



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

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

YARELY BERENICE GARCÍA DOMÍNGUEZ

**T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2015

La presente tesis titulada: ÍNDICES DE SALINIDAD DEL AGUA DE LA RED HIDROGRÁFICA DEL ESTADO DE MORELOS, MÉXICO, realizada por la alumna: YARELY BERENICE GARCÍA DOMÍNGUEZ, 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



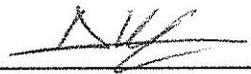
DR. HÉCTOR MANUEL ORTEGA ESCOBAR

ASESOR



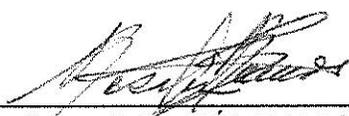
DR. EBANDRO USCANGA MORTERA

ASESORA



DRA. AMADA LAURA REYES ORTIGOZA

ASESORA



DRA. ROSALÍA RAMOS BELLO

ASESOR



M. C. BRANLY OLIVIER SALOMÉ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2015

RESUMEN

ÍNDICES DE SALINIDAD DEL AGUA DE LA RED HIDROLÓGICA DEL ESTADO DE MORELOS, MÉXICO

Yarely Berenice García Domínguez, MC.

Colegio de Postgraduados, 2015

En la actualidad se ha usado prácticamente toda agua disponible para satisfacer los requerimientos de humedad de los diferentes cultivos que activamente se explotan en la agricultura bajo riego. Cada vez más se utilizan hasta el límite las aguas superficiales y subterráneas de la más variada composición química y concentración de sales. Aproximadamente 63 000 hectáreas son irrigadas en el estado de Morelos y debido a que las actividades antropogénicas (agropecuarias, industriales, urbanas) compiten por este recurso, se hace necesario determinar la calidad de estas aguas desde el punto de vista del riego agrícola en puntos distribuidos a lo largo de la Red Hidrográfica del estado. Se hizo una colecta en 79 sitios durante septiembre de 2013. Utilizando los métodos de APHA (1989), se determinaron: potencial de hidrogeno (pH), conductividad eléctrica (CE), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), potasio (K^+), carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-), cloruro (Cl^-) y sulfato (SO_4^{2-}), residuo seco evaporado (RSE), residuo seco calcinado (RSC), RAS original, RAS ajustado (RAS_{aj}) y RAS corregido (RAS^o), Carbonato de Sodio Residual (CSR), Salinidad Efectiva (SE), Salinidad Potencial (SP), Toxicidad del Cloro y Sodio, Dureza (CaCO_3) y Clasificación Hidrogeoquímica. Los valores de pH variaron de 5.60 a 8.00. La conductividad eléctrica de las aguas osciló de 0.057 a 4.021 dS m^{-1} . La concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , fueron de 0.30 a 21.00 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, 0.20 a 24.00 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, 0.00 a 10.30 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, 0.11 a 1.12 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, 0.00 a 0.02 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, 0.28 a 5.42 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, 0.20 a 16.18 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ y 0.33 a 48.93 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, respectivamente. La variación del RAS original fue de 0.00 a 2.46, RAS_{aj} 0.00 a 5.67 y RAS^o 0.00 a 2.88, indicando que son aguas de bajo contenido de sodio. Esta información puede utilizarse junto con datos agronómicos (cultivo, tipo de suelo, clima) para determinar la bondad de la calidad del agua para sus uso particular.

Palabras clave: Sodicidad, Salinidad, Calidad del agua, Riego agrícola y RAS.

ABSTRACT

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

Yarely Berenice García Domínguez, MC

Colegio de Postgraduados, 2015

Currently, practically all the water available to meet the requirements for this vital liquid for different crops being grown under irrigation has been used up. Surface and underground water with the most varied chemical compositions and salt concentrations are being used. Approximately 63 000 hectares are irrigated in the state of Morelos, and because anthropogenic activities (agricultural, industrial, urban) compete for this resource, it is necessary to establish the amount of these waters, from the viewpoint of agricultural irrigation in different points of the state's water network. A collection was carried out in 79 sites in September, 2013. Using the APHA methods (1989), the following were determined: hydrogen potential (pH), electric conductivity (EC), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), carbonate (CO_3^{2-}), bicarbonate (HCO_3^-), chlorine (Cl^-), and sulfate (SO_4^{2-}), dry evaporated residue (DER), dry calcined residue (DCR), original RAS original, adjusted RAS (RAS_{aj}), and corrected RAS (RAS^o), Residual Sodium Carbonate (RSC), Effective Salinity (ES), Potential Salinity (PS), Toxicity of Chlorine and Sodium, Hardness (CaCO_3), and Hydro-geochemical Classification. The pH values ranged between 5.60 and 8.00. Electric conductivity of water varied from 0.057 to 4.021 dS m⁻¹. The concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , were 0.30 to 21.00 mmol_c L⁻¹, 0.20 to 24.00 mmol_c L⁻¹, 0.00 to 10.30 mmol_c L⁻¹, 0.11 to 1.12 mmol_c L⁻¹, 0.00 to 0.02 mmol_c L⁻¹, 0.28 to 5.42 mmol_c L⁻¹, 0.20 to 16.18 mmol_c L⁻¹, 0.33 to 48.93 mmol_c L⁻¹, respectively. Original RAS variation was from 0.00 to 2.46, RAS_{aj} 0.00 to 5.67, and RAS^o 0.00 a 2.88, indicating they are waters low in sodium. This information can be used along with agronomic data (crop, soil type, climate) to determine the adequacy of the water's quality for its use.

Key words: Sodidity, Salinity, Water quality, Agricultural Irrigation, RAS.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para realizar este estudio de Maestría.

Al Dr. Carlos Ramírez Ayala, por la dirección de la investigación, y sobre todo la paciencia y facilidades otorgadas durante el desarrollo de este trabajo.

Al consejo particular: Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar, Dr. Ebandro Uscanga Mortera, Dra. Rosalía Ramos Bello, Amada Laura Reyes Ortigoza y al M. C. Branly Olivier Salomé, por sus exhaustivas revisiones y recomendaciones para mejorar la presentación escrita de esta investigación.

A mi padre Julio García Aguilar, por su confianza y apoyo emocional.

Al M. C. Saúl Flores Valdés, mentor y amigo, por mantener la confianza firme en mí.

A mi hermana Yasmin Marena García Domínguez, por confiar en mí en todo momento.

A una persona que llegó al final de éste camino pero que formó parte fundamental en el desarrollo de éste trabajo, a ti Rodrigo Giovanni Hernández Raya, gracias por el enorme apoyo y amor brindado.

A Don Cruz del laboratorio de Ciencias Ambientales y a la Sra. Amalia Sosa.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. El agua y su distribución	3
2.1.1. Distribución en el planeta	3
2.1.2. Distribución del agua en México	5
2.1.3. Usos del agua en México	10
2.1.4. Uso de agua residual	13
2.1.5. Red hidrográfica en Morelos	14
2.2. Geoquímica de los elementos	15
2.2.1. Carbono	15
2.2.2. Calcio	16
2.2.3. Magnesio	16
2.2.4. Sodio	16
2.2.5. Potasio	17
2.2.6. Cloro	17
2.3. Solubilidad de las sales nocivas para las plantas	18
2.4. Calidad del agua para riego	19
2.4.1. Índice de Carbonato de Sodio Residual (CSR)	20
2.4.2. Índice de Salinidad Efectiva (SE)	22
2.4.3. Índice de Salinidad Potencial (SP)	23
2.4.4. Peligro de salinidad (CE) y sodio (RAS)	25
2.4.5. Calculo del RAS ajustado (RAS_{aj})	29
2.4.6. Calculo del RAS corregido (RAS°)	29
2.4.7. Problemas de infiltración en los suelos agrícolas bajo riego	32
2.4.8. Cloro	35
2.4.9. Sodio	35
2.4.10. Dureza	36
2.4.11. Clasificación hidrogeoquímica	37
3. OBJETIVOS	38
3.1. Objetivo general	38
3.2. Objetivos particulares	38
3.3. HIPOTÉISIS	38

4. MATERIALES Y MÉTODOS	39
4.1 Descripción general de la zona de estudios	39
4.2 Muestreo	41
4.2.1 Muestreo en canales, drenes y ríos	41
4.2.2 Muestreo en presas de almacenamiento	41
4.2.3 Muestro en pozos profundos	41
4.2.4 Muestro en manantiales	42
4.2.5. Determinaciones físico-química	43
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
5.1. Localización geográfica de las estaciones de muestreo	48
5.2. Comprobación de la exactitud de los resultados	57
5.3. Composición y distribución iónica de las aguas	67
5.4. Índice de salinidad	69
5.5. Índice de salinidad efectiva	80
5.6. Índice de salinidad potencial	84
5.7. Clasificación de las aguas en base a la sodicidad	88
5.8. Porcentaje de sodio encontrado	96
5.9. Porcentaje de sodio posible	98
5.10. Carbonato de sodio residual	100
5.11. Clasificación de las aguas con base a su efecto sobre la infiltración	102
5.12. Cloruros	109
5.13. Sodio	111
5.14. Clasificación de las aguas por su dureza	115
5.15. Clasificación hidrogeoquímica	118
6. CONCLUSIONES	123
7. RECOMENDACIONES	125
8. LITERATURA CITADA	126

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1	Distribución hídrica mundial	3
Cuadro 2	Recursos hídricos internos renovables	6
Cuadro 3	Características de los ríos principales de México por vertiente	7
Cuadro 4	Presas con una capacidad mayor de 1 km ³	10
Cuadro 5	Usos del agua en México	11
Cuadro 6	Extracciones de agua por región hidrológico-administrativa	11
Cuadro 7	Clasificación de las aguas para riego con base en el índice de carbonato de sodio residual (CSR)	21
Cuadro 8	Clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de salinidad efectiva (SE)	23
Cuadro 9	Clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de Salinidad Potencial (SP) y algunos parámetros del suelo	24
Cuadro 10	Concentración de calcio (Ca ²⁺) en el agua del suelo, contenida cerca de la superficie del suelo, que resulta de regar con aguas de determinado valor HCO ₃ ⁻ /Ca ²⁺ y CE en dS·m ⁻¹	31
Cuadro 11	Clasificación de las aguas de riego de acuerdo a su contenido de cloruros	35
Cuadro 12	Clasificación de las aguas por su dureza, con base al CaCO ₃	36
Cuadro 13	Determinaciones físico-químicas para aguas	43
Cuadro 14	Localización geográfica de las estaciones de muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos	49
Cuadro 15	Concentración iónica de las aguas del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos	52
Cuadro 16	Porcentaje permisible de diferencia en los resultados analíticos	57
Cuadro 17	Clasificación de las aguas de acuerdo a la salinidad del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, según su CE	71
Cuadro 18	Clasificación de las aguas del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, de acuerdo a la salinidad y grado de restricción para su uso	75

Cuadro 19	Clasificación de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos, con base a su salinidad efectiva	81
Cuadro 20	Clasificación de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a su salinidad potencial	85
Cuadro 21	Clasificación de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos, con base a la sodicidad	90
Cuadro 22	Efecto posible del porcentaje de sodio encontrado de las aguas del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos	97
Cuadro 23	Porcentaje de sodio posible de las aguas del muestreo de la red hidrográfica del Estado de Morelos	99
Cuadro 24	Carbonato de sodio residual de las aguas del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos	101
Cuadro 25	Directriz para interpretar la calidad de las aguas para riego con base a la infiltración	102
Cuadro 26	Clasificación de las aguas con base al efecto sobre la infiltración de la red hidrográfica del estado de Morelos	107
Cuadro 27	Clasificación del contenido de cloruros de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos	110
Cuadro 28	Directriz para interpretar la calidad de las aguas de riego	111
Cuadro 29	Clasificación de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos de acuerdo al contenido de Na ⁺ y su grado de restricción para el riego	113
Cuadro 30	Clasificación de las aguas por su dureza de la red hidrográfica del estado de Morelos	116
Cuadro 31	Clasificación hidrogeoquímica de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Porcentaje y tipo de aguas a nivel mundial y por país (FAO 2008)	5
Figura 2	Extracciones de agua por sector	12
Figura 3	Extracciones de agua por origen	12
Figura 4	Diagrama para la clasificación de las aguas para riego (Richards et al	28
Figura 5	Reducción relativa de la infiltración, provocada por la CE y la RAS (Rhoades 1977; Oster y Schroer 1979)	34
Figura 6	Diagrama triangular para representar resultados de estudios de química del agua	37
Figura 7	Mapa de la ubicación de la red hidrográfica del estado de Morelos	40
Figura 8	Localización geográfica de las estaciones de muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos	51
Figura 9	Relación entre la concentración de cationes y la conductividad eléctrica del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos	59
Figura 10	Relación entre la concentración de aniones y la conductividad eléctrica del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos	60
Figura 11	Relación entre la concentración de sólidos totales y la conductividad eléctrica de la red hidrográfica del estado de Morelos	62
Figura 12	Mapa de distribución de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) de la red hidrográfica del estado de Morelos	65
Figura 13	Mapa de distribución de los sólidos disueltos ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) de la red hidrográfica del estado de Morelos	66
Figura 14	Composición iónica de las aguas del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos	68
Figura 15	Mapa de distribución de la calidad del agua con base a la clasificación, de la red hidrográfica del estado de Morelos	73
Figura 16	Mapa de distribución de la calidad del agua en base a la CE de la red hidrográfica del estado de Morelos	78
Figura 17	Mapa de distribución de la calidad del agua en base a los sólidos disueltos de la red hidrográfica del estado de Morelos	79
Figura 18	Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards et al	93

Figura 19	Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards et al	94
Figura 20	Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards et al	95
Figura 21	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y el RAS original de la red hidrográfica del estado de Morelos	104
Figura 22	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y el RAS ajustado de la red hidrográfica del estado de Morelos	105
Figura 23	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y el RAS corregido de la red hidrográfica del estado de Morelos	106
Figura 24	Mapa de la distribución de la dureza de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos	117
Figura 25	Clasificación hidrogeoquímica de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos	122

1. INTRODUCCIÓN

El agua de la Tierra se encuentra naturalmente en varias formas y lugares: en la atmósfera, en la superficie, bajo tierra y en los océanos. El agua dulce representa sólo el 2.5 % del agua de la Tierra, y se encuentra en su mayoría congelada en glaciares y casquetes glaciares. El resto se presenta principalmente en forma de agua subterránea, y sólo una pequeña fracción se encuentra en la superficie o en la atmósfera (UNESCO, 2006).

En todo el mundo, la actividad humana y los factores naturales están agotando los recursos hídricos disponibles. Aunque en la última década la sociedad se ha concientizado de la necesidad de mejorar la gestión y la protección del agua, los criterios económicos y los factores políticos todavía tienden a dirigir todos los ámbitos de la política del agua. La ciencia y las mejores prácticas a menudo no reciben la atención adecuada.

El estado de Morelos cuenta con abundantes recursos hídricos. La precipitación media anual es de 1 045 mm, superior a la media nacional de 777 mm por año. Dicha precipitación equivale a 5 164 millones de m³ de los cuales 2 374 millones de m³ se transforman en escurrimiento superficial; 1 395 millones se infiltran y alimentan a los acuíferos, y los restantes 1 395 millones de m³ se evaporan. Frente a esta oferta, el consumo en el estado es del orden de los 1 000 millones de m³ anuales. Sin embargo, la distribución del agua es irregular en tiempo y espacio. La mayor precipitación ocurre en la zona Norte, con más de 1 200 mm anuales, y va disminuyendo hacia el Sur, de manera que en los valles de Ticumán y Axochiapan se alcanza una precipitación de 800 mm en promedio (CONABIO y UAEM, 2004).

Conforme al Programa Hidráulico Estatal de Morelos, los cuerpos de agua más importantes en el estado son los lagos de Tequesquitengo y de Coatetelco, y nueve presas de almacenamiento (El Rodeo, Tilzapotla, Plan de Ayala, Chinameca, La Poza, Quilamula, Coahuixtla, Los Carros, Cayehuacan). Todos estos cuerpos sufren variaciones en sus volúmenes durante la época de estiaje. Para el Lago de Tequesquitengo se tiene una disminución de 10 millones de m³, mientras que la Laguna de Coatetelco durante los

últimos 8 años se ha secado completamente en 5 ocasiones. En lo que se refiere a las presas de almacenamiento, sus aguas son utilizadas en su totalidad para riego, por lo que durante el estiaje se vacían casi completamente, quedándoles un volumen de entre el 20 y el 10% de su capacidad total.

Un problema reconocido ampliamente es la escasez de agua con calidad para consumo humano y la competencia que se establece en 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).

La agricultura de regadío depende tanto de la cantidad como de la calidad del agua. No obstante, el aspecto de la calidad ha sido descuidado debido a que en el pasado las fuentes de agua, por lo general, han sido de abundante cantidad, de buena calidad y de fácil utilización. Esta situación, sin embargo, está cambiando en mucho lugares. El uso intensivo de prácticamente todas las aguas de buena calidad, implica que tanto los proyectos nuevos como los antiguos que requieren aguas suplementarias, tienen que recurrir a las aguas de inferior calidad. Para evitar problemas consecuentes, debe existir una planificación efectiva que asegure el mejor uso posible de estas aguas de acuerdo a su calidad.

Desde el punto de vista agrícola, el mayor problema lo constituyen las sales que las aguas llevan en solución, puesto que si estas sales se presentan en concentraciones elevadas, pueden ocasionar problemas de salinidad y sodicidad en el suelo, con el resultante efecto negativo sobre las plantas.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El agua y su distribución

El agua es una sustancia cuya molécula está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O). Es esencial para la supervivencia de todas las formas conocidas de vida. El término agua generalmente se refiere a la sustancia en su estado líquido, aunque la misma puede hallarse en su forma sólida llamada hielo, y en su forma gaseosa denominada vapor.

El agua cubre el 71 % de la superficie de la corteza terrestre. Se localiza principalmente en los océanos, donde se concentra el 96.5 % del agua total, los glaciares y casquetes polares poseen el 1.74 %, los depósitos subterráneos (acuíferos), los permafrost y los glaciares continentales suponen el 1.72 % y el restante 0.04 % se reparte en orden decreciente entre lagos, humedad del suelo, atmósfera, embalses, ríos y seres vivos.

2.1.1. Distribución en el planeta

Se estima que en el mundo existen unos 1 400 millones de km³ de agua, de los cuales 35 millones (2.5 por ciento) son de agua dulce (FAO, 2002).

Cuadro 1. Distribución hídrica mundial.

Distribución de los recursos hídricos mundiales			
	Volumen de agua (millones km³)	Porcentaje de agua dulce	Porcentaje del total del agua
Agua total	1386		100.00
Agua dulce	35	100.0	2.53
Glaciares y capas polares	24.4	69.7	1.76
Agua subterránea	10.5	30	0.76
Lagos, ríos y atmósfera	0.1	0.3	0.01
Agua salina	1351		97.47

Fuente: FAO, 2002.

La gran cantidad de agua dulce de las capas polares, glaciares y acuíferos profundos no es utilizable. El agua dulce que puede ser usada procede esencialmente de la escorrentía

superficial del agua de lluvia, generada en el ciclo hidrológico. El agua se recicla continuamente por la evaporación causada por la energía solar. El ciclo hidrológico consume diariamente más energía que la utilizada en toda la historia de la humanidad.

El promedio anual de precipitación sobre la tierra alcanza 119 000 km³, de los cuales alrededor de 74 000 km³ se evaporan a la atmósfera. Los 45 000 km³ restantes fluyen hacia lagos, embalses y cursos de agua o se infiltran en el suelo alimentando a los acuíferos. Este volumen de agua se denomina convencionalmente «recursos hídricos». No todos estos recursos son utilizables, porque parte del agua fluye hacia ríos remotos y parte durante inundaciones periódicas. Se estima que de 9 000 a 14 000 km³ son económicamente utilizables por el hombre, nada en comparación con la cantidad total de agua de la tierra (FAO, 2002).

Las extracciones anuales de agua para uso humano ascienden a alrededor de 3 600 km³. Parte del caudal de agua superficial debe seguir su curso natural para asegurar la dilución de efluentes y para asegurar la conservación de los ecosistemas acuáticos. El caudal ecológico que debe llevar un río depende de la época del año y de otros factores específicos de cada cuenca hidrográfica. Los caudales mínimos anuales de los ríos se estiman en unos 2 350 km³, aunque es necesario conocer mejor los aspectos ecológicos de los ríos, que son complejos. Si a esta cantidad se suma la que se extrae para uso humano resulta que ya están comprometidos 5 950 km³ de los recursos de agua dulce fácilmente disponibles. Globalmente, las cifras de recursos hídricos muestran que la situación es delicada, teniendo en cuenta las proyecciones demográficas y las demandas de agua. La situación ya es crítica en varios países y regiones, pues tanto la población como los recursos están distribuidos irregularmente. La escasez de agua dulce y la competencia entre los usuarios está aumentando en cada vez mayor número de zonas del mundo (FAO, 2002).

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) en su plataforma AQUASTAT (Sistema de información global sobre el agua, desarrollado por la División de Tierras y Aguas de la FAO), distingue tres tipos de extracciones de agua: agrícolas, municipales (incluyendo la doméstica), e industriales.

A nivel mundial, las proporciones de extracción son aproximadamente 70 % agropecuaria, 11 % municipal y 19 % industriales. Estos números, sin embargo, están fuertemente influenciados por pocos países que tienen una extracción de agua muy alta en comparación con otros países. Calculando las proporciones en cada país y tomando el promedio de estas proporciones globalmente demuestra que, “para un determinado país” estas proporciones son 59, 23 y 18 %, respectivamente (FAO, 2008).

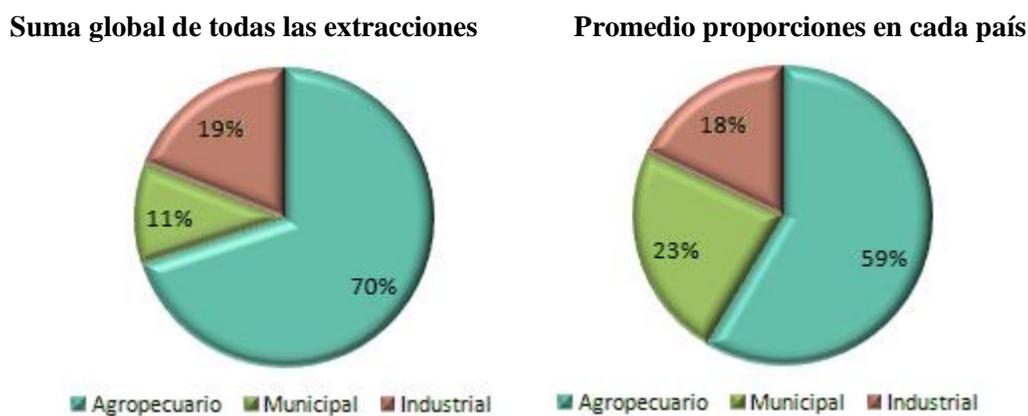


Figura 1. Porcentaje y tipo de aguas a nivel mundial y por país (FAO 2008).

2.1.2. Distribución del agua en México

La precipitación media anual en México es de 758 mm, que suponen un volumen de agua en todo el territorio de 1 489 km³. De este volumen total, cerca del 72.5 % se pierde en evapotranspiración y evaporación directa de las masas de agua y vuelve a la atmósfera; 350 km³ escurre por los ríos o arroyos, y 150 km³ se considera agua subterránea renovable de los cuales 91 km³ se infiltra al subsuelo de forma natural para recargar los acuíferos, haciendo un total de recursos hídricos internos renovables anuales (RHIR) de 409 km³ (Cuadro 2). Estos recursos hídricos se encuentran repartidos de una forma desigual en el territorio mexicano, lo que da lugar a variaciones significativas de las disponibilidades de agua según regiones.

El 50 % del escurrimiento superficial se genera en el Sureste, en tan sólo el 20 % del territorio, mientras que el Norte, que abarca el 30 % del territorio, genera sólo el 4 % de dicho escurrimiento.

Cuadro 2. Recursos hídricos internos renovables.

Recursos hídricos renovables de agua dulce			
Precipitación (media a largo plazo)	-	758	mm/año
	-	1 489 000	millones m ³
Recursos hídricos internos renovables (media a largo plazo)	-	409 000	millones m ⁴
Recursos hídricos internos renovables totales reales	-	461 883	millones m ⁵
Tasa de dependencia		11.5	%
Recursos hídricos renovables totales por habitante	2013	3 776	m ³ /año
Capacidad total de presas	2011	150 000	millones m ³

Fuente: CONAGUA, 2010.

Se han identificado 1 471 cuencas que se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas y a su vez se agrupan en 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA). Los ríos y arroyos del país constituyen una red hidrográfica de 633 000 km de longitud, en la que destacan cincuenta ríos principales por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial del país y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie territorial continental del país.

Por la superficie que abarcan, destacan las cuencas de los ríos Bravo y Balsas, y por su longitud, destacan los ríos Bravo y Grijalva-Usumacinta. Los ríos Lerma (que desemboca en el lago Chapala), Nazas y Aguanaval pertenecen a la vertiente interior. En la Cuadro 3 se presentan los datos más relevantes de los ríos principales del país.

Cuadro 3. Características de los ríos principales de México por vertiente.

Río	RHA	Escunimiento natural medio superficial ^a (millones de &taño)	Área de la cuenca (km ²)	Longitud del río (km)	
Vertiente del Pacífico y Golfo de California					
1	Balsas	IV Balsas	16 587	117 406	770
2	Santiago	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	7 849	76 416	562
3	Verde	V Pacífico Sur	5 937	18 812	342
4	Ometepec	V Pacífico Sur	5 779	6 922	115
5	El Fuerte	III Pacífico Norte	5 176	33 590	540
6	Papagayo	V Pacífico Sur	4 237	7 410	140
7	San Pedro	III Pacífico Norte	3 417	26 480	255
8	Yaqui	II Noroeste	3 163	72 540	410
9	Culiacán	III Pacífico Norte	3 122	15 731	875
10	Suchiate ^b	XI Frontera Sur	2 737	203	75
11	Ameca	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	2 236	12 214	205
12	Sinaloa	III Pacífico Norte	2 100	12 260	400
13	América	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	2 015	9 795	240
14	Coahuayana	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	1 867	7 114	203
15	Colorado ^b	I Península de Baja California	1 863	3 840	160
16	Baluarté	III Pacífico Norte	1 838	5 094	142
17	San Lorenzo	III Pacífico Norte	1 680	8 919	315
18	Acaponeta	III Pacífico Norte	1 438	5 092	233
19	Piactla	III Pacífico Norte	1 415	11 473	220
20	Presidio	III Pacífico Norte	1 250	6 479	NO
21	Mayo	II Noroeste	1 232	15 113	386
22	Tehuantepec	V Pacífico Sur	950	10 090	240
23	Coatán ^b	XI Frontera Sur	751	605	75
24	Tomatlán	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	668	2 118	ND
25	Marabasco	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	648	2 526	ND
26	San Nicolás	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	543	2 330	ND
27	Elota	III Pacífico Norte	506	2 324	ND
28	Sonora	II Noroeste	408	27 740	421
29	Concepción	II Noroeste	123	25 808	335
30	Matape	II Noroeste	90	6 606	205
31	Tijuana ^b	I Península de Baja California	78	3 231	186
32	Sonoyta	II Noroeste	16	7 653	311
33	Gñjalva-Usumacinta ^b	XI Frontera Sur	115 536	83 553	1521
34	Papaloapan	X Golfo Centro	44662	46 517	354
35	Coalzacocalcos	X Golfo Centro	28 093	17 369	325
36	Pánuco	IX Golfo Norte	20 330	84 956	510
37	Tonal	X Golfo Centro	11 389	5 679	82
38	Tecolutla	X Golfo Centro	6 095	7 903	375
39	Bravo ^b	VI	5 588	225 242	ND
40	Jamapa	X Golfo Centro	2 563	4 061	368
41	Nautla	X Golfo Centro	2 217	2 785	124
42	La Antigua	X Golfo Centro	2 139	2 827	139
43	Soto La Marina	IX Golfo Norte	2 086	21 183	416
44	Tuxpan	X Golfo Centro	2 076	5 899	150
45	Candelaria ^b	XII	2 011	13 790	150
46	Cazones	X Golfo Centro	1 712	2 688	145
47	San Fernando	IX Golfo Norte	1 545	17 744	400
48	Hondo ^b	XII Península de Yucatán	533	7 614	115
Vertiente interior					
49	Lerma	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	4 742	47 116	708
50	Nazas-Aguanaval	VII Cuencas Centrales del Norte	1 912	89 239	1081

Fuente: CONAGUA, 2011^a.

El Río Bravo nace en el estado de Colorado y fluye a lo largo de 3 051 km hasta su desembocadura en el Golfo de México. En el tramo situado aguas debajo de Fort Quitman (Texas) registra un flujo reducido hasta su confluencia con el río Conchos, afluente mexicano. En el punto de unión de los dos ríos, el río Conchos aporta un volumen promedio equivalente al 70 % del conducido por el río Bravo en ese punto. Otros afluentes importantes del río Bravo son el río Conejos en Colorado (EUA), los ríos Chama y Jémez en Nuevo México (EUA), los ríos Pecos y Devils en Texas (EUA) y los ríos Salado y San Juan en Tamaulipas. Aportes menores dan los afluentes de los ríos San Diego, San Rodrigo y Escondido y el arroyo de las Vacas en Coahuila (CILA, 2005).

El río Balsas es uno de los ríos más largos del país. La fuente más lejana del río Balsas es el pequeño río Zahuapan, un arroyo del estado de Tlaxcala, que se une al río Altoyac en el estado de Puebla. Ya como Altoyac avanza hacia el suroeste y recibe las aguas del río Axamilpa. Al adentrarse en el estado de Guerrero recibe al río Mixteco y al Nexapa. Al recibir al río Tlapaneco da inicio nominalmente el río Balsas, que es llamado a veces río Mexcala en el estado de Guerrero. En la presa de El Caracol recibe al río San Juan. Sigue hacia el este incorporando nuevos afluentes, como los ríos Yextla y El Aguacate, y recibe al río Cutzamala, justo en la frontera interestatal. A partir de aquí y hasta su desembocadura, el Balsas forma la frontera entre los estados de Guerrero y Michoacán. Al llegar a la larga cola del embalse de la presa del Infiernillo recibe al río Grande y al río Cupatitzio. Tras más de 70 km de tramo embalsado llega a la presa Infiernillo y finalmente desemboca en el océano Pacífico.

La región de los ríos Grijalva y Usumacinta, comprende los estados de Tabasco y Chiapas y pequeñas porciones de Campeche. Es una de las zonas ecológicas con más alta diversidad biológica y cultural del territorio mexicano. El río Grijalva nace en las cumbres de la sierra del Soconusco, Guatemala, para luego fluir entre las montañas chiapanecas. Al llegar a Tabasco, cambia su nombre por el de Mezcalapa. Después de recibir el tributo del Pichucalco o Ixtacomitán, el Mezcalapa recibe al río de la Sierra y adopta nuevamente el nombre de Grijalva. Tras esta larga travesía confluye en Tres Brazos con los dos brazos del Usumacinta, 12 km más abajo pasan junto a Frontera y siete km más adelante desemboca al

Golfo de México. El Alto Usumacinta marca la frontera entre Guatemala y México. Recorre 200 km a partir de la unión del río Salinas y el río de la Pasión, tributarios que le dan origen en el Gran Petén guatemalteco. El Usumacinta se abre paso entre desfiladeros hasta Boca del Cerro, en el estado de Tabasco. Allí comienza el Bajo Usumacinta y recibe al río San Pedro, el más caudaloso de sus afluentes.

En lo que se refiere a las aguas subterráneas, el país está dividido en 653 acuíferos. En el año 2000, se detectaron problemas de sobreexplotación en el 17 % de los acuíferos ubicados principalmente en las regiones noroeste, norte y centro-oeste.

Lagos y Embalses

Los lagos y lagunas naturales del país representan una capacidad de almacenamiento de 14 km³. Los principales lagos de México son: el lago de Chapala con una capacidad de 8.13 km³, el lago de Cuitzeo con 0.92 km³, el lago de Pátzcuaro con 0.55 km³, el lago Catemaco con 0.45 km³, el lago Yuriria con 0.19 km³, el lago Tequesquitengo con 0.16 km³ y el lago Nabor Carrillo con 0.012 km³.

En México, existen más de 4 462 presas y bordos (pequeñas obras de almacenamiento), de las cuales 667 están clasificadas como grandes presas, según la definición de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, por sus siglas en inglés). En 2011, la capacidad de almacenamiento de las presas era aproximadamente de 150 km³ (CONAGUA, 2011a).

Existen 24 presas con una capacidad mayor de 1 km³, 18 presas con una capacidad mayor de 2 km³, diez presas con una capacidad mayor de 3 km³ y tres presas con una capacidad mayor de 10 km³ (Cuadro 4).

Cuadro 4. Presas con una capacidad mayor de 1 km³.

Nombre de la presa	Río	Acabado/ Operativo desde	Altura de la presa (m)	Capacidad del estanque (Km ³)
Dr. Belisario Domínguez	Río Grijalva	1974	147	12.76
Infiemillo	Río Balsas	1963	152	12.50
Netzahualcóyotl	Río Grijalva	1964	138	10.60
Presidente Miguel Alemán	Río Tonto	1955	76	8.12
Solidaridad	Río Santiago	1993	187	5.54
Internacional La Amistad	Río Bravo	1969	87	4.46
Internacional Falcón	Río Bravo	1953	50	3.91
General Vicente Guerrero	Río Soto La Marina	1971	60	3.91
Lázaro Cárdenas	Río Nazas	1946	105	3.34
Adolfo López Mateos	Río Humaya	1964	106	3.07
Álvaro Obregón	Río Yaqui	1952	90	2.99
Plutarco Elías Calles	Río Yaqui	1964	134	2.96
Miguel Hidalgo y Costilla	Río Fuerte	1956	81	2.92
Luis Donaldo Colosio	Río Fuerte	1995	165	2.91
La Boquilla	Río Conchos	1916	80	2.89
José López Portillo	Río San Lorenzo	1983	136	2.80
Miguel de la Madrid	Río Santo Domingo	1988	70	2.60
Leonardo Rodríguez Alcaine		2006	186	2.28
Gustavo Díaz Ordaz	Río Sinaloa	1981	116	1.86
Manuel Moreno Torres	Río Grijalva	1980	261	1.63
Carlos Ramírez Ulloa	Río Balsas	1986	126	1.52
Adolfo Ruiz Cortines	Río Mayo	1955	89	1.11
Ángel Albino Corzo	Río Grijalva	1986	58	1.09
Cuchillo-Solidaridad	Río San Juan	1994	44	1.03
Total				98.81

Fuente: CONAGUA, 2011^a.

2.1.3. Usos del agua en México

En 2011, la extracción hídrica total nacional para usos consuntivos alcanzó los 80.3 km³, destacando el sector agrícola con un consumo de 61.6 km³, equivalente al 77 % del total de las extracciones. El consumo municipal alcanzó los 11.4 km³, o el 14 % del total de las extracciones, la industria alcanzó un consumo de 7.3 km³, o el 9 % del total de las extracciones, de los cuales 4.1 km³ son para enfriamiento de plantas termoeléctricas (Cuadro 5, Cuadro 6 y Figura 2). En el total no se incluyen 164.6 km³ de uso no consuntivo, entre los que destaca el uso hidroeléctrico con 136.1 km³ (CONAGUA, 2011a).

Cuadro 5. Usos del agua en México.

Extracción de agua			
Extracción total de agua	2011	80	millones m ³ /año
- agrícola	2011	61	millones m ³ /año
- municipal	2011	11	millones m ³ /año
- industrial	2011	7280	millones m ³ /año
por habitante	2011	673	m ³ /año
Extracción de agua superficial y agua subterránea	2011	77	millones m ³ /año
% sobre bs recursos hídricos renovables totales reales	2011	17	%
Recursos hídricos no convencionales			
Agua residual municipal producida	2011	7458	millones m ³ /año
Agua residual industrial producida	2010	9700	millones m ³ /año
Agua residual municipal tratada	2011	3081	millones m ³ /año
Agua residual industrial tratada	2010	2000	millones m ³ /año
Uso directo de agua residual municipal tratada	2011	804	millones m ³ /año
Uso directo de agua residual industrial tratada	2010	19	millones m ³ /año
Agua desalinizada producida	2001		
Utilización & acta de drenaje hídrico agrícola			

Fuente: CONAGUA, 2011.

Cuadro 6. Extracciones de agua por región hidrológico-administrativa.

RHA	Extracción total 10⁵m³
I. Península de Baja California	3 400
II. Noroeste	7 700
III. Pacífico Norte	10 400
IV. Balsas	10 700
V. Pacífico Sur	1 400
VI. Río Bravo	9 200
VII. Cuencas Centrales del Norte	3 800
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	14 500
IX. Golfo Norte	4 900
X. Golfo Centro	5 000
XI. Frontera Sur	2 200
XII. Península de Yucatán	2 700
XIII. Aguas del Valle de México	4 700
TOTAL	80 600

Fuente: CONAGUA, 2011.

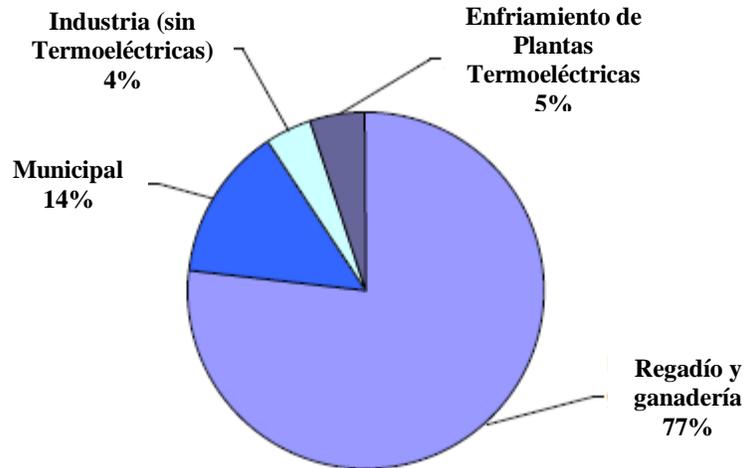


Figura 2. Extracciones de agua por sector.

En 2009, el 60.19 % del agua utilizada en el país para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 37.34 % proviene de fuentes subterráneas (acuíferos). Entre 2001 y 2009, el agua superficial concesionada creció 15 %, en tanto que la subterránea se incrementó en 21 % (CONAGUA, 2011a). Un 0.02 % proviene de agua desalinizada y un 2.44 % de utilización directa de aguas (Figura 3).

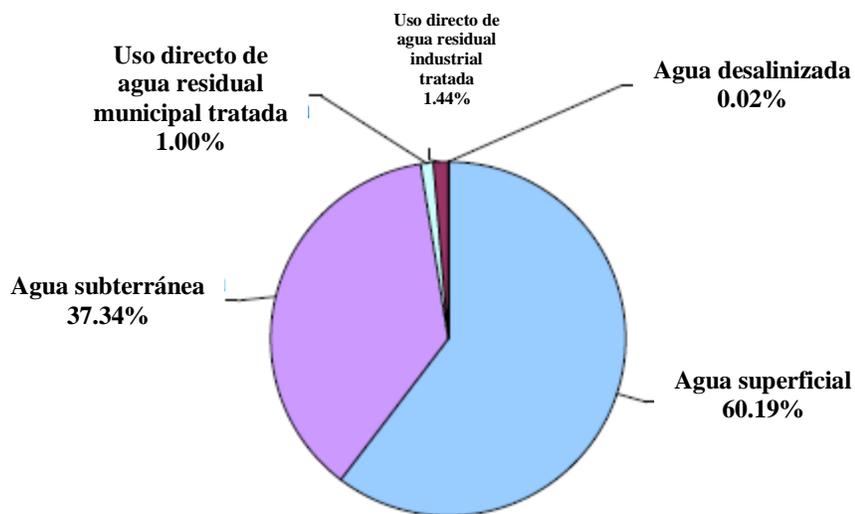


Figura 3. Extracciones de agua por origen

El 34% del agua concesionada para el uso agrícola es de origen subterráneo, lo que representa un incremento del 23% en el periodo del 2001 al 2009. Para el abastecimiento público el tipo de fuente predominante es la subterránea con el 62% del volumen. En cuanto a la industria se refiere, el agua subterránea abarca el 51% de las extracciones (CONAGUA, 2011a).

A nivel nacional la extracción anual de agua representa el 17% de los RHIR. Sin embargo, esta cifra no revela los problemas de escasez y contaminación que afectan a una porción importante de las cuencas y acuíferos nacionales y causan conflictos entre usuarios. En el norte y en el altiplano, en una superficie que ocupa las dos terceras partes del territorio y donde ocurre la tercera parte del escurrimiento medio anual, se asienta el 70% de la población y la actividad industrial, así como la mayor parte de las áreas habilitadas con riego, mientras tanto, en el sur y el sureste, con apenas la tercera parte del territorio y dos terceras partes del agua disponible, la densidad demográfica y la actividad económica son bajas.

2.1.4. 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.

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.

En 2011, en México se produjeron 7.46 km³ de aguas residuales municipales y en 2010 se produjeron 6.70 km³ de aguas residuales no municipales (incluyendo la industria) de las cuales se trataron 3.08 km³ y 2.00 km³ respectivamente. El uso directo de agua residual municipal tratada fue de 0.80 km³. Además, también tiene lugar el uso directo de agua residual no tratada. En el uso directo de agua de origen municipal destaca la transferencia de aguas residuales colectadas en las redes de alcantarillado hacia cultivos agrícolas. En una menor proporción se reutilizan dichas aguas en las industrias, así como en las termoeléctricas, como es el caso de la central termoeléctrica de Villa de Reyes en San Luis Potosí y en servicios municipales. En el uso directo de agua de origen industrial destacan las aguas residuales de los ingenios azucareros en el cultivo de caña en el estado de Veracruz (CONAGUA, 2011a). La producción de agua desalinizada en 2001 se estimó en 19.1 millones de m³.

2.1.5. Red hidrográfica en Morelos

El río Amacuzac se encuentra ubicado en la zona tropical, mostrando una temporalidad muy marcada de lluvias y secas. Cuenta con una superficie hidrológica total de 117 406 km², distribuida en tres subregiones: Alto Balsas 50 409 km², Medio Balsas 31 951 km² y Bajo Balsas 35 046 km². Las subcuencas del Alto y Bajo Amacuzac, están ubicadas en la parte suroeste del estado de Morelos, entre los paralelos 18'22'06" y 18'44'25" latitud Norte y los meridianos 98'44'57" y 99'30'08" longitud Oeste (Contreras-MacBeath *et al.*, 2006).

El río Amacuzac hace un recorrido de 240 km desde su nacimiento en las faldas del Nevado de Toluca hasta su desembocadura en el río Balsas. La cuenca del río genera un volumen por precipitación de aproximadamente 4 216 millones de m³, de los cuales 3 432 representan el escurrimiento susceptible de aprovechamiento. De estos, 880 millones de m³ se usan en los sectores agropecuario, doméstico, comercial e industrial, por lo que se cuenta con una disponibilidad de 2 552 millones de m³ (Contreras-MacBeath *et al.*, 2006).

La superficie de la cuenca Amacuzac comprende, de forma total o parcial, 69 municipios: 31 completos del estado de Morelos; 27 del Estado de México; siete de Guerrero, dos de Puebla y dos delegaciones del Distrito Federal (DF). En su interior se alberga un total de

2,087 localidades de los estados señalados. Tiene una superficie de 8,946 km². Respecto a los municipios es importante señalar que, en el caso del Estado de México, doce de ellos participan en forma parcial y tres de ellos (San Simón, Sultepec, Texcalyacac y Toluca) tienen territorio en ella pero no población; lo mismo ocurre con las dos delegaciones del D. F. y con los municipios de Copalillo, en Guerrero, y Teotlalco, en Puebla. Esta situación se debe a que son los parteaguas de la cuenca y por las condiciones de la zona.

La cuenca del río Amacuzac, 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 de Chichinautzin. En el Sur el parteaguas lo delimitan los municipios de Jolalpa en el estado de Puebla y Huitzucó, Atenango del Río, Taxco de Alarcón y Teticpan en Guerrero. En la parte Oeste. La cuenca la delimitan el parque Nevado de Toluca, Almoloya de Alquisiras y Zacualpan.

2.2. Geoquímica de los elementos

2.2.1. 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 todos los seres vivos. 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 del planeta, los compuestos de carbono forman yacimientos de carbón, petróleo y gas. En la corteza terrestre los compuestos de carbono están distribuidos en forma de carbonatos de calcio que forman parte de las calizas y mármoles. Los carbonatos de calcio, uniéndose con el magnesio forman las dolomitas $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Una

gran cantidad de carbonatos, fundamentalmente CaCO_3 y MgCO_3 están contenidos en las rocas sedimentarias.

2.2.2. Calcio

En la corteza terrestre ocupa aproximadamente el 4%. Las rocas básicas contienen una cantidad importante de este elemento químico, en tanto que las rocas ácidas contienen una cantidad relativamente menor. El Ca^{2+} se encuentra en la composición de las augitas, anfíboles, anortitas, y otras plagioclasas (Kovda *et. al.* 1967; Szabolcs, 1989).

En aguas minerales el Ca^{2+} , es el principal catión. Este elemento está muy ampliamente distribuido en los minerales más comunes de las rocas y el suelo. Los controles químicos en la ocurrencia de Ca^{2+} en agua son quizás más simples que los controles de los elementos más polivalentes, pero son lo suficientemente complejos para proporcionar una amplia serie de problemas para la investigación futura.

2.2.3. Magnesio

El Mg constituye el 2.07 % de la corteza terrestre es magnesio; se encuentra en cantidades relativamente mayores en rocas básicas y ultrabásicas. En el basalto el contenido de Mg^{2+} es cercano a 3.77% y en los piroxenos 10.9%.

En aguas naturales el contenido de Mg^{2+} no suele sobrepasar los 40 mg L^{-1} . En terrenos calcáreos pueden rebasarse los 100 mmol_c L^{-1} y en terrenos evaporíticos pueden llegar a valores de 1000 mmol_c L^{-1} . En general las aguas subterráneas contienen pocas cantidades de magnesio excepto cuando están en contacto con dolomitas o con evaporitas ricas en Mg^{2+} . En algunos suelos el Mg^{2+} 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.

3.2.4. Sodio

El sodio ocupa el séptimo lugar en abundancia entre los elementos de la corteza terrestre; rocas magmáticas alcalinas tienen entre el 15 y 20% de Na^+ y K^+ , en tanto que rocas

basálticas contienen alrededor de 2.31%. El Na^+ se encuentra en la Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_3$), plagioclasas, leicita, nefelino, y en los minerales que contienen cloro como: sodalita.

Cuando el Na^+ se ha puesto en solución, tiende a permanecer en esas condiciones. No hay reacciones de precipitación importante que pueda mantener bajas las concentraciones de sodio en el agua, las concentraciones de C son controladas por la precipitación de los carbonatos de calcio (CaCO_3). Se retiene Na^+ por adsorción sobre superficies minerales, especialmente por los minerales con capacidades de intercambio catiónico alto, tales como las arcillas.

2.4.5. Potasio

El potasio ocupa el 2.27% de la corteza terrestre; se encuentra formando parte, tanto de rocas ácidas, como de rocas básicas. En rocas basálticas, 1.26% de estas está constituido por K^+ .

Una gran cantidad de iones de K^+ 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 K^+ se obtiene de la solubilización de depósitos de evaporitas, en particular de sales tipo silvina (KCl) o carnalita ($\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

En las aguas más diluidas, donde el contenido de sodio está por debajo de 10 mg/L, la concentración de K^+ puede ser la mitad o la décima parte que del sodio. Sin embargo las concentraciones de potasio más de unas pocas decenas de miligramos por litro, son inusuales excepto en agua con muy altas concentraciones de sólidos disueltos o en el agua de manantiales calientes. La concentración más baja de potasio se observa en las aguas naturales.

2.4.6. Cloro

El cloro constituye el 0.10% de la corteza terrestre; una gran cantidad se encuentra en las rocas sedimentarias de origen marino, 0.05% del material de rocas extrusivas es cloro, y en rocas alcalinas el cloro es 0.7% del material que las constituye; pero es importante

mencionar que la mayor cantidad de cloro se encuentra en la hidrósfera, alrededor de 60% de las reservas de este elemento están ahí.

Los minerales del cloro son: Halita (NaCl), silvita (KCl), epsomita $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, carnalita ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), kainita ($\text{KClMgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), y cloruros de magnesio (MgCl_2) y Ca hidratados con hasta doce moléculas de agua en algunos casos.

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.

2.3. Solubilidad de las sales nocivas para las plantas

El tipo de sales a que se hace referencia son: cloruros de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} ; los sulfatos de Na^+ y Mg^{2+} y los bicarbonatos de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} .

En las rocas sedimentarias, capa del intemperismo, y suelos, una gran parte de las sales se encuentra en forma cristalina; durante el humedecimiento una parte de estas sales pasa a la fase líquida. A medida que aumenta la temperatura, la solubilidad aumenta en algunas sales como NaHCO_3 , K_2SO_4 , Na_2SO_4 y Na_2CO_3 .

En cuanto a la precipitación de las sales contenidas en las aguas, estudios han demostrado que en primer lugar se precipitan los hidróxidos de silicio y fierro, después los carbonatos de calcio y de magnesio, enseguida el yeso y los sulfatos de magnesio, y por último cloruros de sodio, potasio y magnesio (Kovda *et. al.* 1967; Szabolcs, 1989).

Al principio los iones de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} , son extraídos en sus orígenes de las mallas cristalinas de los minerales que conforman las rocas. Se puede señalar que la concentración relativa de los iones depende de los procesos específicos que se presentan en las soluciones de las aguas para riego (Ayers y Wescot, 1987).

2.4. Calidad del agua para riego

Según Letey *et al.* (2003), la calidad del agua es definida como “las propiedades químicas, físicas y biológicas que afectan su uso”. De acuerdo con lo anterior, la calidad del agua no puede ser definida hasta que su uso sea especificado.

La calidad del 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).

Desde el punto de vista agrícola, la calidad del agua se refiere al tipo y la cantidad de sales presentes en ella y su efecto sobre el suelo y el desarrollo y crecimiento de los cultivos. El uso de agua salina en la agricultura altera las características químicas de los suelos. Además, una alta concentración de Na^+ y Cl^- puede causar desórdenes nutricionales y toxicidad. Las sales se encuentran en concentraciones variables en todas las aguas y pueden disociarse en iones cuando son puestas en solución (De Pascale y Barbieri, 1995).

Las características más importantes que determinan la calidad del agua para riego son la concentración total de sales solubles, la concentración relativa del Na^+ con respecto a otros cationes, la concentración de Boro u otros elementos que puedan ser tóxicos, y bajo ciertas condiciones, la concentración de HCO_3^- con relación a la de Ca^{2+} más Mg^{2+} . Los principales iones que se evalúan en el agua son Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , CO_3^{2-} y HCO_3^- , (Richards, 1954; Ayers y Wescot, 1985; Rhoades *et al.*, 1992; Glover, 1993; Boman *et al.*, 2002).

Aguas con alto contenido de Ca^{2+} o Mg^{2+} se consideran “duras” y no son recomendables para uso doméstico, sin embargo este tipo de agua se considera buena para riego. De los cationes encontrados en el agua, el Na^+ es el más peligroso. A diferencia de las aguas cálcicas o magnésicas, aquellas altas en Na^+ son consideradas “blandas” y generalmente no son recomendables para irrigación. El ion SO_4^{2-} no provoca en general daños a las plantas, sin embargo, contribuye al incremento de la salinidad en la solución del suelo. En contraste, el cloro tiene un efecto tóxico directo sobre algunas plantas (Glover 1993).

La calidad del agua de riego se determina de varias formas incluyendo el grado de acidez y alcalinidad (pH), conductividad eléctrica (CE), carbonato de sodio residual (CSR) y relación de adsorción de sodio (RAS) (Richards, 1954; Ayers y Westcot, 1985; Glover, 1993). En la agricultura, el uso de agua salina afecta más en la etapa de germinación que en el desarrollo de las plantas, por lo cual no se recomienda mezclar aguas salinas con aguas dulces, en todo caso es mejor una aplicación secuencial de agua dulce durante las etapas sensibles y de agua salina durante las etapas tardías (Hamdy *et al.*, 1993). El potencial de reutilización de las aguas salinas depende de la calidad del agua, tipo de suelo, cultivos y condiciones agro-climáticas (Sharma y Rao, 1988). Para Sharma y Minhas (2005), el manejo del agua salina comprende todos aquellos métodos, sistemas y técnicas de conservación del agua, remediación, desarrollo, aplicación, uso y remoción, que promuevan un nivel de uso social y ambientalmente favorable al menor costo posible.

2.4.1. Índice de Carbonato de Sodio Residual (CSR)

Por lo general, las aguas para riego ricas en iones HCO_3^- son las que provienen de acuíferos formados por basaltos, las provenientes de zonas urbano-industriales, y aguas subterráneas en las que se tienen procesos reductores de mucha intensidad (Antipov-Karataev, 1967). En estas aguas existe la tendencia de los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} a precipitarse en forma de HCO_3^{2-} a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada. Las reacciones de precipitación de los iones de Ca^{2+} y de Mg^{2+} no se completan en circunstancias ordinarias, pero a medida que, las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} se van reduciendo la proporción relativa de iones de Na^+ se va incrementando.

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

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

En estas relaciones, los constituyentes iónicos se expresan en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$. El cálculo de los valores de estas ecuaciones incluye la presuposición de que los iones CO_3^{2-} y HCO_3^- son cuantitativamente precipitados en el suelo hasta el límite de las concentraciones presentes de Ca^{2+} y Mg^{2+} en las aguas de riego.

Con base en estos índices, se puede concluir que las aguas con más de $2.5 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ de CSR no son buenas para el riego; aguas que contienen de 1.25 a $2.5 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ son dudosas; y aguas para riego que contienen menos de $1.25 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$, con toda seguridad son buenas (Cuadro 7).

Cuadro 7. Clasificación de las aguas para riego con base en el índice de carbonato de sodio residual (CSR).

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

Fuente: Richards *et al.*, 1959.

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

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

2.4.2. Índice de Salinidad Efectiva (SE)

Este índice, propuesto por Doneen en 1959, es útil para estimar el peligro que pueden producir las sales más solubles del agua para riego al formar parte de la solución del suelo; esto puede entenderse mejor si se toma en cuenta que al ser sustraídos los CaCO_3 , CaMg_3 y CaSO_4 , cuando estos se precipitan en el momento en que el agua de riego pasa a formar parte de la solución del suelo y dejan de participar en el ascenso de la presión osmótica de la solución del suelo; pero es entonces cuando aumenta la concentración relativa de otras sales en la solución del suelo, sales que pueden causar problemas para los cultivos por cambios físico-químicos en el suelo.

El cálculo de este índice está condicionado a lo siguiente:

- i. Si $\text{Ca}^{2+} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$:
$$\text{SE} = (\text{suma de cationes}) - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$$
- ii. Si $\text{Ca}^{2+} < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$: pero $\text{Ca} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$:
$$\text{SE} = (\text{suma de cationes}) - \text{Ca}^{2+}$$
- iii. Si $\text{Ca}^{2+} < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$; pero $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$:
$$\text{SE} = (\text{suma de cationes}) - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$$
- iv. Si $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$:
$$\text{SE} = (\text{suma de cationes}) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

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

En el siguiente cuadro se presenta la clasificación de las aguas para riego de acuerdo con este índice.

Cuadro 8. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de salinidad efectiva (SE).

Clase	CSR
	mmolc L ⁻¹
Buena	<3
Condicionada	3-15
No recomendable	>15

Fuente: Doneen, 1958.

2.4.3. Índice de Salinidad Potencial (SP)

Este índice fue propuesto por Doneen en 1961, el objetivo de este índice es evaluar el efecto de las sales solubles de Cl⁻, Na²⁺ y MgSO₄ cuando la humedad baja del 50% de la Humedad Aprovechable Residual (HAR) y una alta concentración de estas sales en las aguas para riego puede causar daño a los cultivos, ya que esto da lugar a un incremento de la presión osmótica de la solución del suelo.

La expresión matemática utilizada para determinar la salinidad potencial es:

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

En esta expresión los iones se expresan en mmolc L⁻¹.

Cuadro 9. Clasificación de las aguas para riego de acuerdo al índice de Salinidad Potencial (SP) y algunos parámetros del suelo.

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

2.4.4. Peligro de salinidad (CE) y sodio (RAS)

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

- Aguas de baja salinidad (C1): $0 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} < \text{CE} < 250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, pueden usarse para riego en casi todos los cultivos y en casi todos los tipos de suelo, la salinización de los suelos es mínima. Pueden ser necesarios lavados de suelo después de practicar el riego durante mucho tiempo, pero eso solo si la permeabilidad de los terrenos es baja y los cultivos se ven afectados por la salinidad.
- Aguas de salinidad media (C2): $250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} < \text{CE} < 750 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, pueden usarse siempre y cuando tengan un grado moderado de lavado de suelos. En casi todos los casos, y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, estas aguas pueden usarse en la producción de plantas moderadamente tolerantes a las sales.
- Aguas altamente salinas (C3): $750 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} < \text{CE} < 2250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, no es conveniente usarlas para riego en suelos cuyo drenaje sea deficiente, y aun con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales para el control de la salinidad, además de que es necesario que las plantas a regar con estas aguas sean muy tolerantes a la salinidad.
- Aguas muy altamente salinas (C4): $\text{CE} > 2250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, no son apropiadas para riego bajo condiciones ordinarias, pero pueden usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado, debiendo aplicarse un exceso de agua para lograr un buen lavado, también es muy importante que los cultivos a regar con estas aguas sean altamente tolerantes a las sales.

Las aguas cuya $CE \leq 750 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ son satisfactorias en cuanto a concentración de sales, aun cuando los cultivos sensibles pueden ser afectados de manera adversa cuando se usan aguas que presenten $250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} < CE \leq 750 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Las aguas con $750 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} < CE \leq 2250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ son comúnmente utilizadas, obteniéndose un buen crecimiento de las plantas, siempre y cuando se haga un buen manejo del suelo y se cuente con drenaje eficiente (Richards, 1973; Oster y Rhoades, 1986).

El empleo de aguas con $CE > 2250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ es una excepción, y en escasas ocasiones se obtienen buenos resultados en las cosechas de los cultivos irrigados con este tipo de aguas.

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

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

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

Donde:

RAS = Relación de Adsorción de Sodio

Na = concentración de los iones de sodio expresada en mmolc L^{-1}

Ca = concentración de los iones de calcio expresada en mmolc L^{-1}

Mg = concentración de los iones de magnesio expresada en mmolc L^{-1}

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

- Aguas bajas en sodio (S1): $0 < \text{RAS} < 10$, son aguas que pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos y dar como resultado pocas probabilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Pero cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de Na^+ .
- Aguas medias en sodio (S2): $10 < \text{RAS} < 18$, estas aguas solo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.
- Aguas altas en sodio (S3): $18 < \text{RAS} < 26$, pueden provocar niveles altos de sodio intercambiable casi en todos los tipos de suelo, por tal razón será necesario prácticas especiales de manejo, buen drenaje, facilidad de lavado del suelo e incorporaciones adicionales de materia orgánica. El riego con estas aguas, sobre suelos con alto contenido de yeso, difícilmente dará lugar al desarrollo de niveles perjudiciales de sodio intercambiable.
- Aguas muy altas en sodio (S4): $\text{RAS} > 26$, esta agua es inadecuada para el riego de cultivos agrícolas, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del Ca^{+2} de los suelos y la aplicación de $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ u otros mejoradores en combinación con el uso de este tipo de aguas permite que aun siga siendo rentable el cultivo que se esté manejando.

La clasificación considera el efecto del RAS y la CE en la cual se utiliza el diagrama de la Figura 4, citada en Richards *et al.*, (1959).

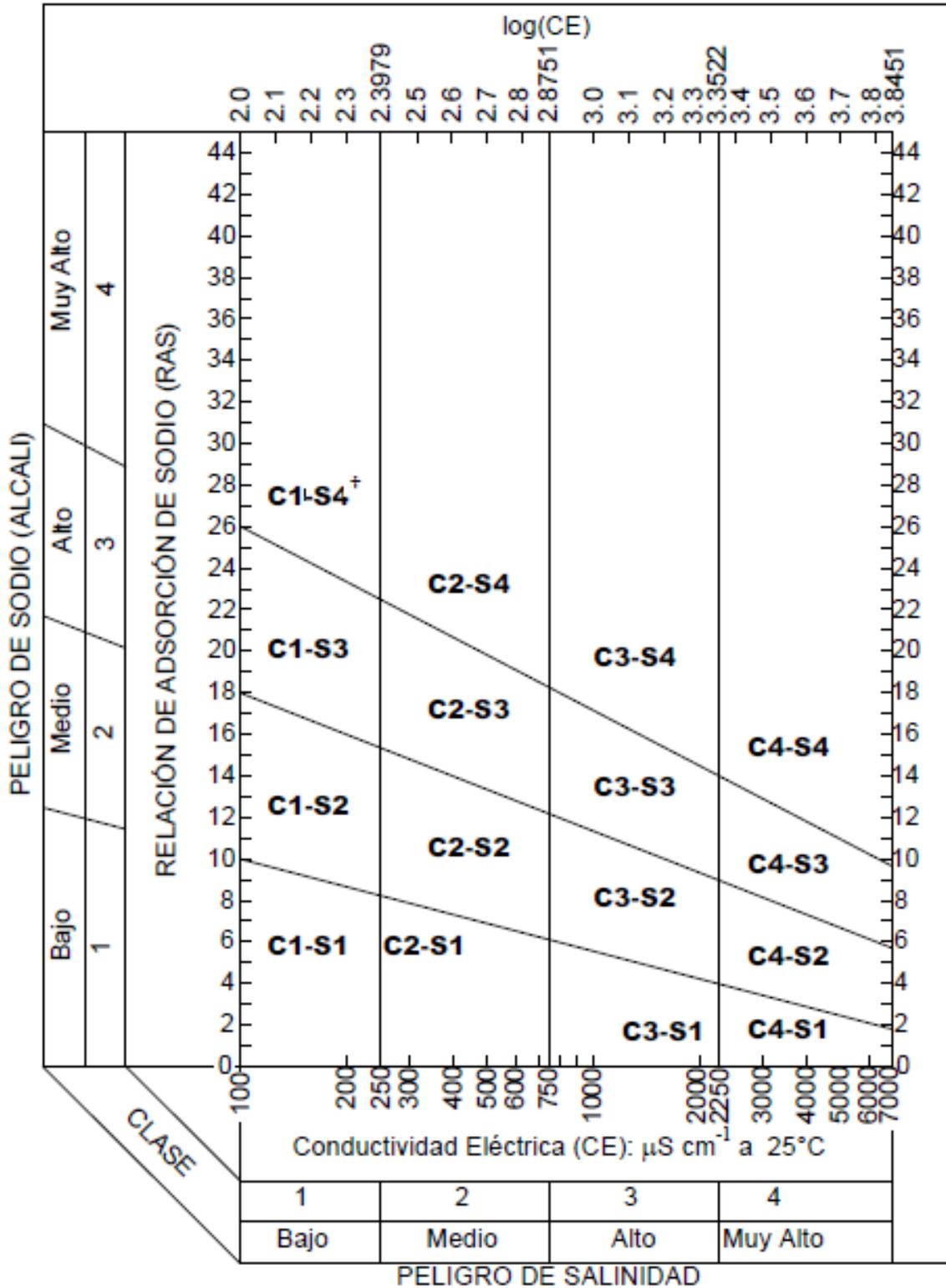


Figura 4. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego (Richards *et al.*, 1959).

2.4.5. Calculo del RAS ajustado (RAS_{aj})

El RAS_{aj} es aquel que considera variaciones en la composición de aguas de riego, en lo que concierne a la cuantificación de efectos de precipitación o disolución del $CaCO_3$.

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

Para estimar la precipitación del carbonato de calcio ($CaCO_3$) cuando alcanza su límite de saturación en presencia de iones HCO_3^- , 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:

pk₂ = 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 = Logaritmo negativo de la concentración molar de Calcio.

P(Alk) = Logaritmo negativo de la concentración equivalente de CO_3^{2-} y HCO_3^-

2.4.6. Calculo del RAS corregido (RAS°)

El procedimiento de ajuste del RAS propuesto sobreestima el peligro de sodificación (Suárez 1981). 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.

Surge de la aplicación de la siguiente expresión:

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

Dónde:

Na⁺ = Concentración de sodio en mmolc L⁻¹ en el agua de riego

Ca[°] = Concentración corregida de Calcio en mmolc L⁻¹

Mg²⁺ = Concentración de Magnesio en el agua de riego expresada en mmolc L⁻¹

La concentración de Ca[°] se obtiene a partir del Cuadro 10 publicado por Ayers y Wescot en (1987). Se entra en el cuadro una vez determinada la relación HCO₃⁻/Ca²⁺ y la CE en dS m⁻¹ del análisis de agua.

Cuadro 10. Concentración de calcio (Ca^{2+}) 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 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

		SALINIDAD DEL AGUA APLICADA EN CEa dS m^{-1}											
		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2	3	4	6	8
0.05		13.2	13.61	13.92	14.4	14.79	15.26	15.91	16.43	17.28	17.97	19.07	19.94
0.1		8.31	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	7.9	8.31	8.64	9.17	9.54
0.2		5.24	5.4	5.52	5.71	5.87	6.06	6.31	6.52	6.86	7.13	7.57	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
0.3		4	4.12	4.21	4.36	4.48	4.62	4.82	4.98	5.24	5.44	5.77	6.04
0.35		4.61	3.72	3.8	3.94	4.04	4.17	4.35	4.49	4.72	4.91	5.21	5.45
0.4		3.3	3.4	3.48	3.6	3.7	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	3.8	4	4.15	4.41	4.61
0.5		2.84	2.93	3	3.1	3.19	3.29	3.43	3.54	3.72	3.87	4.11	4.3
0.75		2.17	2.24	2.29	2.37	2.43	2.51	2.62	2.7	2.84	2.95	3.14	3.28
1		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	Valores de $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$	1.54	1.59	1.63	1.68	1.73	1.78	1.86	1.92	2.02	2.1	2.23	2.33
1.5		1.37	1.41	1.44	1.49	1.53	1.58	1.65	1.7	1.79	1.86	1.97	2.07
1.75		1.23	1.27	1.3	1.35	1.38	1.43	1.49	1.54	1.62	1.68	1.78	1.86
2		1.13	1.16	1.19	1.23	1.26	1.31	1.36	1.4	1.48	1.54	1.63	1.7
2.25		1.04	1.08	1.1	1.14	1.17	1.21	1.26	1.3	1.37	1.42	1.51	1.58
2.5		0.97	1	1.02	1.06	1.09	1.12	1.17	1.21	1.27	1.32	1.4	1.47
3		0.85	0.89	0.91	0.94	0.96	1	1.04	1.07	1.13	1.17	1.24	1.3
3.5		0.78	0.8	0.82	0.85	0.87	0.9	0.94	0.97	1.02	1.06	1.12	1.17
4		0.71	0.73	0.75	0.78	0.8	0.82	0.86	0.88	0.93	0.97	1.03	1.07
4.5		0.66	0.68	0.69	0.72	0.74	0.76	0.79	0.82	0.86	0.9	0.95	0.99
5		0.61	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.74	0.76	0.8	0.83	0.88	0.93
7		0.49	0.5	0.52	0.53	0.55	0.57	0.59	0.61	0.64	0.67	0.71	0.74
10		0.39	0.4	0.41	0.42	0.43	0.45	0.47	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58
20		0.24	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.3	0.32	0.33	0.35	0.37
30		0.18	0.19	0.2	0.2	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.

Ca° $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ expresados en mmolc L^{-1} y CEa en dS cm^{-1} .

2.4.7. Problemas de infiltración en los suelos agrícolas bajo riego

Este tipo de problemas existe cuando la infiltración del agua en el suelo es muy lenta, y como consecuencia de esto no se humedece el suelo lo suficiente en toda la zona de raíces de los cultivos; ya que antes de que esto último ocurra, el agua se escurre y/o se evapora.

Esta disminución de la velocidad de infiltración del agua en el suelo se debe a modificaciones del medio poroso de los suelos, lo que está directamente relacionado con la magnitud de la concentración de sodio intercambiable, es decir, se debe a los altos contenidos de iones de Na^+ intercambiable en las soluciones de los suelos y de las aguas de riego.

Se ha establecido que cuando los iones de Ca^{2+} se encuentran adsorbidos en cantidad suficiente en los suelos, los suelos tienen condiciones favorables para el desarrollo de los cultivos agrícolas (Peterson, 1947). Por otro lado, cuando los iones de Na^+ intercambiable se encuentran adsorbidos en exceso en los suelos, los suelos presentan dispersión coloidal y mayor viscosidad, y en estas condiciones los suelos poseen baja o muy baja velocidad de infiltración del agua.

La dispersión de los suelos y la pérdida de permeabilidad o modificaciones de la geometría del medio poroso se producen únicamente cuando la concentración de Na^+ sobrepasa la concentración de Ca^{2+} en una proporción por encima de 3:1 (Ortega, 1993).

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

Es posible que la solución del suelo se reconcentre por la extracción de agua de las plantas; o bien se diluya por los efectos del riego o por la lixiviación del ion Na^+ fuera de la zona radical. En lo que se refiere a los iones de Ca^{2+} , estos no se mantienen completamente en solución o en cantidades constantes, sino que su concentración cambia de manera continúa

hasta alcanzar un equilibrio. Estas variaciones en su concentración se deben a la disolución de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y CaCO_3 , aumentando con esto las concentraciones de Ca^{2+} en las soluciones del suelo. La precipitación de los iones de Ca^{2+} , que generalmente ocurren en forma de CaCO_3 , influye directamente en los valores relativos de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), ya que la concentración relativa del ion Na^+ en las soluciones del suelo se ve aumentada debido a que se precipita parcialmente una fracción de calcio en forma de carbonato de calcio (Bower y Goertzen, 1958; Wilcox et. al., 1954).

La disolución del Ca^{2+} se promueve por la dilución de la solución o por el CO_2 disuelto en el agua del suelo, mientras que su precipitación ocurre debido a la presencia de suficiente Ca^{2+} conjuntamente con CO_3^{2-} , HCO_3^- y SO_4^{2-} en cantidades suficientes como para exceder la solubilidad de CaCO_3 o la solubilidad del CaSO_4 . Por tal motivo, la calidad de las aguas depende de los procesos de solubilización de los iones de Ca^{2+} y de la precipitación de los mismos en presencia de iones CO_3^{2-} y HCO_3^- . En consecuencia, el índice de RAS adquiere gran importancia para la evaluación de la calidad agronómica de las aguas superficiales y subterráneas para riego (Rhoades, 1968; Richards, 1973; Ayers y Wescot, 1987).

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

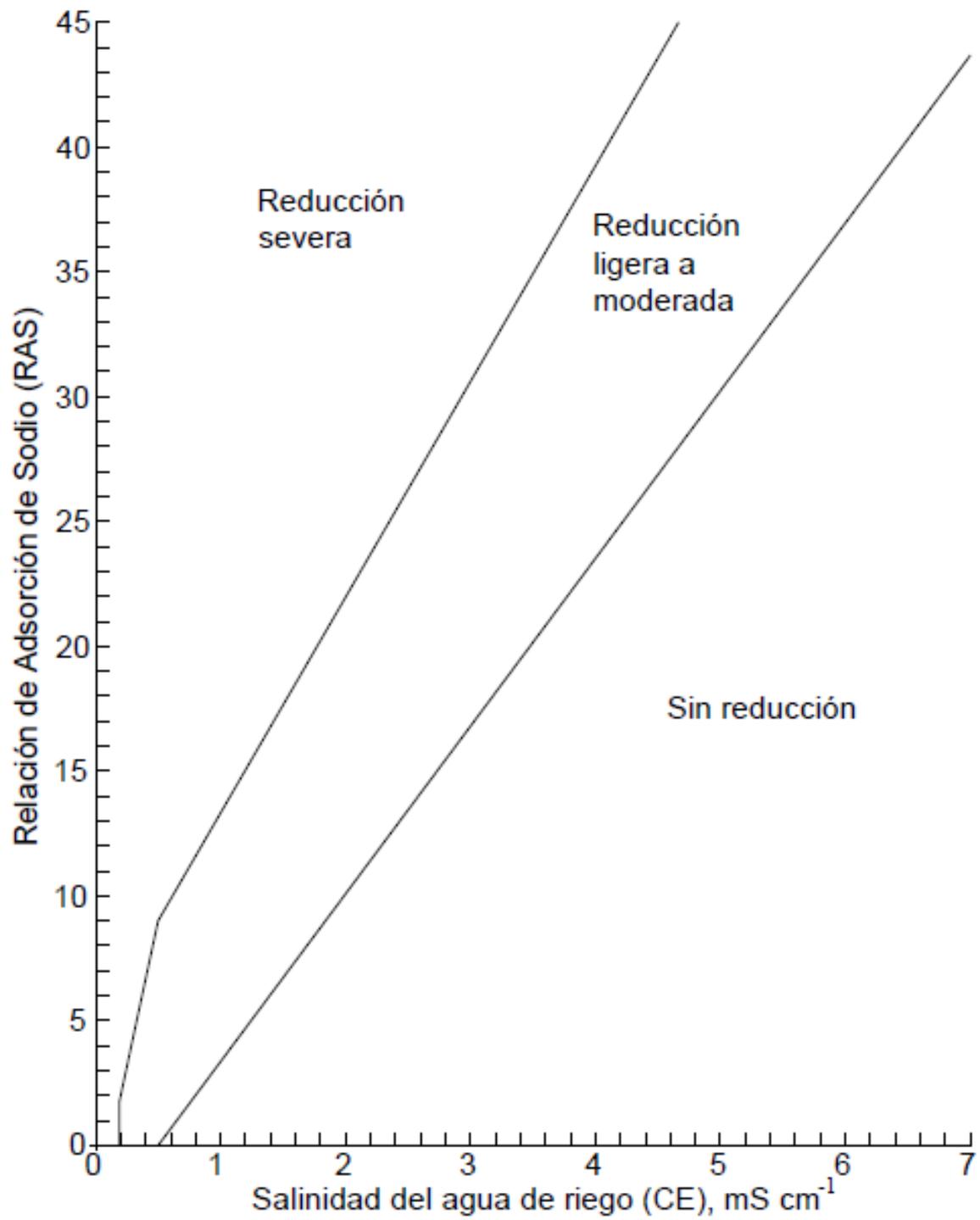


Figura 5. Reducción relativa de la infiltración, provocada por la CE y la RAS (Rhoades 1977; Oster y Schroer 1979).

2.4.8. Cloro

El Cl^- no es adsorbido por el complejo de cambio, pero se encuentra disuelto en la solución del suelo; puede ser absorbido por las raíces y conducido a las hojas, donde se puede acumular hasta niveles perjudiciales. Estos son generalmente de 0.3 a 0.5% respecto a la hoja en peso seco. La acumulación del ión cloruro en los tejidos de plantas que manifiestan síntomas de toxicidad, no es una indicación infalible de la toxicidad específica del cloruro. Para clasificar el agua por el contenido de cloruros, se utiliza el Cuadro 11.

Cuadro 11. Clasificación de las aguas de riego de acuerdo a su contenido de cloruros.

Clase	Contenidos de Cloruros en mmolc L^{-1}
Buena	<1
Condicionada	1.00 - 5.00
No recomendable	>5.00

Fuente: Coras, 1996.

2.4.9. Sodio

Las plantas absorben Na^+ del suelo junto con el agua. A medida que el agua es transpirada el Na^+ se va concentrando en las hojas y cuando alcanza ciertas concentraciones produce efectos tóxicos. El límite de tolerancia de cada cultivo es distinto, pero para muchas especies arbóreas la toxicidad se presenta cuando el Na^+ presenta un porcentaje superior al 0.25-0.5% respecto al peso seco de la hoja. El efecto tóxico del Na^+ no depende de la concentración absoluta de este catión en el suelo, sino de su proporción respecto al Ca^{2+} . Por tal razón la tolerancia de cultivos se relaciona con el PSI del suelo.

Su toxicidad no es fácilmente diagnosticada como el Cl^- , pero se han reportado casos usando aguas con alta concentración de Na^+ . Los síntomas típicos de toxicidad del Na^+ aparecen en forma de quemaduras o necrosis a lo largo de los bordes de las hojas.

2.4.10. 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 Ca^{2+} y Mg^{2+} combinados principalmente con CO_3^{2-} y HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- y otros aniones de ácidos minerales (Wetzel, 1981).

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

En el Cuadro 12 se presenta la clasificación de las aguas respecto a su dureza como carbonato de calcio (CaCO_3) en mmolc L^{-1} .

Cuadro 12. Clasificación de las aguas por su dureza, con base al CaCO_3 .

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

Fuente: Keith, 1967

2.4.11. Clasificación hidrogeoquímica

El contenido de iones en el agua superficial y subterránea está en función de las rocas que predominan en la fuente de agua, el clima que predomina en la zona, la naturaleza del suelo sobre la que fluye y la contaminación antropogénicas.

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).

El diagrama de Piper o diagrama triangular (Figura 6), es el más utilizado para poder clasificar las aguas de acuerdo a características comunes, en este caso de acuerdo al catión y anión predominante (Pérez *et al.*, 2003).

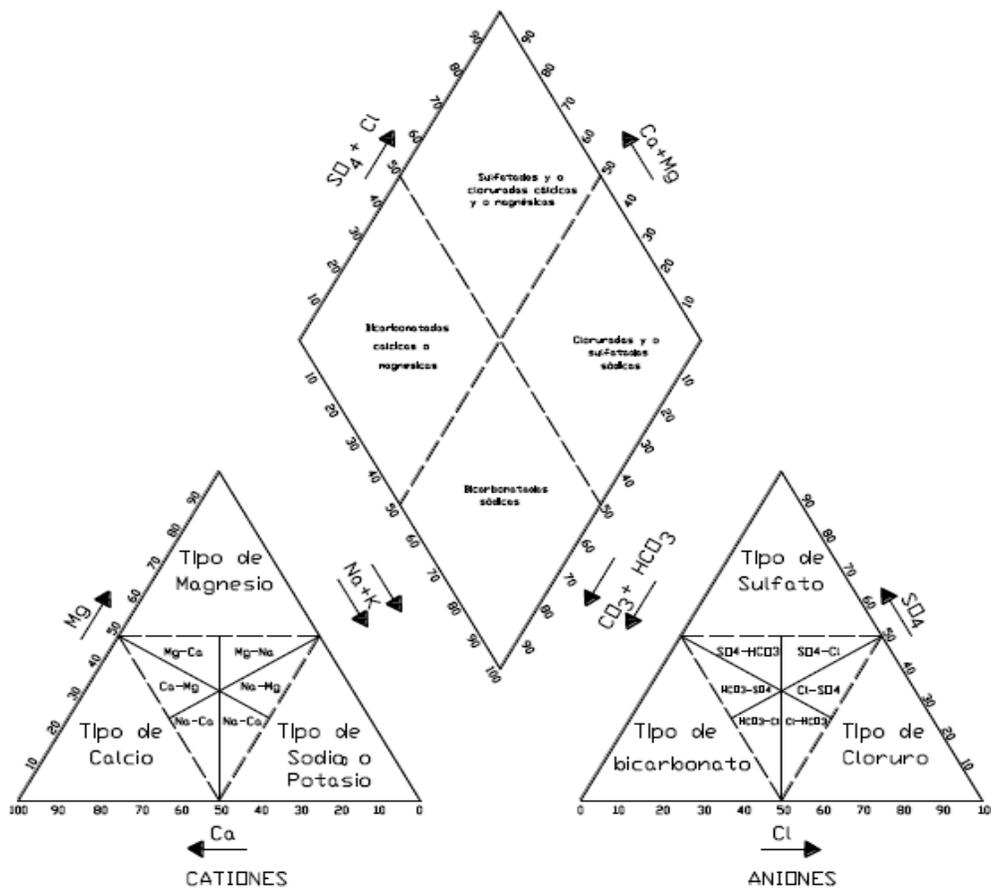


Figura 6. Diagrama triangular para representar resultados de estudios de química del agua.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Determinar los índices de calidad del agua de riego de la red hidrográfica del estado de Morelos en 79 estaciones de muestreo.

3.2. Objetivos particulares

- Determinar las concentraciones de los diferentes iones en las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos (ríos Amacuzac, Yautepec, Cuautla, Apatlaco, Tembembe).
- Determinar los parámetros físico-químicos de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos (ríos Amacuzac, Yautepec, Cuautla, Apatlaco, Tembembe), así como de sus afluentes. Temperatura (T), Potencial de Hidrogeno (pH), conductividad eléctrica (CE), residuo seco evaporado (RSE), residuo seco calcinado (RSC), Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} .
- Obtener el índice de salinidad potencial (SP) índice de salinidad efectiva (SE), % de sodio posible, carbonato de sodio residual (CSR), Toxicidad de Cloro y Sodio.
- Determinar el valor de la Relación de adsorción de Sodio ($\text{RAS}_{\text{original}}$, $\text{RAS}^{\circ}_{\text{corregido}}$, $\text{RAS}_{\text{ajustado}}$) y Dureza (CaCO_3)
- Determinar la Clasificación Hidrogeoquímica

3.3. HIPOTÉISIS

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

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción general de la zona de estudios

La superficie del estado de Morelos es de 4 958.2 km representando el 0.2 % de la superficie del país formando parte de la región central. Se encuentra localizado entre los paralelos 19°22'06'' y 19°07'10'' latitud Norte y los meridianos 98°38'14'' y 99°30'08'' longitud Oeste (Toledo, 2003).

El clima que predomina es el cálido subhúmedo Aw, principalmente en las zonas bajas del río Amacuzac (García 1988), con dos subtipos climáticos: Awo" (w)(i)'g y Awo" (w)(e)g (SPP, 1981).

El estado de Morelos queda comprendida dentro de la región hidrológica número 18 (río Balsas), con una superficie de 4,958 km², dividida en dos cuencas, la del río Amacuzac que abarca casi el 90% de su territorio y el resto comprende a la cuenca del río Nexapa, al Oriente del estado, la cual cuenta con 2,838 millones de m³ de escurrimiento anual. Sin embargo, aproximadamente el 75% de dicho volumen escurre libremente hacia los estados vecinos de Guerrero y Puebla. Por lo que respecta a las aguas subterráneas, la disponibilidad en los valles de Cuernavaca, Cuautla-Yautepec y Zacatepec, asciende a 37 millones de m³ anuales.

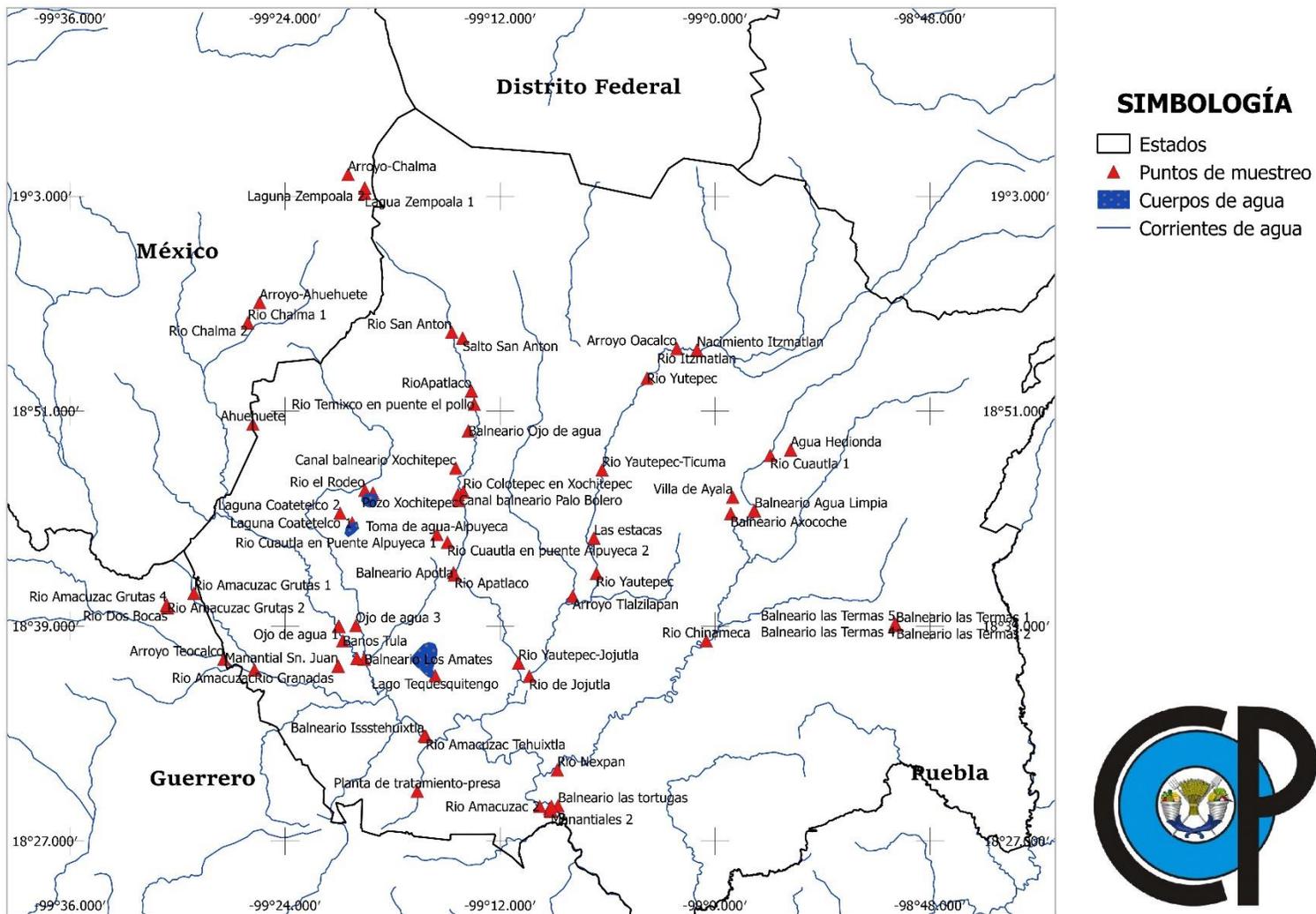


Figura 7. Mapa de la ubicación de la red hidrográfica del estado de Morelos.

4.2 Muestreo

La toma de muestras de agua es una operación que requiere especial atención. Lo más importante es tratar que la muestra sea homogénea y representativa, y por sobre todo que en la extracción no se modifiquen las propiedades del agua a analizar.

El análisis físico químico se requiere como mínimo 1 L de agua, la cual se debe almacenar en recipientes que 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 deben considerar criterios específicos.

4.2.1 Muestreo en canales, drenes y ríos

Las muestras se tomaron en el agua en movimiento en unos centímetros debajo de la superficie. La frecuencia tuvo que ver con las oscilaciones del caudal en las diferentes estaciones del año; por ejemplo, en épocas de lluvias se deben tomar las muestras mientras dure la misma, para observar el cambio en las concentraciones.

4.2.2 Muestreo en presas de almacenamiento

Las condiciones que se distinguieron son, si se deriva la presa 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.

4.2.3 Muestro 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 el reabastecimiento del acuífero, entonces va a 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.

4.2.4 Muestro 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 para 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 muestras por 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 tomada, nombre y localización del sitio. Se tomaron un total de 158 muestras (dos muestras por punto), en pozos, presas, lagos, ríos, arroyos, manantiales y drenes.

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

Cuadro 13. Determinaciones físico-químicas para aguas.

PARÁMETRO(S)	MÉTODO	REFERENCIA
pH	Potenciómetro	NOM-AA-081980
Conductividad eléctrica	Conductímetro	NOM-AA-93-1984
Residuo seco evaporado	Gravimetría	NOM-AA-34-1981 Procedimiento B
Residuos seco calcinado	Gravimetría	NOM-AA—34-1981
Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻	Volumétrico (titulación)	APHA, 1995
Na ⁺ , k ⁺	Volumétrico (titulación)	APHA, 1995 3500-Na ⁺ y K ⁺
SO ₄ ²⁻	Espectrofotometría	APHA, 1995 4500-SO ₄ ²⁻ E

4.2.5. Determinaciones físico-químicas

pH

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

Conductividad eléctrica

La capacidad de conducir la corriente de una solución es proporcional a la concentración de iones en dicha solución. La conductividad eléctrica expresa la concentración total de sales solubles contenidas en las aguas de riego. La medida la conductividad eléctrica se realiza mediante un conductímetro provisto de célula de conductividad apropiada. La conductividad eléctrica se puede expresar en diferentes unidades.

(Siemens cm⁻¹, mhos cm⁻¹) y sus equivalencias son las siguientes:

$$1 \text{ dS m}^{-1} = 1 \text{ milimhos cm}^{-1} = 1000 \text{ } \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$$

Residuo seco evaporado

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

Para determinar los Residuos Secos Evaporados (Sólidos Totales Disueltos) se agregaron 25 mL de alícuota en capsulas de porcelana previamente pesadas con una balanza digital, la capsula con la alícuota se colocó en la plancha precalentada a 105 °C, con una cama de sal de cuarzo, hasta quedar completamente secos, enseguida se pesaron, la diferencia de peso inicial y final representa el contenido de sólidos totales o residuo total.

$$\text{STD (ppm)} = \frac{(\text{peso capsula con residuo} - \text{peso capsula}) * 1 \times 10^6}{25}$$

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 dejaron enfriar y se pesaron. Por medio de la formula anterior se obtiene su valor.

Carbonatos y Bicarbonatos

Para la determinación de CO_3^{2-} y HCO_3^- 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 los CO_3^{2+} con fenolftaleína al 0.25%, para la determinación de bicarbonatos se usó al indicador anaranjado de metilo al 0.1%. Para determinar CO_3^{2+} 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 indicó la presencia de CO_3^{2+} , se tituló agregando ácido sulfúrico hasta que el color desapareció.

En la misma muestra se determinó la concentración de HCO_3^- 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

El ion Cl^- es uno de los iones más difundidos en las aguas naturales. No suele ser un ion que plantee problemas de potabilidad a las aguas de consumo, aunque sí que es un indicador de contaminación de las aguas debido a la acción del hombre. Esto es así porque, aunque la concentración de cloruros en aguas naturales es muy variable pues depende de las características de los terrenos que atraviesan, dicha concentración es menor comparada con la concentración del ion en aguas residuales ya que la actividad humana incrementa necesariamente dicha concentración.

A la muestra proveniente de la titulación de CO_3^{2-} y HCO_3^- se le agregó tres gotas del indicador de K_2CrO_4 y se adicionó la solución de nitrato de plata hasta obtener un color rojo ladrillo.

Según Richard (1985), la corrección varía según la muestra en el momento que vire, aumentando normalmente de 0.03 hasta 0.20 mL para aumentos de volumen de 2 hasta 12 mL.

Para los cálculos se utilizó la siguiente ecuación:

$$Cl_{meq L^{-1}} = \frac{\text{ml gastados} \times N \text{ del } \text{AgNO}_3 \times 1000}{\text{ml muestra}}$$

Sulfatos

Para la determinación de SO_4^{2-} 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 BaSO_4 , debido a que se combinan los sulfatos con el bario del BaCl_2 , 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 SO_4^{2-} .

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 BaCl_2 . Se agitó un minuto y se obtuvo la lectura en el espectrofotómetro

Calcio y Magnesio

Para la determinación de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ se utilizó el método por titulación con EDTA (Etilen-diamino-tetracetato), recomendado por APHA (1995), y como indicador al negro eriocromo 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.

Se colocaron 5 ml de muestra en un vaso de precipitados, se le agregaron 5 gotas de solución amortiguadora (cloruro de amonio) y una pizca de Eriocromo negro T y posteriormente se tituló con EDTA (Etilen-diamino-tetracetato o versenato) al 0.01 N usando una microbureta de 10 ml.

El cambio de color al punto final es de violeta a azul o verde. Para los cálculos se utilizó la siguiente ecuación:

$$(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})_{\text{meq L}^{-1}} = \frac{\text{ml gastados} \times \text{N del EDTA} \times 1000}{\text{ml muestra}}$$

Con los datos obtenidos de Calcio, por diferencia obtenemos Magnesio:

$$\text{Mg}^{2+} = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - \text{Ca}^{2+}$$

Calcio

Es el quinto elemento y el tercer metal más abundante en la corteza terrestre. Los compuestos de Ca^{2+} constituyen 3.64% de la corteza terrestre. El metal es trimorfo, más duro que el Na^+ , pero más blando que el Al^{3+} . Al igual que el berilio y el aluminio, pero a diferencia de los metales alcalinos, no causa quemaduras sobre la piel. Es menos reactivo químicamente que los metales alcalinos y que los otros metales alcalinotérreos. La distribución del Ca^{2+} es muy amplia; se encuentra en casi todas las áreas terrestres del mundo. Este elemento es esencial para la vida de las plantas y animales.

Los iones Ca^{2+} disueltos en el agua forman depósitos en tuberías y calderas cuando el agua es dura, es decir, cuando contiene demasiado Ca^{2+} o Mg^{2+} . Esto se puede evitar con los ablandadores de agua.

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 (Etilendiamino-tetracetato) hasta que se obtuvo un color violeta.

Sodio y Potasio

Para determinar el contenido de Na^+ y K^+ se utilizó el flamómetro Aut Cal FlamPhotometer 643. Se colocó una solución de Cesio, después se abrió la válvula de gas LP. Antes de colocar las muestras se calibró el equipo con una solución patrón de 140 meq L^{-1} de Na^+ y 5.0 mmolc L^{-1} de K^+ . Las muestras se colocaron directamente desde los recipientes. Este aparato nos dio directamente la lectura en mmolc L^{-1} .

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Localización geográfica de las estaciones de muestreo

El estado de Morelos queda comprendida dentro de la región hidrológica número 18 (río Balsas), con una superficie de 4,958 km², dividida en dos cuencas, la del río Amacuzac que abarca casi el 90% de su territorio y el resto comprende a la cuenca del río Nexapa, al oriente del estado, la cual cuenta con 2,838 millones de m³ de escurrimiento anual.

Alrededor de 63 000 hectáreas son irrigadas en Morelos y dado que las actividades agropecuarias, industriales y recreacionales compiten por este recurso, han disminuido las fuentes de agua para la agricultura, incrementando 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 aplica.

Las estaciones de muestreo se distribuyeron en el río Amacuzac y sus tributarios (manantiales, pozos, presas y ríos, como: Apatlaco, Yautepec, Cuautla, Chalma, Tembembe, Balsas y 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 muestreo y en la Figura 8 su localización geográfica. Se realizaron 79 estaciones en Septiembre de 2013, en donde el 62.1 % fueron de ríos, presas y lagos, mientras que el 37.9 % en manantiales y pozos.

Como se puede observar en la Figura 8, los puntos 1, 2, 3, 5, 6, 25, 26, 28, 29 y 30 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 de muestreo se encuentra en el Cuadro 15.

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

No.	Sitio de muestreo	Fecha de colecta	LN	LW	msnm	Temperatura
1	Lagua Zempoala 1	09/09/2013	19°03'09.4"	99°18'93.4"	2840	17.8 °C
2	Laguna Zempoala 2	09/09/2013	19°03'28.4"	99°18'93.5"	2839	17.8 °C
3	Arroyo-Chalma	09/09/2013	19°04'13.6"	99°20'29.3"	3130	15.0 °C
4	Ahuehuete	09/09/2013	18°50'17.1"	99°25'48.4"	2051	15.7 °C
5	Arroyo-Ahuehuete	09/09/2013	18°57'04.4"	99°25'25.5"	1833	16.7 °C
6	Río Chalma 1	09/09/2013	18°55'56.8"	99°26'05.3"	1867	15.9 °C
7	Río Chalma 2	09/09/2013	18°55'56.8"	99°26'05.3"	1867	15.6 °C
8	Lagua el Rodeo	09/09/2013	18°46'26.4"	99°19'06.0"	1076	34.7 °C
9	Río el Rodeo	09/09/2013	18°46'35.8"	99°19'33.1"	1102	22.3 °C
10	Laguna Coatetelco 1	09/09/2013	18°44'46.4"	99°20'15.6"	969	31.8 °C
11	Laguna Coatetelco 2	09/09/2013	18°45'19.0"	99°20'56.3"	961	25.3 °C
12	Río Cuautla en Puente Alpuyecá 1	09/09/2013	18°44'07.3"	99°15'31.6"	1041	23.5 °C
13	Toma de agua-Alpuyecá	10/09/2013	18°44'07.3"	99°15'31.6"	1041	23.5 °C
14	Río Colotepec en Xochitepec	10/09/2013	18°46'30.3"	99°14'03.4"	1053	20.4 °C
15	Manantial balneario Palo Bolero	10/09/2013	18°46'02.2"	99°14'17.9"	1067	21.1 °C
16	Canal balneario Palo Bolero	10/09/2013	18°46'02.4"	99°14'17.4"	1057	20.2 °C
17	Canal balneario Xochitepec	10/09/2013	18°47'49.9"	99°14'28.5"	1114	20.8 °C
18	Balneario Ojo de agua	10/09/2013	18°49'54.5"	99°13'46.4"	1216	22.7 °C
19	Río Temixco en puente el pollo	10/09/2013	18°51'23.5"	99°13'26.6"	1246	19.2 °C
20	RíoApatlaco	10/09/2013	18°52'08.3"	99°13'36.1"	1299	18.5 °C
21	Río Cuautla en puente Alpuyecá 2	10/09/2013	18°43'41.2"	99°14'56.5"	1028	22.3 °C
22	Balneario Los Amates	10/09/2013	18°37'09.3"	99°19'35.2"	941	25.2 °C
23	Balneario Sn. Juan	10/09/2013	18°36'45.5"	99°21'01.9"	909	28.6 °C
24	Manantial Sn. Juan	10/09/2013	18°36'47.1"	99°21'02.4"	910	28.6 °C
25	Río Amacuzac Grutas 1	10/09/2013	18°40'50.8"	99°29'05.5"	1103	24.7 °C
26	Río Dos Bocas	10/09/2013	18°40'01.9"	99°30'34.7"	1044	18.7 °C
27	Río Amacuzac Grutas 2	10/09/2013	18°40'01.9"	99°30'34.7"	1044	18.9 °C
28	Río Amacuzac Grutas 3	10/09/2013	18°40'10.3"	99°30'35.9"	1072	22.2 °C
29	Río Amacuzac Grutas 4	10/09/2013	18°40'12.0"	99°30'36.9"	1082	23.3 °C
30	Arroyo Teocalco	10/09/2013	18°37'09.5"	99°27'25.6"	988	27.8 °C
31	Río Amacuzac	10/09/2013	18°36'34.1"	99°25'43.0"	920	21.3 °C
32	Río Granadas	10/09/2013	18°36'34.1"	99°25'43.0"	920	25.0 °C
33	Ojo de agua 1	10/09/2013	18°39'00.5"	99°21'00.9"	887	26.1 °C
34	Río chalma 1	10/09/2013	18°39'00.5"	99°21'00.9"	887	24.8 °C
35	Ojo de agua 2	10/09/2013	18°38'58.9"	99°20'59.4"	896	25.6 °C
36	Ojo de agua 3	10/09/2013	18°39'02.0"	99°20'03.3"	937	25.9 °C
37	Río Chalma 2	10/09/2013	18°37'12.8"	99°19'59.7"	892	24.7 °C
38	Baños Tula	10/09/2013	18°38'11.3"	99°20'47.4"	913	28.5 °C
39	Lago Tequesquitengo	11/09/2013	18°36'14.7"	99°15'37.9"	908	28.6 °C
40	Río Amacuzac, Tehuixtla	11/09/2013	18°32'51.4"	99°16'08.7"	851	21.5 °C

Continuación...

No.	Sitio de muestreo	Fecha de colecta	LN	LW	msnm	Temperatura
41	Balneario Issstehuixtla	11/09/2013	19°32'52.7"	99°16'14.1"	870	25.8 °C
42	Planta de tratamiento-presa	11/09/2013	18°29'47.4"	99°16'37.7"	982	27.3 °C
43	Balneario Apotla	11/09/2013	18°41'59.3"	99°14'36.2"	1009	23.5 °C
44	Río Apatlaco	11/09/2013	18°41'52.2"	99°14'32.5"	1025	21.4 °C
45	Salto San Anton	11/09/2013	18°55'05.5"	99°14'05.5"	1004	20.7 °C
46	Río San Anton	11/09/2013	18°55'25.3"	99°14'41.9"	1516	19.2 °C
47	Balneario Xochitepec	12/09/2013	18°46'20.9"	99°14'20.6"	1068	21.3 °C
48	Pozo Xochitepec	12/09/2013	18°46'21.7"	99°14'21.0"	1027	24.0 °C
49	Río Yautepec-Jojutla	12/09/2013	18°36'57.0"	99°10'58.3"	951	23.4 °C
50	Río de Jojutla	12/09/2013	18°36'12.5"	99°10'22.3"	904	23.1 °C
51	Las huertas-Borbollón	12/09/2013	18°28'50.0"	99°09'13.6"	773	29.3 °C
52	Manantiales 1	12/09/2013	18°28'41.3"	99°09'12.9"	773	28.5 °C
53	Manantiales 2	12/09/2013	18°28'40.5"	99°09'10.1"	790	23.5 °C
54	Río amacuzac 1	12/09/2013	18°28'42.7"	99°09'09.4"	768	22.9 °C
55	Manantiales 3	12/09/2013	18°28'42.7"	99°09'09.4"	768	28.8 °C
56	Río Amacuzac 2	12/09/2013	18°28'56.4"	99°09'47.3"	781	22.5 °C
57	Río Nexpan	12/09/2013	18°30'59.0"	99°08'48.5"	783	25.8 °C
58	Balneario las tortugas	12/09/2013	18°28'58.6"	99°08'46.2"	774	29.1 °C
59	Balneario Los Cascabeles	12/09/2013	18°28'57.0"	99°09'08.3"	748	28.7 °C
60	Arroyo Tlalzilapan	12/09/2013	18°40'41.1"	99°07'56.7"	935	23.2 °C
61	Río Yautepec	12/09/2013	18°41'56.9"	99°06'37.4"	941	25.5 °C
62	Las estacas	12/09/2013	18°43'55.5"	99°06'45.9"	954	23.7 °C
63	Río Yautepec-Ticuma	12/09/2013	18°47'43.5"	99°06'18.5"	1006	25.5 °C
64	Río Yutepec	12/09/2013	18°52'50.7"	99°03'47.9"	1215	25.5 °C
65	Río Cuautla 1	13/09/2013	18°48'32.2"	98°56'55.2"	1289	18.9 °C
66	Agua Hedionda	13/09/2013	18°48'51.1"	98°55'46.8"	1405	26.1 °C
67	Balneario las Termas 1	13/09/2013	18°39'02.7"	98°49'53.8"	1252	35.4 °C
68	Balneario las Termas 2	13/09/2013	18°39'02.0"	98°49'52.6"	1245	32.5 °C
69	Balneario las Termas 3	13/09/2013	18°39'06.9"	98°49'55.8"	1243	30.4 °C
70	Balneario las Termas 4	13/09/2013	18°39'08.3"	98°49'56.6"	1253	29.4 °C
71	Balneario las Termas 5	13/09/2013	18°39'08.3"	98°49'56.6"	1253	28.6 °C
72	Villa de Ayala	13/09/2013	18°46'12.7"	98°59'00.8"	1216	21.4 °C
73	Río Chinameca	13/09/2013	18°38'11.3"	99°00'29.4"	1005	22.4 °C
74	Balneario Axocoche	13/09/2013	18°45'17.4"	98°59'07.7"	1178	23.3 °C
75	Balneario Agua Limpia	13/09/2013	18°45'26.3"	98°57'47.6"	1190	22.8 °C
76	Río Cuautla 2	13/09/2013	18°45'26.2"	98°57'49.8"	1210	22.4 °C
77	Arroyo Oacalco	13/09/2013	18°54'30.3"	99°02'08.0"	1249	22.5 °C
78	Río Itzmatlán	13/09/2013	18°54'24.6"	99°01'01.1"	1257	23.4 °C
79	Nacimiento Itzmatlán	13/09/2013	18°54'25.5"	99°01'00.6"	1256	21.9 °C

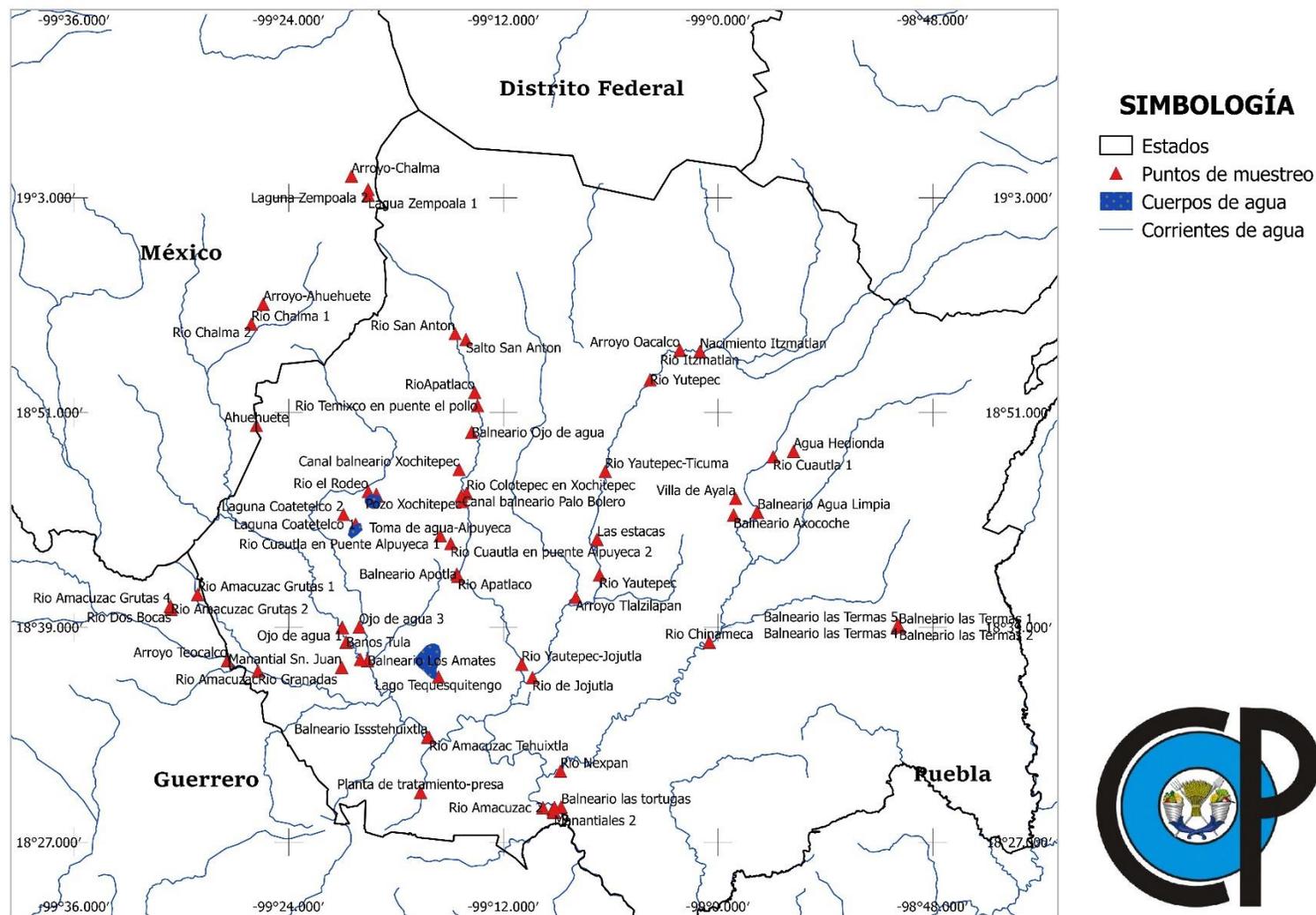


Figura 8. Localización geográfica de las estaciones de muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

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

No.	pH	CE μScm ⁻¹	mmolc L ⁻¹										RSE ppm	Σ mgL ⁻¹ Σ mmoles	%	
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma				
1	5.60	8100	0.30	0.48	0.00	0.41	1.19	0.00	0.34	0.20	0.59	1.13	54.00	84.23	2.39	
			6.00	5.83	0.00	16.03	0.00	20.74	7.10	28.53						
			0.15	0.24	0.00	0.41	0.00	0.34	0.20	0.30						164
2	6.31	116.85	0.30	0.52	0.00	0.40	1.22	0.00	0.49	0.26	0.42	1.17	62.00	86.84	2.07	
			6.00	6.32	0.00	15.44	0.00	29.89	9.23	19.96						176
			0.15	0.26	0.00	0.40	0.00	0.49	0.26	0.21						176
3	6.16	57.85	0.31	0.21	0.00	0.40	0.92	0.00	0.28	0.28	0.33	0.89	38.00	67.10	1.34	
			6.20	2.55	0.00	15.44	0.00	17.08	9.94	15.88						138
			0.16	0.11	0.00	0.40	0.00	0.28	0.28	0.17						138
4	6.24	105.25	0.30	0.53	0.10	0.31	1.24	0.00	0.47	0.24	0.55	1.26	65.55	90.13	0.90	
			6.00	6.44	2.30	11.93	0.00	28.67	8.52	26.28						180
			0.15	0.27	0.10	0.31	0.00	0.47	0.24	0.27						180
5	5.74	73.65	0.50	0.10	0.10	0.42	1.12	0.00	0.29	0.28	0.48	1.05	43.50	80.55	2.86	
			10.00	1.22	2.30	16.23	0.00	17.69	9.94	23.18						163
			0.25	0.05	0.10	0.42	0.00	0.29	0.28	0.24						163
6	6.40	139.35	0.45	0.63	0.30	0.43	1.81	0.00	0.54	0.28	0.88	1.70	92.00	125.49	2.87	
			9.00	7.65	6.90	16.62	0.00	32.94	9.94	42.44						253
			0.23	0.32	0.30	0.43	0.00	0.54	0.28	0.44						253
7	6.46	139.25	0.55	0.52	0.20	0.42	1.69	0.00	0.53	0.30	0.94	1.77	93.00	126.61	2.41	
			11.00	6.32	4.60	16.42	0.00	32.33	10.65	45.29						246
			0.28	0.26	0.20	0.42	0.00	0.53	0.30	0.47						246
8	6.27	146.70	0.70	0.41	0.20	0.44	1.75	0.00	0.60	0.24	0.89	1.73	100.00	128.70	0.53	
			14.00	4.98	4.60	17.20	0.00	36.60	8.52	42.79						248
			0.35	0.21	0.20	0.44	0.00	0.60	0.24	0.45						248
9	6.39	112.45	0.50	0.50	0.20	0.43	1.63	0.00	0.45	0.24	0.86	1.55	80.00	114.63	2.30	
			10.00	6.08	4.60	16.62	0.00	27.45	8.52	41.37						225
			0.25	0.25	0.20	0.43	0.00	0.45	0.24	0.43						225
10	7.33	700.00	1.70	2.12	2.70	0.86	7.38	0.00	2.79	0.62	3.78	7.19	440.00	529.20	1.29	
			34.00	25.76	62.10	33.63	0.00	170.19	22.01	181.52						1077
			0.85	1.06	2.70	0.86	0.00	2.79	0.62	1.89						1077
11	7.01	504.00	2.30	1.30	1.10	0.50	5.20	0.00	1.47	0.46	3.25	5.18	300.00	368.65	0.10	
			46.00	15.80	25.30	19.35	0.00	89.67	16.33	156.20						695
			1.15	0.65	1.10	0.50	0.00	1.47	0.46	1.63						695
12	7.48	1200.00	8.80	3.16	0.45	0.43	12.84	0.00	1.47	0.54	10.73	12.74	770.00	865.35	0.40	
			176.00	38.39	10.35	16.81	0.00	89.67	19.17	514.96						1423
			4.40	1.58	0.45	0.43	0.00	1.47	0.54	5.36						1423
13	7.05	2700.00	10.80	4.60	6.85	0.51	22.76	0.00	2.28	16.18	4.14	22.60	1730.00	1361.29	0.35	
			216.00	55.89	157.55	19.75	0.00	139.08	574.39	198.64						3561
			5.40	2.30	6.86	0.51	0.00	2.28	16.20	2.07						3561
14	7.00	319.35	1.20	1.10	0.75	0.46	3.51	0.00	0.83	0.70	1.99	3.52	200.00	243.65	0.16	
			24.00	13.37	17.25	17.99	0.00	50.63	24.85	95.57						489
			0.60	0.55	0.75	0.46	0.00	0.83	0.70	1.00						489
15	6.75	2500.00	2.105	8.15	0.75	0.46	30.41	0.00	2.56	0.90	27.95	31.41	1645.00	2084.77	1.63	
			421.00	99.02	17.25	17.79	0.00	156.16	31.95	134.159						3324
			10.53	4.08	0.75	0.46	0.00	2.56	0.90	13.97						3324
16	6.98	300.55	1.10	1.30	0.70	0.46	3.56	0.00	0.79	0.65	1.98	3.42	230.00	238.17	1.88	
			22.00	15.80	16.10	17.79	0.00	48.19	23.08	95.22						479
			0.55	0.65	0.70	0.46	0.00	0.79	0.65	0.99						479
17	6.76	320.00	1.25	1.35	0.90	0.45	3.95	0.00	0.96	0.75	1.96	3.67	194.00	258.83	3.59	
			25.00	16.40	20.70	17.40	0.00	58.56	26.63	94.15						534
			0.63	0.68	0.90	0.45	0.00	0.96	0.75	0.98						534
18	6.68	567.50	1.60	2.70	1.50	0.46	6.26	0.00	1.24	1.20	3.86	6.30	396.00	420.97	0.35	
			32.00	32.81	34.50	17.99	0.00	75.64	42.60	185.44						848
			0.80	1.35	1.50	0.46	0.00	1.24	1.20	1.93						848

Continuación...

No.	pH	CE μScm ⁻¹	mmolc L ⁻¹										RSE ppm	Σ mgL ⁻¹ Σ mmoles	%
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma			
19	6.72	311.05	1.15	1.15	0.90	0.47	3.67	0.00	0.88	0.70	2.10	3.68	208.00		
			23.00	13.97	20.70	18.18		0.00	53.68	24.85	100.57			254.95	0.14
			0.58	0.58	0.90	0.47		0.00	0.88	0.70	1.05			5.14	
20	6.68	254.75	1.10	1.05	0.50	0.46	3.11	0.00	0.74	0.60	1.70	3.04	186.00		104
			22.00	12.76	11.50	17.79		0.00	45.14	21.30	81.67			212.15	
			0.55	0.53	0.50	0.46		0.00	0.74	0.60	0.85			4.22	
21	6.72	352.65	1.30	1.35	1.00	0.49	4.14	0.00	1.00	0.70	2.41	4.11	232.00		0.31
			26.00	16.40	23.00	19.16		0.00	61.00	24.85	115.90			286.31	
			0.65	0.68	1.00	0.49		0.00	1.00	0.70	1.21			5.72	
22	6.83	614.00	3.85	1.00	0.62	0.50	5.97	0.00	1.85	0.65	3.95	6.45	408.00		3.87
			77.00	12.15	14.26	19.35		0.00	112.85	23.08	189.36			448.05	
			1.93	0.50	0.62	0.50		0.00	1.85	0.65	1.97			8.01	
23	6.79	1100.00	6.40	4.65	0.20	0.41	11.66	0.00	2.25	0.50	8.99	11.74	748.00		0.34
			128.00	56.50	4.60	16.03		0.00	137.25	17.75	431.51			791.64	
			3.20	2.33	0.20	0.41		0.00	2.25	0.50	4.49			13.38	
24	6.82	1100.00	6.65	4.00	0.15	0.41	11.21	0.00	1.79	0.55	8.85	11.19	743.00		0.07
			133.00	48.60	3.45	15.84		0.00	109.19	19.53	424.73			754.33	
			3.33	2.00	0.15	0.41		0.00	1.79	0.55	4.42			12.64	
25	7.05	507.50	2.00	0.200	0.00	0.38	2.18	0.00	1.28	0.40	0.50	2.18	312.00		0.06
			40.00	2.430	0.00	14.66		0.00	78.08	14.20	23.89			168.41	
			1.00	0.100	0.00	0.38		0.00	1.28	0.40	0.25			3.20	
26	7.10	1916.00	0.80	2.85	0.20	0.40	4.25	0.00	0.59	0.40	3.20	4.19	158.00		0.69
			16.00	34.63	4.60	15.64		0.00	35.99	14.20	153.70			274.76	
			0.40	1.43	0.20	0.40		0.00	0.59	0.40	1.60			5.02	
27	6.97	204.70	1.15	0.70	0.10	0.39	2.34	0.00	0.69	0.50	1.20	2.39	154.00		1.24
			23.00	8.51	2.30	15.05		0.00	42.09	17.75	57.77			166.47	
			0.58	0.35	0.10	0.39		0.00	0.69	0.50	0.60			3.20	
28	7.44	538.50	2.85	2.50	0.28	0.30	5.93	0.00	1.52	0.60	4.18	6.30	314.00		3.05
			57.00	30.38	6.44	11.73		0.00	92.72	21.30	200.78			420.34	
			1.43	1.25	0.28	0.30		0.00	1.52	0.60	2.09			7.47	
29	7.31	562.50	2.65	1.45	0.30	0.36	4.76	0.00	1.15	0.70	2.94	4.79	312.00		0.34
			53.00	17.62	6.90	14.08		0.00	70.15	24.85	141.22			327.81	
			1.33	0.73	0.30	0.36		0.00	1.15	0.70	1.47			6.03	
30	7.47	523.50	3.25	1.15	0.20	0.38	4.98	0.00	1.64	0.50	2.60	4.74	304.00		2.47
			65.00	13.97	4.60	14.86		0.00	100.04	17.75	124.82			341.04	
			1.63	0.58	0.20	0.38		0.00	1.64	0.50	1.30			6.22	
31	7.41	220.70	1.35	0.65	0.15	0.40	2.55	0.00	0.74	0.50	1.23	2.47	150.00		1.43
			27.00	7.90	3.45	15.44		0.00	45.14	17.75	59.20			175.88	
			0.68	0.33	0.15	0.40		0.00	0.74	0.50	0.62			3.40	
32	7.40	417.50	3.40	0.60	0.05	0.38	4.43	0.00	1.58	0.35	2.40	4.33	235.00		1.09
			68.00	7.29	1.15	14.66		0.00	96.38	12.43	115.19			315.09	
			1.70	0.30	0.05	0.38		0.00	1.58	0.35	1.20			5.56	
33	7.11	836.00	4.15	3.30	0.30	0.41	8.16	0.00	1.92	0.45	5.91	8.28	494.00		0.74
			83.00	40.10	6.90	15.84		0.00	117.12	15.98	283.51			562.44	
			2.08	1.65	0.30	0.41		0.00	1.92	0.45	2.95			9.75	
34	7.07	530.00	3.30	1.70	0.30	0.41	5.71	0.00	1.54	0.40	3.97	5.91	378.00		1.76
			66.00	20.66	6.90	16.03		0.00	93.94	14.20	190.79			408.52	
			1.65	0.85	0.30	0.41		0.00	1.54	0.40	1.99			7.14	
35	6.90	830.00	4.70	3.10	0.15	0.40	8.35	0.00	2.15	0.40	5.83	8.38	508.00		0.22
			94.00	37.67	3.45	15.44		0.00	131.15	14.20	279.94			575.85	
			2.35	1.55	0.15	0.40		0.00	2.15	0.40	2.91			9.91	
36	6.86	868.00	4.90	3.30	0.20	0.40	8.80	0.00	2.10	0.55	6.10	8.75	558.00		0.26
			98.00	40.10	4.60	15.44		0.00	128.10	19.53	292.78			598.55	
			2.45	1.65	0.20	0.40		0.00	2.10	0.55	3.05			10.39	

Continuación...

No.	pH	CE µScm ⁻¹	mmolc L ⁻¹											RSE ppm	Σ mgL ⁻¹ Σ mmoles	%	
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma	Error				
37	7.14	634.50	175	150	0.15	0.41	3.81	0.00	1.31	0.35	2.21	3.87	387.00				
			35.00	18.23	3.45	15.84		0.00	79.91	12.43	106.27				271.12		
			0.88	0.75	0.15	0.41		0.00	1.31	0.35	1.11				4.95		
38	6.90	1100.00	6.70	4.60	0.10	0.40	1180	0.00	1.89	0.35	8.98	11.22	755.00				
			134.00	55.89	2.30	15.44		0.00	115.29	12.43	431.15				766.50		2.49
			3.35	2.30	0.10	0.40		0.00	1.89	0.35	4.49				12.87		
39	7.96	4025.00	16.70	24.00	10.30	1.13	52.13	0.04	1.06	2.20	48.93	52.23	2574.00				
			334.00	291.60	236.90	43.99		1.20	64.66	78.10	2348.68				3399.13		0.10
			8.35	12.00	10.31	1.13		0.02	1.06	2.20	24.45				59.52		
40	7.76	403.50	2.40	1.60	0.00	0.35	4.35	0.00	0.94	0.40	2.79	4.13	312.00				
			48.00	19.44	0.00	13.49		0.00	57.34	14.20	133.73				286.20		2.58
			1.20	0.80	0.00	0.35		0.00	0.94	0.40	1.39				5.08		
41	6.70	1900.00	16.10	4.50	0.30	0.35	2125	0.00	2.14	0.65	18.94	21.73	1203.00				
			322.00	54.68	6.90	13.69		0.00	130.54	23.08	909.02				1459.89		1.11
			8.05	2.25	0.30	0.35		0.00	2.14	0.65	9.46				23.21		
42	6.93	698.50	5.40	1.10	0.50	0.30	7.30	0.00	0.74	0.60	5.94	7.28	487.00				
			108.00	13.37	11.50	11.53		0.00	45.14	21.30	285.29				496.13		0.08
			2.70	0.55	0.50	0.30		0.00	0.74	0.60	2.97				8.36		
43	6.91	2000.00	14.10	6.90	1.80	0.41	23.21	0.00	2.19	0.95	20.09	23.23	1259.00				
			282.00	83.84	41.40	15.84		0.00	133.59	33.73	964.29				1554.68		0.05
			7.05	3.45	1.80	0.41		0.00	2.19	0.95	10.04				25.89		
44	7.04	318.45	1.90	0.85	1.25	0.42	4.42	0.00	0.73	0.55	3.20	4.48	246.00				
			38.00	10.33	28.75	16.42		0.00	44.53	19.53	153.70				311.26		0.70
			0.95	0.43	1.25	0.42		0.00	0.73	0.55	1.60				5.93		
45	6.79	450.00	1.75	1.95	1.70	0.42	5.82	0.00	1.33	0.80	3.52	5.65	328.00				
			35.00	23.69	39.10	16.42		0.00	81.13	28.40	169.04				392.78		1.47
			0.88	0.98	1.70	0.42		0.00	1.33	0.80	1.76				7.86		
46	6.80	285.70	1.30	0.80	1.40	0.43	3.93	0.00	0.74	0.55	2.69	3.98	250.00				
			26.00	9.72	32.20	16.81		0.00	45.14	19.53	129.10				278.49		0.63
			0.65	0.40	1.40	0.43		0.00	0.74	0.55	1.34				5.52		
47	6.85	115.00	0.55	0.45	1.00	0.38	2.38	0.00	0.39	0.40	1.67	2.46	125.00				
			11.00	5.47	23.00	14.86		0.00	23.79	14.20	80.24				172.55		1.69
			0.28	0.23	1.00	0.38		0.00	0.39	0.40	0.84				3.51		
48	7.26	857.00	4.45	3.45	1.98	0.39	10.27	0.00	2.36	1.05	6.70	10.11	592.00				
			89.00	41.92	45.54	15.25		0.00	143.96	37.28	321.67				694.61		0.78
			2.23	1.73	1.98	0.39		0.00	2.36	1.05	3.35				13.08		
49	6.84	692.50	3.95	2.10	1.44	0.43	7.92	0.00	1.35	0.85	5.72	7.92	467.00				
			79.00	25.52	33.12	16.81		0.00	82.35	30.18	274.60				541.57		0.00
			1.98	1.05	1.44	0.43		0.00	1.35	0.85	2.86				9.96		
50	7.08	701.50	4.40	2.25	1.60	0.43	8.68	0.00	1.57	0.70	6.20	8.47	412.00				
			88.00	27.34	36.80	16.62		0.00	95.77	24.85	297.78				587.15		1.17
			2.20	1.13	1.60	0.43		0.00	1.57	0.70	3.10				10.72		
51	6.77	2200.00	17.30	7.90	2.15	0.44	27.79	0.00	1.46	0.70	25.79	27.95	1398.00				
			346.00	95.99	49.45	17.20		0.00	89.06	24.85	1237.82				1860.37		0.28
			8.65	3.95	2.15	0.44		0.00	1.46	0.70	12.89				30.24		
52	6.75	1800.00	14.65	5.45	2.00	0.45	22.55	0.00	1.94	0.65	19.89	22.48	1142.00				
			293.00	66.22	46.00	17.40		0.00	118.34	23.08	954.66				1518.70		0.15
			7.33	2.73	2.00	0.45		0.00	1.94	0.65	9.94				25.03		
53	6.80	1800.00	14.10	5.30	2.10	0.45	21.95	0.00	1.72	0.65	19.19	21.56	1139.00				
			282.00	64.40	48.30	17.40		0.00	104.92	23.08	921.14				1461.23		0.88
			7.05	2.65	2.10	0.45		0.00	1.72	0.65	9.59				24.21		
54	7.08	517.00	3.40	1.40	1.45	0.41	6.66	0.00	1.07	0.60	4.97	6.64	392.00				
			68.00	17.01	33.35	16.03		0.00	65.27	21.30	238.58				459.54		0.15
			1.70	0.70	1.45	0.41		0.00	1.07	0.60	2.48				8.42		

Continuación...

No.	pH	CE µScm ⁻¹	mmolc L ⁻¹										RSE ppm	Σ mgL ⁻¹ Σ mmoles	%
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma			
55	6.79	1900.00	4.15	5.55	2.00	0.43	22.13	0.00	1.59	0.80	19.64	22.03	1283.00		0.22
			283.00	67.43	46.00	16.81		0.00	96.99	28.40	942.90				
			7.08	2.78	2.00	0.43		0.00	1.59	0.80	9.82				
56	7.20	420.00	2.50	1.30	1.30	0.40	5.50	0.00	1.03	0.45	4.12	5.60	316.00		0.91
			50.00	15.80	29.90	15.44		0.00	62.83	15.98	197.57				
			1.25	0.65	1.30	0.40		0.00	1.03	0.45	2.06				
57	7.26	705.00	3.40	2.60	2.05	0.49	8.54	0.00	1.70	0.75	6.09	8.54	415.00		0.01
			68.00	31.59	47.15	19.16		0.00	103.70	26.63	292.43				
			1.70	1.30	2.05	0.49		0.00	1.70	0.75	3.04				
58	6.66	2200.00	16.95	7.60	2.40	0.43	27.38	0.00	1.96	0.75	24.70	27.41	1421.00		0.07
			339.00	92.34	55.20	16.62		0.00	119.56	26.63	1185.75				
			8.48	3.80	2.40	0.43		0.00	1.96	0.75	12.35				
59	6.76	2150.00	16.40	19.60	2.35	0.43	38.78	0.00	1.74	0.75	36.31	38.80	1352.00		0.03
			328.00	238.14	54.05	16.62		0.00	106.14	26.63	1742.79				
			8.20	9.80	2.35	0.43		0.00	1.74	0.75	18.14				
60	7.20	663.00	4.20	1.90	1.50	0.42	8.02	0.00	2.22	0.60	5.11	7.93	456.00		0.52
			84.00	23.09	34.50	16.23		0.00	135.42	21.30	245.35				
			2.10	0.95	1.50	0.42		0.00	2.22	0.60	2.55				
61	7.12	815.50	5.20	2.55	1.70	0.45	9.90	0.00	1.77	0.70	7.41	9.88	533.00		0.08
			104.00	30.98	39.10	17.60		0.00	107.97	24.85	355.90				
			2.60	1.28	1.70	0.45		0.00	1.77	0.70	3.71				
62	6.94	1200.00	6.90	3.60	2.00	0.42	12.92	0.00	2.14	0.80	9.93	12.87	723.00		0.21
			138.00	43.74	46.00	16.42		0.00	130.54	28.40	476.44				
			3.45	1.80	2.00	0.42		0.00	2.14	0.80	4.96				
63	7.12	430.50	2.25	1.45	1.30	0.46	5.46	0.00	0.91	0.60	3.86	5.37	216.00		0.80
			45.00	17.62	29.90	17.99		0.00	55.51	21.30	185.44				
			1.13	0.73	1.30	0.46		0.00	0.91	0.60	1.93				
64	7.03	770.00	4.85	2.35	1.60	0.45	9.25	0.00	1.42	0.80	7.04	9.26	453.00		0.07
			97.00	28.55	36.80	17.60		0.00	86.62	28.40	338.07				
			2.43	1.18	1.60	0.45		0.00	1.42	0.80	3.52				
65	7.22	396.50	1.25	2.05	1.60	0.44	5.34	0.00	1.49	0.50	3.29	5.28	248.00		0.55
			25.00	24.91	36.80	17.20		0.00	90.89	17.75	157.98				
			0.63	1.03	1.60	0.44		0.00	1.49	0.50	1.64				
66	6.28	3200.00	20.55	10.95	5.15	0.52	37.17	0.00	5.42	2.90	29.51	37.83	2004.00		0.88
			411.00	133.04	118.45	20.33		0.00	330.62	102.95	1416.48				
			10.28	5.48	5.15	0.52		0.00	5.42	2.90	14.75				
67	6.70	2100.00	16.35	6.05	3.25	0.44	26.09	0.00	1.55	1.30	23.52	26.37	1325.00		0.55
			327.00	73.51	74.75	17.01		0.00	94.55	46.15	1129.05				
			8.18	3.03	3.25	0.44		0.00	1.55	1.30	11.75				
68	6.77	1700.00	11.35	4.90	3.00	0.43	19.68	0.00	1.80	0.95	17.10	19.85	1113.00		0.42
			227.00	59.54	69.00	16.81		0.00	109.80	33.73	820.58				
			5.68	2.45	3.00	0.43		0.00	1.80	0.95	8.54				
69	6.83	1200.00	6.95	4.00	2.80	0.45	14.20	0.00	2.12	0.85	11.49	14.46	749.00		0.94
			139.00	48.60	64.40	17.40		0.00	129.32	30.18	551.69				
			3.48	2.00	2.80	0.45		0.00	2.12	0.85	5.74				
70	6.91	834.50	4.05	2.90	2.45	0.42	9.82	0.00	2.28	0.70	6.95	9.93	512.00		0.60
			81.00	35.24	56.35	16.23		0.00	139.08	24.85	333.79				
			2.03	1.45	2.45	0.42		0.00	2.28	0.70	3.48				
71	6.67	756.00	3.35	2.70	2.40	0.40	8.85	0.00	2.39	0.70	5.74	8.83	453.00		0.14
			67.00	32.81	55.20	15.64		0.00	145.79	24.85	275.31				
			1.68	1.35	2.40	0.40		0.00	2.39	0.70	2.87				
72	7.01	514.50	1.45	3.15	1.95	0.45	7.00	0.00	1.95	0.50	4.76	7.21	301.00		1.53
			29.00	38.27	44.85	17.40		0.00	118.95	17.75	228.59				
			0.73	1.58	1.95	0.45		0.00	1.95	0.50	2.38				

Continuación...

No.	pH	CE μScm ⁻¹	mmolc L ⁻¹											RSE ppm	Σ mgL ⁻¹ Σ mmoles	%
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma	Error			
73	7.18	575.50	2.30	2.75	0.40	0.12	5.57	0.00	1.52	0.75	3.31	5.58	342.00	0.12		
			46.00	33.41	9.20	4.69		0.00	92.72	26.63	159.05		371.70			
			1.15	1.38	0.40	0.12		0.00	1.52	0.75	1.66		6.97			
74	6.70	1400.00	6.40	5.35	0.65	0.29	12.69	0.00	3.19	0.95	8.31	12.45	856.00	0.97		
			128.00	65.00	14.95	11.34		0.00	194.59	33.73	398.70		846.30			
			3.20	2.68	0.65	0.29		0.00	3.19	0.95	4.15		15.11			
75	6.70	1100.00	4.80	4.20	0.60	0.34	9.94	0.00	3.06	1.00	5.59	9.65	698.00	1.47		
			96.00	51.03	13.80	13.10		0.00	186.66	35.50	268.18		664.26			
			2.40	2.10	0.60	0.34		0.00	3.06	1.00	2.79		12.29			
76	6.98	535.50	1.75	2.55	0.55	0.39	5.24	0.00	1.97	0.90	2.33	5.20	321.00	0.43		
			35.00	30.98	12.65	15.25		0.00	120.17	31.95	111.62		357.62			
			0.88	1.28	0.55	0.39		0.00	1.97	0.90	1.16		7.12			
77	7.43	1500.00	9.05	4.65	1.40	0.47	15.57	0.00	2.34	1.10	12.10	15.54	943.00	0.10		
			181.00	56.50	32.20	18.18		0.00	142.74	39.05	580.57		1050.24			
			4.53	2.33	1.40	0.47		0.00	2.34	1.10	6.04		18.20			
78	7.03	1400.00	8.80	4.50	1.20	0.46	14.96	0.00	2.60	1.25	11.09	14.94	873.00	0.04		
			176.00	54.68	27.60	17.79		0.00	158.60	44.38	532.43		1011.47			
			4.40	2.25	1.20	0.46		0.00	2.60	1.25	5.54		17.70			
79	6.64	2000.00	13.45	6.55	1.40	0.47	21.87	0.00	2.89	1.30	17.30	21.49	1250.00	0.86		
			269.00	79.58	32.20	18.18		0.00	176.29	46.15	830.56		1451.97			
			6.73	3.28	1.40	0.47		0.00	2.89	1.30	8.65		24.71			
MEDIA	6.89	898.88	5.42	3.24	1.27	0.43	10.36	0.00	1.54	0.88	7.95	10.37	576.70	0.94		
			96.63	30.85	26.51	18.38		0.02	95.67	30.93	314.22		613.21			
			2.42	1.27	1.15	0.47		0.00	1.57	0.87	3.27		11.02			
MEDIANA	6.90	634.50	3.40	2.35	0.90	0.42	7.00	0.00	1.52	0.65	4.18	7.19	408.00	0.69		
			59.10	18.23	16.51	16.03		0.00	94.55	23.08	174.72		450.42			
			1.48	0.75	0.72	0.41		0.00	1.55	0.65	1.82		8.05			
MODA	6.79	1100.00	3.40	0.52	0.20	0.40		0.00	0.74	0.50	3.86		312.00			
			20.00	12.15	0.00	16.42		0.00	45.14	26.63	422.40					
			0.50	0.50	0.00	0.42		0.00	0.74	0.75	4.40					
DV	1.53	797.45	5.51	3.74	1.56	0.11	9.84	0.00	0.84	1.79	9.12	9.91	506.83	0.93		
			95.94	30.85	33.98	20.87		0.14	55.66	63.08	334.44		527.05			
			2.40	1.27	1.48	0.53		0.00	0.91	1.78	3.48		9.28			

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, CE, 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 16.

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

$$\% Dif = \frac{|\Sigma \text{ cationes} - \Sigma \text{ aniones}|}{\Sigma \text{ cationes} + \Sigma \text{ aniones}} \times 100$$

Cuadro 16. Porcentaje permisible de diferencia en los resultados analíticos.

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

Fuente: APHA, 1995.

Se tiene un error promedio de 0.94 % para el muestreo, de acuerdo al cuadro anterior, el porcentaje de error está 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 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ entre el total de cationes en meq 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 HCO_3^{1-} ó SO_4^{2-} y ricas en Ca^{2+} y Mg^{2+} , la relación baja hasta 80 y para aguas con Cl^- y ricas en Na^+ llega hasta 110.

La comprobación de los valores analíticos mediante esta recomendación se hizo con las medias obtenidas en el muestreo, el resultado de este es 86.7.

Para graficar la relación de la suma de aniones y cationes en función de la CE se realizaron las Figuras 9 y 10 para el muestreo obteniendo una pendiente media de 0.011525.

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 meq L^{-1} entre CE en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

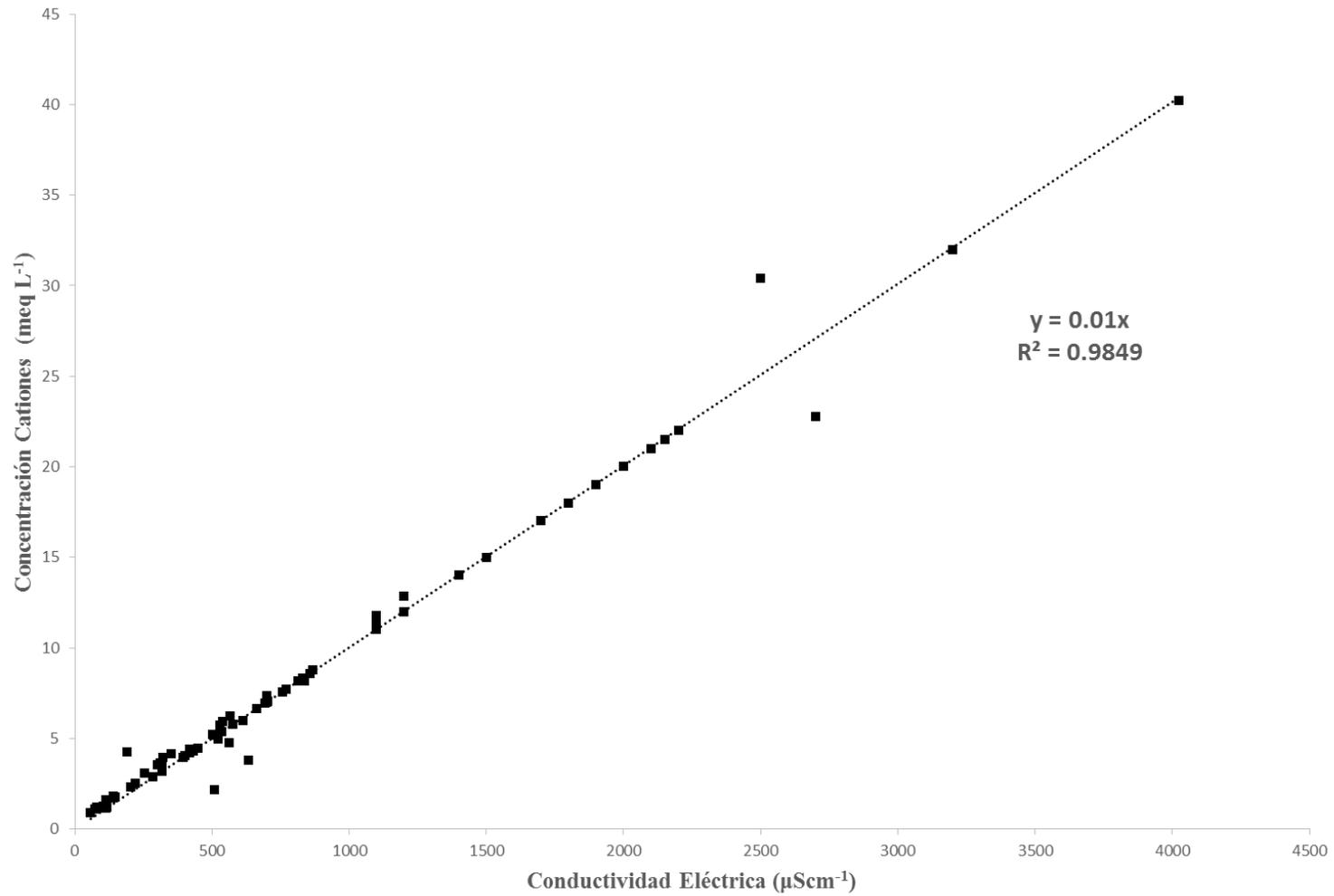


Figura 9. Relación entre la concentración de cationes y la conductividad eléctrica del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

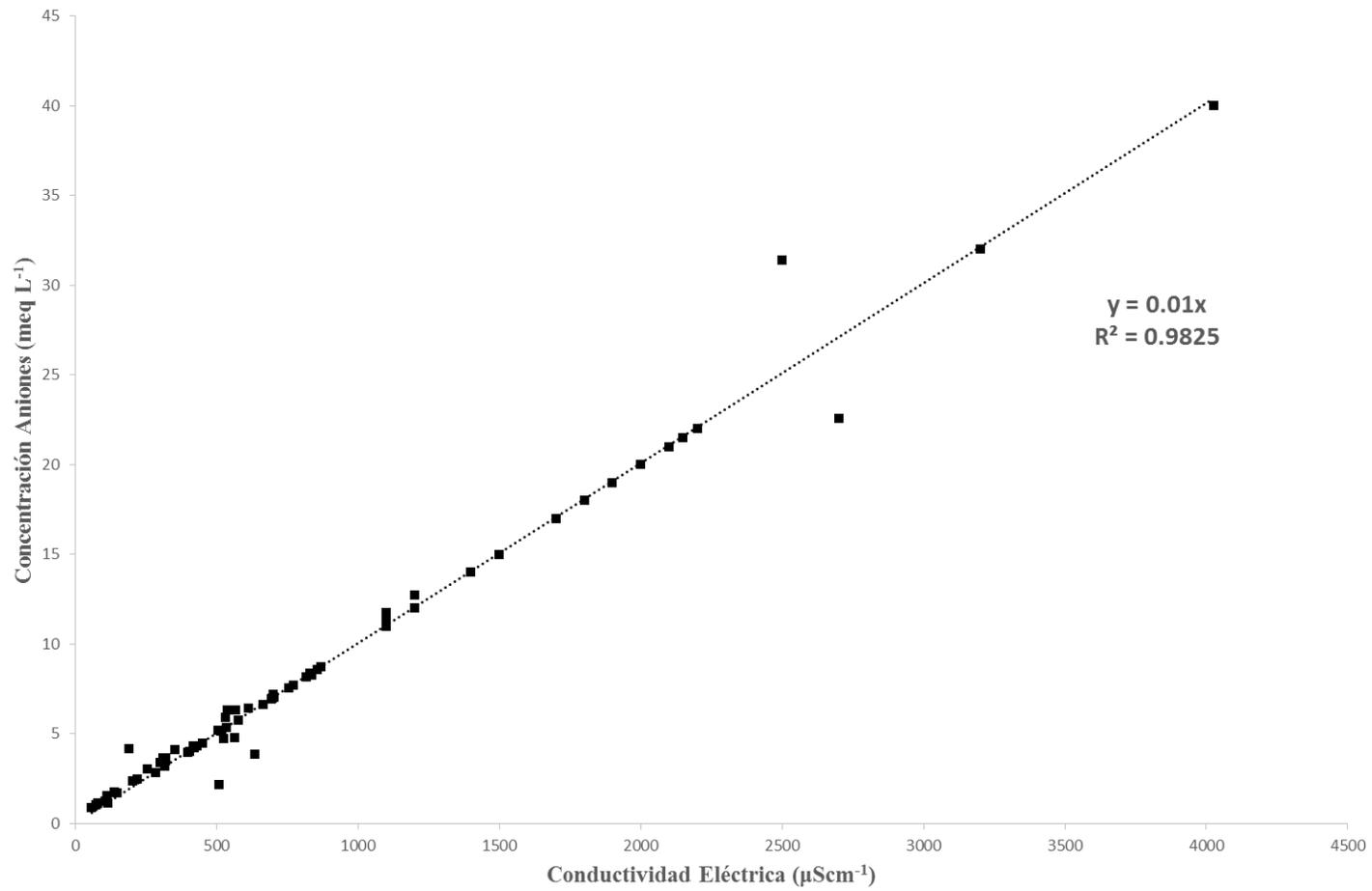


Figura 10. Relación entre la concentración de aniones y la conductividad eléctrica del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

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 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, la cual 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 del contenido de los sólidos disueltos, esto se expresa en la siguiente ecuación.

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

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

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

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 muestreo fue de 0.638, el muestreo se encuentra dentro del intervalo recomendado y se presenta en la Figura 11.

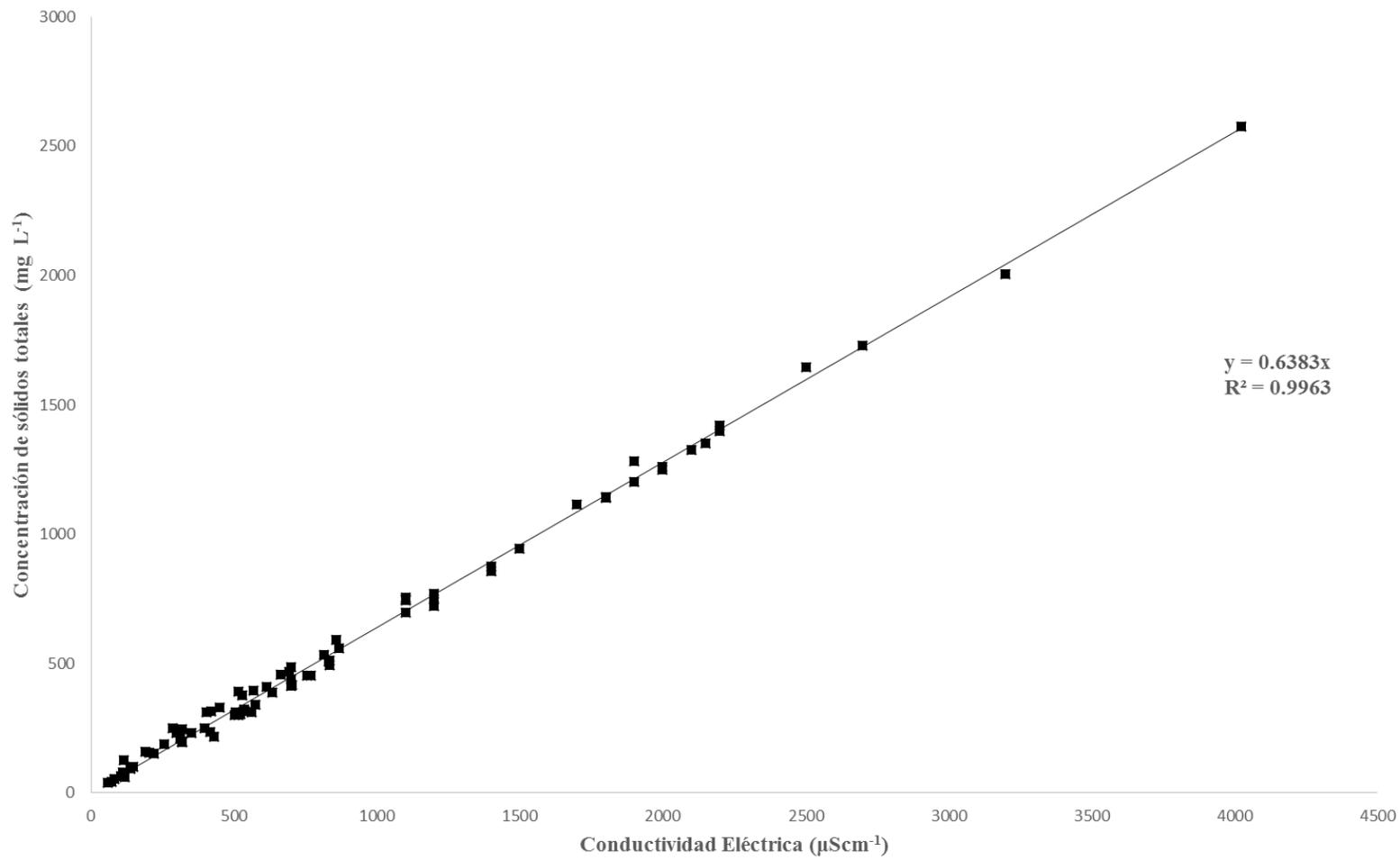


Figura 11. Relación entre la concentración de sólidos totales y la conductividad eléctrica de la red hidrográfica del estado de Morelos.

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 mmolc 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 μS cm⁻¹ y se multiplica por el coeficiente 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 0.70 para que sean confiables los datos y la concentración total de sólidos disueltos medidos debe ser mayor a la calculada, de no ser así las muestras deben ser analizadas nuevamente.

Los STD calculados se determinaron de la siguiente manera:

$$CE_{medidos} = 898.88 \times 0.6383 = 573.75$$

Media de la CE μS cm⁻¹ = 898.88

(Coeficiente de la CE y STD) $y = 0.6383x$

La segunda comprobación de APHA (1995) se realizó de la siguiente manera:

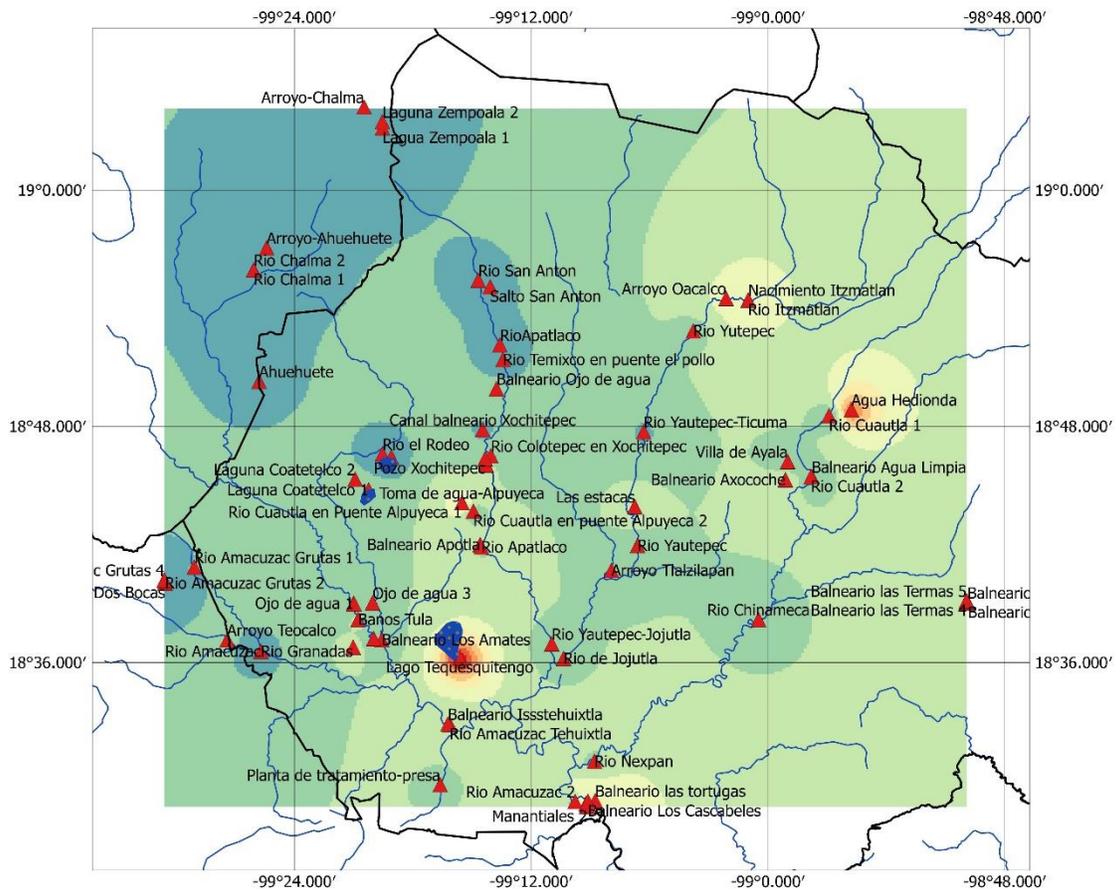
$$\frac{613.21_{medidos}}{573.75_{calculados}} = 1.06$$

De acuerdo con los resultados presentados en la fórmula anterior, para el caso del muestreo se tiene un valor de **1.06**, 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 CE medida y la CE 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 mmolc L^{-1} , la CE_{medida} es el promedio de las mediciones en cada punto de muestreo. Para el muestreo se obtuvo **1.06**, los resultados analíticos están correctos, ya que están dentro del rango permisible de 0.9 a 1.1.



SIMBOLOGÍA

- Corrientes de agua
- Cuerpos de agua
- Estados
- ▲ Puntos de muestreo



CE $\mu\text{S}/\text{cm}$

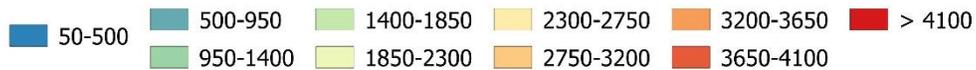
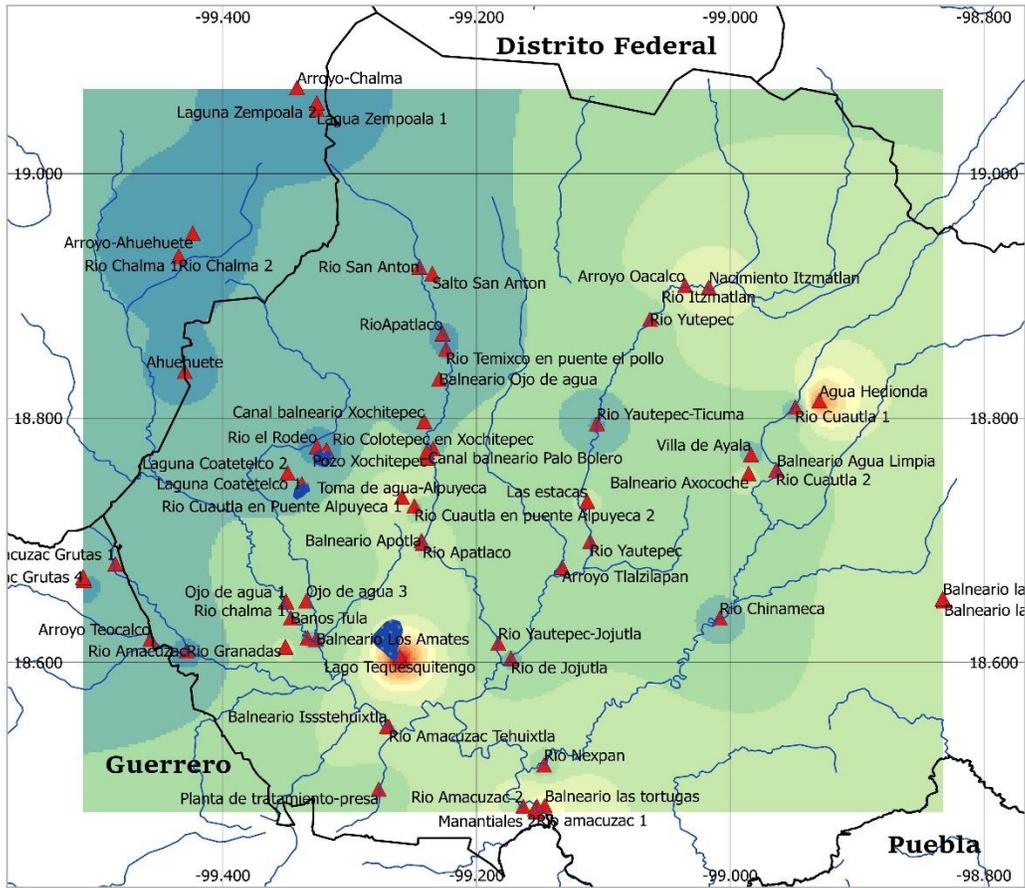


Figura 12. Mapa de distribución de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) de la red hidrográfica del estado de Morelos.



SIMBOLOGÍA

- Estados
- ▲ Datos copiar
- Cuerpos de agua
- Corrientes de agua



STD

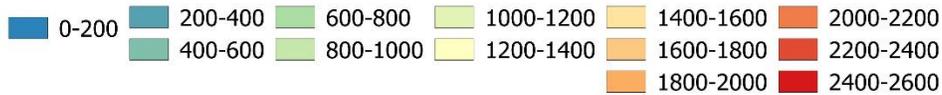


Figura 13. Mapa de distribución de los sólidos disueltos (mmolc L^{-1}) de la red hidrográfica del estado de Morelos.

5.3. 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 Na^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- y Cl^- , 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 0.30 a 21.05 mmolc L⁻¹; Mg^{2+} de 0.20 a 24.00 mmolc L⁻¹; Na^+ de 0.00 a 10.30 mmolc L⁻¹; K^+ de 0.11 a 1.12 mmolc L⁻¹ y de aniones es: HCO_3^- de 0.28 a 5.42 mmolc L⁻¹; Cl^- de 0.20 a 16.18 mmolc L⁻¹; SO_4^{2-} de 0.33 a 48.93 mmolc L⁻¹; CO_3^{2-} 0.00 a 0.04. Esto nos indica que los iones con mayor concentración son: Ca^{2+} , Mg^{2+} y SO_4^{2-} . Para tener una mejor referencia sobre los resultados antes mencionados se realizó la Figura 14, 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 14 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: 15, 39, 41, 43, 51, 55, 58, 59, 66, 67 y 79, los cuales pertenecen a aguas subterráneas. La disolución de horizontes evaporíticos (yeso y anhídrita fundamentalmente) representa el aporte más importante de SO_4^{2-} 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 13 y 39.

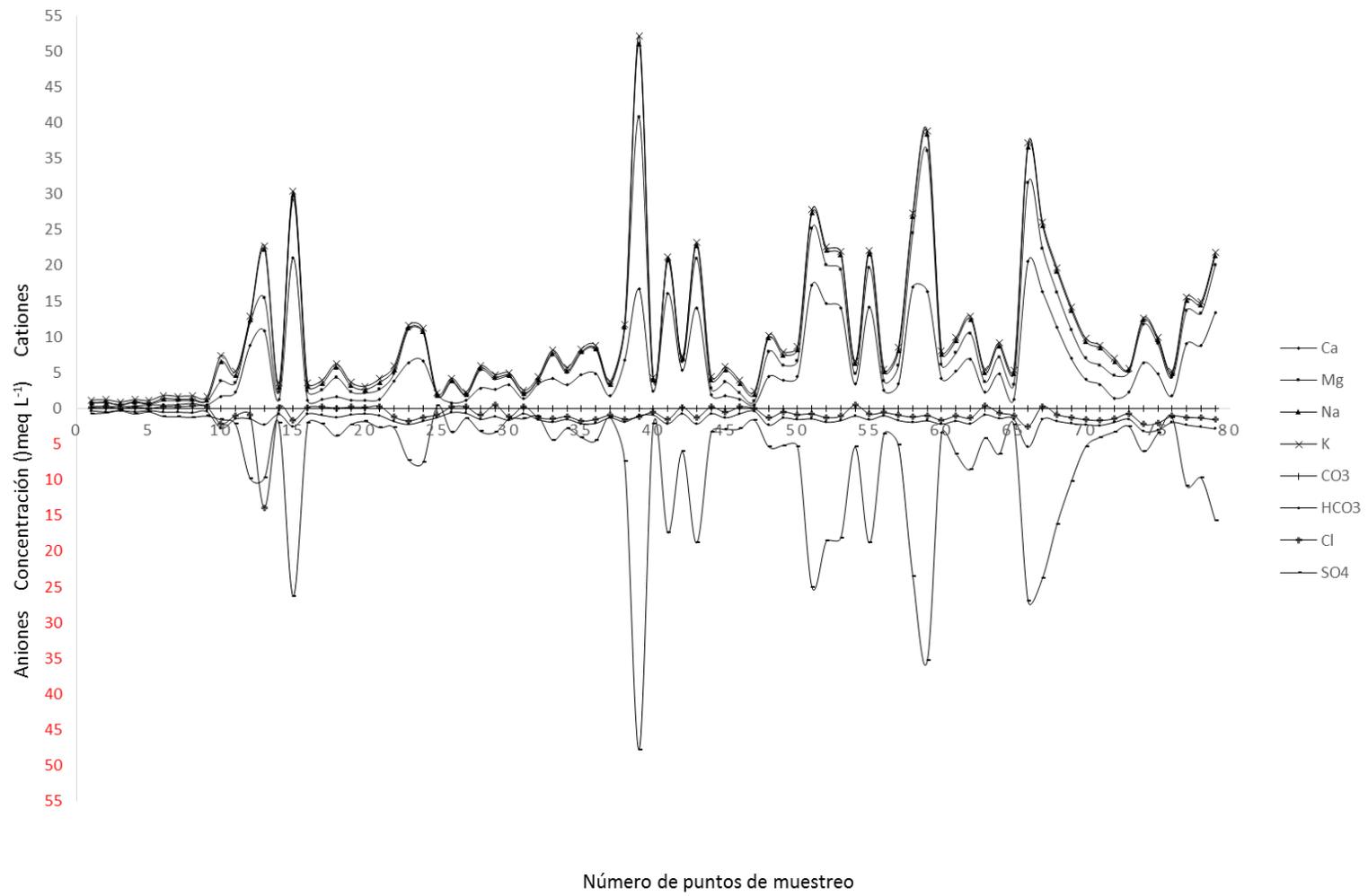


Figura 14. Composición iónica de las aguas del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

5.4. Índice de salinidad

Las mediciones de los diferentes parámetros de contenidos de sales solubles en aguas y soluciones acuosas, son directamente proporcionales con respecto a la conductividad eléctrica CE ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$), sólidos totales disueltos (STD), cationes solubles totales (CST) y aniones solubles totales (AST). Las aguas naturales nunca son puras, todas contienen sustancias disueltas (Kovda, 1973).

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 17 se muestra la clasificación en base a la conductividad eléctrica de las estaciones de muestreo, los resultados indican que el 16.46% están dentro de la clasificación C1 ($\text{CE} < 250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), la cual indica que son aguas de baja salinidad y pueden usarse para riego en la mayoría de los cultivos y casi en cualquier tipo de suelo. El 41.77% son aguas de salinidad media C2 ($\text{CE } 250 - 750 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), pueden usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado y cultivos moderadamente tolerantes a las sales.

El 36.71% son aguas altamente salinas C3 ($\text{CE } 750 - 2250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), 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 5.06% son aguas muy altamente salinas C4 ($\text{CE} > 2250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), 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 encuentran los puntos 13 (Toma de agua Alpuyeca), 15 (Manantial balneario Palo Bolero), 39 (Lago Tequesquitengo) y 66 (Agua Hedionda). El incremento en la conductividad eléctrica se debe a la concentración de iones derivados de la mezcla de agua con drenajes domésticos, industriales y agrícolas.

Ayers y westcot (1987), sugirieron que los cultivos de 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 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, respectivamente. De acuerdo con esto, se pueden utilizar todas las aguas para el riego de sorgo; para el caso del cultivo de arroz se restringe el uso de las estaciones 13, 15, 39, 51, 58, 59, 66 y 67; las aguas de las estaciones anteriores y la 41, 43, 52, 53, 55, 79, no son recomendables para el riego de los cultivos de tomate; para caña de azúcar y maíz las estaciones que pueden ocasionar problemas en su rendimiento son 12, 62, 68, 69, 74, 77, 78 y 79, además de las que se restringen para arroz y tomate. Para el frijol no se pueden usar las estaciones con una CE mayor a 700 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y para cebolla se restringe el uso de las aguas mayor a 800 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

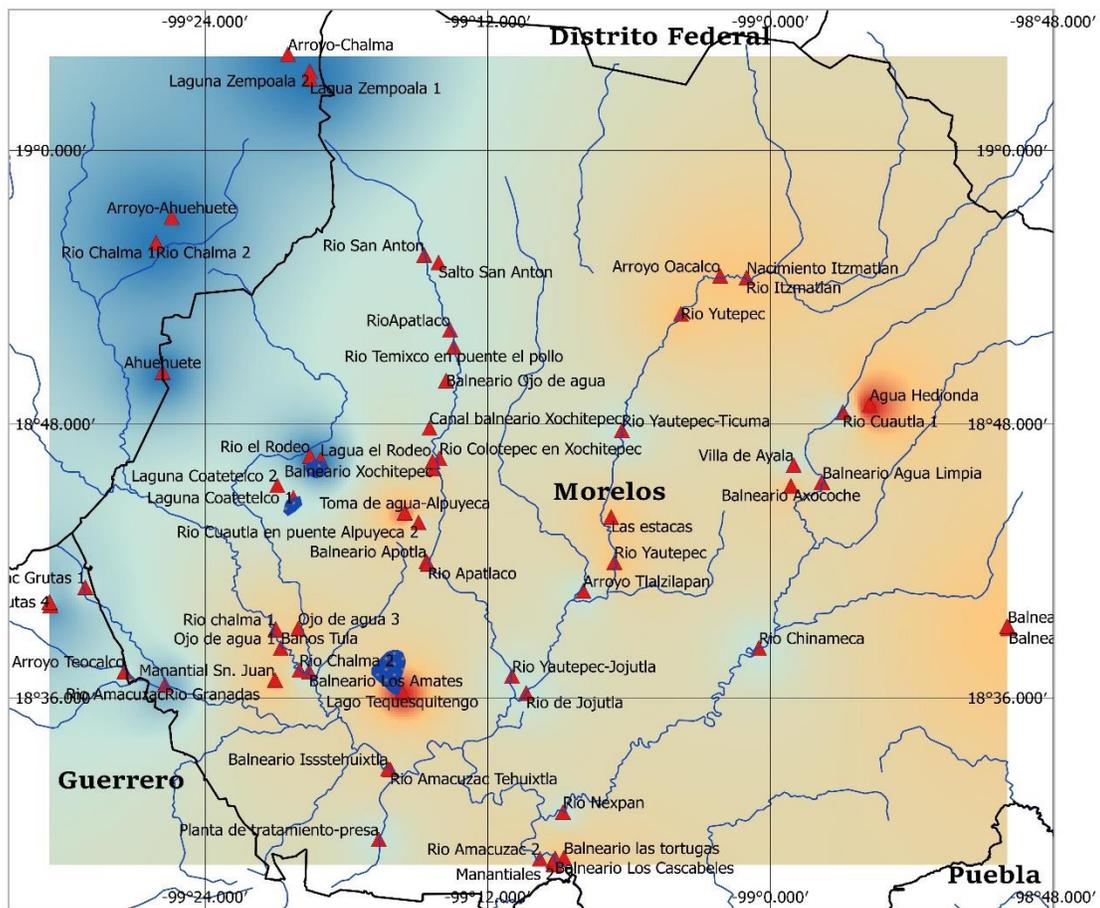
Según Ayers y westcot (1987), las sales del suelo y del agua reducen la disponibilidad del agua a las plantas a tal punto que afectan los rendimientos.

Cuadro 17. Clasificación de las aguas de acuerdo a la salinidad del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, según su CE.

No. De	CE	Clasificación en base a la CE	
Muestra	$\mu\text{S cm}^{-1}$	Tipo	Clasificación
1	81	C1	Aguas de baja salinidad
2	117	C1	Aguas de baja salinidad
3	58	C1	Aguas de baja salinidad
4	105	C1	Aguas de baja salinidad
5	74	C1	Aguas de baja salinidad
6	139	C1	Aguas de baja salinidad
7	139	C1	Aguas de baja salinidad
8	147	C1	Aguas de baja salinidad
9	112	C1	Aguas de baja salinidad
10	700	C2	Agua salinidad media
11	504	C2	Agua salinidad media
12	1200	C3	Aguas altamente salinas
13	2700	C4	Aguas muy altamente salinas
14	319	C2	Agua salinidad media
15	2500	C4	Aguas muy altamente salinas
16	301	C2	Agua salinidad media
17	320	C2	Agua salinidad media
18	568	C2	Agua salinidad media
19	311	C2	Agua salinidad media
20	255	C2	Agua salinidad media
21	353	C2	Agua salinidad media
22	614	C2	Agua salinidad media
23	1100	C3	Aguas altamente salinas
24	1100	C3	Aguas altamente salinas
25	508	C2	Agua salinidad media
26	192	C1	Aguas de baja salinidad
27	205	C1	Aguas de baja salinidad
28	539	C2	Agua salinidad media
29	563	C2	Agua salinidad media
30	524	C2	Agua salinidad media
31	221	C1	Aguas de baja salinidad
32	418	C2	Agua salinidad media
33	836	C3	Aguas altamente salinas
34	530	C2	Agua salinidad media
35	830	C3	Aguas altamente salinas
36	868	C3	Aguas altamente salinas
37	635	C2	Agua salinidad media
38	1100	C3	Aguas altamente salinas
39	4025	C4	Aguas muy altamente salinas
40	404	C2	Agua salinidad media

Continuación...

No. De	CE	Clasificación en base a la CE	
Muestra	$\mu\text{S cm}^{-1}$	Tipo	Clasificación
41	1900	C3	Aguas altamente salinas
42	699	C2	Agua salinidad media
43	2000	C3	Aguas altamente salinas
44	318	C2	Agua salinidad media
45	450	C2	Agua salinidad media
46	286	C2	Agua salinidad media
47	115	C1	Aguas de baja salinidad
48	857	C3	Aguas altamente salinas
49	693	C2	Agua salinidad media
50	702	C2	Agua salinidad media
51	2200	C3	Aguas altamente salinas
52	1800	C3	Aguas altamente salinas
53	1800	C3	Aguas altamente salinas
54	517	C2	Agua salinidad media
55	1900	C3	Aguas altamente salinas
56	420	C2	Agua salinidad media
57	705	C2	Agua salinidad media
58	2200	C3	Aguas altamente salinas
59	2150	C3	Aguas altamente salinas
60	663	C2	Agua salinidad media
61	816	C3	Aguas altamente salinas
62	1200	C3	Aguas altamente salinas
63	431	C2	Agua salinidad media
64	770	C3	Aguas altamente salinas
65	397	C2	Agua salinidad media
66	3200	C4	Aguas muy altamente salinas
67	2100	C3	Aguas altamente salinas
68	1700	C3	Aguas altamente salinas
69	1200	C3	Aguas altamente salinas
70	835	C3	Aguas altamente salinas
71	756	C3	Aguas altamente salinas
72	515	C2	Agua salinidad media
73	576	C2	Agua salinidad media
74	1400	C3	Aguas altamente salinas
75	1100	C3	Aguas altamente salinas
76	536	C2	Agua salinidad media
77	1500	C3	Aguas altamente salinas
78	1400	C3	Aguas altamente salinas
79	2000	C3	Aguas altamente salinas



SIMBOLOGÍA

- Estados
- ▲ Datos para mostrar
- Cuerpos de agua
- Corrientes de agua
- C1 Baja Salinidad
- C2 Media Salinidad
- C3 Altamente Salina
- C4 Muy Altamente Salina



Figura 15. Mapa de distribución de la calidad del agua con base a la clasificación, de la red hidrográfica del estado de Morelos.

Ayers y Wescot (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 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y en cuanto a los sólidos totales disueltos 450 y 2000 mg L^{-1} .

En el Cuadro 18 contiene los resultados del muestreo de acuerdo a la conductividad eléctrica, estos indican que el 54.43% no tiene ningún grado de restricción para su uso, el 43.04% presentan restricción de ligera a moderada y 2.53% muestran un severo grado de restricción para su uso; los puntos que presentan grado severo de restricción son 39 que corresponde al Lago Tequesquitengo y 66 que corresponde a Agua Hedionda. Para el caso de los Sólidos Totales Disueltos, los porcentajes coinciden con los de la CE, al igual que los puntos que presentan grado de restricción severo.

Según Ayers y Wescot (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 las estaciones 39 y 66.

Cuadro 18. Clasificación de las aguas del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos, de acuerdo a la salinidad y grado de restricción para su uso.

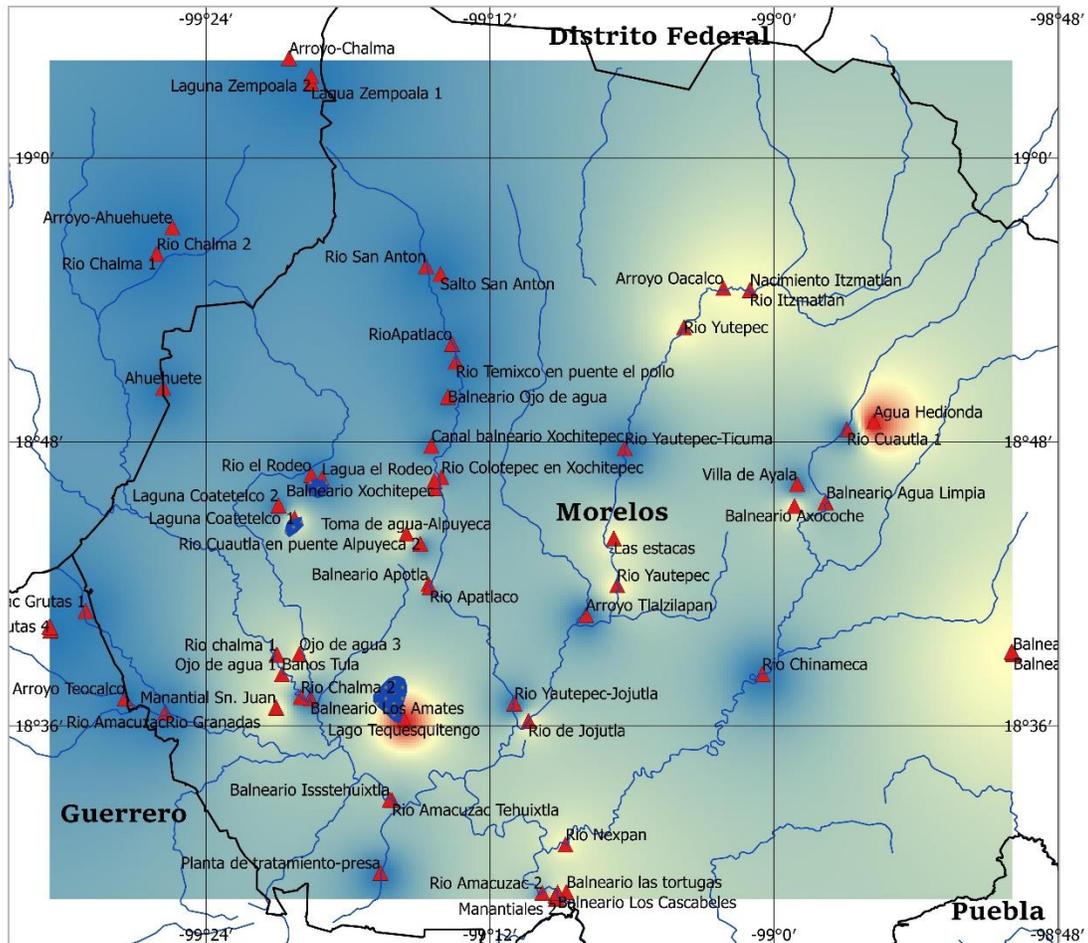
No.	Directrices para interpretar las calidades de las aguas de riego			
	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	STD (mg L^{-1})	Grados de restricción de uso para CE	Grado de restricción de uso para STD
1	81	54	Ninguna	Ninguna
2	117	62	Ninguna	Ninguna
3	58	38	Ninguna	Ninguna
4	105	66	Ninguna	Ninguna
5	74	44	Ninguna	Ninguna
6	139	92	Ninguna	Ninguna
7	139	93	Ninguna	Ninguna
8	147	100	Ninguna	Ninguna
9	112	80	Ninguna	Ninguna
10	700	440	Ligera a moderada	Ninguna
11	504	300	Ninguna	Ninguna
12	1200	770	Ligera a moderada	Ligera a moderada
13	2700	1730	Ligera a moderada	Ligera a moderada
14	319	200	Ninguna	Ninguna
15	2500	1645	Ligera a moderada	Ligera a moderada
16	301	230	Ninguna	Ninguna
17	320	194	Ninguna	Ninguna
18	568	396	Ninguna	Ninguna
19	311	208	Ninguna	Ninguna
20	255	186	Ninguna	Ninguna
21	353	232	Ninguna	Ninguna
22	614	408	Ninguna	Ninguna
23	1100	748	Ligera a moderada	Ligera a moderada
24	1100	743	Ligera a moderada	Ligera a moderada
25	508	312	Ninguna	Ninguna
26	192	158	Ninguna	Ninguna
27	205	154	Ninguna	Ninguna
28	539	314	Ninguna	Ninguna
29	563	312	Ninguna	Ninguna
30	524	304	Ninguna	Ninguna
31	221	150	Ninguna	Ninguna
32	418	235	Ninguna	Ninguna
33	836	494	Ligera a moderada	Ligera a moderada
34	530	378	Ninguna	Ninguna

Continuación...

Directrices para interpretar las calidades de las aguas de riego				
No.	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	STD (mg L^{-1})	Grados de restricción de uso para CE	Grado de restricción de uso para STD
35	830	508	Ligera a moderada	Ligera a moderada
36	868	558	Ligera a moderada	Ligera a moderada
37	635	387	Ninguna	Ninguna
38	1100	755	Ligera a moderada	Ligera a moderada
39	4025	2574	Severa	Severa
40	404	312	Ninguna	Ninguna
41	1900	1203	Ligera a moderada	Ligera a moderada
42	699	487	Ninguna	Ligera a moderada
43	2000	1259	Ligera a moderada	Ligera a moderada
44	318	246	Ninguna	Ninguna
45	450	328	Ninguna	Ninguna
46	286	250	Ninguna	Ninguna
47	115	125	Ninguna	Ninguna
48	857	592	Ligera a moderada	Ligera a moderada
49	693	467	Ninguna	Ligera a moderada
50	702	412	Ligera a moderada	Ninguna
51	2200	1398	Ligera a moderada	Ligera a moderada
52	1800	1142	Ligera a moderada	Ligera a moderada
53	1800	1139	Ligera a moderada	Ligera a moderada
54	517	392	Ninguna	Ninguna
55	1900	1283	Ligera a moderada	Ligera a moderada
56	420	316	Ninguna	Ninguna
57	705	415	Ligera a moderada	Ninguna
58	2200	1421	Ligera a moderada	Ligera a moderada
59	2150	1352	Ligera a moderada	Ligera a moderada
60	663	456	Ninguna	Ligera a moderada
61	816	533	Ligera a moderada	Ligera a moderada
62	1200	723	Ligera a moderada	Ligera a moderada
63	431	216	Ninguna	Ninguna
64	770	453	Ligera a moderada	Ligera a moderada
65	397	248	Ninguna	Ninguna
66	3200	2004	Severa	Severa
67	2100	1325	Ligera a moderada	Ligera a moderada
68	1700	1113	Ligera a moderada	Ligera a moderada

Continuación...

No.	Directrices para interpretar las calidades de las aguas de riego			
	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	STD (mg L^{-1})	Grados de restricción de uso para CE	Grado de restricción de uso para STD
69	1200	749	Ligera a moderada	Ligera a moderada
70	835	512	Ligera a moderada	Ligera a moderada
71	756	453	Ligera a moderada	Ligera a moderada
72	515	301	Ninguna	Ninguna
73	576	342	Ninguna	Ninguna
74	1400	856	Ligera a moderada	Ligera a moderada
75	1100	698	Ligera a moderada	Ligera a moderada
76	536	321	Ninguna	Ninguna
77	1500	943	Ligera a moderada	Ligera a moderada
78	1400	873	Ligera a moderada	Ligera a moderada
79	2000	1250	Ligera a moderada	Ligera a moderada

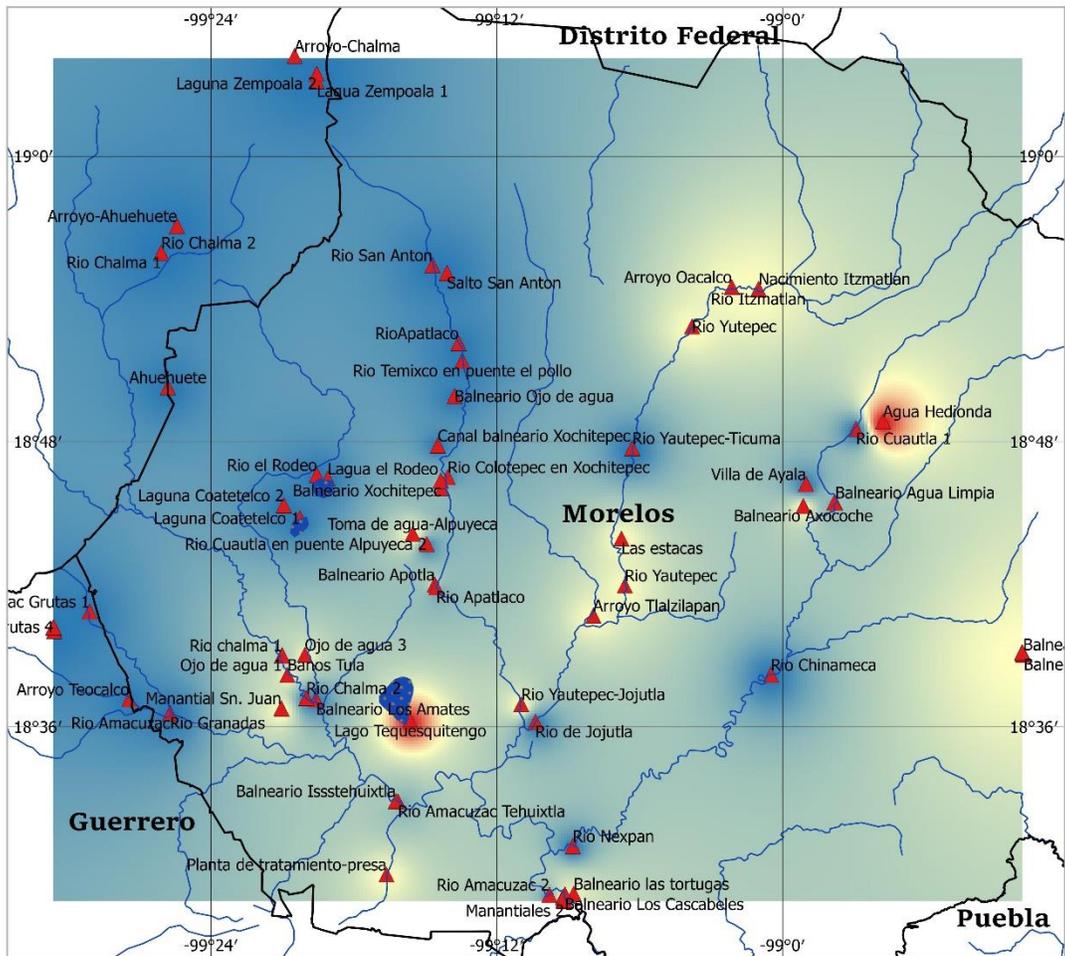


SIMBOLOGÍA

- Estados
- ▲ Puntos de Muestreo
- Cuerpos de agua
- Corrientes de agua
- Nunguna Restricción
- Restricción Ligera a Moderada
- Severa Restricción



Figura 16. Mapa de distribución de la calidad del agua en base a la CE de la red hidrográfica del estado de Morelos.



SIMBOLOGÍA

- | | |
|--------------------|-------------------------------|
| Estados | Ninguna Restricción |
| Puntos de Muestreo | Restricción Ligera a Moderada |
| Cuerpos de agua | Severa Restricción |
| Corrientes de agua | |



Figura 17. Mapa de distribución de la calidad del agua en base a los sólidos disueltos de la red hidrográfica del estado de Morelos.

5.5. Índice de salinidad efectiva

El criterio de salinidad toma en cuenta que se precipitarán todos los CO_3^{2-} , HCO_3^- y SO_4^{2-} 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 conocen mejor los peligros de las sales que se encuentra en solución.

El cuadro 19 muestra los resultados de las estaciones del muestro respecto a este índice (SE). Dentro de la clasificación de buena calidad para el uso en el riego se encuentra el 39.24% de los puntos las cuales no representan peligro para su uso, ya que el contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+} es mayor que el contenido de CO_3^{2-} y SO_4^{2-} ; el 55.70% está dentro del tipo de agua condicionada para su uso, las cuales pueden mezclarse con las sales del suelo ocasionando severos problemas a los cultivos y a los suelos; y el 5.06% no se recomienda su uso.

Cuadro 19. Clasificación de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos, con base a su salinidad efectiva.

No.	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación
1	0.85	Buena
2	0.92	Buena
3	0.61	Buena
4	0.94	Buena
5	0.62	Buena
6	1.27	Buena
7	1.14	Buena
8	1.05	Buena
9	1.13	Buena
10	4.59	Condicionada
11	2.90	Buena
12	4.04	Condicionada
13	16.34	No recomendable
14	2.31	Buena
15	9.36	Condicionada
16	2.46	Buena
17	2.70	Buena
18	4.66	Condicionada
19	2.52	Buena
20	2.01	Buena
21	2.84	Buena
22	2.12	Buena
23	5.26	Condicionada
24	4.56	Condicionada
25	0.40	Buena
26	3.45	Condicionada
27	1.19	Buena
28	3.08	Condicionada
29	2.11	Buena
30	1.73	Buena
31	1.20	Buena
32	1.03	Buena
33	4.01	Condicionada
34	2.41	Buena
35	3.65	Condicionada
36	3.90	Condicionada
37	2.06	Buena

Continuación...

No.	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación
38	5.10	Condicionada
39	35.43	No recomendable
40	1.95	Buena
41	5.15	Condicionada
42	1.90	Buena
43	9.11	Condicionada
44	2.52	Buena
45	4.07	Condicionada
46	2.63	Buena
47	1.83	Buena
48	5.82	Condicionada
49	3.97	Condicionada
50	4.28	Condicionada
51	10.49	Condicionada
52	7.90	Condicionada
53	7.85	Condicionada
54	3.26	Condicionada
55	7.98	Condicionada
56	3.00	Buena
57	5.14	Condicionada
58	10.43	Condicionada
59	22.38	No recomendable
60	3.82	Condicionada
61	4.70	Condicionada
62	6.02	Condicionada
63	3.21	Condicionada
64	4.40	Condicionada
65	3.85	Condicionada
66	16.62	No recomendable
67	9.74	Condicionada
68	8.33	Condicionada
69	7.25	Condicionada
70	5.77	Condicionada
71	5.50	Condicionada
72	5.05	Condicionada
73	3.27	Condicionada

Continuación...

No.	Índice de Salinidad Efectiva	Clasificación
74	6.29	Condicionada
75	5.14	Condicionada
76	3.27	Condicionada
77	6.52	Condicionada
78	6.16	Condicionada
79	8.42	Condicionada

5.6. Índice de salinidad potencial

El criterio de salinidad potencial se basa en la consideración de que las sales que se precipitarán serán los CO_3^{2-} y HCO_3 , pero sólo parte de los SO_4^{2-} , principalmente CaSO_4 y permanecerán solubles NaSO_4 , K_2SO_4 y MgSO_4 (Donnen, 1975). 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 (Ramírez, 2009).

Los resultados del muestreo de este índice, se muestra en el Cuadro 20, los cuales indican que el 49.37% están clasificadas como aguas buenas para riego, el 45.57% son condicionadas y el 5.06% no se recomiendan para su uso sobre suelos y cultivos en los que se van a aplicar estas aguas.

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

Cuadro 20. Clasificación de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos, en base a su salinidad potencial.

No.	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación Salinidad Potencial
1	0.50	Buena
2	0.47	Buena
3	0.45	Buena
4	0.51	Buena
5	0.52	Buena
6	0.72	Buena
7	0.77	Buena
8	0.69	Buena
9	0.67	Buena
10	2.51	Buena
11	2.09	Buena
12	5.90	Condicionada
13	18.25	No recomendable
14	1.70	Buena
15	14.87	Condicionada
16	1.64	Buena
17	1.73	Buena
18	3.13	Condicionada
19	1.75	Buena
20	1.45	Buena
21	1.91	Buena
22	2.62	Buena
23	4.99	Condicionada
24	4.97	Condicionada
25	0.65	Buena
26	2.00	Buena
27	1.10	Buena
28	2.69	Buena
29	2.17	Buena
30	1.80	Buena
31	1.12	Buena
32	1.55	Buena
33	3.40	Condicionada
34	2.39	Buena
35	3.32	Condicionada
36	3.60	Condicionada

Continuación...

No.	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación Salinidad Potencial
37	1.46	Buena
38	4.84	Condicionada
39	26.67	No recomendable
40	1.79	Buena
41	10.12	Condicionada
42	3.57	Condicionada
43	10.99	Condicionada
44	2.15	Buena
45	2.56	Buena
46	1.89	Buena
47	1.24	Buena
48	4.40	Condicionada
49	3.71	Condicionada
50	3.80	Condicionada
51	13.59	Condicionada
52	10.59	Condicionada
53	10.25	Condicionada
54	3.09	Condicionada
55	10.62	Condicionada
56	2.51	Buena
57	3.80	Condicionada
58	13.10	Condicionada
59	18.90	No recomendable
60	3.16	Condicionada
61	4.41	Condicionada
62	5.76	Condicionada
63	2.53	Buena
64	4.32	Condicionada
65	2.15	Buena
66	17.66	No recomendable
67	13.06	Condicionada
68	9.50	Condicionada
69	6.60	Condicionada
70	4.18	Condicionada
71	3.57	Condicionada
72	2.88	Buena

Continuación...

No.	Índice de Salinidad Potencial	Clasificación Salinidad Potencial
73	2.41	Buena
74	5.10	Condicionada
75	3.79	Condicionada
76	2.06	Buena
77	7.15	Condicionada
78	6.80	Condicionada
79	9.95	Condicionada

5.7. Clasificación de las aguas en base a la sodicidad

Se utilizaron las diferentes formulaciones de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), tomando en cuenta la precipitación del Ca^{2+} en forma de CO_3^{2-} , ya que la cantidad del Ca^{2+} precipitado varía de acuerdo al pH y la temperatura.

El proceso de sodificación en los suelos se presenta por el uso de aguas con altos contenidos de Na^+ , particularmente en zonas áridas, donde se presenta el caso de una precipitación pluviométrica limitada y una evaporación alta (Jalali *et al.*, 2008). El peligro de la sodificación queda determinado por las concentraciones absolutas y relativas de los cationes que se encuentran en la solución (Richards *et al.*, 1973; Costa, 1999; Pereira *et al.*, 2008). Es importante mencionar, que los niveles de sodificación que adquieren los diferentes suelos que son regados con aguas de distintas relaciones catiónicas dependerán de los valores de los distintos RAS.

En el Cuadro 21 se presentan los resultados de la clasificación del RAS Original, Ras ajustado y Ras corregido. Así mismo en las Figuras 18, 19 y 20 se presenta el diagrama de clasificación de las aguas para riego de acuerdo con Richards *et al.*, (1959) con base a la CE y RAS. El RAS original se encuentra en la Figura 18, el RAS ajustado en la Figura 19 y el RAS corregido en la Figura 20. El 100% de las muestras para los tres tipos de RAS, se encuentran en la clasificación S1; esta clasificación 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.

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

Cuando se riega con aguas de RAS elevado no se debe permitir que el suelo seque, debido a que se precipitarán los $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ y $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, y posteriormente el $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$, de esta manera la solución edáfica perderá los cationes alcalinotérreos con lo que el RAS se

elevará y parte del Na^+ 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).

Alto niveles de RAS puede afectar directamente la nutrición de la planta por deficiencias de Ca^{2+} y Mg^{2+} (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 21. Clasificación de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos, con base a la sodicidad.

No.	Clasificación en base al RAS					
	RAS original	Tipo	RAS ajustado	Tipo	RAS corregido	Tipo
1	0.000	S1	0.000	S1	0.000	S1
2	0.000	S1	0.000	S1	0.000	S1
3	0.000	S1	0.000	S1	0.000	S1
4	0.155	S1	0.095	S1	0.103	S1
5	0.183	S1	0.028	S1	0.082	S1
6	0.408	S1	0.321	S1	0.288	S1
7	0.273	S1	0.213	S1	0.186	S1
8	0.268	S1	0.233	S1	0.184	S1
9	0.283	S1	0.184	S1	0.187	S1
10	1.954	S1	3.972	S1	1.999	S1
11	0.820	S1	1.433	S1	0.775	S1
12	0.184	S1	0.383	S1	0.203	S1
13	2.469	S1	5.675	S1	2.883	S1
14	0.699	S1	0.912	S1	0.548	S1
15	0.196	S1	0.493	S1	0.247	S1
16	0.639	S1	0.827	S1	0.522	S1
17	0.789	S1	1.123	S1	0.667	S1
18	1.023	S1	1.748	S1	0.942	S1
19	0.839	S1	1.117	S1	0.686	S1
20	0.482	S1	0.591	S1	0.371	S1
21	0.869	S1	1.257	S1	0.741	S1
22	0.398	S1	0.782	S1	0.419	S1
23	0.085	S1	0.193	S1	0.093	S1
24	0.065	S1	0.140	S1	0.070	S1
25	0.000	S1	0.000	S1	0.000	S1
26	0.148	S1	0.190	S1	0.126	S1
27	0.104	S1	0.120	S1	0.078	S1
28	0.171	S1	0.326	S1	0.167	S1
29	0.210	S1	0.353	S1	0.189	S1
30	0.135	S1	0.255	S1	0.137	S1
31	0.150	S1	0.183	S1	0.112	S1
32	0.035	S1	0.065	S1	0.036	S1
33	0.155	S1	0.327	S1	0.164	S1
34	0.190	S1	0.359	S1	0.189	S1
35	0.076	S1	0.165	S1	0.083	S1

Continuación...

Clasificación en base al RAS						
No.	RAS original	Tipo	RAS ajustado	Tipo	RAS corregido	Tipo
36	0.099	S1	0.215	S1	0.109	S1
37	0.118	S1	0.199	S1	0.107	S1
38	0.042	S1	0.092	S1	0.045	S1
39	2.283	S1	4.843	S1	2.248	S1
40	0.000	S1	0.000	S1	0.000	S1
41	0.093	S1	0.222	S1	0.120	S1
42	0.277	S1	0.435	S1	0.247	S1
43	0.555	S1	1.321	S1	0.662	S1
44	1.066	S1	1.362	S1	0.850	S1
45	1.250	S1	2.114	S1	1.157	S1
46	1.366	S1	1.613	S1	1.016	S1
47	1.414	S1	0.000	S1	0.874	S1
48	0.996	S1	2.182	S1	1.079	S1
49	0.828	S1	1.536	S1	0.822	S1
50	0.877	S1	1.715	S1	0.902	S1
51	0.606	S1	1.341	S1	0.616	S1
52	0.631	S1	1.459	S1	0.778	S1
53	0.674	S1	1.515	S1	0.821	S1
54	0.936	S1	1.560	S1	0.854	S1
55	0.637	S1	1.409	S1	0.709	S1
56	0.943	S1	1.487	S1	0.831	S1
57	1.184	S1	2.317	S1	1.205	S1
58	0.685	S1	1.611	S1	0.801	S1
59	0.554	S1	1.307	S1	0.607	S1
60	0.859	S1	1.802	S1	0.940	S1
61	0.864	S1	1.773	S1	0.937	S1
62	0.873	S1	1.935	S1	0.987	S1
63	0.956	S1	1.434	S1	0.818	S1
64	0.843	S1	1.625	S1	0.866	S1
65	1.246	S1	2.133	S1	1.136	S1
66	1.298	S1	3.665	S1	1.774	S1
67	0.971	S1	2.152	S1	1.135	S1
68	1.052	S1	2.343	S1	1.198	S1
69	1.197	S1	2.650	S1	1.349	S1
70	1.314	S1	2.803	S1	1.404	S1

Continuación...

No.	Clasificación en base al RAS					
	RAS original	Tipo	RAS ajustado	Tipo	RAS corregido	Tipo
72	1.286	S1	2.500	S1	1.268	S1
73	0.252	S1	0.475	S1	0.250	S1
74	0.268	S1	0.654	S1	0.310	S1
75	0.283	S1	0.667	S1	0.318	S1
76	0.375	S1	0.736	S1	0.366	S1
77	0.535	S1	1.244	S1	0.623	S1
78	0.465	S1	1.102	S1	0.556	S1
79	0.443	S1	1.106	S1	0.548	S1

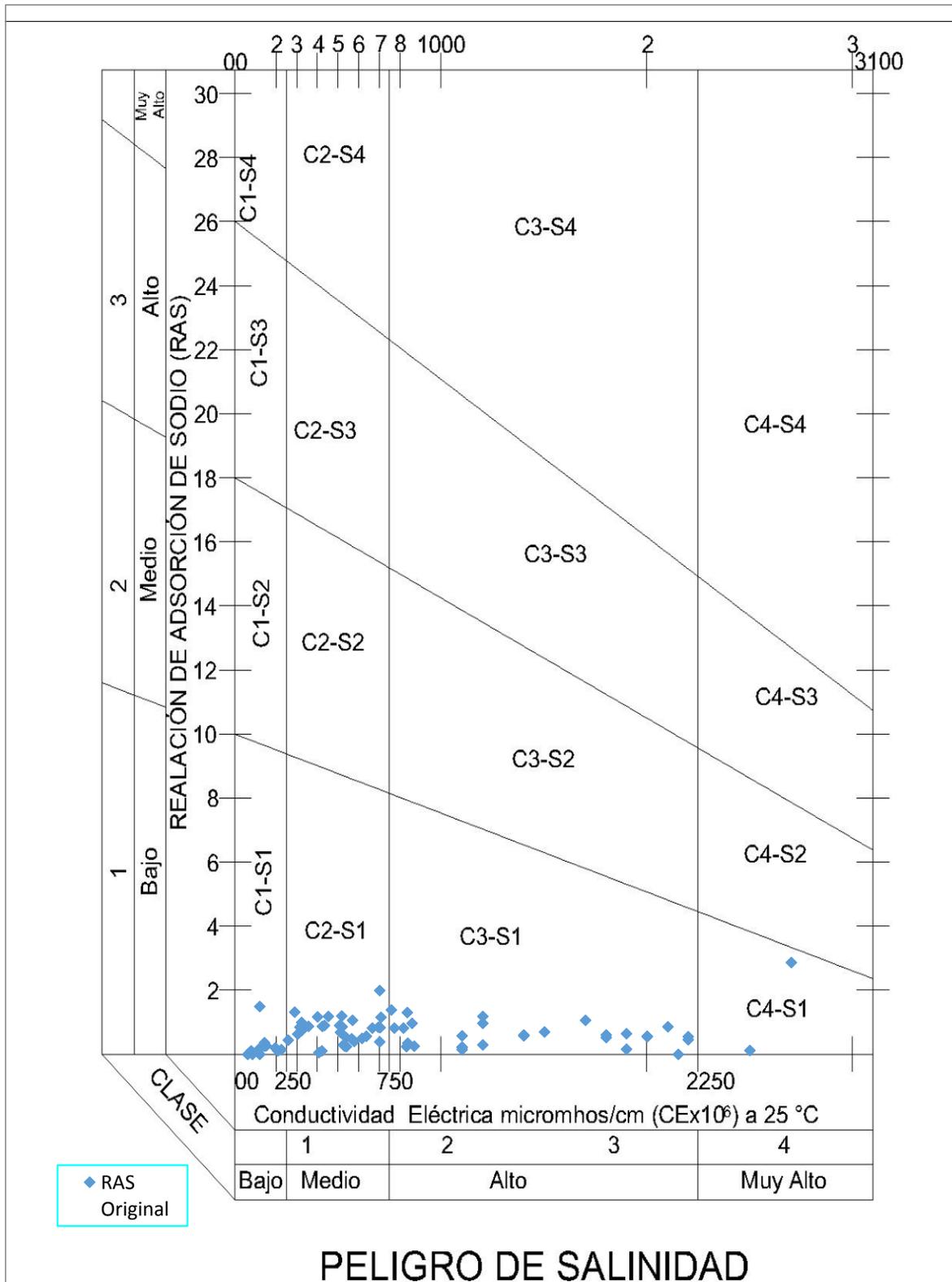


Figura 18. Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards *et al.* (1959), de la red hidrográfica del estado de Morelos (RAS Original).

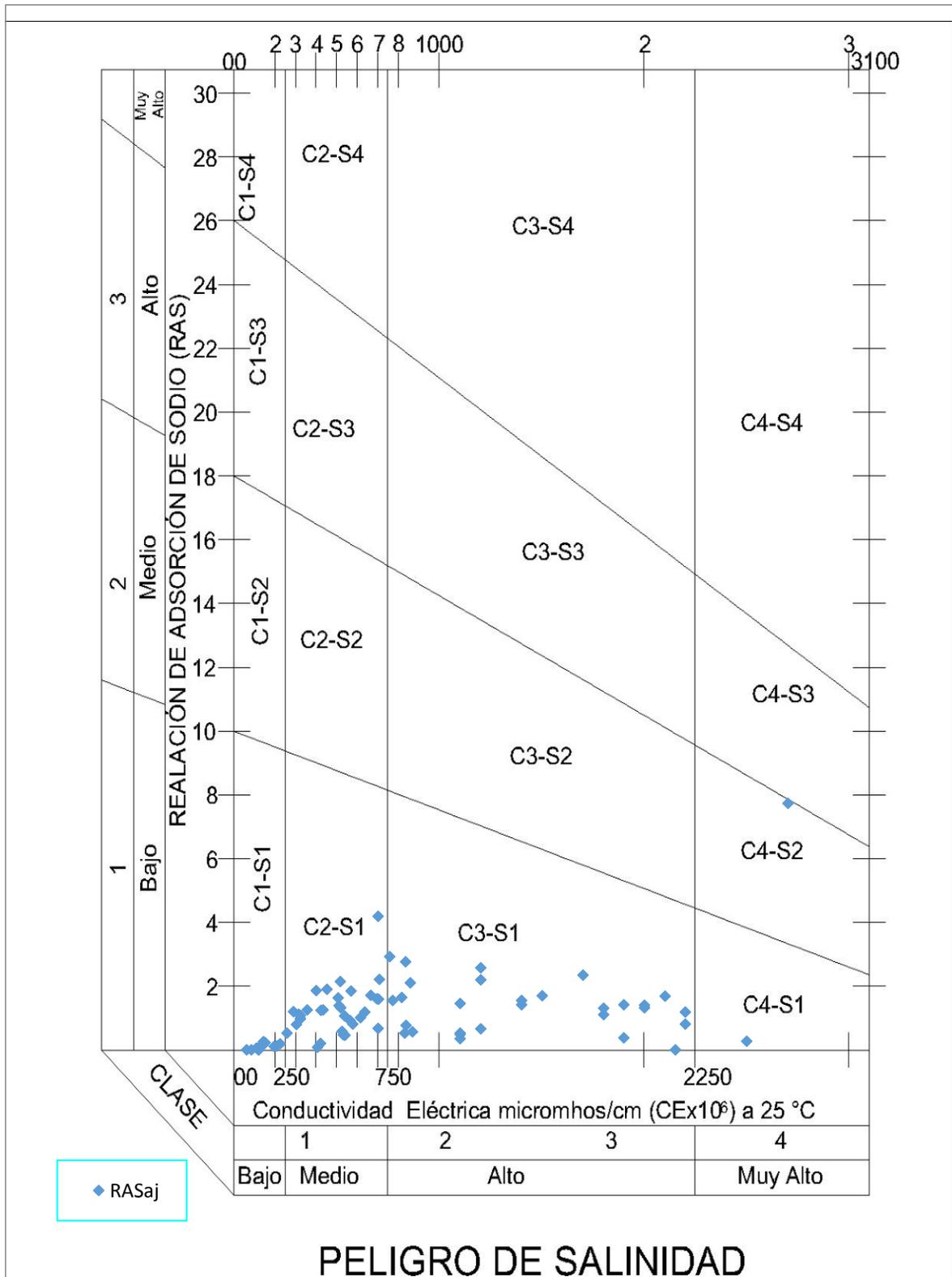


Figura 19. Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards *et al.* (1959), de la red hidrográfica del estado de Morelos (RASaj).

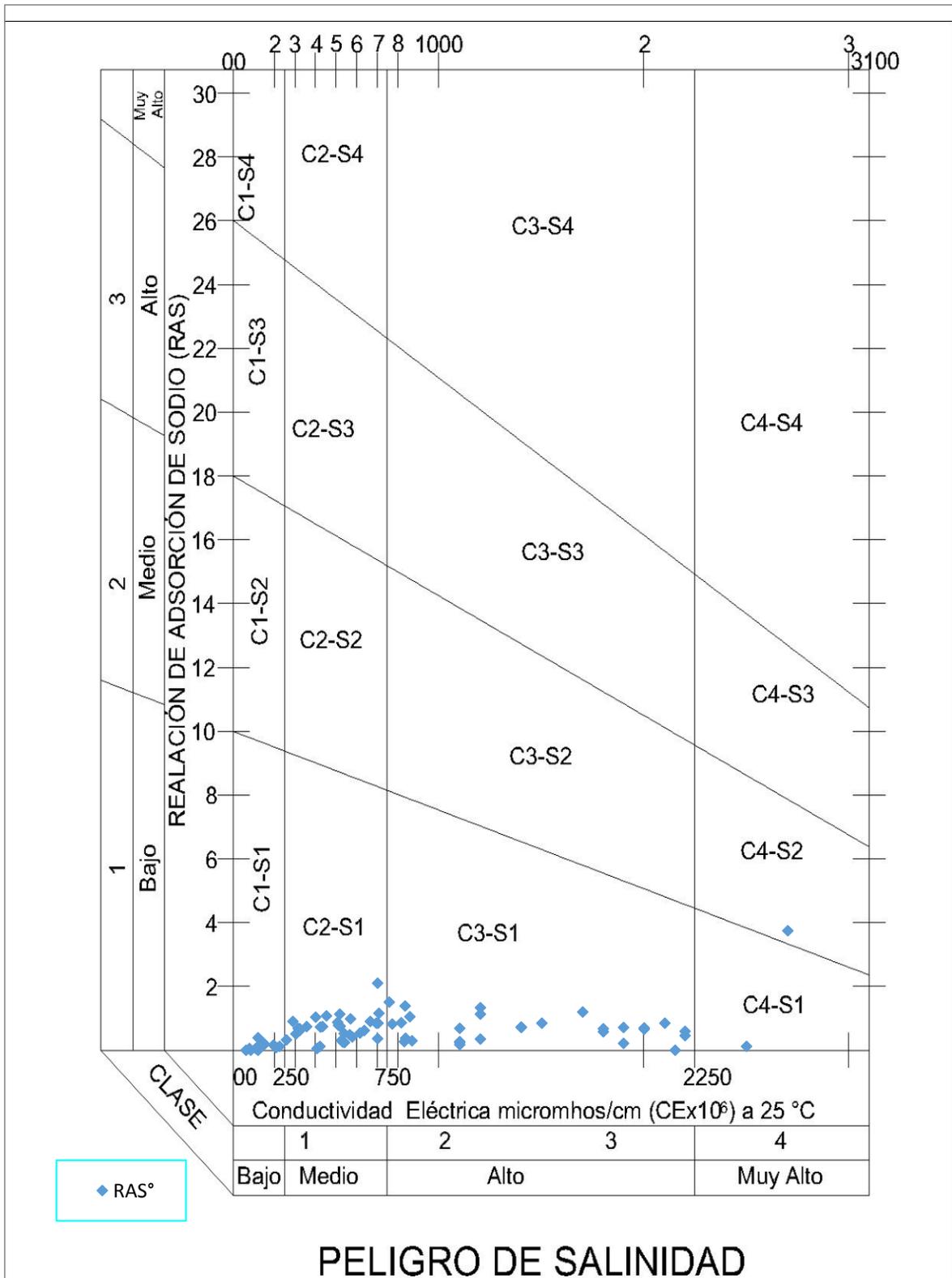


Figura 20. Diagrama de clasificación de las aguas para riego citada por Richards *et al.* (1959), de la red hidrográfica del estado de Morelos (RAS°).

5.8. Porcentaje de sodio encontrado

El peligro de desplazamiento del Ca^{2+} y Mg^{2+} por el Na^+ en el complejo de intercambio catiónico, empieza cuando el contenido de Na^+ en solución presenta más de la mitad de los cationes disueltos, y como la cantidad de Na^+ en la solución del agua de riego no es suficiente para desplazar el calcio y al magnesio, después de que se precipitan los carbonatos de calcio y magnesio, así como sulfatos de calcio, se puede estimar el porcentaje de sodio encontrado pues de esta manera se incrementa el contenido de Na^+ en una solución.

En el Cuadro 22 se aprecian los resultados de las estaciones de muestreo, para este índice el 54.43% de las aguas tendrá poca probabilidad de generar suelos sódicos y el 45.57% tiene probabilidad de formar suelos sódicos.

Las aguas residuales presentan altas concentraciones de Na^+ en comparación con otros cationes, lo cual concuerda con los resultados obtenidos del presente estudio, ya que las muestras que contienen mayor cantidad de Na^+ son aquellas que fueron tomadas en cauces de ríos, arroyos y lagunas, que han recibido las descargas de aguas residuales de los poblados e industrias más próximos (Heidarpour *et al.*, 2007; Bhardwaj *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2009).

Cuadro 22. Efecto posible del porcentaje de sodio encontrado de las aguas del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Porcentaje de Na encontrado	Clasificación	No.	Porcentaje de Na encontrado	Clasificación
1	0.00	No hay problema de suelo sódicos	41	1.44	No hay problema de suelo sódicos
2	0.00	No hay problema de suelo sódicos	42	7.14	No hay problema de suelo sódicos
3	0.00	No hay problema de suelo sódicos	43	7.89	No hay problema de suelo sódicos
4	10.75	No hay problema de suelo sódicos	44	31.25	Probabilidad de suelo sódicos
5	14.29	No hay problema de suelo sódicos	45	31.48	Probabilidad de suelo sódicos
6	21.74	Probabilidad de suelo sódicos	46	40.00	Probabilidad de suelo sódicos
7	15.75	Probabilidad de suelo sódicos	47	50.00	Probabilidad de suelo sódicos
8	15.27	Probabilidad de suelo sódicos	48	20.04	Probabilidad de suelo sódicos
9	16.67	Probabilidad de suelo sódicos	49	19.23	Probabilidad de suelo sódicos
10	41.41	Probabilidad de suelo sódicos	50	19.39	Probabilidad de suelo sódicos
11	23.40	Probabilidad de suelo sódicos	51	7.86	No hay problema de suelo sódicos
12	3.63	No hay problema de suelo sódicos	52	9.05	No hay problema de suelo sódicos
13	30.79	Probabilidad de suelo sódicos	53	9.77	No hay problema de suelo sódicos
14	24.59	Probabilidad de suelo sódicos	54	23.20	Probabilidad de suelo sódicos
15	2.50	No hay problema de suelo sódicos	55	9.22	No hay problema de suelo sódicos
16	22.58	Probabilidad de suelo sódicos	56	25.49	Probabilidad de suelo sódicos
17	25.71	Probabilidad de suelo sódicos	57	25.47	Probabilidad de suelo sódicos
18	25.86	Probabilidad de suelo sódicos	58	8.91	No hay problema de suelo sódicos
19	28.13	Probabilidad de suelo sódicos	59	6.13	No hay problema de suelo sódicos
20	18.87	Probabilidad de suelo sódicos	60	19.74	Probabilidad de suelo sódicos
21	27.40	Probabilidad de suelo sódicos	61	17.99	Probabilidad de suelo sódicos
22	11.33	No hay problema de suelo sódicos	62	16.00	Probabilidad de suelo sódicos
23	1.78	No hay problema de suelo sódicos	63	26.00	Probabilidad de suelo sódicos
24	1.39	No hay problema de suelo sódicos	64	18.18	Probabilidad de suelo sódicos
25	0.00	No hay problema de suelo sódicos	65	32.65	Probabilidad de suelo sódicos
26	5.19	No hay problema de suelo sódicos	66	14.05	No hay problema de suelo sódicos
27	5.13	No hay problema de suelo sódicos	67	12.67	No hay problema de suelo sódicos
28	4.97	No hay problema de suelo sódicos	68	15.58	Probabilidad de suelo sódicos
29	6.82	No hay problema de suelo sódicos	69	20.36	Probabilidad de suelo sódicos
30	4.35	No hay problema de suelo sódicos	70	26.06	Probabilidad de suelo sódicos
31	6.98	No hay problema de suelo sódicos	71	28.40	Probabilidad de suelo sódicos
32	1.23	No hay problema de suelo sódicos	72	29.77	Probabilidad de suelo sódicos
33	3.87	No hay problema de suelo sódicos	73	7.34	No hay problema de suelo sódicos
34	5.66	No hay problema de suelo sódicos	74	5.24	No hay problema de suelo sódicos
35	1.89	No hay problema de suelo sódicos	75	6.25	No hay problema de suelo sódicos
36	2.38	No hay problema de suelo sódicos	76	11.34	No hay problema de suelo sódicos
37	4.41	No hay problema de suelo sódicos	77	9.27	No hay problema de suelo sódicos
38	0.88	No hay problema de suelo sódicos	78	8.28	No hay problema de suelo sódicos
39	20.20	Probabilidad de suelo sódicos	79	6.54	No hay problema de suelo sódicos
40	0.00	No hay problema de suelo sódicos			

5.9. Porcentaje de sodio posible

En el Cuadro 23 se aprecian los resultados de las estaciones de muestreo, el 6.33% de las muestras analizadas tienen una clasificación “Buena” y el 93.67% están “Condicionadas”, esto significa que se debe tener mucho cuidado en el tipo de agua que se empleará para el riego y en la selección de los tipos de cultivos.

Las muestras que están dentro de la categoría condicionadas, proceden mayormente de cauces de ríos donde existe fuerte actividad antropogénica, lo cual significa que el aporte de aguas de drenaje a los cauces naturales tiene una gran importancia para la presencia de Na^+ en las aguas.

Cuadro 23. Porcentaje de sodio posible de las aguas del muestreo de la red hidrográfica del Estado de Morelos.

No.	Porcentaje de Na posible	Clasificación	No.	Porcentaje de Na posible	Clasificación
1	0.00	Buena	41	1.60	Condicionada
2	0.00	Buena	42	7.99	Condicionada
3	0.00	Buena	43	8.73	Condicionada
4	21.74	Condicionada	44	38.23	Condicionada
5	24.39	Condicionada	45	41.77	Condicionada
6	35.71	Condicionada	46	50.72	Condicionada
7	27.03	Condicionada	47	62.11	Condicionada
8	28.17	Condicionada	48	26.33	Condicionada
9	26.67	Condicionada	49	23.45	Condicionada
10	72.39	Condicionada	50	23.95	Condicionada
11	34.06	Condicionada	51	8.30	Condicionada
12	4.11	Condicionada	52	9.92	Condicionada
13	34.30	Condicionada	53	10.62	Condicionada
14	33.78	Condicionada	54	27.99	Condicionada
15	2.74	Condicionada	55	9.95	Condicionada
16	30.30	Condicionada	56	31.94	Condicionada
17	35.43	Condicionada	57	32.28	Condicionada
18	32.89	Condicionada	58	9.60	Condicionada
19	38.79	Condicionada	59	6.42	Condicionada
20	26.18	Condicionada	60	27.88	Condicionada
21	37.74	Condicionada	61	22.14	Condicionada
22	17.13	Condicionada	62	19.31	Condicionada
23	2.22	Condicionada	63	31.78	Condicionada
24	1.66	Condicionada	64	21.68	Condicionada
25	0.00	Buena	65	46.92	Condicionada
26	6.13	Condicionada	66	16.49	Condicionada
27	7.94	Condicionada	67	13.49	Condicionada
28	6.81	Condicionada	68	17.19	Condicionada
29	9.23	Condicionada	69	24.08	Condicionada
30	6.76	Condicionada	70	34.41	Condicionada
31	10.64	Condicionada	71	39.60	Condicionada
32	2.02	Condicionada	72	42.39	Condicionada
33	5.15	Condicionada	73	10.18	Condicionada
34	7.98	Condicionada	74	7.06	Condicionada
35	2.59	Condicionada	75	9.17	Condicionada
36	3.17	Condicionada	76	19.10	Condicionada
37	7.18	Condicionada	77	10.97	Condicionada
38	1.05	Condicionada	78	10.08	Condicionada
39	20.64	Condicionada	79	7.56	Condicionada
40	0.00	Buena			

5.10. Carbonato de sodio residual

Cuando en el agua de riego el contenido de CO_3^{2-} y HCO_3^- es mayor que el Ca^{2+} y Mg^{2+} , existe la posibilidad de que se forme carbonato de sodio (Na_2CO_3), debido a que, por su alta solubilidad, puede permanecer en solución aún después de que han precipitado los carbonatos de calcio y magnesio. En estas condiciones el Na^+ puede ser suficiente para desplazar el Ca^{2+} y Mg^{2+} del complejo de intercambio, produciéndose con ésto la defloculación del suelo (Wilcox *et al.*, 1954).

Se tiene que el 100% de las muestras son aguas bajas en carbonato de sodio residual, lo que indica que son buenas para riego, ésto se observa en el Cuadro 24.

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 se infiltra a través del suelo, pues la cantidad de HCO_3^- 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, se precipitaría todo el HCO_3^- (Bohn *et al.*, 1993).

Cuadro 24. Carbonato de sodio residual de las aguas del muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Carbonado de sodio residual	Clasificación	No.	Carbonado de sodio residual	Clasificación
1	-0.33	Buena	41	-18.76	Buena
2	-0.48	Buena	42	-5.90	Buena
3	-0.15	Buena	43	-18.82	Buena
4	-0.33	Buena	44	-1.94	Buena
5	-0.26	Buena	45	-2.21	Buena
6	-0.48	Buena	46	-1.28	Buena
7	-0.55	Buena	47	-0.48	Buena
8	-0.51	Buena	48	-5.44	Buena
9	-0.46	Buena	49	-4.73	Buena
10	-1.09	Buena	50	-4.94	Buena
11	-2.26	Buena	51	-23.15	Buena
12	-10.65	Buena	52	-17.88	Buena
13	-14.52	Buena	53	-17.37	Buena
14	-1.51	Buena	54	-3.62	Buena
15	-26.76	Buena	55	-18.08	Buena
16	-1.57	Buena	56	-2.71	Buena
17	-1.52	Buena	57	-4.25	Buena
18	-3.13	Buena	58	-22.30	Buena
19	-1.42	Buena	59	-23.22	Buena
20	-1.36	Buena	60	-3.80	Buena
21	-1.64	Buena	61	-5.91	Buena
22	-3.53	Buena	62	-8.51	Buena
23	-9.03	Buena	63	-2.68	Buena
24	-9.12	Buena	64	-5.75	Buena
25	-1.14	Buena	65	-1.67	Buena
26	-1.70	Buena	66	-26.30	Buena
27	-1.18	Buena	67	-20.61	Buena
28	-3.99	Buena	68	-14.53	Buena
29	-3.27	Buena	69	-8.89	Buena
30	-2.85	Buena	70	-4.69	Buena
31	-1.23	Buena	71	-3.66	Buena
32	-2.45	Buena	72	-2.56	Buena
33	-5.84	Buena	73	-3.72	Buena
34	-3.59	Buena	74	-9.08	Buena
35	-5.88	Buena	75	-6.33	Buena
36	-6.31	Buena	76	-2.49	Buena
37	-2.84	Buena	77	-11.68	Buena
38	-9.40	Buena	78	-10.91	Buena
39	-36.82	Buena	79	-17.22	Buena
40	-3.04	Buena			

5.11. Clasificación de las aguas con 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 de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} (Rengasarny, 1982; Levy *et. al.*, 2005; Bacarro *et al.*, 2006).

La infiltración disminuye con el incremento del PSI y una baja salinidad y tienen su origen en los procesos expansivos y dispersivos sobre las arcillas (Oster, 1994; Oster y Shainberg, 2001). Por tanto, el valor del RAS y la CE tienen que interpretarse conjuntamente para evaluar posibles problemas de las aguas de riego (Cuadro 25).

Cuadro 25. Directriz para interpretar la calidad de las aguas para riego con base a la infiltración.

Infiltración										
(reduce infiltración; evaluar usando a la vez la CE y el RAS)										
RAS	=	0	-	3	y	CE	=	> 0.7	0.7-0.2	< 0.2
	=	3	-	6			=	> 1.2	1.2-0.3	< 0.3
	=	6	-	12			=	> 1.9	1.9-0.5	< 0.5
	=	12	-	20			=	> 2.9	2.9-1.3	< 1.3
	=	20	-	40			=	> 5.0	5.0-2.9	< 2.9

En este trabajo, se utilizó el término “problemas de infiltración” para indicar el efecto de la salinidad y de la sodicidad, en relación con la facilidad con que el agua aplicada entra y se desplaza en los primeros centímetros del suelo. Un problema de infiltración se hace evidente, cuando el agua de riego no atraviesa la superficie del suelo a una velocidad lo suficientemente rápida, como para permitir la renovación del agua consumida por el cultivo entre dos riegos.

Los resultados del análisis de las aguas del presente estudio para el RAS original, se pueden ver en la Figura 21 y en el Cuadro 26, estos indican que el 44.3% no se reduce la velocidad de infiltración, el 41.8% presentan una reducción ligera a moderada y el 13.9% son aguas con una severa reducción en la velocidad de infiltración.

Para el RAS_{aj} se tiene que el 43.0% de las muestras no presentan reducción, el 43.0% presentan una reducción ligera a moderada y el 13.9% son aguas con una severa reducción en la infiltración, esto se puede observar en la Figura 22.

Con el RAS^o, se tiene que el 44.3% no presentan reducción en la infiltración, el 41.8% presentan una reducción ligera a moderada y el 13.9% con severa reducción en la infiltración, se indica en la Figura 23.

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.

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

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

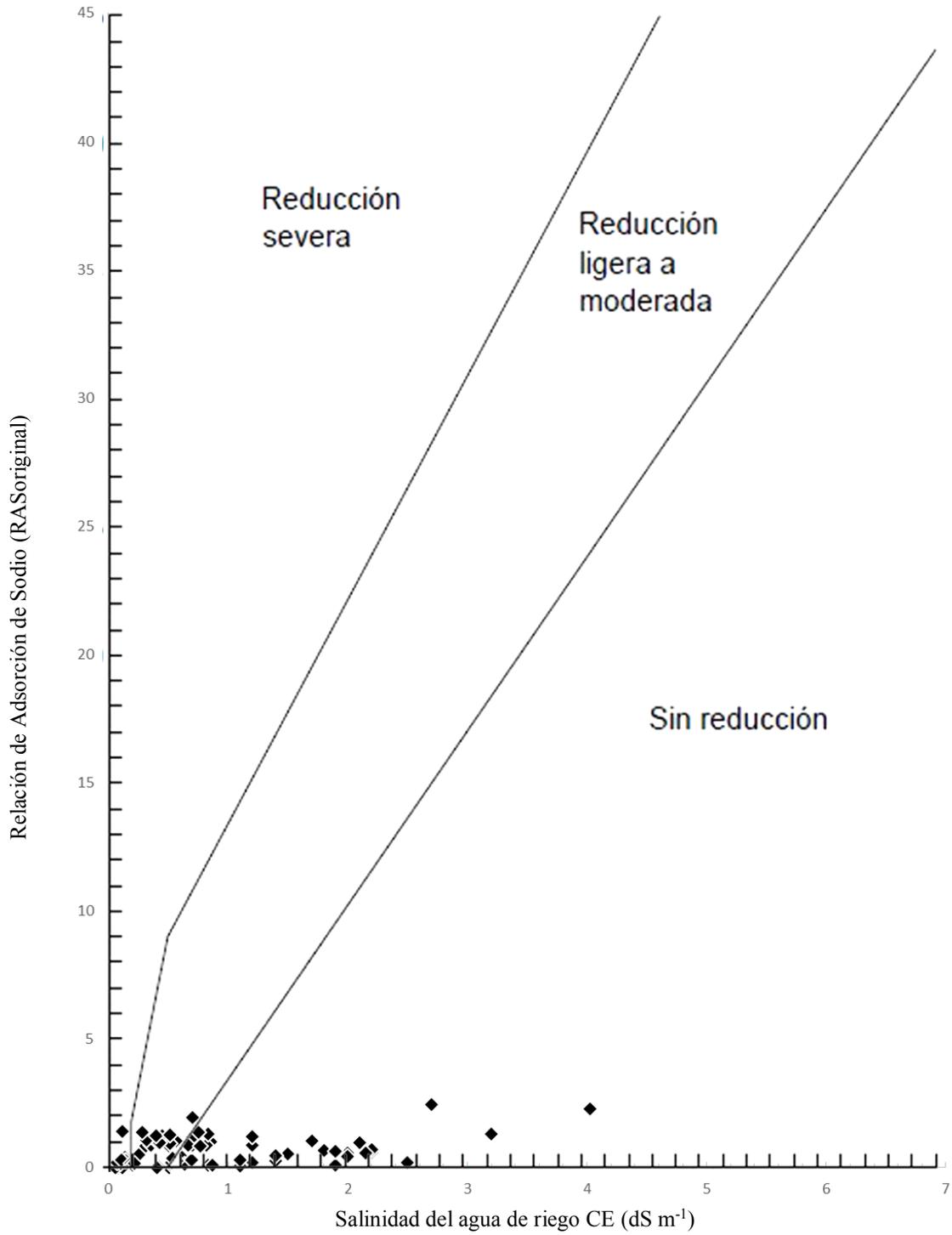


Figura 21. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y el RAS original de la red hidrográfica del estado de Morelos.

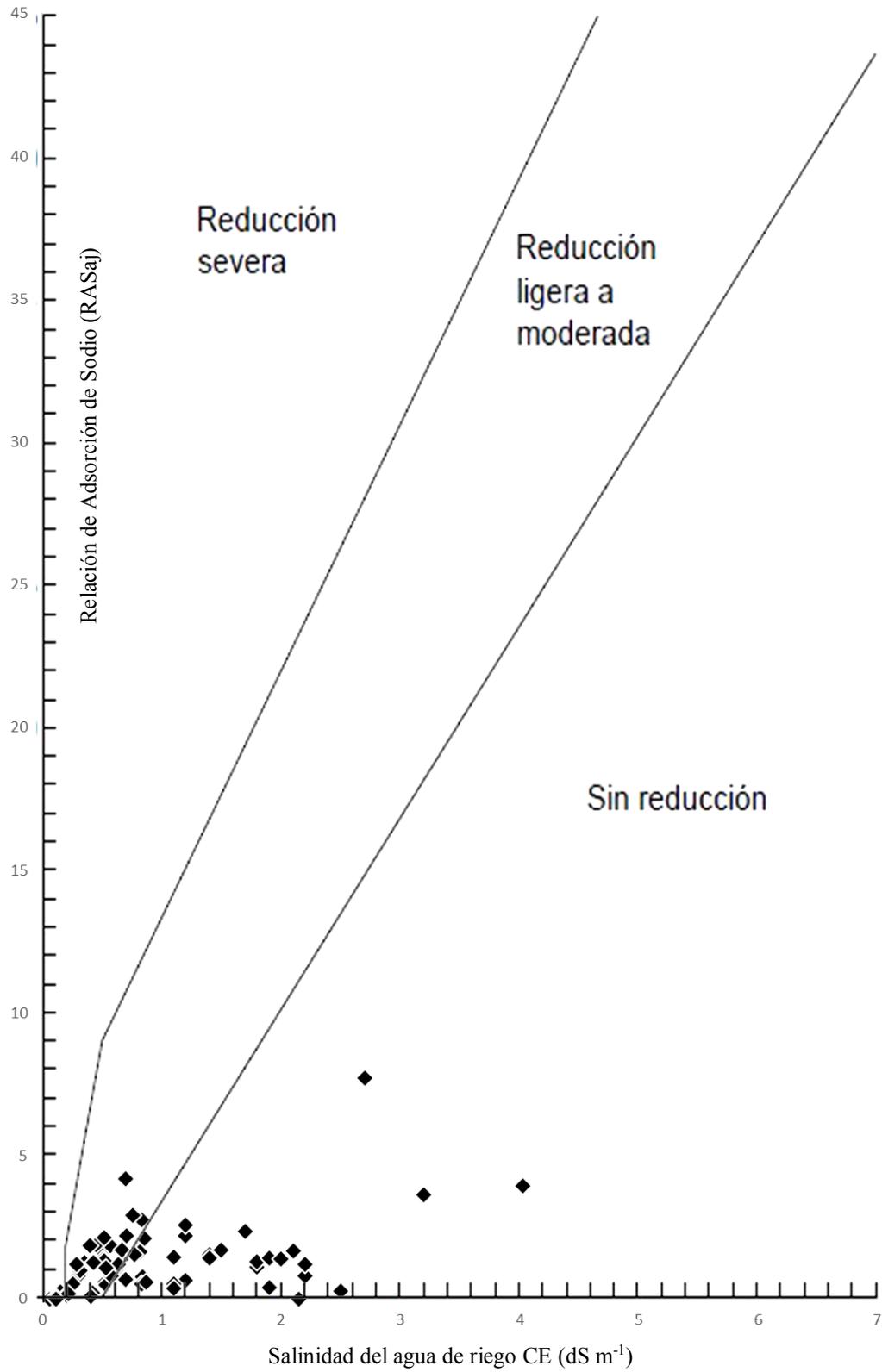


Figura 22. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y el RAS ajustado de la red hidrogáfica del estado de Morelos.

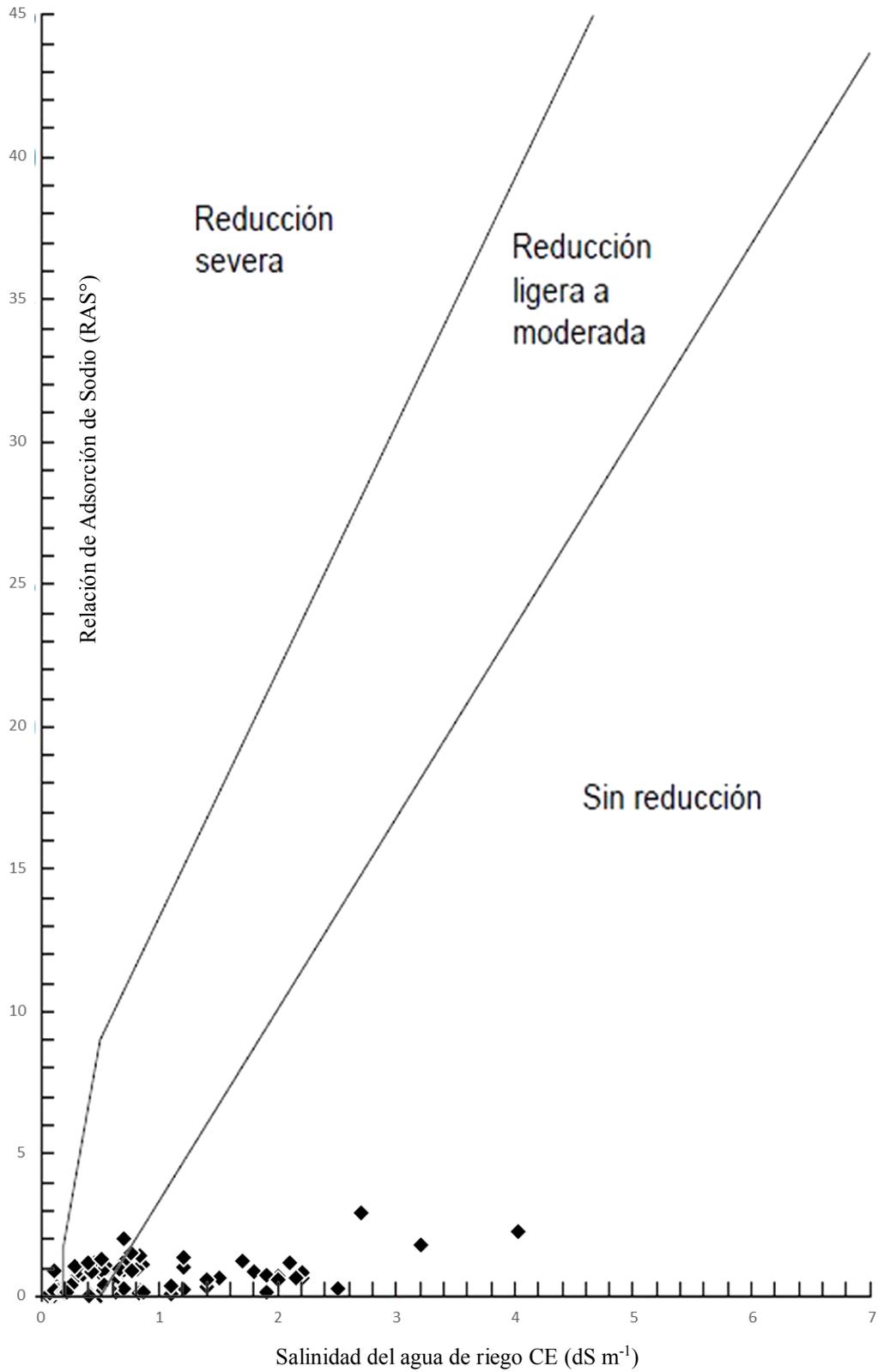


Figura 23. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y el RAS corregido de la red hidrográfica del estado de Morelos.

Cuadro 26. Clasificación de las aguas con base al efecto sobre la infiltración 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 severa	Reducción severa	Reducción severa
7	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
8	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
9	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
10	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
11	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
12	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
13	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
14	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
15	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
16	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
17	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
18	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
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 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	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
24	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
25	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
26	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
27	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
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	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
34	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
35	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
36	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
37	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
38	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
39	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
40	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
41	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción

Continuación...

No.	RAS original	RASaj	RAS°
42	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
43	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
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	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
47	Reducción severa	Reducción severa	Reducción severa
48	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
49	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
50	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
51	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
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	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
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	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
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	Sin reducción	Sin reducción
67	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
68	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
69	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
70	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
71	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Sin reducción
72	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
73	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
74	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
75	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
76	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada	Reducción ligera o moderada
77	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
78	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción
79	Sin reducción	Sin reducción	Sin reducción

5.12. Cloruros

La presencia del ion Cl^- en las aguas de riego hace que los cultivos queden afectados con gran frecuencia de clorosis foliares acentuadas en las partes más iluminadas, que pueden degenerar en necrosis de los bordes foliares (Canovas Cuenca, 1978). Como en el caso anteriormente citado del Na^+ , el ion Cl^- afecta especialmente a determinadas especies de plantas arbóreas, como frutales de hueso, limoneros y aguacates, a causa de su acumulación en las hojas. No obstante, los cloruros no son tóxicos para los hortícolas, los cereales, los forrajes o los cultivos con elevado contenido en fibras (Maas, 1990).

Los resultados del contenido de Cl^- para el muestreo de la red hidrográfica del estado de Morelos se presentan en el Cuadro 27, estos indican que el 87.34% de las estaciones están clasificadas como buenas para el riego, 11.39% están condicionadas para el riego y por último el 1.27% no son recomendadas para riego.

Las aguas condicionadas para riego provienen mayormente de ríos y lagos, los cuales reciben descargas de aguas urbano-industriales, y presentan en su composición el ion Cl^- . El agua que corresponde al 1.27%, no recomendable para riego es el de la estación número 13, denominada “Toma de agua Alpuyeca”, es decir, agua entubada del servicio municipal.

Las aguas residuales añaden cantidades considerables de Cl^- 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 (Romero, 1999).

En algunas especies de frutales la absorción de Cl^- está fuertemente influenciada por el catión acompañante, y 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 (Torques, 1986; Steppuhn *at al.*, 2005). Los Cl^- también pueden inhibir la división celular e incrementar la succulencia de algunas plantas, para reducir las concentraciones internas (Borquez, 1986; Rodríguez, 2006).

Cuadro 27. Clasificación del contenido de cloruros de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Cl mmol _c L ⁻¹	Clasificación	No.	Cl mmol _c L ⁻¹	Clasificación
1	0.20	Buena	41	0.65	Buena
2	0.26	Buena	42	0.60	Buena
3	0.28	Buena	43	0.95	Buena
4	0.24	Buena	44	0.55	Buena
5	0.28	Buena	45	0.80	Buena
6	0.28	Buena	46	0.55	Buena
7	0.30	Buena	47	0.40	Buena
8	0.24	Buena	48	1.05	Condicionada
9	0.24	Buena	49	0.85	Buena
10	0.62	Buena	50	0.70	Buena
11	0.46	Buena	51	0.70	Buena
12	0.54	Buena	52	0.65	Buena
13	16.18	No recomendada	53	0.65	Buena
14	0.70	Buena	54	0.60	Buena
15	0.90	Buena	55	0.80	Buena
16	0.65	Buena	56	0.45	Buena
17	0.75	Buena	57	0.75	Buena
18	1.20	Condicionada	58	0.75	Buena
19	0.70	Buena	59	0.75	Buena
20	0.60	Buena	60	0.60	Buena
21	0.70	Buena	61	0.70	Buena
22	0.65	Buena	62	0.80	Buena
23	0.50	Buena	63	0.60	Buena
24	0.55	Buena	64	0.80	Buena
25	0.40	Buena	65	0.50	Buena
26	0.40	Buena	66	2.90	Condicionada
27	0.50	Buena	67	1.30	Condicionada
28	0.60	Buena	68	0.95	Buena
29	0.70	Buena	69	0.85	Buena
30	0.50	Buena	70	0.70	Buena
31	0.50	Buena	71	0.70	Buena
32	0.35	Buena	72	0.50	Buena
33	0.45	Buena	73	0.75	Buena
34	0.40	Buena	74	0.95	Buena
35	0.40	Buena	75	1.00	Condicionada
36	0.55	Buena	76	0.90	Buena
37	0.35	Buena	77	1.10	Condicionada
38	0.35	Buena	78	1.25	Condicionada
39	2.20	Condicionada	79	1.30	Condicionada
40	0.40	Buena			

5.13. Sodio

La toxicidad del Na^+ es más fácil de diagnosticar que la del Cl^- , pero ha sido identificado claramente como resultado de una alta proporción de Na^+ en el agua (alto Na^+ o RAS). En contraste con los síntomas de toxicidad del cloro, la cual aparece inicialmente en el ápice de las hojas, los síntomas típicos del sodio aparecen en forma de quemadura o necrosis a lo largo de los bordes de las mismas. Las concentraciones de sodio en las hojas alcanzan niveles tóxicos después de varios días o semanas. Los síntomas aparecen primero en las hojas más viejas y en sus bordes y, a medida que se intensifica, la necrosis se desplaza progresivamente en el área intervenal, hacia el centro de las hojas (Ayers y Wescot, 1987).

El límite de tolerancia de cada cultivo es distinto, pero para muchas especies arbóreas la toxicidad se presenta cuando el Na^+ presenta un porcentaje superior al 0.25-0.5% respecto al peso seco de la hoja. El efecto tóxico del Na^+ no depende de la concentración absoluta de este catión en el suelo, sino de su proporción respecto al Ca^{2+} . Por tal razón, la tolerancia de cultivos se relaciona con el PSI del suelo.

La clasificación de las aguas de acuerdo al grado de restricción para su uso en el riego por aspersión y superficial, se realizó de acuerdo a las directrices para interpretar la calidad del agua del Cuadro 28.

Cuadro 28. Directriz para interpretar la calidad de las aguas de riego.

Problema Potencial	Unidades	Grado de Restricción de Uso		
		Ninguna	Ligera a Moderada	Severa
Sodio (Na)				
Riego por superficie	RAS	<3	3-9	>9
Riego por aspersión	$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$	<3	>3	

Autor: Ayers y Wescot, 1987.

Los resultados del Cuadro 29 indican que 94.4% de las aguas no están restringidas para su uso en el riego por superficie y el 5.06% son estaciones que tienen restricción de ligera a moderada. Para el riego por aspersión el 94.94% de las aguas no están restringidas y el 5.06% son estaciones que tienen restricción de ligera a moderada.

Otros efectos de las altas concentraciones de Na^+ 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 al 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 Na^+ ingresa a las células y se va acumulando, reduce la capacidad selectiva de la membrana celular, el Ca^{2+} 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).

Cuadro 29. Clasificación de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos de acuerdo al contenido de Na⁺ y su grado de restricción para el riego.

No.	RASaj	Clasificación Riego Superficial	Na ⁺ mmol _c L ⁻¹	Clasificación Riego por Aspersión
1	0.00	Sin Restricción	0.00	Sin Restricción
2	0.00	Sin Restricción	0.00	Sin Restricción
3	0.00	Sin Restricción	0.00	Sin Restricción
4	0.09	Sin Restricción	0.10	Sin Restricción
5	0.03	Sin Restricción	0.10	Sin Restricción
6	0.32	Sin Restricción	0.30	Sin Restricción
7	0.21	Sin Restricción	0.20	Sin Restricción
8	0.23	Sin Restricción	0.20	Sin Restricción
9	0.18	Sin Restricción	0.20	Sin Restricción
10	3.97	Restricción ligera a moderada	2.70	Sin Restricción
11	1.43	Sin Restricción	1.10	Sin Restricción
12	0.38	Sin Restricción	0.45	Sin Restricción
13	5.68	Restricción ligera a moderada	6.85	Restricción ligera a moderada
14	0.91	Sin Restricción	0.75	Sin Restricción
15	0.49	Sin Restricción	0.75	Sin Restricción
16	0.83	Sin Restricción	0.70	Sin Restricción
17	1.12	Sin Restricción	0.90	Sin Restricción
18	1.75	Sin Restricción	1.50	Sin Restricción
19	1.12	Sin Restricción	0.90	Sin Restricción
20	0.59	Sin Restricción	0.50	Sin Restricción
21	1.26	Sin Restricción	1.00	Sin Restricción
22	0.78	Sin Restricción	0.62	Sin Restricción
23	0.19	Sin Restricción	0.20	Sin Restricción
24	0.14	Sin Restricción	0.15	Sin Restricción
25	0.00	Sin Restricción	0.00	Sin Restricción
26	0.19	Sin Restricción	0.20	Sin Restricción
27	0.12	Sin Restricción	0.10	Sin Restricción
28	0.33	Sin Restricción	0.28	Sin Restricción
29	0.35	Sin Restricción	0.30	Sin Restricción
30	0.25	Sin Restricción	0.20	Sin Restricción
31	0.18	Sin Restricción	0.15	Sin Restricción
32	0.07	Sin Restricción	0.05	Sin Restricción
33	0.33	Sin Restricción	0.30	Sin Restricción
34	0.36	Sin Restricción	0.30	Sin Restricción
35	0.16	Sin Restricción	0.15	Sin Restricción
36	0.21	Sin Restricción	0.20	Sin Restricción
37	0.20	Sin Restricción	0.15	Sin Restricción
38	0.09	Sin Restricción	0.10	Sin Restricción
39	4.84	Restricción ligera a moderada	10.30	Restricción ligera a moderada
40	0.00	Sin Restricción	0.00	Sin Restricción

Continuación...

No.	RASaj	Clasificación Riego Superficial	Na ⁺ mmol _c L ⁻¹	Clasificación Riego por Aspersión
41	0.22	Sin Restricción	0.30	Sin Restricción
42	0.44	Sin Restricción	0.50	Sin Restricción
43	1.32	Sin Restricción	1.80	Sin Restricción
44	1.36	Sin Restricción	1.25	Sin Restricción
45	2.11	Sin Restricción	1.70	Sin Restricción
46	1.61	Sin Restricción	1.40	Sin Restricción
47	0.00	Sin Restricción	1.00	Sin Restricción
48	2.18	Sin Restricción	1.98	Sin Restricción
49	1.54	Sin Restricción	1.44	Sin Restricción
50	1.72	Sin Restricción	1.60	Sin Restricción
51	1.34	Sin Restricción	2.15	Sin Restricción
52	1.46	Sin Restricción	2.00	Sin Restricción
53	1.51	Sin Restricción	2.10	Sin Restricción
54	1.56	Sin Restricción	1.45	Sin Restricción
55	1.41	Sin Restricción	2.00	Sin Restricción
56	1.49	Sin Restricción	1.30	Sin Restricción
57	2.32	Sin Restricción	2.05	Sin Restricción
58	1.61	Sin Restricción	2.40	Sin Restricción
59	1.31	Sin Restricción	2.35	Sin Restricción
60	1.80	Sin Restricción	1.50	Sin Restricción
61	1.77	Sin Restricción	1.70	Sin Restricción
62	1.94	Sin Restricción	2.00	Sin Restricción
63	1.43	Sin Restricción	1.30	Sin Restricción
64	1.62	Sin Restricción	1.60	Sin Restricción
65	2.13	Sin Restricción	1.60	Sin Restricción
66	3.66	Restricción ligera a moderada	5.15	Restricción ligera a moderada
67	2.15	Sin Restricción	3.25	Restricción ligera a moderada
68	2.34	Sin Restricción	3.00	Sin Restricción
69	2.65	Sin Restricción	2.80	Sin Restricción
70	2.80	Sin Restricción	2.45	Sin Restricción
71	2.92	Sin Restricción	2.40	Sin Restricción
72	2.50	Sin Restricción	1.95	Sin Restricción
73	0.47	Sin Restricción	0.40	Sin Restricción
74	0.65	Sin Restricción	0.65	Sin Restricción
75	0.67	Sin Restricción	0.60	Sin Restricción
76	0.74	Sin Restricción	0.55	Sin Restricción
77	1.24	Sin Restricción	1.40	Sin Restricción
78	1.10	Sin Restricción	1.20	Sin Restricción
79	1.11	Sin Restricción	1.40	Sin Restricción

5.14. Clasificación de las aguas por su dureza

El término dureza se usa frecuentemente como un parámetro de la calidad de las aguas. La dureza de las aguas está regida por el contenido de las sales de Ca^{2+} y Mg^{2+} , combinados principalmente con CO_3^{2-} y HCO_3^- (Wetzel, 1981).

La fórmula utilizada para determinar la dureza se expresa de la siguiente manera:

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

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

Se tiene que el 27.8% son aguas blandas, 17.7% son aguas moderadamente duras, el 24.1% son aguas duras y el 30.4% son aguas muy duras, esto se observa en el Cuadro 30.

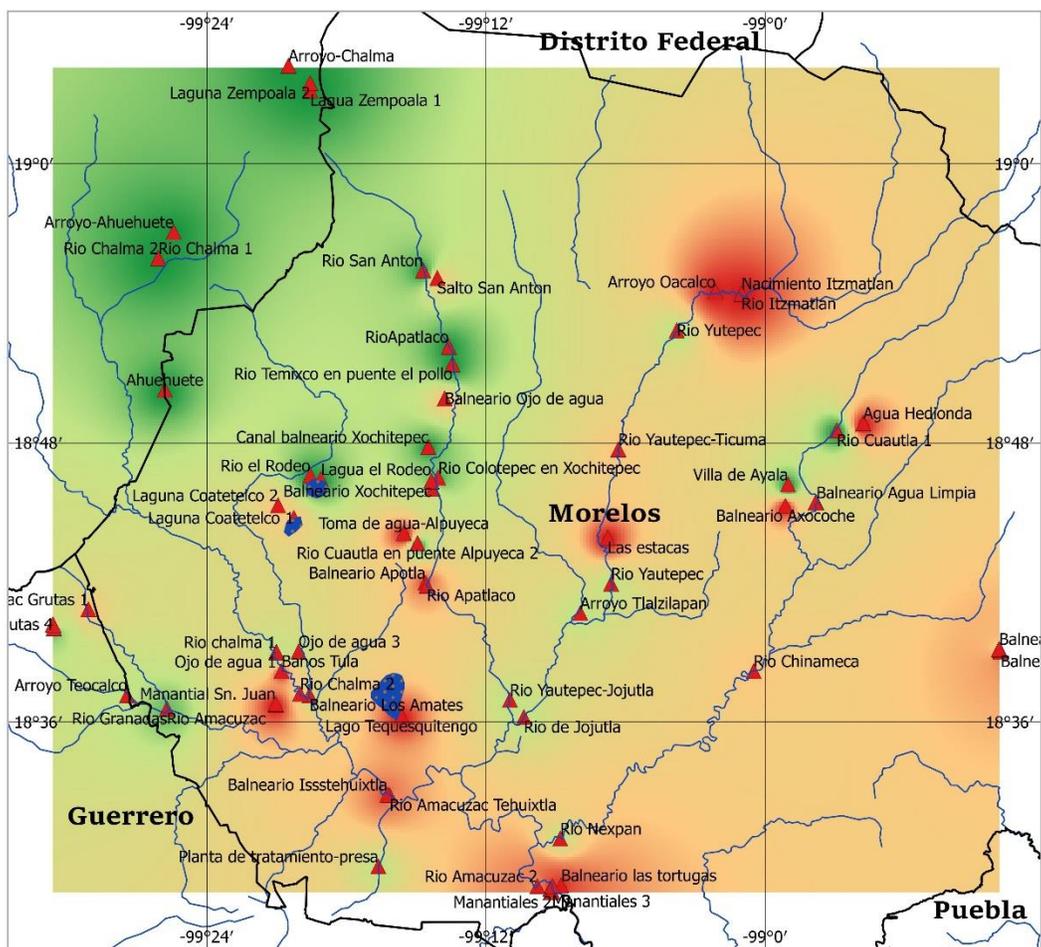
Desde el punto de vista sanitario, las aguas duras son tan satisfactorias para el consumo humano como las aguas blandas, sin embargo, un agua dura requiere demasiado jabón para la formación de espuma y crea un problema de lavado, además deposita lodo e incrustaciones sobre las superficies con las cuales 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).

Cuando las concentraciones de HCO_3^- excedan $2 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$ y el pH excede de 7.5, puede haber precipitaciones de CaCO_3 , es necesario entonces inyectar continuamente ácido al sistema (Hassan, 1998; Ocampo, 1999).

Se debe tener cuidado en el uso del agua dura en el control químico de las malezas, ya que esta puede ser causante de la inhibición del agente activo de los herbicidas, porque se degrada o se combina, formando sales menos efectivas para el combate de las malas hierbas (Hassan, 1998).

Cuadro 30. Clasificación de las aguas por su dureza 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	6.00	15.00	Blanda	41	322.00	805.00	Muy dura
2	6.00	15.00	Blanda	42	108.00	270.00	Dura
3	6.20	15.50	Blanda	43	282.00	705.00	Muy dura
4	6.00	15.00	Blanda	44	38.00	95.00	Moderadamente dura
5	10.00	25.00	Blanda	45	35.00	87.50	Moderadamente dura
6	9.00	22.50	Blanda	46	26.00	65.00	Blanda
7	11.00	27.50	Blanda	47	11.00	27.50	Blanda
8	14.00	35.00	Blanda	48	89.00	222.50	Dura
9	10.00	25.00	Blanda	49	79.00	197.50	Dura
10	34.00	85.00	Moderadamente dura	50	88.00	220.00	Dura
11	46.00	115.00	Moderadamente dura	51	346.00	865.00	Muy dura
12	176.00	440.00	Muy dura	52	293.00	732.50	Muy dura
13	216.00	540.00	Muy dura	53	282.00	705.00	Muy dura
14	24.00	60.00	Blanda	54	68.00	170.00	Dura
15	421.00	1052.50	Muy dura	55	283.00	707.50	Muy dura
16	22.00	55.00	Blanda	56	50.00	125.00	Moderadamente dura
17	25.00	62.50	Blanda	57	68.00	170.00	Dura
18	32.00	80.00	Moderadamente dura	58	339.00	847.50	Muy dura
19	23.00	57.50	Blanda	59	328.00	820.00	Muy dura
20	22.00	55.00	Blanda	60	84.00	210.00	Dura
21	26.00	65.00	Blanda	61	104.00	260.00	Dura
22	77.00	192.50	Dura	62	138.00	345.00	Muy dura
23	128.00	320.00	Muy dura	63	45.00	112.50	Moderadamente dura
24	133.00	332.50	Muy dura	64	97.00	242.50	Dura
25	40.00	100.00	Moderadamente dura	65	25.00	62.50	Blanda
26	16.00	40.00	Blanda	66	411.00	1027.50	Muy dura
27	23.00	57.50	Blanda	67	327.00	817.50	Muy dura
28	57.00	142.50	Moderadamente dura	68	227.00	567.50	Muy dura
29	53.00	132.50	Moderadamente dura	69	139.00	347.50	Muy dura
30	65.00	162.50	Dura	70	81.00	202.50	Dura
31	27.00	67.50	Blanda	71	67.00	167.50	Dura
32	68.00	170.00	Dura	72	29.00	72.50	Blanda
33	83.00	207.50	Dura	73	46.00	115.00	Moderadamente dura
34	66.00	165.00	Dura	74	128.00	320.00	Muy dura
35	94.00	235.00	Dura	75	96.00	240.00	Dura
36	98.00	245.00	Dura	76	35.00	87.50	Moderadamente dura
37	35.00	87.50	Moderadamente dura	77	181.00	452.50	Muy dura
38	134.00	335.00	Muy dura	78	176.00	440.00	Muy dura
39	334.00	835.00	Muy dura	79	269.00	672.50	Muy dura
40	48.00	120.00	Moderadamente dura				



SIMBOLOGÍA

- | | | | |
|--|--------------------|--|--------------------|
| | Cuerpos de agua | | Blanda |
| | Estados | | Moderadamente Dura |
| | Corrientes de agua | | Dura |
| | Dureza | | Muy Dura |



Figura 24. Mapa de la distribución de la dureza de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos.

5.15. Clasificación hidrogeoquímica

La clasificación de las aguas del presente estudio se pueden observar en la Figura 25 y el Cuadro 31. En el caso de los cationes se tiene que el 48.1% de las estaciones son del tipo calcio, 2.5% son de tipo magnesio, 1.3% son del tipo sodio y el 48.1% son mixtas, de estas 12.7% son cálcico-magnésica, 2.5% magnésico-cálcica, 10.1% magnésico-sódica, 13.9% sódico-cálcica y 8.9% sódico-magnésica.

Para los aniones se tiene que 1.3% son de tipo bicarbonatado, 1.3% del tipo cloruro, 91.1% tipo sulfatado y 6.3% del tipo mixta, de estas el 1.3% bicarbonatada-sulfatada, 3.8% sulfatada-bicarbonatada y 1.3% sulfatada-clorurada.

En cuanto a la clasificación hidrogeoquímica total se tiene que 1.3% son aguas Bicarbonatada-sulfatada Magnésico-sódica, 1.3% Clorurada sódico-cálcica, 46.8% Sulfatada cálcica, 12.7% Sulfatada cálcico-magnésica, 2.5% Sulfatada magnésica, 1.3% Sulfatada magnésico-cálcica, 7.6% Sulfatada magnésico-sódica, 1.3% Sulfatada sódica, 10.1% Sulfatada sódico-cálcica, 10.1% Sulfatada sódico-magnésica, 1.3% Sulfatada-bicarbonatada magnésico-sódica, 2.6% Sulfatada-clorurada Sódico-Cálcica y 1.3% Sulfatada-bicarbonatada Sódico-cálcica.

En las aguas subterráneas y de los suelos, la mayoría de las sales que se encuentran disueltas en estas aguas están presentes en estado iónico. Por lo general unos cuantos iones son los que se encuentran siempre presentes, y obteniéndose la sumatoria representan la totalidad de iones en solución (Huizar, *et al.*, 2001; Güler y Thyne, 2004; Diop y Tijani, 2008).

Prol y Cortes (2003) indican que la concentración del ion SO_4^{2-} 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 las 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 (FeS_2) es también una fuente potencial de azufre en las muestras de agua (Güler y Thyne, 2004).

Cuadro 31. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos.

No.	Catión dominante	Anión dominante	Clasificación
1	Mixta: Magnésico-Sódica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Magnésico-Sódica
2	Mixta: Magnésico-Sódica	Mixta: Bicarbonatada-Sulfatada	Bicarbonatada-Sulfatada Magnésico-Sódica
3	Mixta: Sódico-Cálcica	Mixta: Sulfatada-Clorurada	Sulfatada-Clorurada Sódico-Cálcica
4	Mixta: Magnésico-Sódica	Mixta: Sulfatada-Bicarbonatada	Sulfatada-Bicarbonatada Magnésico-Sódica
5	Mixta: Sódico-Cálcica	Mixta: Sulfatada-Bicarbonatada	Sulfatada-Bicarbonatada Sódico-Cálcica
6	Mixta: Sódico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Magnésica
7	Mixta: Sódico-Cálcica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Cálcica
8	Mixta: Sódico-Cálcica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Cálcica
9	Mixta: Sódico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Magnésica
10	Mixta: Sódico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Magnésica
11	Mixta: Sódico-Cálcica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Cálcica
12	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
13	Mixta: Sódico-Cálcica	Tipo de Cloruro	Clorurada Sódico-Cálcica
14	Mixta: Sódico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Magnésica
15	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
16	Mixta: Magnésico-Sódica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Magnésico-Sódica
17	Mixta: Magnésico-Sódica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Magnésico-Sódica
18	Mixta: Magnésico-Sódica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Magnésico-Sódica
19	Mixta: Sódico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Magnésica
20	Mixta: Cálcico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcico-Magnésica
21	Mixta: Sódico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Magnésica
22	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
23	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
24	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
25	Tipo de Calcio	Tipo de Bicarbonato	Sulfatada Sódico-Magnésica
26	Tipo de Magnesio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Magnésica
27	Mixta: Cálcico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcico-Magnésica
28	Mixta: Cálcico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcico-Magnésica
29	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
30	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
31	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
32	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
33	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
34	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
35	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
36	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
37	Mixta: Cálcico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcico-Magnésica
38	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
39	Mixta: Magnésico-Cálcica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Magnésico-Cálcica
40	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
41	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
42	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica

Continuación...

No.	Catión dominante	Anión dominante	Clasificación
43	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
44	Mixta: Sódico-Cálcica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Cálcica
45	Mixta: Sódico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Magnésica
46	Mixta: Sódico-Cálcica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Cálcica
47	Tipo de sodio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódica
48	Mixta: Cálcico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcico-Magnésica
49	Mixta: Cálcico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcico-Magnésica
50	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
51	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
52	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
53	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
54	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
55	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
56	Mixta: Sódico-Cálcica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Cálcica
57	Mixta: Cálcico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcico-Magnésica
58	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
59	Tipo de Magnesio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Magnésica
60	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
61	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
62	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
63	Mixta: Sódico-Cálcica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Cálcica
64	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
65	Mixta: Magnésico-Sódica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Magnésico-Sódica
66	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
67	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
68	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
69	Mixta: Cálcico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcico-Magnésica
70	Mixta: Cálcico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcico-Magnésica
71	Mixta: Sódico-Cálcica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Sódico-Cálcica
72	Mixta: Magnésico-Sódica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Magnésico-Sódica
73	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
74	Mixta: Cálcico-Magnésica	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcico-Magnésica
75	Mixta: Magnésico-Cálcica	Mixta: Sulfatada-Bicarbonatada	Sulfatada-Bicarbonatada Magnésico-Cálcica
76	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
77	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
78	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica
79	Tipo de Calcio	Tipo de Sulfato	Sulfatada Cálcica

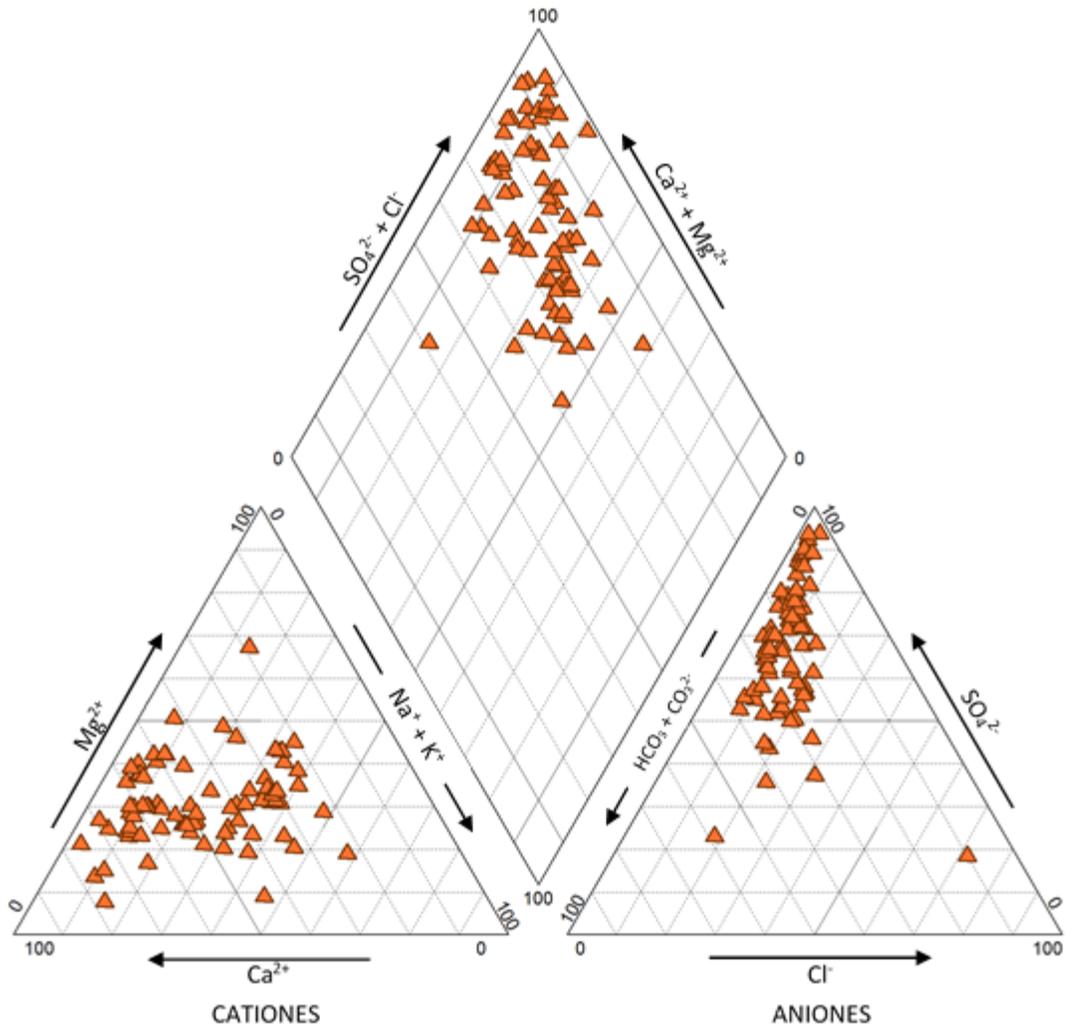


Figura 25. Clasificación hidrogeoquímica de las aguas de la red hidrográfica del estado de Morelos.

6. CONCLUSIONES

En el área de estudio, las fuentes principales de abastecimiento de agua para uso agrícola son corrientes superficiales, pozos, manantiales, lagos y presas, por lo cual la composición química de éstas resulta de gran importancia para favorecer los cultivos y por ende los suelos donde se aplican los riegos.

La variación en la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , y SO_4^{2+} , en puntos distribuidos a lo largo de la red hidrográfica del estado de Morelos, se debe a que este recibe las aguas residuales en diferente cantidad y calidad de industrias, centros urbanos, y de zonas agropecuarias a lo largo de toda su trayectoria; en temporada de lluvias la precipitación pluvial reduce la concentración de la mayoría de los contaminantes en las aguas superficiales.

Cerca del 68% de estas aguas tienen una CE menor a $1000 \mu\text{S cm}^{-1}$. Si únicamente se considerara la CE, se podría decir que la calidad del agua para riego es excelente en la mayoría de los casos; y es necesario tener más cuidado cuando es época de escasas lluvias, porque es entonces cuando puede haber algunos sitios en donde la salinidad sea tan alta como se observa en el sitio 41. Los valores de RAS mostraron que el 94.9 % de las muestras no se tienen problemas de toxicidad por Na^+ en riego por superficie, por tanto, la calidad del agua es aceptable con base únicamente en los resultados de CE y RAS.

La exactitud de los análisis químicos se establece con las relaciones $y=\text{CE}_{\text{teórica}}$ y $x=\text{CE}_{\text{experimental}}$. Las relaciones conjuntas de la $\text{CE}_{\text{teórica}}$ ($\mu\text{S cm}^{-1}$)- $\text{CE}_{\text{experimental}}$ ($\mu\text{S cm}^{-1}$)=1.06. El intervalo de aceptación establecido por este método de comprobación de los datos analíticos es de $0.9 < \text{CE}_{\text{teórica}} / \text{CE}_{\text{experimental}} < 1.1$, lo cual nos indica que los datos analíticos obtenidos en este trabajo son correctos.

En 23% de los sitios del muestreo tienen una conductividad eléctrica de $1400\text{-}4025 \mu\text{S cm}^{-1}$. Lo cual indica que se presentaran condiciones de salinidad, si no se realiza un buen manejo de los suelos.

Los contenidos de CSR $<1.25 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ en las 79 muestras, indican que el 100% de las aguas son buenas para riego.

En cuanto a la clasificación hidrogeoquímica, predomina el agua Sulfatada en todas sus gamas como Sulfatada cálcica, sulfatada cálcico-magnésica, sulfatada magnésica, sulfatada magnésico-cálcica, sulfatada magnésico-sódica, sulfatada sódica, sulfatada sódico-cálcica sódico magnésica, sulfatada-bicarbonatada magnésico-sódica, sulfatada-clorurada sódico-cálcica.

7. RECOMENDACIONES

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.

Se recomienda realizar periódicamente un análisis de agua de riego utilizada en cada sitio para tomar las medidas adecuadas en cuanto a su uso, de acuerdo a las condiciones de suelo, clima y cultivos convenientes en la zona de riego.

8. LITERATURA CITADA

Ahmed, B.; Kemper, W. D.; Haides, G.; y Niazi, M. A. 1979. Use of gypsum stones to lower the sodium adsorption ratio of irrigation water. *Soil Science*.

Antipov-Karataev, I. N. 1967. Reclamation of Soloretz soils in the USSR. Israel Program for Scientific Translatiom. Jerusalén.

Alonso, M. 1998. Las lagunas de la España peninsular. *Lirnnetica*. 15:1-176.

APHA. American Public Health Association. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater 19thedition. 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.

Ayer, R. S., Westcot, D. W., 1985. Water Quality for agricultura. FAO. Irrigation and Drainage Paper 29. Rev. 1, Roma (Italia). pp: 174

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.

Balks, M. R. W. J. Bond and C. J. Smith. 1998. Effects of sodium accumulation on soil physical propierties under an effluent-irrigated plantation. *Australian Journal of Soil Research*. 36: 821-830.

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

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.

Borquez, O. R. 1986. Efecto de las solubles. Colegio de Posgraduados. Tesis maestría en ciencias. Edafología. Montecillo, Estado de México.

Bower, C. A. y Goertzen J. O., 1958. Replacement of adsorbed sodium in soils by hydrolysis of calcium carbonate. Soil Science.

Bower, C. A.; Ogata, G. y Tuckson, J. M. 1968. Sodium hazard of irrigation water as influenced by leaching fraction and by precipitation of solution of calcium carbonate. Soil Science.

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.

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. 2002b. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuautla-Yautepec. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. México.

CONABIO y UAEM. 2004. La Diversidad Biológica en Morelos: Estudio del Estado. Contreras-MacBeath, T., J.C. Boyás, F. Jaramillo (editores). Comisión Nacional para el

Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México.

Canovas C. J., 1978. Calidad Agronómica de las aguas de riego. Publicaciones de extensión agraria. Madrid (España).

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.

Coras Merino, P. 1996. Calidad química del agua para riego. Universidad Autónoma Chapingo, México: UACH. Departamento de Fitotecnia.

Diop, S. and M. Tijani 2006. Assessing the basement aquifers of Eastern Senegal. *Hydrogeology Journal*. 16: 1349-1369.

Doneen L. (1975). Water quality for irrigated agricultura. *In: Plant in Saline Environments*, A. Poljakoff-Mayber y J. Gale eds. *Ecological Studies*. Springer Verlag. NY. Vol. 15. pp. 56-76.

Eaton F. M. (1950). Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Science* 69: 123-134.

FAO (Food and Agriculture Organization). 2008. AQUASTAT, FAO's Information System on Water and Agriculture. (Disponible en <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/globalmaps/index.stm>).

FAO (Food and Agriculture Organization). 2004. Economic valuation of water resources agricultura: From the sectoral to a functional perspective of natural resource management. *FAO Water Reports* 27. FAO, Rome.

FAO (Food and Agriculture Organization). 2002. Agua y cultivos. Roma. pp: 1-25.

Gardner, W. K. 2004. Changes in soils irrigated with saline groundwater containing excess bicarbonate. *Australian Journal of Soils Research*. 42: 825-831.

González, L. M. 2001. Apuntes sobre la fisiología de las plantas cultivadas bajo estrés de la salinidad. *Cultivos Tropicales*, 23(4): 47-57.

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.

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.

Halperin S. J. and J. P. Lynch. 2003. Effects of salinity in cytosolic Na⁺ and K⁺ in root hairs of *Arabidopsis thaliana*: in vivo measurements using the fluorescent dyes SBFI and PBFI. *Journal of Experimental Botany* 54: 2035-2043.

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 la ciudad de México, en Medio ambiente y desarrollo en México. V.2, México: CIIH-UNAM-Porrúa.

Huizar, A. R., O. Campos E., L. Mitre S., D. Alatraste V., T. Méndez G. y F. Juárez S. 2001, evaluación hidrogeológica de la subcuenca Tecocomulco, estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 18(1): 55-73.

Jalali, M., H. Merikhpour, M. J. Kaledhonkar, and S. E. A. T. M. Van Der Zee. 2008. Effects of wastewater Irrigation on Soil Sodicity and Nutrient Leaching in Calcareous Soils. *Agric. Water Manage.* 95:143-153.

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.

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.

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.

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.

Maas, E. V. 1986. Salt tolerance of plants. *Applied agricultural research*. 1:12:26.

Maathuis, F. J. 2006. The role of monovalent cation transporters in plant responses to salinity, *Journal of Experimental Botany*. 57: 1137-1147.

Maderey, R. L. E. y J. Carillo. 2005. El recurso agua en México; un análisis geográfico, Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F. p: 128.

McNeal, B. L. 1968. Prediction of the Effect of Mixed-Salt Solutions on Soil Hydraulic Conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 190-193.

Netondo, G. W., J. C. Onyango, and E. Beck. 2004. Sorghum and salinity: I. Responde of growth, wáter relations, and ion acumulation to NaCl salinity. *Crop Science.* 44(3): 797-805.

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

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.

Oster, J. D. y Rhoades, J. D. 1986. Water management for salinity and sodicity control. Chapter 7. *Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater.* Davis, California, U. S. A.

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. pp. 93-107.

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 guas subterráneas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán, Estado de Hidalgo, México, *Hidrobiológica.* 13(2): 95-102.

- Peterson, J. B. 1947. Calcium linkage a mechanism in soil granulation. *Soil Science*.
- Piper A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of wáter-analyses, *Transactions, American Geophysical Union*, 25(6): 914-928.
- Rengasarny, P. 1982. Dispersion of Calcium Clay. *Australian Journal of Soil Research*. 20:153-157.
- 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.
- Richards, L. A. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos, Manual No. 60. Editorial LIMUSA.
- Rhoades, J. D., and D. B. Krueger, 1968. Extraction of Cations from Silicate Mineral during the Determination of Exchangeable Cations in Soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:488-492.
- Richards, L. A. (Ed.) 1959. Suelos Salinos y Sódicos. Personal del Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América. *Manual de Agricultura No. 60*. pp. 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.
- 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.
- Sharma, D. P. 1985. Evaluation of Water Infiltration Characteristics during the Reclamation of Sodic Soils. *Short Communications. J. Indian Soil Sci.* 33:389-895.

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

Suarez, D. L. 1981. Relation Between pHc and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an Alternative Method of Estimating SAR of soil or Drainage Waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:469-475.

Surapanemi, 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.

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. The united nations world water development report 2. Charter 4, part. 1, global hydrology and water resources. pp: 120-123.

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.

Wetzel, R. 1981. *Limnología*. Ediciones Omega. Barcelona España. p. 666.

Wilcox, L. V., G. Y. Blair and C. A. Bower. 1954. Effect of Bicarbonate on Suitability of Water for Irrigation. *Soil Sci*. 77(4): 256-266.