



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**CALIDAD AGRÍCOLA DE LAS AGUAS URBANO-
INDUSTRIALES DEL VALLE DEL MEZQUITAL,
HIDALGO**

ALMA DELIA LÓPEZ GARCÍA

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

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2011


La presente tesis, titulada **Calidad agrícola de las aguas urbano industriales del Valle del Mezquital, Hidalgo**, realizada por la alumna **Alma Delia López García** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR:

CONSEJERO:




Dr. CARLOS RAMÍREZ AYALA

ASESOR:



Dr. HÉCTOR MANUEL ORTEGA ESCOBAR

ASESOR:



Dr. EBANDRO USCANGA MORTERA

CALIDAD AGRÍCOLA DE LAS AGUAS URBANO-INDUSTRIALES DEL VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO

Alma Delia López García, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2011

Las aguas residuales generadas en el Valle de México, son usadas en el riego de cultivos en el Valle del Mezquital, a lo largo de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán. Para establecer las características físico-químicas de estas aguas, se planteo una investigación de tipo Observacional, Prospectiva, Transversal y Descriptiva. Mediante la asociación de variables físico-químicas específicas medidas en las aguas se hace inferencia sobre los niveles de sodio intercambiable en los suelos que son regados con estas aguas. Las variables de mayor relevancia son: pH, CE, RAS, PSI y B. Los valores obtenidos, expresados en máximos y mínimos son: pH 6.53- 9.85, CE 108-3109 $\mu\text{S cm}^{-1}$, RAS = 9.65-0.09, PSI = 14.02-0.06, B = 2.65-0.003 mg L⁻¹. La calidad del agua y su uso es definida por las concentraciones iónicas parciales y totales. Las aguas son bicarbonatadas y sódicas, respectivamente. Así, la salinidad sódica del sistema hidrográfico se debe a la contribución antropogénica.

Palabras clave: RAS, PSI, B.

QUALITY AGRICULTURE OF URBAN INDUSTRIAL WATER IN THE VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO

Alma Delia López García, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2011

The wastewater generated in the Valley of Mexico, are used in the irrigation of crops in the Valle del Mezquital, along the Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapan hydrographic system. To establish and physical and chemical characteristics of these waters, new research observacional, prospective, cross sectional type considered. By combining specific physical and chemical variables measured in the water is inference about the levels of exchangeable sodium in soils that are irrigated with this water, in addition to establishing the quantitative effects of ion concentrations in crop. The most important variables are: pH, CE, SAR. The values obtained, expressed in maximum and minimum are: pH 6.53- 9.85, CE 108-3109 $\mu\text{S cm}^{-1}$, RAS = 9.65-0.09, PSI = 14.02-0.06, B = 2.65-0.003 mg L^{-1} . Water quality and its use are defined by the partial and total ion concentrations. The waters are bicarbonates, thus altering the sodium content.

Index words: SAR, PSI, B.

Agradecimientos

Agradezco al **Pueblo de México** que a través del **CONACyT** me concedió la oportunidad y el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

Al **Colegio de Postgraduados** y el **Postgrado en Hidrociencias** por otorgarme las facilidades para la realización de esta investigación.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología **COMECyT** por haberme apoyado con una beca-tesis, que permitió realizar sin interrupción este trabajo.

Al Dr. **Héctor Manuel Ortega Escobar** por apoyar y motivarme durante el proyecto, por dejarme aprender un poco del experto en salinidad, por recordarme que hay grandes problemas que requieren nuestra atención y por brindarme consejo y confianza. Sin su dirección, este proyecto no hubiera sido posible.

Al Dr. **Carlos Ramírez Ayala** por su disposición para emprender proyectos, por su paciencia y tiempos brindados, por su rapidez para apoyar a las personas y sus acertados comentarios.

Al Dr. **Ebandro Uscanga Mortera** por su valiosa revisión en este trabajo.

A la Sra. **Elvira Amalia Sosa Galán** por su infinita ayuda durante la realización de este trabajo.

Al personal de los laboratorios de Hidrociencias, RASPA, Génesis de suelos, biblioteca y de apoyo en las diferentes áreas del Colegio de Postgraduados, especialmente a Don Raul, Don Gonzalo, Don Cruz y Don Porfirio.

A todos ellos, muchas gracias de todo corazón.

Dedicatoria

Para mis padres Israel y Gudelia, por su comprensión y ayuda en momentos malos y menos malos. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

Para mi esposo Jorge, por su paciencia, por su comprensión, por su empeño, por su fuerza, por su amor, porque lo quiero.

Para mi hija, Sunem. Es la persona que más directamente ha sufrido las consecuencias del trabajo realizado. Su nacimiento es lo mejor que nunca me ha pasado, y ha venido a este mundo para darme el último empujón para terminar el trabajo. Es sin duda mi referencia para el presente y para el futuro.

Y por último, pero no menos importante, mis hermanos Uziel y Juan por su apoyo y comprensión.

Para ellos, muchas gracias por todo.

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCION.....	1
2. TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	4
2.1. OBJETIVOS.....	4
2.1.1. GENERAL.....	4
2.1.2. PARTICULARES.....	4
2.2. HIPOTESIS.....	4
3. REVISION DE LITERATURA.....	5
3.1. Geoquímica de los elementos y sus compuestos que participan en las soluciones acuosas de los suelos y de las aguas superficiales.....	5
3.2. Solubilidad de las sales nocivas en el agua.....	11
3.3. Solubilidad de las sales más importantes que participan en las soluciones salinas de los suelos.....	13
3.4. Composición química de las aguas de suelos (extractos de saturación), aguas superficiales (ríos) y aguas de pozos.....	13
3.5. Aguas superficiales de diferentes partes del mundo.....	15
3.6. Calidad del agua de riego.....	16
3.7. Peligro de salinización de los suelos.....	19
3.8. Peligro de sodificación de los suelos.....	20
3.8.1. Relación funcional Porcentaje de Sodio Intercambiable-Relación de Adsorción de Sodio (PSI-RAS).....	22
3.8.2. Ecuación de intercambio catiónico de Gapon.....	23
3.8.3. Relación de adsorción de sodio original o explícita (RAS).....	26
3.8.4. Relación de adsorción de sodio ajustado (RASaj).....	27
3.8.5. Relación de adsorción de sodio corregido (RAS°).....	31
3.9. Problemas de infiltración en los suelos agrícolas bajo riego.....	35
3.10. Carbonato de sodio residual (CSR).....	39
3.11. Criterios de toxicidad.....	43

4.	MATERIALES Y METODOS.....	47
4.1.	Descripción geográfica de la zona de estudio.....	47
4.2.	Estaciones de muestreo y variables evaluadas.....	49
4.3.	Directrices sobre la calidad del agua.....	53
4.4.	Análisis estadístico.....	54
4.5.	Formas de comprobar los análisis químicos de las aguas.....	55
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
5.1.	Composición iónica de las aguas residuales (Otoño 2008 y Verano 2009).....	59
5.2.	Distribución de los diferentes cationes y aniones en las aguas que riegan el Valle del Mezquital.....	60
5.3.	Conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ y mmolc L^{-1} en las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital.....	63
5.4.	Relación de la conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas residuales (determinada teóricamente) con la conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ (determinada experimentalmente).....	65
5.5.	Relación de los mg L^{-1} analíticos con la conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas residuales.....	67
5.6.	Relación de suma de cationes mmolc L^{-1} con la conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas residuales.....	68
5.7.	Relación de la presión osmótica (MPa) y la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las aguas residuales.....	69
5.8.	Clasificación de las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital de acuerdo con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS).....	72
5.9.	Clasificación de las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital en lo que se refiere al Peligro de Disminución de la Infiltración.....	78
5.10.	Carbonato de Sodio Residual.....	80
5.11.	La relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital.....	82
5.12.	Contenido de Boro en las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital.....	84
5.13.	Contenido del Fósforo en las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital.....	94

5.14. Nitratos en las aguas residuales del Valle del Mezquital.....	95
6. CONCLUSIONES.....	98
7. RECOMENDACIONES.....	100
8. BIBLIOGRAFIA.....	101
9. ANEXOS	108
ANEXO.1. Localización geográfica de los sitios de muestreo de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán. Otoño 2008 y Verano 2009.....	108
ANEXO.2. Concentración iónica del agua que riega el Valle del Mezquital. Otoño 2008 y Verano 2009.....	113
ANEXO.3. Presión osmótica calculada por tres métodos del agua de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán.....	126
ANEXO.4. Valores de los diferentes RAS determinados de acuerdo con sus diferentes formulaciones.....	131
ANEXO.5. Clasificación de acuerdo al contenido de boro (mg L^{-1}) de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán. Otoño 2008 y Verano 2009. Buena (B); Condicionada (C) y No Recomendable (NR).....	136
ANEXO.6. Clasificación del contenido de fosfatos (PO_4^{3-}) de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán. Otoño 2008 y Verano 2009.....	137
ANEXO.7. Cuadro de relaciones iónicas de los principales cationes y aniones de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán. Otoño 2008 y Verano 2009...	138
ANEXO.8. Clasificación de acuerdo a su Salinidad Efectiva de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán. Otoño 2008 y Verano 2009.....	143
ANEXO.9. Clasificación del agua residual de acuerdo con su Salinidad Potencial, de de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán. Otoño 2008 y Verano 2009.....	144

INDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Solubilidad de las diferentes sales que participan en la salinización de los suelos.....	13
Cuadro 2. Características químicas de los extractos de saturación de suelos salinos y sódicos, aguas de pozos y aguas de ríos que han sido analizados por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos.....	14
Cuadro 3. Calidad del agua superficial (ríos), que son utilizadas para riego.....	17
Cuadro 4. Composición química de algunas aguas fluviales usadas para riego en el Oeste de los Estados Unidos.....	18
Cuadro 5. Análisis químico del agua de riego de varias fuentes en Kinnaur región de Himachal Pradesh, India.....	19
Cuadro 6. Calculo de los valores de pH_c teórico de las aguas de riego.....	32
Cuadro 7. Concentración de calcio (Ca°) en el agua del suelo, contenido cerca de la superficie del suelo, que resultaría de regar con aguas de determinado valor HCO_3^-/Ca^{2+} y conductividad del agua de riego (CE).....	36
Cuadro 8. Influencia de los cationes adsorbidos en las diferentes propiedades físicas de los suelos.....	38
Cuadro 9. Clasificación del agua de riego, de acuerdo con el carbonato de sodio residual.....	42
Cuadro 10. Composición química de aguas para riego que se experimentaron en un suelo franco Hanford con diferentes números de riegos.....	42
Cuadro 11. Límites permisibles de boro en $mg L^{-1}$, establecidos por Wilcox en 1948, para diferentes clases de agua de riego.....	45
Cuadro 12. Métodos analíticos utilizar para caracterizar el agua de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán.....	52
Cuadro 13. Lineamientos para evaluar la calidad del agua para riego.....	54
Cuadro 14. Conductividad eléctrica teórica de los diferentes iones que más comúnmente se encuentran en el agua.....	65
Cuadro 15. Clasificación de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, de acuerdo con las diferentes formulaciones de RAS-CE, Otoño 2008 y Verano 2009.....	76

Cuadro 16.	Valores del PSI determinados de acuerdo con el RAS_{or} , de las muestras de agua del Valle del Mezquital.....	85
-------------------	--	----

INDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Valores de los logaritmos negativos de las concentraciones molares de pCa y equivalentes de pCO_3+HCO_3 con respecto a las concentraciones totales de cationes expresados en $mmol_c L^{-1}$	34
Figura 2.	Localización de las estaciones de muestreo en la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán, Otoño de 2008.....	50
Figura 3.	Localización de las estaciones de muestreo en la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán, Verano de 2009.....	51
Figura 4.	Composición iónica del agua residual de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán, Otoño 2008.....	61
Figura 5.	Composición iónica del agua residual de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán, Verano 2009.....	62
Figura 6.	Curva de distribución de frecuencias de los valores de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) del agua residual que riega el Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo.....	63
Figura 7.	Curva de distribución de frecuencias de los valores de la suma de cationes ($mmol_c L^{-1}$) del agua residual que riegan el Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo.....	64
Figura 8.	Relación funcional entre la conductividad eléctrica teórica ($\mu S cm^{-1}$) y la conductividad eléctrica experimental ($\mu S cm^{-1}$) del agua residual del Valle del Mezquital.....	66
Figura 9.	Concentración de sales expresadas en $mg L^{-1}$ y su relación con la conductividad eléctrica del agua residual del Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo.....	67
Figura 10.	Relación entre la conductividad eléctrica $\mu S cm^{-1}$ y la concentración de las sales solubles expresada en $mmol_c L^{-1}$ de las muestras de agua que riegan el Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo.....	68
Figura 11.	Relación entre la PO_{exp} (MPa) y la $PO_{teórica}$ (MPa) de las muestras de agua que riegan el Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo.....	70
Figura 12.	Relación entre los $mmol-ion L^{-1}$ y la conductividad eléctrica $\mu S cm^{-1}$ del agua que riega el Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo.....	71

	Página
Figura 13. Relación entre los valores del RAS_{or} - RSA_{aj}	75
Figura 14. Relación entre los valores de RAS_{or} - RAS°_{corr}	75
Figura 15. Diagrama de clasificación del agua, de la red hidrográfica Zumpango – Ixmiquilpan – Zimapán, Otoño 2007 e Invierno 2008, RAS original-CE, RAS ajustado-CE y RAS° corregido-CE.....	77
Figura 16. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio bajo diferentes formulaciones (RAS_{or} , RAS_{aj} y RAS°_{corr}) del agua de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, Otoño 2008 y Verano 2009.....	79
Figura 17. Distribución del agua residual, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán, de acuerdo con el contenido de carbonato de sodio residual Na_2CO_3 ($mmol_c L^{-1}$) para las estaciones de muestreo Otoño 2008 y Verano 2009.....	81
Figura 18. Relación entre el PSI del suelo calculado de acuerdo al RAS_{or} . Se utilizaron diferentes coeficientes de selectividad iónica $k = [mmol_c L^{-1}]^{-1/2}$.	90
Figura 19. Relación entre el PSI del suelo calculado de acuerdo al RAS_{aj} . Se utilizaron diferentes coeficientes de selectividad iónica $k = [mmol_c L^{-1}]^{-1/2}$.	91
Figura 20. Relación entre el PSI del suelo calculado de acuerdo al RAS° . Se utilizaron diferentes coeficientes de selectividad iónica $k = [mmol_c L^{-1}]^{-1/2}$.	92
Figura 21. Distribución del agua residual del Valle del Mezquital de acuerdo con el contenido de Boro $mg L^{-1}$	93
Figura 22. Distribución del agua residual del Valle del Mezquital de acuerdo con el contenido de fosfatos (PO_4^{-3}).....	95
Figura 23. Distribución del agua residual del Valle del Mezquita de acuerdo con el contenido de nitratos (NO_3^{-}).....	97

1. INTRODUCCION

El desarrollo socioeconómico de la humanidad se ha basado, en gran parte, en el éxito del regadío. El uso de aguas de riego con contenidos elevados en sales es uno de los factores ambientales que más limitan la productividad de los cultivos agrícolas

Actualmente se estima que de los 72 millones de metros cúbicos de agua que se utilizan en el país; el 78% se destina a la agricultura de riego. Ésta, calculada en más de 6.0 millones de hectáreas que se subdividen en 38 distritos de riego y 39 500 unidades de riego.

Los distritos de riego 088 Chiconautla, Estado de México, 03 de Tula y 100 de Alfajayucan, en el Estado de Hidalgo, se riegan con aguas residuales urbano-industriales de la Ciudad de México. Se estima que el volumen de aguas residuales de origen urbano-industrial que emite la ciudad de México al valle del Mezquital es 2553 Mm³ anuales (Espino, 1981).

Estas aguas residuales se utilizan para el riego en el valle del Mezquital prácticamente sin ningún tratamiento. Sin embargo se debe indicar que en algunas circunstancias, como la existencia de algunas plantas de tratamiento, las aguas residuales de origen urbano industrial antes de verterse a los cauces de conducción y por consiguiente destinarse al riego de cultivos agrícolas, deben tratarse en diferentes lagunas de estabilización (Jairo,1999).

La agricultura de riego depende de la cantidad y calidad de agua disponible. En las últimas décadas se le ha dado mucha importancia a la calidad del agua para riego debido a que en la práctica agrícola se utilizan aguas subterráneas, aguas superficiales (ríos, lagos, lagunas) y manantiales de la mas variada composición química. En general, las aguas de los ríos se retienen en diferentes embalses, para después ser utilizadas en las zonas agrícolas bajo riego.

Se ha hecho un uso intensivo de prácticamente todas las aguas de buena calidad, para el riego, debido a que la necesidad de agua para el riego de nuevas áreas agrícolas ha estado aumentando en los últimos años, por este motivo, se ha hecho necesario recurrir a fuentes de agua de menor calidad. Es oportuno señalar, que las aguas de uso urbano-industrial en el país se vierte a los cauces naturales con poco o nulo tratamiento, o bien son utilizadas en los campos agrícolas que se ubican en la periferia de las grandes ciudades.

Para determinar la factibilidad del uso de determinada agua de riego, es necesario que se tomen en cuenta los siguientes factores: a). Composición química; b). Las particularidades de los cultivos agrícolas; c). El clima de la zona agrícola bajo riego; d). Las propiedades físicas de los suelos y e). Los métodos agronómicos que se utilizan en la explotación de los diferentes cultivos agrícolas (Kovda, et. al., 1967; Oster y Rhoades, 1986). La interdependencia de estos cinco factores, determina la posibilidad de uso de una fuente de agua para el riego de los cultivos agrícolas.

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

Los problemas que se presentan durante el uso de aguas para riego de diferente calidad son por consiguiente: a). Salinidad; b). Problemas de infiltración; c). Toxicidad de iones específicos, como el boro, cloro o sodio; d). Exceso de nutrimentos como nitratos y fosfatos (Ramalho, 1998); y el caso particular de aguas urbano-industriales de la Ciudad de México que riegan el Valle del Mezquital, un problema adicional son los metales pesados (plomo, zinc, cadmio, mercurio, entre otros).

En diferentes investigaciones se ha establecido que las aguas que riegan el Valle del Mezquital son: sulfático-clorhídrico-bicarbonatadas y clorhídrico-sulfático-bicarbonatadas (Velásquez, 2001).

Cuando las aguas de riego contienen cantidades considerables de iones bicarbonato, la precipitación de los iones de calcio se presenta con cierta intensidad. En las aguas de riego que tienden a tener un régimen alcalino debido al sistema carbonato ($\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-}$) la precipitación de los iones de calcio en forma de calcita y en alguna medida la precipitación de magnesio como carbonato de magnesio condicionan un incremento en los valores de la relación de adsorción de sodio. En condiciones de equilibrio del agua del suelo, con una

determinada agua de riego un aumento de los valores de RAS en las aguas de riego, este aumento se refleja también en los valores del Porcentaje de Sodio Intercambiable en los suelos.

En este trabajo de investigación que es un tipo de estudio Descriptivo, Prospectivo y Transversal, en el cual se tiene afluentes de aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán se ha establecido como objetivo caracterizar las diferentes aguas residuales en los parámetros físico-químicos fundamentales como: pH, CE, Ca, Mg, Na, K, CO₃, HCO₃, Cl, CO₄, RSE, PO, PO₄, NO₃ y B.

Mediante la asociación de diferentes variables se podrá inferir sobre los valores del porcentaje de sodio intercambiable PSI que adquirirán los distintos suelos del Valle del Mezquital, cuando las aguas residuales se encuentren en equilibrio con los suelos que se riegan con esta agua.

2. TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El trabajo de investigación es de carácter Prospectivo, Transversal, Descriptivo, Observacional.

2.1. OBJETIVOS

2.1.1. GENERAL

Establecer los diferentes niveles de sodio intercambiables PSI en los suelos de acuerdo con los diferentes valores de RAS.

2.1.2. PARTICULARES

Determinar los parámetros físico-químicos esenciales de la composición de las aguas residuales como; pH, CE, Ca, Mg, Na, K, CO₃, HCO₃, Cl, SO₄, RSE, PO, PO₄, NO₃ y B.

Determinar los valores de la Relación de Adsorción de Sodio bajo diferentes conceptualizaciones; RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^o_{corr}.

2.2. HIPOTESIS

Con el conocimiento de los distintos valores de los diferentes parámetros físico-químicos de las aguas residuales se podrá conocer la magnitud del por ciento de sodio intercambiable de los suelos del Valle del Mezquital.

3. REVISION DE LITERATURA

La diversidad de concentraciones iónicas en las aguas superficiales se debe a los contenidos mineralógicos de las rocas que estas aguas atraviesan durante su escurrimiento hacia las depresiones oceánicas (Kodva *et. al.*, 1967). Durante este transcurso, las aguas superficiales pasan por diferentes formaciones geológicas y debido a los procesos de intemperismo de las rocas, las soluciones acuosas se enriquecen con diferentes elementos químicos. Sin embargo, se debe señalar también que, cuando los diferentes compuestos salinos presentes en los suelos y en las aguas superficiales alcanzan concentraciones límite se precipitan. Como por ejemplo las sales de los bicarbonatos o sales de los sulfatos entre otras (Wilcox *et. al.*, 1954). Así, los procesos de disolución y de precipitación reducen la concentración y composición de las aguas superficiales.

La presente revisión bibliográfica está orientada a analizar el origen de los elementos que forman las sales disueltas en las aguas superficiales y residuales; así mismo, persigue establecer los fundamentos de los distintos índices de clasificación de las aguas para riego, tanto superficiales como subterráneas.

3.1. Geoquímica de los elementos y sus compuestos que participan en las soluciones acuosas de los suelos y de las aguas superficiales.

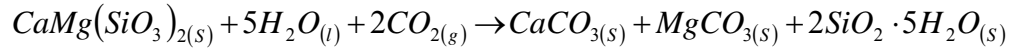
Los elementos que participan en las soluciones de las aguas superficiales, freáticas, acuíferas, marinas y de los suelos, son: calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K), oxígeno (O), cloro (Cl), azufre (S), carbono (C), nitrógeno (N), boro (B), y otros (Huez, 1985). En el caso particular de las aguas urbano-industriales de la ciudad de México se deben mencionar los metales pesados (plomo, zinc, mercurio, arsénico, cadmio, etc.), además las aguas residuales poseen también cantidades considerables de boro (B).

Calcio (Ca).

En la corteza terrestre se tiene un 3.2 % de calcio. Es uno de los elementos ampliamente difundidos durante la cristalización del magma, y está en la composición de las rocas básicas y en menor cantidad en las rocas ácidas. El contenido del calcio en los basaltos alcanza un 6.4%

y en los granitos disminuye hasta 1.55%. El calcio se encuentra en la composición de las augitas, anfíboles, anortitas y de las plagioclasas (Kovda et al., 1967), (Szabolcs, 1989).

El intemperismo de los silicatos de calcio ocurre de la siguiente manera:



El intemperismo de los aluminosilicatos que contienen calcio ocurre de acuerdo con el siguiente esquema:

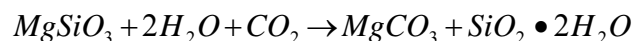


El $CaCO_3$ que se ha formado durante el intemperismo de los minerales que contienen calcio, y en presencia de CO_2 , pasa a una forma más soluble como bicarbonato de calcio $Ca(HCO_3)_2$.

Las sales solubles de calcio, $Ca(HCO_3)_2$, $CaCl_2$, $Ca(NO_3)_2$, se acumulan en las aguas naturales: superficiales, freáticas y de los suelos y con el flujo de éstas ingresan a las depresiones internas, mares y océanos. Una parte del calcio, como resultado de la evaporación de las soluciones y de las reacciones de intercambio se precipitan, formando: calcita ($CaCO_3$), yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), anhidrita ($CaSO_4$), gaylusita ($CaSO_3Na_2CO_3 \cdot 5H_2O$), y dolomita $CaMg(CO_3)_2$ y otras que entran en la composición de las rocas sedimentarias, marinas y en la composición de los suelos.

Magnesio (Mg).

El contenido de magnesio en la corteza terrestre es igual a 2.07%. Así como el calcio, el magnesio está contenido en grandes cantidades en el magma. Se encuentra mucho en las rocas básicas y ultrabásicas. En el basalto su contenido es igual a 3.77%, y en los piroxenos alcanza 10.9%. En las rocas de magma ácida su contenido es menor que el del calcio. Durante el intemperismo de los silicatos magnésicos se forma carbonato de magnesio.



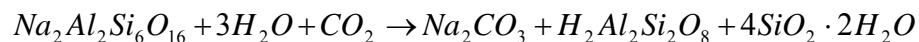
Durante el intemperismo de los feldespatos, en condiciones de una reacción alcalina se forma montmorillonita, hidromicas y otros minerales arcillosos. Las sales $MgSO_4$, y $MgCl_2$ son muy solubles en el agua. El carbonato de magnesio $MgHCO_3$ es menos soluble y el bicarbonato de

magnesio es débilmente soluble. Las sales de magnesio que se solubilizan en las aguas superficiales, freáticas y en los suelos, participan en los grandes ciclos de migración en la corteza terrestre (Huez, 1985). En las rocas sedimentarias y en los suelos, el magnesio se acumula en forma de minerales salinos: magnesita $MgCO_3 \cdot H_2O$, dolomita $CaMg(CO_3)_2$, epsomita $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, kieserita $MgSO_4 \cdot H_2O$, astrakanita $Na_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot H_2O$ carnalita $KClMgCl_2 \cdot 6H_2O$, kainita $KClMgSO_4 \cdot 3H_2O$ y otras (Kovda et. al., 1967).

Sodio (Na).

Su contenido en la corteza terrestre es de 2.35%. En las rocas del magma alcalino el contenido de Na + K es de 15 – 20%, y en los basaltos se encuentra en 2.31%. El sodio se encuentra en la albita, plagioclasa, leicitita, nefelino y en los minerales que contienen cloro como: sodolita y nosean.

El intemperismo de los aluminosilicatos que contienen sodio ocurre de acuerdo con el siguiente esquema:



Los Na_2CO_3 , y $NaHCO_3$ que se han formado pueden reaccionar con los ácidos y sales, formando $NaCl$, Na_2SO_4 , $NaNO_3$ y $NaSiO_3$. Durante el intemperismo de minerales que contienen cloro el sodio se presenta como Na_2SO_4 (Szabolcs, 1989).

Las sales de sodio se encuentran en grandes cantidades en las aguas freáticas de las regiones semidesérticas y desérticas. La mineralización de las aguas freáticas en las zonas áridas varía de 1-2 hasta 100-200 $g L^{-1}$. Además, cuando las concentraciones son muy altas, en la composición de sales predomina el $NaCl$ y Na_2SO_4 . Por otra parte, generalmente se acumulan estas sales en los suelos sódicos y salinos. De tal forma que el ión sodio se encuentra en la composición de los cationes adsorbidos (20-30-60% y más) (Szabolcs, 1989; Bingham et. al., 1979). Asimismo, una fracción del sodio adsorbido puede pasar a la solución del suelo donde reacciona con el CO_3^{2-} y HCO_3^- ; para formar carbonato y bicarbonato de sodio.

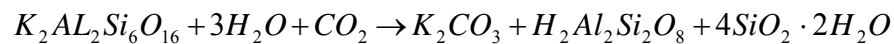
Los suelos salinos contienen hasta 2-3% de sales de sodio, las costras salinas pueden contener hasta 10-20%. Los siguientes minerales de sodio son los más ampliamente distribuidos y se

precipitan durante la evaporación de las aguas de los suelos, freáticas y superficiales: halita (NaCl), mirabilita (Na₂SO₄), salitre sódico NaNO₃, termonatrita (Na₂CO₃·H₂O), soda (Na₂CO₃·10H₂O), trona (Na₂CO₃NaHCO₃·2H₂O), glauberita (2Na₂SO₄Na₂CO₃) y gaylusita (Na₂CO₃Na₂CO₃·5H₂O) (Antipov-Karataev., 1967., Szabolcs, 1989).

Potasio (K).

La corteza terrestre contiene 2.27% de potasio. Al igual que el sodio, se encuentra en la composición de las rocas ácidas y básicas. En las rocas ácidas se encuentra el potasio en mayor cantidad que el sodio, en las rocas básicas y alcalinas el contenido de éste elemento es menor si se compara con el contenido de sodio. En los basaltos su contenido es de 1.2%. El potasio está en la composición de la ortoclasa, muscovita y como trazas se encuentra en las plagioclasas y en la albita.

En los procesos de intemperismo de los aluminosilicatos que contienen potasio, las reacciones ocurren de acuerdo con la siguiente ecuación:



Los carbonatos de potasio cuando interactúan con los ácidos y con las sales se transforman en cloruros, sulfatos y nitratos. En la hidrosfera, el potasio es de menor contenido que el sodio. Esto está relacionado con la resistencia al intemperismo de los minerales potásicos.

En los suelos salinos y sódicos, el potasio adsorbido es considerablemente menor que el sodio debido a su bajo contenido en las aguas superficiales, freáticas y de los suelos (Richards, 1973).

Las sales minerales del potasio son: silvita (KCl), carnalita (KClMgCl₂·6H₂O), kainita (KClMgSO₄·4H₂O), y salitre potásico (KNO₃).

Cloro (Cl).

El contenido de cloro en la corteza terrestre es de 0.1%. En las rocas extrusivas es de 0.05% y en las rocas alcalinas es de 0.7%. La mayor cantidad se encuentra en la hidrósfera, alrededor de 60% de sus reservas totales.

La fuente principal de este elemento en las aguas oceánicas son emanaciones gaseosas primarias de los volcanes y la emanación secundaria de las lavas durante su enfriamiento.

Una cantidad considerable ingresa a las depresiones oceánicas en forma de cloruros que han sido lixiviados de las rocas marinas saturadas con éste ión o de la formación de éstos durante el intemperismo. En la corteza continental, una cantidad se encuentra en las rocas sedimentarias de origen marino y en las rocas continentales. Durante la evaporación de golfos pequeños y lagunas limítrofes al mar, los cloruros de sodio, potasio y magnesio, forman yacimientos de una gran potencia. En las aguas freáticas y de los suelos de las zonas áridas y de regiones sin escurrimientos se encuentran cantidades considerables de este ión.

Los minerales del cloro son: NaCl (halita), KCl (silvita), $MgCl_2 \cdot 7H_2O$ (epsomita), $KClMgCl_2 \cdot 6H_2O$ (carnalita), $KClMgSO_4 \cdot 4H_2O$ (kainita) y cloruros de magnesio y calcio hidratados con una, dos o más, hasta doce moléculas de agua.

El Azufre (S).

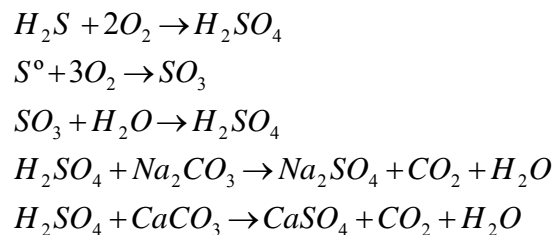
El contenido en la corteza terrestre es de 0.06%. En las rocas cristalinas, la cantidad de azufre, en promedio es de 0.05% y en las sedimentarias, es de 0.22%. En las rocas eruptivas, se encuentra en la forma de pirita (FeS_2), gayun ($3NaAlSiO_4Na_2SO_4$) y otros.

En las rocas sedimentarias predomina en forma de sales del ácido sulfúrico. Sus sales minerales son: yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), anhidrita ($CaSO_4$), kiserita ($MgSO_4$), mirabilita ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$), glauberita ($Na_2SO_4CaSO_4$), astrakanita ($Na_2SO_4MgSO_4 \cdot 4H_2O$), y kainita ($KClMgSO_4 \cdot 4H_2O$).

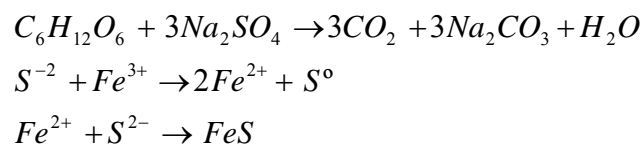
La hidrosfera contiene 0.09%, una cantidad considerable se encuentra en el agua de los océanos. En particular existen muchos compuestos en las aguas de las lagunas y de los lagos

salados. Muchos de éstos se encuentran en las aguas freáticas y en los suelos de las regiones áridas y semiáridas.

Es uno de los elementos importantes en la nutrición vegetal, ya que forma parte de la composición de las proteínas. Participando en el ciclo biológico, durante la descomposición de las proteínas se transforma en ácido sulfhídrico. El ácido sulfhídrico al combinarse con el oxígeno del aire se oxida y forma ácido sulfúrico, en estas condiciones participan bacterias oxidantes aeróbicas del ácido sulfhídrico. A su vez el azufre que se ha formado en condiciones de reducción de sulfatos; enseguida reacciona con algunas cantidades de oxígeno disuelto formando el ión sulfito, posteriormente, el ión sulfito se combina con el agua formando ácido sulfúrico. Estas cantidades de ácido sulfúrico formadas, reaccionan con los carbonatos de los metales alcalino-térreos originándose con esto los sulfatos correspondientes (Szabolcs, 1989). Estos procesos en condiciones de oxidación del ácido sulfhídrico hasta ácido sulfúrico y el proceso de reducción de sulfatos en condiciones anaeróbicas se presenta líneas abajo.



Reducción de sulfatos en condiciones anaeróbicas.



Cuando no hay suficiente oxígeno, las formas oxidadas del azufre se reducen hasta sulfhídrico.

Carbono (C).

Los compuestos del carbono forman la parte más importante en las sustancias orgánicas.

Las sustancias orgánicas se forman en las plantas verdes durante el proceso de fotosíntesis, en donde el bióxido de carbono del aire y como resultado de la absorción de la energía

luminosa del sol por la clorofila se une con el hidrógeno que se ha formado durante la descomposición del agua. El oxígeno se despidió hacia el aire. Durante la destrucción de las sustancias orgánicas por los microbios, así como durante la respiración, el bióxido de carbono se forma y se despidió hacia el aire, aunque parcialmente se solubiliza en el agua el dióxido de carbono que se ha solubilizado en el agua se asimila éste por las raíces de las plantas participando en la formación de sustancias orgánicas. Bajo la acción de los microorganismos las sustancias orgánicas se transforman en humus.

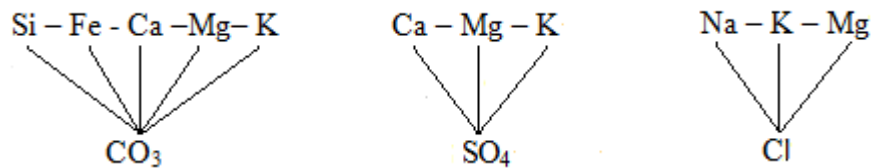
En las profundidades del planeta los compuestos del carbono forman yacimientos de carbón, petróleo y gas. En la corteza terrestre los compuestos del carbono están distribuidos en forma de carbonatos de calcio, que forman parte de las calizas y mármoles. Los carbonatos de calcio uniéndose con el magnesio forman las dolomitas $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Una gran cantidad de carbonatos, fundamentalmente de CaCO_3 y MgCO_3 están contenidos en las rocas sedimentarias (los loess contienen hasta 20-25%) (Kovda et al., 1967; Huéz, 1985). En las soluciones acuosas de los suelos sódicos y en los suelos que se han salinizado se encuentran carbonato y bicarbonato de sodio; los carbonatos de calcio y de magnesio se solubilizan débilmente en el agua, los bicarbonatos de calcio y de magnesio son más solubles en el agua.

Los minerales – sales que contienen carbono y que están ampliamente distribuidos son: calcita (CaCO_3), dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, magnesita (MgCO_3), soda (Na_2CO_3), potasa (K_2CO_3), y trona ($\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot\text{NaHCO}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

3.2. Solubilidad de las sales nocivas en el agua

Las sales solubles nocivas para las plantas que se encuentran en la capa intemperica del suelo y, aguas superficiales freáticas son: los cloruros de Na, Ca y Mg, los sulfatos de Na y Mg, los carbonatos y bicarbonatos de Na, Mg y Ca. En las rocas sedimentarias, capa del intemperismo y suelos, una gran parte de las sales se encuentra en forma cristalina y durante el humedecimiento, una parte pasa a la fase líquida. A medida que aumenta la temperatura, la solubilidad de algunas sales aumenta (NaHCO_3 , K_2SO_4 , Na_2SO_4).

La secuencia de las precipitaciones de las sales de una solución policomponente, depende del grado de su solubilidad. Las sales débilmente solubles se precipitan en concentraciones bajas y las sales más solubles se precipitan en concentraciones muy altas. Una regularidad general de precipitación se expresa de la siguiente manera:



es decir los cationes se precipitan secuencialmente de acuerdo con la serie: Fe - Si - Ca - Mg - Na - K y los aniones de acuerdo con la serie CO_3 - SO_4 - Cl.

Las regularidades de la precipitación de las sales se han estudiado ampliamente en las aguas de altos contenidos salinos. En primer lugar se precipitan los hidróxidos de silicio y fierro, después los carbonatos de calcio y de magnesio, más adelante el yeso y los sulfatos de magnesio, y por último cloruros de sodio, potasio y magnesio (Kovda et al., 1967, Szabolcs, 1989).

En principio los iones de calcio Ca^{2+} , magnesio Mg^{2+} , sodio Na^+ , potasio K^+ , carbonato CO_3^{2-} , bicarbonato HCO_3^- , cloruro Cl^- y sulfato SO_4^{2-} , son extraídos en sus orígenes de las mallas cristalinas de los minerales que conforman las rocas. De tal manera que, se puede señalar, que la concentración relativa de unos iones con respecto a otros dependerá de procesos específicos que se presenten en las soluciones de las aguas de riego (Ayers y Wescot, 1987).

Cuando se estudian las composiciones químicas de las aguas naturales, de escurrimiento y subterráneas, así como también aguas freáticas y aguas de los suelos, es muy importante conocer la solubilidad de las diferentes sales. En los procesos de acumulación de sales en los suelos de las cuencas endorreicas es muy importante conocer las diferentes solubilidades que tienen las sales ya que en un proceso de escurrimiento hacia las partes más bajas de las cuencas endorreicas, las diferentes sales solubles se depositan en los suelos de acuerdo con las distintas solubilidades de las sales.

3.3. Solubilidad de las sales más importantes que participan en las soluciones salinas de los suelos.

En un proceso de migración de las soluciones de los suelos hacia las depresiones y cuencas endorreicas en las partes más bajas se acumulan las sales más solubles. En el Cuadro 1 Se presenta la solubilidad de diferentes sales que participan en la salinización.

Cuadro 1. Solubilidad de las diferentes sales que participan en la salinización de los suelos.

Sal	En g por 100 g de solución						En g por litro de solución					
	Temperatura en °C						Temperatura en °C					
	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50
Na ₂ CO ₃	6.5	10.9	17.9	28.4	32.4	32.1	70	122	213	371	441	429
NaHCO ₃	6.5	7.5	8.7	10	11.3	12.7	68	80	93	107	121	137
Na ₂ SO ₄	4.3	8.3	16.1	29	32.6	31.8	45	90	185	373	430	415
NaCl	26.3	26.3	26.4	26.5	26.7	26.9	318	317	317	317	318	319
MgSO ₄	18	22	25.5	28	30.8	33.4						
MgCl ₂	38.8	39.8	41	48.6	51.8	54.4						
CaCl ₂	37.3	39.4	42.7	50.7	53.4	56						
NaNO ₃	42.1	44.4	46.7	49	51.2	53.3	570	607	686	686	724	762
KNO ₃	11.6	17.5	24	31.5	39	46.1	125	194	279	384	498	614
K ₂ CO ₃	51.7	52.2	52.6	53.2	53.9	54.7	814	823	829	839	852	867
KHCO ₃	18.4	21.5	25.2	28.5	32.2	36						
K ₂ SO ₄	6.7	8.5	10	11.5	12.9	14.2	71	91	108	125	142	157
KCl	21.9	23.8	25.6	27	28.7	3.01	253	277	301	322	341	359

Fuente: Kodva *et. al.*, 1967

3.4. Composición química de las aguas de suelos (extractos de saturación), aguas superficiales (ríos) y aguas de pozos

La composición química de las aguas que circulan en la superficie y de las aguas subterráneas varía grandemente en regiones áridas y semiáridas. En el Cuadro 2 se muestran datos que se han seleccionado de extractos de saturación de suelos salinos, agua de pozos y de ríos que se han analizado en el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos. Estas muestras se han tomado en muchas partes del mundo.

Las soluciones de extractos de saturación de suelos son más salinas y sódicas que las soluciones acuosas de aguas de pozos y ríos. Este aspecto, refleja los efectos de la evapotranspiración y el intemperismo, de minerales de rocas superficiales de la corteza terrestre, ya que con el aumento de contenidos salinos en las soluciones; el ión sodio (Na⁺) predomina sobre el ión calcio (Ca²⁺), debido a que las sales de sodio son mas solubles que las

sales de calcio. La importancia de esta consideración de que el ión Na^+ predomina sobre el ión Ca^{2+} se refleja también en el aumento de valores de la relación de adsorción de sodio. Estos datos también muestran que el ión cloro (Cl^-) es el anión predominante en aguas de mayor salinidad, mientras que el ión sulfato (SO_4^{2-}) prevalece en las soluciones acuosas diluidas. Este aspecto es muy notable, debido a los procesos de precipitación del yeso (CaSO_4).

El aumento en la relación Mg/Ca expresa el hecho de que las sales del ion magnesio (Mg^{2+}) son más estables que las sales del ión Ca^{2+} . En términos generales, la relación Ca/HCO_3^- es más grande que uno. Y como el ión Ca^{2+} se precipita en los suelos en forma de CaCO_3 , la relación Mg/Ca también tiende a incrementarse.

Cuadro 2. Características químicas de los extractos de saturación de suelos salinos y sódicos, aguas de pozos y aguas de ríos que han sido analizados por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos.

mmol _e L ⁻¹	Número de muestras	Origen	Media	Mediana	menor que 10%	menor que 90%
Ca^{2+}	139	Extracto de saturación	27.80	10.60	1.40	71.80
	115	Pozos	5.90	3.10	0.80	14.50
	68	Ríos	4.70	3.40	1.00	10.90
Mg^{2+}	139	Extracto de saturación	22.20	8.00	1.10	79.10
	115	Pozos	4.30	1.50	0.50	15.30
	61	Ríos	3.60	2.20	0.60	9.20
Na^+	139	Extracto de saturación	93.20	53.50	1.80	219.00
	115	Pozos	15.80	6.60	0.80	44.80
	58	Ríos	7.50	3.70	0.70	18.90
K^+	128	Extracto de saturación	1.60	0.50	0.10	2.20
	101	Pozos	0.60	0.10	0.01	0.90
	30	Ríos	0.30	0.20	0.06	0.50
SO_4^{2-}	134	Extracto de saturación	400.00	29.40	3.70	94.10
	23	Pozos	6.70	3.60	0.40	5.40
	58	Ríos	6.70	4.10	0.30	9.00
Cl^-	139	Extracto de saturación	95.50	34.80	1.40	281.00
	115	Pozos	15.00	2.50	0.20	54.20
	58	Ríos	5.90	1.50	0.20	20.70
HCO_3^-	139	Extracto de saturación	8.30	3.00	1.20	10.30
	115	Pozos	4.90	4.10	1.90	8.20
	58	Ríos	3.30	3.00	1.70	5.70
CE (dS m ⁻¹)	134	Extracto de saturación	12.90	8.80	1.10	33.70
	115	Pozos	2.40	1.20	0.30	7.30
	58	Ríos	1.40	0.92	0.30	3.20
RAS [mmol _e L ⁻¹]	139	Extracto de saturación	38.50	15.10	0.90	56.10
	115	Pozos	6.60	4.70	0.60	16.50
	58	Ríos	3.30	2.40	0.70	7.40

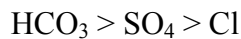
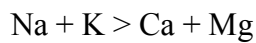
Fuente: Jurinak y Suarez, 1990

3.5. *Aguas superficiales de diferentes partes del mundo*

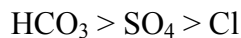
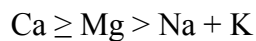
Las aguas superficiales pueden ser clasificadas en dos grupos: a). aguas que fluyen (ríos); y b). aguas estancadas (lagos). Los lagos que se encuentran en cuencas endorreicas poseen un alto contenido de sales y las aguas de lagos abiertos de las zonas húmedas, poseen una baja salinidad (Kodva, 1967).

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

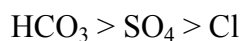
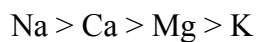
1. Aguas en contacto con rocas graníticas:



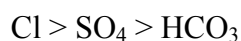
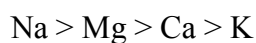
2. Aguas en contacto con rocas carbonatadas (calizas y dolomitas):



3. Aguas de acuíferos basálticos:



4. Aguas de mar:



La concentración y composiciones de las aguas naturales superficiales que se utilizan para riego varían considerablemente en diferentes regiones del mundo. En los Cuadros 3 y 4, se presentan las composiciones de diferentes aguas que se utilizan en el riego.

Un ejemplo de aguas de buena calidad para riego de una región fría y árida de la zona de los Himalayas son las que se presentan en el Cuadro 5 (Ortega *et. al.*, 2005). Las cadenas

montañosas de los altos Himalayas que bordean el Tibet comprenden la región de Kinnaur, Lahaul y Spiti y en las áreas contiguas de Himachal Pradesh, India representan las típicas regiones de gran altitud que son extremadamente frías y áridas. De acuerdo a la conductividad eléctrica y relación de adsorción de sodio, todas las aguas son de buena calidad, sin embargo, los valores del RAS, indican que solamente las aguas del manantial de Chango, India presentaría bajos peligros de sodicidad. Los contenidos de carbonatos en todas las aguas son de valores bajos.

3.6. Calidad del agua de riego

La calidad de las aguas para riego está determinada por la concentración y la composición de los constituyentes disueltos que ésta contenga (Doneen, 1975). Por lo tanto, la calidad del agua de riego es una consideración de uso agronómico, y tienen un carácter importante para comprender como se pueden salinizar los suelos agrícolas y como se puede saturar el complejo de intercambio catiónico con sodio intercambiable (Ayers y Wescot, 1987).

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

Durante la evaluación del uso de agua de riego en las actividades agrícolas es necesario tomar en cuenta para el suelo el riesgo de: a). Salinización o bien b). Incrementar las concentraciones de algunos de los siguientes iones: sulfato de calcio, boro y/o carbonatos (Ayers y Wescot, 1987; Coras, 2000). Es importante señalar que los peligros de las altas concentraciones de iones bicarbonatados y carbonatados; se deben analizar con respecto a las concentraciones de los iones de calcio y magnesio (Eaton, 1950).

Cuadro 3. Calidad del agua superficial (ríos), que son utilizadas para riego.

No.	Fuente de agua y localización	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Total	CO ₃ ²⁻ +HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Total	B	RAS	
		μS cm ⁻¹												mmol _e L ⁻¹
Aguas de ríos														
01	San Joaquín, Biola, C.A.	60.0	0.20	0.10	0.20	0.10	0.60	0.40	0.10	0.10	0.60	53.0	0.06	0.10
02	Feather, Nicolaus, C.A.	90.0	0.40	0.30	0.10	0.10	0.90	0.70	0.10	0.10	0.90	70.0	0.01	0.10
03	Columbia, Canadian Border	150.0	1.10	0.40	0.10	0.00	1.60	1.30	0.00	0.30	1.60	87.0	-	0.20
04	Sacramento, Knights Landing, C. A.	150.0	0.70	0.50	0.40	0.00	1.60	1.20	0.20	0.20	1.60	11.0	0.05	0.60
05	Snake, King Hill, ID	500.0	2.30	1.60	1.30	0.10	5.30	3.50	0.70	1.10	5.30	312.0	0.04	2.00
06	Missouri, Williston, N. D.	650.0	2.90	1.60	2.30	0.10	6.90	2.80	0.30	3.80	6.90	426.0	0.11	2.80
07	Río Grande, Falcon Dam, TX	670.0	3.00	1.00	2.60	0.10	6.70	2.40	1.90	2.40	6.70	419.0	0.15	3.50
08	South Platte, Julesburg, CO	1200.0	6.60	2.80	4.50	0.30	14.20	3.80	1.00	9.40	14.20	910.0	0.23	5.00
09	Colorado, Yuma, AZ	1400.0	5.20	2.60	6.40	0.20	14.40	2.80	4.00	7.60	14.40	914.0	0.18	7.10
10	Salt, Stewart Mtn Dam, AZ	1400.0	1.20	4.30	8.90	0.20	12.90	2.80	9.10	1.00	12.90	755.0	0.14	12.00
11	Arkansas, John Martain Dam, CO	1400.0	7.10	6.20	5.10	0.10	16.60	2.90	0.90	12.80	16.60	1130.0	0.15	4.90
12	Pecos, Artesia, NM	3400.0	20.40	12.00	13.30	0.00	39.90	2.30	13.80	23.80	39.90	2530.0	-	9.10
13	Gila, Gillespie Dam, AZ	7400.0	17.00		53.10	1.20	83.30	5.50	49.70	28.10	83.30	5120.0	0.28	40.00
Aguas de pozos														
01	Indio, CA	300.0	1.40	0.30	1.30	0.00	3.00	2.20	0.20	0.60	3.00	205.0	0.02	2.00
02	Bakersfield, CA	790.0	0.20	0.00	7.30	0.00	7.50	2.50	2.50	2.50	7.50	500.0	6.93	12.00
03	Scottsdale, AZ	1200.0	3.20	2.70	6.80	-	12.70	3.20	6.20	3.10	12.50	718.0	-	8.30
04	Tolleson, AZ	4000.0	6.40	4.10	33.30	-	43.80	10.80	24.90	8.10	43.80	2878.0	-	38.00
05	Pecos, TX	4400.0	9.30	16.10	21.80	0.70	47.90	1.90	29.10	16.90	47.90	2793.0	-	14.00
06	Roll, AZ	7200.0	14.80	11.70	48.00	0.30	74.80	6.30	55.40	13.10	74.80	4535.0	1.28	36.90

Fuente: Hoffman *et al.*, 1990.

Cuadro 4. Composición química de algunas aguas fluviales usadas para riego en el Oeste de los Estados Unidos.

No.	Ríos	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca ²⁺ mmolc L^{-1}	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	TOTAL	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TOTAL	RSE mg L^{-1}	RAS*	PSS**
01	Columbia Winat chic Washington	150	0.90	0.40	0.20	0.00	1.50	0.00	1.20	0.10	0.20	1.50	78	0.24	13.00
			18.03	4.86	4.60	0.00	0.00	73.20	9.60						
			0.45	0.20	0.20	0.00	0.00	1.20	0.10	0.10					
02	Río Grande Otowi Ba N. Mex.	340	1.90	0.70	0.80	0.00	3.40	0.00	1.80	1.50	0.10	3.40	227	0.70	24.00
			38.07	8.50	18.40	0.00	0.00	109.80	53.17	4.80					
			0.95	0.35	0.80	0.00	0.00	1.80	1.50	0.05					
03	El Paso, Tex.	1160	4.20	1.40	6.00	0.00	11.60	0.00	3.60	3.10	5.00	11.70	754	3.58	52.00
			84.16	17.01	138.00	0.00	0.00	219.60	109.89	240.15					
			2.10	0.70	6.00	0.00	0.00	3.60	3.10	2.50					
04	Gila. Florence, Ariz.	1720	3.60	2.00	11.30	0.00	16.90	0.00	3.70	10.00	3.30	17.00	983	6.75	67.00
			72.14	24.30	259.90	0.00	0.00	225.70	354.50	158.49					
			1.80	1.00	11.30	0.00	0.00	3.70	10.00	1.65					
05	Pecos, Carlsbad N. Méx.	3210	17.30	9.20	11.50	0.00	38.00	0.00	3.20	12.00	23.00	38.20	2380	3.15	30.00
			346.69	111.78	264.50	0.00	0.00	195.20	425.40	1104.69					
			8.65	4.60	11.50	0.00	0.00	3.20	12.00	11.50					
06	Humboldt Rye Patch. N. Mex.	1170	1.70	1.90	7.90	0.00	11.50	0.00	5.20	4.50	2.20	11.90	658	5.88	68.00
			34.06	23.08	181.70	0.00	0.00	317.20	159.52	105.66					
			0.85	0.95	7.90	0.00	0.00	5.20	4.50	1.10					

Fuente: Hoffman *et al.*, 1990.

*RAS= Relación de adsorción de sodio. Las concentraciones están expresadas en mmolc L^{-1} .

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

Cuadro 5. Análisis químico del agua de riego de varias fuentes en Kinnaur región de Himachal Pradesh, India.

No.	Localización Ríos	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$			HCO_3^-	Cl^-	B mg L^{-1}	RAS*
				$\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$						
01	Tapri (Sutlej river)	7.9	300	2.6	0.4	1.8	2.2	0.20	0.35	
02	Kalpa (Boktu canal)	6.8	100	0.3	0.7	0.1	1.8	0.15	1.58	
03	Akpa (irrigation tank)	6.9	250	1.3	1.2	1.0	1.6	0.10	1.50	
04	Labrang (spring water)	7.8	550	5.3	0.2	3.1	2.0	0.08	0.12	
05	Labrang (stream)	7.4	550	5.0	0.5	3.1	2.4	0.05	0.31	
06	Siaso Khad (rivulet water)	6.4	250	2.1	0.4	0.8	1.6	0.80	0.39	
07	Sunam (irrigation channel)	7.9	550	5.0	0.5	2.8	1.6	0.15	0.32	
08	Pooh (irrigation channel)	7.6	300	2.7	0.3	1.1	1.2	0.25	0.26	
09	Dubling (irrigation channel)	7.4	700	6.4	0.6	2.2	1.6	0.15	0.34	
10	Chango (spring and stream)	6.9	100	0.2	0.8	0.2	1.4	0.05	2.60	

Fuente: Negi y Ghosh, 1980

RAS= Relación de Adsorción de sodio. Las concentraciones están expresadas en $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$

3.7. Peligro de salinización de los suelos

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

Con base en la conductividad eléctrica (CE) las aguas para riego se han clasificado en:

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

Aguas de salinidad media (C2): La CE es $250 - 750 \mu\text{S cm}^{-1}$, puede usarse siempre y cuando se tenga un grado moderado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, se pueden producir las plantas moderadamente tolerantes a las sales.

Aguas altamente salinas (C3): La CE es de 750 a 2250 $\mu\text{S cm}^{-1}$. No pueden usarse en los suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aun con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales de control de la salinidad. Consecuentemente si se utiliza para riego, se deben seleccionar especies vegetales muy tolerantes a las sales.

Aguas muy altamente salinas (C4): Con $\text{CE} > 2250 \mu\text{S cm}^{-1}$, no es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias, pero puede usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado, debiendo aplicarse un exceso de agua para lograr un buen lavado, en este caso, se deben seleccionar cultivos altamente tolerantes a las sales.

3.8. Peligro de sodificación de los suelos

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

La subdivisión de las aguas de riego con respecto a la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), se basa primordialmente en el efecto que tiene el sodio intercambiable sobre las condiciones físicas de los suelos (Bower et al., 1968). No obstante, las plantas sensibles a este elemento pueden sufrir daños a consecuencia de la acumulación del sodio en sus tejidos aun cuando los valores de sodio intercambiable son más bajos que los necesarios para afectar las condiciones físicas de los suelos.

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

Aguas medias en sodio (S2): RAS = 10 – 18. En suelos de textura fina, el ión sodio representa un peligro considerable, más aún si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio catiónico, especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Estas aguas solo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.

Aguas altas en sodio (S3): RAS = 18 – 26. Pueden producir niveles altos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos, por lo que éstos entonces necesitan prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado e incorporaciones adicionales de materia orgánica. Los suelos yesíferos, pueden no desarrollar niveles perjudiciales de sodio intercambiable, cuando se riegan con este tipo de aguas.

Puede requerirse el uso de mejoradores químicos para sustituir al sodio intercambiable, sin embargo, tales mejoradores no serán económicos si se usan aguas de muy alta sodicidad (Ahmed et al., 1979).

Aguas muy altas en sodio (S4): RAS > 26. Esta agua es inadecuada para el riego de cultivos agrícolas, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y la aplicación de yeso u otros mejoradores no hace antieconómico el empleo de esta clase de aguas.

Sobre las diferentes concentraciones de sales que contienen las distintas aguas que se utilizan en el riego agrícola y sobre los peligros de sodificación que pueden provocar estas, en general se pueden mencionar las aguas cuya conductividad eléctrica es $< 750 \mu\text{S cm}^{-1}$, siendo satisfactorias en cuanto a concentración de sales, aun cuando los cultivos sensibles pueden ser afectados de manera adversa, cuando se usan aguas cuya conductividad varíe entre 250 y $750 \mu\text{S cm}^{-1}$. Las aguas cuya conductividad eléctrica varía entre 750 y $2250 \mu\text{S cm}^{-1}$ son comúnmente utilizadas, obteniéndose con ellas un crecimiento adecuado de las plantas, siempre y cuando se haga buen manejo de los suelos y se cuente con drenaje eficiente, sin embargo, las condiciones de salinidad se presentarán si el lavado y el drenaje no son adecuados (Richards, 1973; Oster y Rhoades, 1986).

El empleo de aguas con conductividad eléctrica mayor a $2250 \mu\text{S cm}^{-1}$ es una excepción y en pocas ocasiones se obtienen buenas cosechas.

Por otra parte se debe mencionar que, el riesgo de sodificación que implica el uso de agua de riego, queda determinado por las concentraciones absoluta y relativa de los cationes (calcio, magnesio, sodio). Si la proporción de sodio es alta, será mayor el peligro de la sodificación y al contrario, si predomina el calcio y el magnesio, esta sodificación es menor (Bower y Wilcox, 1965).

3.8.1. Relación funcional por ciento de sodio intercambiable-relación de adsorción de sodio (PSI-RAS)

La posibilidad de predecir la distribución de iones en la solución del suelo y los iones adsorbidos en los sistemas coloidales de los suelos, es de mucha importancia para el manejo de suelos con problemas de salinidad y de sodicidad. Un parámetro de evaluación de la posibilidad de uso de una determinada agua de riego es el nivel en que el porcierto de sodio intercambiable (PSI) se encontrará en el suelo debido a procesos de adsorción del sodio de las aguas de riego en el complejo de intercambio catiónico de suelos.

El PSI es la propiedad con lo cual disminuye la permeabilidad de los suelos, además de las manifestaciones toxicas del ión sodio en los cultivos. Estos efectos del ión sodio están muy correlacionados, por tanto, cualquier posible evaluación del peligro potencial de la sodicidad de una agua de riego, deberá relacionarse con el PSI, que tendrá que encontrarse en el suelo derivado del uso de una determinada agua de riego.

Como ya se ha mencionado, el peligro de sodicidad de las aguas de riego puede afectar la producción de cultivos. El peligro potencial de la sodicidad del agua es a veces evaluado con los valores de la relación de adsorción de sodio y con los valores de la salinidad. La sodicidad del suelo está dada por el PSI, esto significa el porcentaje de cargas negativas saturadas con iones de sodio.

El PSI de un suelo puede ser estimado de la relación de adsorción de sodio (RAS) del agua, cuando el agua esta en equilibrio con el suelo y en condiciones de saturación. La ecuación

para calcular el PSI a partir de la relación de adsorción de sodio se obtiene de la siguiente manera:

$$\frac{X_{Na}}{CIC - X_{Na}} = Kg \text{ RAS} \text{ y } PSI = \frac{X_{Na}}{CIC} 100$$

Después de hacer los arreglos correspondientes la ecuación final es:

$$\frac{PSI}{100 - PSI} = Kg \text{ RAS}$$

Y despejando PSI nos queda como resultado:

$$PSI = \frac{Kg \text{ RAS}}{1 + Kg \text{ RAS}} 100$$

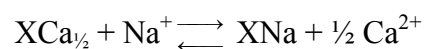
Esta es la ecuación para calcular el PSI de un suelo conociendo la relación de adsorción de un agua de riego determinada en condiciones de equilibrio y saturación del suelo con esa agua.

3.8.2. Ecuación de intercambio catiónico de Gapon

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

La reacción de intercambio catiónico de Gapon, ha sido ampliamente utilizada en los estudios de salinidad y de sodicidad.

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



Donde: Las concentraciones de los iones en solución se expresan en mol L⁻¹; Las concentraciones de los iones en el complejo de intercambio de cationes están expresadas en cmol_c kg⁻¹.

En condiciones de equilibrio esta ecuación se escribe como sigue: $kg = \frac{X_{Na} (C_{Ca^{2+}})^{1/2}}{X_{Ca_{1/2}} (C_{Na^+})}$

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

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

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

El laboratorio de salinidad de los Estados Unidos (1954) consideró que el ión magnesio Mg^{2+} se comporta de forma similar al ión calcio Ca^{2+} , en la fase adsorbida del complejo de intercambio catiónico. Si se toma en cuenta la modificación introducida a la ecuación de Gapon, entonces, esta se expresa como sigue:

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

Donde: Kg, es el coeficiente de selectividad iónica de Gapon modificado, expresado en $(\text{mmol L}^{-1})^{-1/2}$ y RAS, es la relación de adsorción de sodio que se encuentra definida como sigue:

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

Donde: Las concentraciones totales analíticas están expresadas en mmol L^{-1}

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

$$\frac{XNa}{CIC - XNa} = Kg \text{ RAS} = \text{RSI}$$

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

En términos del PSI la ecuación se expresa como:

$$\frac{PSI}{100 - PSI} = Kg \text{ RAS} = \text{RSI}$$

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

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

El valor de la constante de selectividad iónica de Gapon (K_g) se determina al graficar la relación funcional RSI-RAS; y considerando que ésta es lineal, entonces, la pendiente se obtiene aplicando las técnicas de regresión lineal.

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

En diversas investigaciones se han determinado diferentes valores del coeficiente de selectividad iónica de Gapon obteniéndose un rango de valores de 0.016 a 0.008 ($\text{mmol L}^{-1})^{-1/2}$. El laboratorio de salinidad de los Estados Unidos, para los suelos de zonas áridas y semiáridas del Oeste de Estados Unidos recomienda un valor del coeficiente de selectividad iónica de Gapon de $0.015 (\text{mmol L}^{-1})^{-1/2}$.

Estas observaciones nos indican que para determinar con exactitud el valor del coeficiente de selectividad iónica de Gapon, es necesario evaluar este coeficiente experimentalmente, con los suelos en los que se requiere estimar el coeficiente de Gapon. Las variaciones del coeficiente de selectividad iónica de Gapon dependen de la mineralogía de los cristales arcillosos y de los grupos funcionales de las moléculas orgánicas.

3.8.3. Relación de adsorción de sodio original o explícita (RAS)

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

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

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

Por lo tanto, este parámetro se ha utilizado con muchas ventajas para hacer un excelente diagnóstico de problemas de sodicidad en suelos, en lugar de la determinación directa del PSI.

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

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

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

3.8.4. Relación de adsorción de sodio ajustado (RASaj)

Otro valor de RAS, es aquel que considera variaciones en la composición de aguas de riego, en lo que concierne a la cuantificación de efectos de precipitación o disolución del carbonato de calcio.

$$\text{RAS}_{\text{aj}} = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}} [1 + (8.4 - \text{pH}_c)]$$

Donde: RAS_{aj} , son los valores que se obtienen al modificar los valores del RAS original o explícito de las aguas de riego expresados en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; RAS, son los valores que se obtienen de manera explícita de las determinaciones químicas del Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} de las aguas de riego expresadas en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; 8.4, es el valor del pH de un suelo calcáreo no sódico en equilibrio con el CO_2 con la atmósfera; pH_c , son los valores teóricos del agua de riego que tendrá cuando esta agua esté en equilibrio con el CaCO_3 .

El término $(8.4 - \text{pH}_c)$ refleja la tendencia del agua de riego que se aplica a los suelos de precipitar o disolver la calcita, CaCO_3 . Cuando $(8.4 - \text{pH}_c) > 0$ para una agua de riego, el carbonato de calcio precipita en el suelo y cuando $(8.4 - \text{pH}_c) < 0$, entonces, el agua de riego que se aplica a los suelos solubiliza el carbonato de calcio CaCO_3 que se encuentra en el suelo.

La precipitación de bicarbonatos en el agua de riego

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

Cuando las aguas residuales de riego poseen concentraciones apreciables de iones bicarbonato (HCO_3^-); como son las aguas residuales que riegan las áreas agrícolas del Valle del Mezquital, es necesario considerar que, una determinada fracción de los contenidos de calcio se precipita de acuerdo con la ecuación siguiente:



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

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

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

El índice de saturación está definido como el pH actual del agua (pH_a) menos el pH teórico (pH_c) que el agua deberá tener, si esta agua está en equilibrio con la calcita CaCO_3 . Este índice de saturación se define como sigue:

$$\text{Índice de saturación (SI)} = \text{pH}_a - \text{pH}_c$$

Los valores positivos (+) de este índice indicarán que la calcita (CaCO_3) se precipitará del agua de riego. Los valores negativos (-) de este índice, indicarán que la calcita (CaCO_3) se disolverá en el agua de riego, es decir, el carbonato de calcio CaCO_3 , en el agua de riego se

encontrará en forma disociada formando iones de calcio Ca^{2+} e iones bicarbonato HCO_3^- . La ecuación de Langelier para calcular el pH_c de los análisis químicos de las aguas de riego es:

$$\text{pH}_c = (\text{pk}_2' - \text{pk}_c') + \text{pCa} + \text{pAlk}$$

Donde: $\text{pCa} + \text{pAlk}$, son los logaritmos negativos de la concentración molar del Ca^{2+} y de la concentración equivalente de las bases titulables ($\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$) respectivamente; $\text{pk}_2' - \text{pk}_c'$, son los logaritmos negativos de la segunda constante de disociación del ácido carbónico (H_2CO_3) y la constante de solubilidad del carbonato de calcio (CaCO_3) respectivamente, ambos corregidos por su fuerza iónica (I).

Bower (1965) y Pratt *et al.* (1969) encontraron en lisímetros experimentales de invernadero que una fracción de bicarbonatos HCO_3^- aplicados en aguas de riego se precipitaron en el suelo y que ampliamente esta precipitación está relacionada con una modificación del índice de saturación de Langelier.

Esta modificación del índice de saturación de Langelier; consiste simplemente en sustituir el pH de un suelo que tiene propiedades buffer, por el pH actual del agua de riego (pH_a) con propiedades buffer pequeñas, de tal manera que, aunque la ecuación de Langelier fue derivada para un sistema cerrado. Bower (1965) y Pratt *et al.* (1969) señalan que en lisímetros de invernadero en un sistema abierto, la aplicación de agua de riego a un suelo, de un valor de pH cualquiera, puede entonces por lo tanto calcularse los valores del pH teórico (pH_c), como una medida de la tendencia del carbonato de calcio CaCO_3 a precipitarse en la solución acuosa.

La corrección por fuerza iónica (I) de los valores de pk_2' y pk_c' , son los logaritmos negativos de la segunda constante de disociación del ácido carbónico y la constante de solubilidad de la calcita (CaCO_3), se llevó a cabo de acuerdo con la ecuación de Debye y Hückel con una determinada fuerza iónica (I). De tal manera que para el cálculo de (pk_2' y pk_c') y el cálculo de (I) se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$(\text{pk}_2' - \text{pk}_c') = \left\{ 2.0269 + \left[0.5092 \left(\frac{4.0(I)^{1/2}}{1.0 + 2.0(I)^{1/2}} + \frac{(I)^{1/2}}{1.0 + 1.45(I)^{1/2}} \right) \right] \right\}$$

El último término de esta ecuación expresa y proporciona la corrección de Debye y Hückel para una fuerza iónica determinada (I).

El número 2.0269 es la diferencia entre pk_2' y pk_c' ; utilizando $k_2=4.7 \times 10^{-11}$ y $k_c=5.0 \times 10^{-9}$ como los valores numéricos de estas constantes.

Calculo de los valores del pH teórico (pH_c) de las aguas residuales

En primer lugar se calcula una serie de pH's teóricos (pH_c) para diferentes concentraciones expresadas en $mmol_c L^{-1}$ para los parámetros $pk_2' - pk_c'$, pCa y pAlk.

Las concentraciones de cationes expresadas en $mmol_c L^{-1}$ que se utilizan en estos cálculos son: 0.1-100 $mmol_c L^{-1}$. En el Cuadro 6, se presentan los valores de las diferentes variables para construir una gráfica y así facilitar el cálculo del pH teórico (pH_c) derivado de los análisis químicos de las aguas, Figura 1.

La construcción de esta gráfica teórica (Figura 1) se realiza en papel semilogarítmico, en el que en el eje logarítmico (y) se colocan las concentraciones molares de calcio y las concentraciones de las bases titulables ($CO_3^{2-} + HCO_3^-$) expresadas en $mmol_c L^{-1}$, y en el eje de las (x), escala aritmética en el sistema decimal, se colocan las concentraciones totales de cationes de las aguas de riego expresadas en $mmol_c L^{-1}$.

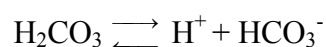
La fuerza iónica y la concentración total de las aguas naturales están ampliamente correlacionadas. Un estudio estadístico de estas variables derivó en la siguiente ecuación de regresión:

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

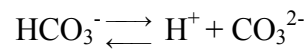
Donde: C, es la concentración total de cationes de un agua de riego determinada expresada en $mmol_c L^{-1}$; I, es la fuerza iónica de un agua expresada en $M L^{-1}$.

Los valores de la fuerza iónica (I) que se obtuvieron de esta ecuación, fueron introducidos en la ecuación expuesta arriba ($pk_2' - pk_c'$).

Las constantes de disociación del ácido carbónico (H_2CO_3) son las siguientes:

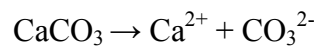


$$K_1 = \frac{(H^+)(HCO_3^-)}{(H_2CO_3^*)} = 4.2 \times 10^{-7}$$



$$K_2 = \frac{(H^+)(CO_3^{2-})}{(HCO_3^-)} = 4.2 \times 10^{-11}$$

La segunda constante de disociación del H_2CO_3 es la que más nos interesa, porque es la que representa la disociación del HCO_3^- para formar CO_3^{2-} , que posteriormente, éste se asocia con el Ca^{2+} para formar el $CaCO_3$. La constante de solubilidad de la calcita (k_c) es:



$$k_c = [Ca^{2+}][CO_3^{2-}] = 5.0 \times 10^{-9}$$

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

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

3.8.5. Relación de adsorción de sodio corregido (RAS°)

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

Cuadro 6. Calculo de los valores de pH_c teórico del agua de riego.

Concentración (mmol _e L ⁻¹)	pH _c = (pk ₂ - pk ₀₊ + pCa + (pAlk) [*]		
	pk ₂ - pk _c	pCa	pAlk
0.10	2.0897	4.3010	4.0000
0.20	2.0955	4.0000	3.6990
0.30	2.1007	3.8239	3.5229
0.40	2.1055	3.6990	3.3979
0.50	2.1100	3.6021	3.3010
0.60	2.1142	3.5229	3.2218
0.70	2.1182	3.4559	3.1549
0.80	2.1220	3.3979	3.0969
0.90	2.1256	3.3468	3.0458
1.00	2.1290	3.3010	3.0000
2.00	2.1576	3.0000	2.6990
3.00	2.1797	2.8239	2.5229
4.00	2.1980	2.6990	2.3979
5.00	2.2139	2.6021	2.3010
6.00	2.2281	2.5229	2.2218
7.00	2.2408	2.4559	2.1549
8.00	2.2525	2.3979	2.0969
9.00	2.2633	2.3468	2.0458
10.0	2.2733	2.3010	2.0000
11.0	2.2827	2.2596	1.9586
12.0	2.2915	2.2218	1.9208
13.0	2.2999	2.1871	1.8861
14.0	2.3078	2.1549	1.8539
15.0	2.3154	2.1249	1.8239
16.0	2.3226	2.0969	1.7959
17.0	2.3295	2.0706	1.7696
18.0	2.3361	2.0458	1.7447
19.0	2.3424	2.0223	1.7212
20.0	2.3486	2.0000	1.6990
21.0	2.3545	1.9788	1.6778
22.0	2.3602	1.9586	1.6576
23.0	2.3657	1.9393	1.6383
24.0	2.3710	1.9208	1.6198
25.0	2.3762	1.9031	1.6021
26.0	2.3813	1.8861	1.5850
27.0	2.3861	1.8697	1.5686
28.0	2.3909	1.8539	1.5528
29.0	2.3955	1.8386	1.5376
30.0	2.4000	1.8239	1.5229
31.0	2.4044	1.8097	1.5086
32.0	2.4087	1.7959	1.4949
33.0	2.4129	1.7825	1.4815
34.0	2.4170	1.7696	1.4685
35.0	2.4210	1.7570	1.4559
36.0	2.4249	1.7447	1.4437
37.0	2.4287	1.7328	1.4318
38.0	2.4325	1.7212	1.4202
39.0	2.4361	1.7100	1.4089
40.0	2.4397	1.6990	1.3979
41.0	2.4432	1.6882	1.3872
42.0	2.4467	1.6778	1.3768
43.0	2.4501	1.6676	1.3665
44.0	2.4534	1.6576	1.3565
45.0	2.4567	1.6478	1.3468
46.0	2.4599	1.6383	1.3372
47.0	2.4630	1.6289	1.3279
48.0	2.4661	1.6198	1.3188
49.0	2.4692	1.6108	1.3098
50.0	2.4722	1.6021	1.3010

Continuación...Cuadro 6

Concentración (mmol _e L ⁻¹)	pHe = (pk ₂ - pk _c) + pCa + (pAlk)*		
	pk ₂ - pk _c	pCa	pAlk
51.0	2.4751	1.5935	1.2924
52.0	2.4780	1.5850	1.2840
53.0	2.4808	1.5768	1.2757
54.0	2.4837	1.5686	1.2676
55.0	2.4864	1.5607	1.2596
56.0	2.4891	1.5528	1.2518
57.0	2.4918	1.5452	1.2441
58.0	2.4945	1.5376	1.2366
59.0	2.4971	1.5302	1.2291
60.0	2.4997	1.5229	1.2218
61.0	2.5022	1.5157	1.2147
62.0	2.5047	1.5086	1.2076
63.0	2.5072	1.5017	1.2007
64.0	2.5096	1.4949	1.1938
65.0	2.5120	1.4881	1.1871
66.0	2.5144	1.4815	1.1805
67.0	2.5167	1.4750	1.1739
68.0	2.5190	1.4685	1.1675
69.0	2.5213	1.4622	1.1612
70.0	2.5235	1.4559	1.1549
71.0	2.5258	1.4498	1.1487
72.0	2.5280	1.4437	1.1427
73.0	2.5301	1.4377	1.1367
74.0	2.5323	1.4318	1.1308
75.0	2.5344	1.4260	1.1249
76.0	2.5365	1.4202	1.1192
77.0	2.5386	1.4145	1.1135
78.0	2.5406	1.4089	1.1079
79.0	2.5426	1.4034	1.1024
80.0	2.5446	1.3979	1.0969
81.0	2.5466	1.3925	1.0915
82.0	2.5486	1.3872	1.0862
83.0	2.5505	1.3820	1.0809
84.0	2.5525	1.3768	1.0757
85.0	2.5544	1.3716	1.0706
86.0	2.5562	1.3665	1.0655
87.0	2.5581	1.3615	1.0605
88.0	2.5599	1.3565	1.0555
89.0	2.5618	1.3516	1.0506
90.0	2.5636	1.3468	1.0458
91.0	2.5654	1.3420	1.0410
92.0	2.5671	1.3372	1.0362
93.0	2.5689	1.3325	1.0315
94.0	2.5706	1.3279	1.0269
95.0	2.5723	1.3233	1.0223
96.0	2.5740	1.3188	1.0177
97.0	2.5757	1.3143	1.0132
98.0	2.5774	1.3098	1.0088
99.0	2.5791	1.3054	1.0044
100.0	2.5807	1.3010	1.0000

Fuente: Can, 2005

* Entrando en la primera columna con las concentraciones en mmol_e L⁻¹. a. Ca²⁺+Mg²⁺+Na⁺; b. Ca²⁺ y; c. CO₃²⁻+ HCO₃⁻, se obtienen los valores de (pk₂-pk_c), pCa y p(Alk) respectivamente.

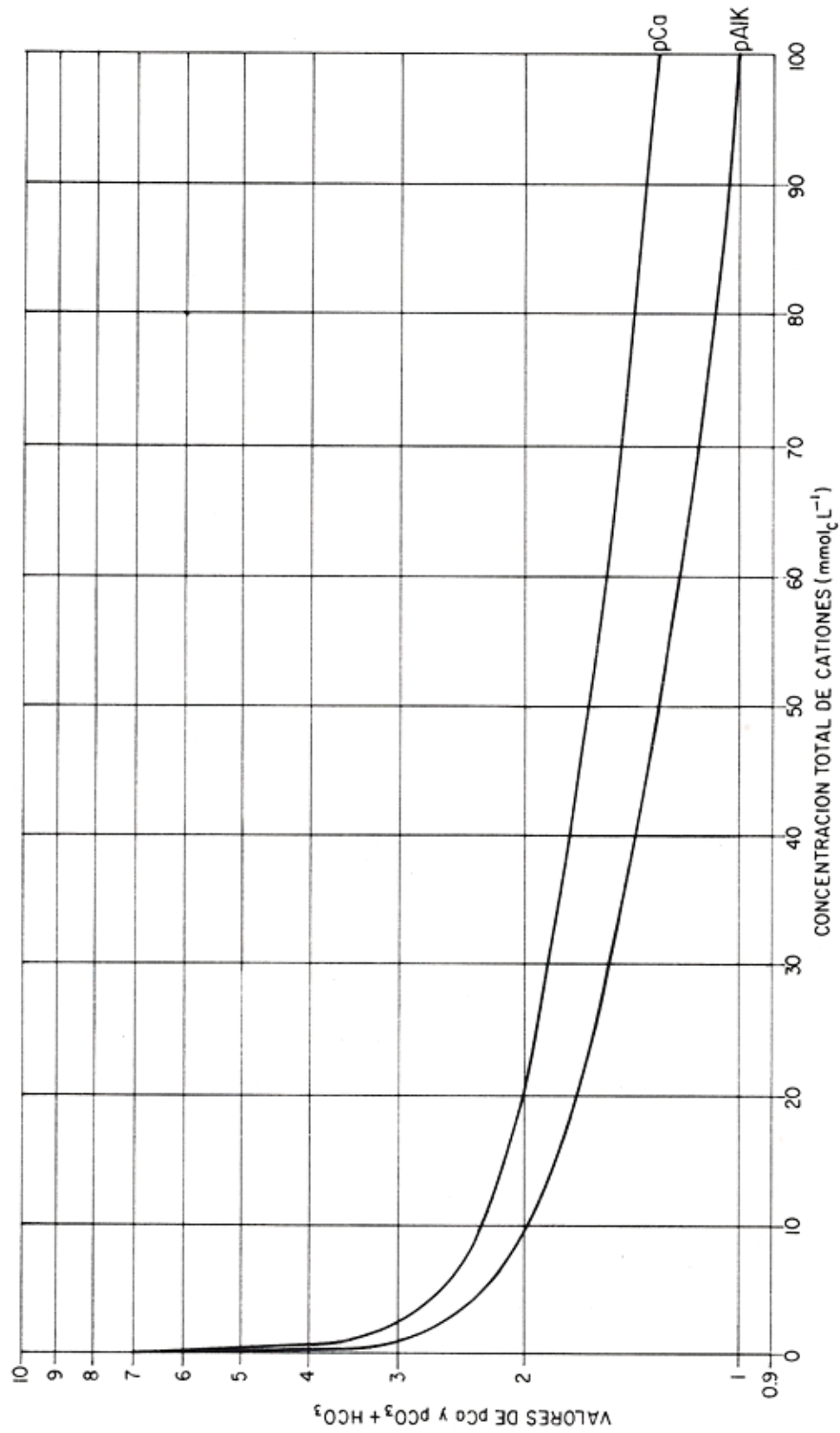


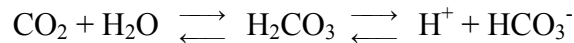
Figura 1. Valores de los logaritmos negativos de las concentraciones molares de pCa y equivalentes de pCO₃+HCO₃ con respecto a las concentraciones totales de cationes expresados en mmolc L⁻¹.

La fórmula de la relación de adsorción de sodio o RAS que toma en cuenta la presión parcial del bióxido de carbono CO_2 se representa como sigue: $\text{RAS}^\circ = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}}$

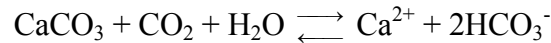
Donde: RAS° es el valor del RAS de una agua de riego que toma en cuenta la presión parcial del CO_2 $P_{\text{CO}_2}=0.0007$ atmósferas y una relación determinada de HCO_3^-/Ca ; C_{Na^+} , $C_{\text{Ca}^{2+}}$, $C_{\text{Mg}^{2+}}$ son las concentraciones de estos iones expresadas en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$.

Para calcular la concentración de calcio (Ca°) que debe introducirse en la fórmula de la relación de adsorción de sodio, se toma en cuenta la relación $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$, expresada en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ y la conductividad eléctrica, expresada en mS cm^{-1} de las aguas de riego que se aplican a los suelos. (Cuadro 7)

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



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



3.9. Problemas de infiltración en los suelos agrícolas bajo riego

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 entre 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; McNeal et al., 1968). Por lo general, las modificaciones del medio poroso de los suelos, se deben a diferentes niveles de sodio intercambiable.

Cuadro 7. Concentración de calcio (Ca°) en el agua del suelo, contenido cerca de la superficie del suelo, que resultaría de regar con aguas de determinado valor $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ y conductividad del agua de riego (CE)^{a,b}.

	SALINIDAD DEL AGUA DE RIEGO APLICADA CE mS cm^{-1}												
	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	
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	
0.10	8.30	8.57	8.77	9.07	9.31	9.62	10.02	10.35	10.89	11.32	12.01	12.56	
0.15	6.34	6.54	6.69	6.92	7.11	7.34	7.65	7.9	8.31	8.64	9.17	9.58	
0.20	5.24	5.40	5.52	5.71	5.87	6.06	6.31	6.52	6.86	7.13	9.57	7.91	
0.25	4.51	4.65	4.76	4.92	5.06	5.22	5.44	5.62	5.91	6.15	6.52	6.82	
0.30	4.00	4.12	4.21	4.36	4.48	4.62	4.82	4.98	5.24	5.44	5.77	6.04	
0.35	3.61	3.72	3.80	3.94	4.04	4.17	4.35	4.49	4.72	4.91	5.21	5.45	
0.40	3.30	3.40	3.48	3.60	3.70	3.82	3.98	4.11	4.32	4.49	4.77	4.98	
0.45	3.05	3.14	3.22	3.33	3.42	3.53	3.68	3.80	4.00	4.15	4.41	4.61	
0.50	2.84	2.93	3.00	3.10	3.19	3.29	3.43	3.54	3.72	3.87	4.11	4.30	
0.75	2.17	2.24	2.29	2.37	2.43	2.51	2.62	2.7	2.84	2.95	3.14	3.28	
1.00	1.79	1.85	1.89	1.96	2.01	2.09	2.16	2.23	2.35	2.44	2.59	2.71	
Valor de $\frac{\text{HCO}_3^-}{\text{Ca}^{2+}}$	1.25	1.54	1.59	1.63	1.68	1.73	1.78	1.86	1.92	2.02	2.1	2.23	2.33
	1.50	1.37	1.41	1.44	1.49	1.53	1.58	1.65	1.70	1.79	1.86	1.97	2.07
	1.75	1.23	1.27	1.30	1.35	1.38	1.43	1.49	1.54	1.62	1.68	1.78	1.86
	2.00	1.13	1.16	1.19	1.23	1.26	1.31	1.36	1.40	1.48	1.58	1.63	1.70
	2.25	1.04	1.08	1.10	1.14	1.17	1.21	1.26	1.3	1.37	1.42	1.51	1.58
	2.50	0.97	1.00	1.02	1.06	1.09	1.12	1.17	1.21	1.27	1.32	1.4	1.47
	3.00	0.85	0.89	0.91	0.94	0.96	1.00	1.04	1.07	1.13	1.17	1.24	1.30
	3.50	0.78	0.80	0.82	0.85	0.87	0.90	0.94	0.97	1.02	1.06	1.12	1.17
	4.00	0.71	0.73	0.75	0.78	0.80	0.82	0.86	0.88	0.93	0.97	1.03	1.07
	4.50	0.66	0.68	0.69	0.72	0.74	0.76	0.79	0.82	0.86	0.9	0.95	0.99
	5.00	0.61	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.74	0.76	0.8	0.83	0.88	0.93
	7.00	0.49	0.50	0.52	0.53	0.55	0.57	0.59	0.61	0.64	0.67	0.71	0.74
	10.00	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.45	0.47	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58
	20.00	0.24	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.32	0.33	0.35	0.37
	30.00	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.27	0.28

Fuente: Suárez, 1981

^a. Supone: a. Una fuente de calcio proveniente de silicatos o caliza CaCO_3 , b. no existe precipitación del magnesio y, c. la presión relativa del CO_2 de la superficie del suelo es de 0.0007 atmósferas.

^b. Ca° , $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ están expresados en $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$ y la CE, está expresada en mS cm^{-1}

Es decir, en forma directa, se deben a los altos contenidos de iones de sodio en las soluciones de los suelos y de las aguas de riego. Sobre el efecto de los diferentes tipos de agua en las propiedades físicas de los suelos ya en 1921 Scofield y Headley, en distintos resúmenes de resultados de varios experimentos que se llevaron a cabo para la recuperación de los suelos sódicos, llegaron a la conclusión de que “las aguas duras hacen tierras blandas y de que las aguas blandas hacen tierras duras”(Richards, 1973).

Después de los trabajos de investigación, y a partir de una comprensión profunda de los procesos de intercambio catiónico en los suelos, se ha establecido que cuando los iones de calcio se encuentran adsorbidos a los suelos en cantidades suficientes, los suelos tienen condiciones favorables para el desarrollo de los cultivos agrícolas (Peterson, 1947). En cambio, cuando en los suelos se tienen en estado adsorbido algunas cantidades de sodio intercambiable, los suelos presentan dispersión coloidal y mayor viscosidad. En estos casos, los suelos poseen baja o muy baja permeabilidad.

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

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.

Una velocidad de infiltración de 3 mm h^{-1} es considerada baja, mientras que una infiltración por encima de 12 mm h^{-1} es relativamente alta. Además de la cantidad de agua, la infiltración está determinada por las características físicas del suelo, como la textura, estructura, grado de compactación, contenido de materia orgánica, tipo de minerales de la arcilla y por sus características químicas, incluyendo los cationes intercambiables.

La dispersión de los suelos y la destrucción de su estructura se producen únicamente cuando el contenido de sodio supera al del calcio en una proporción por encima de 3:1. Este

contenido relativo de sodio provoca serios problemas de infiltración de la misma manera que una salinidad muy baja del agua. Esto se debe a la falta de suficiente calcio para contrarrestar los efectos dispersantes del sodio. La Figura 3 es utilizada para mostrar que tanto la salinidad del agua (CE) como su relación de adsorción de sodio (RAS) afectan la velocidad de infiltración.

El tipo y la cantidad de cationes adsorbidos influyen de manera importante en las propiedades físicas y químicas de los suelos, por ejemplo el Ca^{2+} y el Na^+ tienen una influencia directa en la estructura de los suelos. De este modo, el Ca^{2+} al ser un buen coagulante favorece como consecuencia la formación de flóculos, permitiendo que el suelo tenga una estructura granulada bien desarrollada y estable, en cambio el ión Na^+ dispersa a las partículas coloidales de los suelos (Cuadro 8).

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

Propiedad de los suelos	Actividad relativa
01 Dispersión	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
02 Máxima higroscopicidad	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
03 Velocidad de infiltración	$\text{Na} < \text{K} < \text{Mg} < \text{Ca} < \text{Al}$
04 Ascensión capilar	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
05 Plasticidad	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
06 Resistencia de los agregados	$\text{Na} < \text{K} < \text{Mg} < \text{Ca} < \text{Al}$
07 Reacción de la solución (pH)	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
08 Hinchamiento	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
09 Velocidad de absorción del agua	$\text{Na} < \text{K} < \text{Mg} < \text{Ca} < \text{Al}$
10 Adherencia	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
11 Disociación de coloides	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
12 Compresibilidad cuando se tiene deshidratación	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$

Fuente: Gorbunov, 1967

Por ejemplo, al analizar la dispersión, cuando el complejo de intercambio catiónico está saturado con un solo tipo de catión se observará que, el suelo saturado con sodio (Na) se disemina más que el suelo que está saturado con potasio (K), y este suelo se esparcirá más que el suelo saturado con magnesio (Mg) y así sucesivamente. De esta misma manera se comporta la ascensión capilar, la compresibilidad cuando se tiene deshidratación de plasticidad, el hinchamiento, etc. En dirección contraria cambia la velocidad de infiltración, la velocidad de absorción, etc.

3.10. Carbonato de sodio residual (CSR)

En los inicios de los estudios sobre la calidad de las aguas superficiales y subterráneas para riego, se observó experimentalmente que los distintos tipos de aguas se infiltraban de manera diferente en los suelos agrícolas bajo riego; y como consecuencia de estas observaciones, se estableció que sus variadas composiciones químicas afectaban de manera diferente las propiedades físicas de los suelos. Por lo que en ese tiempo se mencionaba que, “aguas duras” hacen suelos blandos y “aguas blandas” hacen suelos duros. Hoy se sabe que las “aguas blandas”, ricas en bicarbonato de sodio propician considerablemente la acumulación de sodio intercambiable en los suelos. Uno de los procedimientos utilizados en el pasado para determinar los posibles problemas de infiltración fue el método del carbonato de sodio residual.

Las aguas de baja calidad han sido usadas para riego en muchas regiones áridas y semiáridas, debido a la ausencia de fuentes limitadas de aguas de buena calidad. A veces las aguas subterráneas que están disponibles para el riego, tienen altos contenidos de carbonato de sodio residual. El uso indiscriminado de estas aguas en la irrigación a veces causa una acumulación excesiva de sales, y conduce a una rápida salinización y sodificación del perfil del suelo, procesos que afectan adversamente el desarrollo de cultivos. Sin embargo, se debe señalar que, los efectos de la sodicidad en el desarrollo de los cultivos son diferentes de aquellos efectos que derivan de la salinización.

La salinidad causa una reducción en el crecimiento de las plantas; debido al gasto de energía en la generación de osmólitos celulares, para generar un gradiente de potencial del agua adecuado, para contrarrestar el potencial del agua del suelo generado por sales disueltas en la solución del mismo, mientras que los efectos de la sodicidad, afecta el crecimiento y desarrollo de plantas de manera negativa a través de su influencia en las propiedades físicas e hidrológicas de suelos. En general, los procesos de salinización y de sodificación afectan el rendimiento de cultivos debido a desordenes nutricionales y efectos tóxicos.

En suelos sódicos se incrementa el sodio intercambiable, y por lo tanto, considerables aumentos de sodio intercambiable conduce a deficiencias de calcio y magnesio. La tolerancia de los cultivos a las aguas sódicas de riego depende de la sodicidad total de los suelos, de la habilidad de los cultivos a la tolerancia de la sodicidad, de prácticas agronómicas de manejo y condiciones climáticas durante los ciclos vegetativos de los cultivos.

Eaton (1950) consideró que el proceso de precipitación de calcio Ca y magnesio Mg en forma de carbonatos en las aguas de riego y en las aguas de los suelos, propician una acumulación considerable de sodio intercambiable en los suelos. Este proceso de precipitación de carbonatos es de gran importancia, la precipitación de carbonatos se presenta con mucha intensidad en las aguas que poseen un régimen físico-químico alcalino. Para evaluar la calidad de las aguas que tienen cantidades considerables de carbonatos y bicarbonatos, Eaton propuso un índice de evaluación denominado “Carbonato de Sodio Residual”.

Experimentos que se han llevado a cabo con aguas de diferente contenido de carbonato de sodio residual

En los últimos tiempos se ha observado que las aguas de riego que se utilizan en las zonas áridas y semiáridas poseen elevadas concentraciones de sales, y que a su vez, contienen considerables concentraciones de bicarbonatos. Ejemplos de estos tipos de aguas se tienen en Pakistán (Punjab), India (zona del Noroeste), Estados Unidos (Fresno y Valle Imperial) y México (zonas del Bajío).

Los orígenes de los bicarbonatos y de algunas cantidades de carbonato están relacionados con los yacimientos basálticos profundos en los cuales por procesos de intemperismo las aguas se enriquecen con bicarbonatos y algunas fracciones de carbonatos. Las aguas urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital contienen cantidades variables de carbonato de sodio residual.

Por lo general, en aguas residuales se tienen considerables cantidades de iones bicarbonato debido a la actividad biológica que se presenta en éstas. En aguas ricas en iones bicarbonato, se tiene la tendencia de que iones de calcio y magnesio se precipitan en forma de carbonatos, a medida que la solución del suelo se hace más concentrada. Esta reacción no se completa totalmente en circunstancias ordinarias, pero a medida que va teniendo lugar, las concentraciones de calcio y magnesio se van reduciendo, aumentando la proporción relativa de las concentraciones de iones de sodio. Este proceso aumenta los valores de la relación de adsorción de sodio RAS.

Eaton (1950) utiliza tres términos para referirse a estas reacciones:

$$\text{Porcentaje de sodio encontrado} = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+} 100$$

Porcentaje de sodio posible

$$\frac{\text{Na}^+ 100}{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+) - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)}$$

Carbonato de sodio residual Na_2CO_3

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

Los constituyentes iónicos en estas relaciones se expresan en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$.

Para establecer con que intensidad se adsorbe el ion sodio en aguas de riego, que tienen diferentes cantidades de carbonato de sodio residual; Wilcox *et al.* (1954) diseñaron un experimento que incluyó el crecimiento del pasto Rhodes en macetas conteniendo suelo franco, Hanford (Cuadro 9). Las propiedades físico-químicas en los suelos se determinaron después de los 42 y 86 riegos. Con base en datos que obtuvieron y utilizando el término “carbonato de sodio residual”, establecieron algunos umbrales de contenidos de carbonatos y de bicarbonatos en las aguas de riego (Cuadro 10).

El carbonato de sodio residual se calcula de acuerdo con la siguiente relación:

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

Donde: Los iones están expresados en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$.

Cuadro 9. Clasificación del agua de riego de acuerdo con el carbonato de sodio residual.

Clase	Carbonato de Sodio Residual (mmol _e L ⁻¹)
Buena	<1.25
Condicionada	1.25 a 2.5
No recomendable	>2.5

Fuente: Wilcox *et al.*, 1954

Después de los trabajos de Eaton (1950) y Wilcox *et al.* (1954) se han utilizado para riego aguas de pozos profundos y aguas residuales con valores de carbonato de sodio residual más altos que los que propuso en un tiempo Eaton. Esto es debido a que, en la actualidad prácticamente se ha utilizado en el riego de cultivos, todo tipo de aguas con diferente composición química.

Cuadro 10. Composición química de aguas para riego que se experimentaron en un suelo franco, Hanford con diferentes números de riegos.

Aguas de riego		Análisis de las muestras de suelo después del riego												
No.	Concentración mmol _e L ⁻¹	Composición				CSR* mmol _e L ⁻¹	Riego 42				Riego 86			
		Ca ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻		CE dS m ⁻¹	pH	SI mmol 100 g ⁻¹	PSI	CE dS m ⁻¹	pH	SI mmol 100 g ⁻¹	PSI
20 ^a	20.0	25.0	75.0	0.0	100.0	0.0	3.73	6.8	1.16	12.0	5.30	6.8	1.40	16.0
20 ^b	20.0	25.0	75.0	50.0	50.0	5.0	5.94	8.6	4.52	52.0	16.00	9.4	6.45	72.0
10 ^a	10.0	25.0	75.0	0.0	100.0	0.0	2.22	7.2	0.80	8.4	3.70	7.3	1.40	15.0
10 ^b	10.0	25.0	75.0	50.0	50.0	2.5	2.03	8.6	1.72	20.0	7.30	9.0	3.80	42.0
5 ^a	5.0	25.0	75.0	0.0	100.0	0.0	1.28	6.8	0.84	9.0	1.78	6.7	1.12	11.0
5 ^b	5.0	25.0	75.0	50.0	50.0	1.25	1.18	8.4	1.02	10.0	2.42	7.7	1.98	20.0
1 ^a	1.0	25.0	75.0	0.0	100.0	0.0	0.40	7.1	0.22	2.4	0.32	6.4	0.25	2.4
1 ^b	1.0	25.0	75.0	50.0	50.0	0.25	0.36	7.0	0.24	2.6	0.34	6.4	0.22	2.1
5aL	5.0	75.0	25.0	0.0	100.0	0.0	1.02	6.9	0.22	2.2	1.50	6.1	0.23	2.2
5bL	5.0	75.0	25.0	85.0	15.0	0.50	0.69	8.1	0.29	3.1	1.05	7.4	0.36	3.5
1aL	1.0	75.0	25.0	0.0	100.0	0.0	0.34	7.0	0.14	1.5	0.36	6.4	0.12	1.1
1bL	1.0	75.0	25.0	85.0	15.0	0.10	0.33	7.2	0.14	1.4	0.34	6.4	0.13	1.3

Fuente: Wilcox *et al.*, 1954*CSR=CO₃²⁻ + HCO₃⁻ - (Ca²⁺ + Mg²⁺)

3.11. Criterios de toxicidad

Los problemas de toxicidad surgen cuando ciertos elementos (iones) del suelo o del agua, son absorbidos y acumulados por las plantas en concentraciones lo suficientemente altas como para provocar daños y reducir sus rendimientos. La magnitud de estos daños depende de la cantidad de iones absorbidos y de la sensibilidad de las plantas. Los iones que con más frecuencia ocasionan toxicidad son sodio, cloro y boro. Los problemas de toxicidad pueden ocurrir aun cuando estos iones se encuentren en concentraciones bastante bajas. Sin embargo, los problemas de toxicidad a menudo complican y complementan los problemas de salinidad y de infiltración.

Sodio

Las plantas absorben sodio 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 sodio no depende de la concentración absoluta de este catión en el suelo, sino de su proporción respecto al calcio. Por tal razón la tolerancia de cultivos se relaciona con el PSI del suelo.

Cloro

El cloro no es adsorbido por el complejo de cambio, pero se encuentra disuelto en la solución del suelo, de donde 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 al peso seco de la hoja. 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. Muchas especies de plantas no son más sensibles a cloruros que a concentraciones isosmóticas de sulfatos.

Boro

El boro un elemento esencial y potencialmente tóxico para las plantas cuando excede apenas ligeramente el nivel óptimo, se encuentra en casi todas las aguas naturales y es uno de los más tóxicos constituyentes de la irrigación del agua, su concentración varía desde trazas hasta varias partes por millón.

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

Las aguas superficiales naturales rara vez contienen niveles tóxicos de boro, pero las aguas de manantiales y aguas de pozos pueden contener concentraciones tóxicas, principalmente en las cercanía de fallas tectónicas y en las zonas geotérmicas. La toxicidad del boro ocurre con mayor frecuencia en los suelos de regiones áridas y semiáridas, donde son irrigados con altas concentraciones de boro, mientras que las deficiencias de boro son encontradas principalmente en regiones húmedas. En los rangos de toxicidad para las plantas, el boro debe estar en la solución del suelo más que aquel boro que se encuentra adsorbido a las partículas del suelo.

Si el boro es esencial para el desarrollo y crecimiento de las plantas, el sodio por lo contrario no es esencial, aunque sin embargo, se requieren cantidades muy pequeñas de sodio, mientras que, el cloro es esencial en cantidades tan pequeñas que a menudo es clasificado como no esencial para algunos cultivos. Por ejemplo, si el nivel esencial del boro en el agua es de 0.2 mg L^{-1} ; las concentraciones de boro entre 1 y 2 mg L^{-1} son tóxicas.

La clasificación del agua residual con base en el contenido de boro se presenta en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Límites permisibles de boro en mg L^{-1} , establecidos por Wilcox (1948), para diferentes clases de agua de riego.

Clase de agua	Grupo de cultivos		
	Sensibles	Semitolerantes	Tolerantes
Excelente	< 0.33	< 0.67	< 1.00
Buena	0.33 – 0.67	0.67 – 1.33	1.00 – 2.00
Aceptable	0.67 – 1.00	1.33 – 2.00	2.00 – 3.00
Insegura	1.00 – 1.25	2.00 – 2.50	3.00 – 3.75
No recomendable	> 1.25	> 2.50	> 3.75

Fosfatos

El fósforo puede existir en aguas en solución o suspensión, en estado mineral y orgánico, y bajo forma de diferentes compuestos. La interacción del fósforo con la salinidad es altamente dependiente de la especie y etapa de desarrollo de la planta, concentración y tipo de salinidad, así como de la concentración de P en el sustrato.

En las directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego. Ayers y Wescot (1987) señalan que el contenido de fósforo en aguas de riego normalmente es de $0\text{-}2 \text{ mg L}^{-1}$.

Sulfatos

Junto con cloruros, los sulfatos son los principales aniones presentes en las muestras de agua y son aportes importantes en suelos salinos, pero su control se efectúa adecuadamente considerando volúmenes extra de agua en riegos para asegurar su salida fuera de la zona radicular.

Las plantas pueden presentar sensibilidad a concentraciones altas de sulfatos ya que puede limitar la absorción de sodio y alterar el balance catiónico óptimo dentro la planta, tal sensibilidad se encuentra relacionada con la tendencia de las altas concentraciones de sulfatos a limitar la absorción de calcio por las plantas.

Juntamente con la disminución de calcio, se encuentran asociados los aumentos en la absorción de sodio y potasio, de tal manera que los efectos de la alta concentración de sulfatos en el sustrato pueden estar relacionados a una alteración del balance catiónico óptimo dentro de la planta.

Nitratos

El nitrógeno contenido en el agua de riego se encuentra disponible para las plantas y, por lo tanto, debe considerarse como parte integral del nitrógeno total requerido por los cultivos y del programa de fertilización.

Por otro lado, el agua de riego puede contener niveles excesivos de nitrógeno para ciertos cultivos sensibles, los cuales en este caso presentarían un mayor crecimiento vegetativo que provocaría un retraso en la maduración y baja calidad del producto.

Elementos pesados

Un número de elementos se encuentran normalmente en bajas concentraciones en el agua de riego. Aunque no se incluyen en las rutinas regulares de análisis de aguas de riego, son muy importantes cuando se usan efluentes de agua provenientes de las descargas de uso industrial para el riego agrícola.

Entre ellos se incluyen el Aluminio (Al), Berilio (Be), Cobalto (Co), Flúor (F), Hierro (Fe), Litio (Li), Manganeseo (Mn), Molibdeno (Mo), Selenio (Se), Estaño (Sn), Titanio (Ti), Tungsteno (W) y Vanadio (V). Sin embargo, existe un grupo de elementos pesados que ocasionan peligrosos daños a la salud cuando son absorbidos por las plantas, entre ellos se encuentran Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Mercurio (Hg) y Zinc (Zn).

4. MATERIALES Y METODOS

4.1. *Descripción geográfica de la zona de estudio*

El territorio del valle del Mezquital está constituido por cadenas montañosas, lomeríos y llanuras, aunque también hay algunos valles, montes y cañones. En las llanuras intermontanas del Valle del Mezquital, aunque se tiene escasa precipitación, el desarrollo de la agricultura ha tenido éxito debido al uso de aguas residuales que derivan de la ciudad de México.

En el Valle del Mezquital predomina un clima semiseco-templado con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 14.8°, ocurre la máxima en mayo con 17.3°C. La precipitación total anual es de 543.4 mm, con la máxima incidencia en septiembre con 117.4 mm y la mínima incidencia de precipitación en enero con 8.8 mm (INEGI, 1992).

Actualmente, proceden de la ciudad de México aproximadamente 2200 millones de m³ año⁻¹ de aguas residuales. Estos grandes volúmenes de agua atraviesan la denominada zona agrícola del Valle del Mezquital, que en realidad es un sistema de riego de valles intermontanos. En estos valles se ha construido una basta red de canales que en este trabajo se le llama “Red Hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán”.

Los valles intermontanos que se riegan con aguas mezcladas, se encuentran casi en su totalidad en la provincia geológica del eje Neovolcánico y muy parcialmente en la provincia geológica de la Sierra Madre Oriental.

En las estructuras volcánicas de la provincia del Eje Neovolcánico, el agua actúa como agente de intemperismo físico-químico y por lo tanto de disolución, aprovechando en su circulación un sistema de fracturas, propiciándose con esto el desarrollo de suelos residuales. Es decir, el agua altera las rocas volcánicas. En cambio, en la zona de calizas, el agua aprovecha para su circulación, todo el sistema de fracturas y forma en los depósitos de calizas un conjunto de estructuras típicas de regiones cársticas, como son cavernas y simas.

En general, en las formaciones estratigráficas de la provincia del Eje Neovolcánico, es en donde se encuentra mayoritariamente el Valle del Mezquital. Las rocas ígneas extrusivas se presentan en forma de basalto, tobas y brechas volcánicas. Por ejemplo, los basaltos extrusivos afloran en Xochitlán y Mixquiahuala (INEGI, 1992). En la parte del valle del Mezquital que pertenece parcialmente a la provincia geológica Sierra Madre Oriental se tienen rocas sedimentarias, conglomerados y lutita-arenisca. En los alrededores de Ixmiquilpán se tienen rocas sedimentarias del tipo arenisca-conglomerado. Esta formación se presenta morfológicamente como mesetas y lomeríos de bajo relieve. En la región del Cubo, al norte de Ixmiquilpán, se tienen rocas de limolita-arenisca. Esta es una unidad sedimentaria de origen continental lacustre.

En general, las calizas son de origen marino. Las lutitas son unidades sedimentarias de origen continental y en algunas ocasiones presentan intercalaciones de areniscas y tobas. Las aguas superficiales del Estado de Hidalgo se encuentran comprendidas casi en su totalidad dentro de la región hidrológica del Río Pánuco (INEGI, 1992).

Los distritos de riego Tula y de Alfayucan se abastecen de agua de los ríos San Luis, Tepeji, El salto, y el río Tula, así como de los volúmenes almacenados por las presas de Taxhimay, Requena y Endhó. En la presa Endhó se almacenan grandes cantidades de aguas residuales que derivan del Valle de México.

Los suelos que se tienen sobre las sierras son suelos someros y en las llanuras se tienen suelos generalmente profundos. Los suelos en ocasiones presentan fases dúricas y petrocalcicas.

4.2. Estaciones de muestreo y variables evaluadas

Actualmente se reconoce que los problemas que se tienen durante el uso de las aguas residuales en el Valle del Mezquital son: a). Salinidad-sodicidad; b). De carácter biológico y de compuestos orgánicos resistentes a la biodegradación y c). Acumulación de metales pesados.

En este trabajo se determinó la composición química de las aguas residuales que son conducidas por la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán. La investigación se llevó a cabo desde la perspectiva de los problemas de salinidad y sodicidad.

Con la finalidad de determinar las variaciones de las composiciones químicas de las aguas residuales que circulan en esta red de distribución se establecieron diferentes estaciones de muestreo. La zona de muestreo comprende diferentes formaciones geológicas; entre los mejor representados están: calizas, tobas volcánicas, basaltos y conglomerados.

En la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán se cuenta con canales revestidos y con canales de tierra a cielo abierto.

La toma de muestras se efectuó en 107 lugares para otoño 2008 (Figura 2), y 83 para verano 2009 (Figura 3), distribuidos a lo largo de la red de drenaje de las aguas residuales desde el municipio de Ecatepec, en el estado de México, hasta el municipio de Zimapán en Hidalgo, el muestreo fue simple con dos repeticiones en la superficie del agua, de acuerdo a la NOM-AA-03-1980. Las muestras se tomaron del Gran Canal, canales de riego primarios, secundarios y terciarios, presas y ríos, todos ellos de aguas residuales que se utilizan para el riego agrícola en la zona.

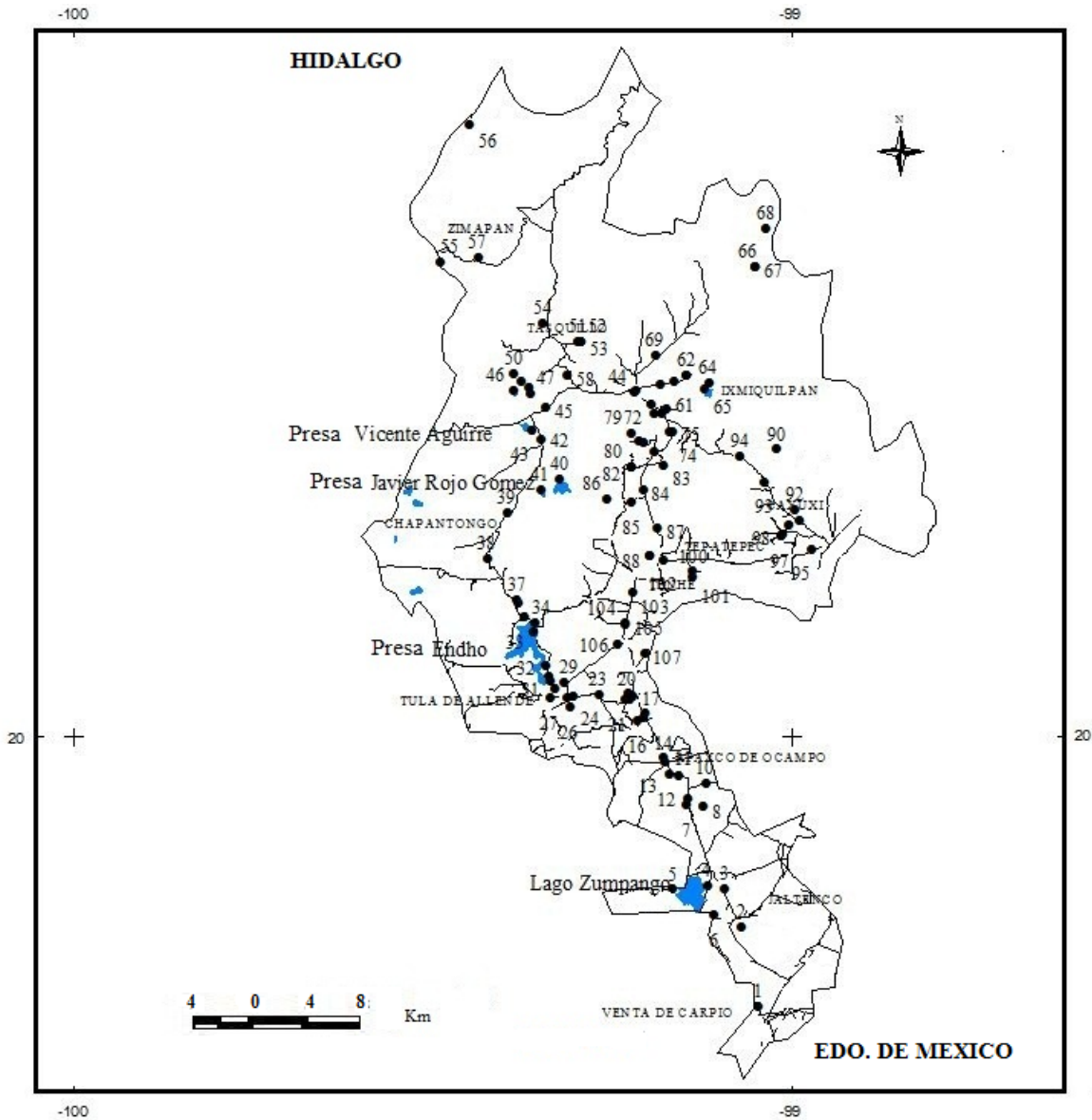


Figura 2. Localización de las estaciones de muestreo, en la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán, Otoño de 2008.

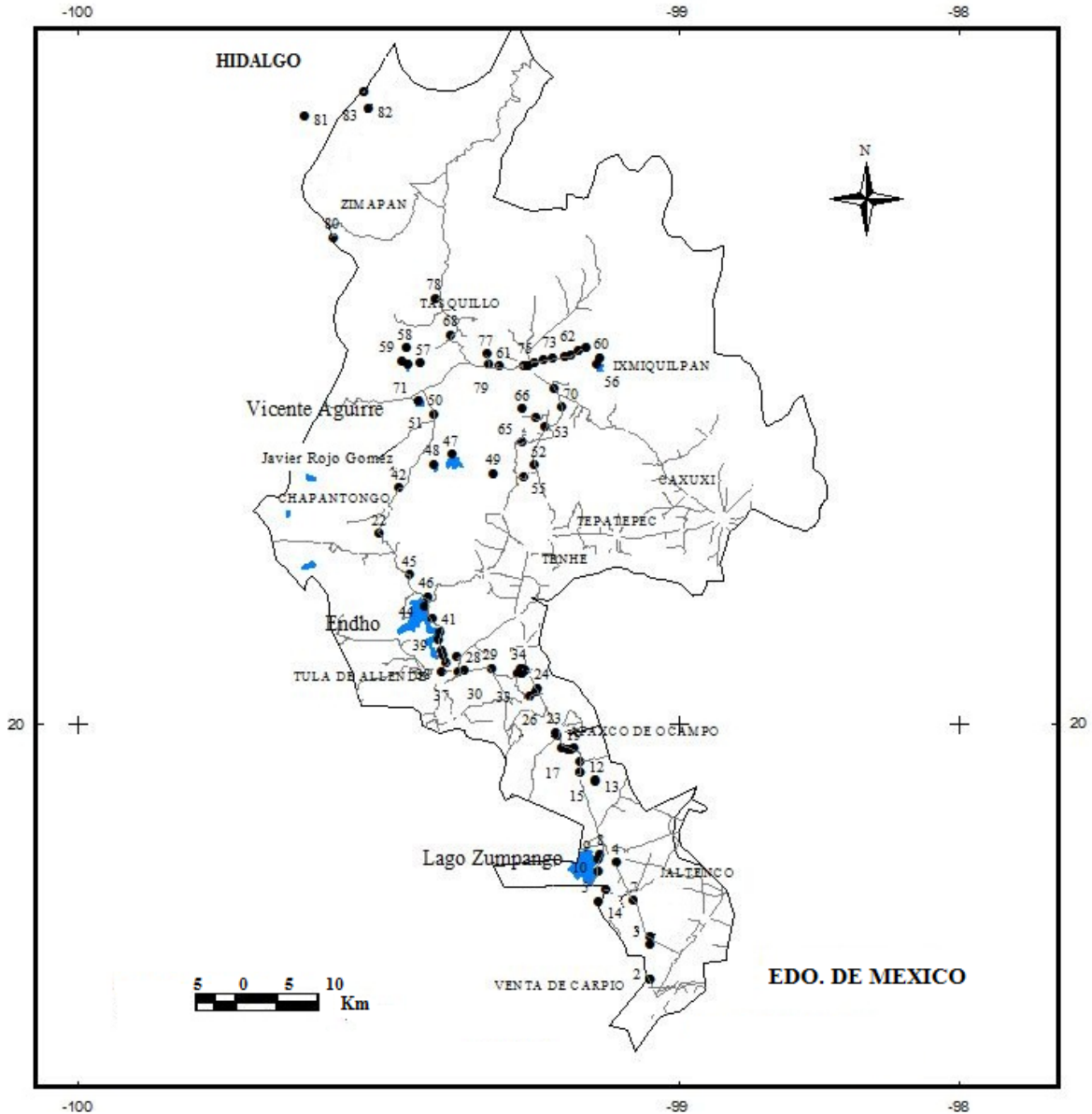


Figura 3. Localización de las estaciones de muestreo, en la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán, Verano de 2009.

Las determinaciones químicas que se llevaron a cabo en las aguas residuales de esta red hidrográfica fueron: pH, CE, Ca, Mg, Na, K, CO_3 , HCO_3 , Cl, SO_4 , RSE, PO, PO_4 , NO_3 y B, Cuadro 12.

Cuadro 12. Métodos analíticos utilizar para caracterizar el agua de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán.

Parámetro	Método	Referencia
1. pH	Potenciómetro marca Beckman	NOMAA081980
2. Conductividad Eléctrica	Conductímetro. Puente de Wheatstone	NOMAA931984
3. Residuo seco evaporado o total de sólidos solubles	Gravimetría utilizando estufa Hot Plate modelo Type 2200 Thermoline	NOMAA341981
4. Residuo seco calcinado	Gravimetría utilizando mufla Lindberg	NOMAA341981
5. Sodio y potasio	Flamometría con un flamómetro 648 IL $\lambda=589$ nm utilizando soluciones estandar 140 meq L ⁻¹ para Na y 5 meq L ⁻¹ para K	APHA, 1989 3500n Y. K. D
6. Calcio más Magnesio	Volumetría. Titulación con EDTA (Merck, Titrisol, Art. 9992) 0.01 N	APHA, 1989 3500 Ca D
7. Carbonatos	Volumetría. Titulación con ácido sulfúrico (Merck, Titrisol, Art.9984) 0.01 N indicador fenoftaleina	APHA, 1989 2320 B
8. Bicarbonatos	Volumetría Titulación con ácido sulfúrico (Merck, Titrisol, Art.9984) 0.01 N	APHA, 1989 2320 B
9. Cloruros	Volumetría Mohr, Titulación con Nitrato de plata (Merck, Nitrato de plata en solución, Art. OC248386) 0.01 N Indicador cromato de potasio al 5%	APHA, 1989 4500 C IB
10. Sulfatos	Turbidimetría. Espectrofotómetro 35. Perkin Elmer $\lambda=420$ nm	APHA, 1989 4500 SO4 E
11. Boratos	Turbidimetría. Espectrofotómetro 35. Perkin Elmer $\lambda=650$ nm	Rodier, 1990
12. Ortofosfatos	Turbidimetría. Espectrofotómetro 35. Perkin Elmer $\lambda=420$ nm	Rodier, 1990
13. Nitratos	Turbidimetría. Espectrofotómetro 35. Perkin Elmer $\lambda=410$ nm	Ácido Salicílico
14. Presión osmótica	Osmometría. Osmómetro Wescor, modelo VAPRO 5520, calibrado con soluciones estándares de optimol de 100, 290 y 1000 mmol kg ⁻¹	

4.3. Directrices sobre la calidad del agua

Las directrices para evaluar la calidad del agua de riego se presentan en el Cuadro 13. Las directrices se refieren sobre todo a los efectos a largo plazo de la calidad del agua sobre la producción de cultivos, las condiciones de suelo y el manejo agrícola. Las directrices tienen un carácter práctico y han sido utilizadas con éxito en la agricultura bajo riego, para evaluar los componentes del agua superficial, agua subterránea, agua de drenaje, efluentes de desagües y otras aguas residuales.

Cuando se utilizan aguas con valores menores a los correspondientes a “ninguna” restricción, por lo general no se presentan o no se identifican problemas en los cultivos o en el suelo. En el caso de restricción “ligera o moderada” se requiere un cuidado gradualmente mayor en la selección de los cultivos y de las alternativas de manejo, para alcanzar el potencial máximo de rendimiento. La restricción “severa” implica la aparición de problemas de suelo y de cultivo y/o reducción en los rendimientos, y la necesidad de contar, para lograr rendimientos aceptables, con un manejo hábil y efectivo, además de un plan de operación específicamente adaptado a la calidad del agua que ha de emplearse.

Los límites son en cierto modo aparentemente arbitrarios ya que en la realidad los cambios son graduales y no existe una división abrupta sobre las diferentes graduaciones. Una variación del 10-20%, por encima o por debajo de los datos, tiene poca importancia, si se considera juntamente y en relación con otros factores que puedan afectar los rendimientos.

Las directrices técnicas constituyen un primer paso para señalar las limitaciones, en calidad de una determinada fuente o suministro de agua. Además de ayudar a superar las limitaciones de uso de un agua determinada, también estas directrices nos permiten adaptarnos a un determinado manejo de suelos agrícolas, para un mejor uso de las aguas de baja calidad.

Cuadro 13. Lineamientos para evaluar la calidad del agua para riego.

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

Fuente: Ayers y Westcot, 1987

*Velásquez, 2001

4.4. *Análisis estadístico*

Para establecer la dependencia funcional entre la concentración total electrolítica (mg L⁻¹), los mmol_c L⁻¹ de cationes o de aniones y la presión osmótica (MPa), con respecto a la conductividad eléctrica (μS cm⁻¹) de las soluciones acuosas de las aguas residuales, se

calibró un modelo lineal ajustado por el origen, mediante la técnica del análisis de regresión lineal, el cual relaciona la concentración de las soluciones expresadas en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ o mg L^{-1} y la presión osmótica con respecto a la conductividad eléctrica de las soluciones acuosas.

El modelo en forma general tiene la estructura siguiente: $Y=B_1X$

Donde: **Y** representa la concentración de la solución en mg L^{-1} o ppm, en un primer caso; la concentración de la solución en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ de cationes y aniones en un segundo caso; y la presión osmótica en MPa desarrollada por la solución en un tercer caso;

B_1 es la pendiente de la recta, es decir, el número de unidades (ppm o mg L^{-1} , $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ o atm) que aumenta la solución (Y) por cada unidad de conductividad eléctrica expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$ o dS m^{-1} que aumenta la misma solución;

X es la conductividad eléctrica de la solución en mS cm^{-1} ($\text{CE} \times 10^3$) o $\mu\text{S cm}^{-1}$ ($\text{CE} \times 10^6$).

El ajuste del modelo se realizó al relacionar primero la conductividad eléctrica (mS cm^{-1} o $\mu\text{S cm}^{-1}$) con la concentración de las soluciones (ppm o mg L^{-1}), luego con la concentración ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$), y finalmente con la presión osmótica (MPa) empleando el método de mínimos cuadrados.

4.5. Formas de comprobar los análisis químicos de las aguas

Después de determinar los constituyentes principales, si éstos se expresan en equivalentes químicos (Eq), la suma de cationes y aniones deben ser aproximadamente iguales.

Balance de cationes y aniones

En principio, las soluciones acuosas son electroneutrales, es decir, en las soluciones se tiene una igualdad de cargas tanto positivas como negativas $\sum n^+ = \sum n^-$. El porcentaje de la diferencia absoluta entre la suma de cationes y aniones es el siguiente:

$$\% \text{ Diferencia} = \frac{|\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}|}{|\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}|} 100$$

Y los criterios para aceptar este porcentaje son:

Σ aniones (mmol _c L ⁻¹)	% Diferencia aceptable
0.0 – 3.0	± 0.2
3.0 – 10.0	± 2.0
10.0 – 800.0	± 2.0-5.0

Sólidos totales disueltos medidos = Sólidos disueltos totales calculados

Para considerar que los análisis de las aguas son correctos, el rango de variación entre el valor de sólidos totales disueltos (STD) medidos mg L⁻¹ y los sólidos totales calculados, este rango debe estar entre los siguientes valores:

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

La concentración total de sólidos totales disueltos medidos debe ser mayor al calculado, porque una contribución significativa no puede ser incluida en el cálculo. Si el valor medido es menor que el calculado, la suma mayor de iones y valores medidos no son confiables. Si el valor medido es mayor del 20% que el calculado, la suma menor de iones y sus constituyentes seleccionados deben ser analizados nuevamente.

Conductividad eléctrica medida = Conductividad eléctrica calculada

En lo que se refiere a las mediciones de la conductividad eléctrica de las soluciones, y para considerar que estas mediciones son correctas el rango de variación de la conductividad eléctrica (CE) medida en mS cm⁻¹ y la conductividad eléctrica calculada debe estar entre los siguientes valores:

$$0.9 < \frac{\text{CE medida}}{\text{CE calculada}} < 1.1$$

Conductividad eléctrica medida y la suma de iones

Para relacionar las mediciones de la conductividad eléctrica CE y la suma de iones (cationes o aniones), cualquiera de estas sumas será en términos generales CE/100 de los valores de la conductividad eléctrica expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$. Para diferentes tipos de salinidad el valor se encuentra entre los siguientes rangos:

$$\frac{\text{CE}}{90} < \frac{\text{CE}}{100} < \frac{\text{CE}}{110}$$

o sea: $100 \Sigma \text{aniones o } \Sigma \text{cationes en mmol}_c \text{ L}^{-1} = (0.9-1.1)\text{CE}$

Donde: Las concentraciones de cationes o aniones están expresadas en $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$, y la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$.

La suma de aniones y cationes debe ser 1/100 del valor de la conductividad eléctrica medida.

Sólidos totales disueltos medidos a un rango de conductividad eléctrica

Otra manera de considerar que los análisis químicos son correctos, es que, el valor numérico del cociente sólidos totales disueltos (ppm o mg L^{-1}) dividido entre la conductividad eléctrica (mS cm^{-1}) deberá ser aproximadamente 0.640. Para diferentes tipos de salinidad este valor tendrá variaciones entre 0.5-1.1.

Los valores calculados de mg L^{-1} , $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ y presión osmótica de las aguas residuales urbano-industriales del sistema hidrográfico de Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán son los que se obtuvieron mediante la inferencia estadística con los métodos de regresión lineal. Cuando se comparan procesos determinados experimentalmente con los procesos de ocurrencia teórica utilizando una ley fisicoquímica determinada, el ángulo de la pendiente de esta relación debe ser aproximadamente de 45° .

Para conocer las fracciones adsorbidas de sodio intercambiable en los sistemas coloidales de los suelos del Valle del Mezquital, en condiciones de equilibrio químico con aguas

residuales que riegan estos suelos, se obtuvieron los valores de la relación de adsorción de sodio o RAS en sus diferentes conceptualizaciones físico-químicas.

A este respecto, para inferir sobre los valores de las fracciones adsorbidas de sodio en los suelos se utilizó la ecuación derivada de las reacciones reversibles de intercambio iónico de Gapon, 1987, de acuerdo con la ley de acción de masas ya que el intercambio de cationes puede representarse mediante ecuaciones similares a las que se emplean en las reacciones químicas heterogéneas y estequiométricas.

Dicha ecuación es la siguiente:

$$\text{PSI} = \frac{\text{Kg RAS}}{1 + \text{Kg RAS}} 100$$

Donde: PSI, es el porcentaje de sodio intercambiable en los sistemas coloidales de suelos; kg es el coeficiente de selectividad iónica de las fracciones arcillosas y orgánico-minerales de los suelos $[\text{mmol}_c \text{L}^{-1}]^{-1/2}$; RAS, es la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales. Aquí se consideraron los valores de RAS en las diferentes conceptualizaciones físicoquímicas $[\text{mmol}_c \text{L}^{-1}]^{1/2}$.

A su vez, como las aguas residuales del sistema hidrográfico Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán son ricas en iones bicarbonato HCO_3^- , en esta investigación se calculó el parámetro de Eaton: Carbonato de sodio residual “ Na_2CO_3 ” (CSR).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán, principalmente se encuentra distribuida en el territorio del Valle del Mezquital, Hidalgo, esta zona se riega con aguas residuales derivadas del valle de México cultivos agrícolas; principalmente alfalfa, maíz, cebada y frijol.

Las estaciones de muestreo de las aguas residuales se distribuyeron a lo largo de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán. En zonas aledañas a los diferentes canales de distribución y de conducción de aguas.

En el presente estudio la discusión de los resultados de aguas, se realizó mediante la utilización de diagramas sintéticos de asociaciones funcionales de variables. Los resultados de los valores de los diferentes parámetros se presentan en los anexos.

5.1. *Composición iónica de las aguas residuales (Otoño 2008 y Verano 2009).*

Las diferentes aguas que se utilizan para riego de cultivos agrícolas en el Valle del Mezquital, poseen relaciones iónicas con diferentes variaciones. Y como diferentes relaciones iónicas en estas aguas, en condiciones de cierto equilibrio dentro del espesor de los suelos, van a desarrollar procesos específicos de un quimismo determinado en los diferentes suelos que se riegan con estas aguas, de tal manera que en este trabajo de investigación se analizaron a las aguas residuales que derivan de la zona metropolitana de acuerdo con las diferentes relaciones aniónicas (tipos de agua). Estos tipos de agua van a desarrollar distintos tipos de salinización en los suelos.

Tipos de agua de acuerdo con su composición iónica:

Clorhídrica	Cl / SO_4	>	2.0
Sulfático-clorhídrica	Cl / SO_4	=	1.0 – 2.0
Clorhídrico-sulfática	Cl / SO_4	=	0.2 – 1.0

Sulfática	Cl / SO_4	<	0.2
Sulfático-sódica	$HCO_3 / Cl + SO_4$	=	2.0

El número de muestras de agua con diferentes tipos de quimismo que se encuentran en la población de las aguas residuales, fueron como sigue: 1). composición clorhídrica 143 muestras; 2). composición sulfático-clorhídrica 39 muestras; 3). composición clorhídrica-sulfática 8 muestras. Por lo tanto se presenta un predominio de los cloruros (Cl) en las muestras sobre los sulfatos.

5.2. Distribución de los diferentes cationes y aniones en las aguas que riegan el Valle del Mezquital.

En las Figuras 4 y 5 se presentan las distribuciones de los cationes y los aniones en las aguas residuales para las estaciones de muestreo de otoño 2008 y verano 2009. En ambas figuras se observa que a lo largo de toda la red hidrográfica, el sodio (Na^+) ocupa una mayor superficie por lo que corresponde del lado de los cationes, y en lo que respecta al lado de los aniones, bicarbonato (HCO_3^-) ocupa la mayor superficie (presencia). Esta particularidad en lo que concierne a la composición química de las aguas residuales indica que de acuerdo al quimismo estas aguas tienen una gran proporción de iones bicarbonato (HCO_3^-). Por último, se debe mencionar que los tipos de agua residuales en el Valle del Mezquital son: 1).clorhídrico-bicarbonatadas; 2). sulfático-clorhídricas-bicarbonatadas; 3). clorhídrico-sulfático-bicarbonatadas.

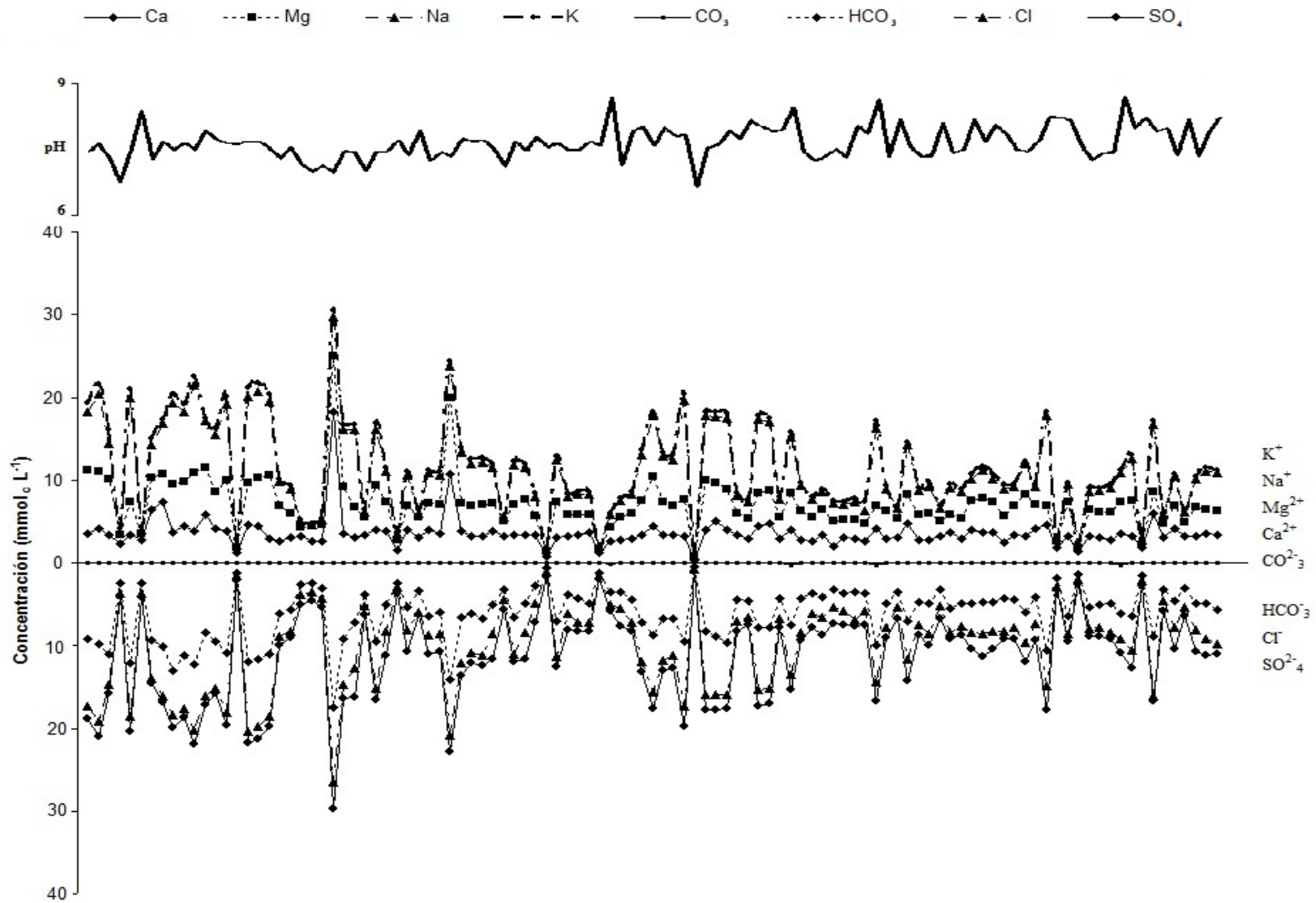


Figura 4. Composición iónica del agua residual de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán. Otoño 2008.

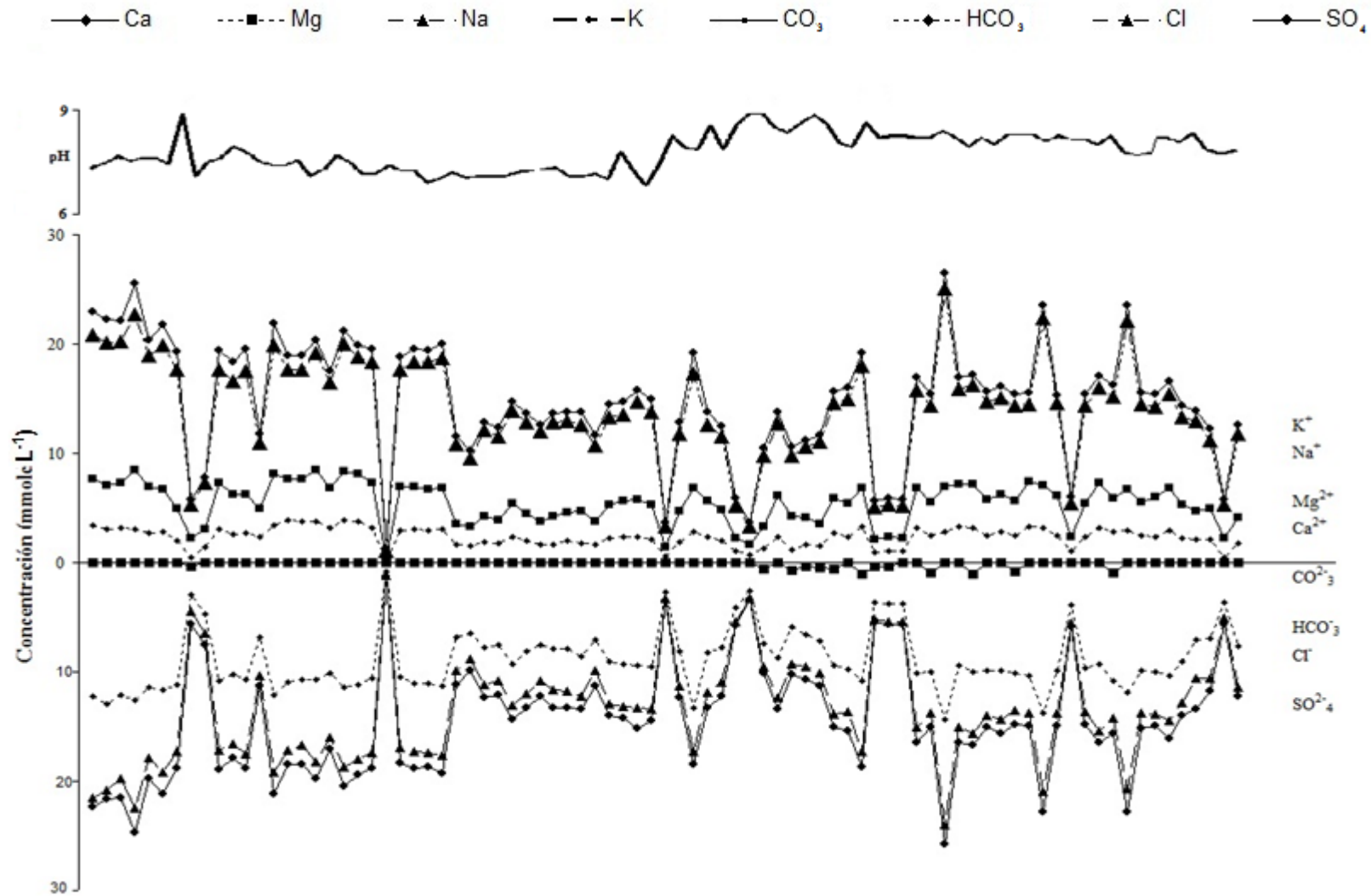


Figura 5. Composición iónica del agua residual de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán Verano 2009.

5.3. Conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ y mmolc L^{-1} en las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital.

Como se ha mencionado la calidad de las aguas de riego está determinada por la concentración electrolítica y por la composición relativa de sus diferentes iones.

En las Figuras 6 y 7 se presenta la distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$ y los mmolc L^{-1} de las diferentes aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital.

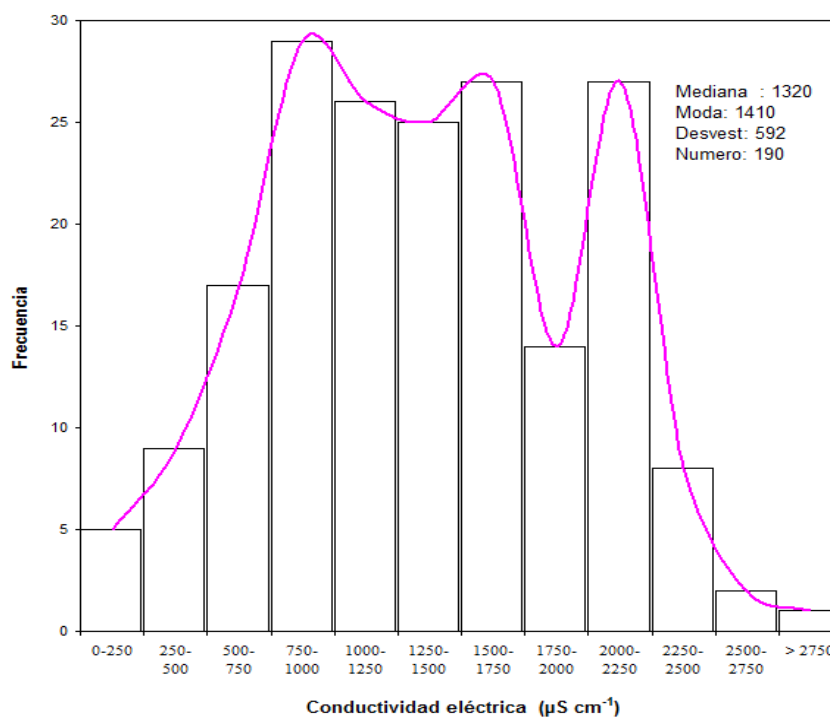


Figura 6. Curva de distribución de frecuencias de los valores de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) del agua residual que riegan el Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo.

De acuerdo con los rangos de los valores de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) establecidos en el diagrama de Richards (1973) para considerar la calidad de las aguas para riego, las diferentes aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital se clasifican como sigue: 1). aguas con una conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1} < 250$ o (C1), se encontraron 5 muestras de agua; 2). Aguas con una conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ 250.0 – 750 (C2) se

encontraron 26 muestras de agua; 3). Aguas con una conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ 750.0 – 2250.0 (C3) se encontraron 148 muestras de agua, y 4). Aguas con una conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ 2250.0 – 5000 (C4), se encontraron 11 muestras de agua.

Por último de acuerdo con los rangos de valores de $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital se clasificaron como sigue: 1). aguas con una concentración $< 5.0 \text{ mmol}_c \text{L}^{-1}$, aquí se encontraron 15 muestras de agua; 2). aguas con una concentración de 5.0 -10.0 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, se encontraron 40 muestras de agua; 3). aguas con una concentración de 10.0 – 20.0 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ se encontraron 96 muestras de agua; 4). aguas con una concentración de 20.0 – 30.0 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ se encontraron 46 muestras de agua; y 5). aguas con una concentración $> 30.0 \text{ mmol}_c \text{L}^{-1}$ aquí se encontró 1 muestra de agua.

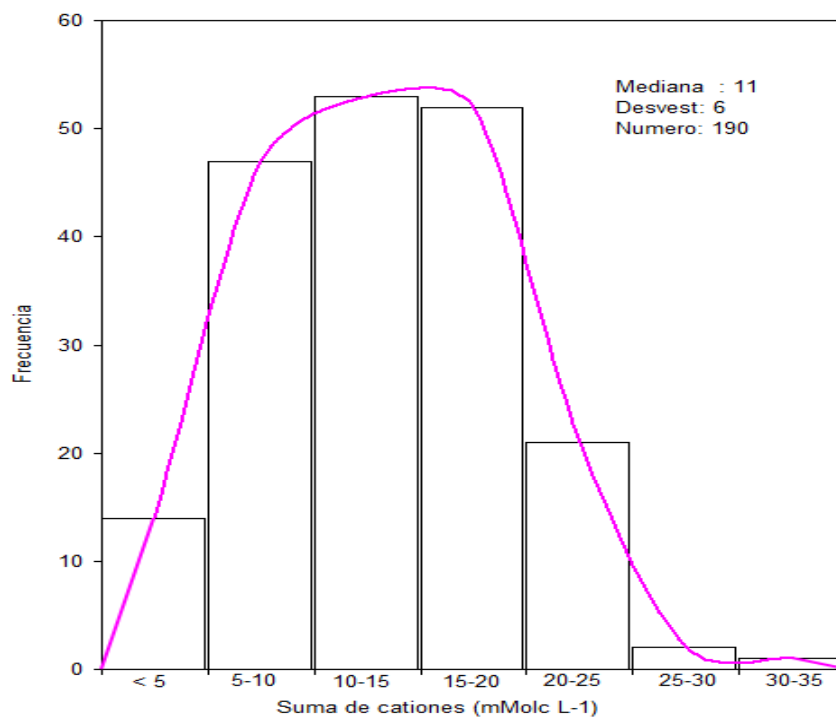


Figura 7. Distribución de frecuencias de los valores de la suma de cationes ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) del agua residual que riegan el Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo.

5.4. *Relación de la conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas residuales (determinada experimentalmente) con la conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ (determinada teóricamente)*

En los trabajos de caracterización de la calidad de las aguas residuales de una gran zona como lo es el Valle del Mezquital, en donde es fundamental hacer la determinación de las sales solubles y considerando que estas determinaciones numericas son muy importantes, se ha tomado en cuenta que medir la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) se puede relacionar con los sólidos disueltos en estas aguas (mg L^{-1}).

Con la finalidad de establecer en qué medida las mediciones experimentales de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) corresponden con los valores teóricos de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) de las aguas residuales, se procedió a establecer la relación funcional $\text{CE}_{\text{teó}} = fa(\text{CE}_{\text{exp}})$. Para este efecto se calculó la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) teórica para cada ión que se tiene en las muestras de agua, de acuerdo con lo establecido por APHA (1995).

En el Cuadro 14 se presentan los valores de conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ teórica para cada ión que se tiene en las muestras de agua residuales.

Cuadro 14. Conductividad eléctrica teórica de los diferentes iones que más comúnmente se encuentran en el agua.

Ión	Conductividad eléctrica a 25°C ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	
	Por $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$	Por mg L^{-1}
Bicarbonato	43.6	0.715
Calcio	52.0	2.60
Carbonato	84.6	2.83
Cloruro	75.9	2.14
Magnesio	46.6	3.82
Potasio	72.0	1.84
Sodio	48.9	2.13
Sulfato	73.9	1.54

En la Figura 8 se presenta la relación funcional $\text{CE}_{\text{teó}} = fa(\text{CE}_{\text{exp}})$

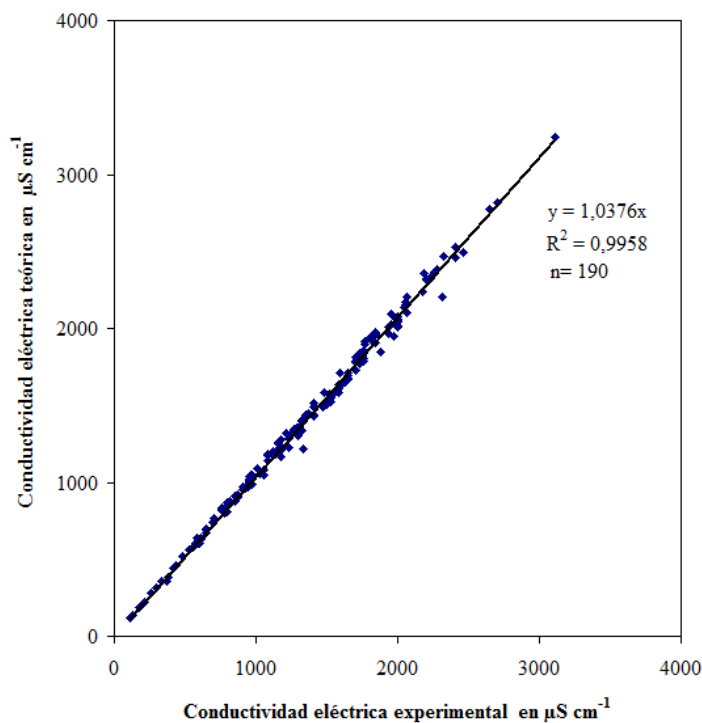


Figura 8. Relación funcional entre la conductividad eléctrica teórica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y la conductividad eléctrica experimental ($\mu\text{S cm}^{-1}$) del agua residual del Valle del Mezquital.

De acuerdo con la Figura 8 se concluye que las determinaciones experimentales de la conductividad eléctrica de las muestras de agua están correctamente determinadas.

Por último es necesario mencionar que, las sales solubles que se encuentran en las soluciones acuosas de las aguas naturales superficiales, subterráneas y residuales, en sus formas disociadas están formando diferentes iones independientes. Los fenómenos de disociación ocurren de acuerdo con las leyes de disociación electrolítica. Es así que, los valores de la conductividad eléctrica de distintas soluciones salinas son proporcionales a las concentraciones iónicas de estas mismas soluciones.

5.5. Relación de los mg L^{-1} analíticos con la conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas residuales

Como se ha señalado por diferentes autores (Richard L.A., 1973; Jurinak, *et al.* 1990; Velázquez, 2001), en investigaciones específicas sobre un gran número de determinaciones de la conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ y su relación con la cantidad en peso de los iones disociados, que las mediciones de la conductividad eléctrica son directamente proporcionales a las masas de las sales disociadas. También a su vez se ha indicado que esta relación funcional $\text{mg L}^{-1} = f_a(\text{CE})$ en proporcionalidad depende de la pendiente del tipo de salinidad. Para diferentes tipos de sales puras y tipos de salinidad, los valores de la pendiente varían de 0.580–1.250 cuando la conductividad eléctrica es expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$.

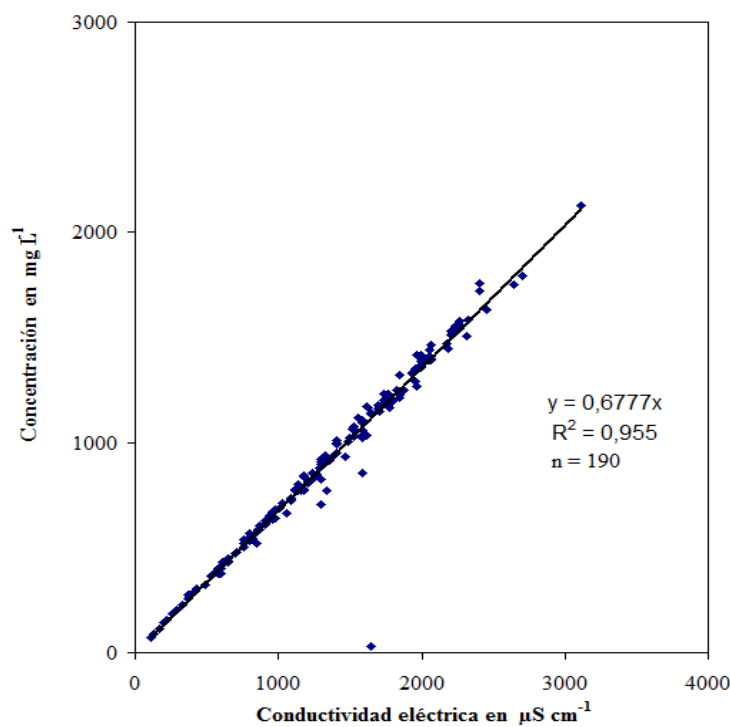


Figura 9. Concentración de sales expresadas en mg L^{-1} y su relación con la conductividad eléctrica del agua residual del Valle del Mezquital. Estado de Hidalgo.

En la Figura 9 se presenta la relación funcional entre las concentraciones de las sales soluble de las aguas residuales y sus valores correspondientes de la conductividad eléctrica

$\text{mg L}^{-1} = fa(\text{CE})$. El valor de la pendiente encontrada es de 0.6777. Este valor corresponde a soluciones ricas en iones bicarbonato.

5.6. *Relación de suma de cationes mmolc L^{-1} con la conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ de las aguas residuales*

Dentro de las características que tienen las soluciones acuosas salinas (aguas naturales y residuales) es que la conductividad eléctrica de las soluciones acuosas expresada en $\mu\text{S cm}^{-1}$ está en función proporcional a la concentración. Conocer los valores de la relación funcional de cationes o aniones $\text{mmolc L}^{-1} = fa(\text{CE})$ es muy importante, ya que en las determinaciones analíticas la suma de cationes o de aniones estas deben ser aproximadamente iguales, tomando en cuenta los porcentajes de error permisibles (Richards, 1973; APHA, 1995).

En la Figura 10 se presentan los valores de la relación funcional $\text{mmolc L}^{-1} = fa(\text{CE})$ para cationes. El valor de la pendiente es 0.0095.

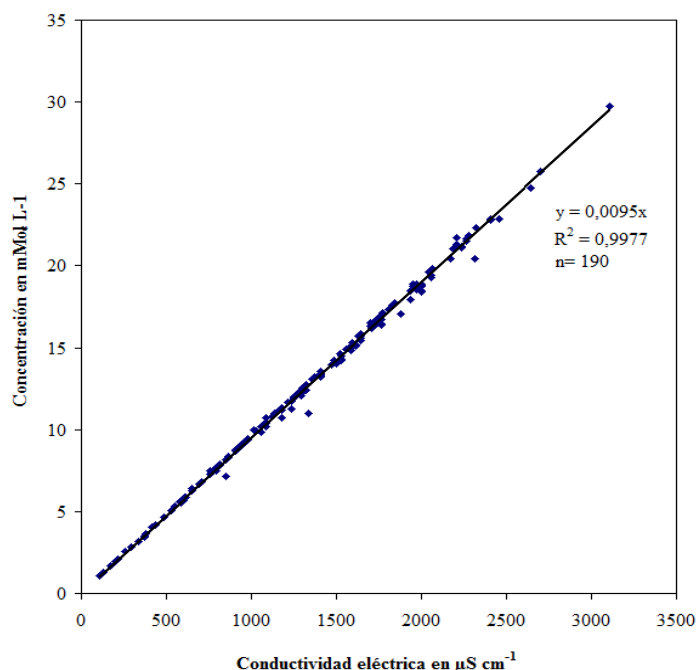


Figura 10. Relación entre la conductividad eléctrica $\mu\text{S cm}^{-1}$ y la concentración de las sales solubles expresada en mmolc L^{-1} de las muestras de agua que riegan el Valle del Mezquital. Estado de Hidalgo.

5.7. *Relación de la presión osmótica (MPa) y la conductividad eléctrica ($\mu S\ cm^{-1}$) de las aguas residuales*

El efecto presión osmótica de las soluciones acuosas y extractos de suelo de los suelos salinos es proporcional a la concentración de solutos en estas soluciones. En muchos casos, la presión osmótica es la que condiciona la salinidad de las diferentes aguas y extractos de suelo. El efecto osmótico de las soluciones acuosas está relacionado con la concentración total de sales, y no tanto con las concentraciones específicas de uno u otro componente. Estos efectos osmóticos se hacen evidentes de manera general, con retraso en el crecimiento de los cultivos, presentándose plantas con pocas hojas y hojas pequeñas.

La relación entre la presión osmótica PO y la conductividad eléctrica CE es muy útil en la práctica agrícola. Dentro de la variación de valores de la CE que permiten el desarrollo de las plantas, la relación $PO = 0.36\ CE$ puede usarse de manera muy aproximada para estimar la presión osmótica de las soluciones de los suelos, cuando se conoce la conductividad eléctrica. Para salinidades de tipo sulfáticas o con participación de sulfatos, el coeficiente (0.36) tiene variaciones.

El movimiento neto de las moléculas del disolvente a través de las membranas semipermeables, (disolvente puro, la disolución diluida, 0 la disolución más concentrada), recibe el nombre de ósmosis. La presión osmótica (π), de una disolución es la presión que se requiere para detener la ósmosis, ésta se expresa en atmósferas, y esta formulada por:

$$\pi = MRT$$

Donde: T - es la temperatura absoluta ($^{\circ}K$).

M - es la molaridad de la solución ($M\ L^{-1}$)

R - es la constante de los gases ($0.082057\ L\ atm/ K\ mol$).

La presión osmótica de las soluciones acuosas de las aguas residuales también se puede determinar de acuerdo con:

$$mg\ L^{-1} = 0.6777\ CE \quad y \quad PO_{atm} = 0.000400\ CE$$

$$PO_{atm} = \frac{0.000400}{0.6777} CE$$

Donde: $mg L^{-1}$ – son los $mg L^{-1}$ que se encuentran en las aguas residuales

0.6777- es la pendiente de la recta que es determinada numéricamente al relacionar $mgL^{-1}=fa(CE)$ en una población de aguas residuales.

0.000400- es la pendiente de la recta que determinada numéricamente al relacionar $PO_{atm}=fa(CE)$

CE- es la conductividad eléctrica determinada numéricamente en una población de aguas residuales $\mu S cm^{-1}$.

PO_{atm} = es la presión osmótica de las soluciones acuosas de una población de aguas residuales

En la Figura 11 se presenta la relación $PO_{teórica}$ (MPa) – PO_{exp} (MPa). El valor numérico de la pendiente de la relación funcional $PO_{teórica}=fa(PO_{exp})$ es 0.965. Este valor corresponde a soluciones del tipo bicarbonatado (Richards, 1973; Ramírez, 1988; Velázquez, 2001)

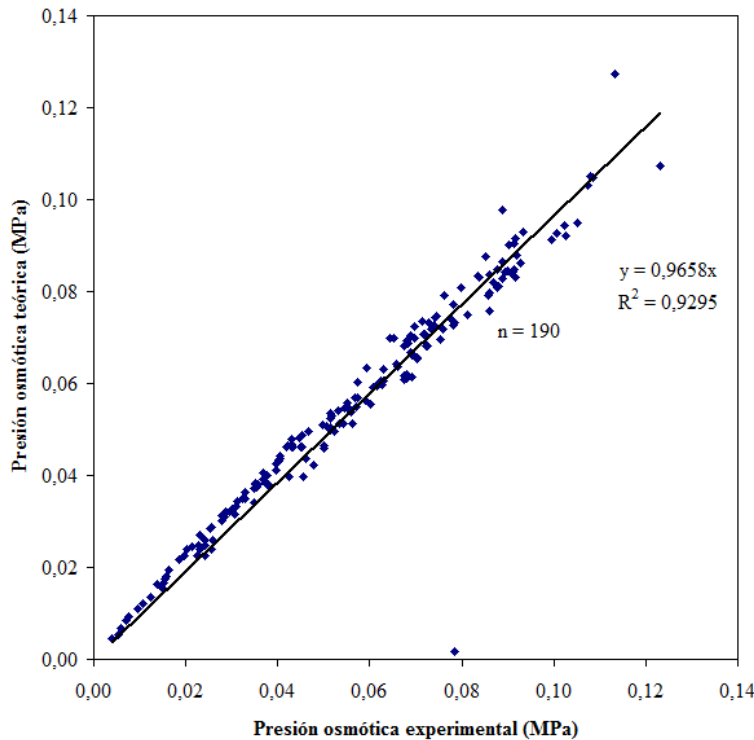


Figura 11. Relación entre la PO_{exp} (MPa) y la $PO_{teórica}$ (MPa) de las muestras de agua que riegan el Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo.

Relación de los mmol-ión L⁻¹ y la conductividad eléctrica μS cm⁻¹ de las aguas residuales

La presión osmótica es una de las propiedades coligativas de las soluciones salinas acuosas. Las propiedades coligativas de las soluciones electrolíticas son: 1). Disminución de vapor, 2). El aumento del punto de ebullición; 3). La disminución del punto de congelación y 4). La presión osmótica. Las propiedades coligativas de las soluciones, dependen únicamente del número de partículas de soluto, que estén presentes en una cantidad dada de disolvente. La salinidad se refiere a las concentraciones de sales solubles, de manera que estas concentraciones, aumentan significativamente las propiedades coligativas de las soluciones en las cuales las plantas están expuestas y especialmente entonces, se reduce el potencial osmótico de las soluciones.

En la Figura 12 se presenta la relación de mmol-ión L⁻¹ con respecto a la conductividad eléctrica μS cm⁻¹ de las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital. El conocimiento del coeficiente $a = 0.017$, es muy útil para conocer las presiones osmóticas, que se desarrollan en las soluciones acuosas de las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital.

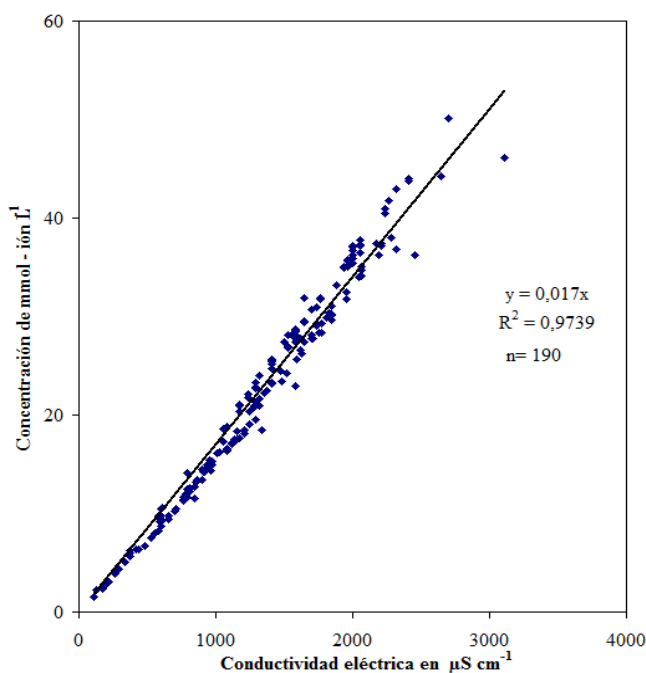


Figura 12. Relación entre los mmol-ión L⁻¹ y la conductividad eléctrica μS cm⁻¹ del agua residual que riega el Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo.

5.8. Clasificación de las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital de acuerdo con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS)

El riego de los diferentes cultivos agrícolas se realiza con aguas de diferente calidad; y debido a las distintas pérdidas por conducción, ya que en la mayoría de los casos el riego se hace utilizando canales de tierra, y también a su vez debido a los excesos de las láminas de riego que se proporcionan a los cultivos para satisfacer sus requerimientos de humedad, todo esto ha provocado que conjuntamente se presenten en los suelos agrícolas bajo riego una elevación de los niveles freáticos más allá de los límites de los que se consideran críticos para ciertos cultivos, y por lo tanto, esto provoca que en los suelos se desarrolle salinización. A ésta salinización de los suelos se le denomina salinización secundaria, y ésta se debe a la elevación de los mantos freáticos, y a una distribución tanto horizontal como vertical de las sales primarias o naturales que se encuentran inicialmente en los distintos espesores de los suelos (Szabolcs, 1989).

Entre las propiedades físicas de los suelos que se afectan, cuando estos se riegan con aguas de diferente composición química y de distinto RAS se encuentran; la porosidad, la conductividad hidráulica y la velocidad de infiltración.

El peligro de sodicidad de los suelos que se riegan con aguas con altos contenidos de sodio, afecta a los cultivos agrícolas. Los altos contenidos de sodio en las soluciones de los suelos, afecta la permeabilidad de estos. Cuando se presenta una notable reducción de la infiltración del agua en el suelo, esto se puede atribuir a una formación de costras superficiales, a una dispersión y migración de las arcillas dentro de los poros y también a un hinchamiento de las arcillas expandibles de los suelos, fundamentalmente a las arcillas montmorilloníticas.

En un medio suelo-agua, el movimiento del agua se ve afectado por la interacción que ocurre entre el suelo y el agua, debido a los procesos de intercambio catiónico; ya que el agua de riego al ser una solución electrolítica, cuyos constituyentes deben actuar con las diferentes fracciones texturales, principalmente con la fracción arcillosa, dado que es la

fracción más activa debido a su gran superficie es de suponer entonces, que se afectarán de alguna manera las propiedades físicas de los suelos, dependiendo esto del tipo de fracción arcillosa y de la calidad del agua de riego (McNeal, 1968).

La mayoría de los minerales arcillosos poseen una estructura formada por capas tetraédricas y octaédricas. A los minerales arcillosos, que tienen una capa octaédrica y una capa tetraédrica, se les denomina minerales arcillosos uno a uno, y se indican como sigue; 1:1, a éstos minerales pertenecen la caolinita y la halloisita.

Existen minerales que tienen tres capas; dos tetraédricas y una octaédrica y que se identifican como 2:1; a estos minerales se les denomina dos a uno, y entre estos minerales arcillosos está la montmorillonita y la vermiculita (McNeal y Coleman 1966).

La adsorción de cationes ocurre en el complejo de intercambio catiónico que está formado de coloides minerales, orgánicos y orgánico-minerales. El tipo y la calidad de los cationes adsorbidos influyen de forma importante en las propiedades físicas y químicas de los suelos, por ejemplo el Ca^{2+} y el Na^{+} , tienen una influencia directa en la estructura de los suelos. De éste modo, el Ca^{2+} , al ser un buen coagulante favorece como consecuencia de esto, la formación de flóculos, permitiendo que el suelo tenga una estructura granulada, bien desarrollada y estable; en cambio, el ion sodio dispersa las partículas coloidales de los suelos.

El proceso mediante el cual, las partículas del suelo se transforman en unidades independientes se le conoce como dispersión (McNeal, 1968); se ha demostrado que cuando la doble capa difusa se encuentra saturada con cationes divalentes, es más comprimida, que cuando está con cationes monovalentes; esto explica el mecanismo floculante de los cationes divalentes, pues sirven como puente de unión entre partículas (Gorbunov, 1967).

La presencia de los iones de sodio, en concentraciones por arriba de ciertos valores con respecto a las concentraciones de los iones de calcio y de magnesio en las soluciones de los suelos, se considera como peligroso, ya que en estos suelos se presentan los siguientes

fenómenos que son: un deterioro de las propiedades físicas de los suelos y efectos de toxicidad en los cultivos debido a las grandes cantidades de iones de sodio en las soluciones de los suelos. El deterioro de las propiedades físicas de los suelos se debe a los altos niveles de sodio intercambiable que se encuentra en ellos.

La sodicidad de un suelo se encuentra determinada por el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), ya que éste, está referido a la cantidad de cargas que están neutralizadas con iones de sodio. El Porcentaje de Sodio Intercambiable puede ser estimado mediante el conocimiento de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) del agua de riego.

Se ha considerado por el laboratorio de salinidad de los Estados Unidos (1954) que se puede asumir que el comportamiento del ión magnesio es similar al del ión calcio en la fase adsorbida.

Por otra parte, como ya se ha señalado anteriormente, que las diferentes aguas naturales debido a su composición iónica, en lo que se refiere a los aniones, poseen diferente régimen físico-químico, y sobre todo aquellas aguas que tienen cantidades considerables de iones bicarbonato como son los aguas residuales. De aquí se deriva que los contenidos de iones de calcio y de magnesio sufren variaciones considerables, debido a la tendencia que tienen estas aguas de poseer un régimen físico-químico que tiende a la alcalinidad ($\text{pH} > 7.0$).

En estas condiciones los iones bicarbonato se precipitan en forma de calcita, debido a que los valores de la Relación de Adsorción de Sodio RAS tenderán a obtener diferentes valores numéricos como resultado de la precipitación o solubilización de ciertas fracciones de la calcita. El proceso de precipitación o de solubilidad de la calcita está determinado por las constantes de equilibrio de los iones de calcio, carbonato y bicarbonato.

En la Figura 13 y 14 se presentan la relación funcional $\text{RAS}_{\text{or}}-\text{RAS}_{\text{aj}}$ y $\text{RAS}_{\text{or}}-\text{RAS}^{\circ}$.

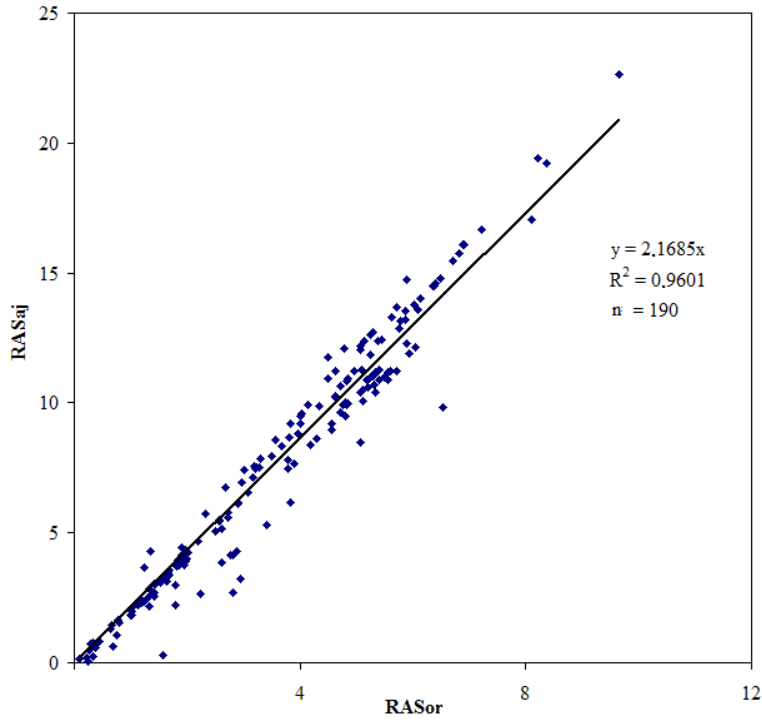


Figura 13. Relación entre los valores del RAS_{or} - RAS_{aj} .

En la Figura 14 se presenta la relación de RAS_{or} - RAS_{corr}° .

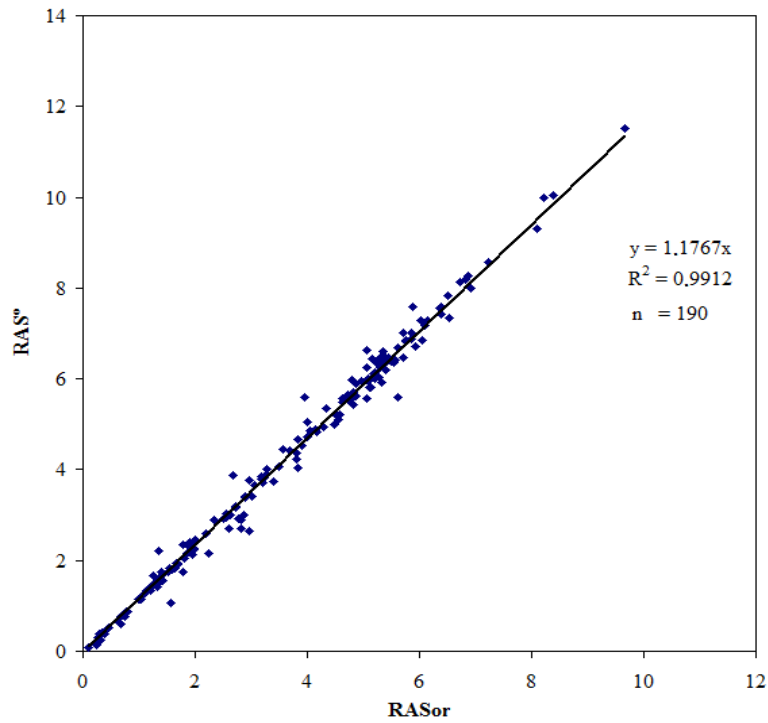


Figura 14. Relación entre los valores de RAS_{or} - RAS_{corr}° .

Con los valores numéricos de los diferentes RAS calculados por las diferentes conceptualizaciones obtenemos diferentes valores de sodio intercambiable PSI. La determinación de valores extremos de PSI_{min} y PSI_{max} es muy útil desde el punto de vista del manejo de las fuentes de calcio para mejorar los suelos sódicos.

En el Cuadro 15 se presenta como se encuentran distribuidas las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital de acuerdo con los valores numéricos del RAS y CE. Aquí se toma en cuenta las variaciones que tienen las concentraciones de calcio de acuerdo a los procesos de precipitación o disolución de la calcita.

Cuadro 15 Clasificación del agua residual de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, de acuerdo con las diferentes formulaciones de RAS-CE, Otoño 2008 y Verano 2009.

FORMULACIONES DE RAS	C1S	C2S	C2S	C3S	C3S	C3S	C3S	C4S	C4S	C4S	C4S
	1	1	2	1	2	3	4	1	2	3	4
Numero de muestras de aguas											
$RAS = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}}$	5	26	-	148	-	-	-	11	-	-	-
$RAS^{\circ} = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}}$	5	26	-	91	57	-	-	3	5	3	-
$RAS_{aj} = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}} [1 + (8.4 - pH_c)]$	5	26		148	-	-	-	11	-	-	-

En la Figura 15 se indica cómo se distribuyeron las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital de acuerdo con los valores numéricos de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) en sus diferentes conceptualizaciones.

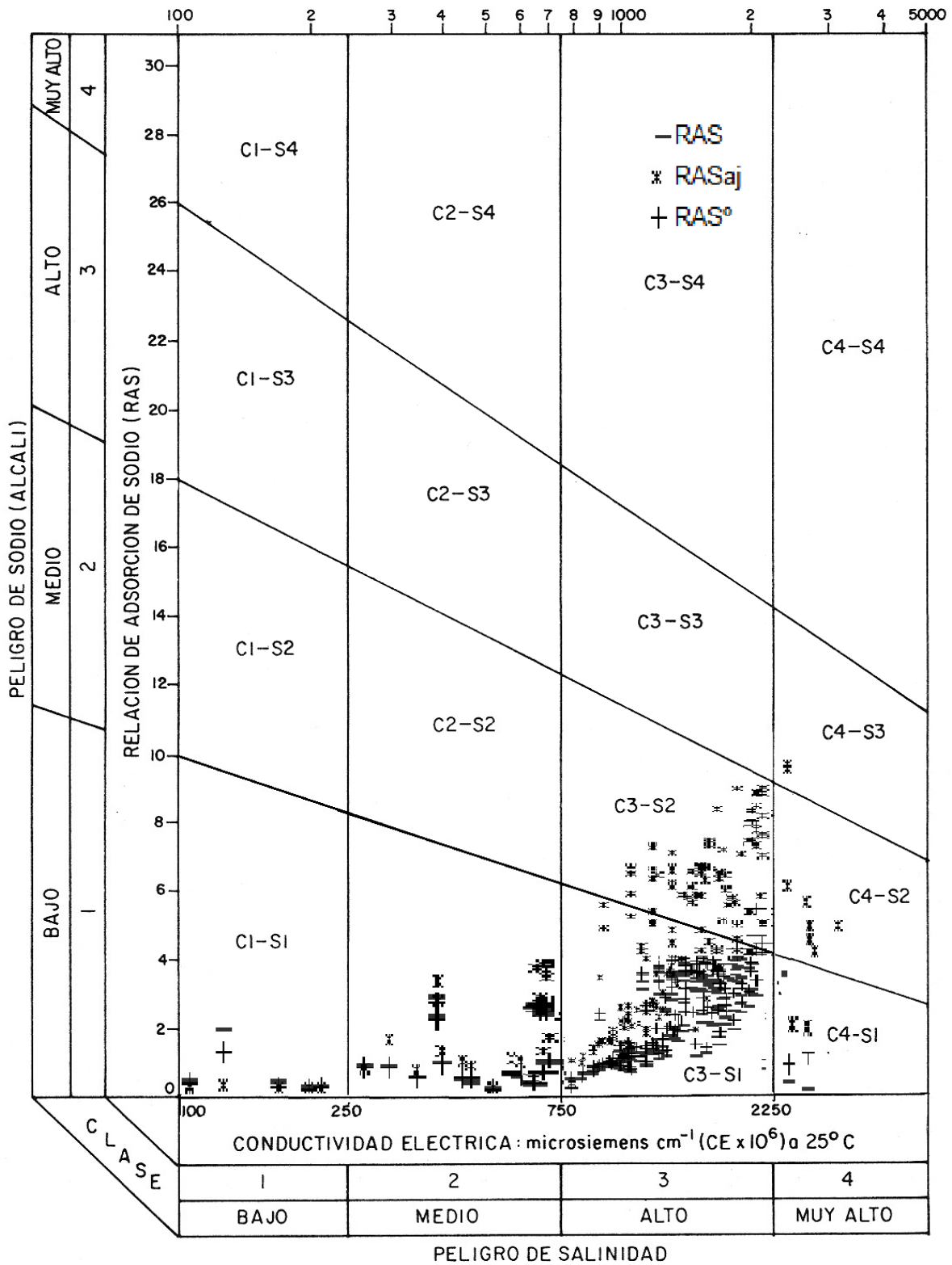


Figura 15. Diagrama de clasificación del agua residual, de la red hidrográfica Zumpango – Ixmiquilpan – Zimapán, Otoño 2007 e Invierno 2008, RAS original-CE, RAS ajustado-CE y RAS^o corregido-CE.

5.9. Clasificación de las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital en lo que se refiere al Peligro de Disminución de la Infiltración

El peligro por salinidad de las aguas de riego puede tener un efecto negativo en la producción de cultivos. La reducción en la tasa de infiltración del agua de riego, puede por lo común ser atribuida a la formación de costras en la superficie, a la disposición y a la migración de las arcillas dentro de los poros de los suelos y al hinchamiento de las arcillas del grupo 2:1. Sin embargo, también el peligro por sodicidad de las aguas de riego depende a su vez, del sistema de manejo de estas aguas. La dispersión de las partículas de la superficie del suelo requiere de que se suministre energía y que se rompan los enlaces químicos entre las partículas del suelo.

El riego por aspersión, puede fuertemente incrementar los problemas de infiltración, que generalmente están asociados con las aguas de riego. Debido a que es más grande la posibilidad de que se propicie un encostramiento de la superficie del suelo, el método de riego por aspersión puede ser inadecuado, cuando se tienen aguas que tienden a causar dispersión e hinchamiento en los suelos y tal es el caso cuando se dispone de aguas ricas en sodio y bicarbonatos. Los sistemas de riego por goteo o sistemas de riego por superficie, producen una menor separación de partículas cuando se utilizan aguas con peligros de sodicidad. Esto es muy importante, cuando se utilizan aguas con algunas cantidades de bicarbonatos.

El proceso de infiltración se refiere a la facilidad con que el agua atraviesa la superficie del suelo, y ésta se mide en términos de sodicidad; el término permeabilidad se refiere a la conductividad hidráulica la cual depende de la geometría de los poros del suelo y del contenido de agua en el suelo, y se utiliza para describir el flujo de agua que tiene ocurrencia dentro de la masa del suelo.

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. Una tasa de infiltración es considerada como baja si es de 3.0 mm h^{-1} , mientras que una tasa de infiltración de 12.0 mm h^{-1} es considerada como relativamente alta.

En la Figura 16 se muestra las estaciones de muestreos otoño 2008 y verano 2009 de las aguas residuales urbano-industriales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán, en lo que se refiere a su capacidad de infiltración en los suelos de acuerdo con su relación de adsorción de sodio RAS y su conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$), se clasifican de acuerdo a su capacidad de infiltración.

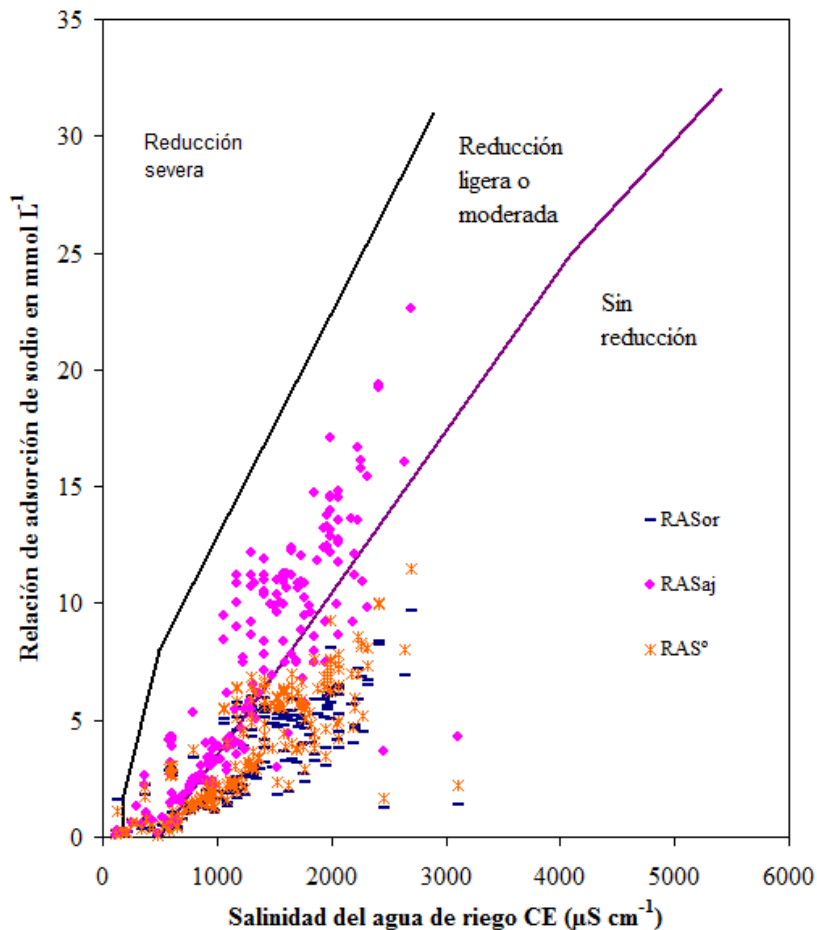


Figura 16. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio bajo diferentes formulaciones (RAS_{or} , RAS_{aj} y $\text{RAS}_{\text{corr}}^{\circ}$) del agua de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, Otoño 2008 y Verano 2009.

5.10. Carbonato de Sodio Residual

Todas las aguas que se utilizan para riego contienen alguna cantidad de sales disueltas. De tal manera que, si el agua de riego es constantemente evaporada y transpirada por las plantas en una masa de suelo determinada, el contenido de sales en el suelo aumentará nuevamente hasta un valor tal que el contenido de cationes de una determinada agua de riego, será muy alto y si el ión sodio se caracteriza por tener una alta proporción, entonces, durante el uso de esta agua de riego en el complejo de intercambio catiónico aumentará el sodio intercambiable. Altos contenidos de sodio intercambiable conducen a que los suelos adquieran propiedades físicas adversas para el desarrollo de los cultivos, pérdida de permeabilidad y dispersión de los suelos. Eaton (1950), en su tiempo sugirió que estos efectos nocivos pueden ser agravados si las aguas de riego contienen altos valores de iones bicarbonato. Como las aguas sulfático-clorhídrico-bicarbonatadas, clorhídrico-sulfático-bicarbonatadas, que riegan el Valle del Mezquital contienen iones de calcio Ca^{2+} e iones de bicarbonato HCO_3^- , y mediante un proceso de evaporación el CO_2 sale del sistema, entonces, el CaCO_3 se precipita de acuerdo con la reacción:



De tal manera que de acuerdo con este proceso, la relación de sodio Na^+ con respecto al calcio Ca^{2+} en la solución del suelo, tenderá a aumentar.

Es así que se propuso por Eaton (1950) el parámetro de Carbonato de Sodio Residual (CSR) que a continuación se indica:

$$\text{Carbonato de Sodio Residual (CSR)} = (\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

En los últimos tiempos, se ha observado que las aguas de riego que se utilizan en las zonas áridas y semiáridas ponen elevadas concentraciones de sales, y que a su vez, contienen elevadas concentraciones de bicarbonatos. Ejemplos de estos tipos de aguas se tienen en Pakistán (Punjab), India (zona noroeste), Estados Unidos (Fresno y Valle Imperial), México (zonas del Bajío y aguas subterráneas de origen basáltico). Las aguas urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital contienen cantidades variables de iones bicarbonato.

En la Figura 17 se presenta como se encuentran distribuidas las aguas residuales urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital. La concentración de CSR en el agua de riego se clasifica como sigue: 1) Buena, para aguas con una concentración de CSR < 1.25 mmol L^{-1} se encontraron 101 muestras; 2) Condicionada, para aguas con una concentración de CSR 1.25- 2.5 mmol L^{-1} se encontraron 20 muestras; 2) No recomendable, para aguas con una concentración de CSR > 2.5 mmol L^{-1} se encontraron 69 muestras.

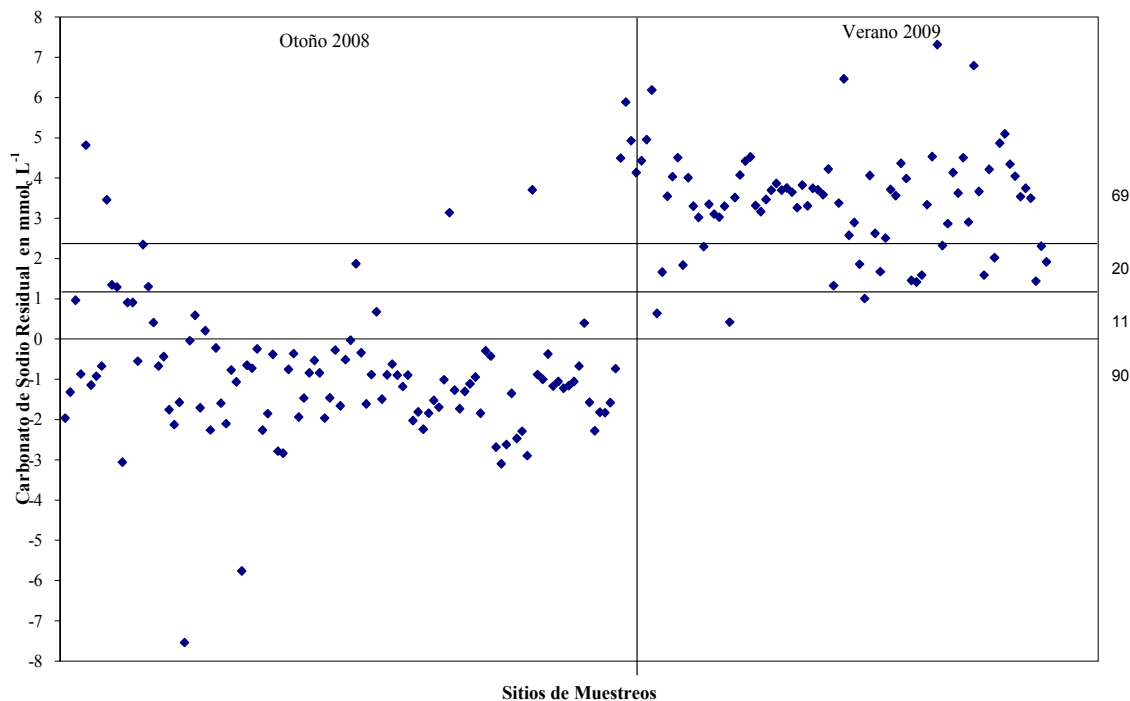


Figura 17. Distribución del agua residual, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán, de acuerdo con el contenido de carbonato de sodio residual Na_2CO_3 (mmol $_c$ L^{-1}) para las estaciones de muestreo Otoño 2008 y Verano 2009.

Después de los trabajos de Eaton (1950) y Wilcox *et al.* (1954) se han utilizado para riego aguas de pozos profundos y aguas residuales con valores de carbonato de sodio residual más altos que los que propuso en su tiempo Eaton. Esto se debe a que en la actualidad, prácticamente se han utilizado en el riego de cultivos todo tipo de aguas de la más variada composición química.

Las aguas que contienen CSR > 2.50 mmol $_c$ L^{-1} han sido consideradas insatisfactorias para riego. Sin embargo, Gupta (1983), reportó que las aguas de riego que contienen CSR > 10.0

mmol_c L⁻¹, y una conductividad eléctrica de 2.0 μS cm⁻¹ y un RAS < 10, pueden prácticamente utilizarse en el riego sin afectar el rendimiento del trigo en un suelo franco-arenoso calcáreo.

5.11. La relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital.

Los orígenes de los iones de Na⁺ en las aguas residuales de las zonas urbano-industriales, se debe a que en los diferentes procesos industriales se utilizan grandes cantidades de Na₂CO₃, H₂SO₄ y Na₂SO₄. Por este motivo, las aguas residuales urbano-industriales de la Ciudad de México tendrán grandes cantidades de Na⁺. Debido a que las soluciones acuosas de los suelos que circulan y migran en los perfiles agronómicos de los suelos del Valle del Mezquital, se están enriqueciendo con iones de Na⁺ y Mg²⁺. Durante un proceso de interacción química con el agua condicionan procesos de hidrólisis de alta intensidad. Los procesos de hidrolización de iones de Na⁺ y Mg²⁺ son los responsables de una alta alcalinidad en las soluciones de los suelos y como las aguas residuales del Valle del Mezquital tienen grandes cantidades de bicarbonatos, los cuales son fácilmente hidrolizables. Como consecuencia de esto aumenta el pH.

Para un mismo valor de la RAS de las aguas superficiales y subterráneas para riego agrícola, que están interactuando con los diferentes sistemas coloidales de los distintos suelo, se tendrán diferentes cantidades de sodio intercambiable expresados a través del PSI. Esto se debe fundamentalmente a los valores del coeficiente de selectividad iónica, es decir, a las diferentes características topográficas de los sistemas coloidales de los suelos.

Es importante tener la posibilidad de predecir la distribución de los iones en la solución del suelo y los iones adsorbidos en los sistemas coloidales de los suelos cuando se tienen condiciones de equilibrio. Cuando esto se tiene, entonces, se pueden manejar los problemas salinidad y sodicidad.

Un parámetro de evaluación muy importante, sobre la posibilidad de una determinada agua de riego, es determinar el nivel en el que se deberá encontrar el Porcentaje de Sodio

Intercambiable (PSI) en el complejo de intercambio de cationes de los suelos, debido a los procesos de adsorción de los iones de sodio en las aguas de riego.

El Porcentaje de Sodio Intercambiable es la propiedad con la cual disminuye la permeabilidad de los suelos, además de las manifestaciones tóxicas del ión sodio en los cultivos. Los efectos del ión sodio sobre los sistemas coloidales de los suelos están muy correlacionados. Por consiguiente, cualquier posible elevación del peligro potencial de la sodicidad de una agua de riego, deberá relacionarse con el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) de los suelos que tendrá que encontrarse en el suelo derivado del uso de un agua de riego.

El peligro potencial de la sodicidad de un agua de riego es a veces evaluado con los valores de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y con los valores de la salinidad.

En los trabajos de diagnóstico y predicción de los peligros de la sodicidad, el PSI de un suelo es estimado de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), cuando un agua de riego determinado se encuentra en equilibrio con el suelo en condiciones de saturación. La ecuación para calcular el PSI a partir de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) se obtiene de la siguiente manera:

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

Después de hacer los arreglos correspondientes la ecuación final queda como sigue:

$$\frac{PSI}{100 - PSI} = Kg RAS$$

Y despejando PSI nos queda como resultado:

$$PSI = \frac{Kg RAS}{1.0 + Kg RAS} 100$$

Esta es la ecuación para calcular el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) de un suelo conociendo la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) de un agua determinado de riego en equilibrio y en condiciones de saturación.

En el Cuadro 16 y Figura 18, 19 y 20 se presentan la relación funcional PSI-RAS para los diferentes valores del RAS de las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital con sus diferentes conceptualizaciones (RAS_{or} , RAS_{aj} y RAS_{corr}). Esta relación funcional PSI-RAS se calculó para los siguientes valores del coeficiente de selectividad iónica $k_g = [mmol L^{-1}]^{-1/2}$; $K_1 = 0.0072444$; $K_2 = 0.01$; $K_3 = 0.0115220$; $K_4 = 0.0118610$; $K_5 = 0.0140113$; $K_6 = 0.0147500$; $K_7 =$ Contenido de Boro 0.015840 y $K_8 = 0.0168999$.

5.12. Contenido de Boro en las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital

El boro es un elemento que se encuentra en todas las aguas naturales tanto superficiales como subterráneas. La concentración de boro en las aguas naturales varía en trazas hasta partes por millón. (S.R.H., 1971). El boro es esencial para el crecimiento de las plantas, pero es demasiado tóxico cuando excede ligeramente el nivel óptimo de concentración.

En las zonas áridas y semiáridas ocurre con mucha frecuencia la toxicidad por Boro en los cultivos. Esta toxicidad del boro se debe a que en los suelos de las zonas áridas con mayor frecuencia se tienen cantidades considerables de boro, o a que en las aguas de riego, sobre todo con las aguas residuales, se introduce el boro a los suelos.

Como es conocido, el boro es uno de los ocho micronutrientes esenciales para el desarrollo normal de los cultivos.

La concentración umbral de boro en el agua de riego se encuentra en el siguiente intervalo $0.3-2.0 mg L^{-1}$. Para cultivos sensibles es de $0.3 mg L^{-1}$ y para cultivos tolerantes la concentración de boro en las aguas de riego es de $2.0 mg L^{-1}$. Por concentración umbral del boro se debe comprender como la concentración máxima permisible para un cultivo

especifico, en donde con una concentración determinada de boro, no se reducen los rendimientos o a su vez, los efectos o daños notables.

Cuadro 16. Valores del PSI determinados de acuerdo con el RAS_{or} , de las muestras de agua del Valle del Mezquital.

Sitio	PSI K=0.0072444	PSI K=0.01	PSI K=0.011522	PSI K=0.011861	PSI K=0.0140113	PSI K=0.01475	PSI K=0.01584	PSI K=0.0168999
1 Oto 08	2.13	2.92	3.35	3.45	4.05	4.25	4.55	4.84
2	2.82	3.84	4.40	4.53	5.31	5.57	5.96	6.33
3	1.36	1.87	2.15	2.21	2.61	2.74	2.94	3.13
4	0.24	0.33	0.38	0.40	0.47	0.49	0.53	0.56
5	4.52	6.13	7.00	7.19	8.38	8.79	9.38	9.94
6	0.22	0.30	0.34	0.35	0.42	0.44	0.47	0.50
7	1.28	1.75	2.02	2.07	2.44	2.57	2.75	2.93
8	1.90	2.61	2.99	3.08	3.61	3.80	4.07	4.33
9	3.15	4.30	4.92	5.06	5.92	6.21	6.64	7.06
10	2.70	3.69	4.23	4.34	5.09	5.35	5.72	6.08
11	3.16	4.31	4.93	5.07	5.93	6.22	6.65	7.07
12	1.66	2.28	2.62	2.69	3.16	3.33	3.56	3.79
13	2.33	3.18	3.65	3.75	4.40	4.63	4.95	5.26
14	2.91	3.98	4.56	4.68	5.49	5.76	6.16	6.54
15	0.17	0.23	0.26	0.27	0.32	0.34	0.36	0.39
16	3.35	4.57	5.22	5.37	6.28	6.59	7.04	7.48
17	3.24	4.41	5.05	5.19	6.08	6.38	6.82	7.24
18	2.68	3.66	4.20	4.31	5.06	5.31	5.68	6.04
19	1.14	1.56	1.79	1.85	2.17	2.28	2.45	2.61
20	1.18	1.62	1.87	1.92	2.26	2.38	2.55	2.71
21	0.33	0.45	0.52	0.53	0.63	0.66	0.71	0.76
22	0.06	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15
23	0.30	0.41	0.48	0.49	0.58	0.61	0.65	0.70
24	0.97	1.33	1.53	1.57	1.86	1.95	2.09	2.23
25	2.27	3.11	3.56	3.66	4.30	4.51	4.83	5.14
26	3.62	4.93	5.64	5.80	6.78	7.11	7.59	8.06
27	0.29	0.40	0.46	0.47	0.56	0.59	0.63	0.67
28	2.25	3.09	3.54	3.64	4.27	4.49	4.80	5.11
29	1.38	1.89	2.18	2.24	2.63	2.77	2.97	3.16
30	0.54	0.75	0.86	0.89	1.05	1.10	1.18	1.26
31	1.44	1.97	2.27	2.33	2.74	2.88	3.09	3.29
32	0.25	0.34	0.39	0.41	0.48	0.50	0.54	0.58
33	1.36	1.86	2.14	2.20	2.59	2.72	2.92	3.11
34	1.40	1.93	2.21	2.28	2.68	2.81	3.02	3.21
35	0.90	1.23	1.42	1.46	1.72	1.81	1.94	2.07
36	2.25	3.07	3.52	3.62	4.25	4.47	4.78	5.09

Continuación Cuadro 16

Sitio	PSI K=0.0072444	PSI K=0.01	PSI K=0.011522	PSI K=0.011861	PSI K=0.0140113	PSI K=0.01475	PSI K=0.01584	PSI K=0.0168999
37	1.93	2.64	3.03	3.12	3.66	3.85	4.12	4.39
38	1.93	2.65	3.04	3.13	3.67	3.86	4.13	4.40
39	1.57	2.15	2.47	2.55	2.99	3.15	3.37	3.59
40	0.20	0.27	0.31	0.32	0.38	0.40	0.43	0.46
41	1.82	2.50	2.87	2.95	3.47	3.64	3.90	4.15
42	1.41	1.94	2.23	2.29	2.69	2.83	3.04	3.23
43	1.01	1.39	1.60	1.64	1.93	2.03	2.18	2.32
44	0.23	0.32	0.37	0.38	0.45	0.47	0.51	0.54
45	1.82	2.50	2.87	2.95	3.46	3.64	3.90	4.15
46	0.94	1.29	1.49	1.53	1.80	1.90	2.03	2.17
47	1.01	1.39	1.59	1.64	1.93	2.03	2.18	2.32
48	1.01	1.39	1.60	1.64	1.93	2.03	2.18	2.32
49	0.16	0.22	0.26	0.27	0.31	0.33	0.36	0.38
50	0.73	1.00	1.15	1.18	1.39	1.47	1.57	1.68
51	0.86	1.19	1.37	1.40	1.66	1.74	1.87	1.99
52	0.97	1.34	1.54	1.58	1.86	1.96	2.10	2.24
53	2.06	2.82	3.23	3.33	3.91	4.10	4.39	4.67
54	2.29	3.13	3.59	3.69	4.33	4.55	4.87	5.18
55	2.05	2.81	3.23	3.32	3.90	4.09	4.38	4.66
56	2.17	2.98	3.41	3.51	4.12	4.33	4.64	4.93
57	4.23	5.75	6.57	6.75	7.87	8.25	8.81	9.34
58	0.18	0.24	0.28	0.29	0.34	0.36	0.38	0.41
59	2.47	3.38	3.88	3.99	4.68	4.91	5.26	5.59
60	2.51	3.43	3.94	4.05	4.75	4.98	5.33	5.67
61	2.84	3.88	4.45	4.57	5.36	5.62	6.02	6.39
62	0.91	1.26	1.45	1.49	1.75	1.84	1.98	2.11
63	0.84	1.16	1.33	1.37	1.62	1.70	1.82	1.94
64	3.04	4.15	4.76	4.89	5.73	6.01	6.43	6.83
65	2.82	3.84	4.40	4.53	5.31	5.57	5.96	6.33
66	0.96	1.31	1.51	1.55	1.83	1.93	2.07	2.20
67	2.32	3.17	3.64	3.74	4.39	4.61	4.93	5.25
68	1.18	1.62	1.86	1.91	2.25	2.37	2.54	2.70
69	0.93	1.28	1.48	1.52	1.79	1.88	2.02	2.15
70	0.89	1.22	1.41	1.45	1.71	1.79	1.92	2.05
71	0.95	1.30	1.50	1.54	1.82	1.91	2.05	2.18
72	0.82	1.12	1.29	1.33	1.57	1.65	1.77	1.88
73	0.93	1.28	1.48	1.52	1.79	1.88	2.02	2.15
74	0.74	1.01	1.17	1.20	1.41	1.49	1.60	1.70
75	3.54	4.82	5.51	5.67	6.63	6.95	7.43	7.88
76	1.10	1.51	1.73	1.78	2.10	2.21	2.37	2.52
77	0.57	0.78	0.90	0.92	1.09	1.15	1.23	1.31
78	2.10	2.88	3.30	3.40	3.99	4.19	4.48	4.77
79	1.20	1.64	1.89	1.94	2.29	2.41	2.58	2.75

Continuación Cuadro 16

Sitio	PSI K=0.0072444	PSI K=0.01	PSI K=0.011522	PSI K=0.011861	PSI K=0.0140113	PSI K=0.01475	PSI K=0.01584	PSI K=0.0168999
80	1.39	1.90	2.19	2.25	2.65	2.78	2.98	3.17
81	0.72	0.99	1.14	1.17	1.38	1.45	1.56	1.66
82	1.36	1.87	2.15	2.21	2.60	2.73	2.93	3.12
83	1.42	1.94	2.23	2.30	2.70	2.84	3.04	3.24
84	0.96	1.32	1.52	1.56	1.84	1.93	2.07	2.21
85	1.20	1.65	1.90	1.95	2.30	2.42	2.59	2.76
86	1.03	1.41	1.62	1.67	1.97	2.07	2.22	2.37
87	1.39	1.91	2.20	2.26	2.66	2.80	3.00	3.19
88	0.86	1.19	1.37	1.41	1.66	1.74	1.87	1.99
89	1.29	1.78	2.04	2.10	2.47	2.60	2.78	2.96
90	0.81	1.12	1.29	1.33	1.56	1.65	1.76	1.88
91	4.09	5.55	6.35	6.52	7.61	7.98	8.52	9.04
92	0.27	0.38	0.43	0.45	0.53	0.55	0.59	0.63
93	0.76	1.05	1.20	1.24	1.46	1.54	1.65	1.76
94	0.49	0.68	0.78	0.80	0.94	0.99	1.07	1.14
95	0.85	1.17	1.35	1.39	1.64	1.72	1.85	1.97
96	1.11	1.53	1.76	1.81	2.13	2.24	2.40	2.55
97	1.21	1.66	1.90	1.96	2.30	2.42	2.60	2.77
98	1.32	1.81	2.08	2.14	2.52	2.65	2.84	3.02
99	1.86	2.55	2.92	3.01	3.53	3.71	3.98	4.23
100	0.46	0.64	0.74	0.76	0.89	0.94	1.01	1.08
101	2.78	3.80	4.36	4.48	5.25	5.51	5.89	6.26
102	0.48	0.67	0.77	0.79	0.93	0.98	1.05	1.12
103	1.37	1.88	2.16	2.22	2.61	2.74	2.94	3.13
104	0.55	0.76	0.87	0.90	1.06	1.12	1.20	1.28
105	1.33	1.82	2.10	2.16	2.54	2.67	2.86	3.04
106	1.82	2.50	2.87	2.95	3.47	3.64	3.90	4.15
107	1.78	2.45	2.81	2.89	3.39	3.57	3.82	4.06
108 Ver 09	4.64	6.29	7.18	7.38	8.60	9.01	9.62	10.19
109	4.75	6.44	7.34	7.54	8.79	9.21	9.82	10.41
110	4.71	6.39	7.29	7.49	8.72	9.14	9.75	10.34
111	4.77	6.47	7.38	7.58	8.84	9.26	9.87	10.47
112	4.42	6.00	6.85	7.04	8.21	8.60	9.18	9.73
113	4.98	6.74	7.69	7.90	9.20	9.63	10.27	10.89
114	5.55	7.50	8.54	8.77	10.20	10.68	11.38	12.05
115	1.99	2.73	3.14	3.23	3.79	3.98	4.26	4.53
116	2.41	3.30	3.78	3.89	4.56	4.79	5.12	5.45
117	3.80	5.17	5.91	6.07	7.10	7.44	7.95	8.44
118	4.08	5.54	6.33	6.51	7.60	7.96	8.50	9.02
119	4.43	6.01	6.86	7.05	8.22	8.62	9.19	9.75
120	2.68	3.66	4.19	4.31	5.05	5.30	5.67	6.03
121	4.07	5.54	6.33	6.50	7.59	7.96	8.50	9.02
122	3.59	4.89	5.60	5.75	6.72	7.05	7.54	8.00

Continuación Cuadro 16

Sitio	PSI K=0.0072444	PSI K=0.01	PSI K=0.011522	PSI K=0.011861	PSI K=0.0140113	PSI K=0.01475	PSI K=0.01584	PSI K=0.0168999
123	3.54	4.83	5.52	5.67	6.63	6.96	7.44	7.89
124	3.67	4.99	5.71	5.87	6.86	7.19	7.68	8.15
125	3.66	4.99	5.70	5.86	6.85	7.19	7.68	8.15
126	3.97	5.40	6.17	6.34	7.40	7.76	8.29	8.80
127	3.69	5.02	5.75	5.90	6.90	7.24	7.73	8.21
128	4.01	5.45	6.23	6.40	7.48	7.84	8.37	8.88
129	1.12	1.54	1.77	1.82	2.15	2.26	2.42	2.58
130	4.00	5.44	6.21	6.38	7.46	7.82	8.35	8.86
131	4.25	5.78	6.60	6.78	7.91	8.30	8.86	9.39
132	4.41	5.98	6.83	7.02	8.19	8.58	9.16	9.71
133	4.49	6.10	6.96	7.15	8.34	8.74	9.33	9.89
134	3.86	5.26	6.01	6.17	7.21	7.56	8.08	8.57
135	3.37	4.59	5.25	5.40	6.32	6.63	7.08	7.52
136	3.77	5.13	5.86	6.03	7.04	7.38	7.89	8.37
137	3.87	5.27	6.02	6.19	7.23	7.58	8.10	8.60
138	3.55	4.83	5.53	5.68	6.64	6.97	7.44	7.90
139	3.90	5.31	6.07	6.23	7.28	7.64	8.15	8.65
140	4.19	5.70	6.51	6.68	7.80	8.18	8.73	9.26
141	4.12	5.60	6.40	6.58	7.68	8.05	8.59	9.12
142	3.83	5.21	5.95	6.12	7.15	7.49	8.00	8.49
143	3.58	4.87	5.57	5.73	6.69	7.02	7.50	7.96
144	3.58	4.87	5.57	5.72	6.69	7.02	7.50	7.96
145	3.38	4.60	5.27	5.41	6.33	6.64	7.10	7.54
146	3.30	4.50	5.14	5.29	6.19	6.49	6.94	7.37
147	3.64	4.95	5.66	5.82	6.80	7.13	7.62	8.09
148	3.68	5.00	5.72	5.88	6.87	7.21	7.70	8.17
149	1.60	2.19	2.51	2.59	3.04	3.20	3.43	3.65
150	3.20	4.37	5.00	5.14	6.02	6.31	6.75	7.17
151	3.91	5.32	6.09	6.25	7.30	7.66	8.18	8.68
152	2.94	4.01	4.59	4.72	5.53	5.81	6.21	6.60
153	3.02	4.12	4.72	4.85	5.68	5.96	6.37	6.77
154	1.97	2.70	3.10	3.19	3.74	3.93	4.21	4.48
155	1.28	1.76	2.03	2.08	2.45	2.58	2.76	2.94
156	3.54	4.82	5.51	5.66	6.62	6.95	7.42	7.88
157	2.68	3.66	4.19	4.31	5.05	5.30	5.67	6.03
158	2.70	3.69	4.23	4.35	5.10	5.36	5.73	6.09
159	3.20	4.37	5.00	5.14	6.01	6.31	6.74	7.16
160	3.98	5.41	6.18	6.35	7.41	7.77	8.30	8.81
161	3.55	4.84	5.53	5.69	6.65	6.97	7.45	7.91
162	4.09	5.56	6.35	6.53	7.62	7.99	8.53	9.05
163	4.19	5.69	6.50	6.68	7.79	8.17	8.72	9.25
164	2.00	2.74	3.15	3.24	3.80	3.99	4.28	4.55
165	1.85	2.54	2.91	2.99	3.52	3.70	3.96	4.21

Continuación..... Cuadro 16

Sitio	PSI K=0.0072444	PSI K=0.01	PSI K=0.011522	PSI K=0.011861	PSI K=0.0140113	PSI K=0.01475	PSI K=0.01584	PSI K=0.0168999
166	2.04	2.80	3.21	3.30	3.87	4.07	4.36	4.64
167	3.40	4.63	5.30	5.45	6.37	6.69	7.14	7.59
168	3.72	5.06	5.79	5.95	6.95	7.29	7.79	8.26
169	6.53	8.80	10.01	10.27	11.91	12.46	13.26	14.02
170	3.25	4.43	5.07	5.21	6.10	6.40	6.84	7.27
171	3.37	4.60	5.26	5.41	6.32	6.63	7.09	7.53
172	3.70	5.03	5.75	5.91	6.91	7.25	7.74	8.22
173	3.47	4.72	5.40	5.55	6.49	6.81	7.28	7.73
174	3.64	4.95	5.66	5.82	6.80	7.14	7.63	8.09
175	2.60	3.55	4.07	4.19	4.91	5.15	5.51	5.86
176	5.61	7.59	8.64	8.87	10.32	10.80	11.51	12.18
177	3.36	4.58	5.24	5.39	6.31	6.62	7.07	7.51
178	2.04	2.79	3.20	3.29	3.86	4.06	4.35	4.62
179	3.75	5.10	5.83	5.99	7.00	7.35	7.85	8.33
180	3.25	4.43	5.06	5.21	6.09	6.39	6.83	7.26
181	3.75	5.10	5.84	6.00	7.01	7.35	7.85	8.33
182	5.72	7.73	8.80	9.04	10.50	11.00	11.71	12.40
183	3.76	5.12	5.85	6.01	7.03	7.37	7.87	8.35
184	3.33	4.54	5.19	5.34	6.24	6.55	7.00	7.43
185	3.30	4.50	5.15	5.30	6.20	6.50	6.95	7.38
186	3.40	4.63	5.30	5.45	6.37	6.68	7.14	7.58
187	3.71	5.05	5.77	5.93	6.93	7.27	7.77	8.24
188	2.09	2.87	3.29	3.38	3.97	4.17	4.47	4.75
189	3.73	5.07	5.80	5.96	6.96	7.30	7.80	8.28
190	2.75	3.76	4.30	4.42	5.18	5.44	5.82	6.19

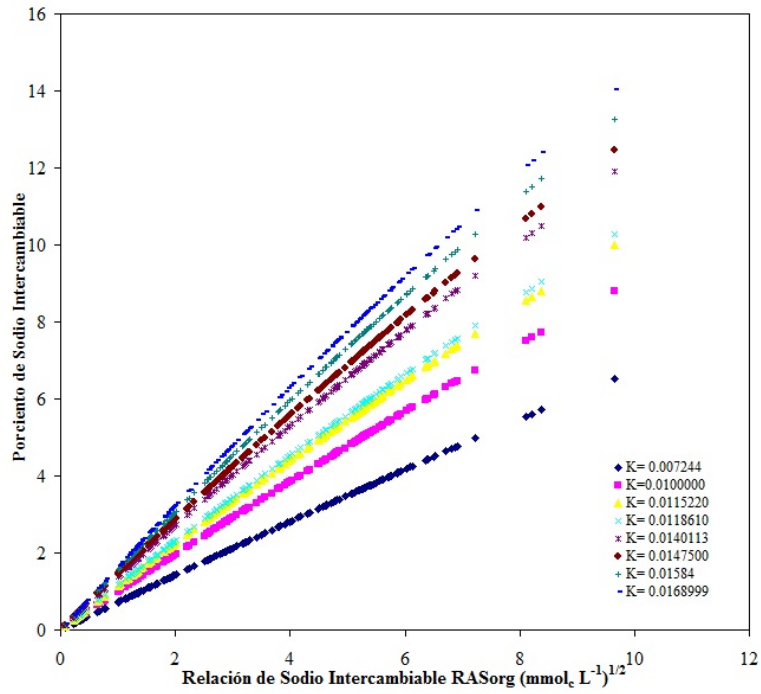


Figura 18. Relación entre el PSI del suelo calculado de acuerdo al RAS_{or} . Se utilizaron diferentes coeficientes de selectividad iónica $k = [mmol_c L^{-1}]^{-1/2}$.

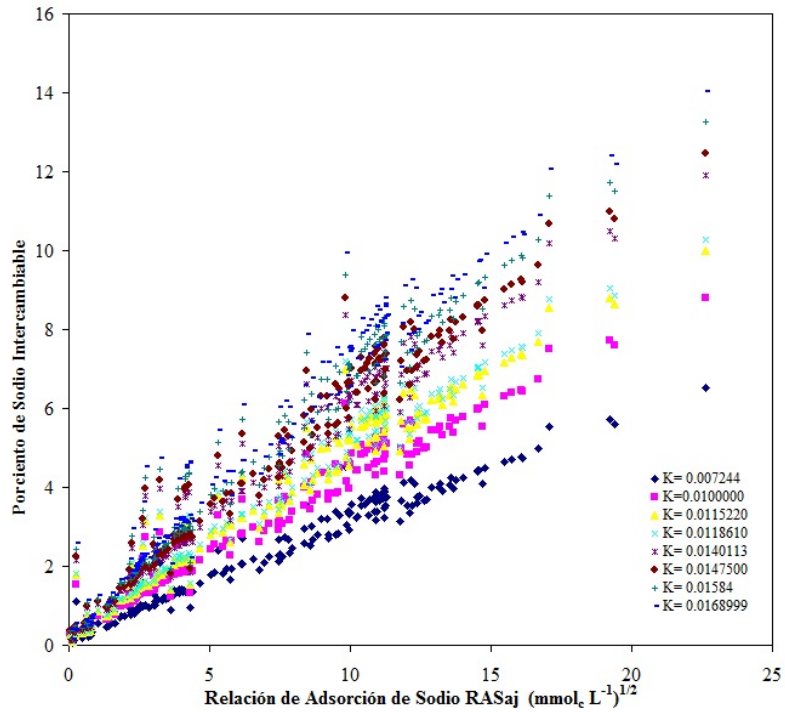


Figura 19. Relación entre el PSI del suelo calculado de acuerdo al RAS_{aj} . Se utilizaron diferentes coeficientes de selectividad iónica $k = [mmol_c L^{-1}]^{-1/2}$.

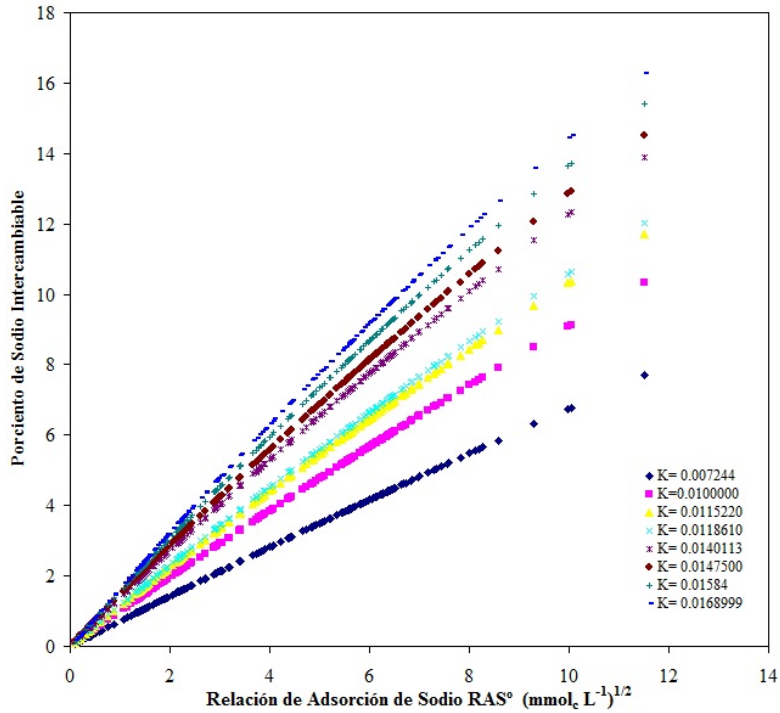


Figura 20. Relación entre el PSI del suelo calculado de acuerdo al RAS°. Se utilizaron diferentes coeficientes de selectividad iónica $k = [\text{mmol}_c \text{L}^{-1}]^{-1/2}$.

Estas concentraciones límites de boro se han obtenido en cultivos que se han desarrollado en arena (USDA, 1954). Sin embargo, cuando el boro de las aguas de riego ingresa a los suelos, las concentraciones de boro en las soluciones tienen una variación debido a procesos de adsorción y absorción del boro en los sistemas arcillosos de los suelos.

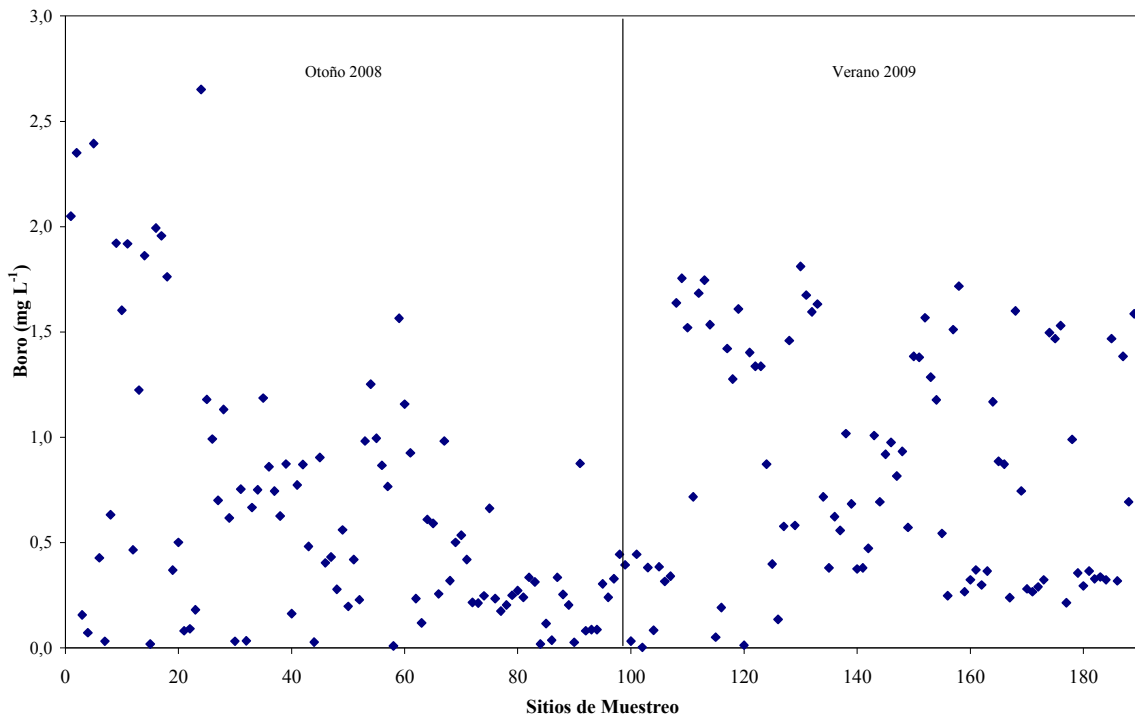


Figura 21. Distribución del agua residual del Valle del Mezquital de acuerdo con el contenido de Boro mg L^{-1} .

Últimamente se han establecido nuevos límites de tolerancia al Boro para una gran variedad de cultivos, de tal manera que se han establecido diferentes intervalos de toxicidad para cultivos muy sensibles ($< 0.5 \text{ mg L}^{-1}$), sensible ($0.5 - 0.75-1.0 \text{ mg L}^{-1}$), moderadamente sensibles ($2.0 - 4.0 \text{ mg L}^{-1}$), tolerantes ($4.0 - 6.0 \text{ mg L}^{-1}$) y muy tolerantes ($6.0 - 15.0 \text{ mg L}^{-1}$) Ayers y Westcot, (1987).

Por último de debe señalar, cuales son las tolerancias de los cultivos que ocupan una mayor superficie en el Valle del Mezquital: maíz $2.0-4.0 \text{ mg L}^{-1}$, alfalfa $4.0-6.0 \text{ mg L}^{-1}$, avena $2.0-4.0 \text{ mg L}^{-1}$, cebada $3.0-4.0 \text{ mg L}^{-1}$, trigo $0.75-1.0 \text{ mg L}^{-1}$, y frijol $0.75-1.0 \text{ mg L}^{-1}$.

De acuerdo a los resultados de boro el 56% de las muestras de agua pueden ser empleadas para el riego en cultivos sensibles. 7% de las muestras únicamente afectaran a los cultivos modernamente sensibles, el resto 32% pueden ser empleadas para riego para especies tolerantes, Figura 21.

No debemos olvidar que el boro es un elemento del ciclo biogeoquímico sedimentario con baja movilidad y que tiende a acumularse en el suelo, así con cada riego, el contenido de boro se incrementa en el suelo y al concentrarse incrementa el riesgo de toxicidad al realizarse riegos sucesivos, sobre todo si se altera el pH a una condición ácida o el contenido de materia orgánica es elevada.

5.13. Contenido del Fósforo en las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital.

Los fosfatos son fertilizantes que se aplican a los suelos en forma de ortofosfatos (PO_4^{-3}). Otra forma de fertilizantes de fósforo son los metafosfatos (PO_3^-) y los pirofosfatos ($\text{P}_2\text{O}_7^{-4}$), y una vez que sean aplicado a los suelos los PO_3^- y los $\text{P}_2\text{O}_7^{-4}$, estas formas de fosfatos se convierten en PO_4^{-3} . La forma soluble predominante del fósforo es H_2PO^- y esencialmente todo el fósforo absorbido por las raíces de las plantas es en esta forma.

El contenido de fósforo en las aguas residuales de la Ciudad de México se debe a la utilización de detergentes en las zonas urbanas de México y a contenidos de desechos orgánicos, además de aquellos procesos industriales que utilizan ácido fosfórico. El enriquecimiento de las aguas con fósforo tiene efectos en el ambiente. El crecimiento desmesurado de plantas acuáticas llega a crear desequilibrios ecológicos, los contenidos de fosfatos de las aguas superficiales que son superiores a 10 mg L^{-1} provocan eutrofización. La eutrofización implica un enriquecimiento interno de los sistemas biológicos por nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, y un crecimiento desmesurado de la biomasa.

Los valores mínimos de contenidos de ortofosfatos PO_4^{-3} son $< 1.0 \text{ ppm}$ y los valores máximos de contenidos de ortofosfatos son de 15 ppm .

Los criterios para evaluar el estado trófico en los lagos y embalses según la OCDE son los siguientes: estado oligotrófico $< 10 \text{ mg P m}^{-3}$; oligomesotrófico $10.0\text{-}20 \text{ mg P m}^{-3}$; mesotrófico $20.0\text{-}50.0 \text{ mg P m}^{-3}$; eutrófico $50.0\text{-}100.0 \text{ mg P m}^{-3}$ e hipereutrófico $>100.0 \text{ mg P m}^{-3}$.

En la Figura 22 se presenta la distribución del contenido de fosfatos PO_4^{-3} en las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital. El número de muestras de agua que contienen 0.5-1.0 mg L^{-1} de PO_4^{-3} es de 33.

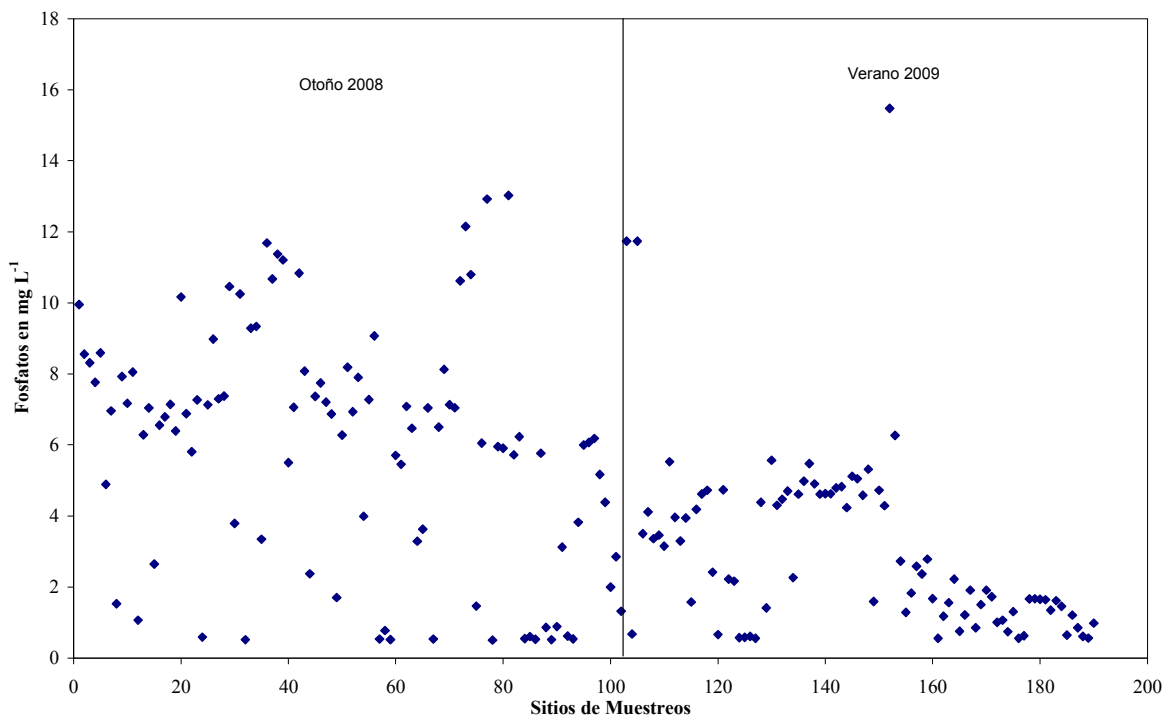


Figura 22. Distribución del agua residual del Valle del Mezquital de acuerdo con el contenido de fosfatos (PO_4^{-3}).

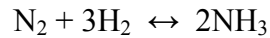
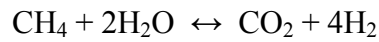
En resumen se puede decir que las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital aportan cantidades importantes de fosfatos.

5.14. Nitratos en las aguas residuales del Valle del Mezquital.

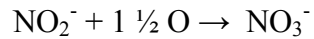
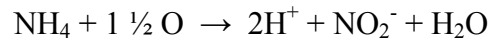
Con la finalidad de conocer las cantidades de los nitratos en las aguas que circulan en la red hidrográfica del Valle del Mezquital y por considerar que los nitratos pueden ser utilizados por las plantas en una fracción considerable y que a su vez si alguna cantidad de estos nitratos tienen una migración hacia yacimientos saturados de aguas, y que por estas circunstancias, una determinada concentración de nitratos disueltos en aguas subterráneas puede ocasionar un problema de salud, así que por este motivo, se determinan los contenidos de nitratos en las aguas residuales en el periodo invierno 2008.

En seguida se presenta el ciclo del nitrógeno en condiciones aeróbicas y anaeróbicas.

Obtención del amonio

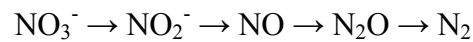


Oxidación del amonio



La reducción de nitratos tiene solamente lugar bajo condiciones de poco oxígeno. Las aguas residuales tienen diferentes cantidades de oxígeno disuelto.

La reducción de los nitratos se presenta con la siguiente serie:



Eutroficación de las aguas de acuerdo con Vollenweiden (1971)

Categoría	Concentración en mg m^{-3} (ppb)
	N- inorgánico
1. Ultra – oligotrófico	< 20
2. Oligo - mesotrófico	200.0 - 400.0
3. Meso - eutrófico	300.0 – 600.0
4. Eu - politrófico	500.0 – 1500.0
5. Politrófico	> 1500.0

En la Figura 23 se presenta la concentración de nitratos NO_3^- en las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital invierno 2008 y verano 2009, se tienen 108 muestras de agua entre $0.0 - 10.0 \text{ mg L}^{-1}$ de nitratos.

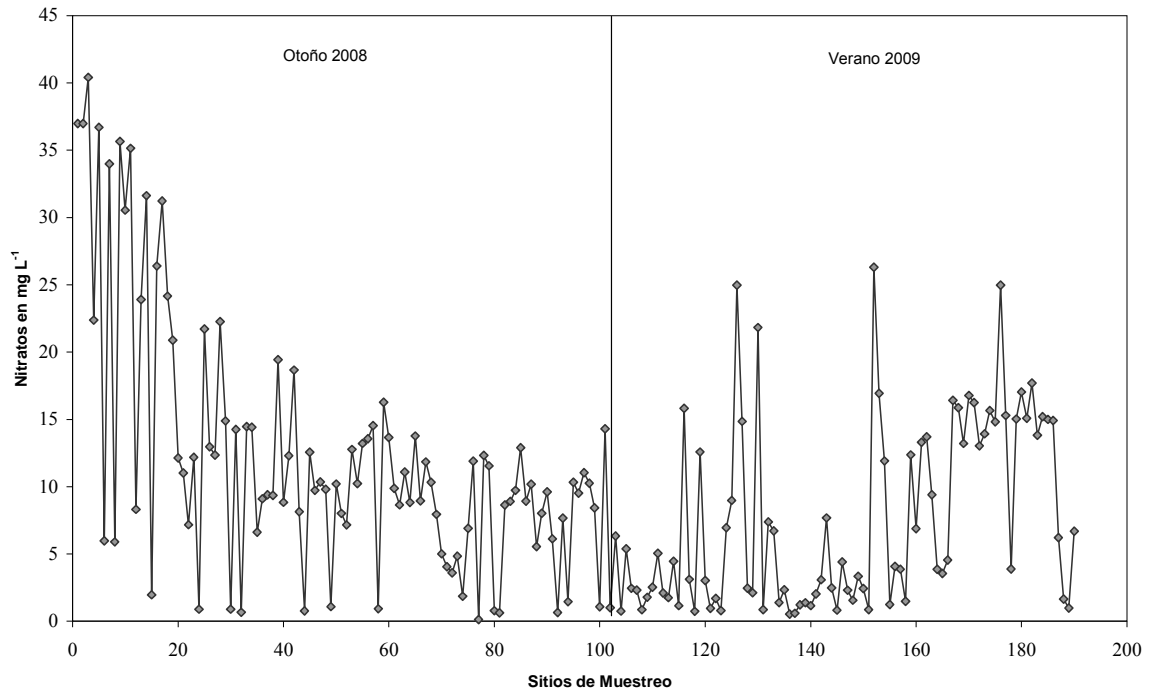


Figura 23. Distribución del agua residual del Valle del Mezquital de acuerdo con el contenido de nitratos (NO₃⁻).

6. CONCLUSIONES

El agua residual de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpán-Zimapán, se clasifican como bicarbonatadas y sódicas de concentración media a alta.

El valor del coeficiente de la relación funcional $\text{mg L}^{-1} = faCE$ fue de $a = 0.6777$. Este coeficiente corresponde a aguas de riego del tipo bicarbonatada.

El valor del coeficiente (a) de la relación funcional $PO = faCE$ fue de $a = 0.0004$, cuando la presión osmótica se expresa en atmósfera.

La exactitud de los análisis químicos se establece con las relaciones $y = CE_{\text{teórica}}$ y $x = CE_{\text{experimental}}$. Las relaciones conjuntas de la $CE_{\text{teórica}} (\mu\text{S cm}^{-1}) - CE_{\text{experimental}} (\mu\text{S cm}^{-1}) = 1.0376$. El intervalo de aceptación establecido por este método de comprobación de los datos analíticos es de $0.9 < CE_{\text{teórica}}/CE_{\text{experimental}} < 1.1$, lo cual nos indica que los datos analíticos obtenidos en este trabajo son correctos.

La evaluación de las aguas residuales utilizando el índice Relación de adsorción de sodio (RAS) en sus diferentes formulaciones es fundamental porque permite establecer los valores límites mínimos y máximos de los efectos negativos sobre las propiedades físicas de los suelos del ion sodio en la zona de estudio.

Por su contenido de boro el 56% de las aguas residuales que riegan los suelos agrícolas son aptas para cultivos sensibles.

En base con los contenidos de ortofosfatos (PO_4^{3-}), en el agua residual estudiada que riega el Valle del Mezquital aportan a las zonas de riego cantidades importantes de fosfatos.

Por lo que atañe a los contenidos de nitratos ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) en el agua se considera que son muy altas ya que estos contenidos corresponden a aguas Eu-polytróficas $> 1.5 \text{ mg L}^{-1}$.

7. RECOMENDACIONES

Los suelos del Valle del Mezquital poseen propiedades físico-químicas muy variadas, debido a que poseen diferentes espesores litológicos, para recomendar las dosis apropiadas de mejoradores químicos que contengan como fuente iones de calcio, se tiene que tomar en cuenta la determinación de valores máximos y mínimos del porcentaje de sodio intercambiable en los suelos, para preveer problemas de infiltración y mejorar en los suelos

la relación $\frac{Na}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$.

8. BIBLIOGRAFIA

1. Abdel, G. G., A. Arslan, A. Gaihbe, and F. Kadouri. 2005. The Effects of Saline Irrigation Water Management and Salt Tolerant Tomato Varieties on Sustainable Production of Tomato in Syria (1999-2002). *Agric. Water Manage.* 78:39-53.
2. Alhammadi, M. S., and D. M. Millar. 2006. Effect of Ionic Strength and Sodium Adsorption Ratio on the Flocculation/Dispersion of Two Surface Soils from Eastern Arkansas. *Soil Sci.* 171(12):960-967.
3. Amrhein, C., and D. L. Suarez. 1991. Sodium-Calcium Exchange with Anion Exclusion and Weathering Corrections. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:698-706.
4. Antipov-Karataev, I. N. 1967. Reclamation of solonetz soils in the USSR. Israel Program for scientific Translation. Jerusalén.
5. APHA. American Public Health Association. 1989. Standard Methods for the Examination of water and wastewater 17-th. Edition Port City Press. Baltimore. Maryland.
6. Arora, Y., M. R. Chaudhary, and N. T. Singh. 1981. Dissolution Rate of Gypsum in Sodic Soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 29(3):361-365.
7. 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.
8. Baccaro K. Degorgue M. Lucca M. Picote L. Zamuner E. y Andreoli. 2006. Calidad del agua para consumo humano y riego en muestras del cinturón hortícola de mar del plata. *Revista de Investigaciones Agropecuarias. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires. Argentina. diciembre. año/vol.35. número 003.pp.* 95-110.
9. Beletse, Y. G., J. G. Annandale, J. M. Steyn, I. Hall, and M. E. Aken. 2008. Can Crops be Irrigated with Sodium Bicarbonate Rich CBM Deep Aquifer Water? Theoretical and Field Evaluation. *Ecol. Eng.* 1-11.
10. Bernstein, L. y Francois, L.E. 1973. Leaching requirement studies. Sensitivity of alfalfa to salinity of irrigation and drainage waters. *Soil Sci.Soc. Amer. Proc.* 37:931-943.
11. Bower, C. A., G. Ogata, and J. M. Tucker. 1968. Sodium Hazard of Irrigation Waters as Influenced by Leaching Fraction and by Precipitation or Solution of Calcium Carbonate. *Soil Sci.* 106(1):29-34.
12. Bower, C. A., L. V. Wilcox, G. W. Akin, and M.G. Keyes. 1965. An Index of the Tendency of CaCO₃ to Precipitation from Irrigation Waters, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29:91-92

13. Bower, C.A., and J. O. Goertzen. 1955. Negative Adsorption of Salts by Soils. *Soil Sci. Soc.Amer. Proc.* 19:147-151.
14. Can, C., A. 2005. Evaluación de la Relación de Adsorción de Sodio en las aguas del cauce del río Tulancingo, Estado de Hidalgo, México. Tesis de la maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. pp. 198.
15. Choudhary, O. P. B., S. Ghuma, A. S. Josan, and M. S. Bajwa. 2006. Effect of Alternating Irrigation with Sodic and Non-Sodic Water on Soil Properties and Sunflower Yield. *Agric. Water Manage.* 85:151-156
16. Christiansen. J., E. *et. al.*. "Irrigation Water Quality Evaluation". *Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE.* Vol. 103. No. IR2. junio de 1977.
17. Coras M., P. M. 2000. Calidad química del agua para riego. Universidad Autónoma Chapingo. Fitotecnia. Texcoco, Edo. de México.
18. Del Arenal R. 1978. Carta Hidrogeológica del área de Actopán-Ixmiquilpán. Estado de Hidalgo. UNAM. Instituto de Geología. Revista; V. 2. pp. 98-103.
19. Del Arenal R. 1985. Estudio Hidrogeoquímico de la porción Centro-Oriental del Valle del Mezquital. Hidalgo. UNAM. Instituto de Geología. Revista; V. 2. pp. 86-97.
20. Doering, E. J., and W. O Willis. 1980. Effect of Soil Solution Concentration on Cation Exchange Relationships. *Proc. Inter. Symp. On Salt-Affected Soils.* Karnal, India.
21. Doneen, L. D. 1975. Water Quality for Irrigated Agricultural. *In: A. Poljakoff, Mayber A., and J. Gale (eds.). Plant in Saline Environments.* Springer-Verlang. New York. U. S. A.
22. Eaton, F., M. 1950. Significance of Carbonates in Irrigation Waters. *Soil Sci.* 69:123-133.
23. Espino De la O., E. 1981. Reuse of municipal wastewater for industrial purposes in Mexico City. pp. 75-88, *In: F.M. D'itri, J. Aguirre y M.M. Athie (Eds.). Municipal wastewater in Agriculture.* Academic Press. New York
24. Evangelou, V. P., and M. Marsi. 2003. Influence of Ionic Strength on Sodium-Calcium Exchange of Two Temperature Climate Soils. *Plant and Soil.* 259:307-313.
25. Flores M. J. P. 2004. Aguas Residuales Utilizadas en la Producción Agropecuaria en el Valle de Juárez. Chihuahua. Congreso Binacional del Agua y de Vinculación de la Región Paso del Norte. Fundación Hewlett. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. 4 Noviembre.
26. Fox, R. H. 1968. The Effect of Calcium and pH on Boron Uptake from High Concentrations of Boron by Cotton and Alfalfa. *Soil Sci.* 106(6):435-439.

27. Frenkel, H., A., and W. A. Hadas. 1978. The Effect of Salt Precipitation and High Sodium Concentrations on Soil Hydraulic Conductivity and Water Retention. *Water Resour. Res.* 14:217-221.
28. Frenkel, H., and N. J. Alperovitch. 1984. The Effect of Mineral Weathering and Soil Solution Concentration on ESR-SAR Relationships of Arid and Semi-Arid Zone Soils from Israel. *J of Soil Sci.* 35:367-372.
29. Gorbunov, N. I. 1967. *Pochbieni y Koloidiy I ij Snachenie dlia plodo Rodya.* Izdatielstvo Nauta. Moscú (En Ruso).
30. Griffin, R. A., and J. J. Jurinak. 1973. Estimation of Activity Coefficients from the Electrical Conductivity of Natural Aquatic Systems and Soil Extracts. *Soil Sci.* 116(1):26-30.
31. Gupta, I. C. 1983. Concept of Residual Sodium Carbonate in Irrigation Waters in Relation to Sodic Hazard in Irrigated Soils. *Curr. Agric.* 7(3/4):97-113.
32. Harron, W. R. A., G. R. Webster, and R. R. Cairns. 1983. Relationship between Exchangeable Sodium and Sodium Adsorption Ratio in a Solonetzic Soil Association. *Can. J. Soil Sci.* 63:461-467.
33. Hoffman, G. J., R. S. Ayers, E. J. Doering, and B. L. Mc Neal. 1990. Salinity in Irrigated Agriculture. pp. 145-185. *In: Agricultural Irrigation. Chapter 5. Agronomy Monograph No. 30.* Madison.
34. Huez, L. M. 1985. Caracterización de algunas propiedades físico químicas de los suelos y espesores subyacentes del predio Montecillos. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México. p. 245.
35. INEGI. 1992. Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo. México.
36. Jairo, A. R. R. 1999. Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización. Ed. Alfa omega 3^a. Edición. Es. Colombiana de Ingeniería. Bogota.
37. 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.
38. Jurinak, J. J. and D. L. Suarez. 1990. The Chemistry of Salt-Affected Soils and Waters. pp. 42-63. *In: Tanji, K. K. (ed). Agricultural Salinity Assessment and Management. Chapter 3. ASCE. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Published by American Society of Civil Engineers. New York.. U. S. A.*
39. Jurinak, J. J., C. Amrhein, and R. J. Wagenet. 1984. Sodic Hazard: The Effect of SAR and Salinity and Overburden Materials. *Soil Sci.* 138(3):142-159.
40. Kaledhonkar, M. J., A. K. Keshari, and S. E. A. T. M. Van Der Zee. 2006. Relative Sensitive of ESP Profile to Spatial and Temporal Variability in Cation Exchange

Capacity and Pore Water Velocity under Simulated Field Conditions. *Agric. Water Manage.* 83(172):58-68.

41. Kelley, W. P. 1963. Use of Saline Irrigation Water. *Soil Sci.* 95:385-391.
42. Keren, R., and S. Miyamoto. 1990. Reclamation of Saline, Sodic, and Boron-Affected Soils. pp. 410-431 *In: Tanji, K. K. (ed) Agricultural Salinity Assessment and Management. Chapter 19. ASCE. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Published by American Society of Civil Engineers. New York. U. S. A.*
43. Keren. R. 1996. Boron. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods. SSSA. 3th. ed. Madison. WI. USA.
44. Keren. R. 1996. Boron. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods. SSSA. 3th. ed. Madison. WI. USA.
45. Kopittke, P. M., H. B. So, and N. Menzies. 2006. Effect of Ionic Strength and Clay Mineralogy on Na-Ca Exchangeable and the SAR-ESP Relationship. *Euro. J. Soil Sci.* 57:626-633.
46. Kovda, V. A., C. Vanden Berg C. and R. M. Hogan. 1967. International Source Book on Irrigation and Drainage of Arid Lands in Relation to Salinity and Alkalinity. FAO/UNESCO.
47. Kovda, V.A. 1947. Origins and regime of saline soils. Academy of Sciences. Moscow. USSR. (Translated to English, by Israel Pogram for Scientific translation, with the title "Landscape in relation to irrigation, drainage and salinity". Jerusalem, Israel. 1971. pp 155-176.
48. Langelier, W. F. 1936. The Analytical Control of Anti-Corrosion Water Treatment. *J. Am. Water Works Assn.* 28(10):1500-1521.
49. Levy, G. J., N. Sharshekeev and G. L. Zhuravskaya. 2002. Water Quality and Sodicity Effects on Soil Bulk Density and Conductivity in Interrupted Flow. *Soil Sci.* 167(10):692-700.
50. Maas, E. V., and G. J. Hoffman. 1977. Crop Salt Tolerante-Current Assessment. *J. Irri. Drain. Div. ASCE.* 103:115-134.
51. Manchanda, H. R., R. N. Garg, S. K. Sharma, and J. P. Singh. 1985. Effect of the Continuous Use of Sodium and Bicarbonate-Rich Irrigation Water with Gypsum and Farmacyard Manure on Soil Properties and the Yield of Wheat in a Fine Loamy Soil. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 33:876-883.
52. McNeal, B. L. y Coleman N.T. 1966. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30:308-312
53. McNeal, B. L. Layfield D. A, Norwell W A. y Rhoades J. D. 1968. Factors influencing hydraulic conductivity of soils in the presence of mitsed salt solution. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:187-190.

54. McNeal, B. L. 1968. Prediction of the Effect of Mixed-Salt Solutions on Soil Hydraulic Conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:190-193.
55. Negi, A. S., and A. B. Ghosh. 1980. Irrigation Water Quality of the Cold and Arid Region in Himachal Pradesh. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 28(3):410-411.
56. Norma Oficial Mexicana. NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites permisibles de constantes descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
57. Norma Oficial Mexicana. NOM-AA-3-1980. Aguas residuales – muestreo. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. Dirección general de Normas. México.
58. Ortega E., M. 1993. Causas del ensalitramiento y su efecto sobre los suelos. Colegio de Postgraduados. Centro de Hidrociencias. Montecillo, Estado de México.
59. Ortega M. y. M. y Ma. J. S. Cíntora G. 2005. Boro, fósforo e índices de salinidad en las aguas residuales para riego agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo. Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. México, D.F.
60. Oster, J. D. and G. Sposito. 1980. The Gapon Coefficient and the Exchangeable Sodium Percentage-Sodium Adsorption Ratio. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:258-260.
61. Pal, B. and B. R. Tripathi. 1982. Effect of EC and SAR of Water on Wheat and Barley Grown on Different Textured Soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 30(3):421-423.
62. Peterson, J. B. 1947. Calcium Linkage a mechanism in soil granulation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 2:29-34.
63. Pizarro F. 1985. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. 2^a. edición. Editorial Agrícola Española. Madrid, España.
64. Prasad, A., D. Kumar and D. V. Singh. 2001. Effect of Residual Sodium Carbonate in Irrigation Water on the Soil Sodification and Yield of Palmarosa (*Cymbopogon martinii*) and Lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*). *Agric. Water Manage.* 50:161-172.
65. Pratt, P. F., and L. F. Bair. 1969. Sodium Hazard of Bicarbonate Irrigation Waters. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33:880-883.
66. Ramalho, R. S. 1998. Tratamiento de aguas residuales. Ed. Reverte, S. A de C. V. México. pp. 88.
67. Ramírez, M. O. M. 1988. Determinación experimental de la capacidad germinativa de algunos cultivos agrícolas en soluciones salinas de diferente concentración total y composición cualitativa. Tesis de maestría. Hidrociencias. Colegio de Postgraduados.
68. Rao, T. S., A. L. Page, and N. T. Coleman. 1968. The Influence of Ionic Strength and Ion-Pair Formation between Alkaline Earth Metals and Sulfate on Na-Divalent Cation-Exchange Equilibria. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:639-643.

69. Rathore, G. S., R. S. Khamparia, G. P. Gupta, and S. B. Sinha. 1980. Correlation Study of Water Soluble Boron with E_{Ce} and Silt plus Clay in Non-Saline and Low Saline Soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 28(2):251-253.
70. Rhoades, J. D. 1972. Quality of Water for Irrigation. *Soil Sci.* 113(4):277-284.
71. Rhoades, J. D., A. Kandiah, and A. M. Mashali. 1992. The Use of Saline Waters for Crop Production. FAO. Irrigation and Drainage Paper No. 58. Rome.
72. Richards, L. A. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sodicos. Manual No. 60. Editorial LIMUSA.
73. Rodier, J. 1978. Análisis de las aguas. Editorial Omega. Barcelona, España. pp. 159-197.
74. Ryan, J., S. Miyamoto, and J. L. Stroehlein. Short Communication. 1977. Relation of Solute and Sorbed Boron to the Boron Hazard in Irrigation Water. *Plant and Soil.* 47:253-256.
75. Sharma, D. R., and P. S. Minhas. 1998. Effect of Irrigation with Sodic Waters of Varying EC, RSC and SAR/adj. SAR on Soil Properties and Yield of Cotton-Wheat. *J. Indian Soc Soil Sci.* 46(1):116-119.
76. Sharma, M. K., S. R. Poonia, R. K. Gupta, and R. S. Siyag. 1994. Sodicity of Irrigation Waters in Relation to Precipitation/Dissolution of CaCO₃. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 42(2):244-247.
77. Singh, Ch., M. R. Chaudhary, Y. Arora, and N. T. Singh. 1980. Effect of Different Concentrations of Gypsum Solution on Sodic Soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 28(2):223-226.
78. Singh, R. B., P. S. Minhas, C. P. S. Chauhan, and R. K. Gupta. 1992. Effect of High Salinity and SAR Waters on Salinization, Sodication and Yields of Pearl-millet and Wheat. *Agric. Water Manage.* 21:93-105.
79. Síntesis de Recursos Hidráulicos. S. R. H. 1971. Presencia del Boro en las aguas negras de la ciudad de México. México.
80. Sposito, G. 1977. The Gapon and Vanselow Selecting Coefficients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:1205-1206.
81. Suarez, D. L. 1981. Relation Between p_{Hc} 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.
82. Suyama, H., S. E. Benes, P. H. Robinson, S. R. Grattan, C. M. Grieve, and G. Getachew. 2007. Forage Yield and Quality under Irrigation with Saline-Sodic Drainage Water: Greenhouse Evaluation. *Agric. Water Manage.* 88:159-172.

83. Szabolcs, I. 1989. Salt Affected Soils. pp. 207-238. Cap 5. CRC. Press, Inc. Boca Raton, Florida.
84. Van Hoorn, J. W. 1971. Quality of Irrigation Water, Limits of Use and Prediction of Long Term Effects. pp. 117-135. *In: Irrigation and Drainage. Paper 7. Salinity Seminar.* Baghdad. FAO. Rome.
85. Velásquez, M. A. 2001. Las variaciones de los procesos de adsorción de sodio en función de los diferentes valores de la relación de adsorción de sodio en las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan, Valle del Mezquital, Hgo. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo Texcoco, Edo. de México.
86. Velázquez. M. A., E.H.M.Ortega, Martínez, G.A., Kohashi, S.J. y N. García, C.N. 2002. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del valle del Mezquital. Hidalgo. México. *Terra- Latinoamericana* 20: 459-464.
87. Verma, L. P. 1983. Tolerance of Wheat to Boron in Irrigation Water. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 31:167-168.
88. Wilcox, L. V., G. Y. Blair and C. A. Bower. 1954. Effect of Bicarbonate on Suitability of Water for Irrigation. *Soil Sci.* 77(4):259-266.

9. ANEXOS.

Anexo 1. Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas residuales. Otoño-08 y Verano 2009.

No.	Sitio de Muestreo	Fecha de colecta	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
			OESTE	NORTE	m.s.n.m
1	Oroño 2008				
	Puente Pemex	25/08/08	99.0451	19.6241	2260
2	Canal a la entrada de Santa Ana Nextlalpán	25/08/08	99.0682	19.7345	2258
3	Canal La Laminadora	25/08/08	99.0920	19.7878	2252
4	Laguna de Zumpango	25/08/08	99.1171	19.7923	2245
5	El Gran Canal. Teoloyucán	25/08/08	99.1066	19.7504	2244
6	Laguna de Zumpango. Emisor Norte	25/08/08	99.1652	19.7865	2240
7	Desviación Tlapanoloya	25/08/08	99.1187	19.9345	2230
8	Balneario Las Canoas	25/08/08	99.1565	19.9451	2219
9	Tequixquiac	25/08/08	99.1225	19.9021	2214
10	Puente de Tequixquiac	25/08/08	99.1437	19.9135	2212
11	Gran Canal Salida de Tequixquiac	25/08/08	99.1459	19.9039	2200
12	Balneario "La Atarjea"	25/08/08	99.1691	19.9474	2189
13	Canal Factoria Apaxco	25/08/08	99.1779	19.9697	2186
14	Río Tula Apaxco	25/08/08	99.1756	19.9649	2177
15	Pino Suárez	26/08/08	99.4236	20.2475	2174
16	Canal revestido Atotonilco	26/08/08	99.2046	20.0261	2161
17	Canal revestido Texas	26/08/08	99.2027	20.0315	2151
18	Río Tula	26/08/08	99.2131	20.0208	2118
19	Atitalaquia	26/08/08	99.2195	20.0566	2108
20	Canal Teltipan de Juárez	26/08/08	99.2045	20.1161	2108
21	Refineria Rexel	26/08/08	99.2684	20.0584	2104
22	Canal Pemex Atitalaquia	26/08/08	99.2306	20.0519	2103
23	Tula 1 Canal	26/08/08	99.3044	20.0553	2100
24	Balneario Nacimiento la Cantera	26/08/08	99.3086	20.0403	2098
25	Canal de la Quina; Atitalaquia	26/08/08	99.2272	20.0593	2096
26	Canal Grande de la Quina	26/08/08	99.2250	20.0508	2095
27	Tula 2 Hotel las Plazas	26/08/08	99.3128	20.0538	2095
28	Canal Grande "Atitalaquia"	26/08/08	99.2243	20.0586	2089
29	Tula Tepetitlán.	26/08/08	99.3369	20.0831	2089
30	Chapantongo	26/08/08	99.3961	20.3109	2087
31	Col. Julián Villagran	26/08/08	99.3419	20.0985	2085
32	Cieneguillas	26/08/08	99.0350	20.7078	2084
33	Canal Grande Tula Gral. Dhendó	26/08/08	99.3163	20.0746	2082
34	Instituto Canadiense	26/08/08	99.3352	20.0770	2069
35	Río Tula Puente Verde	26/08/08	99.3295	20.0665	2060
36	Canal Tlahuelilpán	26/08/08	99.2424	20.1279	2046
37	Canal revestido Tlahuelilpán El tinaco	26/08/08	99.2303	20.1588	2042
38	Canal Requena	26/08/08	99.2304	20.1559	2040
39	La loma Presa Endhó	26/08/08	99.3726	20.1662	2036

Continuación.....Anexo 1

No.	Sitio de Muestreo	Fecha de colecta	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
			OESTE	NORTE	m.s.n.m
40	Río Tula; Puente Metlac	26/08/08	99.3358	20.0530	2035
41	Canal Colonia Fco. I. Madero	26/08/08	99.1377	20.2211	2029
42	Centro de Tepetitlán	26/08/08	99.3816	20.1895	2027
43	Presa Endho	26/08/08	99.3585	20.1451	2023
44	Tepetitlán	26/08/08	99.3811	20.1855	2020
45	Canal Colonia Morelos	26/08/08	99.1365	20.2296	2012
46	Sifón; Presa Endho	26/08/08	99.3572	20.1581	2009
47	Canal revestido Progreso	26/08/08	99.1786	20.2455	2008
48	Canal revestido ISH	26/08/08	99.2213	20.2007	2004
49	Presa Dolores	26/08/08	99.3481	20.3440	1996
50	Canal revestido Mora	26/08/08	99.1871	20.2906	1986
51	Presa Rojo Gómez	26/08/08	99.3228	20.3585	1981
52	Puente el Grasoso I	26/08/08	99.1771	20.3774	1979
53	Canal Caxuxi Cerca de Actopan	30/08/08	99.9758	20.2906	1974
54	Canal Teofani	26/08/08	99.0026	20.2953	1969
55	Canal Boxtha	26/08/08	98.9709	20.2604	1966
56	Pozo de bombeo CNA No. 5	26/08/08	98.9881	20.3006	1963
57	Pozo No. 8 de la CNA	26/08/08	98.9944	20.3153	1963
58	Rumbo a la presa Zimapan (Cerca el Zaucillo)	28/08/08	99.4361	20.6671	1957
59	Pozo Adelaida San Salvador	26/08/08	99.0117	20.2808	1947
60	Agua de manantial Sn Salvador (Resurgimiento)	26/08/08	99.0149	20.2789	1945
61	Canal de aguas negras Sn. Salvador	26/08/08	99.0149	20.2789	1945
62	Canal Grasoso II	26/08/08	99.2065	20.3429	1941
63	Canal Grasoso rumbo a cerro Azul	26/08/08	99.2574	20.3299	1936
64	Canal Villagran	26/08/08	99.0714	20.3896	1931
65	Canal de las Rosas	26/08/08	99.0364	20.3542	1917
66	Canal revestido el Mejay	26/08/08	99.1913	20.3967	1915
67	Río Tula Manantial Progreso	26/08/08	99.1961	20.2512	1901
68	Río Tula Progreso	26/08/08	99.1961	20.2512	1894
69	Puente Alfajayucan	26/08/08	99.3486	20.4135	1879
70	Río Tula Gran Canal Xotho. Ixmiquilpan	27/08/08	99.2189	20.4789	1879
71	Presa Vicente Aguirre	26/08/08	99.3604	20.4262	1877
72	Sta.Ma. Xigui	27/08/08	99.3414	20.4593	1843
73	Cercajas (Cerca puente Portezuelo)	28/08/08	99.3118	20.5041	1820
74	Desviación cerca Esc. Digno	27/08/08	99.3638	20.4778	1814
75	Presa Debodhé	26/08/08	99.1207	20.4839	1814
76	Río Tula Chicoautla	26/08/08	99.2227	20.3255	1813
77	Canal revestido Cerro Prieto	27/08/08	99.3753	20.4937	1812
78	Balnerio Maguey Blanco	26/08/08	99.1646	20.4242	1808
79	Canal revestido Ecoalberto	26/08/08	99.2059	20.4092	1795
80	Canal Maguey Blanco	26/08/08	99.1691	20.4234	1794
81	Hacia la mina Cerro Prieto	27/08/08	99.3664	20.4851	1791
82	Canal Debodhe	26/08/08	99.1150	20.4924	1787
83	Canal de Piedra la Estación	26/08/08	99.1639	20.4955	1785
84	Parque acuático Tlacotlapilco (alberca)	26/08/08	99.2233	20.3754	1780

ContinuaciónAnexo1

No.	Sitio de Muestreo	Fecha de colecta	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
			OESTE	NORTE	m.s.n.m
85	Balneario Dauthi	26/08/08	99.1904	20.4492	1779
86	Parque acuático Tlacotalpilco (toma principal)	26/08/08	99.2231	20.3747	1777
87	Agua fréatica Bandho	26/08/08	99.1450	20.5030	1775
88	Parque acuático Dios Padre	26/08/08	99.1943	20.4631	1774
89	Balneario Pueblo Nuevo	26/08/08	99.1732	20.4563	1770
90	Parque acuático Ecoalberto	26/08/08	99.2114	20.4113	1770
91	Canal Bandaho	26/08/08	99.1463	20.5028	1766
92	EL Arenalito Camino Tolantongo	26/08/08	99.0492	20.6553	1764
93	Río La Gloria	26/08/08	99.0492	20.6553	1763
94	San Francisco (Cerro Prieto)	27/08/08	99.3875	20.4824	1758
95	Río Tula Ecoalberto	26/08/08	99.2224	20.4216	1758
96	Río Tula Tlacotalpilco	26/08/08	99.2233	20.3744	1757
97	Canal Antes de Ixmiquilpán	29/08/08	99.1790	20.4493	1753
98	Canal Cerritos	26/08/08	99.1890	20.5302	1751
99	Canal de Piedra	26/08/08	99.1820	20.4908	1745
100	Presa Madho Corrales	27/08/08	99.3861	20.5060	1736
101	Río Ixmiquilpán	26/08/08	99.2159	20.4826	1692
102	Balneario Tzindejéh	27/08/08	99.2962	20.5509	1639
103	Río Tula Tzindejéh	27/08/08	99.2919	20.5501	1628
104	Balneario II Tzindejéh	27/08/08	99.2919	20.5501	1628
105	Río Tula Puente Corea	27/08/08	99.3460	20.5762	1580
106	Presa Zimapán	27/08/08	99.4887	20.6608	1569
107	Adjuntas	27/08/08	99.4481	20.8520	953
108 Verano 2009	Puente Pemex	03/06/09	99.0449	19.6236	2260
109	Canal de riego cuadrado Chiconautla	03/06/09	99.0456	19.6236	2257
110	Canal de riego antes Santa Ma. Tonatitla	03/06/09	99.0457	19.6728	2255
111	La Laminadora	03/06/09	99.0923	19.7878	2253
112	Canal principal Sta. Ana Nextlalpan	03/06/09	99.7364	19.7364	2253
113	Canal revestido Sta. Ma. Tonatitla	03/06/09	99.0446	19.6842	2252
114	Santa Ana Nextlalpán	03/06/09	99.7347	19.7347	2252
115	Laguna de Zumpango	03/06/09	99.1149	19.7997	2251
116	Laguna de Zumpango Emisor Norte	03/06/09	99.7866	19.7866	2249
117	Canal Princial San Pedro	03/06/09	99.1180	19.7751	2242
118	Puente de Tequixquiac	03/06/09	99.3422	19.9040	2241
119	Tequixquiac Tajo	03/06/09	99.1224	19.9022	2241
120	Tajo	03/06/09	99.1213	19.9008	2241
121	El Gran Canal Teoloyucán	03/06/09	99.1066	19.7506	2240
122	Canal de tierra Tequixquiac	03/06/09	99.1438	19.9134	2240
123	Desviación Tlapanoloya	03/06/09	99.1435	19.9288	2238
124	Presa las canoas	03/06/09	99.1601	19.9455	2238
125	Balneario Las Canoas	03/06/09	99.1569	19.9448	2237
126	La Atarjea nacimiento manantial	03/06/09	99.9459	19.9459	2198
127	Balneario La Atarjea manantial	03/06/09	99.1691	19.9472	2197
128	Apaxco Río Tula	03/06/09	99.1758	19.9649	2195
129	Pino Suárez	03/06/09	99.4238	20.2478	2191

ContinuaciónAnexo 1

No.	Sitio de Muestreo	Fecha de colecta	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
			OESTE	NORTE	m.s.n.m
130	Canal Factoria Apaxco	04/06/09	99.1778	19.9698	2189
131	Canal revestido Texas	04/06/09	99.2029	20.0313	2155
132	Canal revestido Atotonilco	04/06/09	99.2048	20.0262	2153
133	Río Tula	04/06/09	99.2133	20.0207	2152
134	Atitalaquia	04/06/09	99.2196	20.0566	2103
135	Tula 1 Canal	04/06/09	99.3043	20.0554	2098
136	Refinería Rexel	04/06/09	99.2676	20.0588	2097
137	Tula 2 Hotel las Plazas	04/06/09	99.3128	20.0542	2097
138	Canal Grande Tula Gral. Dhendo	04/06/09	99.3161	20.0744	2096
139	Canal Grande Atitalaquia	04/06/09	99.2244	20.0585	2095
140	Canal Pemex Atitalaquia	04/06/09	99.2302	20.0516	2095
141	Canal de la Quina Atitalaquia	04/06/09	99.2271	20.0592	2094
142	Canal Grande de la Quina	04/06/09	99.2250	20.0509	2093
143	Instituto Canadiense	04/06/09	99.3352	20.0770	2093
144	Río Tula Puente Metlac	04/06/09	99.3363	20.0531	2092
145	Tula Tepetitlán.	04/06/09	99.3369	20.0831	2092
146	Col. Julián Villagran	04/06/09	99.3419	20.0985	2092
147	Tula puente verde	04/06/09	99.3296	20.0664	2086
148	Canal Col. Benito Juárez	04/06/09	99.3391	20.1086	2082
149	Chapantongo	04/06/09	99.3961	20.3109	2074
150	Canal de tierra Ahuehuepán	04/06/09	99.3499	20.1285	2059
151	Presa Endho	04/06/09	99.3603	20.1458	2037
152	Tepetitlán	04/06/09	99.3814	20.1893	2018
153	Sifón Presa Endho	04/06/09	99.3568	20.1587	2017
154	Presa Rojo Gómez	04/06/09	99.3226	20.3584	1982
155	Presa Dolores	04/06/09	99.3482	20.3440	1981
156	Canal Grasoso rumbo a cerro Azul	04/06/09	99.2643	20.3309	1981
157	Puente Alfajayucan	04/06/09	99.3485	20.4139	1953
158	Presa Vicente Aguirre	04/06/09	99.3680	20.4335	1946
159	Canal Grasoso II	04/06/09	99.2068	20.3432	1943
160	Canal revestido el Mejay	04/06/09	99.1913	20.3969	1924
161	Canal revestido Ecoalberto	04/06/09	99.2059	20.4092	1848
162	Río Tula Chilcuautla	04/06/09	99.2231	20.3262	1833
163	Presa Debodhé	04/06/09	99.1208	20.4840	1816
164	Laguna (Camino Cerro Prieto)	05/06/09	99.3664	20.4851	1790
165	Presa Madho Corrales	05/06/09	99.3863	20.5061	1789
166	Río San Francisco Sachichileo	05/06/09	99.3924	20.4887	1788
167	Canal Debodhé	05/06/09	99.1149	20.4925	1788
168	Canal de Piedra Ixmiquilpán	05/06/09	99.2553	20.4806	1787
169	Agua Freática Bandho	05/06/09	99.1449	20.5031	1787
170	Canal cuadrado Bandaho	05/06/09	99.1359	20.5067	1786
171	San Pedro Capula	06/06/09	99.1568	20.4959	1782
172	Río Tula Tlacotlapilco	06/06/09	99.2234	20.3743	1782
173	Río Tula Ecoalberto	06/06/09	99.2233	20.4219	1781
174	Río Tula Gran Canal Xotho Ixmiquilpán	06/06/09	99.2211	20.4807	1777

ContinuaciónAnexo 1

No.	Sitio de Muestreo	Fecha de colecta	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
			OESTE	NORTE	m.s.n.m
175	Canal cuadrado revestido después Ixmiquilpán	06/06/09	99.3238	20.5249	1772
176	Río Tula de Ixmiquilpán	06/06/09	99.2159	20.4826	1764
177	Canal Maguey Blanco	06/06/09	99.1692	20.4234	1753
178	San Francisco (Cerro Prieto)	06/06/09	99.3841	20.4843	1752
179	Canal antes de Ixmiquilpán	06/06/09	99.1789	20.4493	1749
180	Canal de Piedra La Estación	06/06/09	99.1639	20.4954	1748
181	Canal Universidad Tecnológica VM	06/06/09	99.1824	20.4923	1740
182	Canal Av. Lázaro Cárdenas	06/06/09	99.2080	20.4867	1732
183	Canal El Nith	06/06/09	99.1944	20.4903	1732
184	Canal Dextho	06/06/09	99.2733	20.4979	1731
185	Río Tula puente Tasquillo	06/06/09	99.3463	20.5760	1594
186	Canal revestido Col. Ignacio López Rayón	06/06/09	99.2716	20.4832	1593
187	Presa Zimapán	06/06/09	99.4884	20.6610	1591
188	Cascadas Maconi	06/06/09	99.5276	20.8311	1587
189	Cañon Zimapán	06/06/09	99.4387	20.8419	1584
190	Adjuntas	06/06/09	99.4461	20.8651	953

Anexo 2. Concentración iónica de las aguas

Sitio	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol _c L ⁻¹										Σ mg y mmol	STD ppm
			Ca	Mg	Na	K	SUMA	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	SUMA		
1 Otoño	7.43	2061	3.71	5.81	9.80	1.03	20.35	0.00	12.98	5.43	1.44	19.85		1321
			74.28	70.65	225.40	40.40		0.00	791.91	192.67	68.98		1464.29	
			1.85	2.91	9.80	1.03		0.00	12.98	5.43	0.72		34.72	
2	7.47	2314	3.36	4.00	12.53	1.12	21.01	0.00	12.18	6.36	1.89	20.43		1483
			67.33	48.64	288.19	43.79		0.00	743.10	225.53	90.56		1507.14	
			1.68	2.00	12.53	1.12		0.00	12.18	6.36	0.94		36.81	
3	7.20	1627	3.43	6.71	4.30	1.63	16.08	0.00	11.11	3.62	1.00	15.73		1197
			68.80	81.63	98.90	63.73		0.00	677.82	128.37	48.06		1167.32	
			1.72	3.36	4.30	1.63		0.00	11.11	3.62	0.50		26.23	
4	7.39	1952	3.51	7.63	7.10	1.04	19.27	0.00	9.17	8.20	1.50	18.87		298
			70.27	92.74	163.30	40.53		0.00	559.46	290.77	72.05		1289.13	
			1.75	3.81	7.10	1.04		0.00	9.17	8.20	0.75		31.82	
5	6.65	416	2.23	1.07	0.43	0.38	4.11	0.00	2.43	1.27	0.32	4.02		1545
			44.69	13.01	9.89	14.86		0.00	148.25	44.92	15.37		290.99	
			1.12	0.54	0.43	0.38		0.00	2.43	1.27	0.16		6.32	
6	7.56	2187	4.13	6.92	9.40	1.15	21.61	0.00	9.74	9.42	1.89	21.05		310
			82.83	84.15	216.20	45.10		0.00	594.24	333.92	90.78		1447.21	
			2.07	3.46	9.40	1.15		0.00	9.74	9.42	0.95		36.18	
7	8.34	434	2.69	0.91	0.40	0.25	4.25	0.00	2.46	1.23	0.51	4.20		1087
			53.97	11.03	9.20	9.64		0.00	150.08	43.73	24.48		302.14	
			1.35	0.45	0.40	0.25		0.00	2.46	1.23	0.25		6.39	
8	7.20	1518	6.39	3.81	4.03	0.77	15.01	0.00	9.28	4.68	0.65	14.61		1241
			128.06	46.37	92.77	30.24		0.00	566.17	166.07	31.15		1060.82	
			3.20	1.91	4.03	0.77		0.00	9.28	4.68	0.32		24.20	
9	7.61	1753	7.39	3.34	6.20	0.37	17.30	0.00	10.06	5.97	0.82	16.85		1501
			148.10	40.61	142.60	14.47		0.00	613.76	211.70	39.38		1210.62	
			3.70	1.67	6.20	0.37		0.00	10.06	5.97	0.41		28.37	
10	7.57	1952	4.41	5.37	8.47	0.97	19.22	0.00	11.13	6.45	1.17	18.75		1384
			88.44	65.30	194.81	37.80		0.00	679.24	228.72	56.07		1350.38	
			2.21	2.69	8.47	0.97		0.00	11.13	6.45	0.58		32.50	
11	7.44	2278	3.81	7.08	10.50	1.10	22.50	0.00	12.19	7.97	1.70	21.86		1594
			76.42	86.09	241.50	43.14		0.00	743.71	282.50	81.66		1555.02	
			1.91	3.54	10.50	1.10		0.00	12.19	7.97	0.85		38.06	
12	7.87	1772	5.85	5.68	5.60	0.38	17.51	0.00	8.47	7.65	1.01	17.13		1196
			117.23	69.07	128.80	14.86		0.00	516.75	271.27	48.51		1166.49	
			2.93	2.84	5.60	0.38		0.00	8.47	7.65	0.50		28.37	
13	7.67	1645	4.08	4.55	6.83	0.79	16.25	0.00	9.54	5.67	0.63	15.84		1167
			81.76	55.33	157.09	30.89		0.00	582.04	200.94	30.26		1138.31	
			2.04	2.28	6.83	0.79		0.00	9.54	5.67	0.32		27.46	
14	7.57	2043	3.88	6.05	9.23	0.95	20.12	0.00	10.84	7.25	1.52	19.61		1427
			77.76	73.57	212.37	37.28		0.00	661.35	257.09	73.20		1392.60	
			1.94	3.03	9.23	0.95		0.00	10.84	7.25	0.76		34.00	
15	7.56	217	1.25	0.60	0.22	0.07	2.14	0.00	1.30	0.27	0.52	2.09		158
			25.05	7.30	5.06	2.74		0.00	79.31	9.57	24.98		154.01	
			0.63	0.30	0.22	0.07		0.00	1.30	0.27	0.26		3.05	
16	7.62	2205	4.67	4.97	10.50	1.02	21.16	0.00	11.99	8.37	1.35	21.71		1567

Continuación.....Anexo 2

Sitio	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹										Σ mg y mmol	STD mgL ⁻¹
			Ca	Mg	Na	K	SUMA	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	SUMA		
17	7.61	2205	93.52	60.44	241.50	39.88		0.00	731.51	296.68	64.97		1528.50	
			2.33	2.49	10.50	1.02		0.00	11.99	8.37	0.68		37.37	
			4.39	5.89	10.47	1.02	21.77	0.00	11.58	8.23	1.48	21.29		1547
18	7.46	2061	87.91	71.62	240.73	40.01		0.00	706.50	291.95	70.98		1509.70	
			2.19	2.95	10.47	1.02		0.00	11.58	8.23	0.74		37.18	
			2.95	7.69	8.77	0.92	20.33	0.00	11.05	7.47	1.29	19.80		1426
19	7.22	1030	59.05	93.51	201.63	36.10		0.00	674.16	264.77	61.86		1391.08	
			1.47	3.85	8.77	0.92		0.00	11.05	7.47	0.64		34.17	
			2.68	4.17	2.93	0.39	10.18	0.00	6.18	2.75	1.00	9.93		727
20	7.47	940	53.71	50.71	67.47	15.38		0.00	377.04	97.52	47.84		709.65	
			1.34	2.09	2.93	0.39		0.00	6.18	2.75	0.50		16.18	
			3.07	2.96	2.87	0.38	9.28	0.00	5.60	2.70	0.78	9.08		670
21	7.06	528	61.52	35.99	65.93	14.86		0.00	341.66	95.74	37.60		653.31	
			1.54	1.48	2.87	0.38		0.00	5.60	2.70	0.39		14.95	
			3.15	1.22	0.67	0.18	5.22	0.00	2.61	1.27	1.20	5.07		371
22	6.89	484	63.06	14.84	15.41	7.17		0.00	159.24	44.92	57.41		362.03	
			1.57	0.61	0.67	0.18		0.00	2.61	1.27	0.60		7.51	
			2.67	1.83	0.13	0.16	4.80	0.00	2.38	1.17	1.12	4.67		334
23	7.03	551	53.51	22.29	3.07	6.26		0.00	145.20	41.37	53.85		325.54	
			1.34	0.92	0.13	0.16		0.00	2.38	1.17	0.56		6.65	
			2.63	1.97	0.63	0.21	5.44	0.00	3.03	1.33	0.94	5.30		386
24	6.88	3109	52.64	24.00	14.49	8.08		0.00	184.86	47.28	44.95		376.29	
			1.31	0.99	0.63	0.21		0.00	3.03	1.33	0.47		7.97	
			18.20	6.77	4.77	0.77	30.50	0.00	17.43	9.05	3.27	29.75		2181
25	7.40	1699	364.73	82.32	109.63	29.98		0.00	1063.40	320.91	157.06		2128.04	
			9.10	3.39	4.77	0.77		0.00	17.43	9.05	1.64		46.13	
			3.58	5.60	6.87	0.73	16.78	0.00	9.14	5.63	1.58	16.35		1189
26	7.36	1708	71.74	68.10	157.93	28.54		0.00	557.63	199.76	75.87		1159.58	
			1.79	2.80	6.87	0.73		0.00	9.14	5.63	0.79		27.75	
			3.03	3.64	9.47	0.51	16.65	0.00	7.26	5.50	3.46	16.22		1176
27	6.93	651	60.65	44.26	217.81	20.07		0.00	442.93	195.03	166.21		1146.97	
			1.51	1.82	9.47	0.51		0.00	7.26	5.50	1.73		27.81	
			3.31	2.22	0.67	0.23	6.43	0.00	3.82	1.37	1.07	6.26		462
28	7.38	1699	66.27	27.00	15.33	9.12		0.00	233.06	48.46	51.62		450.86	
			1.65	1.11	0.67	0.23		0.00	3.82	1.37	0.54		9.39	
			4.00	5.30	6.87	0.73	16.89	0.00	9.51	5.63	1.39	16.53		1207
29	7.38	1157	80.16	64.45	157.93	28.41		0.00	580.21	199.76	66.53		1177.44	
			2.00	2.65	6.87	0.73		0.00	9.51	5.63	0.69		28.08	
			3.79	3.51	3.69	0.44	11.43	0.00	5.04	3.25	2.84	11.13		799
30	7.65	376	75.88	42.72	84.87	17.20		0.00	307.49	115.25	136.41		779.82	
			1.89	1.76	3.69	0.44		0.00	5.04	3.25	1.42		17.49	
			1.47	1.25	0.88	0.14	3.74	0.00	2.50	0.42	0.72	3.64		279
31	7.30	1121	29.46	15.20	20.24	5.47		0.00	152.53	14.78	34.71		272.38	
			0.74	0.63	0.88	0.14		0.00	2.50	0.42	0.36		5.66	
			3.97	2.92	3.73	0.45	11.07	0.00	5.30	2.77	2.73	10.80		791
			79.56	35.51	85.87	17.60		0.00	323.35	98.22	131.12		771.23	

Continuación.....Anexo 2

Sitio	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹										Σ mg y mmol	STD mgL ⁻¹
			Ca	Mg	Na	K	SUMA	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	SUMA		
32	7.87	651	1.99	1.46	3.73	0.45		0.00	5.30	2.77	1.37		17.06	442
			3.12	2.35	0.57	0.39	6.43	0.00	3.37	2.60	0.29	6.26		
			62.52	28.58	13.07	15.25		0.00	205.60	92.20	14.02		431.23	
33	7.17	1139	1.56	1.18	0.57	0.39		0.00	3.37	2.60	0.15		9.81	820
			3.97	3.24	3.60	0.44	11.25	0.00	6.44	2.35	2.18	10.97		
			79.52	39.40	82.80	17.20		0.00	392.90	83.33	104.71		799.86	
34	7.34	1121	1.98	1.62	3.60	0.44		0.00	6.44	2.35	1.09		17.52	796
			3.59	3.38	3.67	0.43	11.07	0.00	5.91	2.60	2.27	10.78		
			72.01	41.10	84.33	16.94		0.00	360.57	92.20	109.03		776.18	
35	7.28	2458	1.80	1.69	3.67	0.43		0.00	5.91	2.60	1.14		17.23	1675
			10.73	9.12	3.93	0.51	24.30	0.00	14.09	6.76	2.04	22.89		
			215.03	110.90	90.47	20.07		0.00	859.63	239.71	97.98		1633.79	
36	7.69	1410	5.37	4.56	3.93	0.51		0.00	14.09	6.76	1.02		36.24	975
			3.90	3.34	6.03	0.66	13.94	0.00	6.59	5.57	1.41	13.57		
			78.16	40.61	138.77	25.94		0.00	402.06	197.39	67.86		950.79	
37	7.63	1265	1.95	1.67	6.03	0.66		0.00	6.59	5.57	0.71		23.18	870
			3.18	3.70	5.03	0.58	12.49	0.00	6.16	4.78	1.18	12.12		
			63.73	44.99	115.77	22.68		0.00	375.82	169.50	56.74		849.22	
38	7.65	1283	1.59	1.85	5.03	0.58		0.00	6.16	4.78	0.59		20.58	898
			3.18	3.85	5.10	0.55	12.68	0.00	6.79	4.37	1.19	12.35		
			63.73	46.82	117.30	21.51		0.00	414.26	154.84	57.18		875.63	
39	7.44	1211	1.59	1.93	5.10	0.55		0.00	6.79	4.37	0.60		20.92	835
			3.83	3.44	4.20	0.49	11.97	0.00	5.01	3.60	3.06	11.67		
			76.82	41.83	96.60	19.29		0.00	305.66	127.66	146.98		814.84	
40	7.02	578	1.92	1.72	4.20	0.49		0.00	5.01	3.60	1.53		18.47	410
			3.16	1.94	0.43	0.19	5.73	0.00	3.25	1.22	1.13	5.60		
			63.33	23.59	9.97	7.56		0.00	198.28	43.14	54.29		400.16	
41	7.61	1247	1.58	0.97	0.43	0.19		0.00	3.25	1.22	0.57		8.21	873
			3.38	3.63	4.80	0.52	12.33	0.00	6.63	4.35	1.04	12.02		
			67.74	44.14	110.40	20.46		0.00	404.50	154.25	49.95		851.44	
42	7.40	1211	1.69	1.82	4.80	0.52		0.00	6.63	4.35	0.52		20.33	825
			3.42	4.23	3.87	0.44	11.96	0.00	4.87	3.55	3.23	11.65		
			68.54	51.48	88.93	17.33		0.00	297.12	125.88	155.31		804.59	
43	7.72	850	1.71	2.12	3.87	0.44		0.00	4.87	3.55	1.62		18.17	533
			3.45	2.21	2.37	0.36	8.38	0.00	2.82	2.07	2.29	7.18		
			69.07	26.87	54.43	14.08		0.00	172.05	73.28	109.92		519.70	
44	7.49	174	1.72	1.11	2.37	0.36		0.00	2.82	2.07	1.14		11.59	118
			0.76	0.65	0.27	0.04	1.72	0.00	0.66	0.39	0.63	1.68		
			15.23	7.90	6.21	1.56		0.00	40.27	13.83	30.26		115.26	
45	7.57	1302	0.38	0.33	0.27	0.04		0.00	0.66	0.39	0.32		2.38	909
			3.05	4.36	4.93	0.52	12.86	0.00	7.05	4.31	1.16	12.52		
			61.12	53.02	113.39	20.20		0.00	430.12	152.83	55.71		886.40	
46	7.43	850	1.53	2.18	4.93	0.52		0.00	7.05	4.31	0.58		21.09	589
			3.18	2.63	2.23	0.35	8.39	0.00	3.87	2.33	1.97	8.18		
			63.73	31.94	51.37	13.55		0.00	236.11	82.74	94.79		574.22	
			1.59	1.31	2.23	0.35		0.00	3.87	2.33	0.99		12.67	

Continuación.....Anexo 2

Sitio	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹									Σ mg y mmol	STD mgL ⁻¹
			Ca	Mg	Na	K	SUMA	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄		
47	7.42	868	3.32	2.51	2.40	0.34	8.57	0.00	4.36	2.77	1.17	8.30	601
			66.53	30.48	55.20	13.29		0.00	266.00	98.22	56.20	585.93	
			1.66	1.25	2.40	0.34		0.00	4.36	2.77	0.59	13.37	
48	7.61	868	3.67	2.15	2.40	0.33	8.55	0.00	4.98	2.21	1.15	8.34	620
			73.55	26.10	55.20	13.03		0.00	303.83	78.37	55.18	605.26	
			1.84	1.07	2.40	0.33		0.00	4.98	2.21	0.57	13.41	
49	7.52	202	1.20	0.54	0.21	0.05	2.00	0.00	1.21	0.26	0.48	1.95	147
			24.05	6.57	4.83	1.96		0.00	73.82	9.22	23.05	143.50	
			0.60	0.27	0.21	0.05		0.00	1.21	0.26	0.24	2.84	
50	8.66	607	2.57	1.74	1.48	0.21	6.00	0.12	3.35	1.63	0.74	5.84	427
			51.50	21.16	34.04	8.21		0.06	204.38	57.80	35.54	416.24	
			1.29	0.87	1.48	0.21		0.06	3.35	1.63	0.37	9.26	
51	7.05	795	2.69	2.85	2.00	0.32	7.86	0.00	3.58	2.00	2.02	7.60	547
			53.91	34.70	46.00	12.38		0.00	218.42	70.92	97.01	533.33	
			1.35	1.43	2.00	0.32		0.00	3.58	2.00	1.01	11.68	
52	7.88	868	2.86	3.06	2.33	0.32	8.58	0.00	4.46	2.69	1.18	8.33	600
			57.31	37.21	53.67	12.64		0.00	272.10	95.39	56.68	585.00	
			1.43	1.53	2.33	0.32		0.00	4.46	2.69	0.59	13.36	
53	7.97	1374	3.34	4.11	5.60	0.52	13.57	0.00	7.18	4.83	1.21	13.22	957
			66.93	49.98	128.80	20.33		0.00	438.05	171.39	58.07	933.56	
			1.67	2.06	5.60	0.52		0.00	7.18	4.83	0.60	22.46	
54	7.51	1844	4.37	6.03	7.37	0.44	18.21	0.00	8.74	6.85	2.11	17.70	1256
			87.57	73.32	169.51	17.20		0.00	533.23	242.90	101.24	1224.98	
			2.19	3.02	7.37	0.44		0.00	8.74	6.85	1.05	29.65	
55	7.96	1356	3.35	3.96	5.53	0.55	13.39	0.00	6.80	5.04	1.21	13.05	939
			67.13	48.15	127.27	21.37		0.00	414.87	178.72	58.30	915.81	
			1.68	1.98	5.53	0.55		0.00	6.80	5.04	0.61	22.18	
56	7.75	1320	3.39	3.43	5.67	0.55	13.04	0.00	6.79	4.47	1.44	12.70	926
			67.94	41.71	130.33	21.51		0.00	414.26	158.39	69.16	903.29	
			1.70	1.72	5.67	0.55		0.00	6.79	4.47	0.72	21.60	
57	7.76	2061	3.20	4.50	11.97	0.68	20.35	0.00	9.57	7.70	2.55	19.82	1435
			64.13	54.72	275.23	26.59		0.00	583.87	273.04	122.60	1400.17	
			1.60	2.25	11.97	0.68		0.00	9.57	7.70	1.28	35.04	
58	6.53	108	0.36	0.40	0.15	0.17	1.08	0.00	0.42	0.30	0.33	1.05	76
			7.21	4.86	3.45	6.65		0.00	25.62	10.64	15.85	74.29	
			0.18	0.20	0.15	0.17		0.00	0.42	0.30	0.17	1.59	
59	7.47	1844	3.94	5.98	7.80	0.49	18.21	0.00	8.31	7.69	1.75	17.75	1244
			78.96	72.72	179.40	19.16		0.00	506.99	272.69	84.05	1213.97	
			1.97	2.99	7.80	0.49		0.00	8.31	7.69	0.88	30.13	
60	7.54	1844	5.03	4.69	7.84	0.68	18.25	0.00	8.84	7.08	1.80	17.72	1273
			100.80	57.07	180.32	26.72		0.00	539.33	251.06	86.33	1241.63	
			2.52	2.35	7.84	0.68		0.00	8.84	7.08	0.90	30.20	
61	7.87	1826	3.98	4.93	8.53	0.60	18.05	0.00	9.59	6.42	1.57	17.57	1279
			79.76	59.99	196.19	23.59		0.00	585.09	227.54	75.21	1247.35	
			1.99	2.47	8.53	0.60		0.00	9.59	6.42	0.78	30.38	
62	7.69	859	3.32	2.65	2.20	0.31	8.48	0.00	4.48	2.61	1.17	8.26	598

Continuación.....Anexo 2

Sitio	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹								Σ mg y mmol	STD mgL ⁻¹		
			Ca	Mg	Na	K	SUMA	CO ₃	HCO ₃	Cl			SO ₄	SUMA
63	8.13	777	66.53	32.22	50.60	12.12		0.00	273.32	92.55	56.20		583.55	550
			1.66	1.33	2.20	0.31		0.00	4.48	2.61	0.59		13.17	
			2.87	2.57	1.93	0.30	7.67	0.00	4.55	2.07	0.86	7.47		
64	7.98	1808	57.45	31.25	44.47	11.73		0.00	277.60	73.28	41.16		536.94	1229
			1.43	1.29	1.93	0.30		0.00	4.55	2.07	0.43		12.00	
			4.39	4.04	8.90	0.47	17.80	0.00	7.81	7.44	2.06	17.31		
65	7.88	1772	87.98	49.13	204.70	18.38		0.00	476.49	263.82	98.94		1199.43	1212
			2.20	2.02	8.90	0.47		0.00	7.81	7.44	1.03		29.87	
			4.82	3.86	8.33	0.49	17.50	0.00	7.79	7.34	1.92	17.05		
66	7.90	813	96.59	46.94	191.59	19.16		0.00	475.27	260.28	92.22		1182.04	571
			2.41	1.93	8.33	0.49		0.00	7.79	7.34	0.96		29.25	
			2.85	2.61	2.20	0.38	8.04	0.00	4.28	2.47	1.12	7.86		
67	8.43	1591	57.11	31.74	50.60	14.99		0.00	261.12	87.47	53.62		556.65	1084
			1.43	1.31	2.20	0.38		0.00	4.28	2.47	0.56		12.62	
			3.97	4.47	6.73	0.54	15.71	0.35	7.20	5.92	1.83	15.30		
68	7.36	976	79.56	54.36	154.79	21.11		10.50	439.27	209.92	87.89		1057.40	653
			1.99	2.24	6.73	0.54		0.18	7.20	5.92	0.91		25.70	
			2.82	3.54	2.93	0.35	9.65	0.00	4.34	4.03	1.02	9.39		
69	7.16	813	56.51	43.05	67.47	13.82		0.00	264.78	142.90	48.95		637.48	560
			1.41	1.77	2.93	0.35		0.00	4.34	4.03	0.51		15.35	
			2.67	2.88	2.17	0.32	8.04	0.00	3.74	2.32	1.78	7.84		
70	7.26	904	53.51	35.02	49.83	12.64		0.00	228.18	82.15	85.44		546.77	624
			1.34	1.44	2.17	0.32		0.00	3.74	2.32	0.89		12.21	
			3.38	3.04	2.22	0.29	8.93	0.00	4.18	2.47	2.06	8.71		
71	7.44	759	67.74	36.97	51.06	11.34		0.00	255.02	87.59	98.94		608.65	518
			1.69	1.52	2.22	0.29		0.00	4.18	2.47	1.03		13.40	
			2.05	3.00	2.10	0.35	7.50	0.00	3.21	2.19	1.91	7.31		
72	7.23	759	41.08	36.48	48.30	13.82		0.00	195.84	77.66	91.74		504.91	535
			1.03	1.50	2.10	0.35		0.00	3.21	2.19	0.96		11.33	
			3.03	2.17	1.83	0.28	7.31	0.00	3.68	2.12	1.70	7.50		
73	8.01	795	60.72	26.39	42.09	10.95		0.00	224.52	75.18	81.65		521.49	542
			1.52	1.09	1.83	0.28		0.00	3.68	2.12	0.85		11.36	
			2.93	2.28	2.10	0.55	7.86	0.00	3.52	3.30	0.85	7.67		
74	7.81	759	58.72	27.72	48.30	21.64		0.00	214.76	117.02	40.83		528.98	549
			1.47	1.14	2.10	0.55		0.00	3.52	3.30	0.43		12.50	
			2.65	2.05	1.57	1.04	7.31	0.00	3.69	2.20	1.61	7.50		
75	8.62	1735	53.11	24.93	36.11	40.66		0.00	225.13	78.01	77.43		535.38	1260
			1.33	1.03	1.57	1.04		0.00	3.69	2.20	0.81		11.66	
			4.13	2.76	9.40	0.83	17.12	0.37	9.66	4.42	2.23	16.68		
76	7.25	940	82.77	33.56	216.20	32.45		11.10	589.36	156.73	107.11		1229.28	653
			2.07	1.38	9.40	0.83		0.19	9.66	4.42	1.12		29.06	
			2.84	3.39	2.70	0.35	9.28	0.00	4.96	2.80	1.28	9.04		
77	8.13	696	56.91	41.22	62.10	13.55		0.00	302.61	99.29	61.48		637.17	486
			1.42	1.70	2.70	0.35		0.00	4.96	2.80	0.64		14.56	
			3.04	2.25	1.28	0.30	6.87	0.00	3.56	1.81	1.32	6.69		
			60.92	27.36	29.44	11.73		0.00	217.20	64.18	63.40		474.23	

Continuación.....Anexo 2

Sitio	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹										Σ mg y mmol	STD mgL ⁻¹
			Ca	Mg	Na	K	SUMA	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	SUMA		
78	7.50	1482	1.52	1.13	1.28	0.30		0.00	3.56	1.81	0.66		10.26	1032
			4.79	3.50	6.03	0.31	14.63	0.00	6.99	4.59	2.67	14.25		
			95.99	42.56	138.77	12.12		0.00	426.46	162.76	128.16		1006.82	
79	7.25	913	2.40	1.75	6.03	0.31		0.00	6.99	4.59	1.33		23.40	635
			2.76	3.05	2.85	0.36	9.02	0.00	4.70	2.80	1.28	8.78		
			55.31	37.09	65.55	14.08		0.00	286.75	99.29	61.41		619.47	
80	7.28	1012	1.38	1.53	2.85	0.36		0.00	4.70	2.80	0.64		14.25	706
			2.77	3.14	3.33	0.51	9.75	0.00	4.97	3.68	1.35	10.00		
			55.51	38.18	76.67	19.94		0.00	303.22	130.49	64.84		688.85	
81	8.06	705	1.39	1.57	3.33	0.51		0.00	4.97	3.68	0.68		16.12	491
			3.29	1.77	1.59	0.31	6.96	0.00	3.22	2.03	1.54	6.79		
			65.93	21.52	36.57	12.12		0.00	196.45	72.10	73.87		478.57	
82	7.35	958	1.65	0.89	1.59	0.31		0.00	3.22	2.03	0.77		10.45	686
			3.73	2.04	3.23	0.46	9.46	0.00	5.48	2.91	0.83	9.22		
			74.75	24.81	74.37	17.86		0.00	334.33	103.19	39.86		669.17	
83	7.44	904	1.87	1.02	3.23	0.46		0.00	5.48	2.91	0.42		15.38	642
			2.86	2.46	3.23	0.38	8.93	0.00	4.90	2.70	1.14	8.74		
			57.31	29.91	74.37	14.86		0.00	298.95	95.74	54.96		626.10	
84	8.14	1085	1.43	1.23	3.23	0.38		0.00	4.90	2.70	0.57		14.45	745
			4.01	3.56	2.60	0.55	10.72	0.00	4.89	3.50	2.06	10.45		
			80.36	43.29	59.80	21.51		0.00	298.34	124.11	99.01		726.42	
85	7.61	1175	2.01	1.78	2.60	0.55		0.00	4.89	3.50	1.03		16.36	793
			3.73	4.15	3.33	0.39	11.60	0.00	4.78	3.82	2.70	11.30		
			74.75	50.46	76.67	15.12		0.00	291.63	135.46	129.72		773.80	
86	8.03	1085	1.87	2.08	3.33	0.39		0.00	4.78	3.82	1.35		17.61	739
			3.74	3.62	2.75	0.58	10.69	0.00	4.74	3.60	2.07	10.41		
			74.95	44.02	63.25	22.68		0.00	289.19	127.66	99.46		721.20	
87	7.79	958	1.87	1.81	2.75	0.58		0.00	4.74	3.60	1.04		16.39	652
			2.50	3.10	3.27	0.59	9.45	0.00	4.25	4.00	1.01	9.26		
			50.10	37.70	75.13	22.94		0.00	259.29	141.84	48.73		635.73	
88	7.42	958	1.25	1.55	3.27	0.59		0.00	4.25	4.00	0.51		15.41	649
			3.42	3.49	2.23	0.32	9.47	0.00	4.44	3.30	1.46	9.20		
			68.54	42.44	51.37	12.64		0.00	270.88	117.02	70.12		633.01	
89	7.38	1247	1.71	1.75	2.23	0.32		0.00	4.44	3.30	0.73		14.48	852
			3.28	4.95	3.67	0.42	12.32	0.00	5.94	3.73	2.29	11.96		
			65.73	60.19	84.33	16.42		0.00	362.40	132.27	109.99		831.33	
90	7.65	967	1.64	2.48	3.67	0.42		0.00	5.94	3.73	1.15		19.02	657
			4.13	2.95	2.13	0.34	9.55	0.00	4.18	3.20	1.91	9.29		
			82.77	35.83	49.07	13.29		0.00	255.02	113.47	91.67		641.12	
91	8.21	1844	2.07	1.47	2.13	0.34		0.00	4.18	3.20	0.95		14.35	1355
			4.63	2.28	10.93	0.37	18.21	0.00	10.62	4.28	2.82	17.72		
			92.79	27.72	251.39	14.60		0.00	647.93	151.77	135.44		1321.64	
92	8.19	333	2.32	1.14	10.93	0.37		0.00	10.62	4.28	1.41		31.07	233
			1.83	0.82	0.43	0.21	3.29	0.00	1.77	1.15	0.28	3.20		
			36.67	9.97	10.00	8.08		0.00	107.99	40.78	13.45		226.94	
			0.92	0.41	0.43	0.21		0.00	1.77	1.15	0.14		5.03	

Continuación.....Anexo 2

Sitio	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol _c L ⁻¹									Σ mg y mmol	STD mgL ⁻¹	
			Ca	Mg	Na	K	SUMA	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄			SUMA
93	8.12	976	3.27	4.13	2.03	0.21	9.64	0.00	6.40	2.20	0.84	9.44		696
			65.53	50.22	46.77	8.08		0.00	390.46	78.01	40.35		679.42	
			1.64	2.07	2.03	0.21		0.00	6.40	2.20	0.42		14.96	
94	7.50	260	1.33	0.44	0.64	0.10	2.51	0.00	1.40	0.53	0.64	2.57		190
			26.65	5.35	14.72	3.91		0.00	85.41	18.79	30.74		185.58	
			0.67	0.22	0.64	0.10		0.00	1.40	0.53	0.32		3.88	
95	7.17	922	3.25	3.23	2.14	0.48	9.10	0.00	5.31	2.63	0.93	8.87		650
			65.13	39.28	49.22	18.90		0.00	323.96	93.38	44.50		634.37	
			1.63	1.62	2.14	0.48		0.00	5.31	2.63	0.46		14.27	
96	7.34	922	3.14	2.92	2.70	0.35	9.11	0.00	5.01	2.74	1.13	8.88		647
			62.93	35.51	62.10	13.55		0.00	305.66	97.16	54.27		631.18	
			1.57	1.46	2.70	0.35		0.00	5.01	2.74	0.57		14.39	
97	7.34	958	2.75	3.32	2.93	0.46	9.46	0.00	4.85	3.52	0.85	9.22		659
			55.11	40.37	67.47	17.99		0.00	295.90	124.82	40.83		642.48	
			1.38	1.66	2.93	0.46		0.00	4.85	3.52	0.43		15.22	
98	9.68	1139	3.52	3.84	3.54	0.35	11.25	0.32	5.88	3.04	1.70	10.94		789
			70.54	46.69	81.42	13.69		9.60	358.74	107.80	81.65		770.13	
			1.76	1.92	3.54	0.35		0.16	5.88	3.04	0.85		17.50	
99	7.94	1320	3.18	4.33	5.07	0.46	13.04	0.00	6.46	4.09	2.19	12.74		918
			63.73	52.65	116.53	17.99		0.00	394.12	145.03	105.19		895.24	
			1.59	2.17	5.07	0.46		0.00	6.46	4.09	1.10		20.93	
100	8.20	293	1.78	0.36	0.67	0.08	2.89	0.00	1.47	0.75	0.60	2.82		209
			35.67	4.38	15.33	3.13		0.00	89.68	26.60	28.70		203.49	
			0.89	0.18	0.67	0.08		0.00	1.47	0.75	0.30		4.34	
101	7.87	1735	5.96	2.57	8.17	0.45	17.15	0.00	8.93	7.20	0.58	16.71		1214
			119.44	31.25	187.83	17.73		0.00	544.82	255.31	27.86		1184.24	
			2.98	1.29	8.17	0.45		0.00	8.93	7.20	0.29		29.31	
102	7.92	597	3.05	1.69	1.03	0.13	5.91	0.00	3.17	1.38	1.22	5.78		422
			61.12	20.55	23.77	5.21		0.00	193.40	49.05	58.74		411.85	
			1.53	0.85	1.03	0.13		0.00	3.17	1.38	0.61		8.70	
103	7.30	1085	4.14	2.68	3.53	0.37	10.73	0.00	4.54	3.30	2.63	10.47		750
			82.97	32.59	81.27	14.60		0.00	276.99	117.02	126.38		731.80	
			2.07	1.34	3.53	0.37		0.00	4.54	3.30	1.32		16.47	
104	8.13	651	3.26	1.66	1.20	0.15	6.27	0.00	3.10	2.34	0.99	6.43		449
			65.33	20.19	27.60	5.73		0.00	189.13	82.98	47.55		438.51	
			1.63	0.83	1.20	0.15		0.00	3.10	2.34	0.50		9.74	
105	7.28	1085	3.21	3.49	3.40	0.36	10.46	0.00	4.87	3.23	2.63	10.73		756
			64.33	42.40	78.20	14.21		0.00	297.12	114.65	126.38		737.29	
			1.61	1.74	3.40	0.36		0.00	4.87	3.23	1.32		16.53	
106	7.89	1157	3.58	2.86	4.60	0.39	11.43	0.00	4.86	4.28	2.00	11.14		791
			71.74	34.78	105.80	15.25		0.00	296.51	151.89	95.90		771.86	
			1.79	1.43	4.60	0.39		0.00	4.86	4.28	1.00		18.35	
107	8.19	1338	3.31	3.04	4.47	0.42	11.24	0.00	5.62	4.12	1.26	11.00		791
			66.33	36.97	102.73	16.42		0.00	342.88	145.98	60.74		772.05	
			1.66	1.52	4.47	0.42		0.00	5.62	4.12	0.63		18.43	
108Verano	7.35	2321	3.40	4.30	13.18	2.04	22.92	0.00	12.20	9.30	0.83	22.33		1626

Continuación.....Anexo 2

Sitio	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹									Σ mg y mmol	STD mgL ⁻¹	
			Ca	Mg	Na	K	SUMA	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄			SUMA
109	7.45	2262	80.11	76.38	267.06	39.69		0.00	744.32	328.18	50.20		1585.94	
			2.00	6.28	11.61	1.02		0.00	12.20	9.25	0.52		42.88	
			3.05	4.05	12.96	2.14	22.20	0.00	12.99	7.80	0.84	21.63		1581
110	7.65	2262	79.93	61.21	281.78	41.84		0.00	683.31	344.93	49.12		1542.11	
			1.99	5.03	12.25	1.07		0.00	11.20	9.73	0.51		41.79	
			3.12	4.12	12.98	1.89	22.11	0.00	12.17	7.65	1.72	21.54		1616
111	7.55	2644	66.69	70.82	278.52	42.62		0.00	764.05	271.27	82.81		1576.78	
			1.66	5.82	12.11	1.09		0.00	12.52	7.65	0.86		41.72	
			3.05	5.45	14.26	2.76	25.52	0.00	12.64	9.81	2.31	24.76		1795
112	7.60	2056	105.90	114.82	103.61	186.64		0.00	934.42	242.90	62.85		1751.15	
			2.64	9.44	4.50	4.77		0.00	15.32	6.85	0.65		44.18	
			2.68	4.30	11.92	1.40	20.30	0.00	11.41	6.50	1.86	19.77		1443
113	7.60	2233	88.12	84.03	185.42	36.75		0.00	677.92	248.65	87.10		1408.00	
			2.20	6.91	8.06	0.94		0.00	11.11	7.01	0.91		37.14	
			2.80	3.86	13.19	1.92	21.77	0.00	11.62	7.55	1.95	21.12		1591
114	7.45	1998	71.58	72.39	264.71	40.47		0.00	741.28	267.72	93.70		1551.84	
			1.79	5.95	11.51	1.04		0.00	12.15	7.55	0.98		40.96	
			1.95	3.00	12.75	1.65	19.35	0.00	11.14	6.10	1.61	18.85		1393
115	8.9	588	84.24	78.64	161.14	73.33		0.00	622.30	261.94	77.20		1358.79	
			2.10	6.47	7.01	1.88		0.00	10.20	7.39	0.80		35.84	
			0.45	1.83	3.00	0.53	5.81	0.30	2.62	1.55	1.17	5.64		385
116	7.10	793	38.08	5.47	67.15	20.80		9.00	81.61	54.96	62.70		375.77	
			0.95	0.45	2.92	0.53		0.15	1.34	1.55	0.65		9.14	
			1.40	1.65	4.21	0.51	7.77	0.00	4.72	1.80	0.98	7.50		584
117	7.50	1968	32.32	23.11	87.04	19.95		0.00	297.07	63.83	46.85		570.17	
			0.81	1.90	3.78	0.51		0.00	4.87	1.80	0.49		14.16	
			3.05	4.20	10.38	1.80	19.43	0.00	10.80	6.40	1.70	18.90		1387
118	7.60	1939	79.96	71.00	179.06	71.91		0.00	604.00	265.58	81.82		1353.33	
			1.99	5.84	7.79	1.84		0.00	9.90	7.49	0.85		35.70	
			2.55	3.65	10.33	1.88	18.41	0.00	10.24	6.31	1.37	17.92		1366
119	7.95	1998	86.78	82.94	161.85	36.75		0.00	672.41	224.36	67.80		1332.89	
			2.17	6.82	7.04	0.94		0.00	11.02	6.33	0.71		35.02	
			2.70	3.55	11.30	1.93	19.48	0.00	10.76	6.78	1.32	18.86		1405
120	7.80	1234	117.26	65.88	171.97	36.17		0.00	667.76	253.62	58.40		1371.07	
			2.93	5.42	7.48	0.93		0.00	10.95	7.15	0.61		35.45	
			2.30	2.70	6.00	0.74	11.74	0.00	6.84	3.56	0.85	11.25		879
121	7.50	2233	66.13	44.99	106.89	21.11		0.00	440.67	142.72	34.64		857.16	
			1.65	3.70	4.65	0.54		0.00	7.22	4.02	0.36		22.15	
			3.40	4.70	11.80	1.94	21.84	0.00	12.11	7.10	1.97	21.18		1562
122	7.40	1939	88.71	105.41	167.56	65.99		0.00	726.02	275.79	94.69		1524.16	
			2.21	8.67	7.29	1.69		0.00	11.90	7.78	0.99		40.52	
			3.85	3.75	10.03	1.27	18.90	0.00	10.90	6.25	1.35	18.50		1359
123	7.40	1998	49.94	48.48	254.15	41.84		0.00	640.44	230.34	60.21		1325.40	
			1.25	3.99	11.05	1.07		0.00	10.50	6.50	0.63		34.97	
			3.75	3.95	9.95	1.35	19.00	0.00	10.73	6.03	1.75	18.51		1437
			55.36	57.70	255.30	42.81		0.00	691.08	240.62	58.89		1401.76	

Continuación.....Anexo 2

Sitio	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹										Σ mg y mmol	STD mgL ⁻¹
			Ca	Mg	Na	K	SUMA	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	SUMA		
124	7.55	2056	1.38	4.75	11.10	1.10		0.00	11.33	6.79	0.61		37.05	1426
			3.82	4.60	10.78	1.10	20.30	0.00	10.72	7.50	1.56	19.78		
			86.41	56.09	251.38	17.79		0.00	603.86	301.41	74.73		1391.66	
125	7.10	1880	2.16	4.61	10.93	0.46		0.00	9.90	8.50	0.78		37.33	1283
			3.15	3.65	9.68	1.08	17.56	0.00	10.15	5.91	1.01	17.07		
			123.08	47.41	185.15	18.18		0.00	516.94	304.96	55.76		1251.47	
126	7.30	2174	3.07	3.90	8.05	0.47		0.00	8.47	8.60	0.58		33.14	1506
			3.90	4.45	11.66	1.18	21.19	0.00	11.46	7.30	1.67	20.43		
			170.79	54.34	179.40	26.20		0.00	642.74	315.59	80.17		1469.24	
127	7.70	2056	4.26	4.47	7.80	0.67		0.00	10.54	8.90	0.83		37.47	1444
			3.80	4.35	10.68	1.08	19.91	0.00	11.18	6.85	1.40	19.43		
			132.97	51.10	210.45	17.79		0.00	632.24	292.55	71.43		1408.52	
128	7.50	1998	3.32	4.20	9.15	0.46		0.00	10.36	8.25	0.74		36.48	1421
			3.12	4.18	11.02	1.16	19.48	0.00	10.60	6.80	1.40	18.80		
			66.36	48.01	254.15	45.36		0.00	663.74	241.13	67.14		1385.88	
129	7.15	130	1.66	3.95	11.05	1.16		0.00	10.88	6.80	0.70		36.19	91
			0.16	0.24	0.70	0.18	1.28	0.00	0.82	0.31	0.12	1.25		
			8.62	7.30	2.07	5.04		0.00	50.37	10.64	4.78		88.82	
130	7.15	1998	0.22	0.60	0.09	0.13		0.00	0.83	0.30	0.05		2.21	1451
			2.98	3.96	10.71	1.22	18.87	0.00	10.46	6.48	1.44	18.38		
			54.99	50.75	269.10	45.36		0.00	700.71	239.36	55.43		1415.69	
131	7.40	1998	1.37	4.17	11.70	1.16		0.00	11.49	6.75	0.58		37.22	1448
			3.06	3.86	11.41	1.15	19.48	0.00	11.00	6.35	1.43	18.78		
			68.43	46.14	262.20	44.77		0.00	683.31	239.19	68.62		1412.66	
132	7.25	1998	1.71	3.79	11.40	1.15		0.00	11.20	6.75	0.71		36.71	1435
			2.98	3.70	11.63	1.16	19.47	0.00	11.10	6.35	1.30	18.75		
			48.53	53.14	270.25	45.16		0.00	671.11	249.13	62.36		1399.67	
133	7.25	2056	1.21	4.37	11.75	1.16		0.00	11.00	7.03	0.65		37.16	1477
			3.04	3.75	11.97	1.28	20.04	0.00	11.32	6.30	1.70	19.32		
			65.94	56.62	258.75	43.40		0.00	686.76	247.75	81.66		1440.88	
134	6.90	1175	1.65	4.66	11.25	1.11		0.00	11.26	6.99	0.85		37.75	856
			1.65	1.85	7.34	0.65	11.49	0.00	6.82	3.12	1.25	11.19		
			50.76	34.53	127.65	23.66		0.00	433.50	104.83	59.88		834.81	
135	7.00	1058	1.27	2.84	5.55	0.61		0.00	7.11	2.96	0.62		20.95	680
			1.50	1.85	6.23	0.64	10.22	0.00	6.52	2.35	0.98	9.85		
			52.97	39.64	93.15	19.35		0.00	329.45	83.33	45.20		663.10	
136	7.20	1322	1.32	3.26	4.05	0.50		0.00	5.40	2.35	0.47		17.35	964
			1.85	2.40	7.88	0.72	12.85	0.00	7.72	3.40	1.28	12.40		
			46.73	45.57	144.90	26.59		0.00	489.11	120.56	66.62		940.09	
137	7.05	1293	1.17	3.75	6.30	0.68		0.00	8.02	3.40	0.69		24.00	920
			1.75	2.08	7.70	0.88	12.41	0.00	7.53	3.25	1.31	12.09		
			54.76	41.54	136.85	25.61		0.00	460.63	115.25	62.69		897.31	
138	7.10	1528	1.37	3.42	5.95	0.66		0.00	7.55	3.25	0.65		22.84	1053
			2.30	3.15	8.38	0.86	14.69	0.00	9.32	3.75	1.24	14.31		
			61.70	53.63	158.70	29.33		0.00	445.37	245.31	32.99		1027.04	
			1.54	4.41	6.90	0.75		0.00	7.30	6.92	0.34		28.16	

Continuación.....Anexo 2

Sitio	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹										Σ mg y mmol	STD mgL ⁻¹
			Ca	Mg	Na	K	SUMA	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	SUMA		
139	7.10	1410	2.05	2.40	8.36	0.85	13.66	0.00	8.15	3.80	1.37	13.32		1036
			60.24	38.34	162.15	29.33		0.00	519.77	134.75	65.99		1010.56	
			1.50	3.15	7.05	0.75		0.00	8.52	3.80	0.69		25.46	
140	7.10	1293	1.60	2.15	8.27	0.61	12.63	0.00	7.51	3.30	1.37	12.18		941
			54.85	44.72	132.25	23.66		0.00	479.46	117.02	65.99		917.95	
			1.37	3.68	5.75	0.61		0.00	7.86	3.30	0.69		23.25	
141	7.20	1410	1.70	2.50	8.60	0.86	13.66	0.00	7.85	3.85	1.61	13.31		1023
			50.90	45.42	159.85	27.76		0.00	500.42	136.52	77.53		998.40	
			1.27	3.74	6.95	0.71		0.00	8.20	3.85	0.81		25.52	
142	7.25	1410	2.00	2.60	8.33	0.82	13.75	0.00	7.87	3.85	1.53	13.25		1038
			45.96	31.37	191.20	28.93		0.00	505.17	136.52	73.41		1012.56	
			1.15	2.58	8.31	0.74		0.00	8.28	3.85	0.76		25.67	
143	7.30	1410	1.80	2.90	7.85	1.20	13.75	0.00	8.53	3.75	1.12	13.40		1014
			62.77	40.52	153.35	31.08		0.00	439.27	138.29	124.42		989.73	
			1.57	3.33	6.67	0.80		0.00	7.20	3.90	1.30		24.76	
144	7.35	1175	1.65	2.10	7.01	0.84	11.60	0.00	7.06	2.80	1.44	11.30		865
			46.69	32.16	136.14	27.57		0.00	424.31	99.29	78.05		844.20	
			1.16	2.64	5.92	0.71		0.00	6.95	2.80	0.81		21.00	
145	7.10	1498	2.25	3.10	7.89	1.22	14.46	0.00	9.10	3.80	1.14	14.04		1045
			53.38	50.29	165.60	30.50		0.00	454.52	212.77	52.36		1019.42	
			1.33	4.14	7.20	0.78		0.00	7.45	6.00	0.55		27.44	
146	7.10	1528	2.38	3.24	7.89	1.18	14.69	0.00	9.33	3.80	1.08	14.21		1102
			59.99	51.87	164.45	30.69		0.00	457.58	134.75	175.40		1074.72	
			1.50	4.27	7.15	0.79		0.00	7.50	3.80	1.83		26.82	
147	7.15	1616	2.35	3.45	8.87	1.08	15.75	0.00	9.39	3.92	1.88	15.19		1198
			179.99	17.71	112.70	24.44		0.00	619.68	155.15	59.03		1168.69	
			4.49	1.46	4.90	0.63		0.00	10.16	4.38	0.61		26.62	
148	7.00	1528	2.12	3.15	8.55	1.08	14.90	0.00	9.50	3.90	1.12	14.52		1093
			51.57	53.28	169.05	30.89		0.00	457.58	138.29	165.72		1066.38	
			1.29	4.38	7.35	0.79		0.00	7.50	3.90	1.73		26.93	
149	7.80	369	0.55	0.86	1.88	0.32	3.61	0.00	2.74	0.55	0.20	3.49		284
			32.06	6.69	26.22	10.53		0.00	183.98	15.96	1.29		276.72	
			0.80	0.55	1.14	0.27		0.00	3.02	0.45	0.01		6.24	
150	7.25	1293	1.90	2.86	7.05	0.96	12.77	0.00	8.14	3.15	1.02	12.31		932
			57.14	46.23	125.35	26.00		0.00	433.17	111.70	109.84		909.42	
			1.43	3.80	5.45	0.67		0.00	7.10	3.15	1.14		22.74	
151	6.80	1968	2.78	4.10	10.43	1.88	19.19	0.00	13.35	3.95	1.22	18.52		1452
			75.30	87.04	166.68	50.44		0.00	887.70	117.02	32.50		1416.67	
			1.88	7.16	7.25	1.29		0.00	14.55	3.30	0.34		35.76	
152	7.40	1410	2.35	3.26	7.00	1.14	13.75	0.00	8.19	3.72	1.36	13.27		1025
			68.36	48.70	133.40	27.96		0.00	518.59	129.43	73.54		999.97	
			1.71	4.00	5.80	0.72		0.00	8.50	3.65	0.77		25.14	
153	8.25	1293	2.05	2.80	6.69	0.98	12.52	0.00	7.75	3.15	1.30	12.20		724
			71.56	40.53	121.90	22.29		0.00	292.85	117.02	40.25		706.39	
			1.79	3.33	5.30	0.57		0.00	4.80	3.30	0.42		19.51	
154	7.90	602	1.02	1.24	2.95	0.68	5.89	0.00	4.12	1.24	0.38	5.74		411

Continuación.....Anexo 2

Sitio	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹									Σ mg y mmol	STD mgL ⁻¹	
			Ca	Mg	Na	K	SUMA	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄			SUMA
155	7.85	369	35.07	21.89	40.50	18.96		0.00	187.76	79.81	16.52		400.52	
			0.88	1.80	1.76	0.49		0.00	3.08	2.25	0.17		10.42	
			0.65	0.98	1.62	0.35	3.60	0.00	2.64	0.65	0.18	3.47		266
156	8.55	1058	37.07	13.98	11.40	5.65		0.00	170.83	17.73	2.97		259.63	
			0.93	1.15	0.50	0.14		0.00	2.80	0.50	0.03		6.05	
			1.25	2.05	6.50	0.62	10.42	0.58	6.79	2.14	0.64	10.15		681
157	7.85	1410	38.08	25.45	134.55	23.85		30.00	151.57	187.20	73.90		664.59	
			0.95	2.09	5.85	0.61		0.50	2.48	5.28	0.77		18.54	
			2.40	3.70	6.63	1.02	13.75	0.00	8.73	3.65	1.02	13.40		1020
158	8.60	1085	83.55	32.88	149.50	21.31		0.00	504.68	163.46	39.38		994.76	
			2.08	2.70	6.50	0.55		0.00	8.27	4.61	0.41		25.13	
			1.20	3.00	5.56	0.82	10.58	0.65	5.23	3.40	0.92	10.20		750
159	8.90	1175	62.65	15.20	128.80	27.96		26.96	285.70	145.30	39.40		731.97	
			1.56	1.25	5.60	0.72		0.45	4.68	4.10	0.41		18.77	
			1.68	2.40	6.52	0.58	11.18	0.30	6.29	2.95	1.14	10.69		789
160	8.90	1175	57.71	42.02	108.10	21.31		24.00	291.39	154.63	70.44		769.61	
			1.44	3.46	4.70	0.55		0.40	4.78	4.36	0.73		20.41	
			1.55	1.95	7.56	0.54	11.60	0.45	6.77	2.90	1.23	11.35		799
161	8.50	1616	56.81	31.01	128.80	24.44		13.80	287.27	150.95	69.94		779.22	
			1.42	2.55	5.60	0.63		0.23	4.71	4.26	0.73		20.39	
			2.65	3.25	8.73	1.02	15.65	0.64	8.83	4.40	1.23	15.10		1061
162	8.35	1645	80.36	55.01	154.10	28.15		75.00	379.77	202.33	60.71		1035.43	
			2.00	4.52	6.70	0.72		1.25	6.22	5.71	0.63		27.76	
			2.40	2.96	9.64	1.04	16.04	0.00	9.73	3.96	1.76	15.45		1170
163	8.65	1968	81.16	52.90	163.86	28.35		0.00	547.93	195.33	71.71		1141.22	
			2.03	4.35	7.12	0.73		0.00	8.98	5.51	0.75		29.46	
			3.24	3.62	11.17	1.16	19.19	1.10	9.75	6.41	1.43	18.69		1298
164	8.85	583	37.22	32.83	318.55	21.70		48.00	432.39	292.55	83.21		1266.45	
			0.93	2.70	13.85	0.56		0.80	7.09	8.25	0.87		35.04	
			0.98	1.18	2.93	0.59	5.68	0.32	3.30	1.60	0.28	5.50		388
165	8.60	602	39.08	14.59	44.29	26.98		22.37	122.02	85.10	23.92		378.35	
			0.98	1.20	1.93	0.69		0.37	2.00	2.40	0.25		9.81	
			1.06	1.34	2.85	0.58	5.83	0.32	3.50	1.54	0.32	5.68		387
166	8.05	597	37.07	18.38	43.65	21.16		28.95	134.91	71.28	22.55		377.95	
			0.93	1.51	1.90	0.54		0.48	2.21	2.01	0.23		9.81	
			1.03	1.16	3.01	0.61	5.81	0.00	3.78	1.58	0.30	5.66		423
167	7.95	1733	52.38	16.77	27.60	21.90		0.00	211.51	59.30	22.88		412.33	
			1.31	1.38	1.20	0.56		0.00	3.47	1.67	0.24		9.82	
			3.20	3.62	8.97	1.10	16.89	0.00	10.16	4.85	1.44	16.45		1233
168	8.65	1586	85.17	44.38	193.89	30.50		0.00	546.79	215.57	86.43		1202.74	
			2.13	3.65	8.43	0.78		0.00	8.96	6.08	0.90		30.93	
			2.42	3.08	8.84	1.12	15.46	0.96	9.08	3.76	1.26	15.06		1049
169	8.20	2703	72.14	57.15	153.56	27.17		63.00	395.09	206.44	49.16		1023.72	
			1.80	4.70	6.68	0.70		1.05	6.48	5.82	0.51		27.73	
			2.86	4.12	18.03	1.42	26.43	0.00	14.30	9.72	1.73	25.75		1838
			28.06	20.67	522.70	33.63		00.00	612.63	424.74	61.20		1793.62	
			0.70	1.70	22.73	0.86		0.00	10.04	11.98	0.64		50.14	

Continuación.....Anexo 2

Sitio	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹							Σ mg y mmol	STD mgL ⁻¹			
			Ca	Mg	Na	K	SUMA	CO ₃	HCO ₃			Cl	SO ₄	SUMA
170	8.25	1763	3.26	3.86	8.75	1.04	16.91	0.00	9.45	5.58	1.39	16.42		1256
			76.15	44.99	210.11	30.50		0.00	565.85	226.98	70.60		1225.18	
			1.90	3.70	9.14	0.78		0.00	9.27	6.40	0.73		31.93	
171	8.25	1763	3.14	3.98	9.09	0.98	17.19	1.05	8.94	5.70	1.06	16.75		1263
			80.16	47.42	200.65	30.69		0.00	587.74	208.88	77.13		1232.67	
			2.00	3.90	8.72	0.79		0.00	9.63	5.89	0.80		31.74	
172	8.20	1586	2.48	3.24	8.96	0.98	15.66	0.00	9.86	4.10	1.12	15.08		1124
			72.23	55.68	156.40	27.17		0.00	532.05	193.00	60.54		1097.07	
			1.80	4.58	6.80	0.70		0.00	8.72	5.44	0.63		28.67	
173	8.20	1645	2.86	3.42	8.78	1.03	16.09	0.00	9.91	4.50	1.20	15.61		1170
			82.38	55.11	158.70	27.37		0.00	563.60	196.54	57.57		1141.28	
			2.06	4.53	6.90	0.70		0.00	9.24	5.54	0.60		29.57	
174	8.40	1586	2.48	3.12	8.72	1.04	15.36	0.86	9.25	3.46	1.24	14.81		876
			74.15	52.90	105.33	27.17		66.00	311.43	166.23	51.80		855.01	
			1.85	4.35	4.58	0.70		1.10	5.10	4.69	0.54		22.91	
175	8.20	1586	3.24	4.15	7.08	1.02	15.49	0.00	10.30	3.46	1.18	14.94		1125
			78.16	54.72	151.50	27.17		0.00	532.01	191.93	62.10		1097.59	
			1.95	4.50	6.59	0.70		0.00	8.72	5.41	0.65		28.51	
176	7.95	2409	3.12	3.90	15.38	1.16	23.56	0.00	13.82	7.12	1.86	22.80		1800
			96.19	38.30	347.76	35.78		0.00	867.46	244.99	125.86		1756.35	
			2.40	3.15	15.12	0.92		0.00	14.22	6.91	1.31		44.02	
177	8.20	1557	2.46	3.70	8.43	0.74	15.33	0.00	9.83	3.96	1.14	14.93		1144
			74.15	48.64	159.85	28.74		0.00	604.42	145.39	54.77		1115.95	
			1.85	4.00	6.95	0.74		0.00	9.91	4.10	0.57		28.11	
178	8.00	613	1.04	1.28	3.09	0.64	6.05	0.00	3.91	1.64	0.34	5.89		443
			50.10	17.39	40.79	14.32		0.00	230.44	64.29	15.34		432.66	
			1.25	1.43	1.77	0.37		0.00	3.78	1.81	0.16		10.57	
179	8.30	1586	2.38	3.08	8.88	1.02	15.36	0.00	9.68	3.92	1.22	14.82		1121
			73.15	57.76	151.10	26.98		0.00	532.45	193.42	58.56		1093.41	
			1.83	4.75	6.57	0.69		0.00	8.73	5.45	0.61		28.63	
180	8.30	1763	3.12	4.12	8.81	1.02	17.07	0.00	9.26	6.12	1.09	16.47		1245
			80.16	47.42	201.25	29.52		0.00	553.19	238.33	64.67		1214.55	
			2.00	3.90	8.75	0.76		0.00	9.07	6.72	0.67		31.87	
181	8.30	1645	2.82	3.12	9.27	1.04	16.25	0.92	9.89	3.39	1.48	15.68		30
			1.93	4.80	6.90	0.69		0.00	9.97	4.50	0.76		29.55	
			2.82	3.12	9.27	1.04		0.92	9.89	3.39	1.48		31.93	
182	8.10	2409	2.96	3.80	15.40	1.32	23.48	0.00	11.86	8.86	2.15	22.87		1766
			89.98	43.30	342.70	34.60		0.00	823.75	262.40	125.74		1722.48	
			2.25	3.56	14.90	0.89		0.00	13.50	7.40	1.31		43.80	
183	8.25	1586	2.45	3.08	8.97	1.02	15.52	0.00	9.88	3.92	1.32	15.12		1135
			75.15	56.54	151.34	26.78		0.00	538.69	159.57	98.81		1106.89	
			1.88	4.65	6.58	0.69		0.00	8.83	4.50	1.03		28.15	
184	8.15	1586	2.35	3.65	8.23	1.13	15.36	0.00	10.05	3.78	1.13	14.96		1059
			78.70	51.43	156.34	27.17		0.00	407.06	193.29	56.09		1033.08	
			1.96	4.23	6.80	0.69		0.00	6.67	5.45	0.58		27.44	

Continuación.....Anexo 2

Sitio	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹									Σ mg y mmol	STD mgL ⁻¹		
			Ca	Mg	Na	K	SUMA	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄			SUMA	
185	8.15	1704	2.98	3.80	8.68	1.13	16.59	0.00	10.32	4.15	1.69	16.16		1193	
			80.80	44.51	195.50	25.22		0.00	505.75	241.80	70.77			1164.34	
			2.02	3.66	8.50	0.65		0.00	8.29	6.82	0.74			30.67	
186	8.00	1469	2.20	3.12	7.92	1.08	14.32	0.00	9.07	3.80	1.08	13.95		953	
			82.16	45.36	139.17	24.19		0.00	319.48	164.89	64.65			929.90	
			2.05	3.73	6.05	0.62		1.50	5.24	4.65	0.67			24.51	
187	7.70	1410	2.12	2.64	8.24	0.92	13.92	0.00	7.07	3.48	2.87	13.42		847	
			58.82	32.83	182.85	13.49		0.00	284.35	118.07	234.08			951.50	
			1.47	2.70	7.95	0.34		0.45	4.66	3.33	2.44			23.34	
188	7.75	1234	2.10	2.90	6.17	1.02	12.19	0.00	6.92	3.70	1.14	11.76		408	
			71.79	30.68	127.65	20.12		0.00	397.78	152.76	54.60			855.39	
			1.79	2.52	5.55	0.51		0.00	6.52	4.31	0.57			21.78	
189	7.80	588	0.42	1.80	3.11	0.48	5.81	0.00	3.66	1.40	0.60	5.66		975	
			34.92	6.69	73.31	12.76		0.00	219.91	14.18	29.36			398.50	
			0.87	0.55	3.19	0.33		0.12	3.60	0.40	0.31			9.37	
190	8.25	1293	1.75	2.35	7.61	0.90	12.61	0.00	7.60	3.80	0.88	12.28		877	
			70.97	31.99	139.63	20.57		0.00	257.86	134.75	92.96			826.73	
			1.77	2.63	6.07	0.53		1.30	4.23	3.80	0.97			21.29	

Anexo 3. Presión osmótica calculada por tres métodos de las aguas de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán.

Sitio	CE μS cm ⁻¹	°K	R		P ₁ =0.024*X		$P_{O_2} = \frac{n * R * T}{V}$		mg L ⁻¹	PO ₃ =(mg L ⁻¹) * (0.0004/0.6777)	
			L atm K ⁻¹ mol	mMol	atm	Mpa	atm	Mpa		atm	MPa
1 Otoño 2008	1952	295.15	0.082057	31.82	0.76	0.077	0.77	0.078	1289.13	0.76	0.077
02	2187	295.15	0.082057	36.18	0.87	0.088	0.88	0.089	1447.21	0.85	0.087
03	1627	295.15	0.082057	26.23	0.63	0.064	0.64	0.064	1167.32	0.69	0.070
04	416	295.15	0.082057	6.32	0.15	0.015	0.15	0.016	290.99	0.17	0.017
05	2314	295.15	0.082057	36.81	0.88	0.090	0.89	0.090	1507.14	0.89	0.090
06	434	295.15	0.082057	6.39	0.15	0.016	0.15	0.016	302.14	0.18	0.018
07	1518	295.15	0.082057	24.20	0.58	0.059	0.59	0.059	1060.82	0.63	0.063
08	1753	295.15	0.082057	28.37	0.68	0.069	0.69	0.070	1210.62	0.71	0.072
09	2061	295.15	0.082057	34.72	0.83	0.084	0.84	0.085	1464.29	0.86	0.088
10	1952	295.15	0.082057	32.50	0.78	0.079	0.79	0.080	1350.38	0.80	0.081
11	2278	295.15	0.082057	38.06	0.91	0.093	0.92	0.093	1555.02	0.92	0.093
12	1772	295.15	0.082057	28.37	0.68	0.069	0.69	0.070	1166.49	0.69	0.070
13	1645	295.15	0.082057	27.46	0.66	0.067	0.66	0.067	1138.31	0.67	0.068
14	2043	295.15	0.082057	34.00	0.82	0.083	0.82	0.083	1392.60	0.82	0.083
15	217	295.15	0.082057	3.05	0.07	0.007	0.07	0.007	154.01	0.09	0.009
16	2205	295.15	0.082057	37.37	0.90	0.091	0.91	0.092	1528.50	0.90	0.091
17	2205	295.15	0.082057	37.18	0.89	0.090	0.90	0.091	1509.70	0.89	0.090
18	2061	295.15	0.082057	34.17	0.82	0.083	0.83	0.084	1391.08	0.82	0.083
19	1030	295.15	0.082057	16.18	0.39	0.039	0.39	0.040	709.65	0.42	0.042
20	940	295.15	0.082057	14.95	0.36	0.036	0.36	0.037	653.31	0.39	0.039
21	528	295.15	0.082057	7.51	0.18	0.018	0.18	0.018	362.03	0.21	0.022
22	484	295.15	0.082057	6.65	0.16	0.016	0.16	0.016	325.54	0.19	0.019
23	551	295.15	0.082057	7.97	0.19	0.019	0.19	0.020	376.29	0.22	0.023
24	3109	295.15	0.082057	46.13	1.11	0.112	1.12	0.113	2128.04	1.26	0.127
25	1699	295.15	0.082057	27.75	0.67	0.067	0.67	0.068	1159.58	0.68	0.069
26	1708	295.15	0.082057	27.81	0.67	0.068	0.67	0.068	1146.97	0.68	0.069
27	651	295.15	0.082057	9.39	0.23	0.023	0.23	0.023	450.86	0.27	0.027
28	1699	295.15	0.082057	28.08	0.67	0.068	0.68	0.069	1177.44	0.69	0.070
29	1157	295.15	0.082057	17.49	0.42	0.043	0.42	0.043	779.82	0.46	0.047
30	376	295.15	0.082057	5.66	0.14	0.014	0.14	0.014	272.38	0.16	0.016
31	1121	295.15	0.082057	17.06	0.41	0.041	0.41	0.042	771.23	0.46	0.046
32	651	295.15	0.082057	9.81	0.24	0.024	0.24	0.024	431.23	0.25	0.026
33	1139	295.15	0.082057	17.52	0.42	0.043	0.42	0.043	799.86	0.47	0.048
34	1121	295.15	0.082057	17.23	0.41	0.042	0.42	0.042	776.18	0.46	0.046
35	2458	295.15	0.082057	36.24	0.87	0.088	0.88	0.089	1633.79	0.96	0.098
36	1410	295.15	0.082057	23.18	0.56	0.056	0.56	0.057	950.79	0.56	0.057
37	1265	295.15	0.082057	20.58	0.49	0.050	0.50	0.051	849.22	0.50	0.051
38	1283	295.15	0.082057	20.92	0.50	0.051	0.51	0.051	875.63	0.52	0.052
39	1211	295.15	0.082057	18.47	0.44	0.045	0.45	0.045	814.84	0.48	0.049
40	578	295.15	0.082057	8.21	0.20	0.020	0.20	0.020	400.16	0.24	0.024
41	1247	295.15	0.082057	20.33	0.49	0.049	0.49	0.050	851.44	0.50	0.051
42	1211	295.15	0.082057	18.17	0.44	0.044	0.44	0.045	804.59	0.47	0.048

Continuación.....Anexo 3

Sitio	CE μS cm ⁻¹	°K	R		P _i =0.024*X		$PO_2 = \frac{n * R * T}{V}$		mg L ⁻¹	PO ₃ =(mg L ⁻¹) * (0.0004/0.6777)	
			L atm K ⁻¹ mol	mMol	atm	Mpa	atm	Mpa		atm	MPa
43	850	295.15	0.082057	11.59	0.28	0.028	0.28	0.028	519.70	0.31	0.031
44	174	295.15	0.082057	2.38	0.06	0.006	0.06	0.006	115.26	0.07	0.007
45	1302	295.15	0.082057	21.09	0.51	0.051	0.51	0.052	886.40	0.52	0.053
46	850	295.15	0.082057	12.67	0.30	0.031	0.31	0.031	574.22	0.34	0.034
47	868	295.15	0.082057	13.37	0.32	0.033	0.32	0.033	585.93	0.35	0.035
48	868	295.15	0.082057	13.41	0.32	0.033	0.32	0.033	605.26	0.36	0.036
49	202	295.15	0.082057	2.84	0.07	0.007	0.07	0.007	143.50	0.08	0.009
50	607	295.15	0.082057	9.26	0.22	0.023	0.22	0.023	416.24	0.25	0.025
51	795	295.15	0.082057	11.68	0.28	0.028	0.28	0.029	533.33	0.31	0.032
52	868	295.15	0.082057	13.36	0.32	0.032	0.32	0.033	585.00	0.35	0.035
53	1374	295.15	0.082057	22.46	0.54	0.055	0.54	0.055	933.56	0.55	0.056
54	1844	295.15	0.082057	29.65	0.71	0.072	0.72	0.073	1224.98	0.72	0.073
55	1356	295.15	0.082057	22.18	0.53	0.054	0.54	0.054	915.81	0.54	0.055
56	1320	295.15	0.082057	21.60	0.52	0.053	0.52	0.053	903.29	0.53	0.054
57	2061	295.15	0.082057	35.04	0.84	0.085	0.85	0.086	1400.17	0.83	0.084
58	108	295.15	0.082057	1.59	0.04	0.004	0.04	0.004	74.29	0.04	0.004
59	1844	295.15	0.082057	30.13	0.72	0.073	0.73	0.074	1213.97	0.72	0.073
60	1844	295.15	0.082057	30.20	0.72	0.073	0.73	0.074	1241.63	0.73	0.074
61	1826	295.15	0.082057	30.38	0.73	0.074	0.74	0.075	1247.35	0.74	0.075
62	859	295.15	0.082057	13.17	0.32	0.032	0.32	0.032	583.55	0.34	0.035
63	777	295.15	0.082057	12.00	0.29	0.029	0.29	0.029	536.94	0.32	0.032
64	1808	295.15	0.082057	29.87	0.72	0.073	0.72	0.073	1199.43	0.71	0.072
65	1772	295.15	0.082057	29.25	0.70	0.071	0.71	0.072	1182.04	0.70	0.071
66	813	295.15	0.082057	12.62	0.30	0.031	0.31	0.031	556.65	0.33	0.033
67	1591	295.15	0.082057	25.70	0.62	0.062	0.62	0.063	1057.40	0.62	0.063
68	976	295.15	0.082057	15.35	0.37	0.037	0.37	0.038	637.48	0.38	0.038
69	813	295.15	0.082057	12.21	0.29	0.030	0.30	0.030	546.77	0.32	0.033
70	904	295.15	0.082057	13.40	0.32	0.033	0.32	0.033	608.65	0.36	0.036
71	759	295.15	0.082057	11.33	0.27	0.028	0.27	0.028	504.91	0.30	0.030
72	759	295.15	0.082057	11.36	0.27	0.028	0.28	0.028	521.49	0.31	0.031
73	795	295.15	0.082057	12.50	0.30	0.030	0.30	0.031	528.98	0.31	0.032
74	759	295.15	0.082057	11.66	0.28	0.028	0.28	0.029	535.38	0.32	0.032
75	1735	295.15	0.082057	29.06	0.70	0.071	0.70	0.071	1229.28	0.73	0.074
76	940	295.15	0.082057	14.56	0.35	0.035	0.35	0.036	637.17	0.38	0.038
77	696	295.15	0.082057	10.26	0.25	0.025	0.25	0.025	474.23	0.28	0.028
78	1482	295.15	0.082057	23.40	0.56	0.057	0.57	0.057	1006.82	0.59	0.060
79	913	295.15	0.082057	14.25	0.34	0.035	0.35	0.035	619.47	0.37	0.037
80	1012	295.15	0.082057	16.12	0.39	0.039	0.39	0.040	688.85	0.41	0.041
81	705	295.15	0.082057	10.45	0.25	0.025	0.25	0.026	478.57	0.28	0.029
82	958	295.15	0.082057	15.38	0.37	0.037	0.37	0.038	669.17	0.39	0.040
83	904	295.15	0.082057	14.45	0.35	0.035	0.35	0.035	626.10	0.37	0.037
84	1085	295.15	0.082057	16.36	0.39	0.040	0.40	0.040	726.42	0.43	0.043
85	1175	295.15	0.082057	17.61	0.42	0.043	0.43	0.043	773.80	0.46	0.046

Continuación.....Anexo 3

Sitio	CE μS cm ⁻¹	°K	R L atm K ⁻¹ mol	mMol	P ₁ =0.024*X		P _{O₂} = $\frac{n * R * T}{V}$		mg L ⁻¹	PO ₃ =(mg L ⁻¹) * (0.0004/0.6777)	
					atm	Mpa	atm	Mpa		atm	MPa
86	1085	295.15	0.082057	16.39	0.39	0.040	0.40	0.040	721.20	0.43	0.043
87	958	295.15	0.082057	15.41	0.37	0.037	0.37	0.038	635.73	0.38	0.038
88	958	295.15	0.082057	14.48	0.35	0.035	0.35	0.036	633.01	0.37	0.038
89	1247	295.15	0.082057	19.02	0.46	0.046	0.46	0.047	831.33	0.49	0.050
90	967	295.15	0.082057	14.35	0.34	0.035	0.35	0.035	641.12	0.38	0.038
91	1844	295.15	0.082057	31.07	0.75	0.076	0.75	0.076	1321.64	0.78	0.079
92	333	295.15	0.082057	5.03	0.12	0.012	0.12	0.012	226.94	0.13	0.014
93	976	295.15	0.082057	14.96	0.36	0.036	0.36	0.037	679.42	0.40	0.041
94	260	295.15	0.082057	3.88	0.09	0.009	0.09	0.010	185.58	0.11	0.011
95	922	295.15	0.082057	14.27	0.34	0.035	0.35	0.035	634.37	0.37	0.038
96	922	295.15	0.082057	14.39	0.35	0.035	0.35	0.035	631.18	0.37	0.038
97	958	295.15	0.082057	15.22	0.37	0.037	0.37	0.037	642.48	0.38	0.038
98	1139	295.15	0.082057	17.50	0.42	0.043	0.42	0.043	770.13	0.45	0.046
99	1320	295.15	0.082057	20.93	0.50	0.051	0.51	0.051	895.24	0.53	0.054
100	293	295.15	0.082057	4.34	0.10	0.011	0.11	0.011	203.49	0.12	0.012
101	1735	295.15	0.082057	29.31	0.70	0.071	0.71	0.072	1184.24	0.70	0.071
102	597	295.15	0.082057	8.70	0.21	0.021	0.21	0.021	411.85	0.24	0.025
103	1085	295.15	0.082057	16.47	0.40	0.040	0.40	0.040	731.80	0.43	0.044
104	651	295.15	0.082057	9.74	0.23	0.024	0.24	0.024	438.51	0.26	0.026
105	1085	295.15	0.082057	16.53	0.40	0.040	0.40	0.041	737.29	0.44	0.044
106	1157	295.15	0.082057	18.35	0.44	0.045	0.44	0.045	771.86	0.46	0.046
107	1338	295.15	0.082057	18.43	0.44	0.045	0.45	0.045	772.05	0.46	0.046
108 Verano 2009	2321	295.15	0.082057	42.88	1.03	0.104	1.04	0.105	1585.94	0.94	0.095
109	2262	295.15	0.082057	41.79	1.00	0.102	1.01	0.103	1542.11	0.91	0.092
110	2262	295.15	0.082057	41.72	1.00	0.101	1.01	0.102	1576.78	0.93	0.094
111	2644	295.15	0.082057	44.18	1.06	0.107	1.07	0.108	1751.15	1.03	0.105
112	2056	295.15	0.082057	37.14	0.89	0.090	0.90	0.091	1408.00	0.83	0.084
113	2233	295.15	0.082057	40.96	0.98	0.100	0.99	0.101	1551.84	0.92	0.093
114	1998	295.15	0.082057	35.84	0.86	0.087	0.87	0.088	1358.79	0.80	0.081
115	588	295.15	0.082057	9.14	0.22	0.022	0.22	0.022	375.77	0.22	0.022
116	793	295.15	0.082057	14.16	0.34	0.034	0.34	0.035	570.17	0.34	0.034
117	1968	295.15	0.082057	35.70	0.86	0.087	0.86	0.088	1353.33	0.80	0.081
118	1939	295.15	0.082057	35.02	0.84	0.085	0.85	0.086	1332.89	0.79	0.080
119	1998	295.15	0.082057	35.45	0.85	0.086	0.86	0.087	1371.07	0.81	0.082
120	1234	295.15	0.082057	22.15	0.53	0.054	0.54	0.054	857.16	0.51	0.051
121	2233	295.15	0.082057	40.52	0.97	0.099	0.98	0.099	1524.16	0.90	0.091
122	1939	295.15	0.082057	34.97	0.84	0.085	0.85	0.086	1325.40	0.78	0.079
123	1998	295.15	0.082057	37.05	0.89	0.090	0.90	0.091	1401.76	0.83	0.084
124	2056	295.15	0.082057	37.33	0.90	0.091	0.90	0.092	1391.66	0.82	0.083
125	1880	295.15	0.082057	33.14	0.80	0.081	0.80	0.081	1251.47	0.74	0.075
126	2174	295.15	0.082057	37.47	0.90	0.091	0.91	0.092	1469.24	0.87	0.088
127	2056	295.15	0.082057	36.48	0.88	0.089	0.88	0.090	1408.52	0.83	0.084
128	1998	295.15	0.082057	36.19	0.87	0.088	0.88	0.089	1385.88	0.82	0.083

Continuación.....Anexo 3

Sitio	CE μS cm ⁻¹	°K	R L atm K ⁻¹ mol	mMol	P _i =0.024*X		$PO_2 = \frac{n * R * T}{V}$		mg L ⁻¹	PO ₃ =(mg L ⁻¹) * (0.0004/0.6777)	
					atm	Mpa	atm	Mpa		atm	MPa
129	130	295.15	0.082057	2.21	0.05	0.005	0.05	0.005	88.82	0.05	0.005
130	1998	295.15	0.082057	37.22	0.89	0.091	0.90	0.091	1415.69	0.84	0.085
131	1998	295.15	0.082057	36.71	0.88	0.089	0.89	0.090	1412.66	0.83	0.084
132	1998	295.15	0.082057	37.16	0.89	0.090	0.90	0.091	1399.67	0.83	0.084
133	2056	295.15	0.082057	37.75	0.91	0.092	0.91	0.093	1440.88	0.85	0.086
134	1175	295.15	0.082057	20.95	0.50	0.051	0.51	0.051	834.81	0.49	0.050
135	1058	295.15	0.082057	17.35	0.42	0.042	0.42	0.043	663.10	0.39	0.040
136	1322	295.15	0.082057	24.00	0.58	0.058	0.58	0.059	940.09	0.55	0.056
137	1293	295.15	0.082057	22.84	0.55	0.056	0.55	0.056	897.31	0.53	0.054
138	1528	295.15	0.082057	28.16	0.68	0.068	0.68	0.069	1027.04	0.61	0.061
139	1410	295.15	0.082057	25.46	0.61	0.062	0.62	0.062	1010.56	0.60	0.060
140	1293	295.15	0.082057	23.25	0.56	0.057	0.56	0.057	917.95	0.54	0.055
141	1410	295.15	0.082057	25.52	0.61	0.062	0.62	0.063	998.40	0.59	0.060
142	1410	295.15	0.082057	25.67	0.62	0.062	0.62	0.063	1012.56	0.60	0.061
143	1410	295.15	0.082057	24.76	0.59	0.060	0.60	0.061	989.73	0.58	0.059
144	1175	295.15	0.082057	21.00	0.50	0.051	0.51	0.052	844.20	0.50	0.050
145	1498	295.15	0.082057	27.44	0.66	0.067	0.66	0.067	1019.42	0.60	0.061
146	1528	295.15	0.082057	26.82	0.64	0.065	0.65	0.066	1074.72	0.63	0.064
147	1616	295.15	0.082057	26.62	0.64	0.065	0.64	0.065	1168.69	0.69	0.070
148	1528	295.15	0.082057	26.93	0.65	0.065	0.65	0.066	1066.38	0.63	0.064
149	369	295.15	0.082057	6.24	0.15	0.015	0.15	0.015	276.72	0.16	0.017
150	1293	295.15	0.082057	22.74	0.55	0.055	0.55	0.056	909.42	0.54	0.054
151	1968	295.15	0.082057	35.76	0.86	0.087	0.87	0.088	1416.67	0.84	0.085
152	1410	295.15	0.082057	25.14	0.60	0.061	0.61	0.062	999.97	0.59	0.060
153	1293	295.15	0.082057	19.51	0.47	0.047	0.47	0.048	706.39	0.42	0.042
154	602	295.15	0.082057	10.42	0.25	0.025	0.25	0.026	400.52	0.24	0.024
155	369	295.15	0.082057	6.05	0.15	0.015	0.15	0.015	259.63	0.15	0.016
156	1058	295.15	0.082057	18.54	0.44	0.045	0.45	0.045	664.59	0.39	0.040
157	1410	295.15	0.082057	25.13	0.60	0.061	0.61	0.062	994.76	0.59	0.059
158	1085	295.15	0.082057	18.77	0.45	0.046	0.45	0.046	731.97	0.43	0.044
159	1175	295.15	0.082057	20.41	0.49	0.050	0.49	0.050	769.61	0.45	0.046
160	1175	295.15	0.082057	20.39	0.49	0.050	0.49	0.050	779.22	0.46	0.047
161	1616	295.15	0.082057	27.76	0.67	0.068	0.67	0.068	1035.43	0.61	0.062
162	1645	295.15	0.082057	29.46	0.71	0.072	0.71	0.072	1141.22	0.67	0.068
163	1968	295.15	0.082057	35.04	0.84	0.085	0.85	0.086	1266.45	0.75	0.076
164	583	295.15	0.082057	9.81	0.24	0.024	0.24	0.024	378.35	0.22	0.023
165	602	295.15	0.082057	9.81	0.24	0.024	0.24	0.024	377.95	0.22	0.023
166	597	295.15	0.082057	9.82	0.24	0.024	0.24	0.024	412.33	0.24	0.025
167	1733	295.15	0.082057	30.93	0.74	0.075	0.75	0.076	1202.74	0.71	0.072
168	1586	295.15	0.082057	27.73	0.67	0.067	0.67	0.068	1023.72	0.60	0.061
169	2703	295.15	0.082057	50.14	1.20	0.122	1.21	0.123	1793.62	1.06	0.107
170	1763	295.15	0.082057	31.93	0.77	0.078	0.77	0.078	1225.18	0.72	0.073
171	1763	295.15	0.082057	31.74	0.76	0.077	0.77	0.078	1232.67	0.73	0.074

Continuación.....Anexo 3

Sitio	CE μS cm ⁻¹	°K	R L atm K ⁻¹ mol	mMol	P _i =0.024*X		P _{O₂} = $\frac{n * R * T}{V}$		mg L ⁻¹	PO ₃ =(mg L ⁻¹) * (0.0004/0.6777)	
					atm	Mpa	atm	Mpa		atm	MPa
172	1586	295.15	0.082057	28.67	0.69	0.070	0.69	0.070	1097.07	0.65	0.066
173	1645	295.15	0.082057	29.57	0.71	0.072	0.72	0.073	1141.28	0.67	0.068
174	1586	295.15	0.082057	22.91	0.55	0.056	0.55	0.056	855.01	0.50	0.051
175	1586	295.15	0.082057	28.51	0.68	0.069	0.69	0.070	1097.59	0.65	0.066
176	2409	295.15	0.082057	44.02	1.06	0.107	1.07	0.108	1756.35	1.04	0.105
177	1557	295.15	0.082057	28.11	0.67	0.068	0.68	0.069	1115.95	0.66	0.067
178	613	295.15	0.082057	10.57	0.25	0.026	0.26	0.026	432.66	0.26	0.026
179	1586	295.15	0.082057	28.63	0.69	0.070	0.69	0.070	1093.41	0.65	0.065
180	1763	295.15	0.082057	31.87	0.76	0.077	0.77	0.078	1214.55	0.72	0.073
181	1645	295.15	0.082057	31.93	0.77	0.078	0.77	0.078	29.55	0.02	0.002
182	2409	295.15	0.082057	43.80	1.05	0.107	1.06	0.107	1722.48	1.02	0.103
183	1586	295.15	0.082057	28.15	0.68	0.068	0.68	0.069	1106.89	0.65	0.066
184	1586	295.15	0.082057	27.44	0.66	0.067	0.66	0.067	1033.08	0.61	0.062
185	1704	295.15	0.082057	30.67	0.74	0.075	0.74	0.075	1164.34	0.69	0.070
186	1469	295.15	0.082057	24.51	0.59	0.060	0.59	0.060	929.90	0.55	0.056
187	1293	295.15	0.082057	21.29	0.51	0.052	0.52	0.052	826.73	0.49	0.049
188	588	295.15	0.082057	9.37	0.22	0.023	0.23	0.023	398.50	0.24	0.024
189	1410	295.15	0.082057	23.34	0.56	0.057	0.57	0.057	951.50	0.56	0.057
190	1234	295.15	0.082057	21.78	0.52	0.053	0.53	0.053	855.39	0.50	0.051
Media				19.35	0.46	0.05	0.47	0.05	787.04	0.46	0.05
Mediana				22.32	0.54	0.05	0.54	0.05	896.28	0.53	0.05
Desvest				10.82	0.26	0.05	.26	0.05	412.31	0.24	0.02

Anexo 4. Valores de los diferentes RAS determinados de acuerdo con sus diferentes formulaciones.

Sitio	pH _a	pH _c	Indice de Saturación	RAS original	RASaj ajustado	RAS° corregido	
			pH _a -pH _c		RASaj	Ca°	RAS°
			(mmol _c L ⁻¹) ^{1/2}				
I Otoño 2008	7.39	6.93	0.46	3.01	7.44	0.97	3.42
02	7.56	7.09	0.47	4.00	9.22	0.96	4.73
03	7.20	7.09	0.11	1.91	4.41	1.02	2.19
04	6.65	7.08	-0.43	0.33	0.78	1.21	0.40
05	7.47	7.90	-0.43	6.53	9.82	1.83	7.34
06	8.34	7.05	1.29	0.30	0.70	1.27	0.38
07	7.20	7.72	-0.52	1.79	3.00	2.08	2.35
08	7.61	6.88	0.73	2.68	6.75	1.74	3.89
09	7.43	6.79	0.64	4.49	11.75	1.85	5.01
10	7.57	6.99	0.57	3.83	9.22	1.24	4.66
11	7.44	6.97	0.47	4.50	10.91	1.05	5.21
12	7.87	6.95	0.92	2.33	5.72	1.77	2.90
13	7.67	7.01	0.66	3.29	7.84	1.28	4.00
14	7.57	7.00	0.57	4.14	9.95	1.13	4.87
15	7.56	8.46	-0.90	0.23	0.22	1.82	0.20
16	7.62	6.87	0.75	4.78	12.09	1.20	5.98
17	7.61	6.97	0.64	4.62	11.20	1.18	5.57
18	7.46	7.12	0.34	3.80	8.65	0.93	4.22
19	7.22	7.32	-0.10	1.59	3.30	1.19	1.79
20	7.47	7.31	0.16	1.65	3.45	1.38	1.95
21	7.06	7.56	-0.50	0.45	0.83	2.25	0.51
22	6.89	7.74	-0.85	0.09	0.15	2.13	0.09
23	7.03	7.56	-0.53	0.42	0.76	1.80	0.46
24	6.88	6.22	0.66	1.35	4.30	2.44	2.22
25	7.40	7.07	0.34	3.21	7.48	1.21	3.72
26	7.36	7.30	0.06	5.19	10.89	1.14	6.13
27	6.93	7.45	-0.52	0.40	0.78	1.87	0.47
28	7.38	7.02	0.36	3.18	7.57	1.27	3.79
29	7.38	7.28	0.10	1.93	4.09	1.81	2.26
30	7.65	8.02	-0.37	0.75	1.04	1.49	0.75
31	7.30	7.28	0.02	2.01	4.26	1.73	2.45
32	7.87	7.57	0.30	0.34	0.63	1.91	0.39
33	7.17	7.20	-0.04	1.90	4.17	1.52	2.33
34	7.34	7.20	0.14	1.96	4.31	1.53	2.34
35	7.28	6.48	0.80	1.25	3.64	1.91	1.67
36	7.69	7.15	0.53	3.17	7.12	1.60	3.84
37	7.63	7.34	0.29	2.71	5.60	1.37	3.16
38	7.65	7.27	0.38	2.72	5.79	1.28	3.18
39	7.44	7.28	0.16	2.20	4.66	1.77	2.60
40	7.02	7.57	-0.55	0.27	0.50	1.95	0.31
41	7.61	7.27	0.34	2.56	5.46	1.35	3.04

Continuación.....Anexo 4

Sitio	pH _a	pH _c	Indice de Saturación	RASorg	RASaj ajustado	RAS° corregido	
			pH _a -pH _c		RASaj	Ca°	RAS°
					(mmol _c L ⁻¹) ^{1/2}		
42	7.40	7.42	-0.02	1.98	3.92	1.67	2.25
43	7.72	7.60	0.12	1.41	2.53	2.36	1.57
44	7.49	8.71	-1.22	0.32	0.22	2.04	0.23
45	7.57	7.27	0.30	2.56	5.45	1.22	2.95
46	7.43	7.47	-0.05	1.31	2.52	1.79	1.50
47	7.42	7.47	-0.05	1.41	2.71	1.71	1.65
48	7.61	7.25	0.36	1.41	3.02	1.67	1.74
49	7.52	8.46	-0.94	0.23	0.21	1.85	0.19
50	8.66	7.57	1.08	1.01	1.84	1.67	1.13
51	7.05	7.47	-0.42	1.20	2.31	1.68	1.33
52	7.88	7.47	0.41	1.36	2.61	1.61	1.53
53	7.97	7.28	0.69	2.90	6.15	1.29	3.41
54	7.51	7.08	0.43	3.23	7.50	1.39	3.83
55	7.96	7.28	0.68	2.89	6.14	1.35	3.40
56	7.75	7.27	0.48	3.07	6.54	1.34	3.67
57	7.76	7.17	0.59	6.10	13.59	1.07	7.17
58	6.53	9.22	-2.69	0.24	0.04	1.63	0.15
59	7.47	7.13	0.33	3.50	7.94	1.34	4.08
60	7.54	6.98	0.55	3.56	8.59	1.52	4.45
61	7.87	7.03	0.84	4.04	9.58	1.23	4.86
62	7.69	7.47	0.22	1.27	2.45	1.68	1.50
63	8.13	7.37	0.76	1.17	2.39	1.45	1.36
64	7.98	7.13	0.85	4.34	9.86	1.50	5.35
65	7.88	7.03	0.85	4.00	9.48	1.59	5.05
66	7.90	7.47	0.43	1.33	2.56	1.55	1.53
67	8.43	7.11	1.32	3.28	7.50	1.47	3.91
68	7.36	7.49	-0.12	1.64	3.15	1.61	1.83
69	7.16	7.47	-0.31	1.30	2.50	1.63	1.44
70	7.26	7.49	-0.23	1.24	2.37	1.78	1.43
71	7.44	7.76	-0.32	1.32	2.16	1.43	1.41
72	7.23	7.46	-0.23	1.13	2.20	1.78	1.30
73	8.01	7.46	0.54	1.30	2.52	1.80	1.47
74	7.81	7.45	0.36	1.02	2.00	1.63	1.16
75	8.62	7.02	1.60	5.06	12.05	1.25	6.64
76	7.25	7.39	-0.13	1.53	3.08	1.42	1.74
77	8.13	7.46	0.67	0.79	1.52	1.92	0.89
78	7.50	7.06	0.44	2.96	6.92	1.61	3.77
79	7.25	7.39	-0.14	1.67	3.36	1.59	1.87
80	7.28	7.39	-0.11	1.94	3.90	1.43	2.20
81	8.06	7.59	0.47	1.00	1.81	2.01	1.16
82	7.35	7.26	0.09	1.90	4.07	1.58	2.40
83	7.44	7.39	0.06	1.98	3.99	1.59	2.27
84	8.14	7.27	0.86	1.34	2.84	1.83	1.58
85	7.61	7.28	0.32	1.68	3.56	1.78	1.94
86	8.03	7.27	0.76	1.43	3.05	2.59	1.56
87	7.79	7.49	0.30	1.95	3.74	1.60	2.13

Continuación.....Anexo 4

Sitio	pH _a	pH _c	Indice de Saturación		RASorg	RASaj ajustado		RAS° corregido	
			pH _a -pH _c			RASaj	Ca°	RAS°	
						(mmol _c L ⁻¹) ^{1/2}			
134	6.90	7.44	-0.54	5.55	10.89	0.82	6.36	6.36	
135	7.00	7.43	-0.43	4.81	9.49	0.78	5.43	5.43	
136	7.20	7.39	-0.19	5.41	10.87	0.82	6.21	6.21	
137	7.05	7.39	-0.34	5.56	11.19	0.80	6.41	6.41	
138	7.10	7.35	-0.25	5.08	10.39	0.83	5.94	5.94	
139	7.10	7.40	-0.30	5.60	11.23	2.05	5.60	5.60	
140	7.10	7.39	-0.29	6.04	12.15	0.76	6.86	6.86	
141	7.20	7.40	-0.20	5.93	11.89	0.77	6.72	6.72	
142	7.25	7.40	-0.15	5.49	11.00	0.79	6.39	6.39	
143	7.30	7.35	-0.05	5.12	10.52	0.76	5.80	5.80	
144	7.35	7.44	-0.09	5.12	10.05	0.80	5.82	5.82	
145	7.10	7.35	-0.25	4.82	9.91	0.87	5.60	5.60	
146	7.10	7.35	-0.25	4.71	9.63	0.79	5.56	5.56	
147	7.15	7.36	-0.21	5.21	10.62	0.90	6.01	6.01	
148	7.00	7.31	-0.31	5.27	11.02	0.85	6.04	6.04	
149	7.80	8.23	-0.43	2.24	21.05	0.66	2.16	2.16	
150	7.25	7.39	-0.14	4.57	9.19	0.81	5.21	5.21	
151	6.80	7.04	-0.24	5.62	13.27	0.78	6.68	6.68	
152	7.40	7.40	0.00	4.18	8.37	0.94	4.83	4.83	
153	8.25	7.39	0.86	4.30	8.64	0.88	4.93	4.93	
154	7.90	7.91	-0.01	2.78	4.13	0.79	2.93	2.93	
155	7.85	8.16	-0.31	1.79	2.23	0.75	1.74	1.74	
156	9.55	7.73	1.82	5.06	8.45	0.68	5.56	5.56	
157	7.85	7.35	0.50	3.80	7.80	0.91	4.37	4.37	
158	8.60	7.80	0.80	3.84	6.15	0.78	4.04	4.04	
159	8.90	7.44	1.46	4.56	8.96	0.87	5.10	5.10	
160	8.90	7.44	1.46	5.71	11.21	0.79	6.46	6.46	
161	8.40	7.19	1.21	5.08	11.26	0.98	6.00	6.00	
162	8.35	7.32	1.03	5.89	12.28	0.86	6.98	6.98	
163	8.45	7.12	1.33	6.03	13.76	1.07	7.30	7.30	
164	9.85	7.93	1.92	2.82	4.15	0.88	2.89	2.89	
165	8.70	7.91	0.79	2.60	3.87	0.90	2.70	2.70	
166	8.05	7.91	0.14	2.88	4.28	0.84	3.01	3.01	
167	7.95	7.15	0.80	4.86	10.95	1.02	5.89	5.89	
168	8.45	7.31	1.14	5.33	11.15	0.90	6.26	6.26	
169	8.45	7.05	1.40	9.65	22.64	0.79	11.51	11.51	
170	8.25	7.19	1.06	4.64	10.24	1.08	5.57	5.57	
171	8.25	7.15	1.10	4.82	10.86	1.10	5.71	5.71	
172	8.20	7.32	0.88	5.30	11.04	0.87	6.25	6.25	
173	8.20	7.14	1.06	4.95	11.20	0.96	5.94	5.94	
174	8.40	7.31	1.09	5.21	10.90	0.91	6.14	6.14	
175	8.20	7.13	1.07	3.68	8.35	1.01	4.41	4.41	
176	7.95	7.04	0.91	8.21	19.39	0.85	9.98	9.98	
177	8.20	7.32	0.88	4.80	10.01	0.86	5.58	5.58	
178	8.00	7.91	0.09	2.87	4.27	0.82	3.01	3.01	
179	8.30	7.31	0.99	5.37	11.24	0.85	6.33	6.33	

Continuación.....Anexo 4

Sitio	pH _a	pH _c	Indice de Saturación		RASorg	RASaj ajustado		RAS° corregido	
			pH _a -pH _c			RASaj	Ca°	RAS°	
						(mmol _c L ⁻¹) ^{1/2}			
180	8.30	7.19	1.11	4.63	10.22	1.06	5.47	5.47	
181	8.30	7.10	1.20	5.38	12.38	0.95	6.50	6.50	
182	8.10	7.10	1.00	8.38	19.22	0.90	10.05	10.05	
183	8.25	7.31	0.94	5.39	11.29	0.86	6.39	6.39	
184	8.15	7.31	0.84	4.75	9.94	0.83	5.50	5.50	
185	8.15	7.14	1.01	4.71	10.66	0.92	5.65	5.65	
186	8.00	7.35	0.65	4.86	9.98	0.84	5.63	5.63	
187	8.25	7.39	0.86	5.32	10.69	0.80	5.91	5.91	
188	7.80	8.31	-0.51	2.95	3.22	0.47	2.65	2.65	
189	7.70	7.45	0.25	5.34	10.39	0.97	6.60	6.60	
190	7.75	7.44	0.31	3.90	7.66	0.96	4.54	4.54	

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

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

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

pH_c = pH teórico de las aguas.

Ca° = Concentración de calcio en el agua. Que resultaría de regar con aguas de determinado valor HCO₃⁻/Ca²⁺ y conductividad del agua de riego (CE).

pH_a = pH actual de una agua.

Anexo 5. Clasificación de las aguas residuales del Valle del Mezquital. de acuerdo al contenido de boro (mg L^{-1}). Otoño 2008 y Verano 2009. Buena (B); Condicionada (C) y No recomendable (NR).

Sitio	Boro		Sitio	Boro		Sitio	Boro		Sitio	Boro		Sitio	Boro	
	mg L^{-1}	Clasif		mg L^{-1}	Clasif		mg L^{-1}	Clasif		mg L^{-1}	Clasif		mg L^{-1}	Clasif
1 Otoño 2008	1.92	NR	46	0.40	B	91	0.88	NR	136	0.62	B	181	0.37	B
02	2.39	NR	47	0.43	B	92	0.08	B	137	0.56	B	182	0.33	B
03	0.16	B	48	0.28	B	93	0.09	B	138	1.02	C	183	0.34	B
04	2.05	NR	49	0.56	B	94	0.09	B	139	0.68	B	184	0.32	B
05	0.07	B	50	0.20	B	95	0.30	B	140	0.37	B	185	1.47	NR
06	2.35	NR	51	0.42	B	96	0.24	B	141	0.38	B	186	0.32	B
07	0.43	B	52	0.23	B	97	0.33	B	142	0.47	B	187	1.59	C
08	0.03	B	53	0.98	NR	98	0.44	B	143	1.01	NR	188	1.40	NR
09	0.63	B	54	1.25	NR	99	0.39	B	144	0.69	B	189	0.69	B
10	1.60	NR	55	1.00	NR	100	0.03	B	145	0.92	C	190	1.38	NR
11	1.92	NR	56	0.87	NR	101	0.44	B	146	0.98	NR	Media	0.46	
12	0.47	B	57	0.77	NR	102	0.00	B	147	0.82	NR	Mediana	0.57	
13	1.22	NR	58	0.01	B	103	0.38	B	148	0.93	C	Moda	0.02	
14	1.86	NR	59	1.56	NR	104	0.08	B	149	0.57	B	Desvest	0.59	
15	0.02	B	60	1.16	NR	105	0.38	B	150	1.38	NR			
16	1.99	NR	61	0.93	NR	106	0.32	B	151	1.38	C			
17	1.96	NR	62	0.23	B	107	0.34	B	152	1.57	NR			
18	1.76	NR	63	0.12	B	108 Verano09	1.64	C	153	1.29	NR			
19	0.37	B	64	0.61	B	109	1.75	C	154	1.18	NR			
20	0.50	B	65	0.59	B	110	1.52	NR	155	0.54	B			
21	0.08	B	66	0.26	B	111	0.72	B	156	0.25	B			
22	0.09	B	67	0.98	NR	112	1.68	NR	157	1.51	NR			
23	0.18	B	68	0.32	B	113	1.75	C	158	1.72	C			
24	2.65	C	69	0.50	B	114	1.53	NR	159	0.27	B			
25	1.18	NR	70	0.54	B	115	0.05	B	160	0.32	B			
26	0.99	NR	71	0.42	B	116	0.19	B	161	0.37	B			
27	0.70	B	72	0.22	B	117	1.42	NR	162	0.30	B			
28	1.13	NR	73	0.21	B	118	1.28	C	163	0.37	B			
29	0.62	B	74	0.25	B	119	1.61	NR	164	1.17	NR			
30	0.03	B	75	0.66	B	120	0.01	B	165	0.89	NR			
31	0.75	NR	76	0.23	B	121	1.40	C	166	0.87	NR			
32	0.03	B	77	0.18	B	122	1.34	C	167	0.24	B			
33	0.67	B	78	0.20	B	123	1.34	C	168	1.60	NR			
34	0.75	NR	79	0.25	B	124	0.87	NR	169	0.75	B			
35	1.19	NR	80	0.27	B	125	0.40	B	170	0.28	B			
36	0.86	NR	81	0.24	B	126	0.14	B	171	0.27	B			
37	0.74	B	82	0.33	B	127	0.58	B	172	0.29	B			
38	0.63	B	83	0.31	B	128	1.46	NR	173	0.32	B			
39	0.87	NR	84	0.02	B	129	0.58	B	174	1.50	NR			
40	0.16	B	85	0.12	B	130	1.81	NR	175	1.47	NR			
41	0.77	NR	86	0.04	B	131	1.68	C	176	1.53	NR			
42	0.87	NR	87	0.33	B	132	1.60	NR	177	0.22	B			
43	0.48	B	88	0.25	B	133	1.63	NR	178	0.99	NR			
44	0.03	B	89	0.20	B	134	0.72	B	179	0.36	B			
45	0.90	NR	90	0.03	B	135	0.38	B	180	0.29	B			

Anexo 6. Clasificación del contenido de fosfatos (PO_4^{3-}) de las aguas residuales del Valle del Mezquital. Otoño 2008 y Verano 2009.

Sitio	PO4	Condición	Sitio	PO4	Condición	Sitio	PO4	Condición	Sitio	PO4	Condición	Sitio	PO4	Condición
1 Oto 08	9.95	NR	47	7.20	NR	93	0.54	B	139	4.61	NR	185	0.64	B
2	8.56	NR	48	6.87	NR	94	3.82	NR	140	4.63	NR	186	1.21	B
3	8.31	NR	49	1.70	B	95	6.00	NR	141	4.62	NR	187	0.85	B
4	7.77	NR	50	6.27	NR	96	6.07	NR	142	4.79	NR	188	0.61	B
5	8.59	NR	51	8.19	NR	97	6.18	NR	143	4.83	NR	189	0.56	B
6	4.89	NR	52	6.93	NR	98	5.17	NR	144	4.24	NR	190	0.99	B
7	6.96	NR	53	7.90	NR	99	4.38	NR	145	5.12	NR			
8	1.53	B	54	3.99	NR	100	2.00	NR	146	5.04	NR			
9	7.92	NR	55	7.27	NR	101	2.85	NR	147	4.58	NR			
10	7.17	NR	56	9.07	NR	102	1.32	B	148	5.31	NR			
11	8.05	NR	57	0.53	B	103	11.73	NR	149	1.59	B			
12	1.07	B	58	0.77	B	104	0.68	B	150	4.72	NR			
13	6.29	NR	59	0.52	B	105	11.73	NR	151	4.29	NR			
14	7.04	NR	60	5.70	NR	106	3.51	NR	152	15.47	NR			
15	2.65	NR	61	5.45	NR	107	4.11	NR	153	6.27	NR			
16	6.56	NR	62	7.08	NR	108 Ver 09	3.36	NR	154	2.73	NR			
17	6.79	NR	63	6.47	NR	109	3.46	NR	155	1.29	B			
18	7.14	NR	64	3.29	NR	110	3.15	NR	156	1.83	B			
19	6.39	NR	65	3.63	NR	111	5.52	NR	157	2.58	NR			
20	10.16	NR	66	7.04	NR	112	3.96	NR	158	2.37	NR			
21	6.88	NR	67	0.53	B	113	3.30	NR	159	2.78	NR			
22	5.81	NR	68	6.50	NR	114	3.94	NR	160	1.68	B			
23	7.26	NR	69	8.13	NR	115	1.58	B	161	0.55	B			
24	0.59	B	70	7.13	NR	116	4.19	NR	162	1.17	B			
25	7.13	NR	71	7.05	NR	117	4.62	NR	163	1.56	B			
26	8.98	NR	72	10.62	NR	118	4.72	NR	164	2.22	NR			
27	7.30	NR	73	12.15	NR	119	2.41	NR	165	0.75	B			
28	7.38	NR	74	10.80	NR	120	0.66	B	166	1.22	B			
29	10.46	NR	75	1.46	B	121	4.73	NR	167	1.91	B			
30	3.79	NR	76	6.05	NR	122	2.23	NR	168	0.85	B			
31	10.25	NR	77	12.92	NR	123	2.16	NR	169	1.51	B			
32	0.51	B	78	0.50	B	124	0.57	B	170	1.91	B			
33	9.29	NR	79	5.95	NR	125	0.58	B	171	1.72	B			
34	9.34	NR	80	5.91	NR	126	0.61	B	172	1.00	B			
35	3.34	NR	81	13.03	NR	127	0.55	B	173	1.07	B			
36	11.69	NR	82	5.72	NR	128	4.38	NR	174	0.74	B			
37	10.67	NR	83	6.23	NR	129	1.41	B	175	1.31	B			
38	11.37	NR	84	0.54	B	130	5.57	NR	176	0.55	B			
39	11.21	NR	85	0.60	B	131	4.30	NR	177	0.63	B			
40	5.50	NR	86	0.53	B	132	4.47	NR	178	1.66	B			
41	7.06	NR	87	5.76	NR	133	4.70	NR	179	1.67	B			
42	10.83	NR	88	0.86	B	134	2.26	NR	180	1.65	B			
43	8.08	NR	89	0.51	B	135	4.61	NR	181	1.64	B			
44	2.37	NR	90	0.89	B	136	4.98	NR	182	1.34	B			
45	7.36	NR	91	3.12	NR	137	5.48	NR	183	1.61	B			
46	7.74	NR	92	0.62	B	138	4.90	NR	184	1.45	B			

Anexo 7. Cuadro de relaciones iónicas de los principales cationes y aniones de las aguas residuales de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán., Oto-08 y Ver-09.

Sitio	Nombre del Sitio	Cl/SO ₄	HCO ₃ /Cl+SO ₄	Ca/Mg
1 Otoño 2007	Puente Pemex	3.783	1.89	0.64
02	Canal a la entrada de Santa Ana Nextlalpan	3.373	1.48	0.84
03	Canal La Laminadora	3.618	2.40	0.51
04	Laguna de Zumpango	5.467	0.95	0.46
05	El Gran Canal. Teoloyucan	3.958	1.53	2.08
06	Laguna de Zumpango. Emisor Norte	4.982	0.86	0.60
07	Desviación Tlapanoloya	2.420	1.41	2.97
08	Balneario Las Canoas	7.221	1.74	1.68
09	Tequixquiac	7.281	1.48	2.21
10	Puente de Tequixquiac	5.525	1.46	0.82
11	Gran Canal. Salida de Tequixquiac	4.686	1.26	0.54
12	Balneario La Atarjea	7.575	0.98	1.03
13	Canal Factoria. Apaxco	8.994	1.52	0.90
14	Río Tula. Apaxco	4.757	1.24	0.64
15	Pino Suárez	0.519	1.65	2.08
16	Canal revestido Atotonilco	6.185	1.23	0.94
17	Canal revestido Texas	5.571	1.19	0.74
18	Río Tula	5.798	1.26	0.38
19	Atitalaquia	2.761	1.65	0.64
20	Canal Teltipan de Juárez	3.449	1.61	1.04
21	Refinería Rexel	1.060	1.06	2.58
22	Canal Pemex. Atitalaquia	1.041	1.04	1.46
23	Tula 1. Canal	1.425	1.34	1.33
24	Balneario. nacimiento la Cantera	2.768	1.41	2.69
25	Canal de la Quina. Atitalaquia	3.566	1.27	0.64
26	Canal Grande de la Quina	1.589	0.81	0.83
27	Tula 2. Hotel las Plazas	1.272	1.56	1.49
28	Canal Grande Atitalaquia	4.067	1.35	0.75
29	Tula. Tepetitlan.	1.144	0.83	1.08
30	Chapantongo	0.577	2.19	1.18
31	Col. Julian Villa Gran	1.015	0.96	1.36
32	Cieneguillas	8.909	1.17	1.33
33	Canal Grande Tula. Gral. Dhendo	1.078	1.42	1.22
34	Instituto Canadiense	1.145	1.21	1.06
35	Río Tula. Puente Verde	3.314	1.60	1.18
36	Canal Tlahuelilpan	3.940	0.94	1.17
37	Canal revestido Tlahuelilpan. El tinaco	4.046	1.03	0.86
38	Canal Requenal	3.668	1.22	0.83
39	La loma. Presa Endho	1.176	0.75	1.11
40	Río Tula. Puente Metlac	1.076	1.38	1.63
41	Canal Colonia Fco. I. Madero	4.183	1.23	0.93
42	Centro de Tepetitlan	1.098	0.72	0.81
43	Presa Endho	0.903	0.65	1.56
44	Tepetitlan	0.619	0.65	1.17
45	Canal Colonia La Morelos	3.716	1.29	0.70

Continuación.....Anexo 7

Sitio	Nombre del Sitio	Cl/SO ₄	HCO ₃ /Cl+SO ₄	Ca/Mg
46	Sifón. Presa Endho	1.182	0.90	1.21
47	Canal revestido Progreso	2.368	1.11	1.32
48	Canal revestido. ISH	1.924	1.48	1.71
49	Presa Dolores	0.542	1.64	2.22
50	Canal revestido Mora	2.203	1.41	1.48
51	Presa Rojo Gómez	0.990	0.89	0.94
52	Puente el Grasoso I	2.280	1.15	0.93
53	Canal Caxuxi. Cerca de Actopan	3.998	1.19	0.81
54	Canal Teofani	3.250	0.98	0.72
55	Canal Boxtha	4.153	1.09	0.85
56	Pozo de bombeo CNA No. 5	3.102	1.15	0.99
57	Pozo No. 8 de la CNA	3.017	0.93	0.71
58	Rumbo a la presa Zimapan (Cerca el Zaucillo)	0.909	0.67	0.90
59	Pozo Adelaido. San Salvador	4.394	0.88	0.66
60	Agua de manantial Sn Salvador (Resurgimiento)	3.939	1.00	1.07
61	Canal de aguas negras Sn. Salvador	4.098	1.20	0.81
62	Canal Grasoso II	2.231	1.19	1.25
63	Canal Grasoso rumbo a cerro Azul	2.411	1.56	1.12
64	Canal Villa Gran	3.612	0.82	1.09
65	Canal de las Rosas	3.823	0.84	1.25
66	Canal revestido el Mejay	2.209	1.19	1.09
67	Río Tula. Manantial Progreso	3.235	0.93	0.89
68	Río Tula Progreso	3.954	0.86	0.80
69	Puente Alfajayucan	1.302	0.91	0.93
70	Río Tula. Gran Canal Xotho. Ixmiquilpan	1.199	0.92	1.11
71	Presa Vicente Aguirre	1.147	0.78	0.68
72	Sta.Ma. Xigui	1.247	0.96	1.40
73	Cercajas (Cerca puente Puertezuelo)	3.882	0.85	1.29
74	Desviación cerca Esc. Digno	1.365	0.97	1.29
75	Presa Debodhe	1.982	1.45	1.50
76	Río Tula Chicoautla	2.188	1.22	0.84
77	Canal revestido Cerro Prieto	1.371	1.14	1.35
78	Balnerio Maguey Blanco	1.720	0.96	1.37
79	Canal revestido Ecoalberto	2.190	1.15	0.90
80	Canal Maguey Blanco	2.726	0.99	0.88
81	Hacia la mina Cerro Prieto	1.322	0.90	1.86
82	Canal Debodhe	3.506	1.47	1.83
83	Canal de Piedra la Estación	2.360	1.27	1.16
84	Parque acuático Tlacotalpilco (alberca)	1.698	0.88	1.13
85	Balneario Dauthi	1.414	0.73	0.90
86	Parque acuático Tlacotalpilco (toma principal)	1.739	0.84	1.03
87	Agua fréatica. Bandho	3.943	0.85	0.81
88	Parque acuático Dios Padre	2.260	0.93	0.98
89	Balnerio Pueblo Nuevo	1.629	0.99	0.66
90	Parque acuático Ecoalberto	1.677	0.82	1.40
91	Canal Bandaho	1.518	1.50	2.03

Continuación.....Anexo 7

Sitio	Nombre del Sitio	Cl/SO ₄	HCO ₃ /Cl+SO ₄	Ca/Mg
92	EL Arenalito. camino Tolantongo	4.107	1.24	2.23
93	Río La Gloria	2.619	2.11	0.79
94	Sn. _Francisco (Cerro Prieto)	0.828	1.20	3.02
95	Río Tula Ecoalberto	2.842	1.49	1.01
96	Río Tula Tlacotlapilco	2.425	1.29	1.08
97	Canal antes Ixmiquilpan	4.141	1.11	0.83
98	Canal Cerritos	1.788	1.24	0.92
99	Canal de Piedra	1.868	1.03	0.73
100	Presa Madho Corrales	1.255	1.09	4.94
101	Río Ixmiquilpan	12.414	1.15	2.32
102	Balneario Tzindejéh	1.131	1.22	1.80
103	Río Tula. Tzindejéh	1.254	0.77	1.54
104	Balneario II Tzindejéh	2.364	0.93	1.96
105	Río Tula. Puente Corea	1.229	0.83	0.92
106	Presa Zimapán	2.145	0.77	1.25
107	Adjuntas	3.255	1.04	1.09
108	Puente Pemex	11.205	1.20	0.79
109	Canal de riego cuadrado Chiconautla	9.286	1.50	0.75
110	Canal de riego antes Sta. Ma. Tonatitla	4.437	1.30	0.76
111	La Laminadora	4.247	1.04	0.56
112	Canal principal Sta. Ana Nextlalpan	3.495	1.36	0.62
113	Canal revestido Sta. Ma. Tonatitla	3.870	1.22	0.73
114	Santa Ana Nextlalpan	3.795	1.45	0.65
115	Laguna de Zunpamgo	1.325	0.96	0.25
116	Laguna de Zunpamgo Emisor Norte	1.845	1.70	0.85
117	Canal princial Sn. Pedro	3.757	1.33	0.73
118	Puente de Tequixquiac	4.586	1.33	0.70
119	Tequixquiac. Tajo	5.136	1.33	0.76
120	Tajo	4.185	1.55	0.85
121	El Gran Canal. Teoloyucan	3.601	1.33	0.72
122	Canal de tierra Tequixquiac	4.630	1.43	1.03
123	Desviación Tlapanoloya	3.451	1.38	0.95
124	Presa las canoas	4.820	1.18	0.83
125	Balneario Las Canoas	5.833	1.47	0.86
126	La Atarjea nacimiento manantial	4.373	1.28	0.88
127	Balneario La Atarjea manantial	4.893	1.36	0.87
128	Apaxco. Río Tula	4.865	1.29	0.75
129	Pino Suárez	2.583	1.91	0.67
130	Canal Factoria Apaxco	4.487	1.32	0.75
131	Canal revestido Texas	4.444	1.41	0.79
132	Canal revestido Atotonilco	4.891	1.45	0.81
133	Río Tula	3.706	1.41	0.81
134	Atitalaquia	2.496	1.56	0.89
135	Tula 1. Canal	2.398	1.96	0.81
136	Refinería Rexel	2.656	1.65	0.77
137	Tula 2. Hotel las Plazas	2.490	1.65	0.84

Continuación.....Anexo 7

Sitio	Nombre del Sitio	Cl/SO ₄	HCO ₃ /Cl+SO ₄	Ca/Mg
138	Canal Grande Tula. Gral. Dhendo	3.024	1.87	0.73
139	Canal Grande Atitalaquia	2.766	1.58	0.85
140	Canal Pemex. Atitalaquia	2.402	1.61	0.74
141	Canal de la Quina. Atitalaquia	2.385	1.44	0.68
142	Canal Grande de la Quina	2.519	1.46	0.77
143	Instituto Canadiense	3.348	1.75	0.62
144	Río Tula. Puente Metlac	1.944	1.67	0.79
145	Tula. Tepetitlan.	3.333	1.84	0.73
146	Col. Julian Villa Gran	3.519	1.91	0.73
147	Tula. puente verde	2.085	1.62	0.68
148	Canal Col. Benito Juarez	3.482	1.89	0.67
149	Chapantongo	2.750	3.65	0.64
150	Canal de tierra Ahuehuepan	3.088	1.95	0.66
151	Presa Endho	3.238	2.58	0.68
152	Tepetitlan	2.735	1.61	0.72
153	Sifón. Presa Endho	2.423	1.74	0.73
154	Presa Rojo Gómez	3.263	2.54	0.82
155	Presa Dolores	3.611	3.18	0.66
156	Canal Grasoso rumbo a cerro Azul	3.344	2.44	0.61
157	Puente Alfajayucan	3.578	1.87	0.65
158	Presa Vicente Aguirre	3.696	1.21	0.40
159	Canal Grasoso II	2.582	1.54	0.70
160	Canal revestido el Mejay	2.358	1.64	0.79
161	Canal revestido Ecoalberto	3.577	1.57	0.82
162	Río Tula Chilcuautla	2.250	1.70	0.81
163	Presa Debodhe	4.483	1.24	0.90
164	Laguna (Camino Cerro Prieto)	5.714	1.76	0.83
165	Presa Madho Corrales	4.813	1.88	0.79
166	Río Sn. Fco. Sachichilco	5.267	2.01	0.89
167	Canal Debodhe	3.368	1.62	0.88
168	Canal de Piedra. Ixmiquilpan	2.984	1.81	0.79
169	Agua fréatica. Bandho	5.618	1.25	0.69
170	Canal cuadrado Bandaho	4.014	1.36	0.84
171	Sn. Pedro Capula	5.377	1.32	0.79
172	Río Tula Tlacotlapilco	3.661	1.89	0.77
173	Río Tula Ecoalberto	3.754	1.74	0.84
174	Río Tula. GRAN Canal Xotho. Ixmiquilpan	2.790	1.97	0.79
175	Canal cuadrado revestido despues Ixmi.	2.932	2.22	0.78
176	Río Ixmiquilpan	3.828	1.54	0.80
177	Canal Maguey Blanco	3.473	1.93	0.66
178	Sn. _Francisco (Cerro Prieto	4.824	1.97	0.81
179	Canal antes Ixmiquilpan	3.215	1.88	0.77
180	Canal de Piedra la Estación	5.615	1.28	0.76
181	Canal Universidad _tecnológica VM	2.291	2.03	0.90
182	Canal Av. Lazaro Cardenas	4.121	1.08	0.78
183	Canal El Nith	2.970	1.89	0.80

Continuación.....Anexo 7

Sitio	Nombre del Sitio	Cl/SO₄	HCO₃/Cl+SO₄	Ca/Mg
184	Canal Dextho	3.345	2.05	0.64
185	Río Tula puente Tasquillo	2.456	1.77	0.78
186	Canal revestido Col. Ignacio López Rayón	3.519	1.86	0.71
187	Presa Zimapan	1.213	1.11	0.80
188	Cascadas Maconi	3.255	1.43	0.72
189	Cañon Zimapan	2.333	1.83	0.23
190	Adjuntas	4.318	1.62	0.74

Anexo 8. Clasificación de las aguas residuales de acuerdo con su Salinidad Efectiva, del Valle del Mezquital, Otoño 2008 y Verano 2009.

Sitio	SE	Clasif	Sitio	SE	Clasif	Sitio	SE	Clasif	Sitio	SE	Clasif	Sitio	SE	Clasif
1 Oto08	10.10	C	45	5.81	C	89	6.38	C	133	13.25	C	177	9.17	C
02	11.87	C	46	4.52	C	90	5.37	C	134	7.99	C	178	3.73	C
03	5.93	C	47	4.21	C	91	11.30	C	135	6.87	C	179	9.90	C
04	1.68	B	48	3.57	C	92	1.46	B	136	8.60	C	180	9.83	C
05	13.65	C	49	0.79	B	93	3.24	C	137	8.58	C	181	10.31	C
06	1.55	B	50	2.53	B	94	1.11	B	138	9.24	C	182	16.72	NR
07	5.73	C	51	4.28	C	95	3.79	C	139	9.21	C	183	9.99	C
08	7.24	C	52	4.12	C	96	4.10	C	140	8.88	C	184	9.36	C
09	10.83	C	53	6.39	C	97	4.61	C	141	9.46	C	185	9.81	C
10	9.44	C	54	9.47	C	98	5.05	C	142	9.15	C	186	9.00	C
11	11.60	C	55	6.59	C	99	6.58	C	143	9.05	C	187	8.51	C
12	9.04	C	56	6.25	C	100	1.11	B	144	7.85	C	188	3.59	C
13	7.62	C	57	12.65	C	101	8.62	C	145	9.11	C	189	9.16	C
14	10.19	C	58	0.66	B	102	2.74	B	146	9.07	C	190	7.19	C
15	0.84	B	59	9.90	C	103	6.19	C	147	9.95	C			
16	11.52	C	60	9.41	C	104	3.01	C	148	9.63	C			
17	11.49	C	61	9.13	C	105	5.59	C	149	2.20	B			
18	9.69	C	62	4.00	C	106	6.57	C	150	8.01	C			
19	4.00	C	63	3.12	C	107	5.62	C	151	12.31	C			
20	3.68	C	64	9.99	C	108 Ver09	15.22	NR	152	8.14	C			
21	2.07	B	65	9.71	C	109	15.10	NR	153	7.67	C			
22	2.13	B	66	3.76	C	110	14.87	C	154	3.63	C			
23	2.41	B	67	8.16	C	111	17.02	NR	155	1.97	B			
24	12.30	C	68	5.31	C	112	13.32	C	156	7.12	C			
25	7.64	C	69	4.30	C	113	15.11	NR	157	7.65	C			
26	9.98	C	70	4.75	C	114	14.40	C	158	6.38	C			
27	2.61	B	71	4.29	C	115	3.53	C	159	7.10	C			
28	7.59	C	72	3.63	C	116	4.72	C	160	8.10	C			
29	6.39	C	73	4.34	C	117	12.18	C	161	9.75	C			
30	1.24	B	74	3.62	C	118	12.21	C	162	10.68	C			
31	5.77	C	75	10.23	C	119	13.23	C	163	12.33	C			
32	3.06	C	76	4.32	C	120	6.74	C	164	3.52	C			
33	4.81	C	77	3.31	C	121	13.74	C	165	3.43	C			
34	5.16	C	78	7.64	C	122	11.30	C	166	3.62	C			
35	10.21	C	79	4.32	C	123	11.30	C	167	10.07	C			
36	7.35	C	80	4.78	C	124	11.88	C	168	9.96	C			
37	6.33	C	81	3.67	C	125	10.76	C	169	19.45	NR			
38	5.89	C	82	3.98	C	126	12.84	C	170	9.79	C			
39	6.96	C	83	4.03	C	127	11.76	C	171	10.07	C			
40	2.48	B	84	5.83	C	128	12.18	C	172	9.94	C			
41	5.70	C	85	6.82	C	129	0.88	B	173	9.81	C			
42	7.09	C	86	5.95	C	130	11.93	C	174	9.76	C			
43	4.94	C	87	5.20	C	131	12.56	C	175	8.10	C			
44	0.96	B	88	5.03	C	132	12.79	C	176	16.54	NR			

Anexo 9. Clasificación de las aguas residuales de acuerdo con su Salinidad Potencial, del Valle del Mezquital, Otoño 2008 y Verano 2009.

Sitio	SP	Cla	Sitio	SP	CLASIF.	Sitio	SP	CLASIF.	Sitio	SP	CLASIF.	Sitio	SP	CLASIF.
1 Oto08	8.95	C	46	3.32	C	91	5.69	C	136	4.04	C	181	4.13	C
02	10.36	C	47	3.36	C	92	1.29	B	137	3.90	C	182	9.94	C
03	4.12	C	48	2.78	B	93	2.62	B	138	4.37	C	183	4.58	C
04	1.43	B	49	0.50	B	94	0.85	B	139	4.49	C	184	4.35	C
05	7.30	C	50	2.00	B	95	3.10	C	140	3.99	C	185	5.00	C
06	1.49	B	51	3.01	C	96	3.31	C	141	4.66	C	186	4.34	C
07	5.01	C	52	3.28	C	97	3.95	C	142	4.61	C	187	4.24	C
08	6.38	C	53	5.44	C	98	3.89	C	143	4.31	C	188	1.70	B
09	6.15	C	54	7.90	C	99	5.19	C	144	3.52	C	189	4.92	C
10	7.03	C	55	5.65	C	100	1.05	B	145	4.37	C	190	4.27	C
11	8.82	C	56	5.19	C	101	7.49	C	146	4.34	C			
12	8.15	C	57	8.98	C	102	1.99	B	147	4.86	C			
13	5.98	C	58	0.47	B	103	4.62	C	148	4.46	C			
14	8.01	C	59	8.57	C	104	2.84	B	149	0.65	B			
15	0.53	B	60	7.98	C	105	4.55	C	150	3.66	C			
16	9.04	C	61	7.20	C	106	5.28	C	151	4.56	C			
17	8.97	C	62	3.20	C	107	4.75	C	152	4.40	C			
18	8.11	C	63	2.50	B	108Ver09	9.72	C	153	3.80	C			
19	3.25	C	64	8.47	C	109	8.22	C	154	1.43	B			
20	3.09	C	65	8.30	C	110	8.51	C	155	0.74	B			
21	1.86	B	66	3.02	C	111	10.97	C	156	2.46	B			
22	1.73	B	67	6.83	C	112	7.43	C	157	4.16	C			
23	1.80	B	68	4.54	C	113	8.53	C	158	3.86	C			
24	10.69	C	69	3.21	C	114	6.90	C	159	3.53	C			
25	6.42	C	70	3.50	C	115	2.14	B	160	3.52	C			
26	7.23	C	71	3.15	C	116	2.29	B	161	5.02	C			
27	1.90	B	72	2.97	B	117	7.25	C	162	4.84	C			
28	6.33	C	73	3.73	C	118	6.99	C	163	7.13	C			
29	4.67	C	74	3.01	C	119	7.44	C	164	1.74	B			
30	0.78	B	75	5.54	C	120	3.98	C	165	1.70	B			
31	4.14	C	76	3.44	C	121	8.09	C	166	1.73	B			
32	2.75	B	77	2.47	B	122	6.93	C	167	5.57	C			
33	3.44	C	78	5.92	C	123	6.91	C	168	4.39	C			
34	3.74	C	79	3.44	C	124	8.28	C	169	10.59	C			
35	7.78	C	80	4.36	C	125	6.41	C	170	6.28	C			
36	6.27	C	81	2.80	B	126	8.13	C	171	6.23	C			
37	5.37	C	82	3.33	C	127	7.55	C	172	4.66	C			
38	4.96	C	83	3.27	C	128	7.50	C	173	5.10	C			
39	5.13	C	84	4.53	C	129	0.37	B	174	4.08	C			
40	1.78	B	85	5.17	C	130	7.20	C	175	4.05	C			
41	4.87	C	86	4.64	C	131	7.06	C	176	8.05	C			
42	5.17	C	87	4.51	C	132	7.00	C	177	4.53	C			
43	3.21	C	88	4.03	C	133	7.15	C	178	1.81	B			
44	0.71	B	89	4.88	C	134	3.75	C	179	4.53	C			
45	4.89	C	90	4.15	C	135	2.84	B	180	6.67	C			