

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRICOLAS

CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DE LA RED HIDROGRÁFICA MÉXICO DF- ZONA METROPOLITANA- ZUMPANGO-IXMIQUILPAN-ZIMAPÁN- TAMAZUNCHALE-PÁNUCO

TEOBALDIS MERCADO FERNÁNDEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2011.

La presente tesis titulada: **Caracterización de las aguas de la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Pánuco**, realizada por el alumno: **Teobaldis Mercado Fernández**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

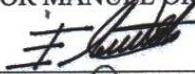
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

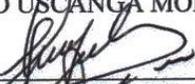
CONSEJERO


Dr. HECTOR MANUEL ORTEGA ESCOBAR

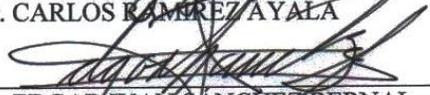
ASESOR


Dr. EBANDRO USCANGA MORTERA

ASESOR


Dr. CARLOS RAMIREZ AYALA

ASESOR


Dr. EDGAR IVAN SANCHEZ BERNAL

ASESORA


Dra. MARTHA ALICIA VELAZQUEZ MACHUCA

ASESORA


Dra. ROSALIA RAMOS BELLO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Agosto de 2011

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Córdoba, Colombia, por su apoyo permanente en mi cualificación docente, en esta ocasión en la realización del doctorado.

Al Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar, por la dirección del trabajo y por su invaluable y permanente colaboración para la realización de la presente investigación.

A mi Consejo Particular: Doctores Ebandro Uscanga Mortera, Carlos Ramírez Ayala, Edgar Iván Sánchez Bernal, Martha Alicia Velázquez Machuca y Rosalía Ramos Bello; por sus revisiones y recomendaciones para el presente trabajo.

A la gerencia del Distrito de Riego 033, Estado de México, en especial a los Ingenieros Raúl Rivas y Primitivo Ramírez, por el apoyo logístico para el muestreo de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo.

A todas las personas que de una u otra manera, me apoyaron para la realización de la presente investigación.

DEDICATORIA

A mi esposa Digna Emérita, por su profundo amor y apoyo permanente.

A mis hijos Ángel José y Julio Rafael, razón suficiente y necesaria para la lucha permanente por la superación.

A mis padres Ángel y Elsa, campesinos nobles que me enseñaron a trabajar y amar con todas las fuerzas del espíritu.

A mis hermanos Víctor, Narciso, Manuel, Ángel y Yusney, por el mutuo cariño y afecto que compartimos.

A Fidelina Márquez y Rosa Aparicio, a quienes quiero como a una madre.

A la memoria de:

- María Victoria, cuya existencia fue tan breve como profunda su huella; te amaré cada día de mi existencia.
- Mis abuelos paternos, Primitivo y María Isabel.
- Mis abuelos maternos, Joaquín y Alejandrina.
- Mi tío Julio Mercado, por su aprecio y cariño.
- Mi suegro Rafael Arteaga, a quien quise como un padre.
- Los profesores de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la universidad de Córdoba, Ernesto Arrieta, Luis Carlos Raciny, Misael Díaz, Hugo Iguarán, Manuel Solano, Iván García, Ulises Caraballo, Alfonso Nieto.

A toda mi familia y amigos, como una muestra de persistencia para lograr nuestros objetivos.

A mis amigos Mexicanos, por sus sinceras manifestaciones de cariño.

A mis amigos Colombianos residentes en México, por la identidad por nuestra tierra.

Al Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar, por su pasión por el trabajo, la academia y la amistad.

Al pueblo Colombiano, por el infinito deseo que podamos construir una sociedad con bienestar para todos.

Al verdadero señor de Nazaret, fundador de las doctrinas de la libertad y justicia social para la humanidad.

CONTENIDO

	Pagina
INDICE DE CUADROS.....	ix
INDICE DE FIGURAS.....	xi
INDICE DE ANEXOS.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	4
2.1 Objetivos.....	4
2.1.1 Objetivo general.....	4
2.1.2 Objetivos específicos.....	4
2.2 Hipótesis.....	5
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
3.1 Las sales solubles en suelos y aguas naturales.....	6
3.1.1 Procesos de acumulación de sales.....	13
3.1.2 Sales más comunes en los suelos y aguas.....	14
3.2 Calidad de aguas para riego y criterios que deben evaluarse.....	19
3.2.1 Criterios de salinidad.....	19
3.2.1.1 Conductividad eléctrica (CE).....	19
3.2.1.2 Presión osmótica (PO).....	22
3.2.1.3 Índice de salinidad efectiva (SE).....	31
3.2.1.4 Índice de salinidad potencial (SP).....	32
3.2.1.5 Fuerza iónica de una solución y coeficiente de actividad.....	33
3.2.1.6 Sales hipotéticas.....	36
3.2.2 Criterios de sodicidad.....	38
3.2.2.1 Ecuación de intercambio catiónico de Gapon.....	38
3.2.2.2 Relación de adsorción de sodio (RAS).....	40
3.2.2.2.1 RAS original o explícito (RAS_{or}).....	43
3.2.2.2.2 RAS ajustado (RAS_{aj}).....	44
3.2.2.2.3 RAS corregido (RAS°).....	55
3.2.2.3 Concentración de iones bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}).....	58
3.2.2.4 Problemas de infiltración de suelos bajo riego.....	60
3.2.3 Criterios de toxicidad.....	64
3.2.3.1 Sodio.....	64
3.2.3.2 Cloro.....	64
3.2.3.3 Boro.....	65
3.2.3.4 Fosfatos.....	66
3.2.3.5 Sulfatos.....	66

3.2.3.6	Nitratos.....	66
3.2.3.7	Elementos pesados.....	67
3.3	Estudios freáticos.....	68
3.3.1	Ecuaciones de transferencia de agua y su implicación en la salinidad de los suelos.....	72
3.3.1.1	Ecuación de continuidad.....	73
3.3.1.2	Ecuación de Darcy.....	73
3.3.1.3	Ecuación general de transferencia de agua.....	74
3.3.1.4	Ecuación de los mantos freáticos someros.....	75
3.3.2	Transporte de solutos.....	75
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	77
4.1	Tipo de investigación.....	77
4.2	Localización del área de estudio y distribución espacio-temporal de los muestreos.....	78
4.3	Métodos analíticos para las determinaciones físico-químicas a las muestras de agua.....	84
4.4	Determinación de parámetros para evaluar la calidad de las aguas.....	87
4.5	Análisis estadístico (asociación de variables).....	89
4.6	Comprobación de resultados analíticos de las determinaciones físico-químicas de las muestras de aguas.....	90
4.6.1	Balance de cationes y aniones.....	90
4.6.2	Conductividad eléctrica medida y conductividad eléctrica teórica.....	91
4.6.3	Conductividad eléctrica experimental y suma de cationes.....	91
4.6.4	Sólidos totales disueltos y sólidos totales calculados.....	91
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	92
5.1	Aguas que circulan por el sector México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco (Valle del Mezquital), verano 2009 y verano 2010.....	92
5.1.1	Composición iónica de las aguas residuales.....	92
5.1.2	Distribución de cationes y aniones.....	94
5.1.3	Distribución por clases de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y suma de cationes ($mmol_c L^{-1}$).....	96
5.1.4	Relación entre conductividad eléctrica teórica ($\mu S cm^{-1}$) y conductividad eléctrica experimental ($\mu S cm^{-1}$).....	98
5.1.5	Relación entre $mg L^{-1}$ y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$).....	99
5.1.6	Relación entre suma de cationes ($mmol_c L^{-1}$) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$).....	100
5.1.7	Relación entre presión osmótica (atm) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$).....	101
5.1.8	Relación entre $mmol - ión L^{-1}$ y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$)...	103

5.1.9	Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$).....	104
5.1.10	Sales hipotéticas.....	105
5.1.11	Clasificación de las aguas residuales de acuerdo con la relación de adsorción de sodio (RAS).....	109
5.1.12	Clasificación de las aguas residuales de acuerdo al peligro de disminución de la infiltración.....	113
5.1.13	Clasificación de las aguas residuales de acuerdo con el carbonato residual de sodio (CSR).....	115
5.1.14	Relación funcional $PSI - RAS$ en las aguas residuales.....	116
5.1.15	Contenido de boro en las aguas residuales.....	118
5.1.16	Contenido de fosfatos en las aguas residuales.....	119
5.1.17	Contenido de nitratos en las aguas residuales.....	121
5.2	Aguas que circulan por el sector Zimapán-Tamazunchale-Pánuco (zona de calizas SLP-VER).....	122
5.2.1	Composición iónica de las aguas.....	122
5.2.2	Distribución de cationes y aniones.....	124
5.2.3	Distribución por clases de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y suma de cationes ($mmol_c L^{-1}$).....	125
5.2.4	Relación entre conductividad eléctrica teórica ($\mu S cm^{-1}$) y conductividad eléctrica experimental ($\mu S cm^{-1}$).....	127
5.2.5	Relación entre $mg L^{-1}$ analíticos y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) ...	128
5.2.6	Relación entre suma de cationes ($mmol_c L^{-1}$) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$).....	128
5.2.7	Relación entre presión osmótica (atm) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$).....	129
5.2.8	Relación entre $mmol - ión L^{-1}$ y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$)...	131
5.2.9	Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$).....	131
5.2.10	Sales hipotéticas.....	132
5.2.11	Clasificación de las aguas de acuerdo con la relación de adsorción de sodio (RAS).....	136
5.2.12	Clasificación de las aguas de acuerdo al riesgo de disminución de la infiltración.....	139
5.2.13	Clasificación de las aguas de acuerdo con el carbonato de sodio residual (CSR).....	139
5.2.14	Relación funcional $PSI - RAS$ en las aguas de la zona de calizas SLP-VER.....	140
5.2.15	Contenido de boro en las aguas.....	142
5.2.16	Contenido de fosfatos en las aguas.....	143
5.2.17	Contenido de nitratos en las aguas.....	144
5.3	Síntesis de la red México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco.....	145

5.3.1	Flujo de cationes y aniones.....	145
5.3.2	Efecto de dilución.....	147
5.3.3	Sales hipotéticas.....	149
5.3.4	Carbonato de sodio residual (<i>CSR</i>).....	151
5.3.5	Variaciones de la relación de adsorción de sodio (<i>RAS</i>) y de la relación funcional <i>PSI – RAS</i>	152
5.4	Aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México.....	155
5.4.1	Dinámica de las aguas freáticas.....	155
5.4.2	Composición iónica de las aguas freáticas.....	157
5.4.3	Distribución de cationes y aniones.....	159
5.4.4	Distribución de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$).....	161
5.4.5	Relación entre mgL^{-1} analíticos y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$)....	164
5.4.6	Relación entre presión osmótica (<i>atm</i>) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$).....	165
5.4.7	Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$).....	168
5.4.8	Sales hipotéticas.....	168
5.4.9	Clasificación de las aguas de acuerdo con la relación de adsorción de sodio (<i>RAS</i>).....	172
5.4.10	Clasificación de las aguas de acuerdo al riesgo de reducción de la infiltración.....	175
5.4.11	Clasificación de las aguas de acuerdo con el carbonato de sodio residual (<i>CSR</i>).....	175
5.4.12	Relación funcional <i>PSI – RAS</i>	177
5.4.13	Contenidos de boro, fosfatos y nitratos en las aguas freáticas.....	179
6.	CONCLUSIONES.....	180
7.	RECOMENDACIONES.....	184
8.	LITERATURA CONSULTADA.....	185
9.	ANEXOS.....	197

INDICE DE CUADROS

		Pagina
Cuadro 1.	Solubilidad del $CaCO_3$ a diferentes presiones parciales del CO_2 a $25^\circ C$	15
Cuadro 2.	Composición iónica de las aguas de riego de algunos ríos de Estados Unidos.....	18
Cuadro 3.	Composición iónica media de aguas de ríos en el mundo.....	18
Cuadro 4.	Clasificación de las aguas de riego de acuerdo al índice de salinidad efectiva.....	32
Cuadro 5.	Clasificación de las aguas de riego de acuerdo al índice de salinidad potencial.....	32
Cuadro 6.	Parámetros individuales del tamaño de iones a_i en Angstrom (Å).....	35
Cuadro 7.	Valores de s_k para sales de diferentes tipos de valencia.....	37
Cuadro 8.	Valores del pH_c para las aguas de riego.....	53
Cuadro 9.	Valores de Ca° , en función de la relación $\frac{HCO_3^-}{Ca^{2+}}$ y la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$).....	57
Cuadro 10.	Clasificación de las aguas de riego de acuerdo al carbonato de sodio residual ($mmol_c L^{-1}$)	60
Cuadro 11.	Efecto de los cationes adsorbidos en algunas propiedades físicas de los suelos.....	61
Cuadro 12.	Clasificación de las aguas de riego basada en el contenido de boro....	65
Cuadro 13.	Límites de boro en aguas de riego para diferentes grados de tolerancia.....	66
Cuadro 14.	Concentración máxima recomendada de elementos trazas y pesados en aguas de riego.....	67
Cuadro 15.	Número de pozos de observación por superficie en hectáreas.....	69
Cuadro 16.	Métodos analíticos empleados para las diferentes mediciones.....	84
Cuadro 17.	Directrices para interpretar la calidad de las aguas de riego.....	86
Cuadro 18.	Factores de conductividad eléctrica de los iones que se encuentran en las aguas.....	88
Cuadro 19.	Tipos de aguas de acuerdo a su composición iónica.....	88
Cuadro 20.	Criterios para aceptar el porcentaje de error en el balance de cationes y aniones.....	90
Cuadro 21.	Composición iónica, muestra 13, Valle del Mezquital, verano 2009...	105
Cuadro 22.	Cálculo de sales hipotéticas, muestra 13, Valle del Mezquital, verano 2009.....	106
Cuadro 23.	Clasificación de las aguas residuales de acuerdo con la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y las diferentes conceptualizaciones del RAS, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	111
Cuadro 24.	Clasificación de las aguas de acuerdo con el riesgo de reducción de la infiltración, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	115

Cuadro 25.	Composición iónica, muestra 7, zona de calizas SLP-VER, verano 2009.....	132
Cuadro 26.	Cálculo de sales hipotéticas, muestra 7, zona de calizas SLP-VER, verano 2009.....	133
Cuadro 27.	Clasificación de las aguas de la zona de calizas SLP-VER de acuerdo con la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y los diferentes <i>RAS</i>	138
Cuadro 28.	Clasificación de las aguas de la zona de calizas SLP-VER de acuerdo con el riesgo de reducción de la infiltración.....	139
Cuadro 29.	Estimación del <i>RAS</i> a partir del factor de concentración (F_c).....	149
Cuadro 30.	Variación de la profundidad del nivel freático, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010...	155
Cuadro 31.	Composición iónica, muestra pozo 5, aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera de 2009.....	169
Cuadro 32.	Cálculo de las sales hipotéticas, muestra pozo 5, aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera de 2009.....	169
Cuadro 33.	Clasificación de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, de acuerdo con la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y los diferentes <i>RAS</i>	174
Cuadro 34.	Clasificación de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, de acuerdo con el riesgo de reducción de la infiltración.....	175

INDICE DE FIGURAS

		Pagina
Figura 1.	Diagrama para clasificar las aguas de riego según la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y el <i>RAS</i>	42
Figura 2.	Valores de <i>pCa</i> y <i>pAlk</i> de las aguas de riego.....	55
Figura 3.	Reducción relativa de la infiltración en función de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y el <i>RAS</i>	63
Figura 4.	Localización de los muestreos, red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009.....	79
Figura 5.	Localización de los muestreos, red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2010.....	80
Figura 6.	Localización de los muestreos, Valle de Mezquital, verano 2009.....	81
Figura 7.	Localización de los muestreos, Valle de Mezquital, verano 2010.....	82
Figura 8.	Localización de la red freática, Modulo de Riego Temascalcingo, Estado de México.....	83
Figura 9.	Tipos de aguas de acuerdo a su composición iónica, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	93
Figura 10.	Relaciones iónicas entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^{+} , Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	94
Figura 11.	Composición iónica de las aguas residuales, Valle del Mezquital, verano 2009.....	95
Figura 12.	Composición iónica de las aguas residuales, Valle del Mezquital, verano 2010.....	95
Figura 13.	Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	97
Figura 14.	Distribución de frecuencias de la suma de cationes ($mmol_c L^{-1}$), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	97
Figura 15.	Relación funcional entre conductividad eléctrica teórica ($\mu S cm^{-1}$) y conductividad eléctrica experimental ($\mu S cm^{-1}$), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	99
Figura 16.	Relación concentración ($mg L^{-1}$) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	100
Figura 17.	Relación entre suma de cationes ($mmol_c L^{-1}$) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	101
Figura 18.	Relación entre presión osmótica teórica (<i>atm</i>) y presión osmótica experimental (<i>atm</i>), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	103

Figura 19.	Relación entre $mmol-iónL^{-1}$ y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	104
Figura 20.	Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	105
Figura 21.	Distribución de sales hipotéticas, Valle del Mezquital, verano 2009..	107
Figura 22.	Distribución de sales hipotéticas, Valle del Mezquital, verano 2010..	108
Figura 23.	Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) de los iones individuales con fuerza iónica (ML^{-1}) de las sales hipotéticas, Valle del Mezquital, verano 2009.....	108
Figura 24.	Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) de los iones individuales con fuerza iónica (ML^{-1}) de las sales hipotéticas, Valle del Mezquital, verano 2010.....	109
Figura 25.	Relación entre RAS_{aj} y RAS_{or} , Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	110
Figura 26.	Relación entre RAS° y RAS_{or} , Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	111
Figura 27.	Diagrama de clasificación de las aguas residuales, $CE-RAS_{or}$, $CE-RAS_{aj}$ y $CE-RAS^{\circ}$, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	112
Figura 28.	Reducción relativa de la infiltración de acuerdo con la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y RAS , Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	114
Figura 29.	Distribución de las aguas residuales de acuerdo con el carbonato de sodio residual ($mmol_c L^{-1}$), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	116
Figura 30.	Relación funcional $PSI-RAS(RAS_{or},RAS_{aj},RAS^{\circ})$ para un $kg' = 0.0072444(mmol_c L^{-1})^{-1/2}$, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	117
Figura 31.	Relación funcional $PSI-RAS(RAS_{or},RAS_{aj},RAS^{\circ})$ para un $kg' = 0.0168999(mmol_c L^{-1})^{-1/2}$, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	118
Figura 32.	Contenidos de boro (mgL^{-1}) en las aguas residuales, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	119
Figura 33.	Contenidos de fosfatos (mgL^{-1}) en las aguas residuales, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	120
Figura 34.	Contenidos de nitratos (mgL^{-1}) en las aguas residuales, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	121
Figura 35.	Tipos de aguas de acuerdo a su composición iónica, zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	122
Figura 36.	Relaciones iónicas entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^{+} , zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	123

Figura 37.	Composición iónica de las aguas, zona de calizas SLP-VER, verano 2009.....	124
Figura 38.	Composición iónica de las aguas, zona de calizas SLP-VER, verano 2010.....	125
Figura 39.	Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	126
Figura 40.	Distribución de suma de cationes ($mmol_c L^{-1}$), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	126
Figura 41.	Relación funcional entre conductividad eléctrica teórica ($\mu S cm^{-1}$) y conductividad eléctrica experimental ($\mu S cm^{-1}$), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010...	127
Figura 42.	Relación entre concentración ($mg L^{-1}$) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	128
Figura 43.	Relación entre suma de cationes ($mmol_c L^{-1}$) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	129
Figura 44.	Relación entre presión osmótica teórica (atm) y presión osmótica experimental (atm), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	130
Figura 45.	Relación entre $mmol - ión L^{-1}$ y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	131
Figura 46.	Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010...	132
Figura 47.	Distribución de las sales hipotéticas, zonas de calizas SLP-VER, verano 2009.....	134
Figura 48.	Distribución de las sales hipotéticas, zonas de calizas SLP-VER, verano 2010.....	135
Figura 49.	Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) de los iones individuales con fuerza iónica (ML^{-1}) de las sales hipotéticas, zona de calizas SLP-VER, verano 2009.....	135
Figura 50.	Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) de los iones individuales con fuerza iónica (ML^{-1}) de las sales hipotéticas, zona de calizas SLP-VER, verano 2010.....	136
Figura 51.	Relación entre RAS_{aj} y RAS_{or} , zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	137
Figura 52.	Relación entre RAS° y RAS_{or} , zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	138
Figura 53.	Distribución de las aguas de la zona de calizas SLP-VER de acuerdo al carbonato de sodio residual ($mmol_c L^{-1}$), verano 2009 y verano 2010.....	140

Figura 54.	Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$ para un $kg' = 0.0072444(mmol_c L^{-1})^{-(1/2)}$, zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	141
Figura 55.	Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$ para un $kg' = 0.0168999(mmol_c L^{-1})^{-(1/2)}$, zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	142
Figura 56.	Contenidos de boro (mgL^{-1}), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	143
Figura 57.	Contenidos de fosfatos (mgL^{-1}), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	144
Figura 58.	Contenidos de nitratos (mgL^{-1}), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	144
Figura 59.	Flujo de iones, red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009.....	146
Figura 60.	Flujo de iones, red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2010.....	146
Figura 61.	Conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) en función de la dilución.....	147
Figura 62.	Relación de adsorción de sodio (RAS) en función de la dilución.....	148
Figura 63.	Distribución de sales hipotéticas, red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009.....	150
Figura 64.	Distribución de sales hipotéticas, red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2010.....	150
Figura 65.	Distribución del carbonato de sodio residual ($mmol_c L^{-1}$), red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009 y verano de 2010.....	151
Figura 66.	Variación del $RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$, red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009 y verano de 2010.....	153
Figura 67.	Variación de la relación funcional $PSI - RAS$, red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009 y verano de 2010.....	154
Figura 68.	Plano de isobatas, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009.....	156
Figura 69.	Plano de isohipsas, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009.....	157
Figura 70.	Tipos de aguas de acuerdo a su composición iónica, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.....	158

Figura 71.	Relaciones iónicas entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , Módulo de Riego Temascalcingo, primavera 2009 y verano 2010.....	159
Figura 72.	Composición iónica de las aguas freáticas, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009.....	160
Figura 73.	Composición iónica de las aguas freáticas, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, verano 2010.....	160
Figura 74.	Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.....	162
Figura 75.	Plano de conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, verano 2010.....	162
Figura 76.	Relación funcional entre la conductividad eléctrica teórica ($\mu S cm^{-1}$) y conductividad eléctrica experimental ($\mu S cm^{-1}$), Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.....	163
Figura 77.	Relación entre concentración ($mg L^{-1}$) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.....	164
Figura 78.	Plano de concentración ($mg L^{-1}$), Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, verano 2010.....	165
Figura 79.	Relación entre presión osmótica teórica (atm) y presión osmótica experimental (atm), Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.....	166
Figura 80.	Plano de presión osmótica (atm) de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009.....	167
Figura 81.	Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010...	168
Figura 82.	Distribución de las sales hipotéticas, aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009.....	170
Figura 83.	Distribución de las sales hipotéticas, aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, verano 2010.....	171
Figura 84.	Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) de los iones individuales y fuerza iónica (ML^{-1}) de las sales hipotéticas, aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009.....	171
Figura 85.	Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) de los iones individuales y fuerza iónica (ML^{-1}) de las sales hipotéticas, aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, verano 2010...	172
Figura 86.	Relación entre RAS_{aj} y RAS_{or} , aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010...	173
Figura 87.	Relación entre RAS° y RAS_{or} , aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010...	173

Figura 88.	Plano de RAS_{aj} de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009.....	174
Figura 89.	Distribución de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, de acuerdo al carbonato de sodio residual ($mmol_cL^{-1}$), primavera 2009 y verano 2010.....	176
Figura 90.	Plano de carbonato de sodio residual ($mmol_cL^{-1}$) de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, verano 2010.....	176
Figura 91.	Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$ para un $kg' = 0.0072444(mmoleL^{-1})^{-1/2}$, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.....	177
Figura 92.	Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$ para un $kg' = 0.0168999(mmoleL^{-1})^{-1/2}$, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.....	178
Figura 93.	Plano de $PSI_{aj(0.0168999)}$, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, verano 2010.....	179

INDICE DE ANEXOS

		Pagina
Anexo 1.	Localización de muestreos, red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009 y verano 2010.....	197
Anexo 2.	Características fisiográficas de la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco.....	201
Anexo 3.	Muestreo de mantos freáticos del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.....	222
Anexo 4.	Composición iónica de las aguas de la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009 y verano 2010.....	224
Anexo 5.	Composición iónica de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010...	240
Anexo 6.	Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$ para diferentes coeficientes de selectividad iónica, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.....	245
Anexo 7.	Distribución de las aguas de la zona de calizas SLP-VER de acuerdo con la conductividad eléctrica y el RAS , verano 2009 y verano 2010.....	248
Anexo 8.	Clasificación de las aguas de la zona de calizas SLP-VER de acuerdo al riesgo de reducción de la infiltración, verano 2009 y verano 2010.....	249
Anexo 9.	Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$ para diferentes coeficientes de selectividad iónica, zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.....	252
Anexo 10.	Distribución de las aguas freáticas de acuerdo con la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y el RAS , Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.....	255
Anexo 11.	Clasificación de las aguas freáticas por el riesgo de reducción de la infiltración, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.....	256
Anexo 12.	Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$ para diferentes coeficientes de selectividad iónica, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010...	257

RESUMEN

CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DE LA RED HIDROGRÁFICA MÉXICO DF- ZONA METROPOLITANA-ZUMPANGO-IXMIQUILPAN-ZIMAPÁN- TAMAZUNCHALE-PÁNUCO

Teobaldis Mercado Fernández, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2011

La presente investigación fue de carácter observacional, prospectivo, transversal y descriptivo-analítico. A través de la caracterización físico-química de las aguas y la asociación de variables y parámetros, fue posible conocer la variación de la composición iónica y la concentración electrolítica, y estimar los valores mínimos y máximos del sodio intercambiable (PSI), a partir de las diferentes formulaciones de la relación de adsorción de sodio RAS (RAS_{or} , RAS_{aj} , RAS°). En el sector México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, por donde circulan las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital, predominan los iones sodio (Na^+) y bicarbonato (HCO_3^-); la relación funcional $mgL^{-1} = fa(CE)$ con una pendiente de 0.7069 corresponde a aguas de tipo bicarbonatadas. De la población de aguas, el 63.77 % tiene concentraciones entre 10 – 20 $mmol_cL^{-1}$; CE media de 1,510.18 $\mu S cm^{-1}$; orden de predominio de sales hipotéticas: $NaCl > NaHCO_3 > Ca(HCO_3)_2 > Mg(HCO_3)_2 > MgSO_4 > KHCO_3$; valores de $PSI_{máximo}$ de 6.98 a 29.37 y de $PSI_{mínimo}$ de 0.1 a 1.3, lo cual permite manejar adecuadamente dosis de fuentes de calcio para el mejoramiento de suelos sódicos; los diferentes RAS ocasionaron reducción ligera a moderada de la infiltración (62.3 – 97.1 %); el 71.7 % de los valores del Carbonato de Sodio Residual (CSR) no son recomendables; el 76.1 % tiene uso condicionado para Boro; el 64.5 % de los valores no son recomendables para Fosfatos y el 10.4 % de los valores no son recomendables para Nitratos. En el sector Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, en la zona de calizas de Hidalgo, San Luis Potosí y Veracruz, predominan los iones calcio (Ca^{2+}) y bicarbonato (HCO_3^-); la relación funcional $mgL^{-1} = fa(CE)$ con un valor de 0.6912 corresponde a aguas de tipo bicarbonatada. De la población de aguas, el 17.9 % tiene concentraciones entre 10 – 15 $mmol_cL^{-1}$; CE media de 647.22 $\mu S cm^{-1}$; orden de predominio de las sales hipotéticas: $Ca(HCO_3)_2 > NaCl > Mg(HCO_3)_2 > MgSO_4 > MgCl_2 > KHCO_3$; se encontraron valores relativamente bajos del $PSI_{máximo}$ (1.7 – 8.0), lo cual indica que el peligro de sodio (Na^+) es mínimo; el 100 % del CSR tiene valores que las califica como buenas; las formulaciones del RAS presentaron reducción ligera a moderada de la infiltración (64.2 – 82.1 %), debido a la baja concentración electrolítica de estas aguas; en cuanto al Boro, solo el 14.9 % tiene valores de uso condicionado y el 100 % de Fosfatos y Nitratos tienen valores que las califica como buenas. La distribución en toda la red hidrográfica de la concentración de sales hipotéticas, CSR , RAS y relación funcional $PSI - RAS$; indica la predominancia relativa de los iones sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y bicarbonato (HCO_3^-) en cada sector por donde circulan las aguas. En los mantos freáticos someros alimentados con aguas residuales a través del riego, ocurre un proceso gradual de salinización o sodificación, debido al comportamiento físico de los flujos freáticos.

Palabras clave: Salinidad, sales hipotéticas, sodicidad, RAS , PSI , PSI , flujos freáticos.

ABSTRACT

WATER CHARACTERIZATION OF THE MEXICO DF- ZONA METROPOLITANA-ZUMPANGO-IXMIQUILPAN-ZIMAPÁN-TAMAZUNCHALE-PÁNUCO HYDROGRAPHIC NETWORK

Teobaldis Mercado Fernández, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2011

This research was an observational, cross-sectional, descriptive - analytical type. Through the physical-chemical characterization of the waters and the association of variables and parameters, it was possible to learn about the variation of ion composition and the electrolyte concentration and estimate the minimum and maximum values of sodium (ESP). In the sector Mexico DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, along which the wastewaters that irrigate the Mezquital valley circulate, sodium (Na^+) and bicarbonate (HCO_3^-) ions are found; the functional relationship $mgL^{-1} = fa(CE)$ with a slope of 0.7069 corresponds to the type of bicarbonate waters. Of the population of waters, 63.77% have concentrations between 10 - 20 $mmol_cL^{-1}$; average EC of 1,510.18 $\mu S cm^{-1}$, order of predominance of the hypothetical salt: $NaCl > NaHCO_3 > Ca(HCO_3)_2 > Mg(HCO_3)_2 > MgSO_4 > KHCO_3$; $ESP_{maximum}$ values from 6.98 to 29.37 and $ESP_{minimum}$ from 0.1 to 1.3, which allows the proper handling of calcium sources doses for the improvement of sodic soils; the different SAR_s caused a decrease from slight to moderate in infiltration (62.3 - 97.1 %); 71.7 % of the values of Residual Sodium Carbonate (RSC) are not recommended; 76.1 % has a conditional use for Boron; 64.5 % of the values are not recommended for Phosphate and 10.4 % of the values are not recommended for Nitrates. In the sector Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, specifically in the Hidalgo, San Luis Potosí and Veracruz limestone area, calcium (Ca^{2+}) and bicarbonate (HCO_3^-) ions prevail; The functional relationship $mgL^{-1} = fa(CE)$ with a value of 0.6912 corresponds to the type of bicarbonate waters. Of the population of water, 17.9 % have concentrations between 10 - 15 $mmol_cL^{-1}$; average EC of 647.22 $\mu S cm^{-1}$; order of predominance of the hypothetical salt: $Ca(HCO_3)_2 > NaCl > Mg(HCO_3)_2 > MgSO_4 > MgCl_2 > KHCO_3$; relatively low $ESP_{maximum}$ (1.7 - 8.0) values were found, which indicate that the sodium (Na^+) hazard is minimal; 100 % of RSC has values that qualifies them as good; SAR_s formulations showed a slight-moderate decrease in infiltration (64.2 - 82.1 %), due to low electrolyte concentration of these waters; in regards to Boron, only 14.9 % has conditional use values and 100 % of Phosphates and Nitrates have values that qualifies them as good. The distribution of hypothetical salts throughout the entire hydrographic network, RSC, SAR and $ESP-SAR$ functional relationship, indicate the relative predominance of the sodium (Na^+), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}) and bicarbonate (HCO_3^-) ions in each sector through which water circulates. In the shallow groundwaters which are fed by wastewater through irrigation occurs a gradual process of salinization and sodicity, due to the physical behavior of the ground water flows.

Keywords: salinity, hypothetical salts, sodicity, SAR,ESP,RSC, ground water flows.

1. INTRODUCCIÓN

La irrigación en la agricultura, es uno de los factores más importantes en el aumento de la producción de los cultivos. A nivel mundial la superficie bajo riego representa el 13 % del total del área dedicada a la agricultura, en tanto que el valor de la producción obtenida bajo este sistema corresponde al 34 % de los ingresos del sector agropecuario mundial. De esta manera, el riego ha permitido reducir la dependencia de la agricultura estacional, pudiéndose sostener una alta producción agrícola (Rhoades *et al.*, 1992).

El acelerado desarrollo de la agricultura de riego, ha conducido a un uso excesivo de las fuentes de agua de fácil acceso, como ríos, lagos y agua subterráneas; como consecuencia se vive actualmente un problema de escasez de fuentes hídricas de buena calidad agrícola, asociados a otros problemas tales como, la sobre explotación de los acuíferos, salinidad y sodicidad de los suelos y contaminación de las fuentes superficiales y subterráneas. Para dar solución al problema de escasez, se han planteado diversas alternativas, que comprenden desde la optimización de las fuentes disponibles, hasta la utilización de fuentes no convencionales, como lo es el uso de las aguas residuales. El uso de las aguas residuales en el riego agrícola, es una práctica que se viene realizando en el mundo desde hace más de 300 años (Abd-El-Naim, 1988; Velázquez, 2001).

El principal uso del agua en México es el agrícola, el cual se refiere al agua utilizada para el riego de cultivos. Actualmente se estima que de los 77,321 millones de m³ con que dispone México; el 77 %, es decir 59,537.2 m³ se destina a la agricultura de riego. La superficie dedicada a las labores agrícolas varía entre 20 y 25 millones de hectáreas, con una superficie cosechada entre 18 a 22 millones de hectáreas por año. El valor de la producción directa equivale al 6.5 % del producto interno bruto (PIB) nacional. México ocupa el sexto lugar mundial en términos de superficie con infraestructura de riego con 6.46 millones de hectáreas. El 54 % de la superficie bajo riego corresponde a 85 Distritos de Riego y el 46 % restante a más de 39,000 Unidades de Riego (CNA, 2008).

Se estima que aproximadamente el 3 % del área total bajo riego (193,800 hectáreas) utilizan aguas residuales. De acuerdo con el INEGI (1992) 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 DF y Zona Metropolitana. El área regada con estas aguas sin ningún tratamiento es de 143,227 hectáreas; aunque existe información de la existencia de algunas plantas de tratamiento primario en cercanías de Tula, Hidalgo, sin embargo las aguas residuales con este tratamiento primario, se vierten a los canales de conducción general del Valle del Mezquital, llegando a los diferentes embalses reguladores, hasta llegar finalmente a la presa de Zimapán. De aquí a través del río Moctezuma las aguas residuales de origen urbano-industrial continúan y conectan con la zona de calizas de Hidalgo, San Luis Potosí y Veracruz, hasta llegar a las llanuras del Golfo Norte, vertiéndose al cauce del río Pánuco, para posteriormente y en forma conjunta llegar al Golfo de México; este recorrido se ha denominado sector Zimapán-Tamazunchale-Pánuco.

Las aguas residuales, particularmente de origen urbano-industrial, contienen compuestos derivados de los procesos industriales, como metales tóxicos, sales solubles, iones de sodio, magnesio, entre otros, que en determinadas condiciones, tienen efectos adversos en los suelos, que se manifiestan básicamente como, acumulación de sales solubles, sodificación paulatina de los espesores superficiales de los suelos y la acumulación de metales pesados en alguna medida; tal como es el caso del Valle del Mezquital, donde se usan aguas residuales con predominancia de sales solubles del tipo Sódico-clorhídrico-bicarbonatadas (Kelley, 1963; Rhoades *et al.*, 1992; CNA, 1994, Cifuentes *et al.*, 1994; Velázquez, 2001; Mendoza, 2009; Castro, 2011).

La predominancia del ión sodio (Na^+) sobre los iones calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), en las soluciones de los suelos, propicia una reacción alcalina ($pH > 8.0 - 9.0$) debido a los procesos de hidrólisis, lo cual causa la solubilización paulatina de los sistemas arcillosos de los suelos y con ello la destrucción de la estructura. El grado de afectación de los suelos por los procesos de sodificación, es función de las características físico-químicas y mineralógicas de éstos y de las aguas que se usan para riego (Figuerola *et al.*, 1991).

A su vez, también se debe señalar que, la aplicación excesiva del agua residual (láminas mayores de 1 m por lo general), retrasa la acumulación de sales solubles en los suelos, debido al efecto de lavado por el alto número de riegos; sin embargo, en las zonas donde se acumula la humedad, las cantidades de sales son considerables.

La finalidad de este trabajo de investigación de carácter descriptivo-analítico, es conocer como varían las composiciones iónicas, las concentraciones electrolíticas y parámetros asociados, como la relación de adsorción de sodio *RAS*, la relación funcional *PSI – RAS*, entre otros; de las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital, las aguas de la zona de calizas de San Luís Potosí y Veracruz y las aguas freáticas, en la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

Conocer las características físico-químicas de las aguas de la red México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco.

2.1.2 Objetivos específicos

1. Determinar para las diferentes muestras de la población de aguas, la composición iónica (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}), los iones específicos (B , PO_4^{-3} , NO_3^-), el pH , la conductividad eléctrica (CE), la presión osmótica (PO) y la concentración de la solución (mgL^{-1}).
2. Determinar relaciones funcionales entre las variables para conocer la salinidad de las soluciones.
3. Determinar las sales hipotéticas en las diferentes muestras de aguas.
4. Determinar la relación de adsorción de sodio RAS , en sus diferentes conceptualizaciones (RAS_{or} , RAS_{aj} y RAS°).
5. Predecir el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), a partir de la relación de adsorción de sodio (RAS) para diferentes valores del coeficiente de selectividad iónica de Gapon.
6. Determinar para las aguas freáticas, la dinámica de variación de la profundidad del nivel freático, zonas de carga, zona de descarga y dirección del flujo freático; y su relación con los procesos de salinidad o sodicidad de los suelos.

2.2 Hipótesis

1. La estimación de los diferentes parámetros de la caracterización físico-química y la asociación de variables de las aguas, permite predecir los niveles de sodio intercambiable (*PSI*) en los suelos.
2. Las aguas residuales que circula en una red hidrográfica, se pueden mejorar naturalmente si en su recorrido sufren dilución y el enriquecimiento con calcio.
3. La dinámica de los mantos freáticos (isohipsas e isobatas) y su relación con la salinidad, permite comprender los procesos de salinidad o sodicidad a macro-escala en los Distritos de Riego.

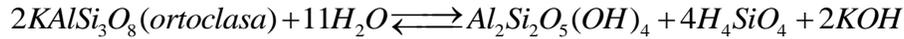
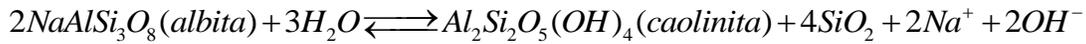
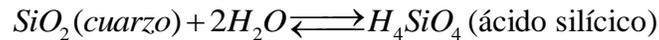
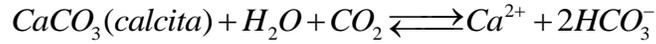
3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Las sales solubles en suelos y aguas naturales

El proceso de transformaciones físicas y químicas que sufren los minerales y rocas, recibe el nombre de intemperismo, este proceso lleva a la desintegración de los minerales primarios y a la formación de nuevos minerales llamados secundarios; estos últimos, generalmente, se presentan en partículas muy pequeñas en el suelo, en la fracción de las arcillas, y por esta razón se les da el nombre de minerales arcillosos. El intemperismo geoquímico permanente durante toda la longitud de tiempo geológico, es la principal fuente de sales en el suelo y en aguas de riego, y además representa un eslabón entre el intercambio geoquímico de materia entre continentes y océanos (Marshall, 1964; Malagon, 1975; Bresler *et al.*, 1982; James *et al.*, 1982; Ford, 1984; Fassbender y Bornemisza, 1987; Jurinak and Suarez, 1990).

La mayoría de rocas que conforman la corteza terrestre se han formado bajo condiciones de altas temperaturas y presiones. Los diferentes cristales que constituyen estas rocas no son estables cuando estos minerales se encuentran expuestos a condiciones atmosféricas; por lo tanto, el intemperismo es un proceso espontáneo que transforma a los minerales primarios en otros minerales más estables en la superficie de la corteza terrestre. La materia orgánica (*MO*) es un agente reductor y también una fuente de ácidos orgánicos que promueven el intemperismo y la migración de cationes en forma de quelatos. En general, por medio de los efectos de agentes del intemperismo (lluvia, O_2 , CO_2 , CH_4 y H_2S), los minerales primarios se transforman en especies solubles (Malagon, 1975; Cardona y Carrillo-Rivera, 2006; Cepeda, 2009).

Algunos ejemplos de reacciones químicas de intemperismo, se presentan a continuación (Kovda, 1980; Bresler *et al.*, 1982; Fassbender, 1987; Jurinak and Suarez, 1990; Bui *et al.*, 1998; Cepeda, 2009):



Intemperismo de silicatos de calcio y magnesio.



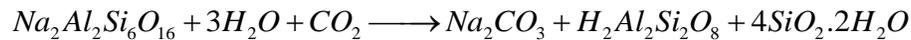
Intemperismo de aluminosilicatos que contienen calcio (Anortita).



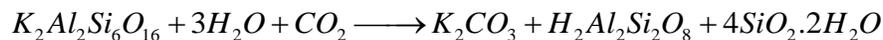
Intemperismo de silicatos magnésico.



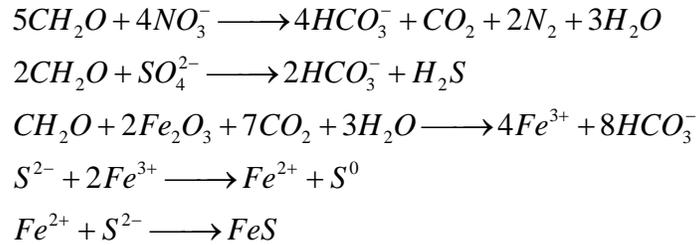
Intemperismo de aluminosilicatos que contienen sodio.



Intemperismo de aluminosilicatos que contienen potasio.



Procesos de reducción de nitratos, sulfatos y óxidos de hierro debido a la actividad biológica de microorganismos, con la participación de la materia orgánica (MO), la cual es representada como CH_2O .



Como consecuencia de esto en todas las reacciones de procesos de reducción se forman bicarbonatos, los cuales ocurren en suelos inundados o con altos niveles freáticos, siendo la materia orgánica necesaria como material energético. Según Velázquez, (2001) y Mendoza, (2009), estos procesos se presentan con mucha intensidad en las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapan que riegan los suelos del Valle del Mezquital, estado de Hidalgo, México.

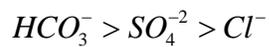
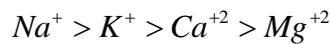
En síntesis, se debe señalar, que las fuentes primarias de las sales solubles en la corteza terrestre, que salinizan los suelos y espesores subyacentes son:

1. Emanaciones gaseosas volcánicas y plutónicas (lavas, fumarolas y magmas) y productos de sus cambios y reacciones físico-químicas. Tales como: a. Sales y gases que se encuentran solubilizados en fuentes termales; b. Productos de oxidación de algunos elementos de la atmósfera; y c. Productos solubles derivados del intemperismo de rocas cristalinas.
2. Los procesos gaseosos solubles que se presentan en forma de elementos (S , Cl), que se oxidan posteriormente o se solubilizan en las aguas. En este grupo se tiene:
 - a. Óxidos (SO_2 , SO , CO_2 , B_2O_3), que se solubilizan en las aguas y se transforman posteriormente en ácidos, por lo que estos compuestos reaccionan con diferentes rocas y se asocian con cationes alcalinos y alcalino-térreos; b. Ácidos (HCl , H_2S , H_3BO_3); y c. Sales ($NaCl$, NH_4Cl).
3. La atmósfera es una fuente importante de sales de los ácidos nítrico, nitroso y carbónico.

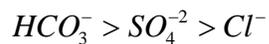
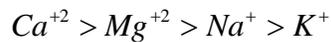
4. Una fuente fundamental de todos los tipos actuales de acumulaciones salinas, es el intemperismo de rocas cristalinas y que dan lugar a carbonatos, sulfatos, cloruros, boratos, etc.

El predominio de iones en las aguas naturales, se debe al tipo de material parental con que esté en contacto, como se señala a continuación (Mandel, 1973; Custodio y Llamas, 1985; Suarez, 1998; Cardona y Carrillo-Rivera, 2006):

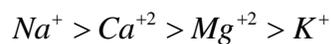
En contacto con granito:



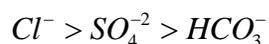
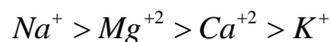
En contacto con calizas y dolomitas:



En contacto o en acuíferos basálticos:



En contacto con agua de mar:



No es fácil establecer los valores concretos para las sales que pueden aportar los diferentes tipos de rocas, no sólo porque existen importantes diferencias de composición y alterabilidad de minerales dentro de cada uno de ellos, sino también por las condiciones climáticas del medio ambiente, la composición del agua de recarga, el tiempo de contacto, la longitud de recorrido, el grado de aireación y la permeabilidad (Kovda, 1980; Custodio y Llamas, 1995).

En rocas ígneas, los iones como el Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , están a veces débilmente retenidos por la estructura silicatada y pasan con facilidad al agua dejando un esqueleto cristalino que supone una resistencia al progreso de esa disolución y que puede llegar a frenarla, protegiéndose así el interior de los cristales. Esta barrera se va disolviendo poco a poco y controla total o parcialmente el ataque de zonas más internas; el proceso de disolución es función del pH y de la temperatura del agua, además de serlo del grado de hidratación. En general la disolución es más rápida por las aguas ácidas que las aguas alcalinas y el anhídrido carbónico disuelto juega un papel muy importante al mantener el pH . Aparte de la liberación de iones alcalinos y alcalinotérreos, parte de la sílice queda en forma coloidal o disuelta; la forma disuelta es mayor cuanto mayor es el pH ; la cantidad de alúmina es en general despreciable si el pH queda entre 5 y 7.5. Las aguas relacionadas con los granitos son en general poco salinas y en ellas domina como anión el HCO_3^- y como cationes el Na^+ , el Ca^{2+} o ambos. Existen cantidades importantes de sílice (entre 20 y 100 ppm), la cual es un residuo de la alteración de silicatos y formación de arcillas, con sólo ínfimos aportes por disolución directa de cuarzo; la relación SiO_2 / Ca es mucho menor que en la roca. Aunque se pueden solubilizar cantidades importantes de K y Fe , el primero es retenido por las arcillas y el segundo precipitado como $Fe(OH)_3$, por lo cual sus concentraciones finales son en general pequeñas. El contenido en Cl^- y SO_4^{2-} es en general bajo ya que estas rocas los contienen en poca cantidad, excepto si existen cristales de piritita (FeS_2), la cual en medio oxidante puede originar aportes importantes de ion sulfato; para ello se necesita de una facilidad de suministro de oxígeno. En los granitos normales dominan los alcalinos sobre los alcalinotérreos y esta preponderancia se mantiene en el agua. En los granitos más básicos como los de las series de las anfibólicas, sienitas y dioritas, la predominancia es menos acentuada. En general la relación Mg^{2+} / Ca^{2+} es menor que 1.0, del orden de 0.3; en anfibolitas, gabros, etc., la relación suele ser más elevada. En climas templados y húmedos no es frecuente que la concentración de las aguas supere los 500 ppm y muchas veces no llega a 200 ppm si las condiciones de ataque son difíciles. Si las aguas de granito pierden CO_2 disuelto por escape a la atmósfera y así pueden quedar francamente alcalinas debido a la predominancia de HCO_3^- y Na^+ , y es

posible que se originen precipitados de $CaCO_3$. Las aguas relacionadas con terrenos basálticos suelen ser algo más salinas que la de terrenos graníticos dada la más fácil alterabilidad de los minerales constituyentes; al igual que con los granitos, se puede suponer que el Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} pasan a la solución, mientras que el K^+ y el Fe se precipitan. En general se libera menos sílice, la cual no suele superar los 60 ppm; siendo el Cl^- y SO_4^{2-} escasos, a menos que existan sulfuros metálicos que por oxidación aporten este último; en general las relaciones Na^+ / Ca^{2+} y Mg^{2+} / Ca^{2+} son similares a las rocas, con valores alrededor de 0.3 para las primeras y de 1 para la segunda (Custodio y Llamas, 1995; Cepeda, 2009).

La gran variedad de rocas sedimentarias que existe, obliga a clasificarlas en grupos para poder llegar a definir algunas ideas generales sobre las sales que puedan aportar. Al ser normalmente más porosas, son capaces de contribuir con más sales y más rápidamente que las rocas ígneas y metamórficas, por lo menos inicialmente, antes de haber sufrido un proceso de lavado interno. El llamado grupo de rocas resisititas, están formadas por materiales que no se disolvieron durante los procesos que dieron lugar a su formación; éstos pueden ser materiales insolubles como el cuarzo y el zircón, o bien materiales que son más o menos atacables pero que fueron depositados antes de que la hidrólisis hubiera completado su acción, como sucede con los silicatos resistentes y algunas micas. En realidad, las arenas y gravas formadas por material granítico, basáltico, gnéisico y carbonatado, contienen muchos materiales solubles que pueden ser liberados si el ataque es suficientemente prolongado; en general la mayor parte de los materiales que pueden aportar se encuentran contenidos en ese cemento, que con frecuencia es carbonato cálcico, en algunas ocasiones, el lavado y dilución de las aguas de formación atrapadas es una importante fuente de sales solubles. El grupo de rocas hidrolisitas, están formadas en su mayor parte por partículas derivadas de la hidrólisis de otras rocas. Tales son las arcillas y pizarras, que en su formación atrapan cantidades notables de agua, la cual van expulsando poco a poco al irse compactando y litificando. Esta agua atrapada es la fuente principal de sales, en especial si es agua marina. El lavado de estos materiales proporciona con frecuencia aguas relativamente salinas y además producen notables fenómenos de

intercambio iónico; el contenido de Cl^- es generalmente elevado, lo mismo que el contenido de SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} ; el contenido de sílice puede ser también elevado. El grupo de rocas precipitadas, son el resultado de reacciones químicas que dan lugar a sales insolubles; están representadas principalmente por las calizas y dolomitas; las calizas puras aportan pocas sales con excepción del HCO_3^- y Ca^{2+} que permite el CO_2 disuelto en el agua; en las calizas más impuras existen más sales solubles tendiéndose hacia valores correspondientes a rocas hidrolisitas; igual comportamiento presentan las dolomitas, en general en estas agua predomina el calcio. El grupo de rocas evaporitas, son las formadas por la evaporación de aguas y por lo tanto son sales fácilmente solubles; las principales rocas evaporitas es el yeso y la sal común; como es de esperar, las aguas en contacto toman grandes cantidades de sales, en especial en las formaciones halinas, donde pueden originarse salmueras. Las formaciones yesíferas pueden dar concentraciones muy elevadas en SO_4^{2-} y Ca^{2+} , y con frecuencia también en Mg^{2+} , Na^+ y Cl^- , debido a su disolución preferente cuando el yeso contiene atrapadas sales de esos iones. El grupo de las rocas carbonosas y bituminosas, las cuales además de poder ceder en general cantidades notables de sales solubles procedentes de la materia viviente que las originó, crea un ambiente reductor que permite la presencia de cantidades importantes de Fe^{2+} y S^{2-} . El contenido en SO_4^{2-} puede ser muy pequeño a consecuencia de la reducción de sulfatos, pero no siempre sucede así; en general existe un buen suministro de CO_2 si el agua aporta oxígeno o se tiene reducción de sulfatos, que hace a esta agua agresiva y por lo tanto capaz de atacar los minerales acompañantes, que con frecuencia originan aguas muy salinas (Fassbender, 1987; Custodio y Llamas, 1995).

Las rocas metamórficas suponen una gradación entre rocas plutónicas (granito) y las sedimentarias, y por lo tanto las aguas en contacto tendrán características intermedias más próximas a unas o a otras según el grado de metamorfismo. Las aguas procedentes de rocas tales como esquistos, cuarcitas, filadidos, mármoles, etc., suelen tener contenidos en sílice moderados, frecuentemente menores de 30 ppm. Los mármoles pueden dar aguas de tipo bicarbonatado cálcico (Custodio y Llamas, 1995).

3.1.1 Procesos de acumulación de sales

En los suelos y aguas se encuentran sales solubles en diferentes cantidades que varían de acuerdo con los diferentes procesos de acumulación, por lo cual es necesario diferenciar los siguientes ciclos de acumulación de sales (Kovda, 1961; Kovda, 1980; Martínez, 1986; Velázquez, 1995):

1. Ciclos continentales, están relacionados con el movimiento, redistribución y acumulación de sales, en regiones interiores sin drenaje de los continentes y cuencas endorreicas. En función de las sales que se acumulan y redistribuyen producto del intemperismo durante la formación de suelos, los ciclos continentales pueden ser primarios y secundarios.
2. Ciclos de acumulación en zonas limítrofes a los mares, hacen referencia a la acumulación de sales, principalmente de cloruros de sodio, en las partes bajas del continente que limitan con el mar y en las orillas de pequeños golfos.
3. Ciclos deltaicos, que comprenden el movimiento, redistribución y acumulación de sales que son traídas desde el continente por el flujo de los ríos hasta los mares.
4. Ciclos artesianos, donde las sales emergen a la superficie por efecto de la evaporación de las aguas subterráneas a través de fallas tectónicas y estructuras destruidas.
5. Ciclos antropogénicos, que ocurren debido a los errores del hombre en sus actividades productivas o por el desconocimiento de las leyes que rigen la acumulación de sales y comprende: 1. Salinización de suelos bajo riego por ascenso de las aguas freáticas; 2. Salinización por sobrepastoreo en zonas donde la cubierta natural del suelo es pobre; 3. Riego con aguas de elevada concentración salina sin considerar acciones que permitan evitar su acumulación en el suelo.

3.1.2 Sales más comunes en suelos y aguas

Las sales más importantes que se encuentran en los suelos y aguas, en zonas áridas y semiáridas, son las sales del ácido carbónico, las sales del ácido clorhídrico y las sales del ácido sulfúrico (Kovda, 1973; James *et al.*, 1982; Velázquez, 1995; Evangelou, 1998; Lal y Kimble, 2000; Ramos, 2006; Mendoza, 2009).

A. Sales de ácido carbónico

Las sales del ácido carbónico se encuentran en suelos, aguas freáticas de zonas áridas y semiáridas, e inclusive en estepas boscosas. El efecto de estas sales depende de su composición, cantidad de bicarbonatos y carbonatos de sodio que se acumulan en el suelo, aguas freáticas y superficiales y en los niveles de su solubilidad. Las sales más importantes de este grupo son:

1. Carbonato y bicarbonato de sodio (Na_2CO_3 , $NaHCO_3$): Su solubilidad varía con la temperatura, con valores de $70 - 429 \text{ gL}^{-1}$; la hidrólisis del Na_2CO_3 provoca alta alcalinidad, además de la pérdida de la estructura y disminución de la permeabilidad del suelo. El bicarbonato de sodio es menos alcalino, debido a que el ácido carbónico neutraliza parte de su efecto.
2. Carbonato de calcio ($CaCO_3$): Es una sal de muy baja solubilidad, con valor de 0.013 gL^{-1} y por lo tanto no es perjudicial para las plantas. La solubilidad del carbonato de calcio aumenta considerablemente con el contenido de CO_2 disuelto en el agua (Cuadro 1) y con la presencia de H_2CO_3 , debido a la formación de $Ca(HCO_3)_2$.

Cuadro 1. Solubilidad del $CaCO_3$ a diferentes presiones parciales del CO_2 a 25 °C.

Presión parcial del CO_2	Solubilidad del $CaCO_3$ ($mmolL^{-1}$)
0.00032	0.53
0.001	0.78
0.01	1.7
0.1	3.9
1.0	9.0
10	22.5

Fuente: adaptado de Frear y Johnston, 1929.

3. Carbonato de magnesio ($MgCO_3$): Es una sal más soluble que el carbonato de calcio y también forma bicarbonato en presencia del ácido carbónico, aumentando su solubilidad. Como el carbonato de magnesio es una sal proveniente de una base fuerte y un ácido débil, su hidrólisis confiere a la solución valores de alta alcalinidad, manifestados con pH de 9 a 10.
4. Carbonato de potasio (K_2CO_3): Existe en cantidades muy pequeñas en los suelos.

B. Sales del ácido clorhídrico

Los cloruros, son los iones más importante en la formación de suelos y aguas freáticas salinas y se caracterizan por una alta solubilidad, por lo cual tienen alta toxicidad para las plantas. Las sales más representativas de este grupo son:

1. Cloruro de sodio ($NaCl$): Es la sal más frecuente en los suelos y aguas freáticas salinas; se caracteriza por su alta solubilidad, la cual alcanza un valor de 318 gL^{-1} , la cual no es afectada por la temperatura y además es muy tóxica para las plantas.
2. Cloruro de calcio ($CaCl_2$): Esta sal en pocas ocasiones existe en los suelos y aguas salinas, debido a que reacciona con el carbonato de calcio, precipitándose en la solución. Por lo tanto esta sal sólo aparecerá en condiciones fuertemente salinas; su solubilidad es del orden de $400 - 500 \text{ gL}^{-1}$; es también una sal efímera en los horizontes superiores del perfil del suelo como resultado de las reacciones de

intercambio de las soluciones ascendentes de cloruro de sodio ($NaCl$) con el calcio (Ca^{2+}) intercambiable.

3. Cloruro de magnesio ($MgCl_2$): Es una sal con solubilidad de 363 gL^{-1} y muy higroscópica al igual que el cloruro de calcio ($CaCl_2$), con quien muchas veces se encuentra unida; por lo que en los suelos con estas sales se conserva la humedad por mucho tiempo.

C. Sales del ácido sulfúrico

Las sales del ácido sulfúrico se encuentran en grandes o pequeñas cantidades en casi todos los suelos y aguas. En los suelos y aguas freáticas de estepas y desiertos, los sulfatos a veces se acumulan en grandes cantidades. El valor agronómico para el mejoramiento de los sulfatos depende del catión acompañante. Las sales más importantes de este grupo son:

1. Sulfato de magnesio ($MgSO_4$): Componente típico de los suelos salinos, aguas freáticas y lagos salinizados; su solubilidad es de 262 gL^{-1} , lo cual la hace una de las sales más perjudiciales, no se acumula en los suelos en forma pura, sino en combinación con otras sales solubles.
2. Sulfato de sodio (Na_2SO_4): Su toxicidad es de 2 – 3 veces menor que el sulfato de magnesio y es también componente típico de los suelos salinos, aguas freáticas y lagos salinizados. Su solubilidad varía mucho con la temperatura, característica muy importante por afectar la formación de precipitados y los lavados de esta sal; los suelos con abundancia de esta sal la acumulan en la capa superior (5 – 10 cm) generando una estructura muy suelta, fofa y granos simples, estando las partículas del suelo floculadas en granos del tamaño de una arena.
3. Sulfato de calcio ($CaSO_4$): Esta es una sal de baja solubilidad, con valor de 1.9 gL^{-1} , por lo tanto no es perjudicial a las plantas.
4. Sulfato de potasio (K_2SO_4): No se acumula en los suelos en grandes cantidades.

Existen ciertas relaciones específicas entre la cantidad de sales en aguas naturales y su composición, de tal manera que durante el proceso de aumento de concentración de las diferentes aguas, ocurren en éstas cambios cuantitativos y cualitativos. A continuación se presentan los tipos geoquímicos de aguas superficiales que circulan en la corteza terrestre (Kovda, 1961; Mendoza, 2009).

1. Aguas naturales con cierto contenido de silicio: Esta agua son de baja concentración ($0.01 - 0.1 \text{ mgL}^{-1}$). Se localizan en los trópicos y en regiones forestales boreales; contienen silicio y sustancias orgánicas.
2. Aguas bicarbonatadas cálcicas con concentraciones de sales de $0.2 - 0.3 \text{ gL}^{-1}$.
3. Aguas bicarbonatadas sódicas con concentraciones de $0.5 - 0.7 \text{ gL}^{-1}$.
4. Aguas bicarbonatadas y con bicarbonatos de sodio con concentraciones totales de sales de $0.5 - 3.0 \text{ gL}^{-1}$. Contienen sulfatos y a veces en menor cantidad cloruros.
5. Aguas clorhídrico sulfáticas con algunas cantidades de soda (Na_2CO_3), y con concentraciones totales de sales de $2.5 - 5.0 \text{ gL}^{-1}$.
6. Aguas sulfático-clorhídricas con concentraciones de sales de $20 - 50 \text{ gL}^{-1}$. Por lo general no contienen carbonato de sodio en cantidades significativas.
7. Aguas clorhídricas. Son salmueras con concentraciones de sales de $100 - 300 \text{ gL}^{-1}$.

La existencia de aguas bicarbonatadas sódicas de yacimientos subterráneos y aguas superficiales con baja concentración de sales ($0.3 - 0.5 \text{ gL}^{-1}$), fue establecida con base en una gran cantidad de datos geoquímicos e hidrogeoquímicos (Kovda, 1961).

Las concentraciones y composiciones de las aguas naturales que se usan para riego varían considerablemente en diferentes regiones del mundo. En los Cuadros 2 y 3 se presentan las composiciones de diferentes aguas usadas para riego (Yaron, 1973; James *et al.*, 1982).

Cuadro 2. Composición iónica de aguas de riego de algunos ríos de Estados Unidos.

Loc.	CE	C	B	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	A	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	RAS	
	μScm ⁻¹	mgL ⁻¹	meqL ⁻¹	mgL ⁻¹				meqL ⁻¹				(meqL ⁻¹) ^{1/2}	
1	60	46	0.52	0.10	0.23	0.08	0.19	0.02	0.36	0.06	0.09	0.02	0.50
2	82	74	0.82	0.03	0.39	0.23	0.20	-	0.79	0.04	0.06	0.01	0.40
3	148	99	1.42	0.10	0.65	0.41	0.34	0.02	1.10	0.14	0.17	0.01	0.50
4	371	218	3.85	0.05	2.34	0.98	0.48	0.05	2.69	0.90	0.31	0.02	0.40
5	694	456	7.26	0.13	2.89	1.49	2.74	0.14	3.05	3.75	0.51	0.01	1.80
6	864	547	8.80	0.11	3.84	1.72	3.13	0.11	2.72	4.37	1.72	0.02	1.90
7	1260	724	11.75	-	2.74	0.94	8.07	-	1.77	1.98	7.95	0.05	5.90
8	1520	832	14.04	0.27	2.94	1.15	9.79	0.16	2.80	1.23	10.0	0.01	6.80
9	1950	1190	20.37	0.31	3.76	5.80	10.7	0.15	5.44	6.23	8.46	0.14	4.90
10	3160	2000	31.48	0.22	7.18	5.51	18.8	-	2.54	8.59	20.6	0.03	7.40
11	8160	5620	87.02	2.60	14.9	10.9	60.9	0.31	3.18	27.9	57.0	0.34	17.0

1. San Joaquin, Biola, California
2. Rogue, Grants Pass, Oregon
3. Sacramento, Knights Landing, California
4. Snake, Heise, Idaho Missouri, Nebraska
5. City, Nebraska
6. Colorado, Lees Ferry, Arizona
7. Arkansas, Ralston, Oklahoma
8. Salt, Below Stewart Mt. Dam, Arizona
9. Sevier, Lynndyl, Utah
10. Pecos, Shumla, Texa
11. Gila, Gellespie, Arizona

C = Concentración total; A = Alcalinidad.

Fuente: Adaptado de James *et al.*, 1982.

Cuadro 3. Composición iónica media de aguas de ríos en el mundo.

Localización	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
	(mgL ⁻¹)							
Norte América	21.0	5.0	9.0	1.4	68.0	20.0	8.0	1.0
Sur América	7.2	1.5	4.0	2.0	31.0	4.8	4.9	0.7
Europa	31.1	5.6	5.5	1.7	95.0	24.0	6.9	3.7
Asia	18.4	5.6	9.3		79.0	8.4	8.7	0.7
África	12.5	3.8	11.0		43.0	13.5	12.1	0.8
Australia	3.9	2.7	2.9	1.4	31.6	2.6	10.0	0.05
Mundo	15.0	4.1	6.3	2.3	58.4	11.2	7.8	1.0

Fuente: Yaron, 1973.

3.2 Calidad de las aguas para riego y criterios que deben evaluarse

La calidad de las aguas para riego está determinada por la concentración y composición de constituyentes disueltos que ésta contenga. Por lo tanto, la calidad del agua de riego es una consideración de uso agronómico, y tiene un carácter importante para comprender como se pueden salinizar los suelos agrícolas y como se puede saturar el complejo de intercambio catiónico con sodio intercambiable. En los países en vías de desarrollo, muchas veces el agua utilizada para riego representa el 95% del total de usos del agua, la calidad de agua usada con fines agrícolas es determinante para la producción y calidad en la agricultura, mantenimiento de la productividad del suelo de manera sostenible (Ayers y Wescot, 1987).

Durante la evaluación del uso del agua para riego, en las actividades agrícolas es necesario tomar en cuenta el riesgo de salinización para el suelo. Las propiedades físico- químicas del suelo (estructura del suelo, estabilidad de los agregados, permeabilidad) son características muy susceptibles al tipo de iones intercambiables que provengan del agua de riego, o bien es importante señalar los peligros de altas concentraciones de sulfatos, magnesio, boro, bicarbonatos y carbonato (Eaton, 1950).

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

3.2.1 Criterios de salinidad

3.2.1.1 Conductividad eléctrica (*CE*)

La capacidad de conducir la corriente de una solución electrolítica, es proporcional a la concentración de iones en dicha solución; por lo cual para medir la concentración total de

sales solubles, se utiliza la conductividad eléctrica (CE), que es el recíproco de la resistencia. El proceso de la conducción de la corriente eléctrica, se basa en el hecho de que los electrolitos, se disocian en iones cargados ($\sum n^+, \sum n^-$) en presencia de agua y los diferentes iones conducen la corriente eléctrica. La conductividad eléctrica se expresa como el recíproco de *ohms* (Richards, 1973; Bresler *et al.*, 1982; Ayers y Wescot, 1987; Castellan, 1998).

La conductancia específica o conductancia C_{esp} , de cualquier solución, cuya resistencia R se mide en una celda con una constante K , está expresada por la siguiente ecuación:

$$C_{esp} = K \frac{1}{R} = mhoscm^{-1}, \quad (3.2.1.1)$$

donde, cm , se refiere a la distancia entre los electrodos; como las medidas de la conductividad se hacen en una celda que contiene dos electrodos de una geometría definida, se aplica un potencial eléctrico a través de los electrodos y la resistencia de la solución entre los electrodos es medida. Los resultados se multiplican por una constante de celda, para corregir las variaciones en la geometría de la celda. Esto permite expresar todas las medidas como conductancia específica C_{esp} , o sea, la conductividad por unidad de volumen de solución en siemens por centímetro Scm^{-1} (Pizarro, 1978; Bresler *et al.*, 1982; Castellan, 1998).

El siemens es demasiado grande, para medir la conductancia eléctrica en la mayoría de los sistemas acuosos naturales; por lo cual se trabaja con unidades de milisiemens por centímetro, pero en atención que el metro es la unidad básica de longitud en el sistema internacional (SI), se prefiere que la conductividad eléctrica (CE) se exprese en decisiemens por metro (dSm^{-1}); de tal manera que: $dSm^{-1} = mScm^{-1} = mmhos.cm^{-1}$ (Pizarro, 1978; Jurinak and Suarez, 1990).

Como resultado de muchas investigaciones, se han establecidos algunas correlaciones, entre la conductividad eléctrica y la concentración de la soluciones, tal como se muestra en las siguientes ecuaciones (James et al., 1982):

$$C(\text{mgL}^{-1}) = 640 \times CE, \quad (3.2.1.2)$$

$$C(\text{meqL}^{-1}) = 10 \times CE, \quad (3.2.1.3)$$

donde, C , es la concentración de la solución y CE es la conductividad eléctrica en dSm^{-1} .

Con base en la conductividad eléctrica (CE) las aguas para riego se han clasificado en cuatro clases (Richards, 1973; Bresler *et al.*, 1982; Ayers y Wescot, 1987):

1. Aguas de baja salinidad (C_1): Con CE menor de $250 \mu\text{Scm}^{-1}$, se utilizan en casi la mayoría de los cultivos y suelos, con poca probabilidad de que se presenten problemas de salinidad. Es necesario algún lavado, pero éste ocurre generalmente bajo las prácticas normales de riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.
2. Aguas de salinidad media (C_2): Con CE entre 250 y $750 \mu\text{Scm}^{-1}$, este tipo de aguas se usa si existe lavado moderado. 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.
3. Aguas altamente salinas (C_3): Con CE entre 750 y $2,250 \mu\text{Scm}^{-1}$, estas aguas no pueden usarse en suelos con restricciones de drenaje. Este tipo de agua se requiere un manejo especial para el control de la salinidad y deben seleccionarse plantas tolerantes a las sales.
4. Aguas muy altamente salinas (C_4): Con CE mayor de $2,250 \mu\text{Scm}^{-1}$, estas aguas no son apropiadas para riego bajo condiciones ordinarias, pero pueden usarse en circunstancias especiales. El suelo debe ser permeable, El drenaje adecuado, debe aplicarse agua en exceso para el lavado y se deben seleccionar cultivos altamente tolerantes a las sales.

3.2.1.2 Presión osmótica (*PO*)

Cuando dos soluciones se ponen en contacto a través de una membrana semipermeable, la cual es una membrana que deja pasar las moléculas de disolvente pero no las de los solutos, las moléculas de disolvente se difunden, pasando desde la solución con menor concentración de solutos a la de mayor concentración. Este fenómeno recibe el nombre de ósmosis, palabra que deriva del griego “Osmos”, que significa impulso. Al suceder la ósmosis, se crea una diferencia de presión en ambos lados de la membrana semipermeable. La presión osmótica, es entonces la presión que se debe aplicar a una solución para detener el flujo neto de disolvente a través de una membrana semipermeable, lo cual indica que el fenómeno de la ósmosis induce como consecuencia la presión osmótica. El descubrimiento de la ósmosis en membranas semipermeables en el año 1828, se le atribuye a Henri Dutrochet, el cual es considerado uno de los grandes fisiólogos del siglo XIX. Dutrochet construyó el primer dispositivo experimental para observar la presión osmótica, el cual denominó osmómetro. Sin duda se considera que la ósmosis es un proceso que pertenece a una clase de fenómenos físicos, que intervienen fuertemente en los procesos vitales (Bresler *et al.*, 1982; Suarez, 1998; Alvarado, 2002; García-Colín, 2003; Del Castillo, 2003; Valera, 2005; Aguilar *et al.*, 2006; Carmona, 2010).

La presión osmótica es una de las cuatro propiedades coligativas de las soluciones, la cual dependen del número de partículas en disolución, sin importar su naturaleza. Se trata de una de las características principales a tener en cuenta en las relaciones de los líquidos que constituyen el medio interno de los seres vivos, ya que la membrana plasmática regula la entrada y salida de soluto al medio extracelular que la rodea, ejerciendo de barrera de control. Se considera que una disolución está en equilibrio cuando no existe intercambio neto de soluto entre las diferentes partes de la misma. Si la disolución se encuentra rodeada por una membrana, el equilibrio se alcanza cuando la presión exterior (generalmente la presión atmosférica) se iguala a la presión que el disolvente ejerce sobre la membrana. Esta última es la presión osmótica, que se representa habitualmente mediante la letra griega π (Bresler *et al.*, 1982; Alvarado, 2002; Valera, 2005; Carmona, 2010).

Las primeras investigaciones sobre la presión osmótica fueron realizadas en 1748 por el abad francés Jean Antoine Nollet, cuando era profesor de física en la Universidad de Navarra, quien descubrió la existencia de las membranas semipermeables. Nollet obtuvo una membrana a partir de una vejiga de cerdo, colocó alcohol a un lado y agua al otro, y observó que el agua fluía a través de la vejiga para mezclarse con el alcohol, pero el alcohol no lo hacía. De este modo, Dutrochet intuyó la importancia del fenómeno en las células, las cuales absorberían o retendrían determinadas sustancias. El inglés Thomas Graham descubrió, en 1854, que las sustancias coloidales no atravesaban ciertas membranas. Sin embargo, los primeros estudios cuantitativos datan de 1877 y se deben al alemán Wilhelm Pfeffer profesor de botánica en Tubingen y Leipzig, quien preparó una membrana semipermeable artificial precipitando hexacianoferrato, sobre las paredes de un vaso poroso. Pfeffer, a partir de la medición de presiones osmóticas en multitud de disoluciones de solutos no volátiles, llegó a las siguientes conclusiones (Bresler *et al.*, 1982; Alvarado, 2002; García-Colín, 2003; Del Castillo, 2003; Valera, 2005; Carmona, 2010):

1. A presión constante, la presión osmótica es directamente proporcional a la concentración de soluto.
2. La presión osmótica de una concentración determinada es directamente proporcional a la temperatura.
3. A una temperatura determinada, dos disoluciones con el mismo número de moles tienen la misma presión osmótica.

Derivación de la ecuación

El estado gaseoso se caracteriza porque fluidos en esta fase, llenan completamente el recipiente que los contiene. Si el recipiente aumenta de volumen, el gas ocupa inmediatamente el nuevo espacio, lo cual es posible si existe un empuje o fuerza ejercida por el gas contra las paredes del recipiente. Esta fuerza ejercida por el gas por unidad de superficie de la pared del recinto, se llama presión gaseosa, la cual se puede medir en cualquier unidad de presión (FL^{-2}), pero con frecuencia se mide en atmósfera (Bresler *et*

al., 1982; Suarez, 1998; Alvarado, 2002; García-Colín, 2003; Del Castillo, 2003; Valera, 2005; Aguilar *et al.*, 2006; Carmona, 2010).

Un gas que se supone cumple con la ley de Boyle-Mariotte (a temperatura constante) y con la ley de Charles-Gay Lussac (a presión y a volumen constante), se conoce como gas ideal. El helio es el gas que más se aproxima a un comportamiento ideal, no obstante la presión debe ser baja. Los gases no cumplen exactamente las leyes mencionadas, especialmente a presiones elevadas y a bajas temperaturas, por lo que dichas leyes son aproximadas para casos reales.

Las leyes del gas ideal se obtuvieron por medio de un procedimiento, que es muy útil en la ciencia, esto es, mantener uno o más parámetros constantes para ver claramente los efectos de cambiar sólo uno de ellos. Estas leyes pueden combinarse en una sola relación general entre presión, el volumen y la temperatura de una cantidad constante de gas. Por otro lado se llama sustancia simple compresible, aquella que tiene como única forma de realizar trabajo a un cambio de volumen. En forma gaseosa las moléculas están tan separadas entre sí que pueden moverse con relativa facilidad, por lo cual cambia continuamente de posición. La ecuación que relaciona la presión, el volumen específico y la temperatura de la fase gaseosa, se llama ecuación de estado, la cual está generalmente explícita para la presión (P) o para el volumen específico (v) de la siguiente manera:

$$P = f(v, T)$$

$$v = f(P, T)$$

A continuación se enuncian las leyes de Boyle-Mariotte y de Charles-Gay Lussac.

Ley de Boyle-Mariote: Estudiaron el efecto de la presión sobre los volúmenes de gases y observaron, que todos se comportan de igual manera al ser sometidos a cambio de presión, siempre y cuando la temperatura se mantenga constante. Esta ley se generaliza así: A temperatura constante, el volumen de un peso dado de cualquier gas ideal, varía inversamente a la presión absoluta a la que se somete. Matemáticamente se expresa como:

$$\text{Si: } T = cte \Rightarrow P \propto \frac{1}{v}$$

$$\therefore PV = \text{Constante.}$$

Es decir:

$$P_1 v_1 = P_2 v_2, \quad (3.2.1.4)$$

que es la ley de Boyle-Mariote.

Ley de Charles-Gay Lussac: Alrededor de 100 años después del descubrimiento de la ley de Boyle-Mariotte, la dilatación de los gases fue estudiada por el físico francés Jacques Alexandre Charles, aunque fue el también francés y físico y químico Joseph Louis Gay Lussac, quien demostró en 1802 que, manteniendo la presión constante, todos los gases se dilatan igualmente por los mismo grados de calor y que, por consecuencia, su mayor o menor densidad, su mayor o menor solubilidad en el agua y naturaleza particular no influyen nada sobre su dilatación. Esta propiedad de los gases se conoce como ley de Charles-Gay Lussac, y se enuncia en dos partes.

Si la presión sobre una cantidad particular de gas se mantiene constante, entonces el volumen variará en forma directamente proporcional a su temperatura absoluta. Matemáticamente se expresa como sigue:

$$\text{Si: } P = cte \Rightarrow v \propto T$$

$$\therefore \frac{v}{T} = \text{Constante.}$$

Es decir:

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}, \quad (3.2.1.5)$$

que es la ley del enunciado.

Si el volumen de una cantidad particular de gas se mantiene constante, entonces la presión variará en forma directamente proporcional a su temperatura absoluta. Matemáticamente se expresa como sigue:

Si: $v = cte \Rightarrow P \propto T$

$$\therefore \frac{P}{T} = \text{Constante.}$$

Es decir:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}, \quad (3.2.1.6)$$

que es la ley del enunciado.

Ahora, para hallar la ecuación que relaciona a las leyes descritas anteriormente, se consideran dos estados, en los cuales se supone entre las presiones absolutas extremas P_1 y P_2 , a una presión intermedia P_2 , igual en los volúmenes específicos v_1 y v_2 , así como a las temperaturas absolutas T_1 y T_2 , de la siguiente manera:

De la ley de Charles-Gay Lussac, para volumen específico constante, pasemos de la presión inicial P_1 a la presión intermedia P_2 y de la temperatura inicial T_1 a la temperatura final T_2 :

Se tiene entonces que:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}, \text{ donde:}$$

$$P_2 = \frac{P_1 T_2}{T_1}$$

De la ecuación de Boyle-Mariotte para temperatura constante, pasemos de la presión inicial P_1 a la presión final P_2 y del volumen específico inicial v_1 al volumen específico final v_2 :

Se tiene entonces que:

$$P_1 v_1 = P_2 v_2, \text{ donde:}$$

$$P_2 = \frac{P_1 v_1}{v_2}$$

Igualando las expresiones anteriores de P_2 , se tiene que:

$$\frac{P_1 T_2}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{v_1}$$

$$\frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2}$$

Para “n” estados diferentes tenemos:

$$\frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2} = \dots = \frac{P_n v_n}{T_n} = R = \text{Constante.}$$

En forma general, para cualquier estado:

$$\frac{Pv}{T} = R \Rightarrow Pv = RT$$

Si, $v = \frac{V}{m}$, para una masa constante “m”, entonces: $P \frac{V}{m} = RT$, y por último:

$$PV = mRT,$$

que corresponde a la ley general de los gases, también llamada ecuación de estado, en donde R es una constante particular para cada gas.

Teniendo en cuenta, que el número de moles (n), es la relación entre la masa de un gas (m) con respecto a su peso molecular (M), se tiene que:

$$n = \frac{m}{M}, \text{ donde:}$$

$$m = nM$$

Mediante los conceptos de constante particular de un gas R y su peso molecular M, podemos referirnos a la constante universal de los gases \bar{R} , que se obtiene mediante la expresión:

$$\bar{R} = RM, \text{ donde:}$$

$$R = \frac{\bar{R}}{M}$$

Finalmente, reemplazando los valores de m y R , en la ecuación general de los gases, se tiene que:

$$Pv = (nM) \frac{\bar{R}}{M} T$$

$$Pv = n\bar{R}T \quad (3.2.1.7)$$

La ecuación (3.2.1.7), recibe el nombre de ecuación general de los gases ideales, y en ella interviene el concepto de mol (n) y la constante universal de los gases (\bar{R}), cuyo valor más usado es $0.08206 \frac{\text{atm} \times L}{\text{mol} \times K}$.

La constante universal de los gases (\bar{R}), es una constante física, que relaciona entre sí diversas funciones de estado termodinámicas, estableciendo una relación entre energía, temperatura y cantidad de materia. Para derivar el valor de \bar{R} , se tiene en cuenta las siguientes consideraciones de la teoría cinética molecular (Castellan, 1998; García-Colín, 2003):

1. Todo gas ideal, está formado por “ N ” pequeñas partículas puntuales (átomos o moléculas).
2. Las moléculas gaseosas se mueven a altas velocidades, en forma recta y desordenada.
3. Un gas ideal ejerce una presión continua sobre las paredes del recipiente que lo contiene, debido a los choques de las partículas con las paredes de este.
4. Los choques moleculares son perfectamente elásticos, es de decir no hay pérdida de energía cinética.

- Al tomar dos o más gases, cualquiera que éstos sean, y se confinan a igual volumen; manteniéndolos a igual condición de temperatura y presión; sucede que el número de moléculas (partículas) es igual en todos los gases; entonces es posible determinar el volumen ocupado por una mole de cualquier gas. En efecto a 0 °C (273 °K) y 1.0 atmósfera de presión; el volumen ocupado por un gas es de 22.4 litros.

De acuerdo con lo anterior se puede plantear lo siguiente:

$$Pv \propto nT$$

$$Pv = \bar{R}nT$$

$$\bar{R} = \frac{Pv}{nT} = \frac{1\text{atm} \times 22.4\text{L}}{1\text{mol} \times 273^\circ\text{K}} = 0.082051282 \frac{\text{atm} \times \text{L}}{\text{mol} \times ^\circ\text{K}}$$

El holandés Jacobus Henricus Van't Hoff realizó un estudio sistemático de las propiedades coligativas de las disoluciones, que publicó en 1885. En este artículo Van 't Hoff formula una expresión, para disoluciones diluidas, que relaciona la presión osmótica con la concentración del soluto, la cual es similar a la ecuación de los gases ideales y proporciona la primera teoría para explicar la presión osmótica. La cual considera que las partículas de un gas se mueven en todas direcciones y chocan entre ellas mismas y con las paredes del recipiente. Los choques contra las paredes representan la presión del gas, o sea realizó una analogía entre la presión osmótica y la ley de los gases ideales. Van't Hoff describió la presión osmótica como el resultado de las colisiones de las moléculas de soluto contra la membrana semipermeable, y supuso que las moléculas de disolvente no contribuían de ninguna manera. Con este modelo, la presión osmótica de una disolución es la misma presión que un gas ideal ejercería si ocupase el mismo volumen de la disolución (Bresler *et al.*, 1982; Suarez, 1998; Alvarado, 2002; García-Colín, 2003; Del Castillo, 2003; Valera, 2005; Aguilar *et al.*, 2006; Carmona, 2010).

La analogía formal entre la ecuación de Van't Hoff y la ley del gas ideal no debe pasar desapercibida. En la ecuación de Van't Hoff, las moléculas de soluto dispersas en el disolvente son análogas a las moléculas gaseosas dispersas en el espacio vacío. El

disolvente es análogo al espacio vacío entre las moléculas gaseosas. A pesar de la analogía, es ilusorio considerar la presión osmótica como un tipo de presión ejercida de algún modo por el soluto. La ósmosis, el paso del disolvente a través de la membrana, se debe a la diferencia del potencial químico en los dos lados de la membrana. La clase de membrana no interesa, la única condición es que sea permeable al disolvente. Tampoco importa la naturaleza del soluto, sólo es necesario que el disolvente contenga material extraño disuelto o partículas que no pasen por la membrana (Castellan, 1998).

Teniendo en cuenta la teoría de Van't Hoff, la ecuación (3.2.1.7), se puede escribir como (Bresler *et al.*, 1982):

$$\pi = M \bar{R} T, \quad (3.2.1.8)$$

donde, π , es la presión osmótica en atmosferas; M , es la molaridad de la disolución de los iones totales disueltos en ML^{-1} ; \bar{R} , es la constante universal de los gases ($0.082037 \frac{atm \times L}{mol \times K}$); T , es la temperatura absoluta ($^{\circ}K$).

Existe una correlación entre presión osmótica (π) y conductividad eléctrica (CE), la cual se muestra en la siguiente ecuación (Richard, 1973; Bresler *et al.*, 1982):

$$\pi = 0.36 \times CE, \quad (3.2.1.9)$$

donde, π , es la presión osmótica en atmósferas y CE , la conductividad eléctrica en dSm^{-1} .

3.2.1.3 Índice de salinidad efectiva (SE)

Este índice de clasificación de las aguas para riego, estima el peligro que pueden producir las sales más solubles del agua al formar parte de la solución del suelo, es decir que al sustraerse de la concentración total, los carbonatos de calcio y de magnesio y los sulfatos de calcio que precipitan fácilmente, cuando el agua de riego pasa a formar parte de la solución del suelo y dejan de participar en el ascenso de la presión osmótica de la solución del suelo (Doneen, 1958).

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

Si, $Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$, entonces:

$$SE = \sum cationes + (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}). \quad (3.2.1.10)$$

Si, $Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$, pero $Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$, entonces:

$$SE = \sum cationes - Ca^{2+}. \quad (3.2.1.11)$$

Si, $Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$, pero $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) > (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$, entonces:

$$SE = \sum cationes - (CO_3^{2-} + HCO_3^-). \quad (3.2.1.12)$$

Si, $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) < (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$, entonces:

$$SE = \sum cationes - (Ca^{2+} + Mg^{2+}). \quad (3.2.1.13)$$

Todos los iones están expresados en $mmol_c L^{-1}$.

Los valores recomendados de acuerdo al índice de salinidad efectiva se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Clasificación de las aguas de riego de acuerdo al índice de salinidad efectiva.

Clase	Índice de salinidad efectiva ($mmol_c L^{-1}$)
Buena	< 3
Condicionada	3 – 15
No recomendada	> 15

Fuente: Doneen, 1958.

3.2.1.4 Índice de salinidad potencial (SP)

Este índice determina la cantidad de cloruros (Cl^-) y sulfatos (SO_4^{2-}), que puede ser perjudicial a los cultivos debido al incremento de la presión osmótica de la solución del suelo. Los cloruros (Cl^-) y los sulfatos (SO_4^{2-}) son sales que quedan en la solución del suelo, cuando la humedad aprovechable para las plantas es menor del 50 %. La salinidad potencial se calcula con la siguiente ecuación (Frenkel, 1984):

$$SP = Cl^- + \frac{1}{2} \times SO_4^{2-}, \quad (3.2.1.14)$$

donde, las concentraciones de Cl^- y SO_4^{2-} se expresa en $mmol_c L^{-1}$.

En el Cuadro 5, se presenta la clasificación de las aguas de acuerdo al índice de salinidad potencial (SP).

Cuadro 5. Clasificación de las aguas de riego de acuerdo al índice de salinidad potencial.

Clase	Índice de salinidad potencial ($mmol_c L^{-1}$)
Buena	< 3
Condicionada	3 – 15
No recomendada	> 15

Fuente: Donnen, 1959, citado por Frenkel, 1984.

3.2.1.5 Fuerza iónica de una solución y coeficiente de actividad

La fuerza iónica se fundamenta en la química de electrolitos y permite calcular las actividades iónicas tanto de una sal pura o única en una solución o de una sal en presencia de otros electrolitos. El principio de fuerza iónica, considera que el coeficiente de actividad de un ión, es el mismo en todas las soluciones que tengan un mismo valor de fuerza iónica (Adams, 1971; Griffin y Jurinak, 1973; Suarez, 1977, Jurinak, 1984; Skoog *et al.*, 2001).

Las correcciones de las soluciones electrolíticas por fuerza iónica (I), son muy importantes, porque permiten conocer los coeficientes de actividad de las soluciones acuosas. La fuerza iónica de una solución electrolítica, es una medida de la intensidad del campo eléctrico de dicha solución y se define de acuerdo a la siguiente ecuación (Ponnamperuma *et al.*, 1966; Waldron y Constantin, 1970; Bresler *et al.*, 1982; Evangelou, 1998; Castellan, 1998; Suarez, 1998; Mihelcic *et al.*, 2008):

$$I = \frac{1}{2} \sum_i^n C_i Z_i^2, \quad (3.2.1.15)$$

donde, C_i , es la concentración molar real de cada ión en la solución en ML^{-1} ; Z_i , es la valencia de cada ión (n^+ , n^-). Es necesario conocer las concentraciones de todos los iones, para determinar los valores de la fuerza iónica (I).

Según Mihelcic *et al.* (2008), La fuerza iónica de los sistemas acuosos raramente es mayor de 0.7 M, y es posible de correlacionarla con parámetros de la calidad del agua como los sólidos totales disueltos (STD) y la conductividad eléctrica, como se indica a continuación:

$$I = 2.5 \times 10^{-5} \times STD, \quad (3.2.1.16)$$

$$I = 1.6 \times 10^{-5} \times CE, \quad (3.2.1.17)$$

donde, I , es la fuerza iónica en $M.L^{-1}$, STD , los sólidos totales disueltos en $mg.L^{-1}$ y CE , la conductividad eléctrica en $\mu S.cm^{-1}$.

Griffin y Jurinak, (1973), en un trabajo con 27 muestras de extractos de suelo y 124 muestras de aguas de ríos, encontraron que la regresión lineal entre fuerza iónica (I) y conductividad eléctrica (CE), con un coeficiente de correlación (r) de 0.996 fue:

$$I = 0.0127 \times CE, \quad (3.2.1.18)$$

donde, I , es la fuerza iónica en $M.L^{-1}$ y CE , la conductividad eléctrica en $dS.m^{-1}$.

Coefficientes de actividad individual de los diferentes iones

Cuando la fuerza iónica es conocida, los coeficientes de actividad de los iones pueden ser calculados. El concepto de actividad de un ión individual es más útil en las soluciones de los suelos, que el concepto de actividad media. Estos principios han sido utilizados por muchos años en las mediciones del pH. El coeficiente de actividad de un ión en la solución f_i esta definido por la ecuación de Debye y Huckel de la siguiente manera (Adams, 1971; Griffin y Jurinak, 1973; Jurinak, 1984; Sokolenko, 1986; Castellan, 1998; Pulido, 2007; Mihelcic *et al.*, 2008):

$$-\log f_i = \frac{AZ_i^2(I)^{\frac{1}{2}}}{1 + Ba_i(I)^{\frac{1}{2}}}, \quad (3.2.1.19)$$

donde, A y B, son contantes dependientes de la temperatura ($^{\circ}T$); I , es la fuerza iónica de la solución (ML^{-1}); a_i , es un parámetro que depende del tamaño de cada ión; f_i , es el coeficiente de actividad del ión i . Para una temperatura de 25 °C, los valores de A y B son de 0.509 y 0.329 respectivamente, de tal manera que conociendo la fuerza iónica (I) y los valores a_i expresados en unidades de Angstrom (Å); es posible calcular el coeficiente de

actividad de cualquier ión. En el Cuadro 6 se presentan los valores de a_i para ser usados en la ecuación de Debye y Huckel.

Cuadro 6. Parámetros individuales del tamaño de iones a_i en Angstrom (Å).

Ión	Valor de a_i
H^+, Al^{3+}, Fe^{3+}	9.0
Mg^{2+}, Be^{2+}	8.0
$Li^+, Ca^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Mn^{2+}, Fe^{2+}$	6.0
Sr^{2+}, Ba^{2+}	5.0
$Na^+, CO_3^{2-}, HCO_3^-, H_2PO_4^-, HSO_3^-, Hg_2^{2+}, SO_4^{2-}, HPO_4^{2-}, PO_4^{3-}$	4.0
$OH^-, F^-, MnO_4^-, K^+, Cl^-, Br^-, I^-, NO_3^-, NH_4^+, Ag^+$	3.0

Fuente: Adaptado de Adams, 1971 y Evangelou, 1998.

La ley límite de Debye – Huckel, predice que el logaritmo del coeficiente de actividad iónica media, es una función lineal de la raíz cuadrada de la fuerza iónica y que la pendiente de la línea debe ser proporcional al producto de las valencias de los iones positivos y negativos. Estas predicciones han sido confirmadas experimentalmente en soluciones diluidas de electrolitos fuertes. En la siguiente ecuación se presenta lo enunciado (Castellan, 1998).

$$\log \bar{f} = 0.5092 \times (z^+) \times (z^-) \times I^{\frac{1}{2}}, \quad (3.2.1.20)$$

donde \bar{f} , es el coeficiente de actividad iónica media, z^+ y z^- son las valencias positivas y negativas de los iones y I , es la fuerza iónica en ML^{-1} .

Según Skoog *et al.*, (2001), los coeficientes de actividad iónica tienen las siguientes propiedades:

1. El coeficiente de actividad iónica de una especie es una medida de la eficacia con la que influye en el equilibrio en el que participa. En soluciones muy diluidas, donde la fuerza iónica es mínima, esa capacidad se vuelve constante y

el valor del coeficiente de actividad tiende al valor de la unidad; en tales circunstancias, la actividad y la concentración molar son idénticas. Sin embargo, conforme aumenta la fuerza iónica, el ión pierde parte de su eficacia y disminuye su coeficiente de actividad.

2. En soluciones poco concentradas, el coeficiente de actividad de una especie dada es independiente de la naturaleza del electrólito y depende sólo de la fuerza iónica.
3. Para una fuerza iónica dada, el coeficiente de actividad de un ión se desvía de la unidad a medida que aumenta su carga. El coeficiente de actividad de una molécula sin carga tiende a la unidad, independiente de la fuerza iónica de la solución.
4. En una fuerza iónica dada, los coeficientes de actividad de los iones con la misma carga tienden a ser igual. Las pequeñas variaciones que se presenten se pueden correlacionar con el diámetro efectivo de los iones hidratados.
5. El coeficiente de actividad de un cierto ión describe su comportamiento efectivo en todos los equilibrios en los que participa.

3.2.1.6 Sales hipotéticas

El concepto básico de la teoría de los electrolitos consiste en que, al disolverse en agua y en algunos otros disolventes polares, las sales, ácidos y bases se disocian parcial o totalmente en iones. Estos existen en la solución independientemente de que a través de ella pase o no una corriente eléctrica. A consecuencia de lo anterior el número de partículas de la sustancia disuelta que se mueven con independencia es mayor que en el caso que no hubiera disociación. La disminución de la temperatura de solidificación, la presión osmótica y las magnitudes de otras propiedades coligativas, crecen directamente proporcional al número de partículas (Guerasimov, 1977).

La influencia total de una mezcla de sales en solución sobre el coeficiente de actividad de cada una de ellas, será una regularidad común si la concentración total de las sales en solución se expresa en términos de la fuerza iónica (I), definida por la ecuación (3.2.1.15).

Si consideramos que:

$$C_i = m_i \text{ y } m_i = v_i m_k,$$

donde, m_k es la molaridad de la sal, para una sal determinada se tiene que:

$$m_+ z_+^2 + m_- z_-^2 = (v_+ z_+^2 + v_- z_-^2) m_k = 2s_k m_k. \quad (3.2.1.21)$$

Al remplazar el valor de la ecuación (3.2.1.21) en la ecuación (3.2.1.15) se tiene que:

$$I = \frac{1}{2} \sum_k 2s_k m_k = \sum_k s_k m_k. \quad (3.2.1.22)$$

En el Cuadro 7, se presentan los valores de s_k para sales de diferentes tipos de valencia.

Cuadro 7. Valores de s_k para sales de diferentes tipos de valencia.

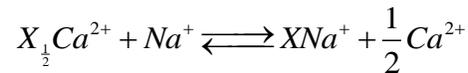
Tipo de valencia	Sales	s_k
1-1	<i>NaCl</i>	1
1-1	<i>NaHCO₃</i>	1
1-1	<i>KCl</i>	1
1-1	<i>KHCO₃</i>	1
1-2	<i>Na₂CO₃</i>	3
1-2	<i>Na₂SO₄</i>	3
1-2	<i>K₂SO₄</i>	3
1-2	<i>K₂CO₃</i>	3
2-1	<i>Ca(HCO₃)₂</i>	3
2-1	<i>CaCl₂</i>	3
2-1	<i>MgCl₂</i>	3
2-1	<i>Mg(HCO₃)₂</i>	3
2-2	<i>CaCO₃</i>	4
2-2	<i>CaSO₄</i>	4
2-2	<i>MgCO₃</i>	4
2-2	<i>MgSO₄</i>	4

Fuente: Adaptado de Guerasimov *et al.*, 1977 y Mendoza, 2009.

3.2.2 Criterios de sodicidad

3.2.2.1 Ecuación de intercambio catiónico de Gapon

Una aproximación del intercambio de iones es aplicar el principio de la ley de acción de masas. La reacción de intercambio de cationes de Gapon, ha sido utilizada ampliamente en los estudios de salinidad y sodicidad. La expresión original de iones $Na^+ - Ca^{2+}$ se expresa como sigue (Helmy, 1963, Sposito, 1977; Sposito and Mattigod, 1977; Oster and Sposito, 1980; Bresler *et al.*, 1982; James *et al.*, 1982; Evangelou and Phillips, 1987; Evangelou and Coale, 1987; Evangelou, 1998; Sumner *et al.*, 1998):



En condiciones de equilibrio la reacción anterior se puede escribir como sigue:

$$kg = \frac{(XNa^+) \times (C_{Ca^{2+}})^{\frac{1}{2}}}{(X_{\frac{1}{2}}Ca^{2+}) \times (C_{Na^+})}, \quad (3.2.2.1)$$

donde, kg , es el coeficiente de selectividad iónica de Gapon expresado en $(molL^{-1})^{-\frac{1}{2}}$; $C_{Ca^{2+}}$ y C_{Na^+} las concentraciones de los iones en la solución en $molL^{-1}$; $X_{\frac{1}{2}}Ca^{2+}$ y XNa^+ las concentraciones de los iones en el complejo de intercambio de cationes están expresadas en $cmol_c Kg^{-1}$.

La relación de los iones adsorbidos y en solución (RAS), se puede expresar como:

$$\frac{XNa^+}{X_{\frac{1}{2}}Ca^{2+}} = kg \frac{(C_{Na^+})}{\sqrt{C_{Ca^{2+}}}}. \quad (3.2.2.2)$$

El laboratorio de salinidad de los Estados Unidos (1954), consideró que el ión magnesio se comporta similar al ión calcio, en la fase adsorbida del complejo de intercambio catiónico (Jurinak, 1984; Velázquez, 2001). Tomando en cuenta estas modificaciones, la ecuación (3.2.2.2) se puede escribir como:

$$\frac{XNa^+}{X_{\frac{1}{2}}Ca^{2+} + X_{\frac{1}{2}}Mg^{2+}} = kg' = \frac{(C_{Na^+})}{\sqrt{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}} = kg' RAS, \quad (3.2.2.3)$$

donde, kg' , es el coeficiente de selectividad iónica de Gapon modificado expresado en $(mmolL^{-1})^{-\frac{1}{2}}$ y RAS , es la relación de adsorción de sodio, dada en $(mmolL^{-1})^{\frac{1}{2}}$.

Debido a que el Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ son los cationes intercambiables más comunes en los suelos, la ecuación 3.2.2.3 se puede simplificar como sigue:

$$\frac{XNa^+}{CIC - XNa^+} = kg' \times RAS = RSI, \quad (3.2.2.4)$$

donde, RSI , se conoce como relación de sodio intercambiable.

En términos del porcentaje de sodio intercambiable (PSI), la ecuación (3.2.2.4) se expresa como:

$$\frac{PSI}{100 - PSI} = kg' \times RAS, \quad (3.2.2.5)$$

donde, PSI es:

$$PSI = \frac{XNa^+}{CIC} \times 100, \quad (3.2.2.6)$$

donde, CIC , es la capacidad de intercambio catiónico.

Despejando PSI de la ecuación (3.2.2.5) se tiene:

$$PSI = \frac{kg' \times RAS}{1 + kg' \times RAS} \times 100. \quad (3.2.2.7)$$

La ecuación (3.2.2.7), se utiliza para calcular el porcentaje de sodio intercambiable de un suelo, conociendo la relación de adsorción de sodio del agua de riego, en condiciones de equilibrio y saturación del suelo con esa agua.

3.2.2.2 Relación de adsorción de sodio (RAS)

Como es difícil obtener datos confiables de los cationes intercambiables, la relación de adsorción de sodio RAS de la solución del suelo o de los diferentes extractos de saturación y de las aguas de riego, ha sido utilizada como parámetro fundamental para el diagnóstico de los peligros de sodicidad de los suelos, cuando estos se encuentran en condiciones de equilibrio con las aguas de riego (Asghar, 1961; Sumner *et al.*, 1998; Mendoza, 2009).

La relación de adsorción de sodio RAS sigue siendo el procedimiento más aceptable para evaluar la calidad agronómica del agua de riego. La demostración teórica de las ecuaciones de intercambio catiónico dada por Gapon, obviamente dentro de los rangos limitados de las aguas de riego (máximo $50 \text{ mmol}_c L^{-1}$), han permitido que se presenten diferentes formulaciones para calcular el RAS . Estas formulaciones prevén la posibilidad de que las concentraciones de los iones de calcio Ca^{2+} en las soluciones de los suelos, aumente o disminuya debido a diferentes procesos físico-químicos que se presentan en los suelos. El RAS que participará y tendrá capacidad de interactuar con el complejo de intercambio catiónico será aquella que éste formada por las concentraciones reales de sodio (C_{Na^+}) y de calcio ($C_{Ca^{2+}}$), las cuales serán los iones compensadores de cargas negativas ($\sum n^-$) de los sistemas coloidales de los suelos, cumpliendo con la ley de acción de masas (Reeve and Tamaddoni, 1965; Sumner *et al.*, 1998; Velázquez, 2001).

La subdivisión de las aguas de riego con respecto a la relación de adsorción de sodio (*RAS*), se basa primordialmente en la relación que tiene el sodio intercambiable en las condiciones físicas de los suelos. No obstante las plantas sensibles a este elemento pueden sufrir daños a consecuencia de la acumulación del sodio en sus tejidos. Cuando los valores de sodio intercambiable son más bajos que los necesarios para afectar las condiciones físicas de los suelos. De acuerdo con los valores del *RAS*, existen cuatro tipos de aguas (Richard, 1973; Ayers y Westcot, 1987).

1. Aguas bajas en sodio (S_1): Puede ser usada para riego en casi todos los suelos, con poco peligro de desarrollo de sodicidad. Sin embargo en cultivos susceptibles al sodio como frutales de hueso (aguacate), podrían acumular cantidades dañinas en las hojas.
2. Aguas medias en sodio (S_2): En suelos de textura fina el ion sodio representa un peligro considerable, más aun si los 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.
3. Aguas altas en sodio (S_3): Pueden producir problemas de sodicidad en la mayoría de los suelos, requieren manejo especial, buen drenaje, altas cantidades de lavado, y aplicaciones de materia orgánica, si existe yeso en el suelo, el problema podría desarrollarse cuando pase algún tiempo, de no ser así es preferible que se agregue.
4. Aguas muy altas en sodio (S_4): generalmente no debe usarse para riego excepto en niveles bajos de salinidad con el uso de yeso o de algún otro mejorador que posibilite su uso.

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

menor (Bower, 1961; Wahhab, 1961; Bower *et al.*, 1965; Rengasamy and Sumner, 1998; Nelson and Oades, 1998; Levy *et al.*, 1998).

En la Figura 1, se presenta el diagrama para la clasificación de aguas de riego, basada en la concentración total de sales *CE* y el contenido relativo de sodio *RAS*.

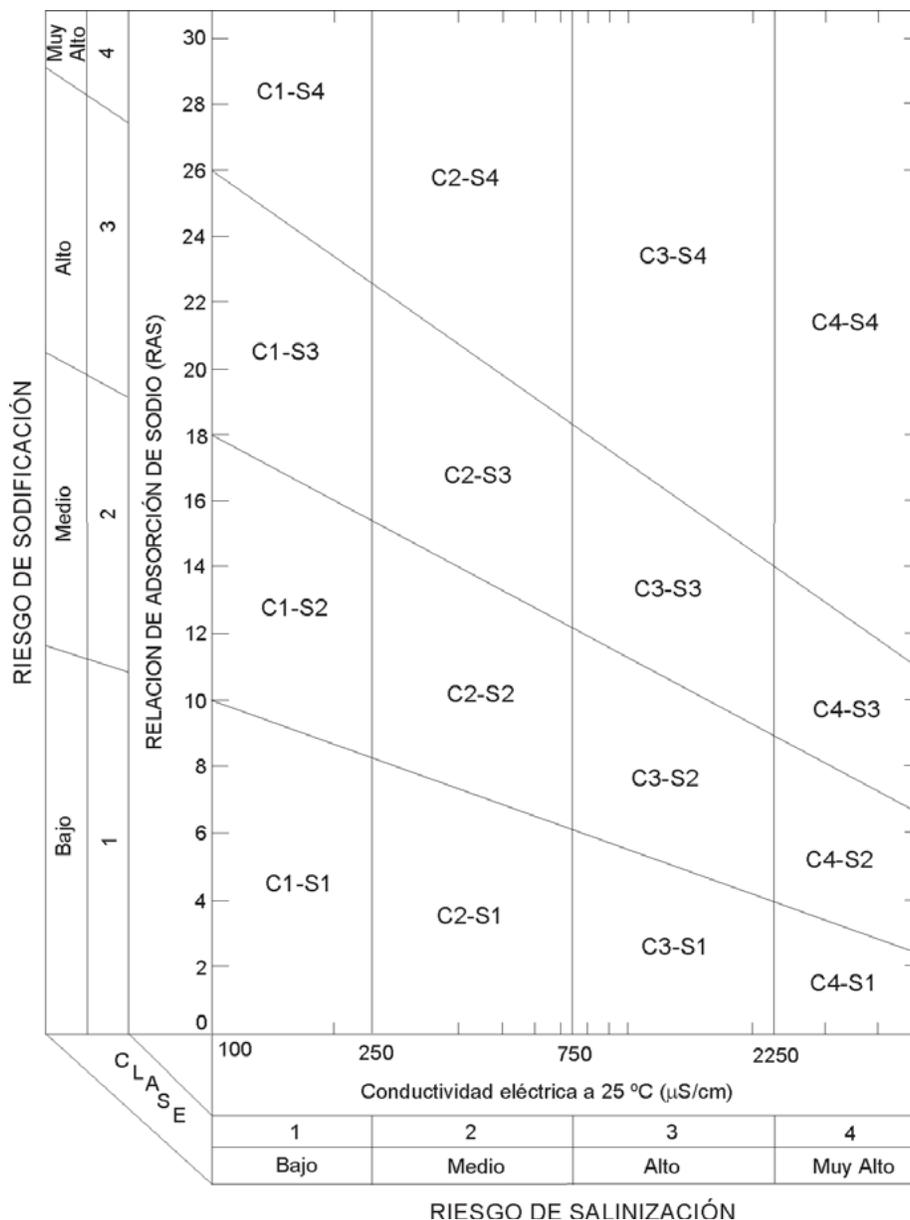


Figura 1, Diagrama de Richard para clasificar las aguas según la conductividad eléctrica y el *RAS* (μScm^{-1}). Fuente: Richard, 1973.

3.2.2.2.1 RAS original o explícito (RAS_{or})

Por lo general, las modificaciones del medio poroso de los suelos se deben a diferentes niveles de sodio intercambiable. Cuando los iones de calcio se encuentran adsorbidos en los suelos en cantidades suficientes, éstos presentan condiciones favorables para el desarrollo de cultivos agrícolas. En cambio, cuando los suelos han adsorbido algunas cantidades de sodio intercambiable, éstos presentan dispersión coloidal y mayor viscosidad. En estos casos, los suelos poseen una muy baja permeabilidad. La Relación de Adsorción de Sodio (RAS_{or}) de una determinada solución del suelo en equilibrio con el agua de riego, se relaciona con una determinada cantidad de sodio adsorbido en el suelo y en consecuencia, esta relación puede usarse como un índice del peligro de sodificación en los suelos que tiene un agua en particular (Kelley, 1957; Asghar, 1961; Bower y Hatcher, 1961; Thomas y Yaron, 1967; Ayers y Wescot, 1987). El RAS original se calcula con la siguiente ecuación:

$$RAS_{or} = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}}, \quad (3.2.2.8)$$

donde, RAS_{or} , es la relación de adsorción de sodio original o explícita expresada en $[mmol_c L^{-1}]^{\frac{1}{2}}$, C_{Na^+} , $C_{Ca^{2+}}$ y $C_{Mg^{2+}}$ son las concentraciones de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} expresadas en $mmol_c L^{-1}$.

En el suelo puede darse un aumento de la concentración de la solución, en la cual la relación con respecto al valor inicial se llama factor de concentración (F_c). Los valores del RAS inicial y final asociados a este proceso, se pueden estimar con las siguientes ecuaciones (James *et al.*, 1982).

$$RAS_{final} = (F_c)^{\frac{1}{2}} \times RAS_{inicial} \quad (3.2.2.9)$$

$$F_c = \frac{C_{final}}{C_{inicial}}, \quad (3.2.2.10)$$

donde, F_c , es el factor de concentración y C , es la concentración. Cuando ocurre un proceso de dilución, como en el lavado de suelos salinos, el F_c se toma como el inverso.

3.2.2.2.2 RAS ajustado (RAS_{aj})

El RAS ajustado (RAS_{aj}) toma en cuenta las variaciones en las concentraciones de $C_{Ca^{2+}}$ y $C_{Mg^{2+}}$, debido a los procesos de precipitación o disolución de la calcita ($CaCO_3$). El RAS_{aj} se determina con la siguiente ecuación (James *et al.*, 1982; Sumner *et al.*, 1998):

$$RAS_{aj} = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}} [1 + (8.4 - pH_c)], \quad (3.2.2.11)$$

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 $mmol_c L^{-1}$; RAS , son los valores que se obtienen con las determinaciones de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} de las aguas de riego expresadas en $mmol_c L^{-1}$; 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 índice de saturación estima la precipitación del $CaCO_3$, cuando alcanza su límite de saturación en presencia de iones de bicarbonato; este índice es igual a la diferencia entre el pH del agua (pH_a) establecido como 8.4 y el pH teórico que el agua alcanzaría en el

equilibrio con el $CaCO_3$ (pH_c). El término $8.4 - pH_c$ refleja la tendencia del agua de riego que se aplica a los suelos de precipitar o disolver la calcita ($CaCO_3$). Cuando $8.4 - pH_c > 0$ para una agua de riego, el carbonato de calcio precipita en el suelo y cuando $8.4 - pH_c < 0$, entonces, el agua de riego que se aplica a los suelos solubiliza el carbonato de calcio ($CaCO_3$) que se encuentra en el suelo (Bower *et al.*, 1965).

La precipitación de la calcita causa una disminución en la salinidad de los suelos, sin embargo, también a su vez, aumenta la proporción de sodio en la solución del suelo, por consiguiente, se aumenta el sodio intercambiable en el complejo de intercambio catiónico de los suelos. Aunque la magnitud de la precipitación de los carbonatos 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 suelo, así como de las composiciones iónicas de las aguas de riego; por lo anterior es necesario, tener en cuenta la tendencia de la precipitación del carbonato de calcio ($CaCO_3$) de las aguas de riego (Eaton, 1950; Bresler *et al.*, 1982).

La derivación de la ecuación de Langelier para calcular el pH_c de los análisis químicos de las aguas de riego es la siguiente (Langelier, 1936; Bower *et al.*, 1965; Bresler *et al.*, 1982; Jurinak, 1984):

El pH se define como el logaritmo negativo de la concentración de hidrogeniones, tal como se muestra en la ecuación (3.2.2.12), cumpliéndose siempre la ecuación (3.2.2.13) (Benson, 1978; Rodríguez y Marín, 1999; Skoog *et al.*, 2001).

$$pH = -\log(H^+), \quad (3.2.2.12)$$

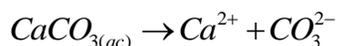
$$(H^+) \times (OH^-) = 10^{-14}, \quad (3.2.2.13)$$

donde, $|H^+|$ y $|OH^-|$ son las concentraciones en ML^- .

El pK se emplea para definir la fuerza de un ácido o una base en una solución y es igual al logaritmo negativo de la constante K de equilibrio químico (Benzon, 1978; Rodríguez y Marín, 1999).

$$pK = -\log K. \quad (3.2.2.14)$$

Consideremos la siguiente reacción:



La constante de solubilidad K'_c del $CaCO_3$ es:

$$K'_c = (Ca^{2+}) \times (CO_3^{2-}) = 5 \times 10^{-9}. \quad (3.2.2.15)$$

Se tiene que: $-\log K'_c = pK'_c$

El principio del producto de solubilidad permite explicar y predecir hasta que punto es completa una reacción de precipitación. Siempre que el producto de las concentraciones de dos iones cualesquiera exceda el valor de la constante de solubilidad, la combinación catión – anión precipitará (Benson, 1978).

La primera y segunda disociación del H_2CO_3 es:



Algunos ácidos débiles como el ácido carbónico (H_2CO_3) contienen dos o más átomos de hidrogeno ionizable, y se disocian en dos o más pasos; el primero de los cuales ocurre más

fácilmente que el segundo o el tercero (Frear y Johnston, 1929; Benson, 1978; Castellan, 1998).

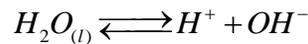
La segunda constante de disociación K_2' del H_2CO_3 es:

$$K_2' = \frac{(H^+) \times (CO_3^{2-})}{(HCO_3^-)} = 4.7 \times 10^{-11} . \quad (3.2.2.16)$$

Se tiene que $-\log K_2' = pK_2'$:

Interesa la segunda constante de disociación del H_2CO_3 , pues aquí el HCO_3^- se disocia y produce CO_3^{2-} , que puede precipitar en presencia de Ca^{2+} .

Para el H_2O se tiene que:



La constante de disociación del agua (K_w) es:

$$K_w = \frac{(H^+) \times (OH)}{(H_2O)}$$

Se puede escribir como:

$$K_w = (H^+) \times (OH) . \quad (3.2.2.17)$$

La concentración equivalente de las bases titulables ($CO_3^{2-} + HCO_3^-$), se puede escribir como:

$$(Alk) + (H^+) = 2(CO_3^{2-}) + (HCO_3^-) + (OH^-), \quad (3.2.2.18)$$

En las aguas naturales en un rango de pH entre 4.5 a 10.3, los valores de (H^+) y (OH^-) son relativamente pequeños, pudiéndose eliminar sin generar error significativo; es decir la ecuación (3.2.2.18) se puede escribir como:

$$(Alk) = 2(CO_3^{2-}) + (HCO_3^-). \quad (3.2.2.19)$$

Se tiene que: $-\log Alk = pAlk$

Despejando CO_3^{2-} de las ecuaciones (3.2.2.16) y (3.2.2.19) se tiene que:

$$CO_3^{2-} = \frac{K_2' \times (HCO_3^-)}{(H^+)}. \quad (3.2.2.20)$$

$$CO_3^{2-} = \frac{(Alk) - (HCO_3^-)}{2}. \quad (3.2.2.21)$$

Igualando las ecuaciones (3.2.2.20) y (3.2.2.21), se tiene que:

$$\frac{K_2' \times (HCO_3^-)}{(H^+)} = \frac{(Alk) - (HCO_3^-)}{2}$$

Despejando HCO_3^- .

$$\frac{K_2' \times (HCO_3^-)}{(H^+)} = \frac{(Alk)}{2} - \frac{(HCO_3^-)}{2}$$

$$\frac{(HCO_3^-)}{2} + \frac{K_2' \times (HCO_3^-)}{(H^+)} = \frac{(Alk)}{2}$$

$$(HCO_3^-) \times \left[\frac{1}{2} + \frac{K_2'}{(H^+)} \right] = \frac{(Alk)}{2}$$

$$\begin{aligned}
 (HCO_3^-) &= \frac{(Alk)}{2} \\
 &= \frac{(Alk)}{\left[\frac{1}{2} + \frac{K_2'}{(H^+)} \right]} \\
 (HCO_3^-) &= \frac{(Alk)}{2 \left[\frac{1}{2} + \frac{K_2'}{(H^+)} \right]}
 \end{aligned}$$

$$(HCO_3^-) = \frac{(Alk)}{1 + \frac{2K_2'}{(H^+)}} \quad (3.2.2.22)$$

Sustituyendo el HCO_3^- de la ecuación (3.2.2.22), en la ecuación (3.2.2.20) se tiene que:

$$(CO_3^{2-}) = \frac{K_2'}{(H^+)} \times \frac{(Alk)}{1 + \frac{2K_2'}{(H^+)}} \quad (3.2.2.23)$$

Ahora, sustituyendo el CO_3^{2-} de la ecuación (3.2.2.23), en la ecuación (3.2.2.15), se obtiene que:

$$K_c' = (Ca^{2+}) \times \frac{K_2'}{(H^+)} \times \frac{(Alk)}{1 + \frac{2K_2'}{(H^+)}} \quad (3.2.2.24)$$

Como la ecuación (3.2.2.15) marca el equilibrio de precipitación del carbonato, la ecuación (3.2.2.24), se puede escribir como:

$$K'_c = (Ca^{2+}) \times \frac{K'_2}{(H_c^+)} \times \frac{(Alk)}{1 + \frac{2K'_2}{(H_c^+)}}. \quad (3.2.2.25)$$

Si hacemos $B = \left[1 + \frac{2K'_2}{(H_c^+)} \right]$, se tiene que:

$$K'_c = (Ca^{2+}) \times \frac{K'_2}{(H_c^+)} \times \frac{(Alk)}{B}. \quad (3.2.2.26)$$

Logarítmizando la ecuación (3.2.2.26) se tiene que:

$$\begin{aligned} -\log K'_c &= -\log(Ca^{2+}) \times \frac{K'_2}{(H_c^+)} \times \frac{(Alk)}{B} \\ -\log K'_c &= -\left[\log(Ca^{2+}) + \log \frac{K'_2}{(H_c^+)} + \log \frac{(Alk)}{B} \right] \\ -\log K'_c &= -\left[\log(Ca^{2+}) + \log K'_2 - \log(H_c^+) + \log(Alk) - \log B \right] \\ -\log K'_c &= -\log(Ca^{2+}) - \log K'_2 + \log(H_c^+) - \log(Alk) + \log B \\ -\log(H_c^+) &= -\log K'_2 + \log K'_c - \log(Ca^{2+}) - \log(Alk) + \log B \\ -\log(H_c^+) &= -\log K'_2 - (-\log K'_c) - \log(Ca^{2+}) - \log(Alk) + \log B \end{aligned}$$

Aplicando los conceptos de pH y pK se obtiene que:

$$pH_c = (pK'_2 - pK'_c) + pCa^{2+} + pAlk + \log \left[1 + \frac{2K'_2}{H_c^+} \right]. \quad (3.2.2.27)$$

Para valores de pH entre 6.5 a 9.5, el valor $\log \left[1 + \frac{2K'_2}{H_c^+} \right]$, es muy pequeño y se puede

omitir, por lo tanto la ecuación (3.2.2.27) queda:

$$pH_c = (pK'_2 - pK'_c) + pCa + pAlk, \quad (3.2.2.28)$$

donde, pK'_2 es el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del ácido carbónico (H_2CO_3), pK'_c es el logaritmo negativo del producto de solubilidad del carbonato de calcio ($CaCO_3$), pCa^{2+} es el logaritmo negativo de la concentración molar de calcio (Ca^{2+}) y $pAlk$ corresponde al logaritmo negativo de la concentración equivalente de carbonato y bicarbonato (CO_3^{2-} , HCO_3^-).

Para la corrección por fuerza iónica (I) de los valores de pK'_2 y pK'_c , se utilizó la ecuación Debye – Hückel, con una determinada fuerza iónica, utilizando las siguientes ecuaciones (Bower, 1965; Richard, 1973).

$$pK'_2 - pK'_c = \left\{ 2.0269 + \left[0.5098 \left(\frac{4(I)^{\frac{1}{2}}}{1+2(I)^{\frac{1}{2}}} + \frac{(I)^{\frac{1}{2}}}{1+1.45(I)^{\frac{1}{2}}} \right) \right] \right\}. \quad (3.2.2.29)$$

El último término de esta ecuación expresa y proporciona la corrección de Debye – Hückel para una fuerza iónica (I) determinada. El número 2.0269 es la diferencia entre pK'_2 y pK'_c ; utilizando $K_2 = 4.7 \times 10^{-11}$ y $K_c = 5 \times 10^{-9}$ como valores numéricos de estas constantes.

La fuerza iónica y la concentración total de las aguas naturales están altamente correlacionadas. En un estudio estadístico con 200 muestras de aguas naturales, 100 de las cuales fueron de aguas superficiales y 100 de aguas subterráneas, en cada grupo las aguas tenían un rango de 1 a 50 $meqL^{-1}$ de cationes totales. Para un coeficiente de correlación de 0.9946 (r), un coeficiente de determinación (r^2) de 0.9892 y un error estándar estimado (\bar{S}) de ± 1.96 ; se encontró la siguiente ecuación de regresión (Bower *et al.*, 1965).

$$1000 \times I = 1.3477 \times C + 0.5355, \quad (3.2.2.30)$$

donde, C , es la concentración total de iones de una determinada agua de riego, expresada en $mmol_c L^{-1}$, I es la fuerza iónica expresada en ML^{-1} .

Para el cálculo del pH_c de las aguas, en primer lugar se calcula para las diferentes concentraciones expresadas $mmol_c L^{-1}$ de los parámetros ($pK_2' - pK_c'$), pCa y $pAlk$. Las concentraciones de iones expresadas en $mmol_c L^{-1}$ que se utilizan en estos cálculos son de $0.1 - 100 mmol_c L^{-1}$. En el Cuadro 8, se presentan los valores de las diferentes variables para construir una gráfica y así facilitar el cálculo del pH_c derivado de los análisis químicos de las aguas. La construcción de la gráfica (Figura 2), se realiza en papel semilogarítmico, colocando en el eje logarítmico (Y) 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 las (X), la escala aritmética en el sistema decimal, se colocan las concentraciones totales de cationes de las aguas de riego expresadas en $mmol_c L^{-1}$ (Bower *et al.*, 1965).

Cuadro 8: Valores de pH_c para las aguas de riego.

Concentración ($meqL^{-1}$ o $mmol_cL^{-1}$)	$pH_c = (pK_2' - pK_c') + pCa + pAlk$		
	$pK_2' - pK_c'$	pCa	$pAlk$
0.1	2.0897	4.3010	4.0000
0.2	2.0955	4.0000	3.6990
0.3	2.1007	3.8239	3.5229
0.4	2.1055	3.6990	3.3979
0.5	2.1100	3.6021	3.3010
0.6	2.1142	3.5223	3.2218
0.7	2.1182	3.4559	3.1549
0.8	2.1220	3.3979	3.0969
0.9	2.1256	3.4668	3.0458
1	2.1290	3.3010	3.0000
2	2.1576	3.0000	2.6990
3	2.1797	2.8239	2.5229
4	2.1980	2.6990	2.3979
5	2.2139	2.6021	2.3010
6	2.2281	2.5229	2.2218
7	2.2408	2.4559	2.1549
8	2.2525	2.3979	2.0969
9	2.2633	2.3468	2.0458
10	2.2733	2.3010	2.0000
11	2.2827	2.2596	1.9586
12	2.2915	2.2218	1.9208
13	2.2999	2.1871	1.8861
14	2.3078	2.1549	1.8539
15	2.3154	2.1249	1.8239
16	2.3226	2.0969	1.7959
17	2.3295	2.0706	1.7696
18	2.3361	2.0458	1.7447
19	2.3424	2.0223	1.7212
20	2.3486	2.0000	1.6990
21	2.3545	1.9788	1.6778
22	2.3602	1.9586	1.6576
23	2.3657	1.9393	1.6383
24	2.3710	1.9208	1.6198
25	2.3762	1.9031	1.6021
26	2.3813	1.8861	1.5850
27	2.3861	1.8697	1.5686
28	2.3909	1.8539	1.5528
29	2.3955	1.8386	1.5376
30	2.4000	1.8239	1.5229
31	2.4044	1.8097	1.5086
32	2.4087	1.7959	1.4949
33	2.4129	1.7825	1.4815
34	2.4170	1.7696	1.4685
35	2.4210	1.7570	1.4559
36	2.4249	1.7447	1.4437
37	2.4287	1.7328	1.4318
38	2.4325	1.7212	1.4202
39	2.4361	1.7100	1.4089
40	2.4397	1.6990	1.3979
41	2.4432	1.6882	1.3872
42	2.4467	1.6778	1.3768
43	2.4501	1.6676	1.3665
44	2.4534	1.6576	1.3565
45	2.4567	1.6478	1.3468
46	2.4599	1.6383	1.3372
47	2.4630	1.6289	1.3279
48	2.4661	1.6198	1.3188
49	2.4692	1.6108	1.3098
50	2.4722	1.6021	1.3010

... Cuadro 8

Concentración (<i>meqL</i> ⁻¹ o <i>mmol_cL</i> ⁻¹)	$pH_c = (pK'_2 - pK'_c) + pCa + pAlk$		
	$pK'_2 - pK'_c$	<i>pCa</i>	<i>pAlk</i>
51	2.4751	1.5935	1.2924
52	2.4780	1.5850	1.2840
53	2.4808	1.5768	1.2757
54	2.4837	1.5686	1.2676
55	2.4864	1.5607	1.2596
56	2.4891	1.5528	1.2518
57	2.4918	1.5452	1.2441
58	2.4945	1.5376	1.2366
59	2.4971	1.5302	1.2291
60	2.4997	1.5229	1.2218
61	2.5022	1.5157	1.2147
62	2.5047	1.5086	1.2076
63	2.5072	1.5017	1.2007
64	2.5096	1.4949	1.1938
65	2.5120	1.4881	1.1871
66	2.5144	1.4815	1.1805
67	2.5167	1.4750	1.1739
68	2.5190	1.4685	1.1675
69	2.5213	1.4622	1.1612
70	2.5235	1.4559	1.1549
71	2.5258	1.4498	1.1487
72	2.5280	1.4437	1.1427
73	2.5301	1.4377	1.1367
74	2.5323	1.4318	1.1308
75	2.5344	1.4260	1.1249
76	2.5365	1.4202	1.1192
77	2.5386	1.4145	1.1135
78	2.5406	1.4089	1.1079
79	2.5426	1.4034	1.1024
80	2.5446	1.3979	1.0969
81	2.5466	1.3925	1.0915
82	2.5486	1.3872	1.0832
83	2.5505	1.3820	1.0809
84	2.5525	1.3768	1.0757
85	2.5544	1.3716	1.0706
86	2.5562	1.3665	1.0655
87	2.5581	1.3615	1.0605
88	2.5589	1.3565	1.0555
89	2.5618	1.3516	1.0506
90	2.5636	1.3468	1.0458
91	2.5654	1.3420	1.0410
92	2.5671	1.3372	1.0362
93	2.5689	1.3325	1.0315
94	2.5706	1.3279	1.0269
95	2.5723	1.3233	1.0223
96	2.5740	1.3188	1.0177
97	2.5757	1.3143	1.0132
98	2.5774	1.3098	1.0088
99	2.5791	1.3054	1.0044
100	2.5807	1.3010	1.0000

Fuente: Ayers y Wescot, 1987; Mendoza, 2009.

*Entrando en la primera columna con las concentraciones en *mmol_cL*⁻¹. a. $Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+$; b. Ca^{2+} y; c. $CO_3^{2-} + HCO_3^-$; se obtienen los valores de $(pK'_2 - pK'_c)$, *pCa* y *pAlk* respectivamente.

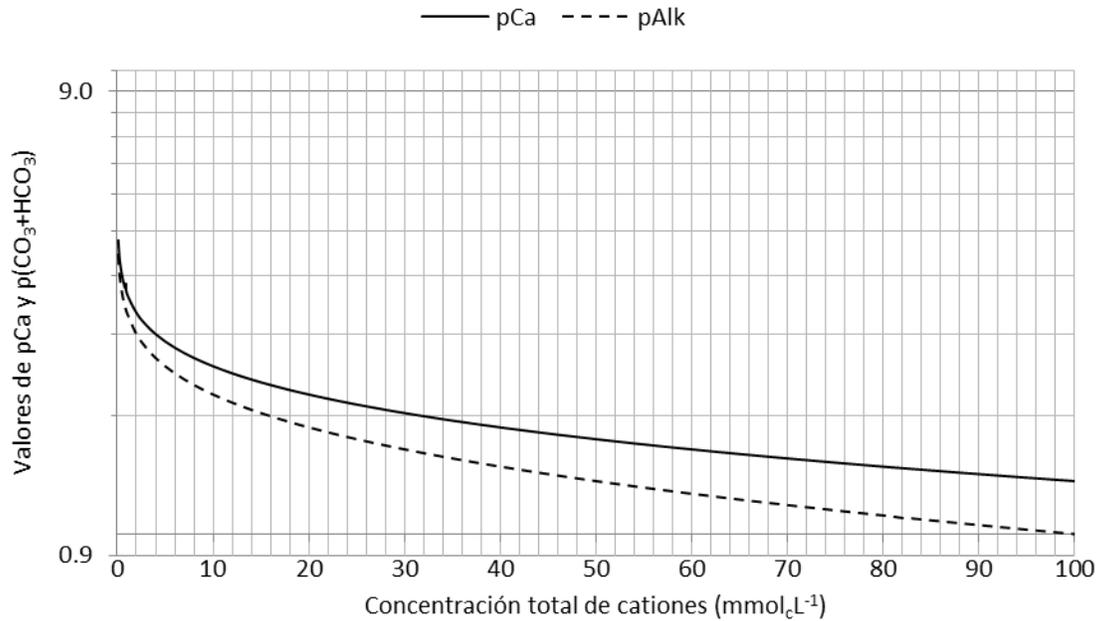


Figura 2. Valores de pCa y $pAlk$ de las aguas de riego. Fuente: Mendoza, 2009.

3.2.2.2.3 RAS corregido (RAS°)

Suarez, (1981), propuso una corrección a los valores del RAS original que tomara en cuenta la variación de la concentración de los iones de calcio y la llamo RAS corregido (RAS°); este enfoque ofrece una mejor comprensión de las modificaciones del calcio del agua del suelo, que dan lugar a un aumento de su contenido, provocado por la disolución del calcio de los carbonatos y de los silicatos, o a una disminución del mismo, ocasionada por la precipitación del calcio en forma de carbonato; y además de debe tener en cuenta la presión parcial del dióxido de carbono en los primeros milímetros del suelo, la cual tiene un valor de 0.0007 atmósferas.

La fórmula de la relación de adsorción de sodio que toma en cuenta la presión parcial del dióxido de carbono es:

$$RAS^\circ = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}}, \quad (3.2.2.31)$$

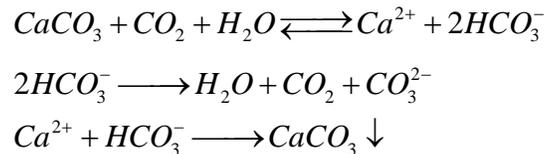
donde, RAS° es el valor del RAS original de una agua de riego que toma en cuenta la presión parcial del dióxido de carbono ($P_{CO_2} = 0.0007$ atmósfera) y una relación determinada de $\frac{HCO_3}{Ca}$; C_{Na^+} , $C_{Ca^{2+}}$, $C_{Mg^{2+}}$ son las concentraciones de estos iones expresadas en $mmol_cL^{-1}$ o $meqL^{-1}$.

Para calcular la concentración de Ca° que debe introducirse en la ecuación (3.2.2.31), se utiliza el Cuadro 9, en el cual se toma en cuenta la relación $\frac{HCO_3}{Ca}$, expresada en $mmol_cL^{-1}$ o $meqL^{-1}$ y la conductividad eléctrica expresada en $dScm^{-1}$ de las aguas de riego (Ayers y Westcot, 1987; Velázquez, 2001; Mendoza, 2009; Arteaga, 2010).

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



En el sistema carbonato-bicarbonato de la disolución o precipitación de la calcita se representa de la siguiente manera:



Cuadro 9. Valores de Ca° en función de la relación $\frac{HCO_3^-}{Ca}$ y la conductividad eléctrica ($mScm^{-1}$)^{1,2}.

		SALINIDAD DEL AGUA DE RIEGO APLICADA CE ($mScm^{-1}$)											
		0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0
Valor de $\frac{HCO_3^-}{Ca^{2+}}$	0.05	13.20	13.61	13.92	14.40	14.79	15.26	15.91	16.43	17.28	17.97	19.07	19.94
	0.10	8.30	8.57	8.77	9.07	9.31	9.62	10.02	10.35	10.89	11.32	12.01	12.56
	0.15	6.34	6.54	6.69	6.92	7.11	7.34	7.65	7.90	8.31	8.64	9.17	9.58
	0.20	5.24	5.40	5.52	5.71	5.87	6.06	6.31	6.52	6.86	7.13	9.57	7.91
	0.25	4.51	4.65	4.76	4.92	5.06	5.22	5.44	5.62	5.91	6.15	6.52	6.82
	0.30	4.00	4.12	4.21	4.36	4.48	4.62	4.82	4.98	5.24	5.44	5.62	5.91
	0.35	3.61	3.72	3.80	3.94	4.04	4.17	4.35	4.49	4.72	4.91	5.21	5.45
	0.40	3.30	3.40	3.48	3.60	3.70	3.82	3.98	4.11	4.32	4.49	4.77	4.98
	0.45	3.05	3.14	3.22	3.33	3.42	3.53	3.68	3.80	4.00	4.15	4.41	4.61
	0.50	2.84	2.93	3.00	3.10	3.19	3.29	3.43	3.54	3.72	3.87	4.11	4.30
	0.75	2.17	2.24	2.29	2.37	2.43	2.51	2.62	2.70	2.84	2.95	3.14	3.28
	1.00	1.79	1.85	1.89	1.96	2.01	2.09	2.16	2.23	2.35	2.44	2.59	2.71
	1.25	1.54	1.59	1.63	1.68	1.73	1.78	1.86	1.92	2.02	2.10	2.23	2.33
	1.50	1.37	1.41	1.44	1.49	1.53	1.58	1.65	1.70	1.79	1.86	1.97	2.07
	1.75	1.23	1.27	1.30	1.35	1.38	1.43	1.49	1.54	1.62	1.68	1.78	1.86
	2.00	1.13	1.16	1.19	1.23	1.26	1.31	1.36	1.40	1.48	1.58	1.63	1.70
	2.25	1.04	1.08	1.10	1.14	1.17	1.21	1.26	1.30	1.37	1.42	1.51	1.58
	2.50	0.97	1.00	1.02	1.06	1.09	1.12	1.17	1.21	1.27	1.32	1.40	1.47
	3.00	0.85	0.89	0.91	0.94	0.96	1.00	1.04	1.07	1.13	1.17	1.24	1.30
	3.50	0.78	0.80	0.82	0.85	0.87	0.90	0.94	0.97	1.02	1.06	1.12	1.17
4.00	0.71	0.73	0.75	0.78	0.80	0.82	0.86	0.88	0.93	0.97	1.03	1.07	
4.50	0.66	0.68	0.69	0.72	0.74	0.76	0.79	0.82	0.86	0.90	0.95	0.99	
5.00	0.61	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.74	0.76	0.80	0.83	0.88	0.93	
7.00	0.49	0.50	0.52	0.53	0.55	0.57	0.59	0.61	0.64	0.67	0.71	0.74	
10.00	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.45	0.47	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58	
20.00	0.24	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.32	0.33	0.35	0.37	
30.00	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.27	0.28	

Fuente: Suárez, 1981.

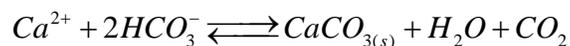
1. Supone: a. Una fuente de Ca proveniente de silicatos o $CaCO_3$; b. No existe precipitación de Mg ; y c. La presión relativa de CO_2 de la superficie del suelo es de 0.0007 atmósferas.
2. Ca° y $\frac{HCO_3^-}{Ca^{2+}}$ están expresados en $mmol_cL^{-1}$ o $meqL^{-1}$ y la CE esta expresada en $mScm^{-1}$.

3.2.2.3 Concentración de iones bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-})

En los últimos años se ha notado la tendencia que las aguas de riego utilizadas en muchas partes del mundo, en especial en las zonas áridas y semiáridas, poseen altas concentraciones de sales, siendo los bicarbonatos los iones predominantes (Jalali *et al.*, 2008; Letey *et al.*, 2011).

El origen de los bicarbonatos y carbonatos están relacionados con yacimientos basálticos profundos, en los cuales por procesos de intemperismos, las aguas de estos acuíferos se enriquecen con bicarbonato y algunas fracciones de carbonato. Las aguas urbano- industriales que riegan el Valle del Mezquital contienen cantidades variables de carbonato de sodio residual (Velázquez, 2001; Mendoza, 2009).

Todas las aguas usadas para el riego de cultivos agrícolas contienen sales disueltas. Si el agua de riego es continuamente evaporada y transpirada en una masa de suelo, las sales contenidas en el suelo pueden incrementarse, llegando a ser perjudicial para las plantas. Muchas investigaciones han mostrado la cantidad de lavado necesario para prevenir la acumulación de sales y sus problemas asociados. Cuando el contenido de cationes de las aguas de riego es caracterizado por una alta proporción de Na^+ , el uso continuo de esta agua puede incrementar el contenido de sodio intercambiable en el suelo, resultando perjudicial para las plantas y disminuyendo la calidad del suelo. Eaton (1950), sugirió que los efectos se agravan con los contenidos de iones de HCO_3^- en el agua de riego. En aguas con contenido de Ca^{2+} y HCO_3^- evaporándose, el CO_2 se pierde del sistema y el $CaCO_3$ precipita de acuerdo con la siguiente reacción (Babcock, et al., 1959; Bresler *et al.*, 1982):



En las aguas con iones bicarbonatos, hay la tendencia del calcio y del magnesio a precipitarse en forma de carbonatos a medida que la solución del suelo se vuelve 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 así la proporción relativa del sodio (Eaton, 1950; Richard, 1973; Bresler *et al.*, 1982); Eaton (1950), al referirse a esta reacción usa tres términos:

1. Por ciento de sodio encontrado
2. Por ciento de sodio posible
3. Carbonato de sodio residual

Por ciento de sodio encontrado (PSE)

Este término se refiere al porcentaje de sodio medido con respecto a la suma de los principales cationes que intervienen en los procesos de sodificación.

$$PSE = \frac{(Na^+ \times 100)}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)}, \quad (3.2.2.32)$$

Por ciento de sodio posible (PSP)

El peligro del desplazamiento de calcio y de magnesio por el sodio, en el complejo de intercambio, empieza cuando el contenido de sodio en solución en el agua de riego no es suficientemente representativo de este peligro, debido a que ya en el suelo, las sales menos solubles ($CaCO_3$, $MgCO_3$ y $CaSO_4$) precipitan y por tanto, el porcentaje de sodio posible está referido a la salinidad efectiva. Las aguas se consideran buenas si su $PSP < 50\%$ y serán condicionadas si su $PSP > 50\%$. Aparentemente el PSP no define aguas no recomendables, el PSP se estima con la siguiente ecuación (Babcock *et al.*, 1959).

$$PSP = \frac{(Na^+ \times 100)}{\left[(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+) - (CO_3^{2-} + HCO_3^-) \right]}, \quad (3.2.2.33)$$

Carbonato de sodio residual (CSR)

Cuando en el agua de riego, el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el contenido de calcio y magnesio, existe la posibilidad de que se forme el carbonato de sodio, debido a que, por su alta solubilidad, puede permanecer en solución aún después de que han precipitado los carbonatos de calcio y de magnesio ($CaCO_3$ y $MgCO_3$). El carbonato de sodio (Na_2CO_3) provoca la defloculación del suelo (Wilcox *et al.*, 1954; Yaron, 1973; Kovda, 1973; Bresler *et al.*, 1982). Este índice se calcula con la siguiente ecuación.

$$CSR = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+}). \quad (3.2.2.34)$$

Cuando la diferencia es negativa, no existe problema y el valor de carbonato de sodio residual puede suponerse igual a cero. Cuando el valor es positivo indica que Ca^{2+} y Mg^{2+} se precipitan en el suelo como carbonatos, existiendo solo sales de sodio en la solución. La clasificación de las aguas para riego de acuerdo con el carbonato de sodio residual, se presenta en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Clasificación de las aguas de riego de acuerdo al carbonato de sodio residual ($mmol_c L^{-1}$).

Clase	Carbonato de sodio residual ($mmol_c L^{-1}$)
Buena	<1.25
Condicionada	1.25 – 2.5
No recomendable	>2.5

Fuente: Adaptada de Wilcox *et al.*, 1954.

3.2.2.4 Problemas de infiltración de suelos bajo riego

La fuerza de coagulación (estabilidad estructural) de los cationes de la serie liotrópica aumenta del litio hacia el bario. En la serie de hidratación los iones se colocan en sentido

inverso a la disminución del diámetro iónico, para los monovalentes es: *Li, Na, K, Rb, Cs*; y para los divalentes es: *Mg, Ca, Ba*. Es natural que los iones de mayor hidratación en los coloides adquieran estabilidad contra la coagulación y la movilidad. En general, los suelos sódicos poseen propiedades físicas adversas para el desarrollo de los cultivos; tal es el caso de estructura poco resistente al agua, gran dureza cuando se secan y alta plasticidad cuando se humedecen, así mismo la infiltración del agua y paso del aire se dificultan. El riego continuo, con aguas ricas en sodio, genera una acumulación de este elemento en el suelo, alterando la serie liotrópica y la secuencia en los grados de hidratación, lo cual conlleva al desarrollo de procesos de masificación estructural que disminuyen los valores de conductividad hidráulica, ocasionando otros problemas, tales como, saturación de los primeros centímetros del horizontes y dificultad para la toma de agua y nutrientes. Otra explicación del efecto del sodio en algunas propiedades del suelo y por ende la conductividad hidráulica, se presenta en el Cuadro 11 (Santana, 1989).

Cuadro 11. Efecto de los cationes adsorbidos en algunas propiedades físicas del suelo.

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

Fuente: Gorbunov, 1967, citado por Santana, 1989.

Del Cuadro 11, 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, se dispersará más que el suelo saturado con potasio, y este se dispersará más que el suelo

saturado con magnesio y así sucesivamente. De esta misma manera se comporta la ascensión capilar, la compresibilidad cuando hay hidratación, plasticidad e hinchamiento. En dirección contraria cambia la velocidad de infiltración, la velocidad de absorción, etc.

Los problemas de infiltración (velocidad de infiltración menor de 3 mmh^{-1}) ocasionados por la mala calidad del agua ocurren en los primeros centímetros del suelo y están ligados con la estabilidad estructural del suelo y con el contenido de sodio con relación al calcio. La dispersión de los suelos y la destrucción de su estructura se producen cuando el contenido de sodio supera al de calcio en una proporción por encima de 3:1. Este contenido relativo de sodio provoca serios problemas de infiltración, al igual que una baja salinidad del agua; esto se debe a la falta de calcio suficiente para contrarrestar los efectos dispersantes del sodio. La Figura 3 es utilizada para evaluar el efecto de la relación de adsorción de sodio (RAS) y la conductividad eléctrica (CE) en la infiltración del agua en los suelos (Reeve and Tamaddoni, 1965; Waldron y Constantin, 1970; Naghshineh-Pour *et al.*, 1970, Vellasco-Molina *et al.*, 1971; Dane y Klute, 1977; Ayers y Wescot, 1987; Abu-Sharar *et al.*, 1987; Shaw *et al.*, 1998; Oster and Jayawardane, 1998; Tanji and Kielen, 2002).

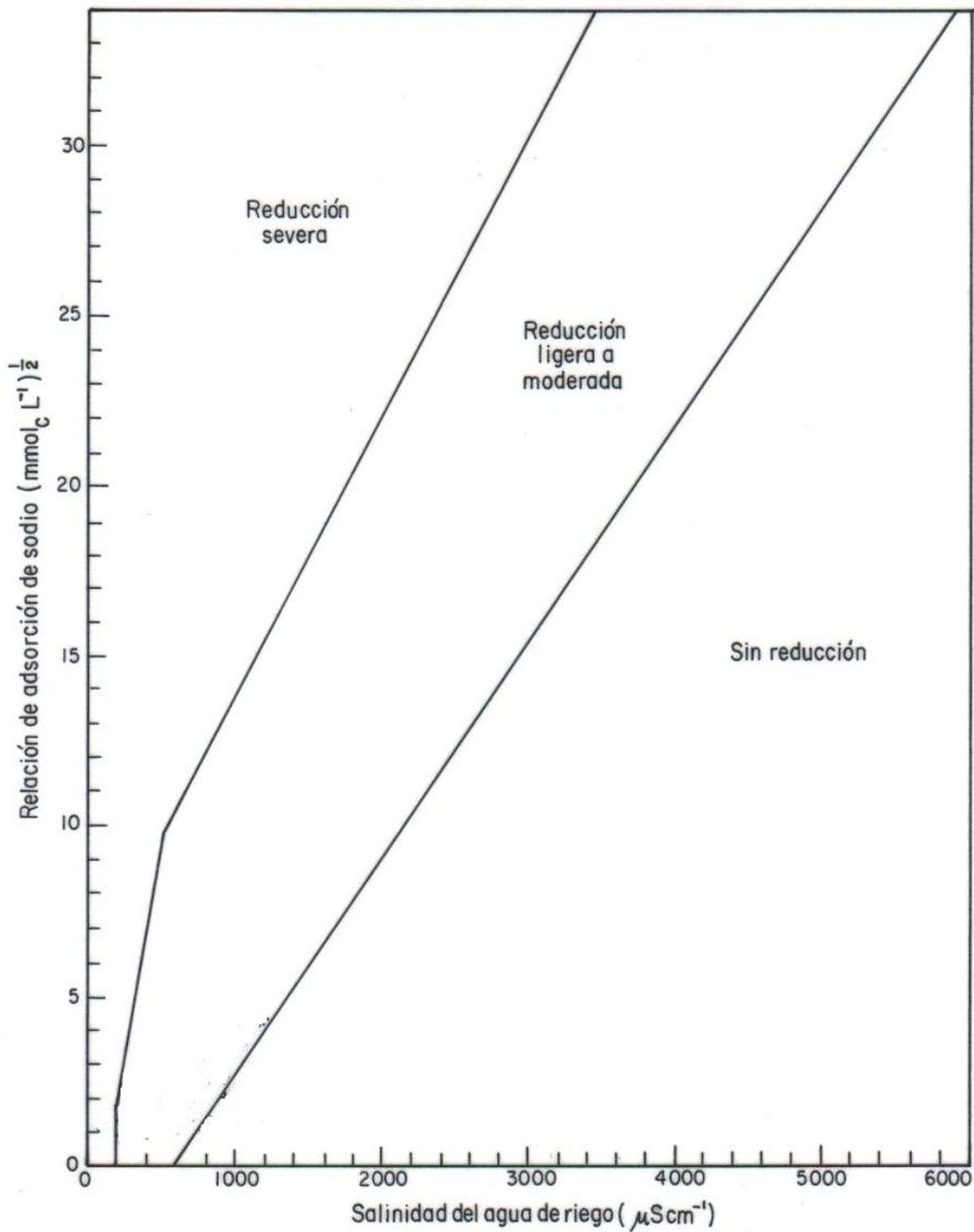


Figura 3. Reducción relativa de la infiltración en función de la conductividad eléctrica (μScm^{-1}) y el RAS. Fuente: Ayers y Wescot, 1987.

3.2.3. Criterios de toxicidad

Los problemas de toxicidad surgen cuando ciertos elementos o iones del suelo o del agua, son absorbidos por las plantas en concentraciones altas y provocan daños que reducen considerablemente su crecimiento, desarrollo y producción. La magnitud de los daños depende de la naturaleza, cantidad de los iones, y la sensibilidad de las plantas cultivadas. Los iones que con más frecuencia causan toxicidad son el sodio, cloro y boro (Yaron, 1973; James *et al.*, 1982; Chen *et al.*, 2009).

3.2.3.1 Sodio

El sodio que las plantas absorben, se va acumulando en las hojas a medida que el agua es transpirada y cuando alcanza ciertos niveles de concentración produce efectos tóxicos. El límite de tolerancia de cada cultivo es diferente, pero en muchas especies vegetales, la toxicidad se presenta cuando el sodio alcanza un porcentaje alrededor de 0.25 % respecto al peso seco de la hoja. En términos generales se considera que el efecto tóxico del sodio no depende de su concentración absoluta, sino de su proporción con respecto al calcio; por tal razón, la tolerancia de los cultivos se relaciona con el porcentaje de sodio intercambiable del suelo (Pizarro, 1978; James *et al.*, 1982).

3.2.3.2 Cloro

El cloro 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 y alcanzar niveles tóxicos. Los síntomas de toxicidad de cloro aparecen en plantas sensibles, cuando su concentración está alrededor del 0.50 % con respecto al peso seco de las hojas (Yaron, 1973; Pizarro, 1978; James *et al.*, 1982).

3.2.3.3 Boro

El boro es un elemento esencial y potencialmente tóxico para las plantas, cuando excede ligeramente el nivel óptimo. Se encuentra en casi todas las aguas naturales y es uno de los constituyentes más tóxico en las aguas de riego. Muchas plantas de cultivo presentan algún grado de toxicidad cuando la concentración de boro llega a 1 mgL^{-1} , tal es el caso del cultivo de limón y naranja; pero otros cultivos como la alfalfa logra buen desarrollo a concentraciones de $1 - 2 \text{ mgL}^{-1}$. Las aguas superficiales naturales pocas veces contienen niveles tóxicos de boro, pero las aguas de manantiales y aguas de pozos, localizadas cerca de fallas tectónicas y zonas geotérmicas, pueden contener concentraciones tóxicas. La toxicidad de boro ocurre con mayor frecuencia en los suelos de regiones áridas y semiáridas, donde se riega con aguas con altas concentraciones de boro, mientras que las deficiencias de boro, son encontradas principalmente en regiones húmedas (Peterson and Newman, 1976; Elrashidi and O'Condor, 1982; Goldberg et al., 2005; Chen et al., 2009).

En los Cuadros 12 y 13 se presenta la clasificación de las aguas de riego con base en el contenido de boro.

Cuadro 12. Clasificación del agua de riego basada en el contenido de boro.

B (mgL^{-1})	Peligro de toxicidad
< 0.5	Seguro para cultivos sensibles
0.5 – 1.0	Cultivos sensibles pueden sufrir daños de ligeros a moderados
1.0 – 2.0	Cultivos semitolerantes pueden sufrir daños moderados
2.0 – 4.0	Cultivos tolerantes pueden sufrir daños moderados
> 4.0	Peligrosa para todos los cultivos

Fuente: James *et al.*, 1982.

Cuadro 13. Límites de boro en aguas de riego para diferentes grados de tolerancia.

Cultivos tolerantes ^a	Cultivos semitolerantes ^b	Cultivos sensibles ^c
Espárragos	Papa	Pera
Palma datilera	Algodón	Manzana
Remolacha azucarera	Olivo	Uvas
Alfalfa	Maíz	Fresa
Ajo		Naranja
Lechuga		Limón
Zanahoria		

^aDe 2 – 4 mgL^{-1} de boro

^bDe 1 – 2 mgL^{-1} de boro

^cDe 0.3 – 1 mgL^{-1} de boro

Fuente: Adaptado de James *et al.*, 1982.

3.2.3.4 Fosfatos

El fósforo puede existir, en estado mineral y orgánico, bajo diferentes compuestos. La interacción del fósforo con la salinidad depende de la especie vegetal, etapa de desarrollo de la planta, concentración y tipo de salinidad. El contenido de fósforo en las aguas de riego debe ser de 0 – 2 mgL^{-1} (Ayers y Wescot, 1987).

3.2.3.5 Sulfatos

Los sulfatos y los cloruros, son los principales aniones presentes en las aguas. Las plantas presentan sensibilidad a concentraciones altas de sulfatos, ya que puede limitar la absorción de sodio y alterar el balance catiónico óptimo dentro de la planta, como es el caso de la limitación en la absorción de calcio (Ayers y Wescot, 1987).

3.2.3.6 Nitratos

El agua de riego puede contener niveles excesivos de nitrógeno para ciertos cultivos sensibles, los cuales en este caso presentarán un mayor crecimiento vegetativo que provoca un retraso en la maduración y baja calidad de la producción (Ayers y Wescot, 1987).

3.2.3.7 Elementos pesados

Muchos elementos se encuentran en bajas concentraciones en las aguas de riego, solo se analizan cuando provienen de efluentes de uso urbano e industrial. Entre estos elementos se incluyen: 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*). Además, existen algunos elementos pesados que ocasionan daños peligrosos al hombre y animales, cuando son absorbidos por las plantas, entre estos se encuentran: Arsénico (*As*), Cadmio (*Cd*), Cromo (*Cr*), Cobre (*Cu*), Plomo (*Pb*), Mercurio (*Hg*) y Zinc (*Zn*). En el Cuadro 14 se presentan las máximas concentraciones recomendadas de elementos pesados y trazas en aguas de riego, para la producción de cultivos, bajo buenas prácticas de riego (Pescod, 1992).

Cuadro 14. Concentración máxima recomendada de elementos trazas y pesados en aguas de riego.

Elemento	Concentración máxima (mgL^{-1})
Aluminio	5.0
Arsénico	0.10
Berilio	0.10
Cadmio	0.01
Cobalto	0.05
Cromo	0.10
Flúor	0.20
Cobre	1.0
Hierro	5.0
Litio	2.5
Manganeseo	0.20
Molibdeno	0.01
Níquel	0.20
Pd	5.0
Selenio	0.02
Vanadio	0.10
Zinc	2.0

Fuente: Adaptado de Pescod, 1992.

3.3 Estudios freáticos

La falta de un adecuado drenaje subsuperficial y la presencia de una napa freática somera agravan los problemas de salinidad y complican su control, lo que indica que el drenaje es una alternativa para el control de la salinidad; frecuentemente la presencia de un nivel freático somero está asociada con capas de suelo de baja permeabilidad (capas de arcilla 2:1 y hardpan), o la roca madre, riegos excesivos y filtraciones de canales (Shainberg y Shalhevet, 1984; Rhodes, 1999).

La forma más eficaz de controlar la salinidad resultante de niveles freáticos poco profundos es mediante un sistema de drenaje que permita bajar el nivel de las aguas freáticas y mantenerlo estable a esa profundidad. El drenaje debe aplicarse siempre que se roten tierras nuevas y es esencial para asegurar el éxito a largo plazo de todo proyecto de riego, una vez establecido un drenaje adecuado, los problemas de salinidad pueden ser controlados por medio de un manejo eficiente del riego (Ayers y Westcot, 1987).

Según Bustamante, (1993), los principales objetivos de los estudios freáticos son:

1. Determinar la extensión, magnitud y naturaleza de los problemas de drenaje.
2. Analizar el comportamiento de las aguas subterráneas e identificar mediante un balance hídrico las causas que originan los problemas de drenaje.
3. Identificar finalmente cómo se puede alterar artificialmente el nivel freático (drenaje subsuperficial) en forma tal que la tabla de agua y sus fluctuaciones no alteren el rendimiento de los cultivos.

En resumen, los estudios de los niveles freáticos se justifican con el objeto de conocer, analizar y ejecutar obras para sostener una agricultura productiva desde el punto de vista del manejo de la humedad subsuperficial del suelo. En consecuencia, se requiere del conocimiento del origen, dirección, fluctuación de las aguas subterráneas, relieve, topografía de los terrenos y localización-distribución de los acuíferos. Para el estudio de los niveles freáticos las observaciones se pueden realizar en pozos para usos domésticos, pozos de observación revestidos, piezómetros y superficies libres de agua como lagos o ciénagas.

Los pozos de observación son orificios o perforaciones de diámetro reducido con relación a su profundidad, que se hacen verticalmente en el suelo con el objeto de determinar los niveles de la tabla de agua y sus fluctuaciones a través del tiempo. Para su construcción se utilizan barrenas de diámetros que varían de 4 a 10 cm, suficientes para tomar muestras de agua para los análisis correspondientes, especialmente de salinidad (Bustamante, 1993; Espinoza, 1995).

La profundidad de los pozos de observación puede ser variable aunque es recomendable unos 4 m para identificar en su construcción la presencia de capas impermeables para efectos de aplicación de fórmulas de espaciamiento de drenes y complementar los estudios edafológicos. Como en estos pozos así construidos se pueden presentar derrumbes que afectan su estabilidad, por lo cual suelen revestirse con un tubo que puede ser de PVC de diámetro menor al del pozo perforado. En el extremo inferior se taponan para impedir entrada de material; el extremo superior se empotra en placa de concreto para darle solidez, identificarlo y determinar la cota. La zona entre el tubo y la pared se rellena con grava como filtro. Como idea no como norma, se puede establecer en principio la siguiente densidad en función de la superficie de estudio, tal como se muestra en el Cuadro 15 (Bustamante, 1993).

Cuadro 15. Número de pozos de observación por superficie en hectáreas.

Superficie (has)	No de pozos	$ha(\text{pozo})^{-1}$
1,000	50	20
2,000	60	35
5,000	100	50
10,000	150	65

Fuente: Bustamante, 1993.

Una vez que se conozcan y evalúen los primeros resultados de los registros periódicos a través del tiempo, se pueden aumentar el número de pozos y definir su localización de acuerdo con los objetivos del estudio y las características del terreno hasta llegar a la que se considere la densidad aceptable. Para superficies menores de 1,000 hectáreas no es aplicable el cuadro 15 y por lo tanto el número de pozos de observación se regirá por las

propias características del estudio pero siempre incrementándose ampliamente su densidad por unidad de superficie.

Cuando se pretende cuantificar los efectos nocivos de los niveles freáticos en las plantas y el suelo es conveniente realizar mediciones quincenales o mensuales (en lo posible el mismo día todos los pozos), de tal manera que se incluyan varios períodos secos y lluviosos. A cada pozo se le debe medir su cota topográfica preferiblemente con relación al nivel del mar. Las hidrógrafas se obtienen graficando la elevación de los niveles freáticos en las ordenadas, contra el tiempo en las abscisas, en cada pozo. Con la información de las hidrógrafas y conociendo la cota del terreno y la profundidad radicular efectiva se obtiene la siguiente información (Pizarro, 1978; Mercado, 1999):

1. Períodos críticos del cultivo en el año, en el área de influencia de cada pozo.
2. Muestra la tasa de ascenso o abatimiento del nivel freático.
3. En conjunto con los componentes del balance hídrico ayuda a entender la causa de las fluctuaciones.

Los mapas de isobatas representan zonas con igual profundidad del nivel freático, estas se obtienen por la medición directa en los pozos de observación desde la superficie del suelo, y determinan las zonas con riesgos de salinización y necesidad de drenaje en especial en períodos o etapas críticas como cuando el cultivo es más sensible a los niveles de agua someros o cuando la napa presenta su máxima elevación en el año, deducida de las mismas hidrógrafas (Pizarro, 1978; CNA, 2007; Mercado *et al.*, 2011).

Los mapas de superficie freáticas se elaboran para cada fecha de registro de los niveles de agua en los pozos, o sea, se localizan los pozos en un plano a escala adecuada y se unen por interpolación los puntos de igual elevación de la cota del nivel freático. Estas líneas de igual altura se denominan equipotenciales o isohipsas. La dirección del flujo será entonces normal a las isohipsas y de las líneas de mayor potencial a las de menor, la densidad de flujo la define la pendiente entre las isohipsas o sea la relación entre la diferencia de alturas y la distancia entre ellas. Una de las formas de conocer las fluctuaciones en el área de

influencia de cada pozo es utilizando las hidrógrafas, pero cuando se quiere conocer en función del tiempo en forma conjunta y dibujar las líneas de cambio, simplemente se superponen los mapas de isobatas e isohipsas para los períodos en consideración; las diferencias en la interpolación de las líneas se localizan y se dibujan los mapas de fluctuaciones de los niveles freáticos (Martínez, 1986; Hassan, 1994; Mercado, 1999).

Si en cada pozo de observación se toman muestras de aguas freáticas y se realizan análisis de salinidad, entonces es posible construir mapas de salinidad de aguas freáticas. Estos mapas son muy importantes para entender los procesos de migración y acumulación de sales en una determinada zona. Las comparaciones de los iones disueltos en el agua freática guarda siempre una cierta relación con la concentración de los iones en los suelos (Custodio y Llamas, 1983; Hassan, 1994; Mercado *et al.*, 2011).

La intensa y continua recarga originada por las filtraciones del agua de riego provoca la sobre elevación de los mantos freáticos en los distritos de riego de las zonas áridas y semiáridas. Cuando el manto freático invade la zona de raíces, se presentan problemas de drenaje y salinidad, afectando la producción de los cultivos y la productividad de los suelos. En ocasiones, los problemas de mantos freáticos elevados y salinidad son de tal magnitud que la actividad agrícola resulta ser incosteable. El drenaje agrícola subterráneo es una alternativa para la rehabilitación de los suelos con este tipo de problemas (Timm *et al.*, 2002; Niazi *et al.*, 2002; Lázaro *et al.*, 2005; Yang, 2008).

En los problemas de drenaje subterráneo se deben tener en cuenta la profundidad mínima a la cual se debe ubicar el nivel freático para que no cause disminución en la producción de los cultivos y se genere una salinización del suelo, por lo que los esquemas de riego para el suministro de agua a los cultivos y control de la salinidad del suelo deben ser adecuados para un descenso de los niveles freáticos someros a fin de incrementar la producción. Una vez que se logra el descenso de los niveles a umbrales adecuados, la operación del drenaje necesita ser optimizado de acuerdo con la dinámica de las variaciones espacio – temporales (Hornbuckle *et al.*, 2007; Rana *et al.*, 2008; Ritzema *et al.*, 2008).

Según CENICANA (1991) y Cruz (1995); la producción de caña de azúcar se puede reducir hasta en 35 tha^{-1} , cuando el nivel freático se mantiene a una profundidad menor de 70 cm. Si en los suelos se tiene una humedad excesiva durante la preparación del terreno, entonces las labores de siembra y cosecha sufren un retraso, además los suelos se compactan y el porcentaje de germinación se reduce, aumentando los costos por concepto de resiembras y, por consiguiente, los costos totales de producción. Pero niveles freáticos entre 1.0 y 1.2 m de profundidad son adecuados para el desarrollo y producción del cultivo de la caña de azúcar.

Estudios realizados en Córdoba, Argentina, usando el modelo de simulación del balance hídrico FREAT 1, en suelos Haplustol udorténtico y Natralbol típico, los dos con niveles freáticos oscilando a menos de 3 m de profundidad, mostraron que el modelo fue apropiado para predecir oscilaciones temporales del manto freático y evaluar el riesgo de inundación por anegamiento y además fue un excelente indicador del riesgo de salinización de los suelos (Degioanni *et al.*, 2006).

3.3.1 Ecuaciones de transferencia de agua y su implicación en la salinidad de los suelos

La descripción cuantitativa del transporte de solutos en la zona no saturada, reviste gran importancia en el entendimiento de las sales en el perfil del suelo, cantidad de nutrientes tomados por las plantas y contaminación del agua subterránea por químicos de peligro potencial provenientes de las aguas de drenaje agrícola. En este sentido una gran cantidad de estudios bajo condiciones de laboratorio han sido desarrollados con el objeto de entender los procesos físicos y químicos que se desarrollan durante el movimiento de los solutos. Sin embargo, la aplicación de los resultados obtenidos a situaciones prácticas ha tenido poco éxito debido a la dificultad para establecer en forma adecuada las condiciones de fronteras y la variabilidad espacio-temporal de las propiedades del suelo. La transferencia de agua a través del suelo es de gran complejidad por tratarse de un proceso esencialmente no lineal en un medio polifásico, donde el contenido de agua varía en el espacio y el tiempo. El agua al desplazarse en el interior del suelo, lo hace a través de los poros, que varían en forma, diámetro y dirección. Estas características hacen que su velocidad de desplazamiento sea

variable. Aún en un mismo poro el agua se mueve a mayor velocidad por el centro del poro que en la cercanía a sus paredes. Una forma de estudiar el proceso de transferencia de agua en los medios porosos es utilizando las siguientes ecuaciones (Kutílek y Nielsen, 1994; Zataráin, 1996; Lázaro, 1998):

3.3.1.1 Ecuación de continuidad

La aplicación del principio de conservación de masa al flujo del agua en un suelo indeformable y asumiendo que el agua es incompresible permite establecer la ecuación de continuidad para un medio poroso.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot q + S = 0, \quad (3.3.1)$$

donde $\theta = \theta(x, y, z, t)$ es el contenido volumétrico de agua ($L^3 L^{-3}$), t es el tiempo (T), q es el flujo unitario de agua (LT^{-1}), ∇ es el operador gradiente y $S = S(x, y, z, t)$ es la tasa de extracción de agua por las plantas en la unidad de tiempo (T^{-1}).

3.3.1.2 Ecuación de Darcy

En los suelos se acepta que el flujo del agua a nivel macroscópico se describe por la ley de Darcy, que establece la proporcionalidad entre el flujo de agua y el gradiente hidráulico:

$$q = -K(\Psi) \nabla(\Psi + z), \quad (3.3.2)$$

donde, $q = (q_x, q_y, q_z)$ es el flujo unitario de agua o gasto por unidad de superficie de suelo expuesto perpendicularmente al movimiento del agua y q_x, q_y, q_z son sus componentes siguiendo sus ejes cartesianos (LT^{-1}), z es el potencial gravitacional asimilado a la coordenada espacial orientado positivamente hacia arriba [L], ψ es el potencial de presión del agua en el suelo expresado como altura equivalente de columna de agua [L]. Los

valores de ψ varían de acuerdo al dominio del flujo ($\psi > 0$ en la zona saturada y $\psi < 0$ en la zona no saturada); $K(\psi)$ es el coeficiente de proporcionalidad conocido como conductividad hidráulica que depende tanto de las propiedades del medio (porosidad del suelo, distribución del tamaño de poros y geometría de los poros), como de la sustancia (viscosidad, densidad, etc.) [LT^{-1}]. El operador gradiente ∇ se define según la expresión siguiente:

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right).$$

La restricción que presenta esta ley, está dada por su funcionamiento sólo para un régimen de flujo laminar donde las fuerzas inerciales son despreciables respecto a las fuerzas viscosas, y donde las interacciones suelo-agua no producen modificaciones significativas en la fluidez. Sin embargo, también pueden ocurrir desviaciones cuando el gradiente y los poros del suelo son muy pequeños debido a la influencia de las fuerzas de adsorción.

3.3.1.3 Ecuación general de transferencia de agua

La combinación de las ecuaciones (3.3.1) y (3.3.2) permite establecer la ecuación general que describe la transferencia de agua en suelos parcialmente saturados.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - \nabla [K(\psi) \nabla H] + S = 0, \quad (3.3.3)$$

donde $H = \psi + z$ es el potencial hidráulico del agua en el suelo [L], K y ψ son funciones no lineales del contenido de humedad (θ).

3.3.1.4 Ecuación de los mantos freáticos someros

La integración de la ecuación 3.3.3 en la dirección de la coordenada z desde H a H_0 , conduce a la ecuación de los mantos freáticos someros.

$$\langle \mu \rangle \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \left[K_s (H - H_0) \nabla H \right] + r, \quad (3.3.4)$$

donde μ es la porosidad drenable, $H = H(x, y, t)$ es la elevación de la superficie libre del agua, $H_0 = H_0(x, y)$ es la elevación del estrato impermeable, $K_s = K_s(x, y)$ es la conductividad hidráulica a saturación y $r = r(x, y, t)$ se ha definido como:

$$r = - \left[-q_{xH} \frac{\partial H}{\partial x} - q_{yH} \frac{\partial H}{\partial y} - q_{zH} \right] - \langle S \rangle (H - H_0), \quad (3.3.5)$$

donde $q_{xH} = q_{xH}(x, y, H, t)$, $q_{yH} = q_{yH}(x, y, H, t)$ y $q_{zH} = q_{zH}(x, y, H, t)$ son los flujos Darcinianos en la dirección de las coordenadas espaciales en H . La variable r representa el aporte vertical y las cantidades de agua desplazada sobre la superficie, es decir, el aporte efectivo de la zona no saturada hacia la saturada.

3.3.2 Transporte de los solutos

La mezcla de los solutos durante el desplazamiento miscible se debe a procesos de dispersión hidrodinámica, difusión molecular, variación de la velocidad de la solución en los poros (distribución de velocidades), reacciones químicas o de intercambio y adsorción física. En otras palabras, la mezcla de los solutos es función de las propiedades del fluido y del material en donde se desarrolla el movimiento (Kutílek y Nielsen, 1994; Zataráin, 1996; Lázaro, 1998).

La aplicación del principio de conservación de masa a un volumen elemental de suelo y para un soluto dado permite establecer:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla q_s + f = 0, \quad (3.3.6)$$

donde $C = C(x, y, z, t)$ es la concentración total del soluto [ML^{-3}], t es el tiempo [T], q_s es el flujo total de soluto [$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$] y $f = f(x, y, z, t)$ es el término de fuente o sumidero [$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$].

En 1855 Fick establece la ley de difusión molecular para un gas o soluto en una solución. La ecuación es la siguiente:

$$q_s = -D\nabla C, \quad (3.3.7)$$

donde q_s es el flujo unitario del soluto que se difunde [MT^{-1}], D es el coeficiente de proporcionalidad conocido como coeficiente de difusión molecular [L^2T^{-1}], ∇ es el operador gradiente y C es la concentración del soluto [ML^{-3}].

El transporte convectivo macroscópico se refiere al movimiento pasivo del soluto asociado con el flujo de Darcy

$$q_s = q_w C_t, \quad (3.3.8)$$

donde q_s , es el flujo de soluto [MT^{-1}] y q_w es el flujo darciniano del agua en el suelo calculado con la expresión $q_w = v\theta$.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Tipo de investigación

En el desarrollo de la presente investigación se tuvieron en cuenta los siguientes criterios (Mendez *et al.*, 1986):

1. De acuerdo con la interferencia del investigador en el fenómeno que se analiza: El estudio fue Observacional, ya que el investigador sólo puede describir o medir el fenómeno estudiado; por tanto no puede modificar a voluntad propia ninguno de los factores que intervienen en el proceso.
2. De acuerdo con el período en que se capta la información: El estudio fue Prospectivo, debido a que toda la información se recogió, de acuerdo con el criterio del investigador para los fines específicos de la investigación, después de la planeación de ésta.
3. De acuerdo con la evolución del fenómeno estudiado: El estudio fue Transversal, debido a que se midió solo una vez, las variables; además se midieron las características de los grupos de unidades en un momento dado, sin pretender evaluar la evolución de esas unidades.
4. De acuerdo con la comparación de las poblaciones: El estudio fue Descriptivo, debido a que solo existió una población, la cual se describió en función de un grupo de variables, de las cuales no existieron hipótesis centrales. Se estableció una hipótesis referente a la búsqueda sistemática de asociaciones de variables dentro de la misma población.

En resumen este trabajo de investigación fue Observacional, Prospectivo, Transversal y Descriptivo.

4.2 Localización del área de estudio y distribución espacio-temporal de los muestreos

En la presente investigación se estudiaron las aguas de la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, la cual inicia con las aguas residuales provenientes de la ciudad de México DF y zonas conurbadas. Para comprender la dimensión de las diferentes zonas que abarcan esta red hidrográfica, se realizaron recorridos preliminares de reconocimiento, para de esta manera establecer los sitios o estaciones de muestreo; es decir estos recorridos se llevaron a cabo para conocer la población de aguas.

Con la finalidad de conocer mejor la amplitud de las variaciones de las diferentes mediciones y parámetros de las características físico-químicas de la población de aguas y por la imposibilidad de muestrear toda la población de una vez, se tomó la decisión de realizar dos muestreos: Muestreo de verano 2009 con 112 estaciones de muestreo y muestreo de verano 2010 con 94 estaciones de muestreo. Con el conocimiento de una amplitud numérica de las distintas mediciones y parámetros, es posible identificar la prevalencia de ciertos procesos en las aguas y los suelos regados con éstas.

La red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, comprende los Estados de México, Hidalgo, San Luís Potosí, Tamaulipas y Veracruz. En esta red, los distritos de riego comprendidos son: Distrito de Riego 088 Chiconautla, Estado de México; Distritos de Riego 03 Tula y 100 Alfajayucan, Estado de Hidalgo; Distrito de Riego 92, San Luís Potosí.

En las Figuras 4 y 5, y el Anexo 1, se presenta la localización de las diferentes estaciones de muestreo de las aguas de la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, correspondiente a los muestreos de verano de 2009 y verano de 2010. En las Figuras 6 y 7, se presenta parte de la red en mención, en la cual se localiza el Valle de Mezquital, donde existe una intensa actividad de riego con estas aguas residuales. En el Anexo 2, se presenta las características fisiográficas de la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco.

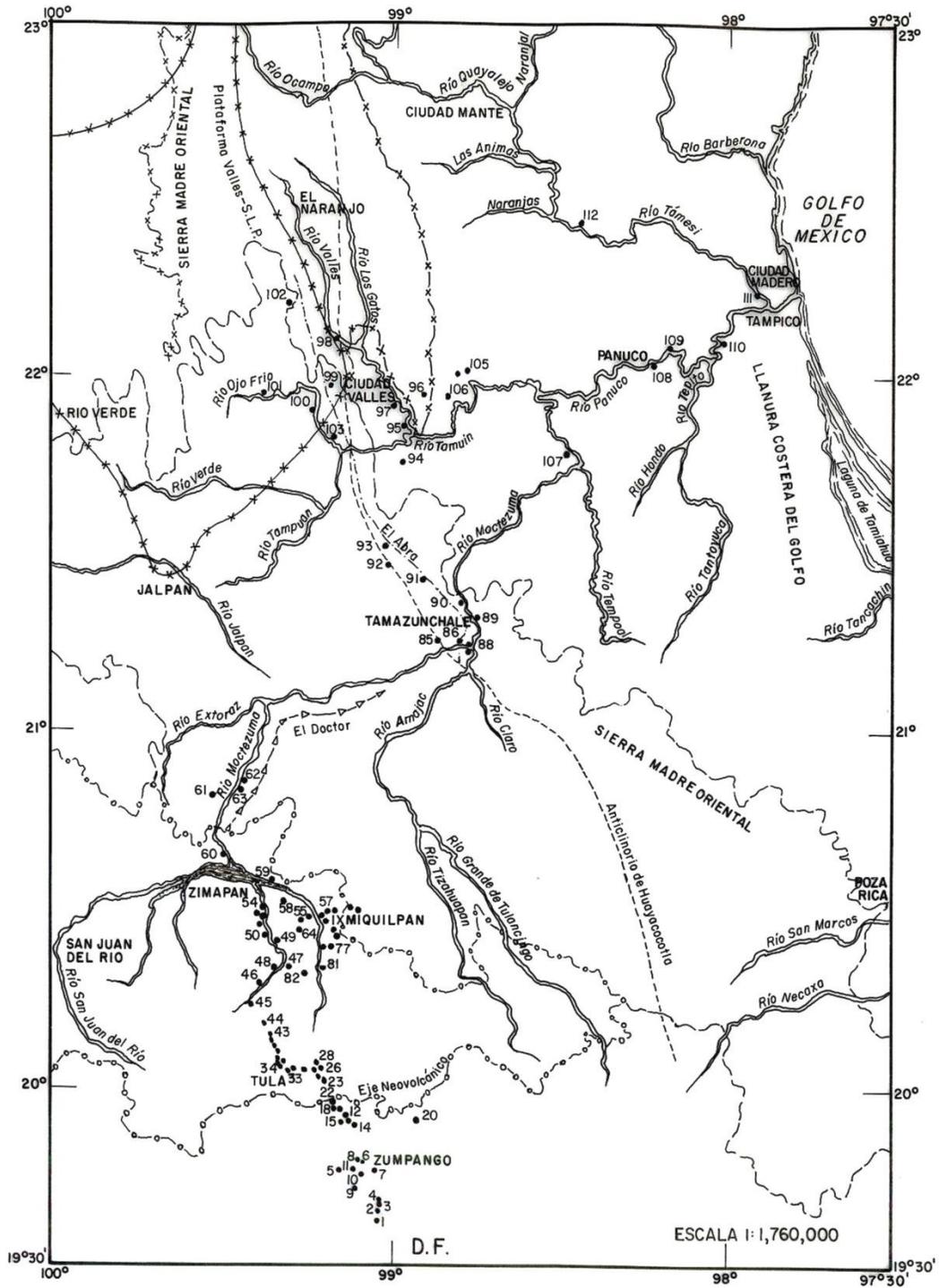


Figura 4. Localización de sitios de muestreo de las aguas, en la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009.

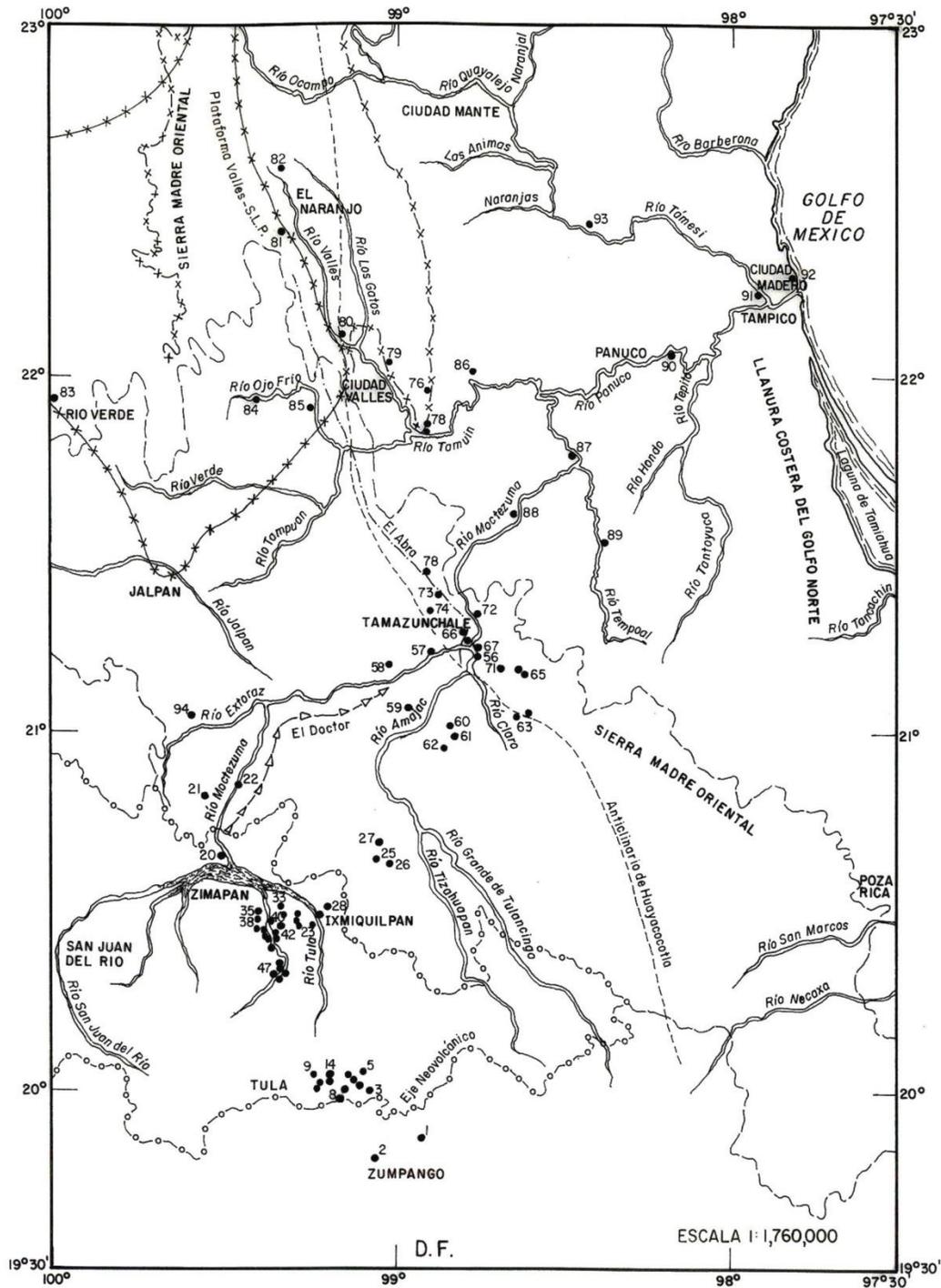


Figura 5. Localización de sitios de muestreos, en la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano de 2010.

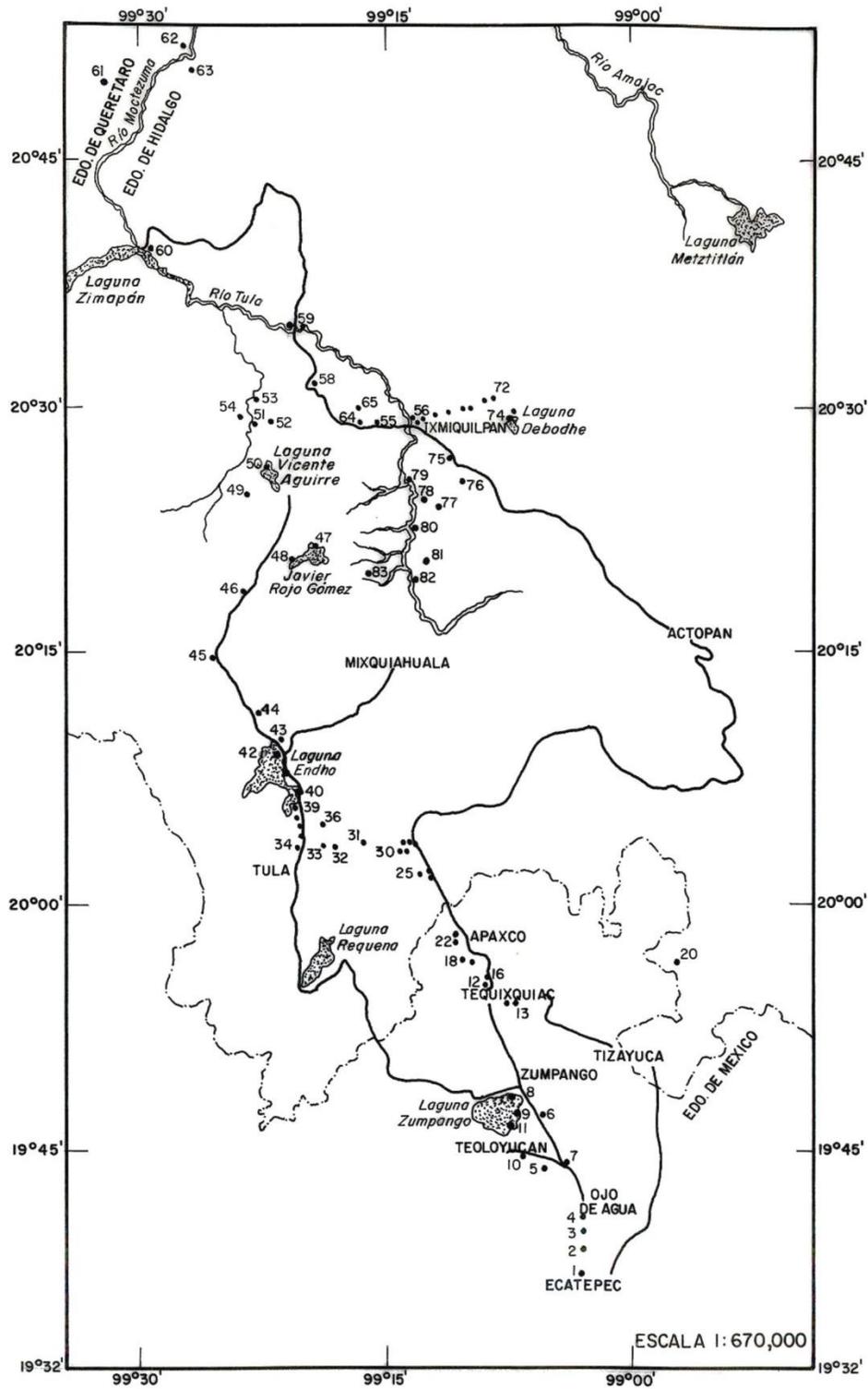


Figura 6. Localización de sitios de muestreos, en la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán (Valle del Mezquital), verano de 2009.

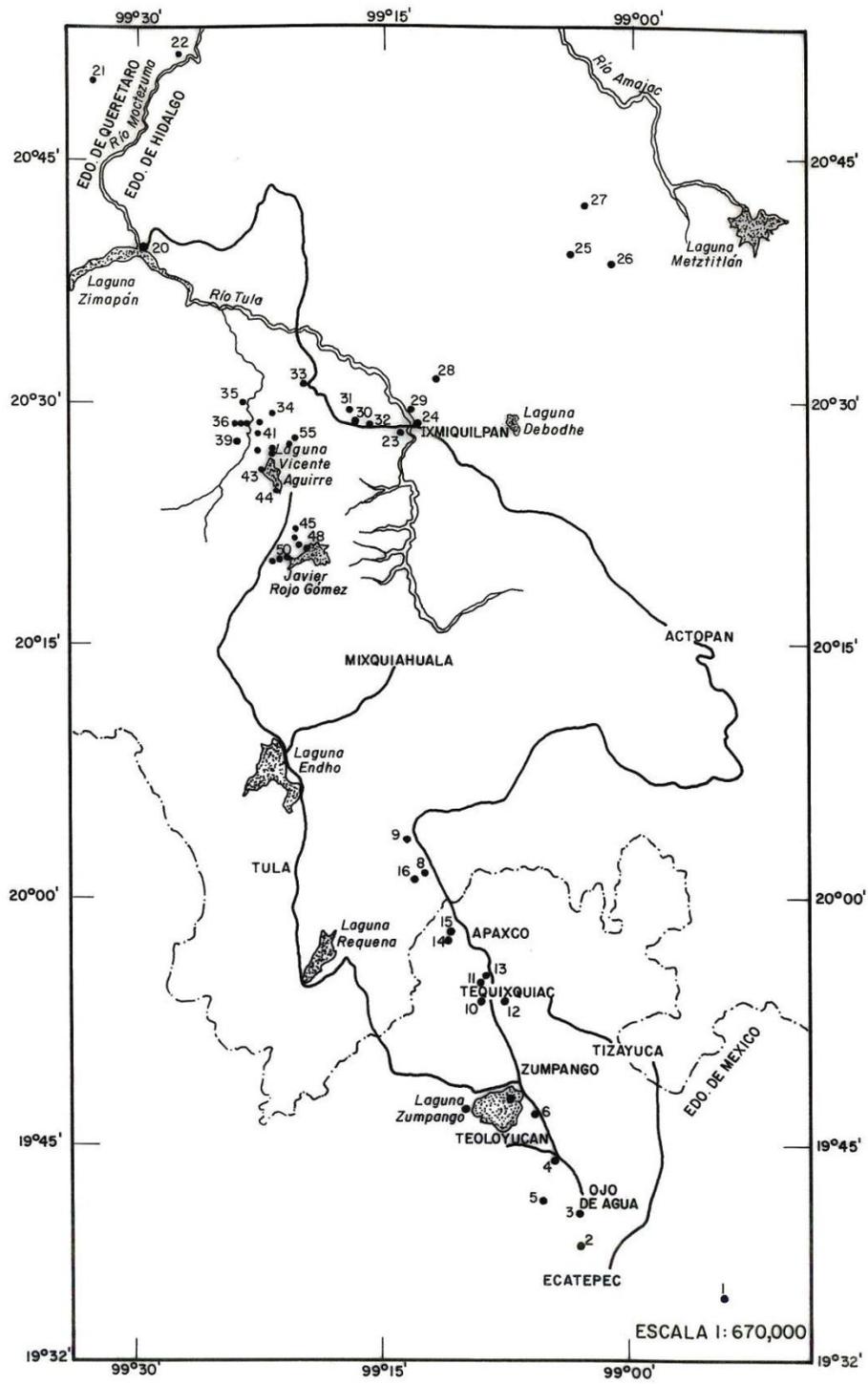


Figura 7. Localización de sitios de muestreos, en la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán (Valle del Mezquital), verano de 2010.

Considerando que en la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, existen Distritos de Riego con zonas que por su topografía presentan niveles freáticos someros, sería ideal muestrear las aguas freáticas alimentadas por las aguas de la red hidrográfica en consideración; pero debido a que no existe una red freática disponible, se optó, por muestrear el Módulo de Riego Temascalcingo, regado con aguas residuales del río Lerma, perteneciente al Distrito de Riego 033, Estado de México, en el cual existe una red de pozos de observación, a la cual se tuvo acceso para realizar dos muestreos; uno en primavera de 2009 y otro en verano de 2010. En la Figura 8, se muestra la red freática del Módulo de Riego Temascalcingo, donde se realizaron los muestreos de los niveles freáticos. En el Anexo 3, se presenta la información correspondiente a los dos muestreos realizados.

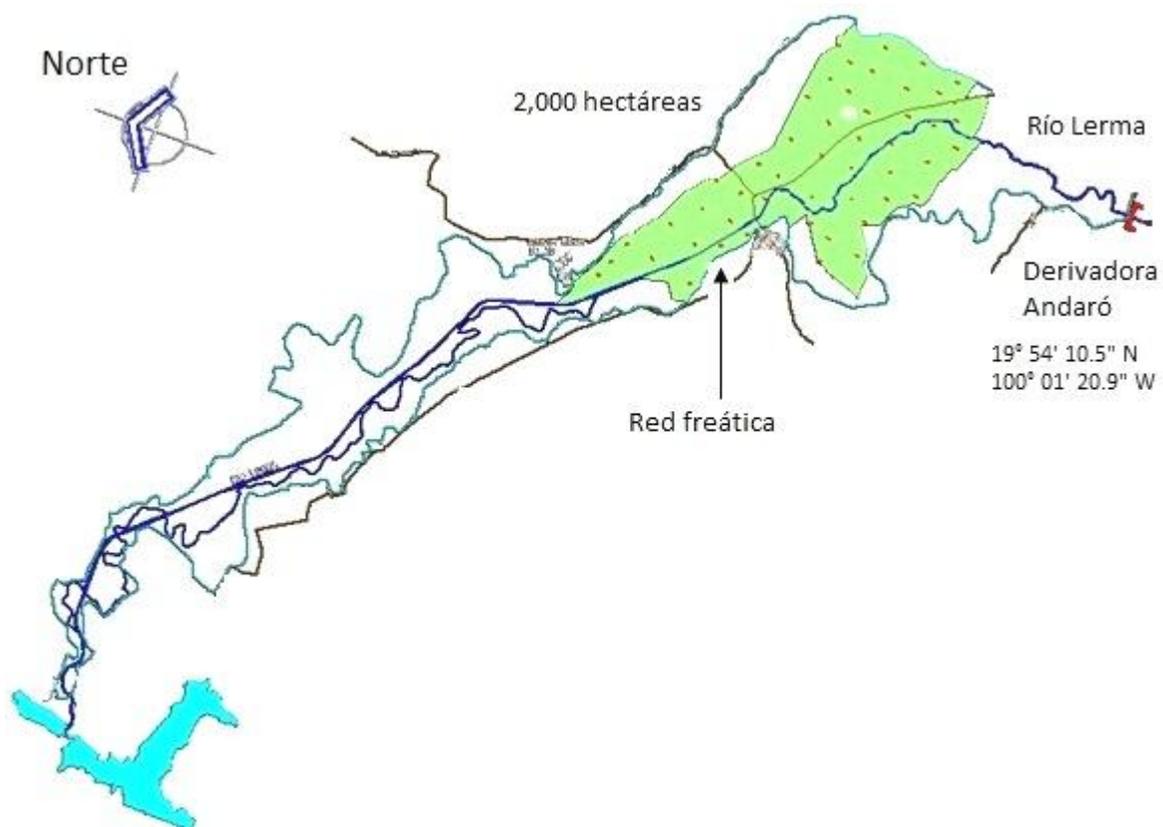


Figura 8. Localización de la red freática, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México. Fuente: CNA-UACH, 2003.

4.3 Métodos analíticos para las determinaciones físico-químicas a las muestras de agua

En el Cuadro 16 se presentan las determinaciones físico-químicas y su respectivo método, que se realizaron a cada muestra de agua.

Cuadro 16. Métodos analíticos empleados para las diferentes mediciones.

Determinación	Método	Referencia
pH	Potenciómetro marca Beckman, modelo Hoffmann Pinther Boswork	APHA, 1995. 4500-H+B
Conductividad eléctrica	Conductímetro puente de Wheastone con celda de vidrio	APHA, 1995. 25108
Residuo seco evaporado	Gravimetría mediante estufa marca Hot-Plate modelo 2200 Thermolyne	APHA, 1995. 2540 D
Sodio y potasio	Flamometría. Flamómetro IL Autocal Flame Photometer 643, $\lambda = 589$ nm, calibrado con soluciones estándar de 140 meqL^{-1} Na y de 5 meqL^{-1} para K	APHA, 1995. 3500-Na y K,D
Calcio y magnesio	Volumétrico. Mediante titulación con EDTA y Eriocromo Negro T, como indicador	APHA, 1995. 3500 Ca D
Carbonatos	Volumétrico. Mediante titulación con ácido sulfúrico y Fenofaleína como indicador	APHA, 1995. 2320 B
Bicarbonatos	Volumétrico. Mediante titulación con ácido sulfúrico y Anaranjado de Metilo como indicador	APHA, 1995. 2320 B
Cloruros	Titulación con Nitrato de Plata y Cromato de Potasio al 5% como indicador	APHA, 1995. 4500-Cl B
Sulfatos	Turbidimetría. Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, $L = 420$ nm	APHA, 1995. 4500-SO ₄ E
Ortofosfato	Espectrofotometría. Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, $L = 690$ nm	Rodier, 1978
Nitratos	Espectrofotometría. Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, $L = 420$ nm	Rodier, 1978
Boro	Espectrofotometría. Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, $L = 690$ nm. Azometina-H	Rodier, 1978
Presión osmótica	Osmómetro Wescor, modelo VAPRO 5520, calibrado con optimol ($100, 290$ y 1000 mmolKg^{-1})	

Con el fin de tener valores límites de referencia, con respecto a los valores de las mediciones realizadas de las diferentes características físico-químicas de las aguas, en el Cuadro 17, se presentan las directrices sobre calidad de agua, de acuerdo a Ayers y Wescot (1987).

Las directrices que sirven para identificar los problemas debido a posibles restricciones derivadas de su uso, tales como; la salinidad, la velocidad de infiltración del agua en el suelo, la toxicidad de los iones específicos o efectos varios. Los lineamientos de estas directrices, se refieren sobre todo a los efectos a mediano y largo plazo de la calidad del agua de riego, sobre la producción de cultivos, las condiciones del suelo y las prácticas culturales agrícolas. Cuando se utilizan aguas con valores menores a “Ninguna Restricción”, por lo general no se presentan problemas en los cultivos o en el suelo. En el caso de “Restricción Moderada”, se requiere mayor cuidado 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 los problemas en los suelos, y en los cultivos, se presentan reducciones en los rendimientos, por lo que se requiere un manejo efectivo y un plan de operación específicamente adaptado a la calidad de las aguas que ha de emplearse. Los lineamientos deben tener un carácter práctico, de tal manera que puedan ser aplicados por productores y técnicos. Estas recomendaciones han sido utilizadas con éxito en la agricultura bajo riego, para evaluar las aguas superficiales, subterráneas, de drenaje, efluentes de desagües y aguas residuales. Las directrices pueden identificar los problemas potenciales y restricciones posibles en el uso de ciertas aguas, pero su adaptabilidad depende de las condiciones de su uso y de la capacidad de manejo de los usuarios. Por otro lado, las directrices permiten analizar los efectos de la calidad del agua, en perspectiva con los otros factores de producción, siendo la meta final el obtener una máxima producción con alta eficiencia del uso del agua disponible (Ayers y Wescot, 1987).

Cuadro 17. Directrices para interpretar la calidad de las aguas para el riego.

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción de uso		
		Ninguna	Ligera a Moderada	Severo
Salinidad (afecta disponibilidad de agua)				
• <i>CE</i> O	<i>dSm⁻¹</i>	< 0.7	0.7 – 3.0	>3.0
• <i>STD</i>	<i>mgL⁻¹</i>	< 450	450 - 2000	> 2000
Infiltración				
<i>RAS</i>	<i>CE =</i>			
0 – 3		> 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				
Sodio				
• Riego por superficie	<i>RAS</i>	< 3.0	3.0 – 9.0	> 9.0
• Riego por aspersión	<i>meqL⁻¹</i>	< 3.0	>3.0	
Cloro				
• Riego por superficie	<i>meqL⁻¹</i>	< 4.0	4.0 – 10.0	> 10.0
• Riego por aspersión	<i>meqL⁻¹</i>	< 3.0	> 3.0	
Boro				
	<i>mgL⁻¹</i>	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
Nitrógeno (<i>NO₃ – N</i>)				
	<i>mgL⁻¹</i>	< 5.0	5.0 – 30.0	> 30.0
Bicarbonato (<i>HCO₃⁻</i>)				
• Aspersión foliar únicamente	<i>meqL⁻¹</i>	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5
<i>pH</i>		Amplitud normal: 6.5 – 8.4		

Fuente: Ayers y Wescot, 1987

Los resultados de las determinaciones físico-químicas, se organizaron en cuadros de acuerdo con la metodología de presentación de resultados analíticos de Ortega, (2011). Para cada muestra se dedican tres filas; en la primera se colocan los valores de cationes y aniones en $mmol_cL^{-1}$, con sus sumatorias y el respectivo error de determinación; en la segunda fila se colocan los valores de los iones en mgL^{-1} y su sumatoria; y en la tercera fila se escriben los valores de los iones en $mmolL^{-1}$ y su sumatoria.

4.4 Determinación de parámetros para evaluar la calidad de las aguas

En todas las muestras de aguas se calcularon los siguientes parámetros:

Parámetro	Procedimiento
1. Distribución de cationes y aniones	: Análisis gráfico (Oda, 2009).
2. Distribución de STD	: Análisis gráfico.
3. Distribución de conductividad eléctrica	: Análisis gráfico.
4. Conductividad eléctrica teórica	: Utilizando el Cuadro 18.
5. Presión osmótica teórica	: Por análisis de regresión y por la ecuación (3.2.1.8).
6. Índice de salinidad efectiva	: Ecuaciones (3.2.1.10) a (3.2.1.13).
7. Índice de salinidad potencial	: Ecuación (3.2.1.14).
8. Fuerza iónica de las soluciones	: Ecuación (3.2.1.15).
9. Coeficiente de actividad de los iones	: Ecuación (3.2.1.19).
10. Sales hipotéticas	: De acuerdo a la solubilidad de las sales.
11. RAS_{or}	: Ecuación (3.2.2.8).
12. RAS_{aj}	: Ecuación (3.2.2.11).
13. RAS°	: Ecuación (3.2.2.31).
14. Relación funcional $RAS - PSI$: Ecuación (3.2.2.7) para cada formulación de RAS y utilizando 8 coeficientes de selectividad de Gapon: 0.0072444, 0.01, 0.0115220, 0.0118610, 0.0140113, 0.0147500, 0.015840 y 0.0168999 (Velázquez, 2001; Velázquez <i>et al.</i> , 2002).
15. Clasificación de las aguas según la conductividad eléctrica y las diferentes formulaciones del RAS	: Figura 1.
16. Clasificación de las aguas según el peligro de disminución de infiltración, para las diferentes formulaciones del RAS	: Figura 3.
17. Carbonato de sodio residual (CSR)	: Ecuación (3.2.2.34).
18. Tipos de agua según su composición iónica	: Utilizando el Cuadro 19.
19. Distribución de Boro, fosfatos y nitratos	: Análisis gráfico (Oda, 2009).

En el módulo de Riego de Temascalcingo, Estado de México, por tener dominio definido con área de 2,000 hectáreas (CNA-UACH, 2003), se realizaron los planos de isobatas, isohipsas y mapas de las principales determinaciones físico-químicas y de los parámetros calculados para evaluación de calidad de las aguas; para cada una de las fechas de muestreo. Para la interpolación se utilizó el método Kriging simple, a través del Software

Surfer; el cual es un método de predicción espacial imparcial que se fundamenta, en la minimización del error cuadrático medio de predicción (Henley, 1981; Samper y Carrera, 1990; Olea, 1999; Webster and Oliver, 2004; Cressie *et al.*, 2004; Sidler and Holliger, 2004; Papritz *et al.*, 2004; Giraldo, 2005; Delgado *et al.*, 2010).

Cuadro 18. Factores de conductividad eléctrica de los iones que se encuentran en las aguas.

Ion	Conductividad eléctrica a 25 °C en ($\mu S m^{-1}$)	
	$\times mmol_c L^{-1}$	$\times mg L^{-1}$
Ca^{2+}	52.0	2.60
Mg^{2+}	46.6	3.82
Na^+	48.9	2.13
K^+	72.0	1.84
CO_3^{2-}	84.6	2.82
HCO_3^-	43.6	0.715
Cl^-	75.9	2.14
SO_4^{2-}	73.9	1.54

Fuente: APHA, 1995.

Cuadro 19. Tipos de agua de acuerdo a su composición iónica.

Tipo de agua	Relación iónica		Características
	$\frac{Cl^-}{SO_4^{2-}}$	$\frac{HCO_3^-}{Cl^- + SO_4^{2-}}$	
Clorhídrica	> 2.0		Predominancia del Cl^- , pequeñas cantidades de HCO_3^- y CO_3^{2-}
Sulfático-clorhídrica	1.0 – 2.0		Predominancia del Cl^- , pequeñas cantidades de HCO_3^- , el CO_3^{2-} prácticamente no existe
Clorhídrico-sulfática	0.2 – 1.0		Predominancia del SO_4^{2-}
Sulfática	< 0.2		Presencia de Na^+ y poca cantidad de HCO_3^-
Sulfático-sódica		2.0	El SO_4^{2-} condiciona la aparición de CO_3^{2-} y HCO_3^- , con la consecuente formación de soda

Fuente: Mercado, 1999.

4.5 Análisis estadístico (asociación de variables)

Para establecer relaciones funcionales entre las determinaciones físico-químicas y parámetros en las muestras de aguas, se calibró un modelo lineal ajustado por el origen, mediante la técnica de regresión lineal (Guisande *et al.*, 2006).

El modelo utilizado, en forma general tiene la siguiente estructura:

$$Y = B_1 X \quad , \quad (4.1)$$

donde, B_1 , es la pendiente de la recta, es decir, el número de unidades que aumenta o disminuye la variable dependiente (Y), por cada unidad que aumenta o disminuye la variable independiente (X).

Las regresiones realizadas fueron:

Y	X
$CE_{experimental} (\mu S cm^{-1})$	$CE_{teórica} (\mu S cm^{-1})$
$mgL^{-1}_{analíticos}$	$CE_{experimental} (\mu S cm^{-1})$
$\sum Cationes (mmol_c L^{-1})$	$CE_{experimental} (\mu S cm^{-1})$
$PO_{experimental} (atm)$	$CE_{experimental} (\mu S cm^{-1})$
$PO_{experimental} (atm)$	$PO_{teórica} (atm)$
$mmol - ion L^{-1}$	$CE_{experimental} (\mu S cm^{-1})$
$RAS_{aj} (mmol_c L^{-1})^{\frac{1}{2}}$	$RAS_{or} (mmol_c L^{-1})^{\frac{1}{2}}$
$RAS^{\circ} (mmol_c L^{-1})^{\frac{1}{2}}$	$RAS_{or} (mmol_c L^{-1})^{\frac{1}{2}}$
$I (ML^{-1})$	$CE_{experimental} (\mu S cm^{-1})$

4.6 Comprobación de resultados de las determinaciones físico-químicas de las muestras de agua

4.6.1 Balance de cationes y aniones

Después de determinar la composición química de las aguas, si estos se expresan en equivalentes químicos, la suma de cationes y aniones deben ser aproximadamente iguales. Las soluciones acuosas, como principio fundamental, son electro-neutrales, es decir, se tiene una igualdad de cargas positivas y negativas ($\sum n^+ = \sum n^-$). El porcentaje de la diferencia absoluta entre la suma de cationes y aniones se calcula con la siguiente ecuación (APHA, 1995).

$$D_e = \left[\frac{(\sum \text{cationes}(\text{mmol}_c L^{-1}) - \sum \text{aniones}(\text{mmol}_c L^{-1}))}{(\sum \text{cationes}(\text{mmol}_c L^{-1}) + \sum \text{aniones}(\text{mmol}_c L^{-1}))} \right] \times 100 \quad , \quad (4.2)$$

donde, D_e , es la diferencia del error en porcentaje. Los criterios para aceptar este porcentaje se presentan en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Criterios para aceptar el porcentaje de error en el balance de cationes y aniones.

\sum aniones o cationes ($\text{mmol}_c L^{-1}$)	D_e aceptable
0.0 – 3.0	± 0.2
3.0 – 10.0	± 2.0
10.0 – 800.0	$\pm 2.0 - 5.0$

Fuente: APHA, 1995.

4.6.2 Conductividad eléctrica medida y conductividad eléctrica teórica

De acuerdo con APHA (1995), el rango de variación de la conductividad eléctrica experimental en $mScm^{-1}$ y la conductividad eléctrica teórica en $mScm^{-1}$ deben estar entre los siguientes valores:

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

4.6.3 Conductividad eléctrica experimental y suma de iones

La suma de cationes y aniones expresadas en $mmol_cL^{-1}$, debe estar cerca de una centésima del valor de la conductividad eléctrica mediada expresada en μScm^{-1} . En ecuación (4.3), se presenta el rango típico en los diferentes tipos de salinidad (APHA, 1995).

$$\sum C/A = \frac{\langle 0.9 - 1.1 \rangle \times CE}{100}, \quad (4.3)$$

donde, $\sum C/A$, es la suma de cationes o aniones, expresada en $mmol_cL^{-1}$, y CE , es la conductividad eléctrica, expresada en μScm^{-1} .

4.6.4 Sólidos totales disueltos medidos y sólidos totales calculados

Para considerar que los análisis de las aguas son correctos y confiables, el rango de variación entre el valor de sólidos totales disueltos (STD) medidos, expresados en mgL^{-1} y los sólidos totales disueltos calculados, expresados en mgL^{-1} , deben estar entre los siguientes valores (APHA, 1995):

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

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis de los resultados de las aguas de la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco (Anexo 4); se abordó por separado, el sector de la red México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, cuyas aguas son usadas para riego en el Valle de Mezquital; por otra parte el sector Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, al cual se le llamo zona de calizas San Luís Potosí-Veracruz (SLP-VER), luego se hace una síntesis de toda la red y finalmente se analiza las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México (Anexo 5).

5.1 Aguas que circulan por el sector México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán (Valle del Mezquital), verano de 2009 y verano 2010

5.1.1 Composición iónica de las aguas residuales

Las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital que se derivan de la zona metropolitana de México DF, presentan composiciones químicas variables, es decir sus relaciones iónicas presentan variaciones considerables, por lo cual desarrollan procesos específicos de quimismo cuando son utilizadas para el riego de diferentes suelos. Estas aguas desarrollan distintos tipos de salinidad en los suelos (Cuadro 19). En la Figura 9, se presenta los diferentes tipos de aguas de acuerdo con su relación iónica, se puede observar que el 99.3 % de las muestras, es decir 137, tienen composición clorhídrica, y solo el 0.7 %, que corresponde a una muestra, tiene composición sulfático-clorhídrica.

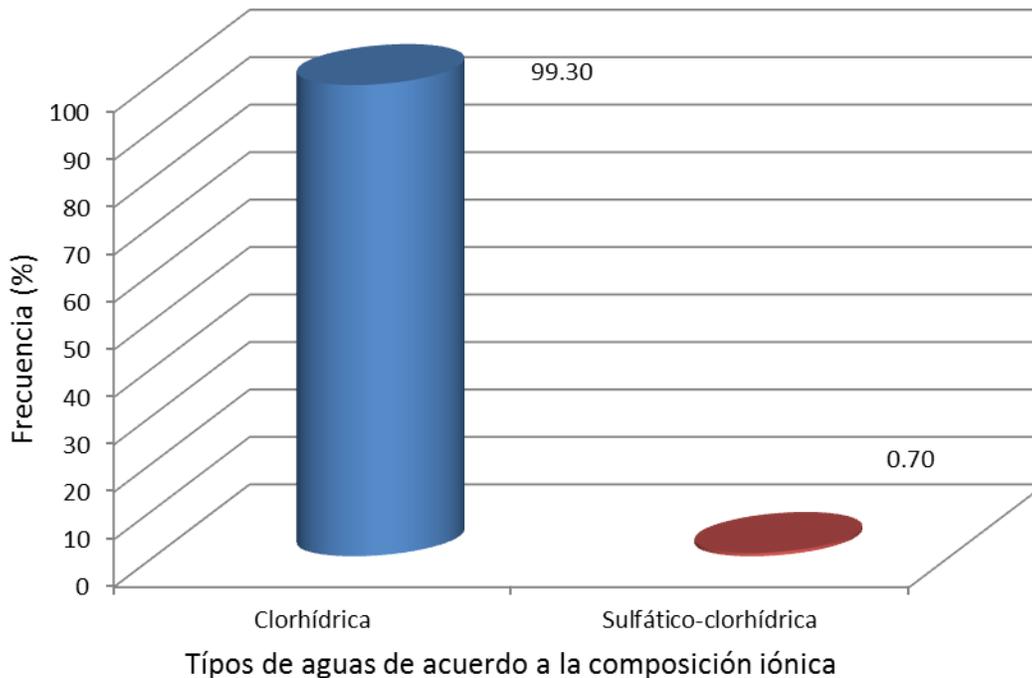


Figura 9. Tipos de aguas de acuerdo a su composición iónica, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

En la Figura 10, se presentan las relaciones iónicas $\frac{Ca^{2+}}{Mg^{2+}}, \frac{Na^+}{Ca^{2+}}, \frac{Na^+}{Mg^{2+}}$; se puede observar que el 88.4 % de las muestras, es decir 122, la relación $\frac{Ca^{2+}}{Mg^{2+}}$, es menor de 1, lo cual indica que existen considerables cantidades de magnesio con respecto al calcio, y por otro lado, con respecto a las relaciones $\frac{Na^+}{Ca^{2+}}$ y $\frac{Na^+}{Mg^{2+}}$, el 99.3 %, lo que equivale a 137 muestras, presentaron valores mayores de 1, lo cual indica el predominio de sodio, con respecto a calcio y magnesio; lo cual se refleja en altos valores de la relación de adsorción de sodio, con sus respectivos efectos en el suelo, cuando estas aguas son utilizadas para riego; como es el caso del Valle de Mezquital, donde se riegan con estas aguas aproximadamente 180,000 hectáreas de cultivos como: alfalfa, maíz, trigo, cebada, avena, frijol y algunas hortalizas (SEMARNAT Y CONAGUA, 2006).

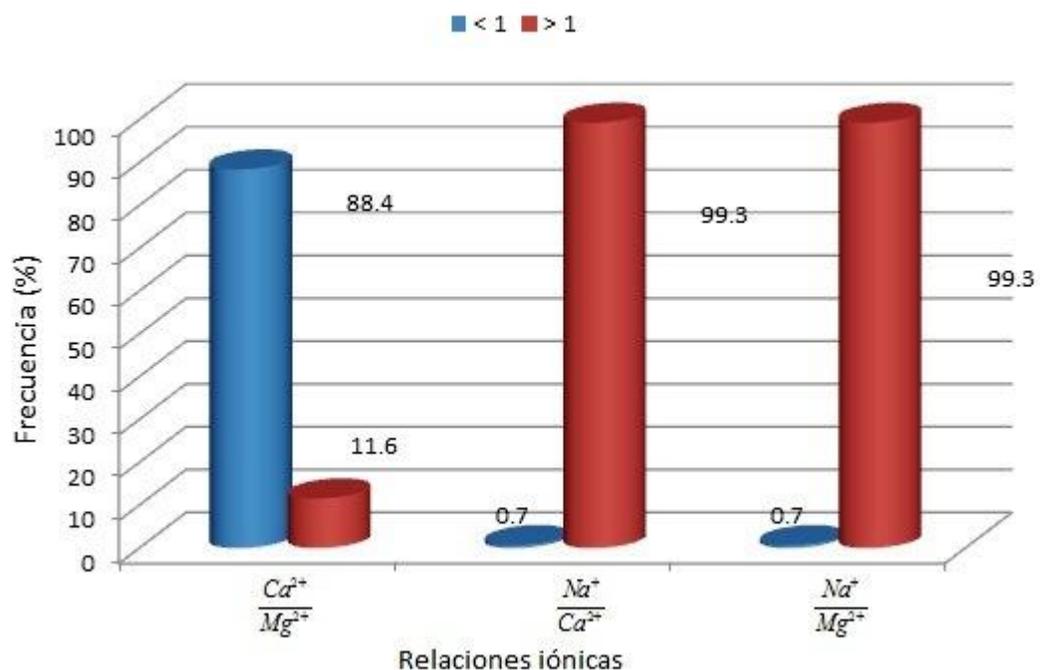


Figura 10. Relaciones iónicas entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

5.1.2 Distribución de cationes y aniones

En las Figuras 11 y 12, se presentan las distribuciones de los cationes y aniones, correspondientes a los muestreos de verano de 2009 y verano de 2010. Se observa en las dos figuras que a través de la red México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, en lo referente a los cationes, el sodio (Na^+) ocupa la mayor superficie, y para los aniones es el bicarbonato (HCO_3^-), es decir estas aguas predominan las sales bicarbonatadas de sodio (Na^+), magnesio (Mg^{2+}) y calcio (Ca^{2+}).

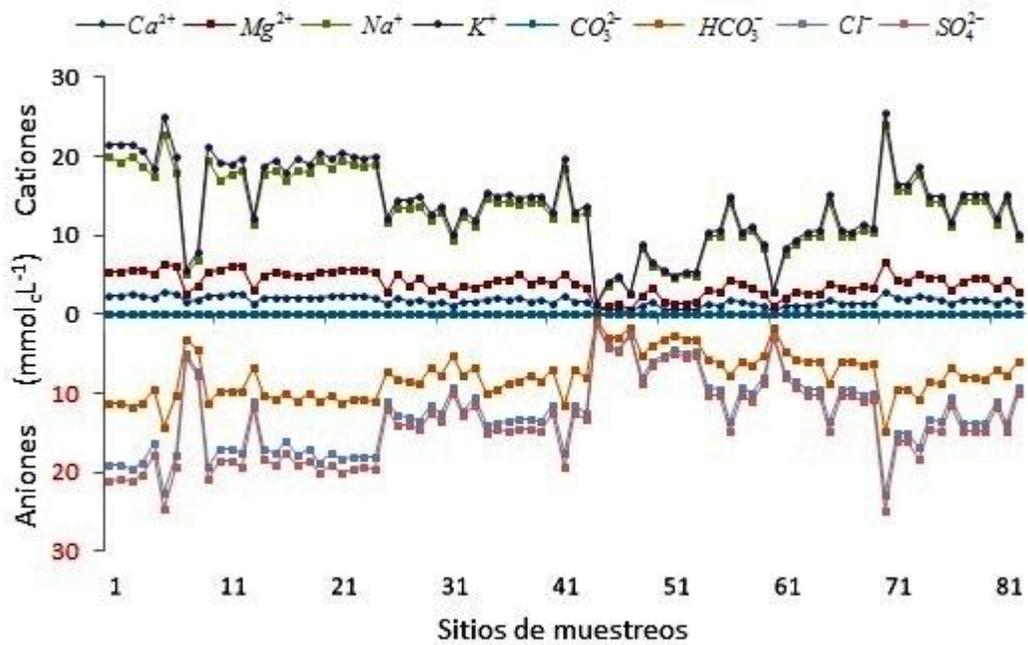


Figura 11. Composición iónica de las aguas residuales, Valle del Mezquital, verano 2009.

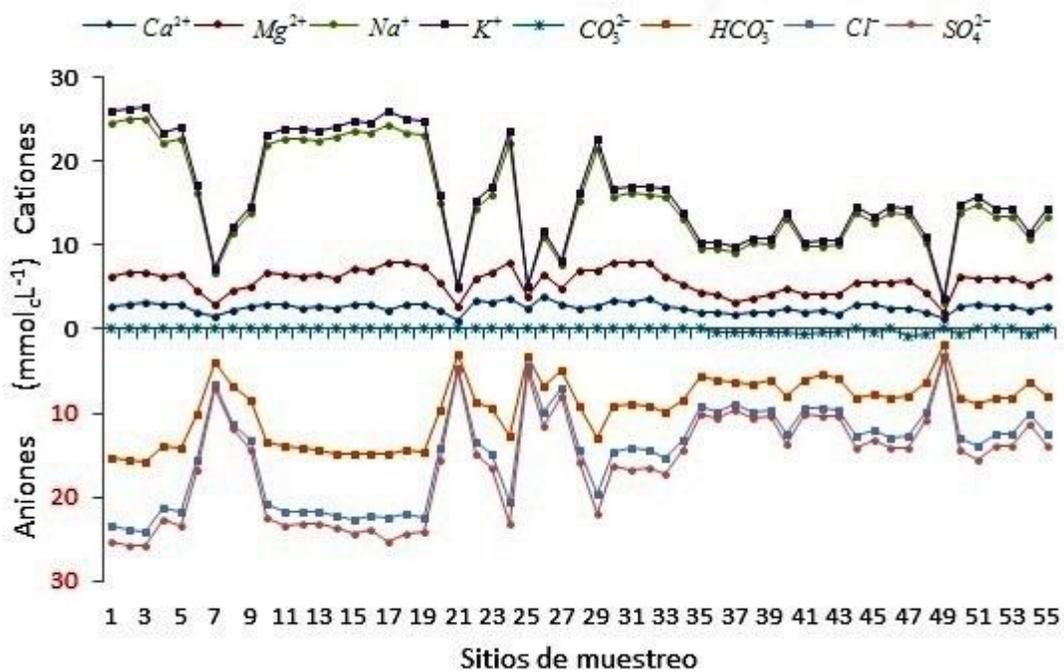


Figura 12. Composición iónica de las aguas residuales, Valle del Mezquital, verano 2010.

5.1.3 Distribución por clases de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y suma de cationes ($mmol_c L^{-1}$)

En la Figura 13, se presenta la distribución de frecuencias de las aguas residuales que riegan el valle del Mezquital, con respecto a la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$). En el diagrama de Richards (1973), se encontró que de acuerdo con los rangos establecidos para la calidad del agua; el 0.72 % (1 muestra) fue C_1 ($< 250 \mu S cm^{-1}$), el 10.15 % (14 muestras) fue C_2 ($250 - 750 \mu S cm^{-1}$), el 75.37 % (104 muestras) fue C_3 ($750 - 2,250 \mu S cm^{-1}$) y el 13.76 % (19 muestras) fue C_4 ($> 2,250 \mu S cm^{-1}$). Los rangos de mayor predominio fueron de $1,000 - 1,250 \mu S cm^{-1}$ con un 20.29 % (28 muestras) y de $1,500 - 1,750 \mu S cm^{-1}$ con un 19.57 % (27 muestras) respectivamente. Estos valores se deben a los altos contenidos de sodio (Na^+) y bicarbonatos (HCO_3^-) en estas aguas.

La distribución de la suma de cationes en $mmol_c L^{-1}$, se presenta en la Figura 14. Se encontró que el 5.07 % (7 muestras) presentó una concentración $< 5 mmol_c L^{-1}$, el 10.87 % (15 muestras) de $5 - 10 mmol_c L^{-1}$, el 63.77 % (88 muestras) de $10 - 20 mmol_c L^{-1}$ y el 20.29 % (28 muestras) de $20 - 30 mmol_c L^{-1}$. Los mayores rangos fueron de $10 - 15 mmol_c L^{-1}$, con un 37.68 % (52 muestras) y de $15 - 20 mmol_c L^{-1}$, con un 26.09 % (36 muestras) respectivamente.

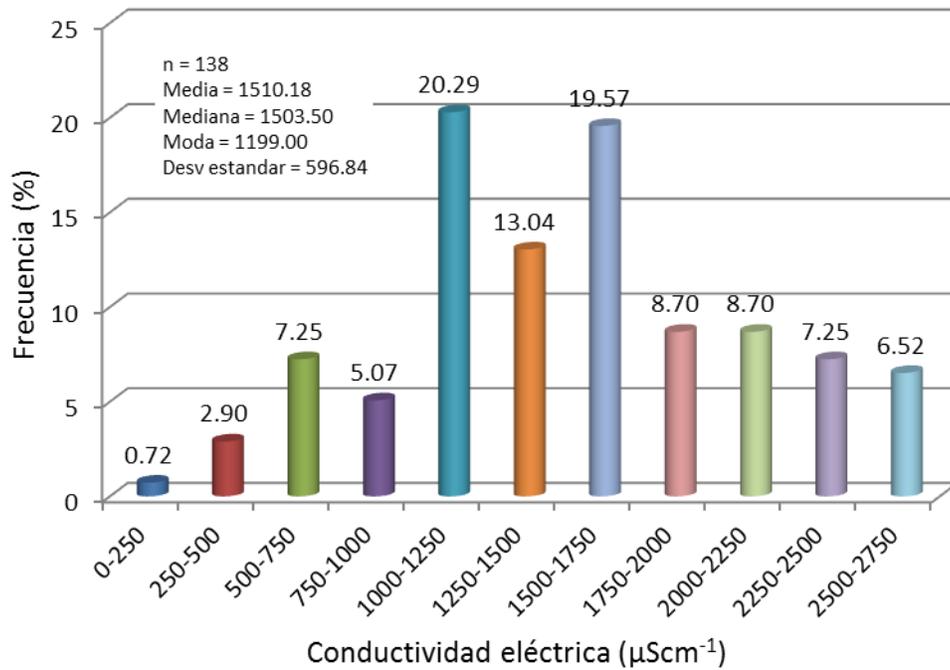


Figura 13. Distribución de frecuencia de la conductividad eléctrica (μScm^{-1}), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

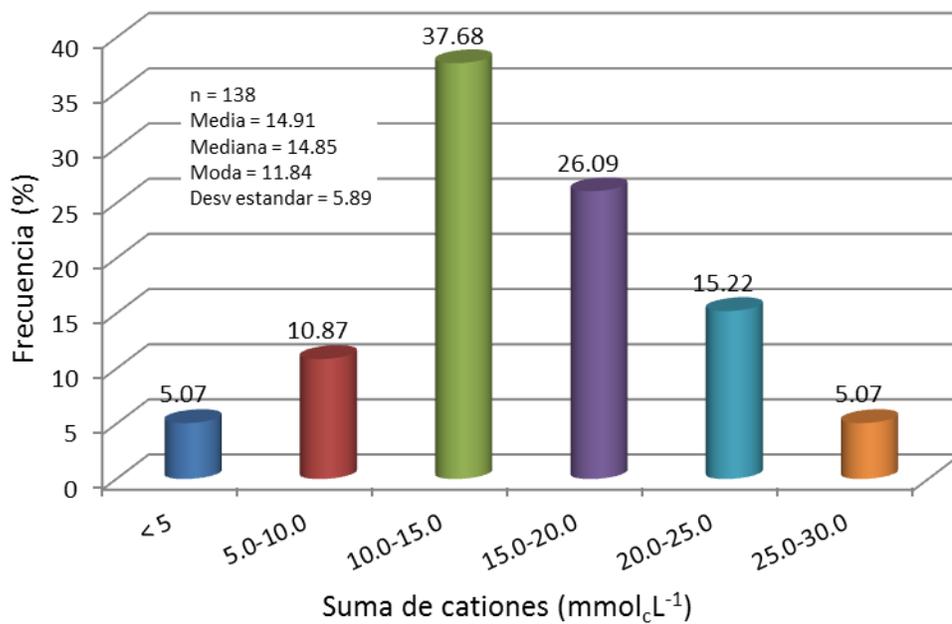


Figura 14. Distribución de frecuencia de la suma de cationes ($\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

5.1.4 Relación entre la conductividad eléctrica teórica ($\mu S cm^{-1}$) y la conductividad eléctrica experimental ($\mu S cm^{-1}$)

Con el propósito de establecer en qué grado, las medidas experimentales de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), corresponden con los valores teóricos de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), se estableció la relación funcional, $CE_{teo} = fa(CE_{exp})$, calculando los valores teóricos de la conductividad eléctrica para cada ión, de acuerdo con el Cuadro 18. La certeza de tener valores precisos de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), es muy importante, pues a partir de ésta se pueden estimar los valores de sólidos totales disueltos (mgL^{-1}) y presión osmótica (atm). Lo anterior indica que la ley de disociación electrolítica, explica que la conductividad eléctrica de las soluciones son proporcionales a sus concentraciones iónicas.

En la Figura 15 se presenta la relación funcional, $CE_{teo} = fa(CE_{exp})$ y de acuerdo a los valores de la pendiente y coeficiente de correlación encontrados, se concluye que las mediciones experimentales de la conductividad eléctrica están correctas.

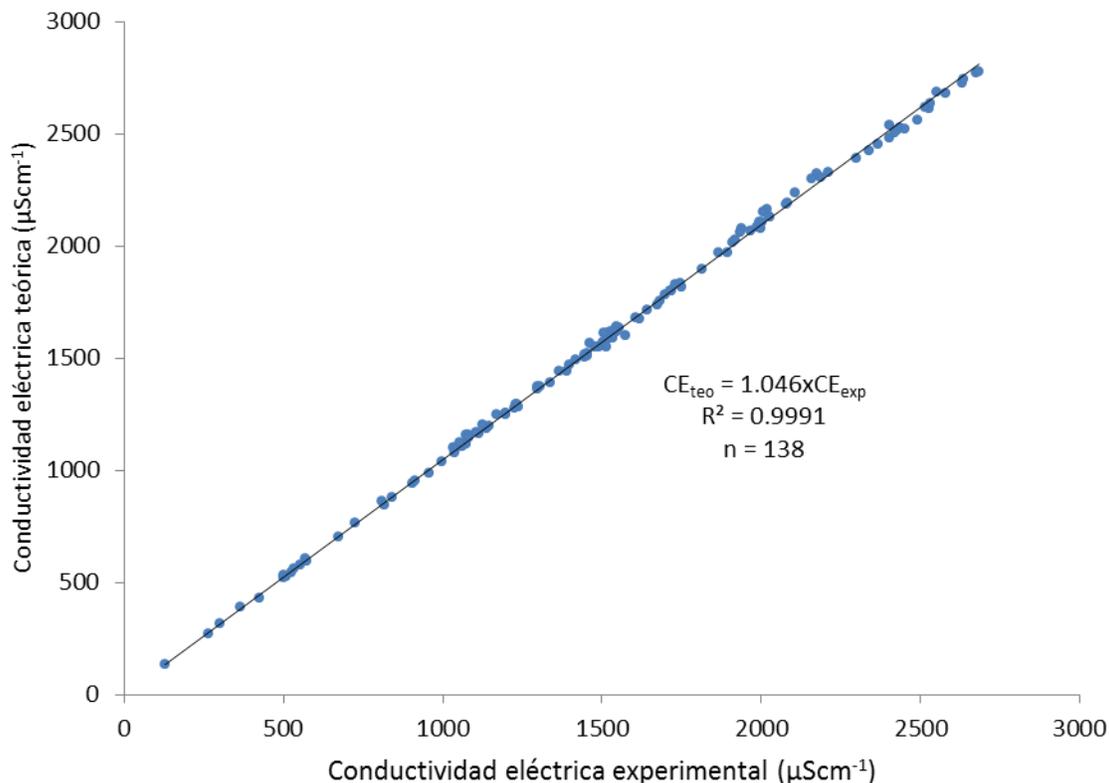


Figura 15. Relación funcional entre conductividad eléctrica teórica (μScm^{-1}) y conductividad eléctrica experimental (μScm^{-1}), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

5.1.5 Relación entre mgL^{-1} analíticos y conductividad eléctrica (μScm^{-1})

Se ha establecido que la conductividad eléctrica, es proporcional a la masa de las sales disociadas y la relación funcional, $\text{mgL}^{-1} = fa(CE_{\text{exp}})$ en proporcionalidad depende del tipo de salinidad. Para diferentes tipos de sales puras y tipos de salinidad los valores de la pendiente de esta relación funcional varían de 0.580 – 1.250, cuando la conductividad eléctrica es expresada en μScm^{-1} .

En la Figura 16, se presenta la relación funcional, entre la concentración de las sales solubles expresada en mgL^{-1} y sus correspondientes valores de conductividad eléctrica en

$\mu S cm^{-1}$. El valor de la pendiente encontrado de 0.7069, corresponde a soluciones ricas en bicarbonato (HCO_3).

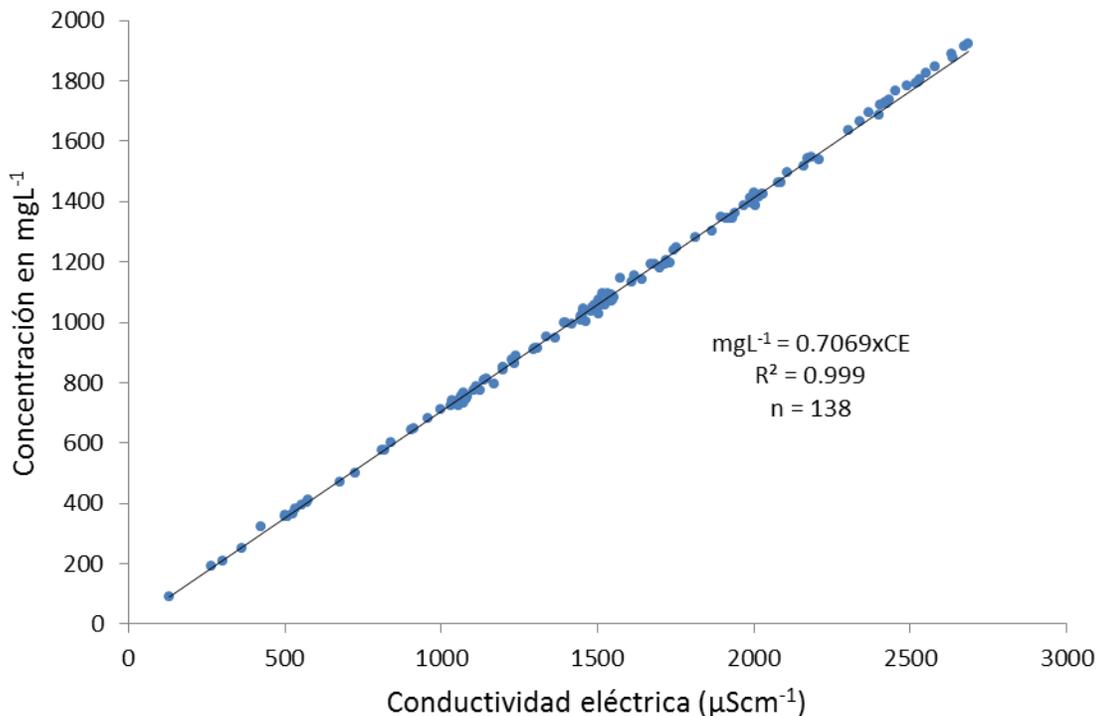


Figura 16. Relación entre concentración ($mg L^{-1}$) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

5.1.6 Relación entre suma de cationes ($mmol_c L^{-1}$) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$)

El conocimiento de los valores de la relación funcional, $mmol_c L^{-1} = fa(CE_{exp})$, es importante, ya que en las determinaciones analíticas, la suma de cationes y aniones deben ser aproximadamente igual, teniendo en cuenta los porcentajes de error permisible (APHA, 1995). En la Figura 17, se presenta la relación funcional entre suma de cationes y conductividad eléctrica; el valor de la pendiente encontrado fue de 0.0099.

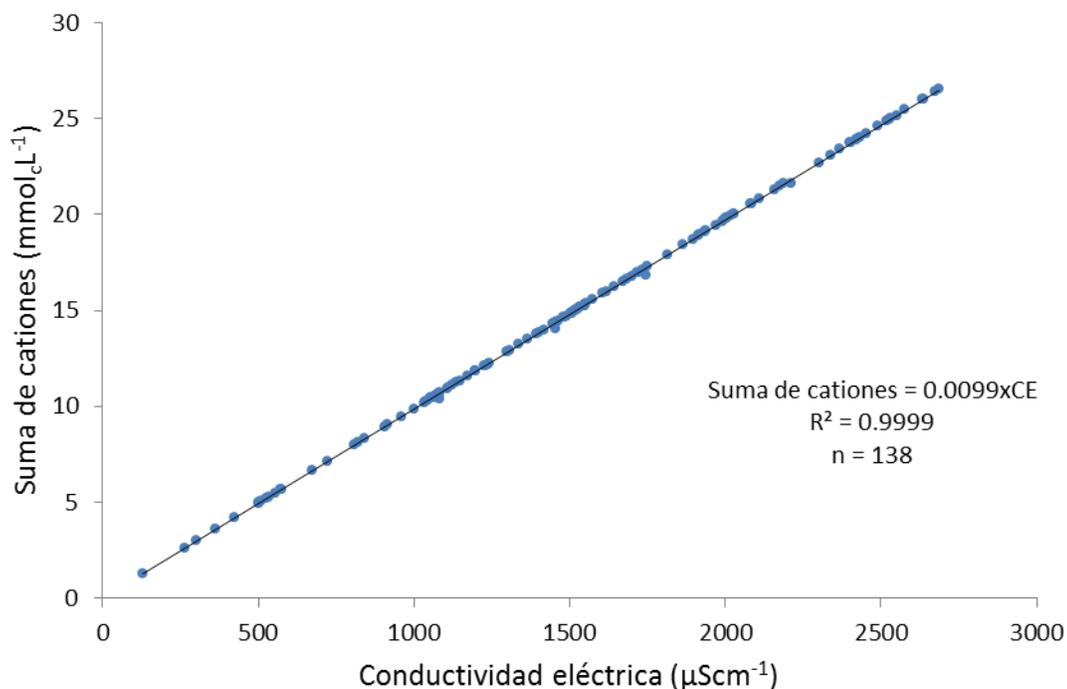


Figura 17. Relación entre suma de cationes ($mmol_cL^{-1}$) y conductividad eléctrica (μScm^{-1}), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

5.1.7 Relación entre presión osmótica (atm) y conductividad eléctrica (μScm^{-1})

La presión osmótica, es la presión que se debe aplicar a una solución para detener el flujo neto de solvente a través de una membrana semipermeable, lo cual indica que el fenómeno de la osmosis induce como consecuencia la presión osmótica, la cual dependen del número de partículas en disolución, sin importar su naturaleza. Luego, el potencial osmótico, es un componente del potencial hídrico del agua en el suelo y representa el efecto determinado por la presencia de solutos disueltos, los cuales disminuyen la energía libre del agua y puede ser cero o asumir valores negativos. A medida que aumenta la concentración de soluto (es decir, el número de partículas de soluto por unidad de volumen de la disolución), el potencial osmótico se hace de menor magnitud. Sin la presencia de otros factores que alteren el potencial hídrico, las moléculas de agua de las disoluciones se moverán desde lugares con poca concentración de solutos a lugares con mayor concentración de solutos. El potencial osmótico; es de dimensiones considerables en suelos salinos, en la cual, las

plantas reducen su capacidad para absorber agua, pues la fuerza a la cual esta retenida el agua en el suelo es mayor a medida que aumentan las sales en la solución; es de anotar entonces que a medida que aumenta la presión osmótica del extracto de saturación del suelo, se hace menor el potencial osmótico y por ende el potencial hídrico, y consigo aumenta la dificultad de toma de agua por las plantas (Mercado, 1999; Mendoza, 2009).

La presión osmótica (π), de una solución es la presión que se requiere para detener la ósmosis y se puede determinar con la ecuación (3.2.1.8). Esta presión osmótica también se puede obtener al correlacionar las relaciones funcionales $mgL^{-1} = fa(CE)$ obtenida y $PO(atm) = fa(CE)$ reportada en muchas investigaciones (Velázquez, 2001; Mendoza, 2009), de la siguiente manera:

$$mgL^{-1} = 0.7069 \times CE(\mu S cm^{-1})$$

$$PO(Atm) = 0.0004 \times CE(\mu S cm^{-1})$$

$$\text{Siendo, } PO(atm) = \frac{0.0004}{0.7069} \times mgL^{-1},$$

donde, PO , es la presión osmótica en atmósfera, 0.0004 es la pendiente de la recta en la relación funcional $PO(atm) = fa(CE)$, 0.7069 es la pendiente de la recta en la relación funcional $mgL^{-1} = fa(CE)$ en la población de aguas residuales y mgL^{-1} , expresa la concentración de la solución.

En la Figura 18 se presenta la relación funcional, $PO_{teórica}(atm) = fa(PO_{experimental})$, donde el valor de la pendiente es 0.9289.

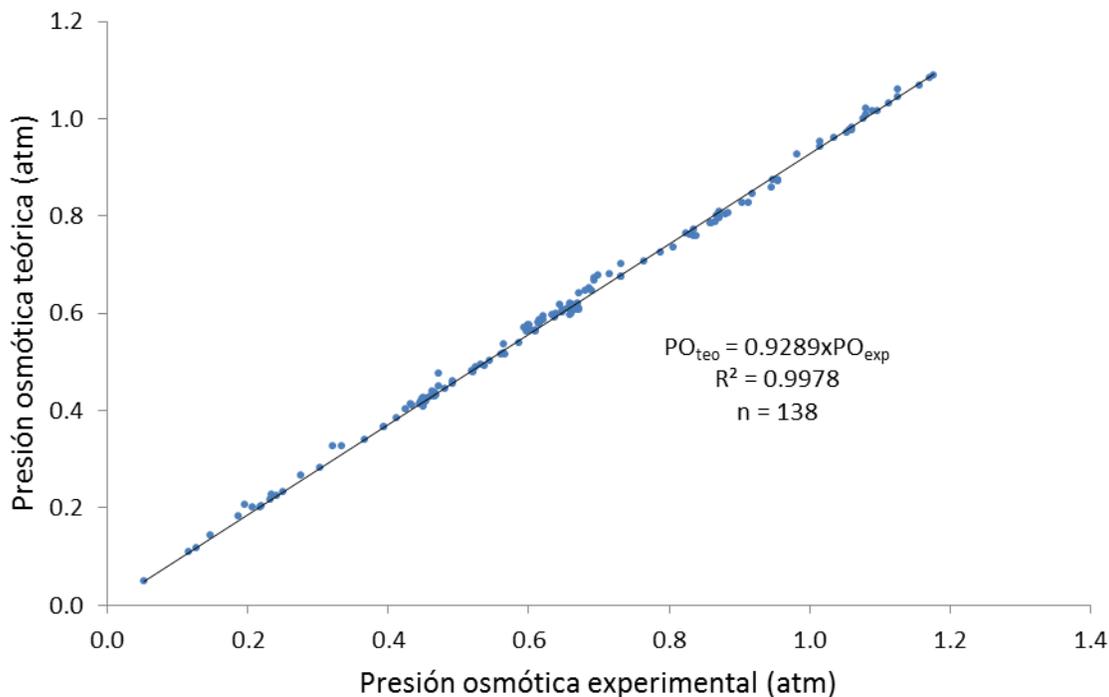


Figura 18. Relación entre presión osmótica teórica (*atm*) y presión osmótica experimental (*atm*), Valle del Mezquital, verano de 2009 y verano 2010.

5.1.8 Relación entre $mmol - iónL^{-1}$ y conductividad eléctrica (μScm^{-1})

Es conveniente expresar la concentración de las soluciones en unidades de molaridad, ya que el aumento de la presión osmótica, la elevación del punto de ebullición, la disminución del punto de congelamiento, son directamente proporcionales a la concentración de la solución, es decir al número de partículas disueltos. En la Figura 19, se presenta la relación funcional, $mmol - iónL^{-1} = fa(CE)$, en la cual la pendiente fue 0.0176; este valor o coeficiente es muy útil para conocer las presiones osmóticas que se desarrollan en las soluciones de las aguas residuales objetos de esta investigación (Velázquez, 2001; Mendoza, 2009).

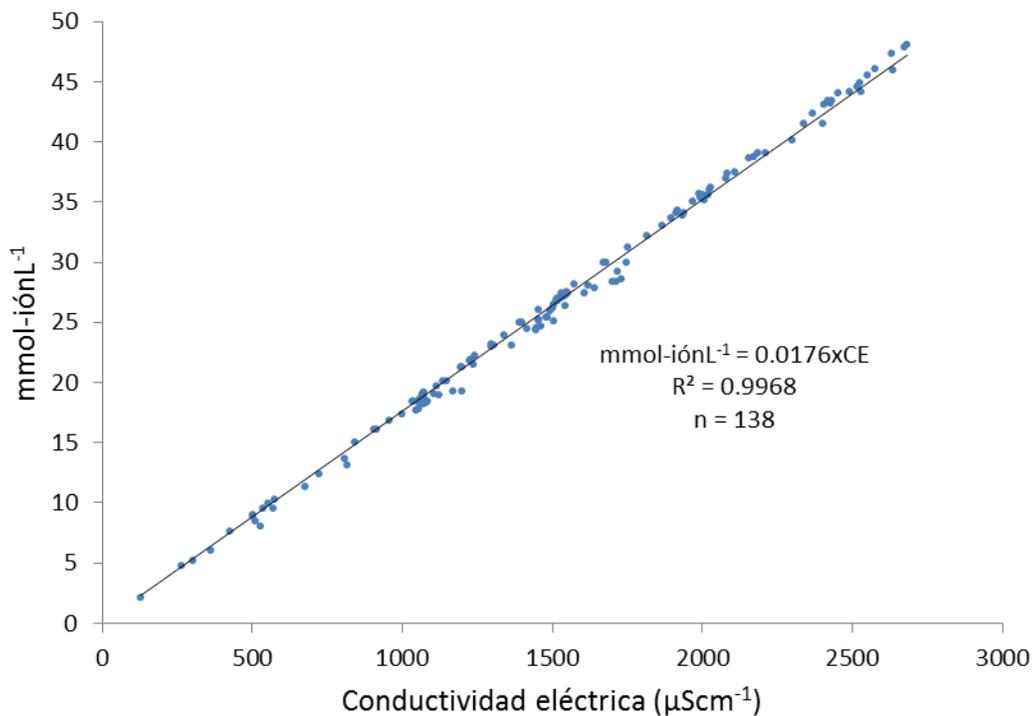


Figura 19. Relación entre $mmol-ionL^{-1}$ y conductividad eléctrica (μScm^{-1}), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

5.1.9 Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) y conductividad eléctrica (μScm^{-1})

La correlación de fuerza iónica I , con la conductividad eléctrica (μScm^{-1}), es muy importante, ya que permite estimar la fuerza iónica y de esta manera conocer los coeficientes de actividad de los diferentes iones en las soluciones. En la Figura 20, se presenta la relación funcional, $I(ML^{-1}) = fa(CE)$; la fuerza iónica se calculó con la ecuación (3.2.1.15). El valor de la pendiente fue 0.00001; este valor coincide con los valores reportados por Griffin y Jurinak (1973), y Mihelcic *et al.* (2008).

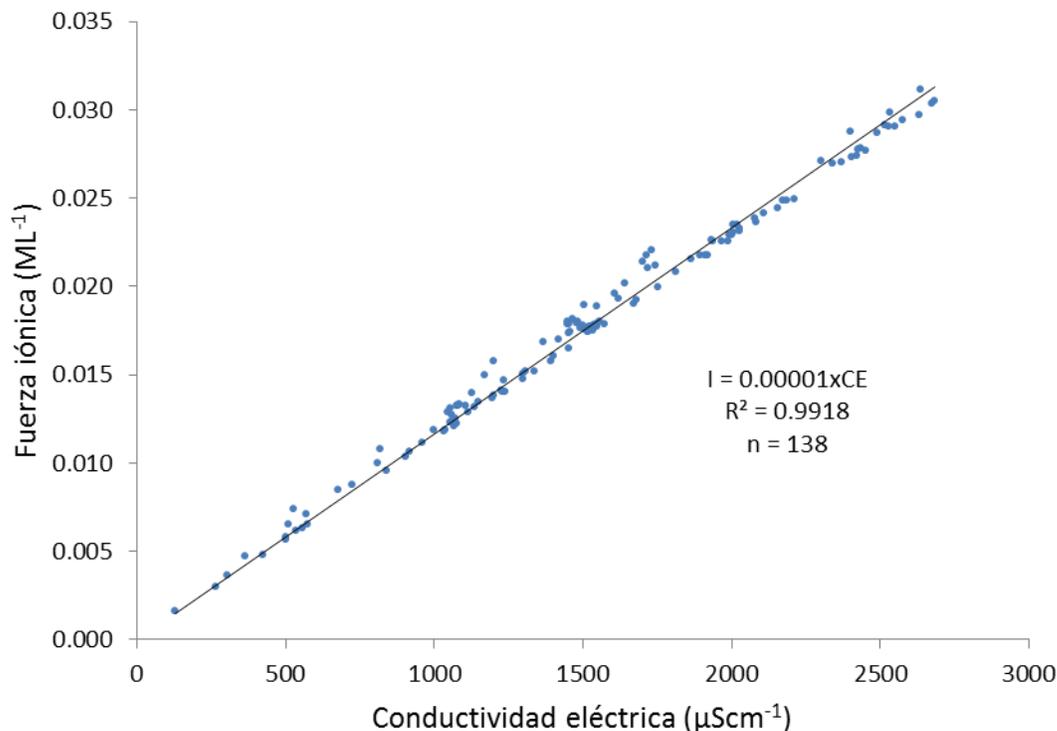


Figura 20. Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) y conductividad eléctrica (μScm^{-1}), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

5.1.10 Sales hipotéticas

Las sales hipotéticas se calcularon teniendo en cuenta la Solubilidad de las sales, los Klarcos (riqueza de elementos en las rocas), el principio de Langelier y la Geoquímica de los iones. En los Cuadros 21 y 22, se presenta el cálculo de las sales hipotéticas, correspondiente a la muestra 13 del muestreo de verano 2009, localizada en Tequixquiac, Estado de Hidalgo.

Cuadro 21. Composición iónica, muestra 13, Valle del Mezquital, verano de 2009.

<i>pH</i>	<i>CE</i>	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	$\Sigma_{cationes}$	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	$\Sigma_{aniones}$	$\Delta\Sigma$
	μScm^{-1}	$mmol_c L^{-1}$										
7.30	2006	2.70	3.52	12.13	1.46	19.81	0.00	9.74	7.90	1.66	19.30	0.51

Cuadro 22. Cálculo de sales hipotéticas, muestra 13, Valle del Mezquital, verano 2009.

Reactivos ($mmol_c L^{-1}$)			Sales hipotéticas ($mmol_c L^{-1}$)	Residuos ($mmol_c L^{-1}$)	
Na^+	+	Cl^-	$NaCl$	Na^+	Cl^-
12.13		7.90	7.90	4.23	0.00
Na^+	+	HCO_3^-	$NaHCO_3$	HCO_3^-	Na^+
4.23	+	9.74	4.23	5.51	0.00
K^+	+	HCO_3^-	$KHCO_3$	HCO_3^-	K^+
1.46		5.51	1.46	4.05	0.00
Ca^{2+}	+	HCO_3^-	$Ca(HCO_3)_2$	HCO_3^-	Ca^{2+}
2.70		4.05	2.70	1.35	0.00
Mg^{2+}	+	HCO_3^-	$Mg(HCO_3)_2$	Mg^{2+}	HCO_3^-
3.52		1.35	1.35	2.17	0.00
Mg^{2+}	+	SO_4^{2-}	$MgSO_4$	Mg^{2+}	SO_4^{2-}
2.17		1.66	1.66	0.51	0.00
			19.30		

Los valores de las sales hipotéticas, del Cuadro 22, equivalen a $0.0079 ML^{-1}$ de $NaCl$, $0.00423 ML^{-1}$ de $NaHCO_3$, $0.00146 ML^{-1}$ de $KHCO_3$, $0.00135 ML^{-1}$ de $Ca(HCO_3)_2$, $0.000675 ML^{-1}$ de $Mg(HCO_3)_2$ y $0.00083 ML^{-1}$ de $MgSO_4$. Con estos valores, utilizando la ecuación (3.2.1.22), el valor de la fuerza iónica de las sales hipotéticas fue de $0.0230 ML^{-1}$. Con este procedimiento se calcularon las sales hipotéticas y su respectiva fuerza iónica de cada una de las muestras de verano de 2009 y verano de 2010. La distribución de los tipos de sales hipotéticas de las aguas residuales que riegan el valle del Mezquital, correspondiente a los muestreos de verano 2009 y verano 2010, se presentan en las Figuras 21 y 22. Se puede observar que el orden de predominancia es: $NaCl > NaHCO_3 > Ca(HCO_3)_2 > Mg(HCO_3)_2 > MgSO_4 > KHCO_3$.

Las relaciones conjuntas de la fuerza iónica de las muestras de agua, calculada para los iones individuales de las soluciones y la fuerza iónica calculada para las sales hipotéticas en los muestreos de verano 2009 y verano 2010, se presentan en las Figuras 23 y 24; los valores de las pendientes (1.0226 y 1.0217) y de los coeficientes de correlación (0.9999 y 1.0000) en las dos gráficas, indican que los dos métodos de cálculo de la fuerza iónica son correctos.

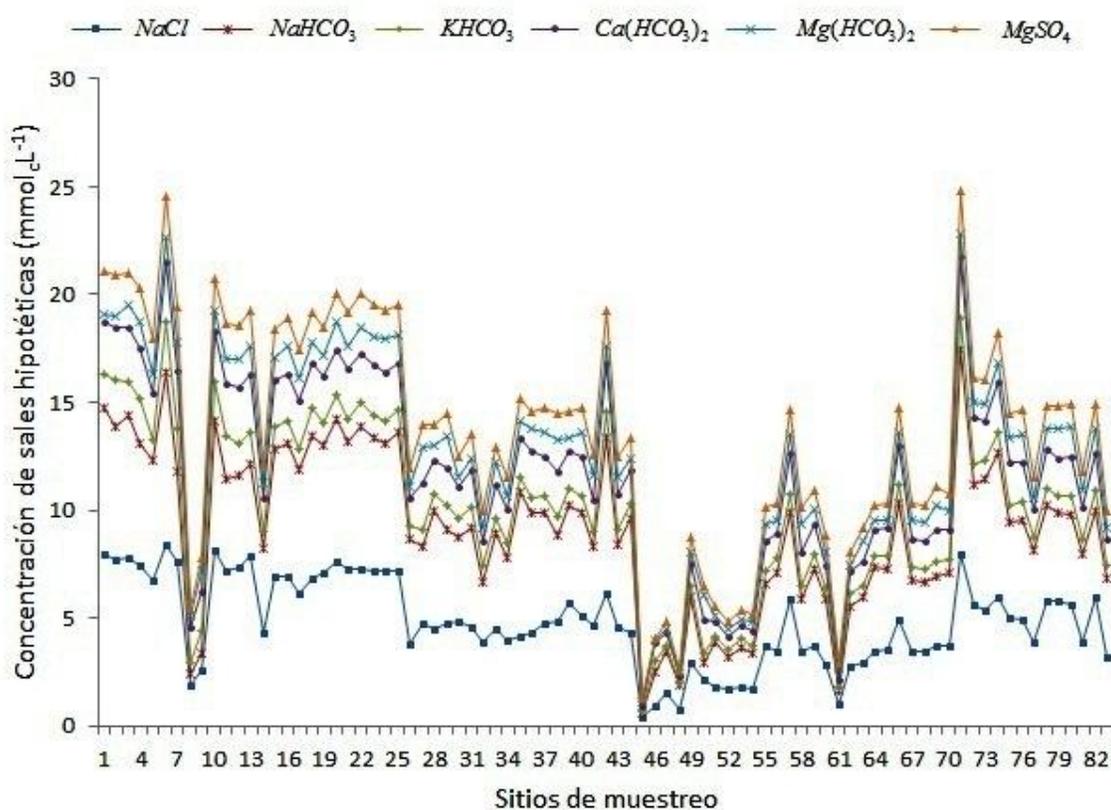


Figura 21. Distribución de sales hipotéticas, Valle del Mezquital, verano 2009.

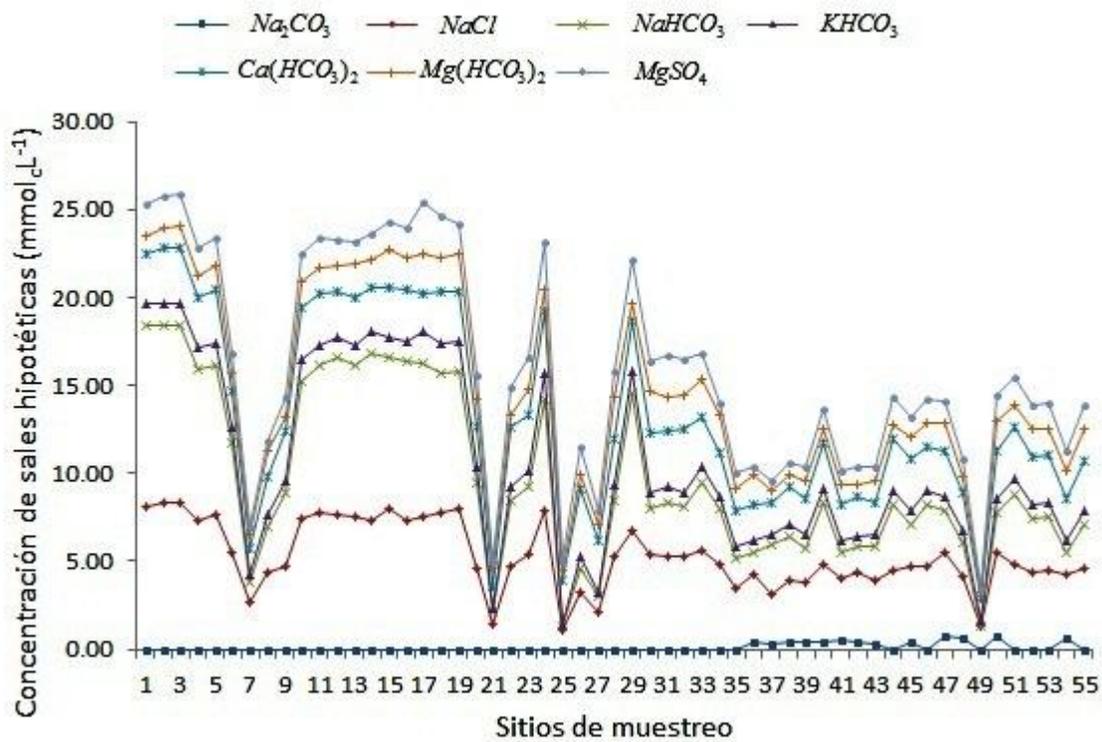


Figura 22. Distribución de las sales hipotéticas, Valle del Mezquital, verano 2010.

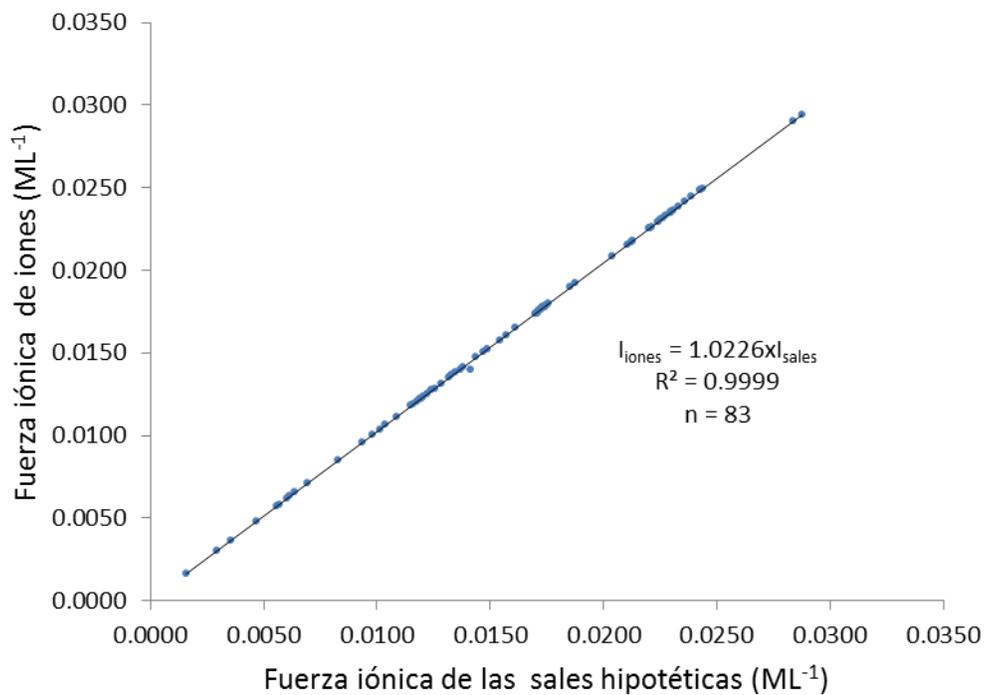


Figura 23. Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) de los iones individuales con fuerza iónica (ML^{-1}) de las sales hipotéticas, Valle del Mezquital, verano 2009.

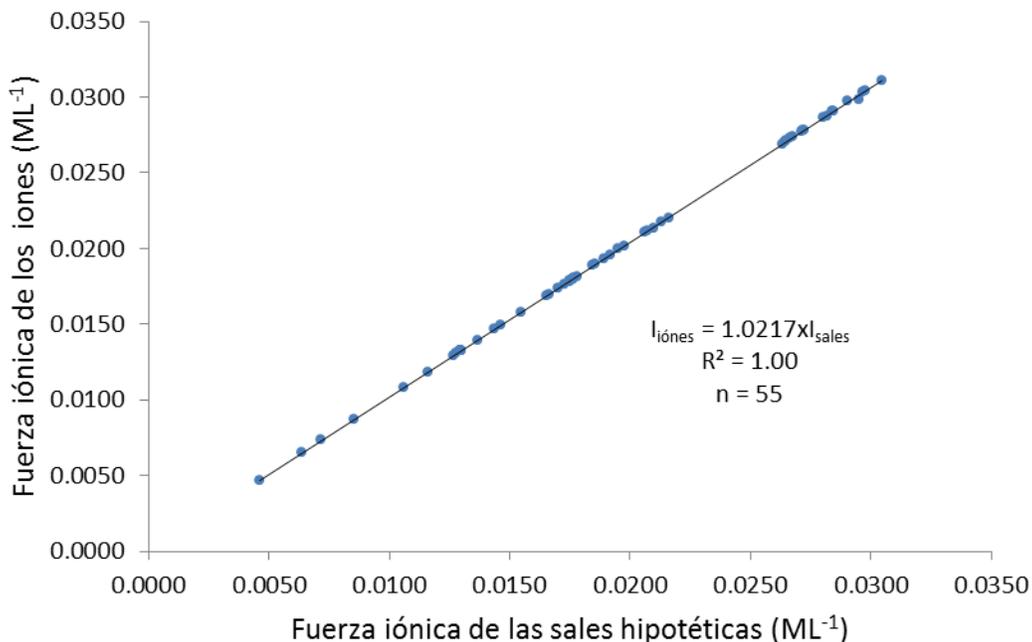


Figura 24. Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) de los iones individuales con fuerza iónica (ML^{-1}) de las sales hipotéticas, Valle del Mezquital, verano 2010.

5.1.11 Clasificación de las aguas residuales de acuerdo con la relación de adsorción de sodio (RAS)

Altas concentraciones de sodio, con respecto a las concentraciones de los iones calcio y magnesio en las soluciones de los suelos, causan un deterioro de las propiedades físicas de los suelos y efectos de toxicidad en los cultivos. El efecto en las propiedades físicas se debe a los altos niveles de sodio intercambiable ($PSI \geq 15\%$) que se encuentran en los suelos. El PSI , hace referencia a la cantidad de cargas negativas del suelo que están neutralizadas con iones de sodio y se puede hacer una predicción a partir del valor de la relación de adsorción de sodio (RAS) de las aguas de riego (Velázquez, 2001; Levy *et al.*, 2003).

Existe la tendencia que, la relación de adsorción de sodio (RAS), presente diferentes valores numéricos, debido al proceso de precipitación o solubilización de ciertas fracciones de calcita ($CaCO_3$); este proceso está determinado por las constantes de equilibrio de los iones calcio, carbonato y bicarbonato (Langelier, 1936).

En las Figuras 25 y 26, se presentan las relaciones funcionales, $RAS_{aj} = fa(RAS_{or})$ y $RAS^{\circ} = fa(RAS_{or})$. Con los valores numéricos de los diferentes conceptualizaciones del RAS , se estiman diferentes valores de sodio intercambiable PSI (ecuación 3.2.2.7). El conocimiento de valores extremos de $PSI_{mínimo}$ y $PSI_{máximo}$, es muy útil para el manejo de fuentes de calcio, para el mejoramiento de suelos sódicos.

En el Cuadro 23 y la Figura 27, se presenta la distribución de las aguas residuales, de acuerdo con los valores numéricos de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y la relación de adsorción de sodio (RAS).

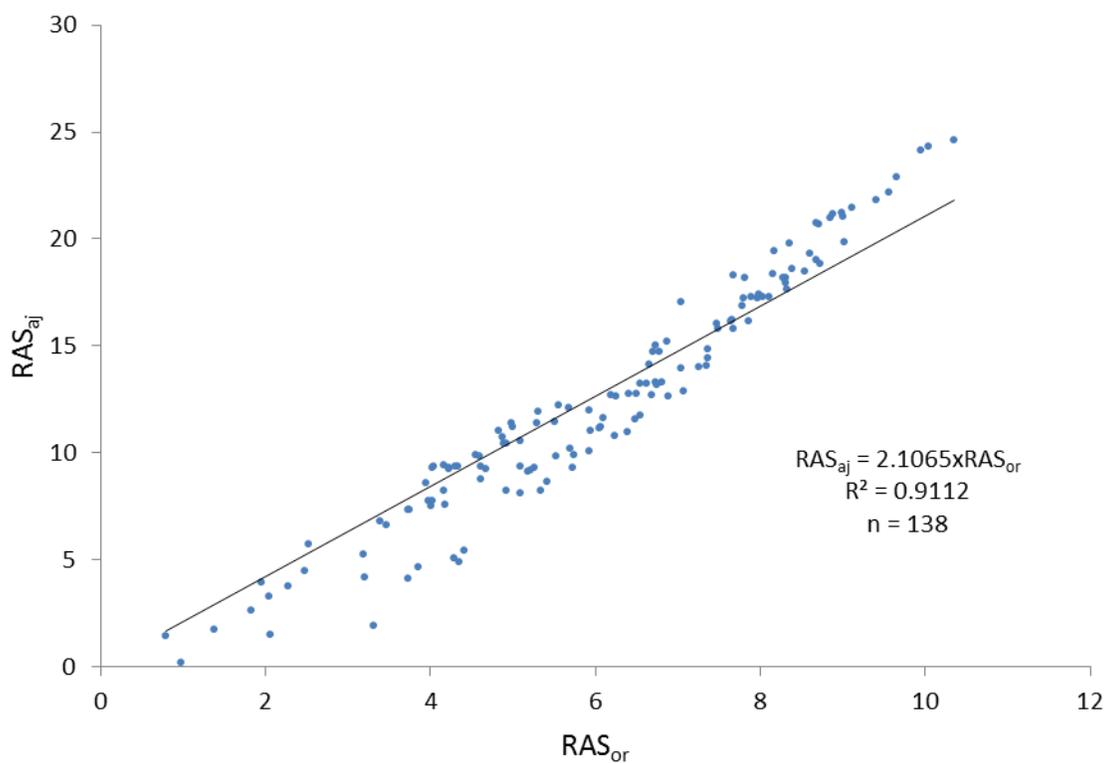


Figura 25. Relación entre RAS_{aj} y RAS_{or} , Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

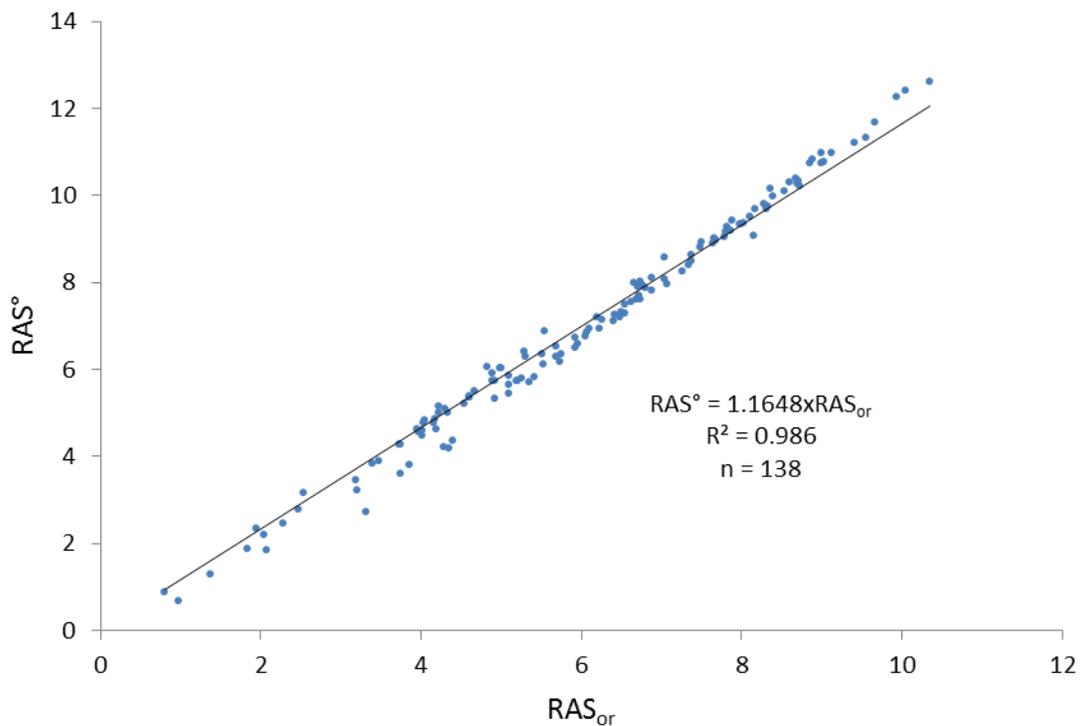


Figura 26. Relación entre RAS° y RAS_{or} , Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

Cuadro 23. Clasificación de las aguas residuales de acuerdo con la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y las diferentes conceptualizaciones del RAS , Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

Formulaciones del RAS	C_1S_1	C_2S_1	C_2S_2	C_3S_1	C_3S_2	C_3S_3	C_3S_4	C_4S_2	C_4S_3	C_4S_4
Número de muestras de agua										
RAS_{or}	1	15	-	41	62	-	-	6	13	-
RAS_{aj}	1	14	3	2	40	35	24	-	-	19
RAS°	2	12	-	25	72	8	-	1	18	-

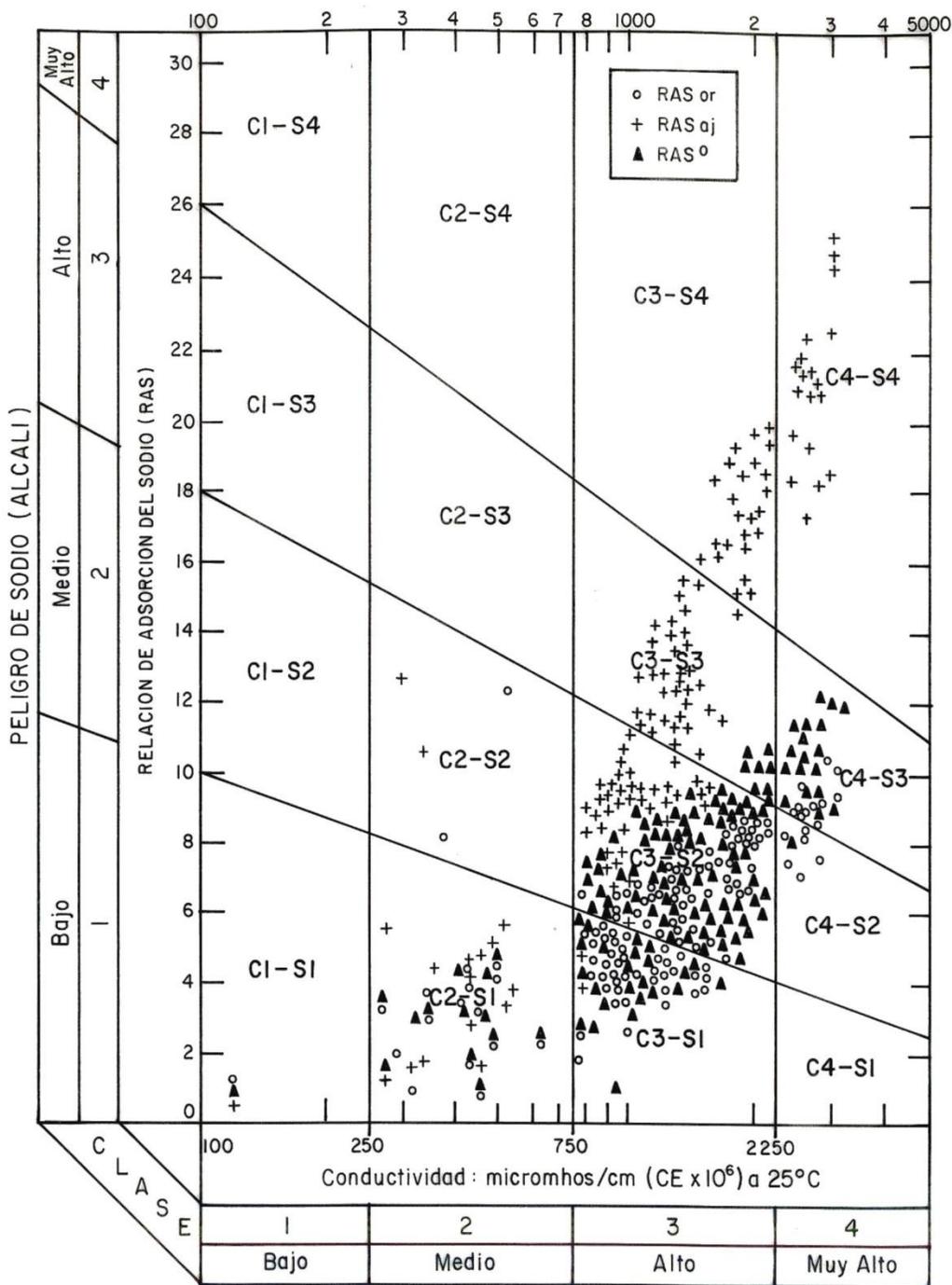


Figura 27. Diagrama de clasificación de las aguas residuales, $CE - RAS_{or}$, $CE - RAS_{aj}$ y $CE - RAS^{\circ}$, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

5.1.12 Clasificación de las aguas residuales de acuerdo al peligro de disminución de la infiltración

La infiltración hace referencia a la velocidad con que el agua entra al suelo y se almacena para el suministro de agua a las plantas, o se percola y lixivia los nutrientes del suelo. La relación entre lámina de agua que entra al suelo y el tiempo que tarda en entrar, define la velocidad de infiltración, la cual tiene un comportamiento asintótico con el tiempo, hasta alcanzar un valor constante llamado infiltración básica; este valor debe estar alrededor de 12 mmh^{-1} para garantizar un adecuado suministro de agua al suelo, bajo los métodos convencionales de riego, valores cercanos a 2 mmh^{-1} , indican que la infiltración es limitada. El proceso de velocidad o tasa de infiltración, depende del contenido inicial de humedad del suelo, relacionado inversamente con la tasa de infiltración; la textura y estructura del suelo, siendo limitada en suelos arcillosos con altos contenidos de arcillas activas del tipo 2:1 y estructuras masivas; la condición de superficie del suelo (desnudo, con presencia de costra, o existencia de vegetación); la cantidad de materia orgánica y calidad del agua aplicada, en este aspecto se hace mención al uso para riego de aguas con altos contenidos de sodio, con respecto al calcio y magnesio, la cuales causan dispersión del suelo.

En la Figura 28 y en el Cuadro 24 se presenta la clasificación por riesgo de reducción de la infiltración, de acuerdo con la conductividad eléctrica (μScm^{-1}) y la relación de adsorción de sodio (RAS). Esta clasificación toma en cuenta las variaciones que tienen las concentraciones de calcio, debido a la precipitación o disolución de la calcita (CaCO_3). Se observa que en la población total de aguas (138 muestras), las tres formulaciones de la relación de adsorción de sodio RAS , ocasionan una reducción ligera a moderada de la infiltración, en el siguiente orden: $RAS_{aj} = 97.1\%$, $RAS^\circ = 68.8\%$ y $RAS_{or} = 62.3\%$.

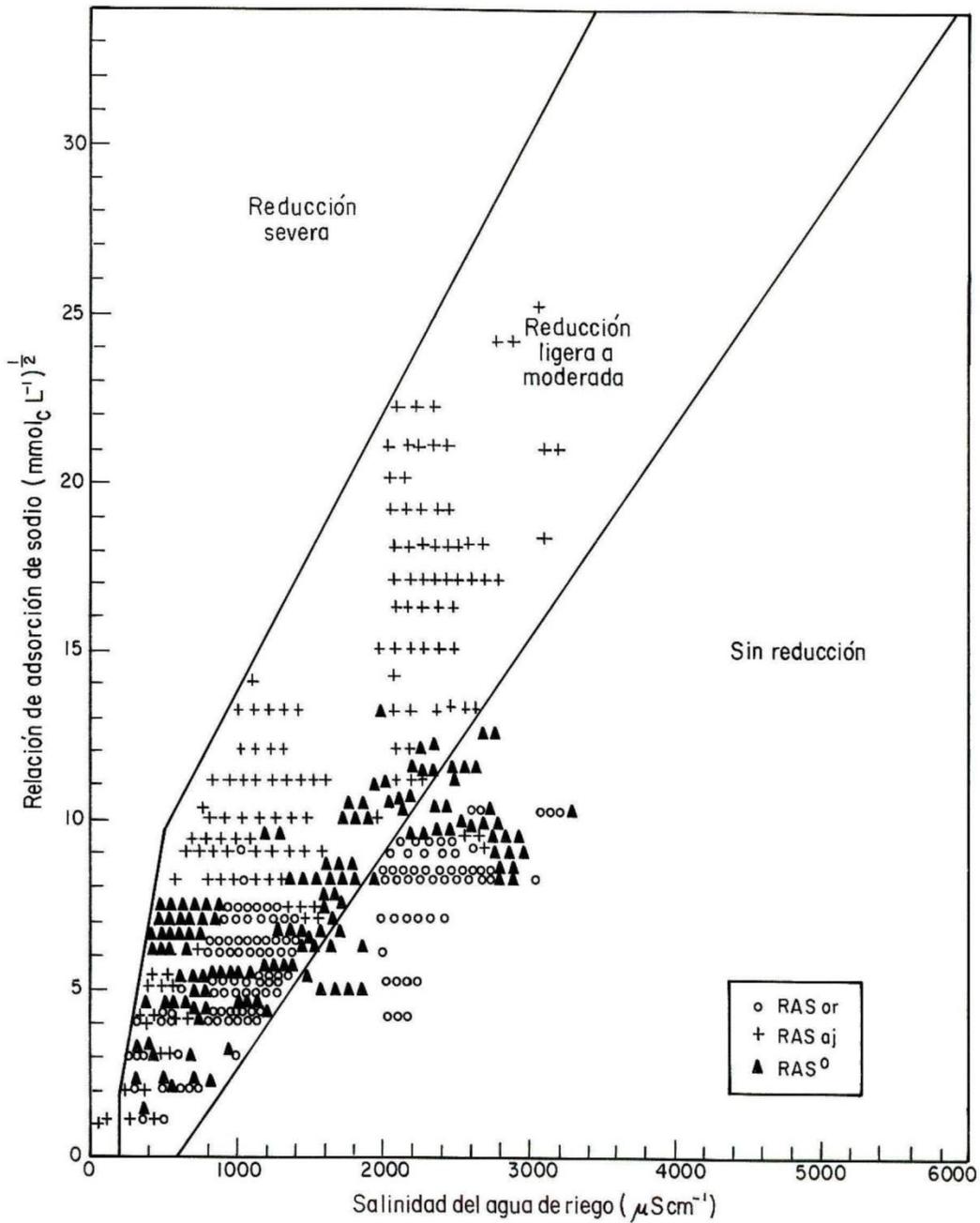


Figura 28. Reducción relativa de la infiltración de acuerdo con la conductividad eléctrica (μScm^{-1}) y el RAS, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

Cuadro 24. Clasificación de las aguas de acuerdo con el riesgo de reducción de la infiltración, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

Formulaciones del <i>RAS</i>	Número de muestras		
	Sin reducción	Reducción ligera a moderada	Reducción severa
<i>RAS_{or}</i>	51	86	1
<i>RAS_{aj}</i>	3	134	1
<i>RAS^o</i>	42	95	1

5.1.13 Clasificación de las aguas residuales de acuerdo con el carbonato de sodio residual (*CSR*)

La precipitación de calcio y magnesio en forma de carbonatos de calcio y magnesio, propician una acumulación considerable de sodio intercambiable en los suelos, razón por la cual se propuso el concepto de carbonato de sodio residual *CSR* (Eaton, 1950), como una medida de los efectos de la sodicidad, la cual afecta negativamente el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que conduce a que los suelos adquieran propiedades físicas adversas, tales como pérdida de permeabilidad y dispersión de los suelos; estos efectos nocivos pueden ser agravados, si se utilizan aguas para riego con altos contenidos de iones de bicarbonatos (Eaton, 1950; McNeal, 1968).

En la Figura 29, se presenta la distribución de las aguas residuales de acuerdo al carbonato de sodio residual (*CSR*); se puede observar que el 71.7 % de la población de aguas residuales (99 muestras), presenta valores mayores de $2.50 \text{ mmol}_e\text{L}^{-1}$, las cuales se consideran no recomendable para riego; el uso indiscriminado de estas aguas para riego, como ocurre en el Valle del Mezquital, ocasiona una excesiva acumulación de sales y conduce a una rápida salinización y sodificación del perfil del suelo, procesos que afectan adversamente el desarrollo y producción de los cultivos.

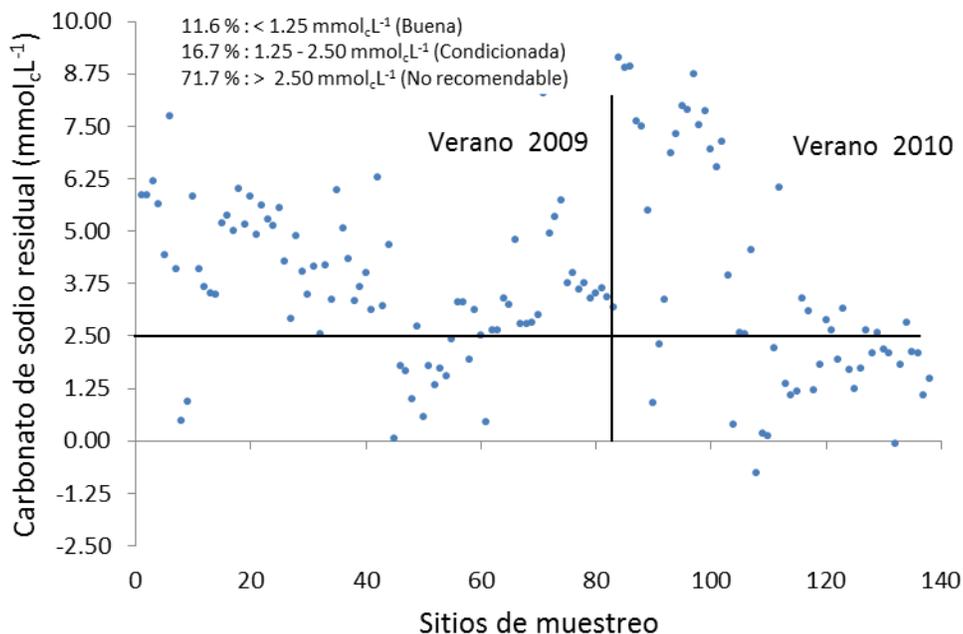


Figura 29. Distribución de las aguas residuales de acuerdo con el carbonato de sodio residual ($mmol_cL^{-1}$), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

5.1.14 Relación funcional $PSI - RAS$ en las aguas residuales

Tener la posibilidad de predecir, en condiciones de equilibrio, la distribución de los iones en solución del suelo y de los iones adsorbidos en los sistemas coloidales del suelo; es de suma importancia para manejar los problemas de salinidad y sodicidad de los suelos. La utilización de la ecuación (3.2.2.7), derivada a partir de la ley de acción de masas, permite hacer una estimación muy acertada del porcentaje de sodio intercambiable (PSI), conociendo la relación de adsorción de sodio del agua de riego, cuando se dé una condición de equilibrio y saturación del suelo con esta agua. El porcentaje de sodio intercambiable (PSI), es el parámetro más relacionado con la disminución de la permeabilidad de los suelos y de las manifestaciones tóxicas del ión sodio (Na^+) en los cultivos (Oster and Sposito, 1990; Murtaza *et al.*, 2006; Crosbie *et al.*, 2007).

En las Figuras 30 y 31, y en el Anexo 6 se presentan las relaciones funcionales; $PSI = fa(RAS_{or})$, $PSI = fa(RAS_{aj})$ y $PSI = fa(RAS^e)$, calculada cada una con los

siguientes valores de coeficiente de selectividad iónica $kg' = [mmol_c L^{-1}]^{-\frac{1}{2}}$: $K_1 = 0.0072444$; $K_2 = 0.01$; $K_3 = 0.0115220$; $K_4 = 0.0118610$; $K_5 = 0.0140113$; $K_6 = 0.0147500$; $K_7 = 0.015840$ y $K_8 = 0.0168999$. Se puede observar en las gráficas de las relaciones funcionales un conjunto de valores mínimos y máximos del porcentaje de sodio intercambiable (PSI). Con el conocimiento de este conjunto de valores, es posible decidir sobre el manejo adecuado del diseño de dosis de calcio (yeso agrícola), para el mejoramiento de los suelos sódicos, que se originan, como consecuencia de la utilización para riego de estas aguas residuales a los suelos del valle del Mezquital.

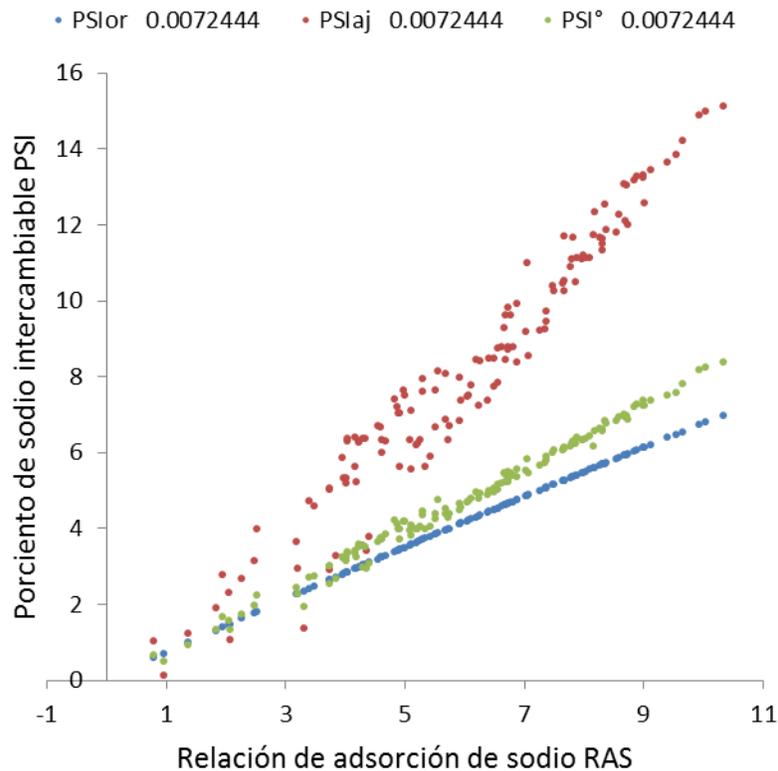


Figura 30. Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$, para un $kg' = 0.0072444 [mmol_c L^{-1}]^{-\frac{1}{2}}$, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

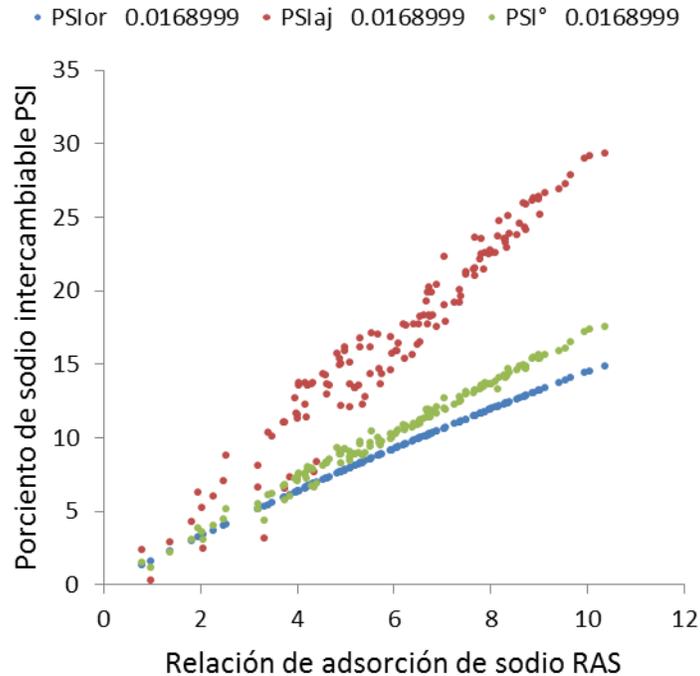


Figura 31. Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^\circ)$, para un $kg' = 0.0168999 [mmol_c L^{-1}]^{-(1/2)}$, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

5.1.15 Contenido de boro en las aguas residuales

El boro es uno de los ocho micronutrientes esenciales, para el normal desarrollo de los cultivos y su umbral entre deficiencia y toxicidad es muy estrecho. La concentración umbral de boro, es la concentración máxima permisible que no reduce los rendimientos en un cultivo específico. Cuando el boro que contienen las aguas de riego ingresa a los suelos, su concentración en la solución, tienden a variar debido a los procesos de adsorción y absorción en los sistemas arcillosos de los suelos (Peterson and Newman, 1976; Goldbert *et al.*, 2005).

En la Figura 32, se presenta los valores de los contenidos de boro en las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital, correspondiente a los muestreos de verano de 2009 y verano de 2010; se puede observar que el 76.1 % de la población de aguas (105 muestras)

tienen valores de $0.3 - 4.0 \text{ mgL}^{-1}$, con un valor máximo de 2.52 mgL^{-1} ; esto las califica como de uso condicionado. Según, Castro, (2011), la tolerancia de los cultivos que ocupan una mayor superficie en el Valle del Mezquital es: maíz $2.0 - 4.0 \text{ mgL}^{-1}$; alfalfa $4.0 - 6.0 \text{ mgL}^{-1}$; avena $2.0 - 4.0 \text{ mgL}^{-1}$; cebada $3.0 - 4.0 \text{ mgL}^{-1}$; trigo $0.75 - 1.0 \text{ mgL}^{-1}$ y frijol $0.75 - 1.0 \text{ mgL}^{-1}$. En atención a lo anterior, se pueden presentar efectos adversos en trigo, frijol, avena y maíz, con el uso continuo de estas aguas residuales en el riego de estos cultivos.

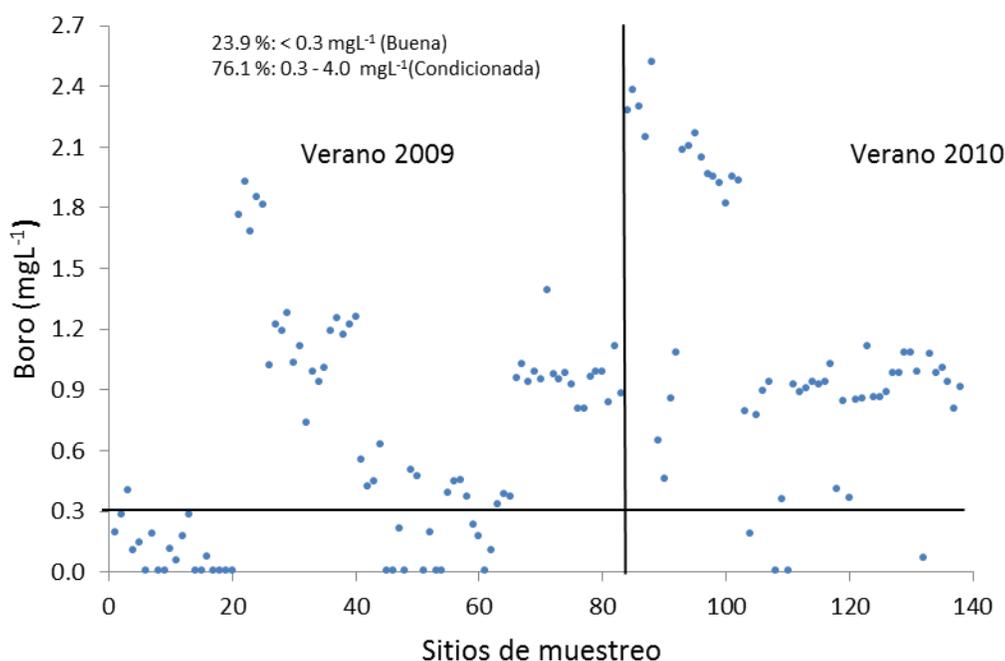


Figura 32. Contenidos de boro (mgL^{-1}) en las aguas residuales, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

5.1.16 Contenido de fosfatos en las aguas residuales

Según Pal y Singh (1985), los fosfatos, son fertilizantes que se aplican al suelo en forma de ortofosfatos (PO_4^{3-}) y son absorbidos por las raíces de las plantas como H_2PO_4^- , que es su forma soluble predominante. El enriquecimiento de las aguas con fósforo tiene efectos adversos en los ecosistemas; cuando el contenido de fosfatos en las aguas superficiales es

superior a 10 mgL^{-1} provoca eutricación; la cual implica un enriquecimiento interno de los sistemas biológicos por nutrientes y un crecimiento desmesurado de la biomasa.

En la Figura 33 se presenta la distribución del contenido de fosfatos (PO_4^{3-}), correspondiente a los muestreos de aguas residuales de verano 2009 y verano 2010. Se puede observar que el 64.5 % de la población de aguas (89 muestras), tienen una concentración de fosfato (PO_4^{3-}) mayor de 2.0 mgL^{-1} , con un valor máximo de 43.1 mgL^{-1} , lo cual las clasifica como no recomendable. Estos altos valores de fosfatos en estas aguas residuales se deben a la utilización de detergentes, aportación de desechos orgánicos y uso de ácido fosfórico en procesos industriales, en el área de México DF y su Zona Metropolitana.

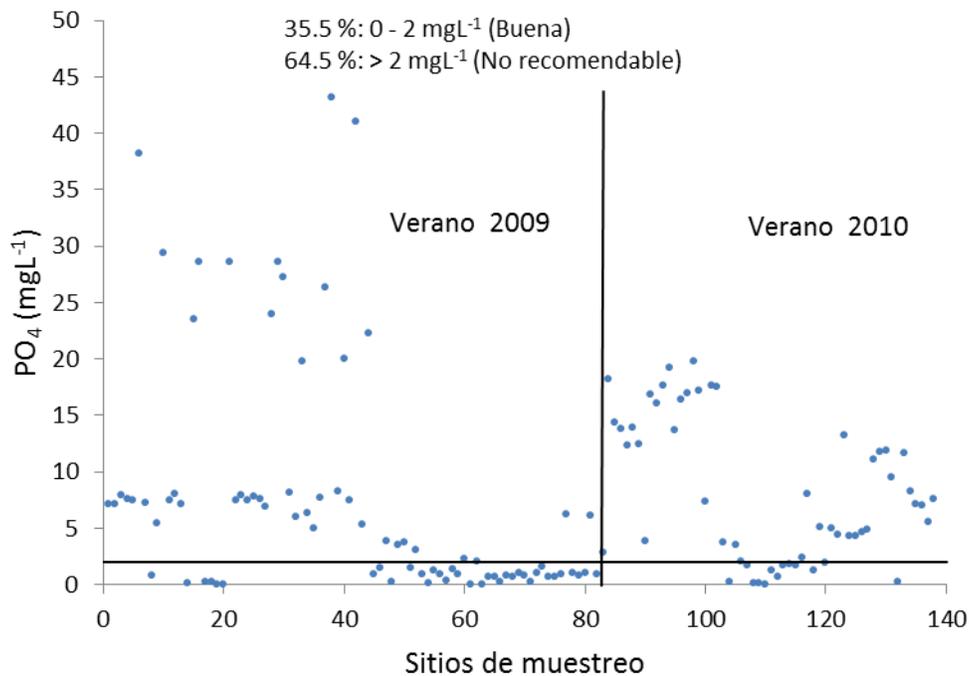


Figura 33. Contenidos de fosfatos (mgL^{-1}), Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

5.1.17 Contenido de nitratos en las aguas residuales

Es importante conocer las cantidades de nitratos (NO_3) que circulan en las aguas residuales, ya que estos pueden ser utilizados por las plantas en una fracción considerable y a su vez cierta cantidad de estos nitratos (NO_3), puede tener una migración hacia estratos saturados y llegar a contaminar las aguas subterráneas, causando un problema ambiental mayor.

En la Figura 34 se presenta la concentración de nitratos en las aguas residuales del Valle del Mezquital, para los muestreos de verano 2009 y verano de 2010. Se encontró que el 89.6 % de las muestras de aguas analizadas, tienen valores de $0.0 - 10.0 \text{ mgL}^{-1}$ de nitratos y el 10.4 % (14 muestras), tienen valores de $10.0 - 20.0 \text{ mgL}^{-1}$ de nitratos, con un máximo de 18.6 mgL^{-1} . Estos valores de acuerdo con la clasificación de Porta *et al.* (2003) pertenecen a la categoría ultra-oligotrófico, de la eutroficación de las aguas.

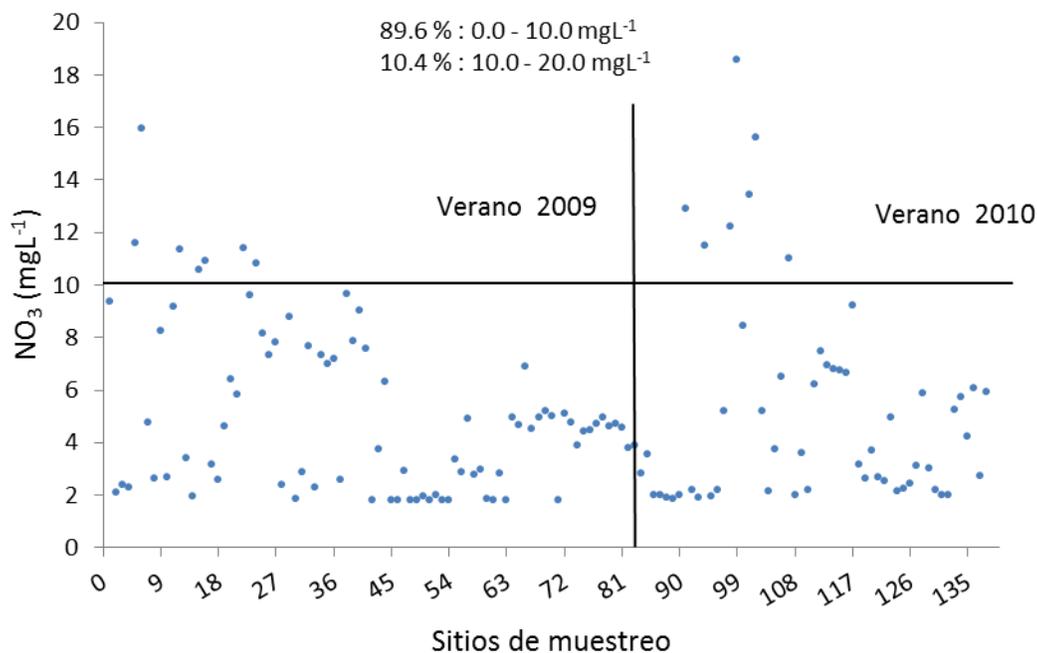


Figura 34. Contenidos de nitratos (NO_3) en las aguas residuales, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

5.2 Aguas que circulan por el sector Zimapán-Tamazunchale-Pánuco (zona de calizas SLP-VER), verano 2009 y verano 2010

5.2.1 Composición iónica de las aguas

Estas son aguas que provienen principalmente de escurrimientos sobre calizas y se mezclan con las aguas residuales que vienen del Valle del Mezquital a través del río Moctezuma. En la Figura 35 se presentan los diferentes tipos de aguas de acuerdo con su relación iónica, en la cual se puede observar que el 85.10 % de la población de aguas (57 muestras), tienen composición clorhídrica, y el 14.90 % (10 muestras) tienen composición sulfático-clorhídrica. El aumento comparativo de la salinidad tipo sulfático clorhídrica con respecto a las aguas residuales del Valle del Mezquital, se deben al aumento del contenido de azufre en las calizas, que al oxidarse forman sulfatos (SO_4^{2-}).

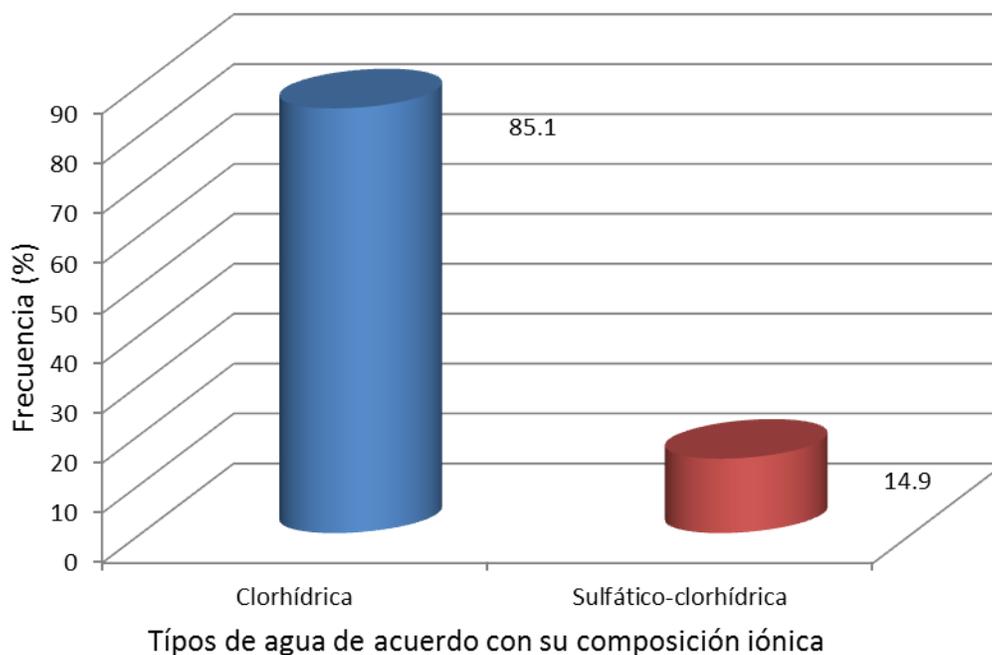


Figura 35. Tipos de aguas de acuerdo a su composición iónica, zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

En la Figura 36 se presentan las relaciones iónica $\frac{Ca^{2+}}{Mg^{2+}}$, $\frac{Na^+}{Ca^{2+}}$, $\frac{Na^+}{Mg^{2+}}$; se puede observar que el 98.5 % (66 muestras) de la relación $\frac{Ca^{2+}}{Mg^{2+}}$ es mayor de 1, lo cual indica que existen considerables cantidades de calcio con respecto al magnesio, y por otro lado, en lo concerniente a la relación $\frac{Na^+}{Ca^{2+}}$, el 76.1 % (51 muestras) presentan valores menores de 1, lo cual indica el predominio del calcio sobre el sodio; los valores de la relación $\frac{Na^+}{Mg^{2+}}$, reflejan que existen valores proporcionales de sodio y magnesio en estas aguas. Todo lo anterior se refleja en menores valores de la relación de adsorción de sodio (RAS).

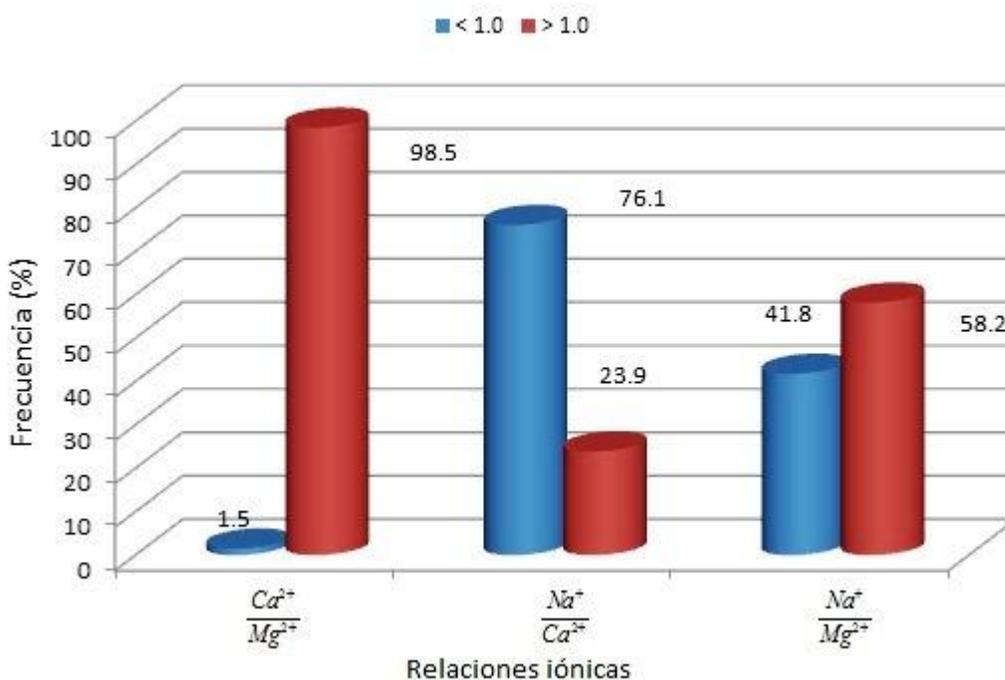


Figura 36. Relaciones iónicas entre el Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

5.2.2 Distribución de cationes y aniones

En las Figuras 37 y 38 se presentan las distribuciones de los cationes y aniones, correspondientes a los muestreos de verano de 2009 y verano de 2010. Se observa en las dos figuras que a través de la red Tamazunchale-Pánuco; en lo referente a los cationes, el calcio (Ca^{2+}) ocupa la mayor superficie, y para los aniones es el bicarbonato (HCO_3^-), es decir, en estas aguas predominan las sales bicarbonatadas de calcio y magnesio. Es importante enfatizar los altos contenidos de calcio y magnesio son heredados de las calizas ($CaCO_3, CaMg(CO_3)_2$).

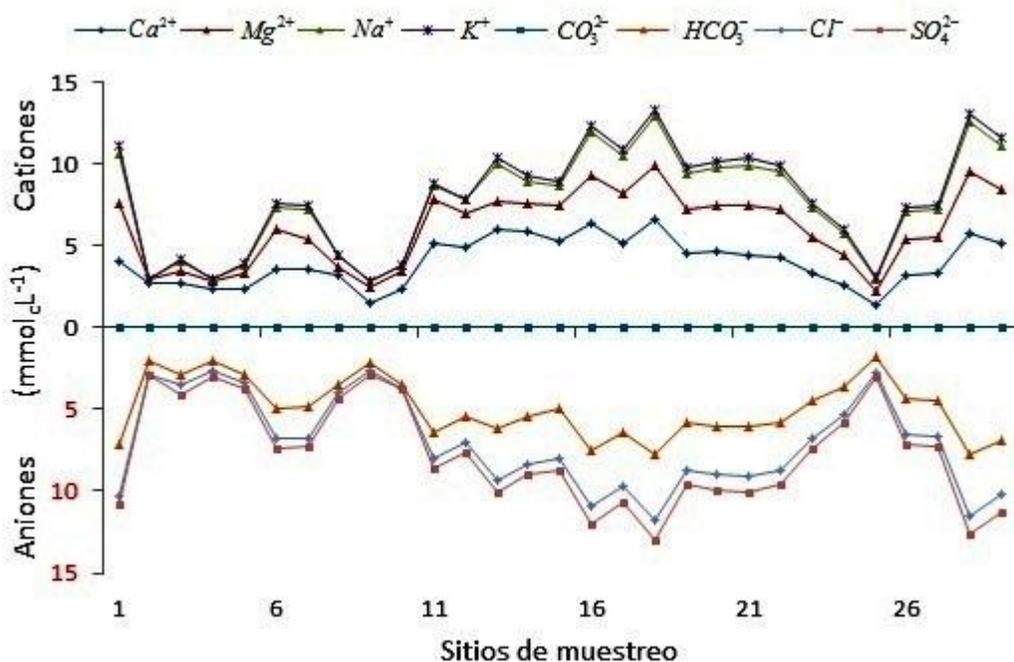


Figura 37. Composición iónica de las aguas, zona de calizas SLP-VER, verano 2009.

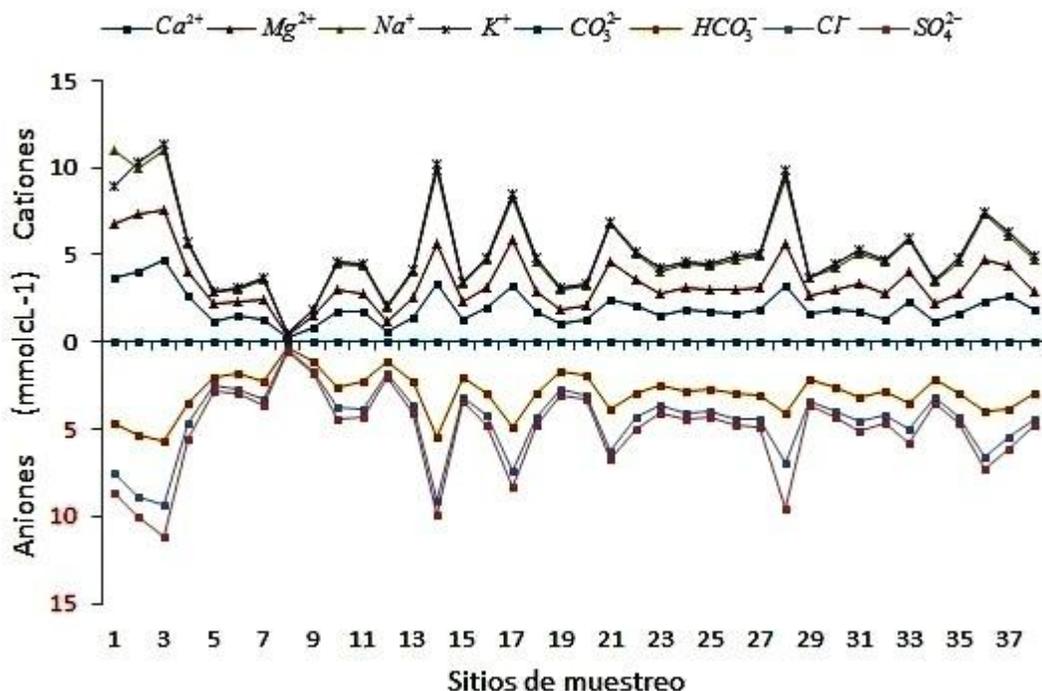


Figura 38. Composición iónica de las aguas, zona de calizas SLP-VER, verano 2010.

5.2.3 Distribución por clases de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y suma de cationes ($mmol_c L^{-1}$)

En la Figura 39 se presenta la distribución de frecuencias de las aguas de la zona de calizas SLP-VER, con respecto a la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$); se encontró que de acuerdo con los rangos establecidos para la calidad del agua, en el diagrama de Richards (1973); el 4.50 % (3 muestra) fue C_1 ($< 250 \mu S cm^{-1}$), el 56.70 % (38 muestras) fue C_2 ($250 - 750 \mu S cm^{-1}$) y el 38.80 % (26 muestras) fue C_3 ($750 - 2,250 \mu S cm^{-1}$). El rangos de mayor predominio fue de $250 - 500 \mu S cm^{-1}$ con un 41.80 % (28 muestras). Lo anterior indica que estas aguas son de concentración baja a media.

La distribución de la suma de cationes en $mmol_c L^{-1}$, se presenta en la Figura 40. Se encontró que el 47.80 % (32 muestras) presentó una concentración $< 5 mmol_c L^{-1}$, el

34.30 % (23 muestras) de 5 – 10 $mmol_cL^{-1}$ y el 17.9 % (12 muestras) de 10 – 20 $mmol_cL^{-1}$. El rango de predominio fue < 5 $mmol_cL^{-1}$.

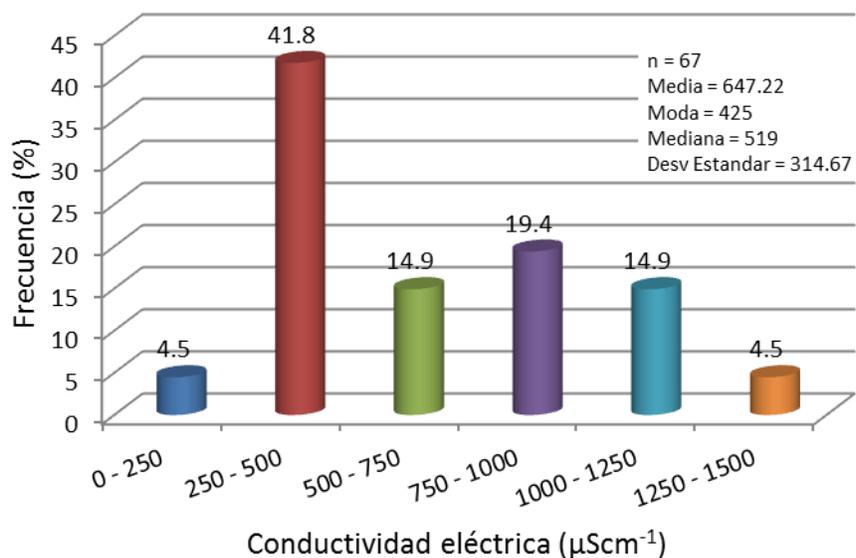


Figura 39. Distribución de frecuencia de la conductividad eléctrica (μScm^{-1}), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

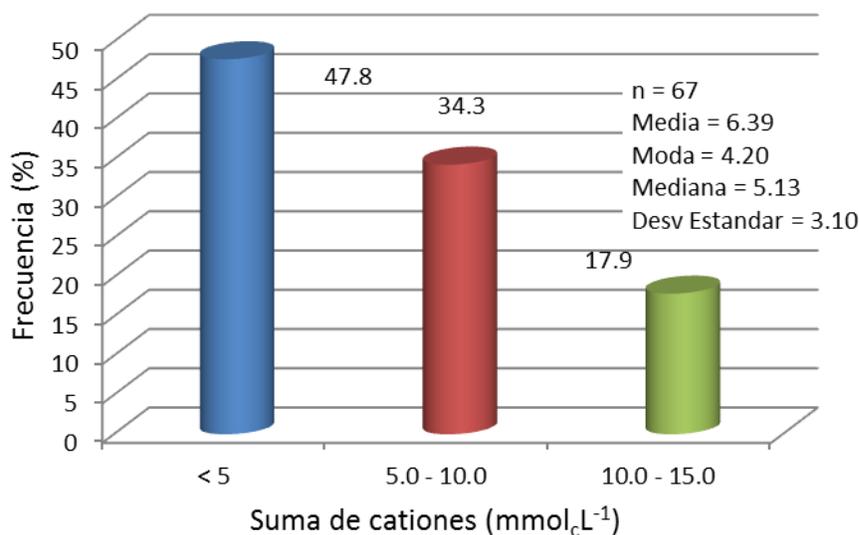


Figura 40. Distribución de frecuencia de la suma de cationes ($mmol_cL^{-1}$), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

5.2.4 Relación entre la conductividad eléctrica teórica ($\mu S cm^{-1}$) y la conductividad eléctrica experimental ($\mu S cm^{-1}$)

En la Figura 41 se presenta la relación funcional, $CE_{teo} = fa(CE_{exp})$; de acuerdo a los valores de la pendiente (1.0383) y coeficiente de determinación (0.9983) encontrados, se concluye que las mediciones experimentales de la conductividad eléctrica están correctas. Lo anterior indica que la ley de disociación electrolítica, explica que la conductividad eléctrica de una solución es proporcional a su concentración iónica.

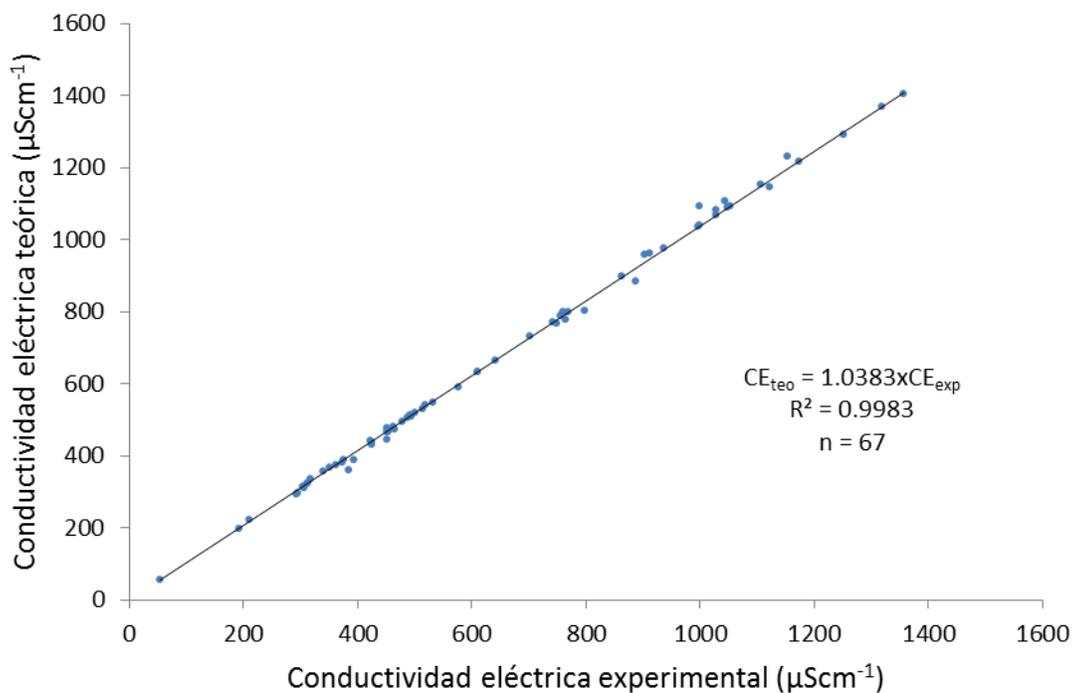


Figura 41. Relación funcional entre conductividad eléctrica teórica ($\mu S cm^{-1}$) y conductividad eléctrica experimental ($\mu S cm^{-1}$), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

5.2.5 Relación entre mgL^{-1} analíticos y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$)

La relación funcional, $mgL^{-1} = fa(CE_{exp})$ se presenta en la Figura 42; el valor de la pendiente encontrado fue de 0.6912, el cual corresponde a soluciones ricas en bicarbonato (HCO_3), en este caso se debe al predominio de sales como el $Ca(HCO_3)_2$ y el $Mg(HCO_3)_2$.

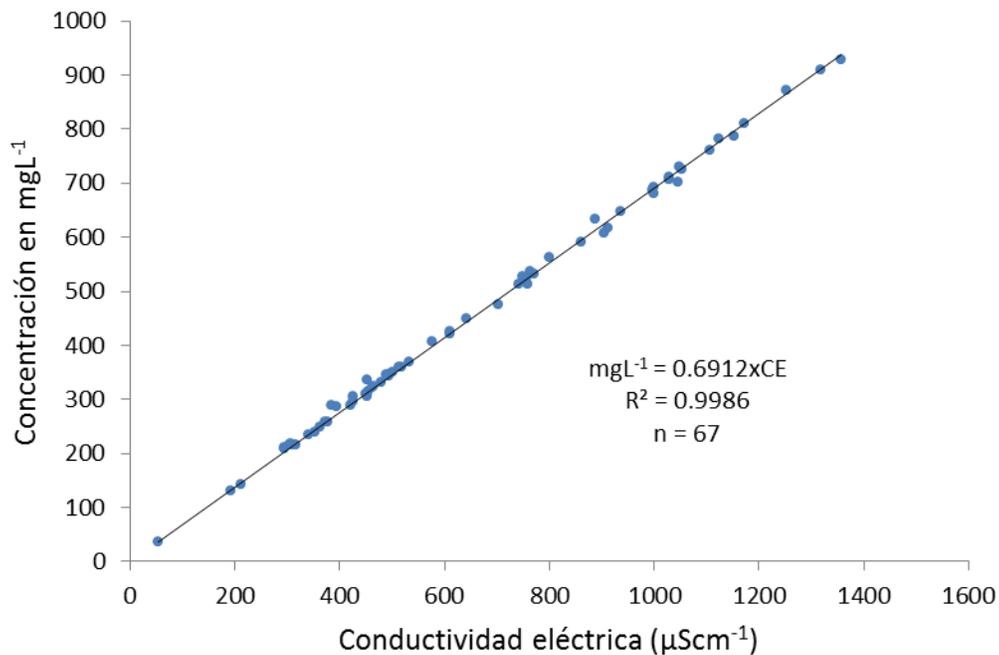


Figura 42. Relación entre concentración (mgL^{-1}) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

5.2.6 Relación entre suma de cationes ($mmol_c L^{-1}$) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$)

En la Figura 43 se presenta la relación funcional, $mmol_c L^{-1} = fa(CE_{exp})$, correspondiente a la suma de cationes; el valor de la pendiente encontrado fue de 0.0099, con un coeficiente de correlación de 1.0.

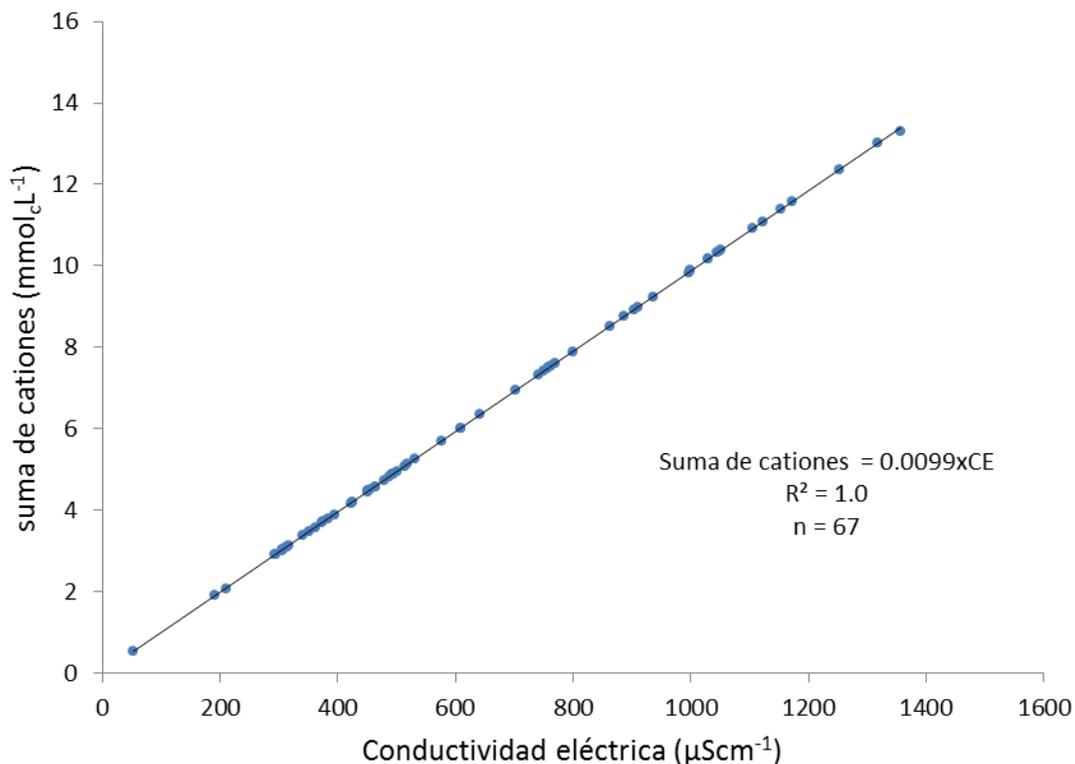


Figura 43. Relación entre suma de cationes ($mmol_c L^{-1}$) y conductividad eléctrica (μScm^{-1}), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

5.2.7 Relación entre presión osmótica (atm) y conductividad eléctrica (μScm^{-1})

En este caso la presión osmótica se obtuvo al correlacionar las relaciones funcionales $mgL^{-1} = fa(CE)$ obtenida para estas aguas de la zona de calizas SLP-VER y $PO(atm) = fa(CE)$ reportada en muchas investigaciones (Velázquez, 2001; Mendoza, 2009), de la siguiente manera:

$$mgL^{-1} = 0.6912 \times CE(\mu Scm^{-1})$$

$$PO(atm) = 0.0004 \times CE(\mu Scm^{-1})$$

$$\text{Siendo, } PO(atm) = \frac{0.0004}{0.6912} \times mgL^{-1} = 0.000579 \times mgL^{-1}$$

donde, PO , es la presión osmótica en atmósfera, 0.0004 es la pendiente de la recta en la relación funcional $PO(atm) = fa(CE)$, 0.6912 es la pendiente de la recta en la relación funcional $mgL^{-1} = fa(CE)$ en la población de aguas y mgL^{-1} , expresa la concentración de la solución.

En la Figura 44 se presenta la relación funcional, $PO_{teórica}(atm) = fa(PO_{experimental})$, donde el valor de la pendiente es 1.1935, el cual corresponde a soluciones donde predominan sales como $Ca(HCO_3)_2$ y $Mg(HCO_3)_2$.

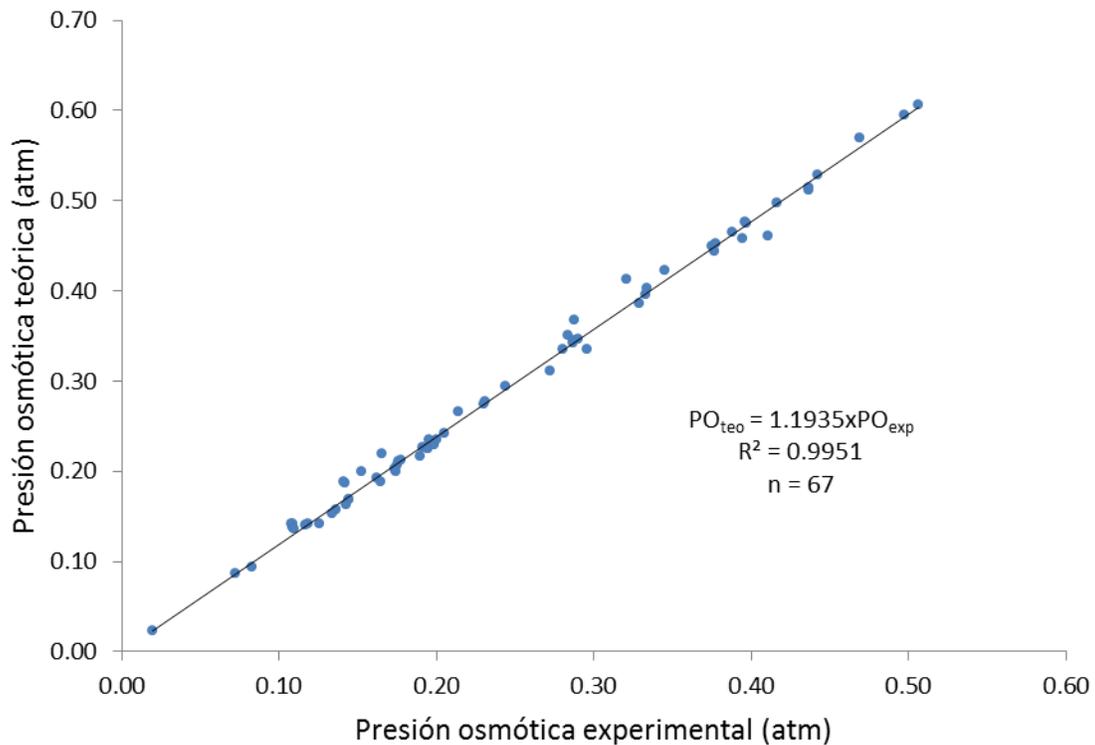


Figura 44. Relación entre presión osmótica teórica (atm) y presión osmótica experimental (atm), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

5.2.8 Relación entre $mmol-iónL^{-1}$ y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$)

En la Figura 45 se presenta la relación funcional, $mmol-iónL^{-1} = fa(CE)$, en la cual, la pendiente fue 0.0155; este valor o coeficiente es muy útil para conocer las presiones osmóticas que se desarrollan en las soluciones de estas aguas.

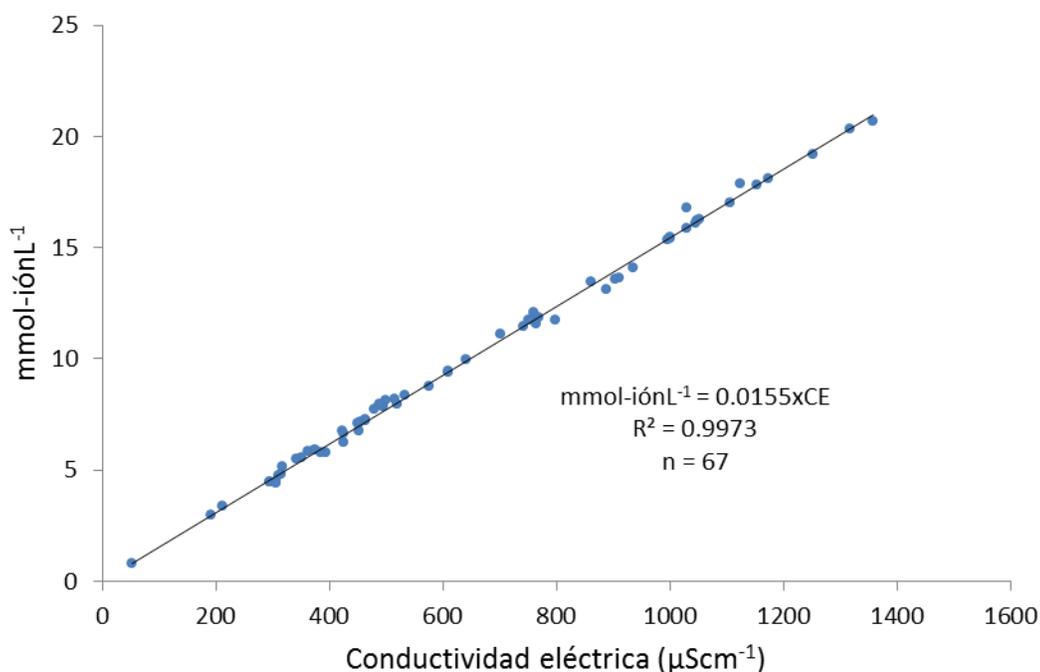


Figura 45. Relación entre $mmol-iónL^{-1}$ y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

5.2.9 Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$)

En la Figura 46 se presenta la relación funcional $I(ML^{-1}) = fa(CE)$; la fuerza iónica se calculó con la ecuación (3.2.1.15). El valor de la pendiente fue 0.00001; este valor coincide con los valores reportados por Griffin y Jurinak (1973), y Mihelcic *et al.* (2008).

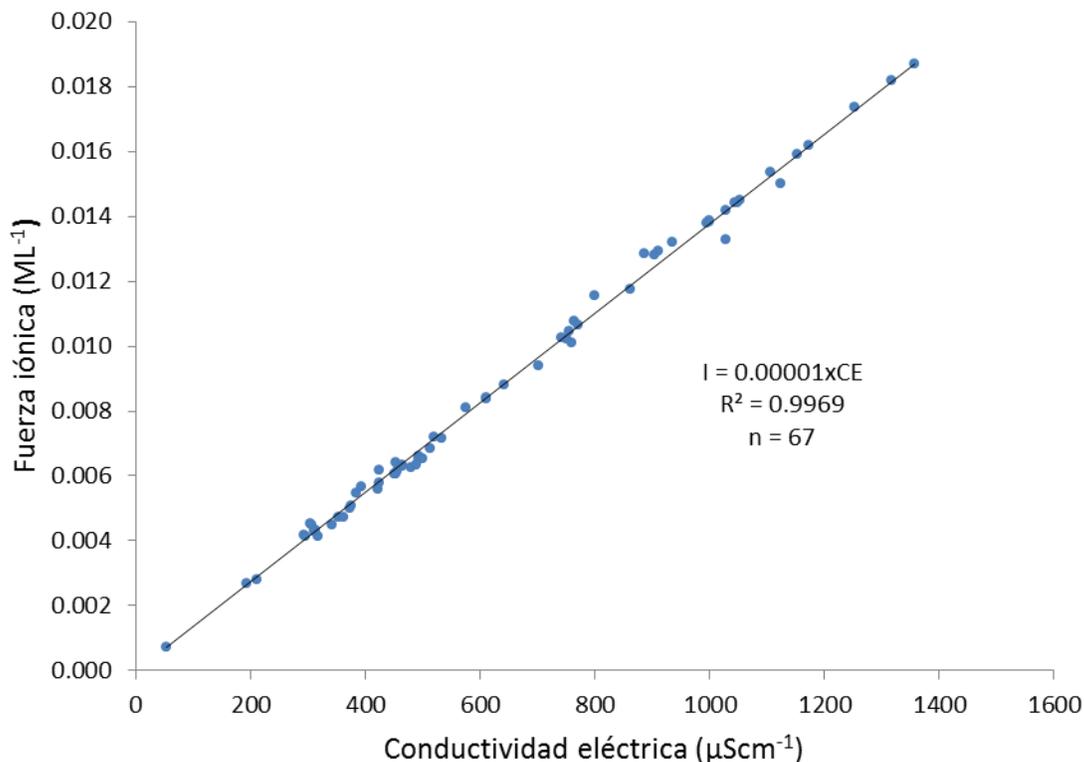


Figura 46. Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) y conductividad eléctrica (μScm^{-1}), zona calizas de SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

5.2.10 Sales hipotéticas

Las sales hipotéticas se calcularon teniendo en cuenta la Solubilidad de las sales, los Klarcos (riqueza de elementos en las rocas), el principio de Langelier y la geoquímica de los iones. En los Cuadros 25 y 26, se presenta el cálculo de las sales hipotéticas, correspondiente a la muestra 7 del muestreo de verano de 2009, localizada en el río Moctezuma, Huesca, Estado de San Luís Potosí.

Cuadro 25. Composición iónica, muestra 7, zona de calizas SLP-VER, verano de 2009.

<i>pH</i>	<i>CE</i>	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	$\sum_{cationes}$	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	$\sum_{aniones}$	$\Delta\Sigma$
	μScm^{-1}	$mmol_c L^{-1}$										
8.00	750.00	3.61	1.73	1.85	0.22	7.41	0.00	4.77	2.00	0.44	7.21	0.20

Cuadro 26. Cálculo de sales hipotéticas, muestra 7, zona de calizas SLP-VER, verano 2009.

Reactivos ($mmol_c L^{-1}$)			Sales hipotéticas ($mmol_c L^{-1}$)	Residuos ($mmol_c L^{-1}$)	
Na^+	+	Cl^-	$NaCl$	Cl^-	Na^+
1.85		2.00	1.85	0.15	0.00
Mg^{2+}	+	Cl^-	$MgCl_2$	Mg^{2+}	Cl^-
1.73	+	0.15	0.15	1.58	0.00
K^+	+	HCO_3^-	$KHCO_3$	HCO_3^-	K^+
0.22		4.77	0.22	4.55	0.00
Ca^{2+}	+	HCO_3^-	$Ca(HCO_3)_2$	HCO_3^-	Ca^{2+}
3.61		4.55	3.61	0.94	0.00
Mg^{2+}	+	HCO_3^-	$Mg(HCO_3)_2$	Mg^{2+}	HCO_3^-
1.58		0.94	0.94	0.64	0.00
Mg^{2+}	+	SO_4^{2-}	$MgSO_4$	Mg^{2+}	SO_4^{2-}
0.64		0.44	0.44	0.20	0.00
			7.21		

Los valores de las sales hipotéticas, del cuadro 26, equivalen a $0.00185 ML^{-1}$ de $NaCl$, $0.000075 ML^{-1}$ de $MgCl_2$, $0.00022 ML^{-1}$ de $KHCO_3$, $0.001805 ML^{-1}$ de $Ca(HCO_3)_2$, $0.00047 ML^{-1}$ de $Mg(HCO_3)_2$ y $0.00022 ML^{-1}$ de $MgSO_4$. Con estos valores, utilizando la ecuación (3.2.1.22), el valor de la fuerza iónica de las sales hipotéticas fue de $0.0049 ML^{-1}$. Con este procedimiento se calcularon las sales hipotéticas y su respectiva fuerza iónica de cada una de las muestras de verano de 2009 y verano de 2010.

La distribución de los tipos de sales hipotéticas de las aguas de la zona de calizas SPL-VER, se presentan en las Figuras 47 y 48. Se puede observar que el orden de predominancia es: $Ca(HCO_3)_2 > NaCl > Mg(HCO_3)_2 > MgSO_4 > MgCl_2 > KHCO_3$.

Las relaciones conjuntas de la fuerza iónica de las muestras de agua, calculada para los iones individuales de las soluciones y la fuerza iónica calculada para las sales hipotéticas en los muestreos de verano 2009 y verano 2010, se presentan en las Figuras 49 y 50. Los valores de las pendientes (1.0169 y 1.0195) y de los coeficientes de correlación (0.9950 y 1.000) en las dos gráficas, indican que los dos métodos de cálculo de la fuerza iónica son correctos y precisos.

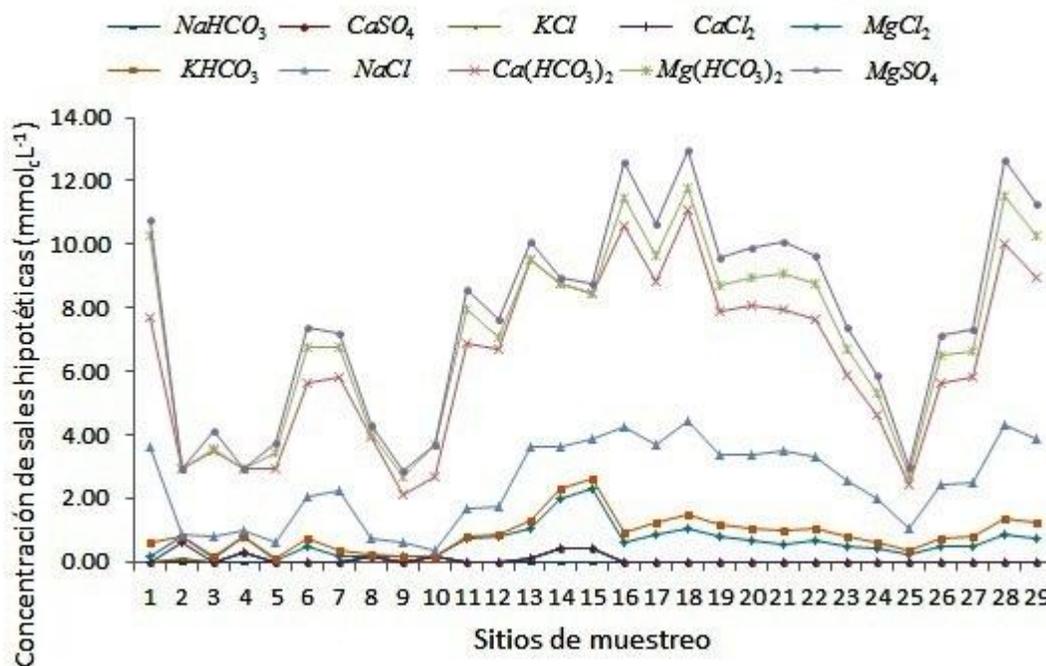


Figura 47. Distribución de las sales hipotéticas, zona de calizas SLP-VER, verano 2009.

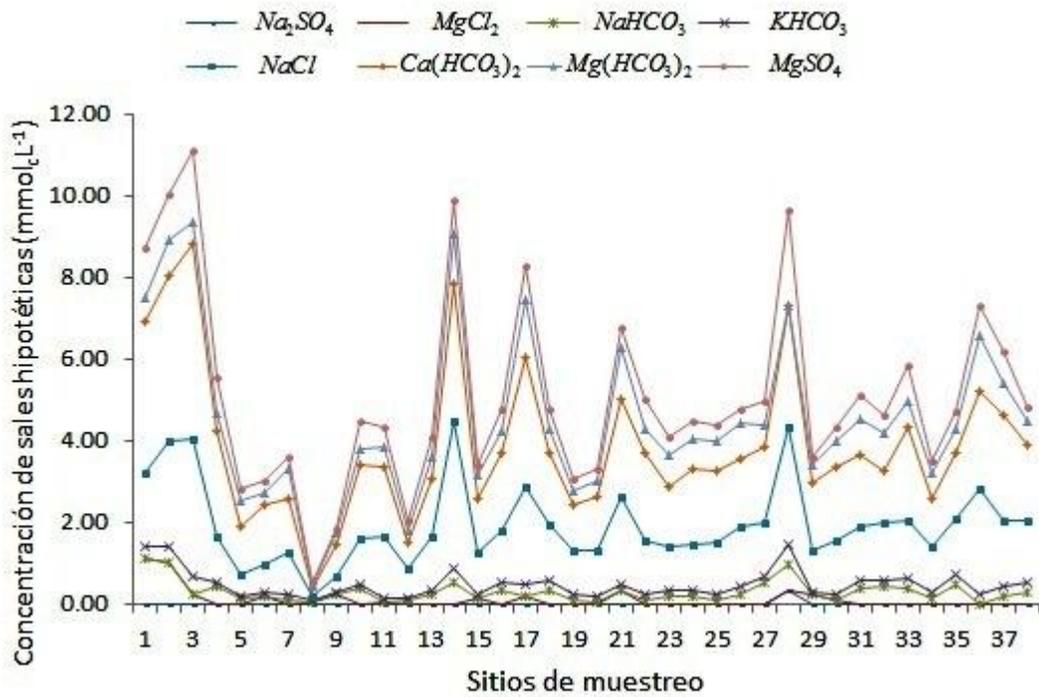


Figura 48. Distribución de las sales hipotéticas, zona de calizas SLP-VER, verano 2010.

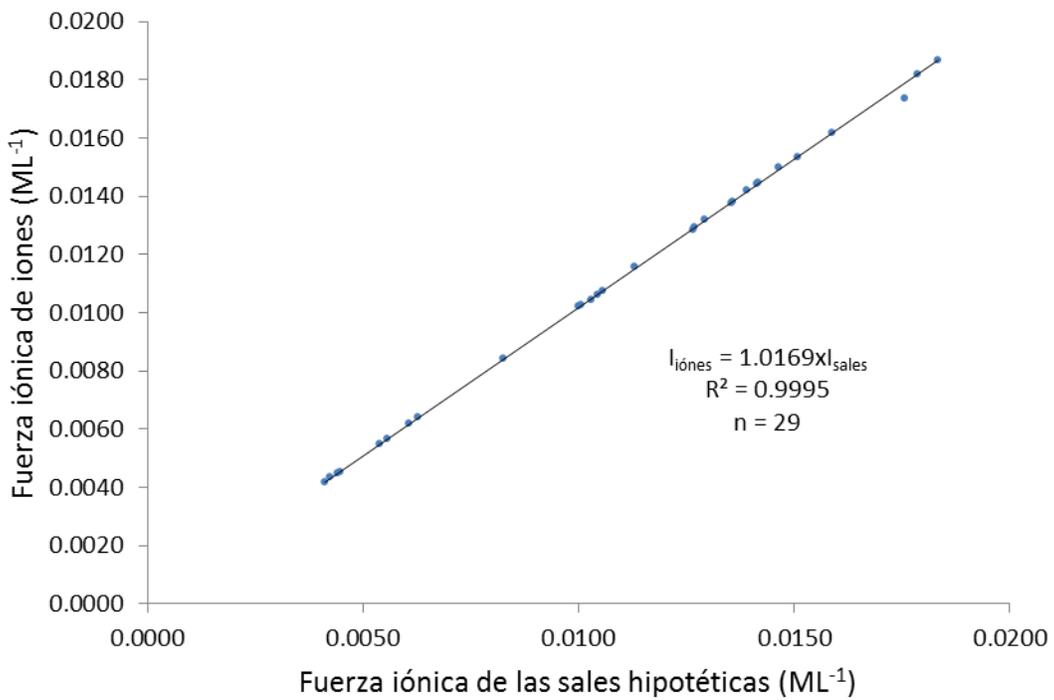


Figura 49. Relación entre la fuerza iónica (ML^{-1}) de los iones individuales y la fuerza iónica (ML^{-1}) de las sales hipotéticas, zona de calizas SLP-VER, verano 2009.

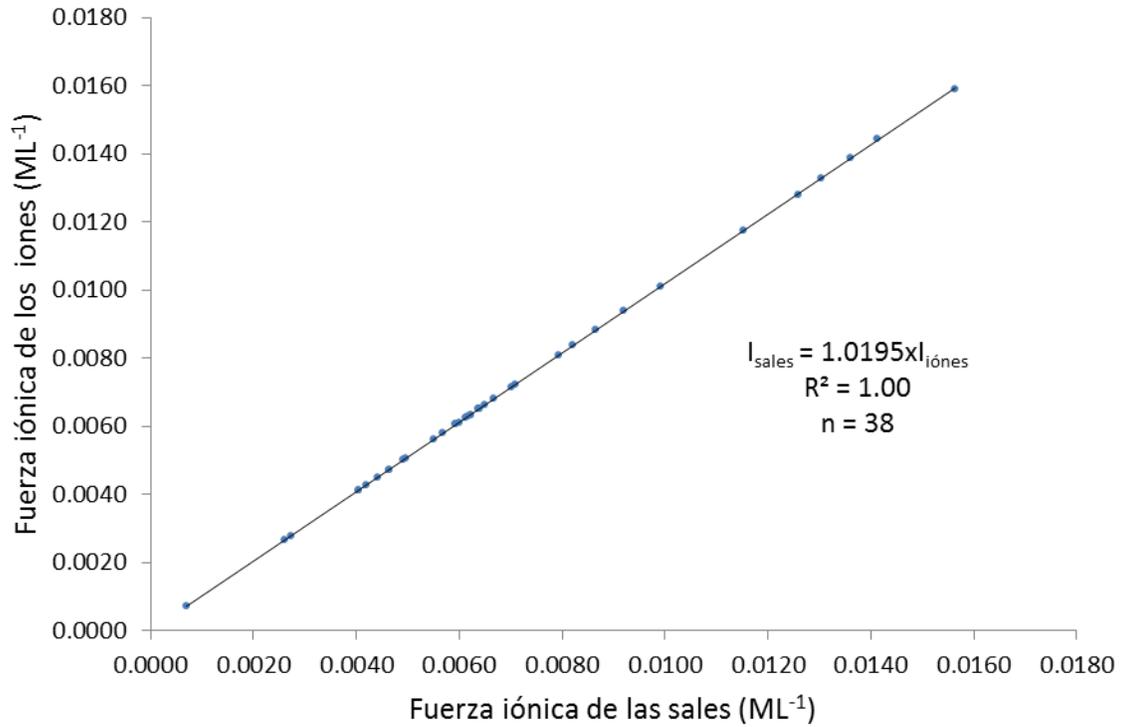


Figura 50. Relación entre la fuerza iónica (ML^{-1}) de los iones individuales y la fuerza iónica (ML^{-1}) de las sales hipotéticas, zona de calizas SLP-VER, verano 2010.

5.2.11 Clasificación de las aguas, de acuerdo con la relación de adsorción de sodio (RAS)

Matemáticamente, la relación de adsorción de sodio (RAS), se puede expresar como:

$$RAS = \lim_{C_{Ca^{2+}} \rightarrow +\infty} \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}}}} = 0$$

$$RAS = \lim_{C_{Ca^{2+}} \rightarrow 0} \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}}}} = +\infty$$

$$RAS = \lim_{C_{Na^+} \rightarrow +\infty} \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}}}} = +\infty$$

$$RAS = \lim_{C_{Na^+} \rightarrow 0} \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}}}} = 0$$

Estas tendencias de la relación de adsorción de sodio (RAS), se deben a los procesos de precipitación o solubilización de ciertas fracciones de calcita ($CaCO_3$); los cuales están determinados por las constantes de equilibrio de los iones calcio, carbonato y bicarbonato.

En las Figuras 51 y 52 se presentan las relaciones funcionales, $RAS_{aj} = fa(RAS_{or})$ y $RAS^{\circ} = fa(RAS_{or})$. Con los valores numéricos de los diferentes conceptualizaciones del RAS , se estiman diferentes valores de sodio intercambiable PSI (ecuación 3.2.2.7). El conocimiento de valores extremos de $PSI_{mínimo}$ y $PSI_{máximo}$, es muy útil para el manejo de fuentes de calcio, para el mejoramiento de suelos sódicos.

En el Cuadro 27 y Anexo 7, se presenta la distribución de las aguas de la zona de calizas SLP-VER, de acuerdo con los valores numéricos de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y la relación de adsorción de sodio (RAS).

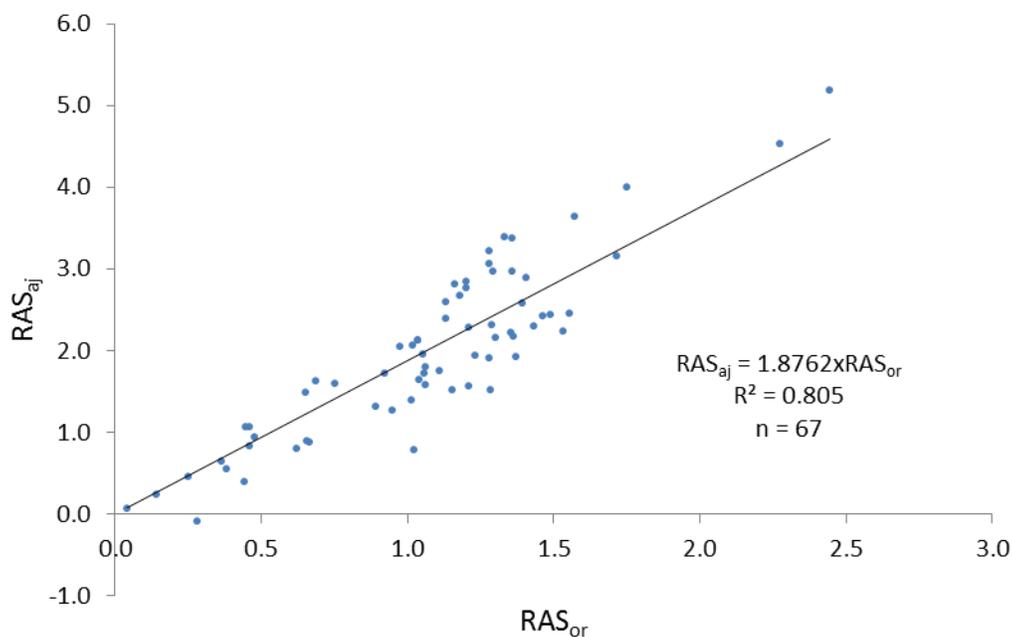


Figura 51. Relación entre RAS_{aj} y RAS_{or} , zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

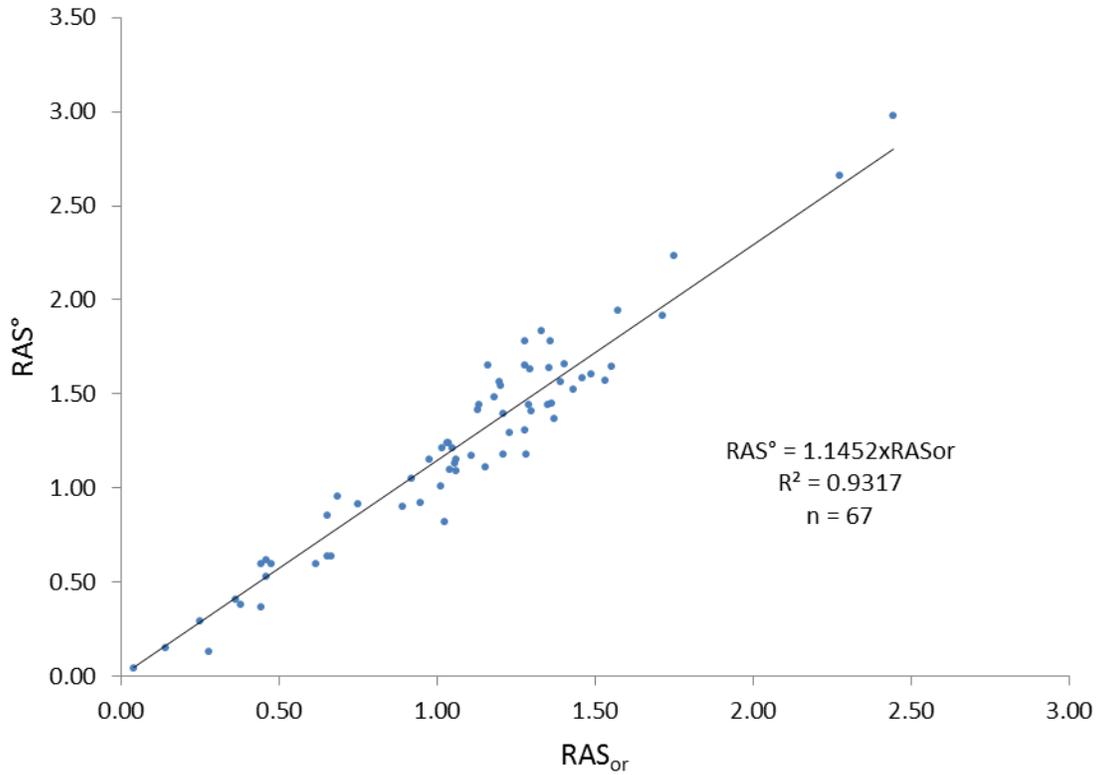


Figura 52. Relación entre RAS° y RAS_{or} , zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

Cuadro 27. Clasificación de las aguas de la zona de calizas SLP-VER, de acuerdo con la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y las diferentes conceptualizaciones del RAS .

Formulaciones del RAS	C_1S_1	C_2S_1	C_2S_2	C_3S_1	C_3S_2
	Número de muestras				
RAS_{or}	3	38	-	26	-
RAS_{aj}	3	39	1	23	1
RAS°	3	38	-	26	-

5.2.12 Clasificación de las aguas de acuerdo al peligro de disminución de la infiltración

En Cuadro 28 y el Anexo 8, se presenta la clasificación de riesgo de reducción de la infiltración, de acuerdo con la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y la relación de adsorción de sodio (RAS). Esta clasificación toma en cuenta las variaciones que tienen las concentraciones de calcio, debido a la precipitación o disolución de la calcita ($CaCO_3$). Se observa que el 64.2, 82.1 y 67.2 % de las muestras, de las tres formulaciones del RAS (RAS_{or} , RAS_{aj} , RAS°), presentan reducción ligera a moderada de la infiltración.

Cuadro 28. Clasificación de las aguas de la zona de calizas SLP-VER de acuerdo con el riesgo de reducción de la infiltración.

Formulaciones del RAS	Sin reducción	Reducción ligera a moderada	Reducción severa
	Número de muestras		
RAS_{or}	23	43	1
RAS_{aj}	11	55	1
RAS°	21	45	1

5.2.13 Clasificación de las aguas de acuerdo con el carbonato de sodio residual (CSR)

La precipitación de calcio y magnesio en forma de carbonatos de calcio y magnesio, propician una acumulación considerable de sodio intercambiable en los suelos, razón por la cual se propuso el concepto de carbonato de sodio residual CSR (Eaton, 1950), como una medida de los efectos de la sodicidad, la cual afecta negativamente el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que conduce a que los suelos adquieran propiedades físicas adversas, tales como pérdida de permeabilidad y dispersión de los suelos; estos efectos nocivos pueden ser agravados, si se utilizan aguas para riego con altos contenidos de iones de bicarbonatos (Eaton, 1950; McNeal, 1968).

En la Figura 53 se presenta la distribución de las aguas de la zona de calizas SLP-VER, de acuerdo al carbonato de sodio residual (CSR); se puede observar que el 100 % de la población de aguas, presenta valores menores $1.25 \text{ mmol}_c L^{-1}$, por lo que se les considera como buenas para su uso en riego. Estos resultados se deben a la presencia de altos contenidos de calcio y magnesio en estas aguas.

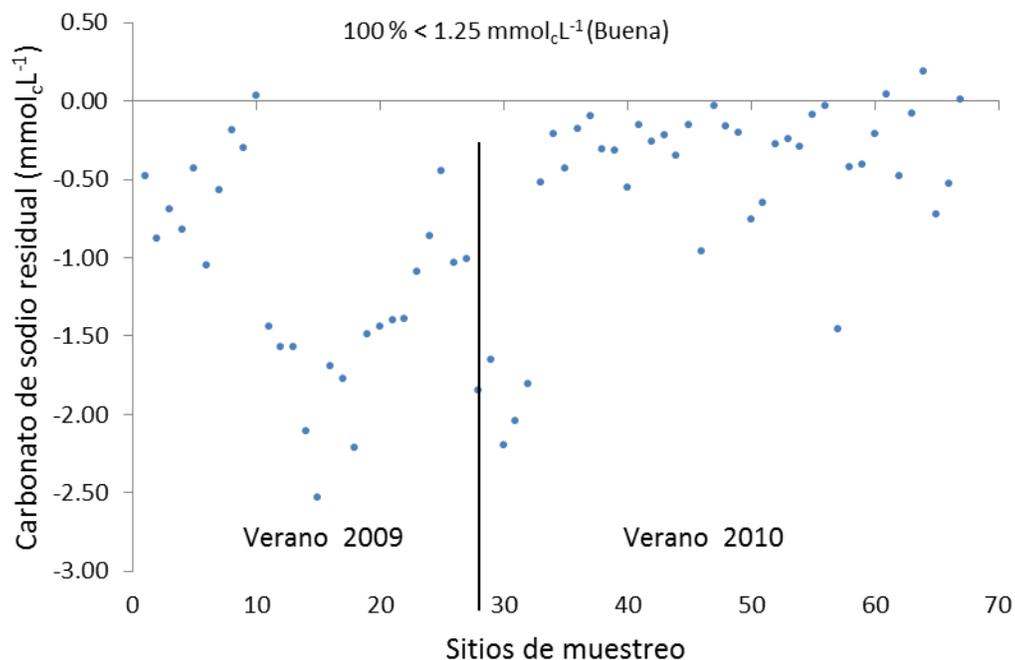


Figura 53. Distribución de las aguas de la zona de calizas SLP-VER de acuerdo al carbonato de sodio residual ($mmol_c L^{-1}$), verano 2009 y verano 2010.

5.2.14 Relación funcional $PSI - RAS$ en las aguas de la zona de calizas SLP-VER

En las Figuras 54 y 55, y en el Anexo 9, se presentan las relaciones funcionales; $PSI = fa(RAS_{or})$, $PSI = fa(RAS_{aj})$ y $PSI = fa(RAS^{\circ})$, calculada cada una con los siguientes valores de coeficiente de selectividad iónica $kg' = [mmol_c L^{-1}]^{-\frac{1}{2}}$: $K_1 = 0.0072444$; $K_2 = 0.01$; $K_3 = 0.0115220$; $K_4 = 0.0118610$; $K_5 = 0.0140113$; $K_6 = 0.0147500$; $K_7 = 0.015840$ y $K_8 = 0.0168999$. Se puede observar en las gráficas de las relaciones funcionales un conjunto de valores mínimos y máximos del porcentaje de

sodio intercambiable (PSI), pero relativamente bajos comparados con los que se predicen en las aguas del Valle del Mezquital, este comportamiento se debe a los altos contenidos de calcio y magnesio en estas aguas. De todas maneras, es importante conocer este conjunto de valores, para el manejo adecuado del diseño de dosis de calcio (yeso agrícola), en caso que se desarrollen suelos sódicos como consecuencia del uso de estas aguas.

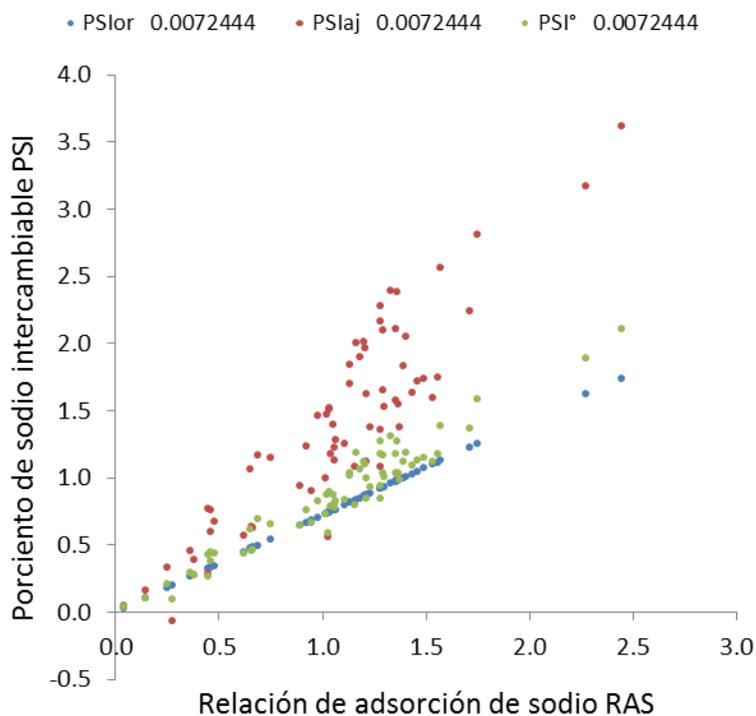


Figura 54. Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$, para un $kg' = 0.0072444 [mmol_c L^{-1}]^{-1/2}$, zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

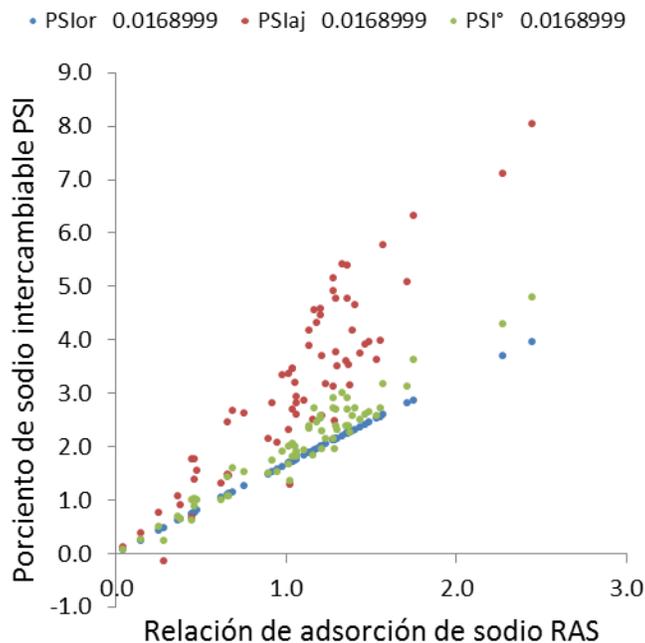


Figura 55. Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$, para un $kg' = 0.0168999 [mmol_c L^{-1}]^{-1/2}$, zona de caliza SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

5.2.15 Contenido de boro en las aguas

En la Figura 56, se presentan los valores de los contenidos de boro en las aguas de la zona de caliza de SLP-Ver, correspondiente a los muestreos de verano de 2009 y verano de 2010. Se puede observar que el 85.1 % de la población de aguas (57 muestras) tienen valores menores de 0.3 mgL^{-1} , lo cual la califica como buena o adecuada para su uso en riego. El 14.9 % (10 muestras) tienen valores de $0.3 - 4.0 \text{ mgL}^{-1}$; con un valor máximo de 0.93 mgL^{-1} , esto las califica como de uso condicionado.

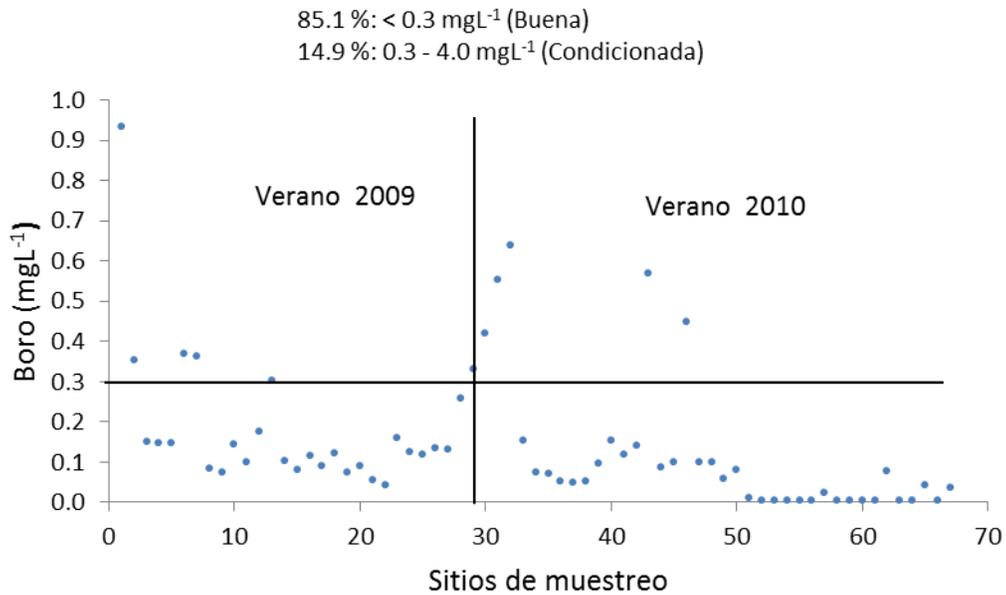


Figura 56. Contenidos de boro (mgL^{-1}), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

5.2.16 Contenido de fosfatos en las aguas

En la Figura 57, se presenta la distribución del contenido de fosfatos (PO_4^{3-}), correspondiente a los muestreos de aguas de la zona de calizas de SLP-VER, en verano 2009 y verano 2010. Se puede observar que el 100 % de la población de aguas, tienen una concentración de fosfatos (PO_4^{3-}) de 0.0 - 2.0 mgL^{-1} , con un valor máximo de 1.28 mgL^{-1} , lo cual las clasifica como buena o recomendable para su uso en riego de cultivos.

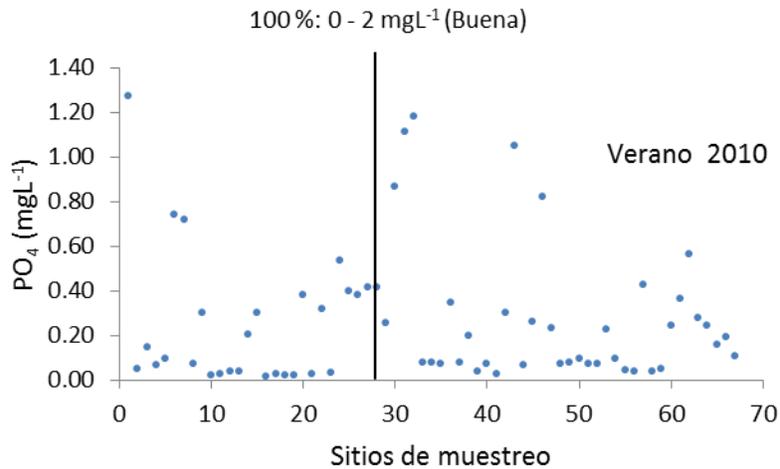


Figura 57. Contenidos de fosfatos (mgL^{-1}), zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

5.2.17 Contenido de nitratos en las aguas

En la Figura 58 se presenta la concentración de nitratos en las aguas de la zona de calizas de SLP-VER, para los muestreos de verano 2009 y verano de 2010. Se encontró que el 100 % de la población de aguas tienen valores en el rango de 0.0 – 10.0 mgL^{-1} de nitratos, con valor máximo de 1.03 mgL^{-1} .

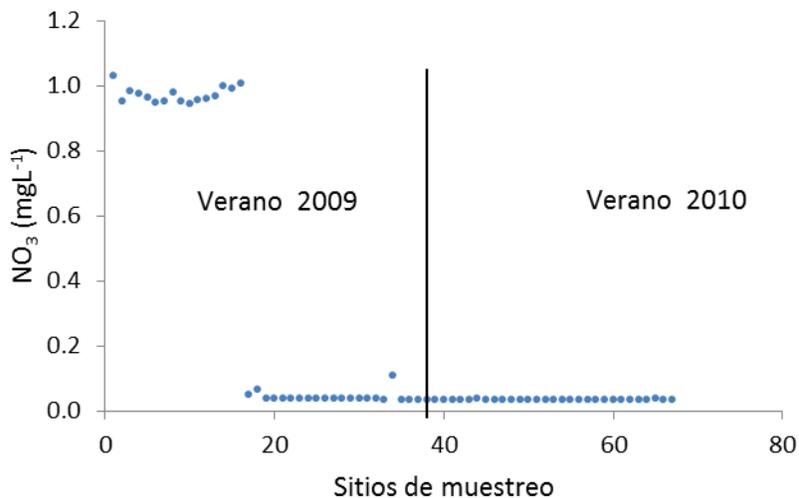


Figura 58. Contenidos de nitratos (mgL^{-1}), zona de calizas SLP-VER, verano de 2009 y verano 2010.

5.3 Síntesis de la red México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco

5.3.1 Flujo de cationes y aniones

En las Figuras 59 y 60, se presenta el flujo de iones de los muestreos de verano 2009 y verano 2010, de la red hidrográfica, desde México DF zona metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco. Se puede observar una alta variación de los iones a lo largo de la red hidrográfica. En cuanto a los cationes; son notables los altos valores de sodio, desde México DF-Zona Metropolitana, hasta Zimapán; disminuyendo considerablemente desde Zimapán hasta Tamazunchale y de aquí hasta el Pánuco. Comportamiento contrario tiene el calcio. En cuanto a los aniones el bicarbonato tiene un comportamiento similar al sodio. Por lo anterior las sales que predominan en la primera parte de la red, la cual se ha llamado aguas residuales del Valle del Mezquital, son las bicarbonatadas sódicas, y en la segunda parte de la red, las bicarbonatadas cálcicas; debido a que estas aguas están en contacto con los materiales calizos que predominan en esta región, provenientes de fuentes que finalmente tributan el río Moctezuma, que es la principal corriente en esta parte de la red.

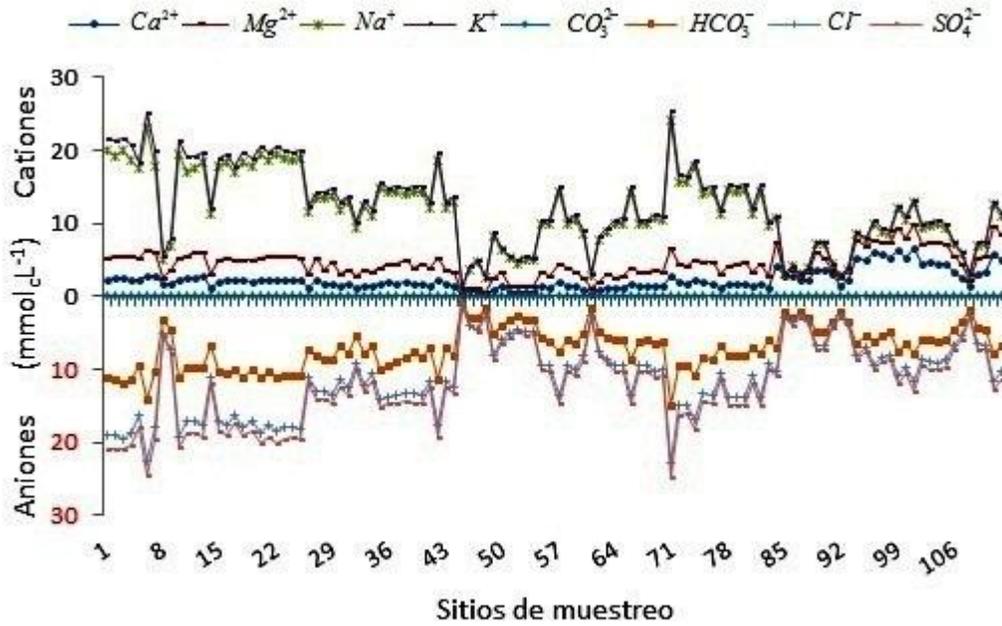


Figura 59. Flujo de iones, red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009.

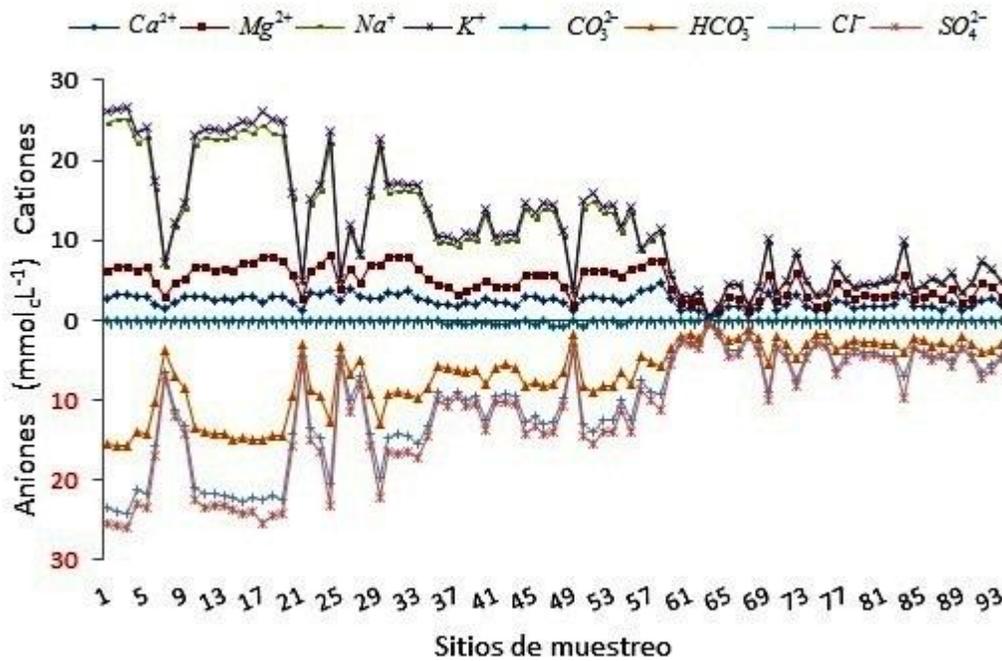


Figura 60. Flujo de iones, red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2010.

5.3.2 Efecto de dilución

Con el propósito de conocer el efecto de la dilución en las aguas residuales que riegan el Valle de Mezquital, se realizó un ensayo, que consistió en hacer una serie de diluciones de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 % con agua destilada, a una muestra de la estación Puente Pemex, Estado de México, en verano de 2010. En las Figuras 61 y 62, se observa como disminuye la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS_{or} , RAS_{aj} , RAS°), a medida que aumenta la dilución. Este comportamiento es un claro ejemplo de lo que sucede en la parte de la red Zimapán-Tamazunchale-Pánuco.

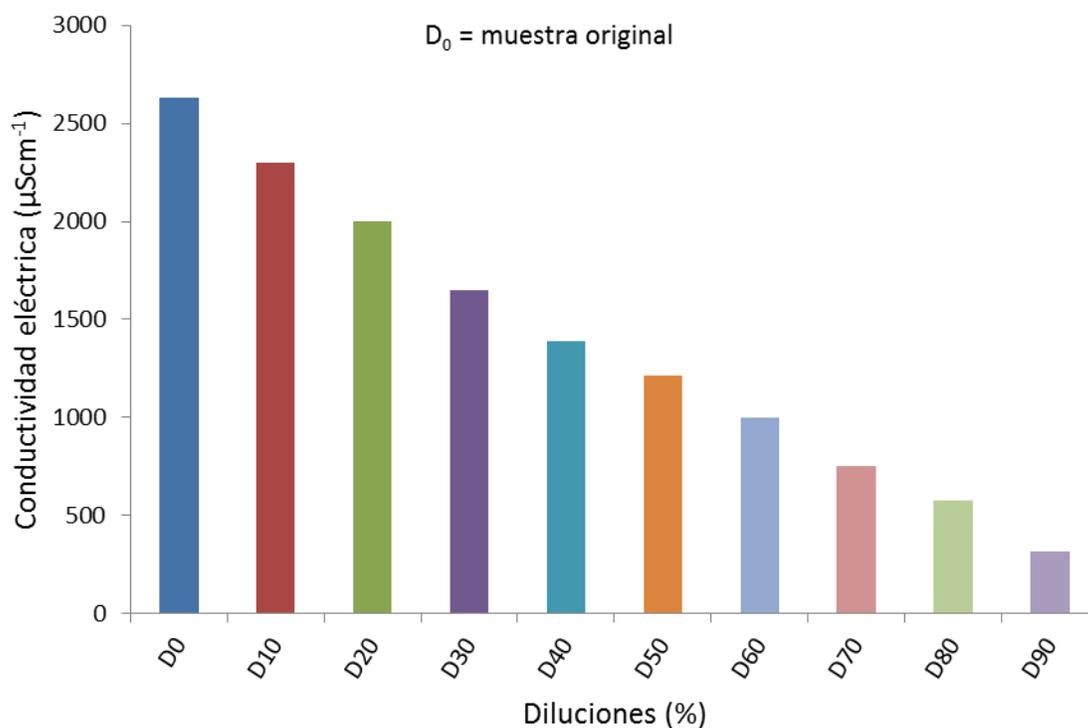


Figura 61. Conductividad eléctrica (μScm^{-1}) en función de la dilución.

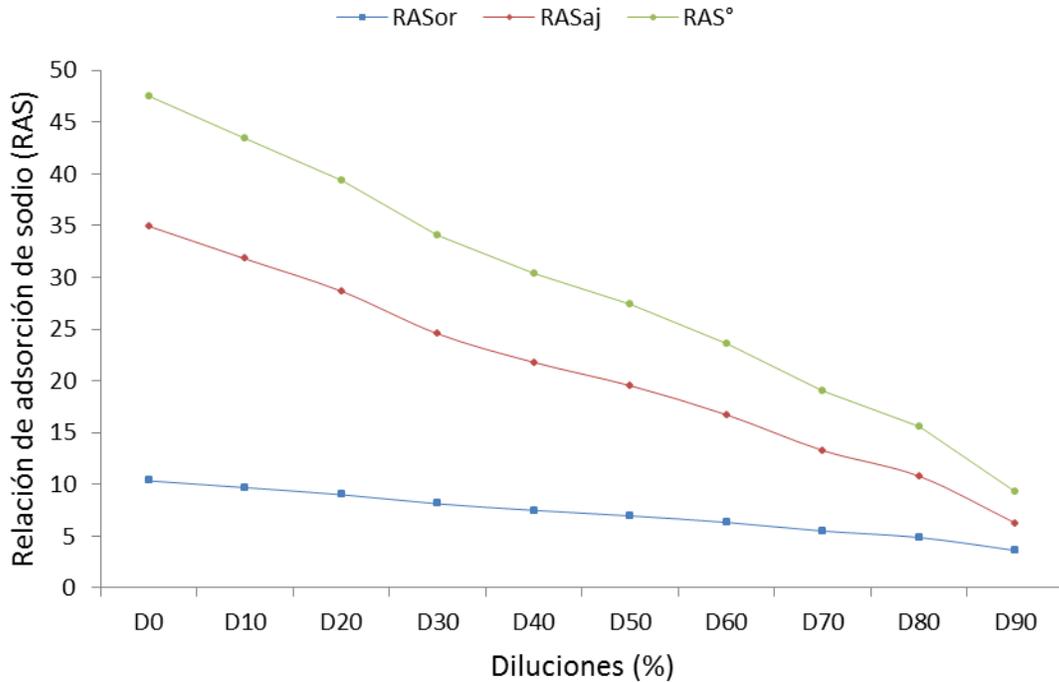


Figura 62. Relación de adsorción de sodio (*RAS*) en función de la dilución.

En el Cuadro 29 se presenta el cálculo de estimación de la relación de adsorción sodio (*RAS*), a partir de la ecuación $RAS_{final} = F_c^{\frac{1}{2}} \times RAS_{inicial}$, donde F_c , es la razón de proporcionalidad de concentración de la solución. Se encontró que partiendo de un $RAS_{inicial}$ de 6.96 y un F_c de 2.167, el valor del RAS_{final} estimado es de 10.24, siendo el correspondiente valor obtenido con las determinaciones iónicas de 10.35; lo anterior indica que este modelo es confiable para predecir los valores de la relación de adsorción de sodio (*RAS*), cuando ocurre un proceso de concentración o dilución en la solución del suelo.

Cuadro 29. Estimación del *RAS* a partir del factor de concentración (F_c).

Muestra	$CE(\mu S cm^{-1})$	RAS_{or}	F_c
D_0 (muestra original)	2633	10.35	
D_{10}	2300	9.69	1.144
D_{20}	2000	9.01	1.316
D_{30}	1650	8.14	1.595
D_{40}	1390	7.50	1.894
D_{50}	1215	6.96	2.167
D_{60}	1000	6.34	2.633
D_{70}	750	5.49	3.510
D_{80}	580	4.88	4.539
D_{90}	320	3.62	8.228

$$RAS_{final} = F_c^{\frac{1}{2}} \times RAS_{inicial} = 2.167^{\frac{1}{2}} \times 6.96 = 10.24$$

5.3.3 Sales hipotéticas

En las Figuras 63 y 64 se presentan las sales hipotéticas, correspondientes a los muestreos de verano 2009 y verano 2010, en la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco. Se puede observar que en los dos muestreos en la parte de la red comprendida entre México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, el predominio de las sales hipotéticas es: $NaCl > NaHCO_3 > Ca(HCO_3)_2 > Mg(HCO_3)_2 > MgSO_4 > KHCO_3$, esto se debe a los altos contenidos de los iones de sodio (Na^+) y bicarbonato (HCO_3^-), ocasionado por las aportaciones en las aguas residuales urbano-industriales de productos como detergentes, ácidos sulfúrico y clorhídrico, entre otros.

En la parte de la red comprendida entre Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, el predominio de las sales hipotéticas es: $Ca(HCO_3)_2 > NaCl > Mg(HCO_3)_2 > MgSO_4 > MgCl_2 > KHCO_3$, esto se debe a los altos contenidos de los iones calcio, magnesio y bicarbonato, propios de la zona de calizas SLP-VER por donde escurren estas aguas.

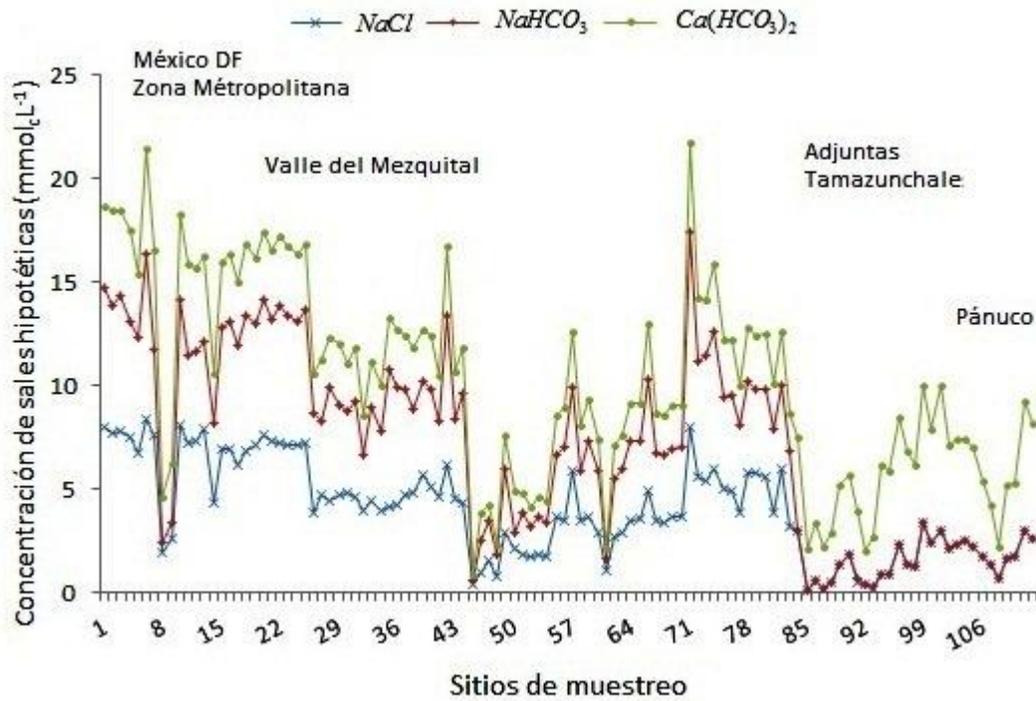


Figura 63. Distribución de sales hipotéticas en la red México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009.

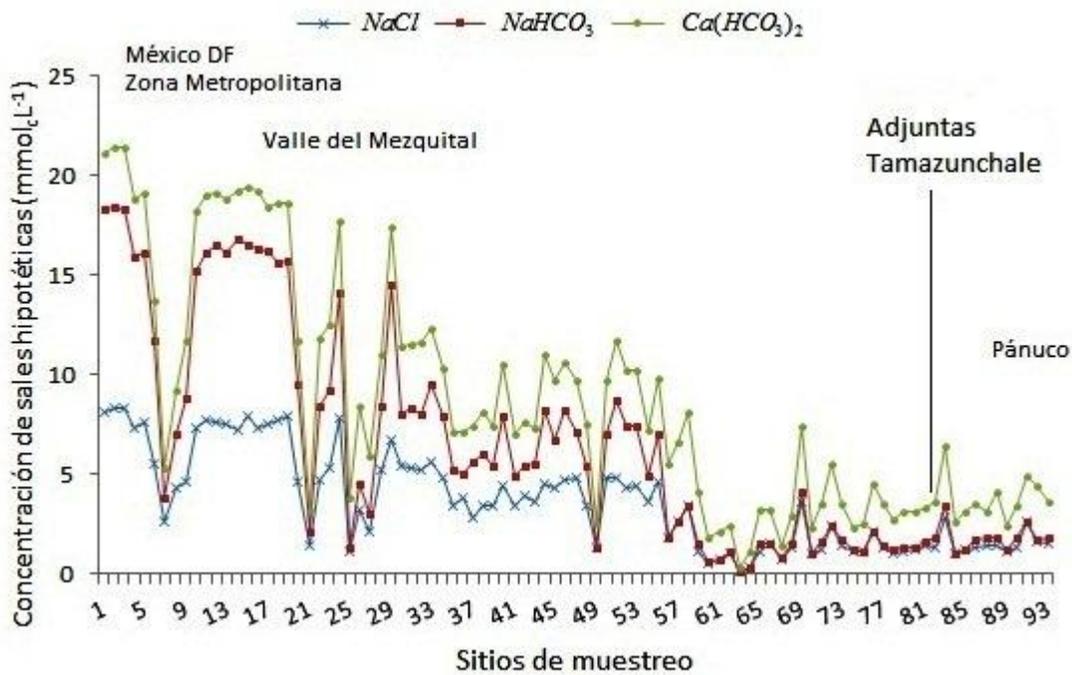


Figura 64. Distribución de sales hipotéticas en la red México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2010.

5.3.4 Carbonato de sodio residual (CSR)

En la Figura 65 se presenta la distribución de carbonato de sodio residual (CSR) de la población total de aguas (205 muestras), de la red México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco. Se puede observar que la parte de la red México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán; el 16.70 % fueron valores de $1.25 - 2.50 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$ (uso condicionado) y el 71.7 % valores mayores de $2.50 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$ (uso no recomendado); esto es concordante con la presencia de altas concentraciones de NaHCO_3 en estas aguas. Mientras en la parte de la red Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, el 100 % de los valores fueron menores de $1.25 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$, lo cual está relacionado con los altos contenidos de calcio y la presencia de mayores concentraciones de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ en estas aguas.

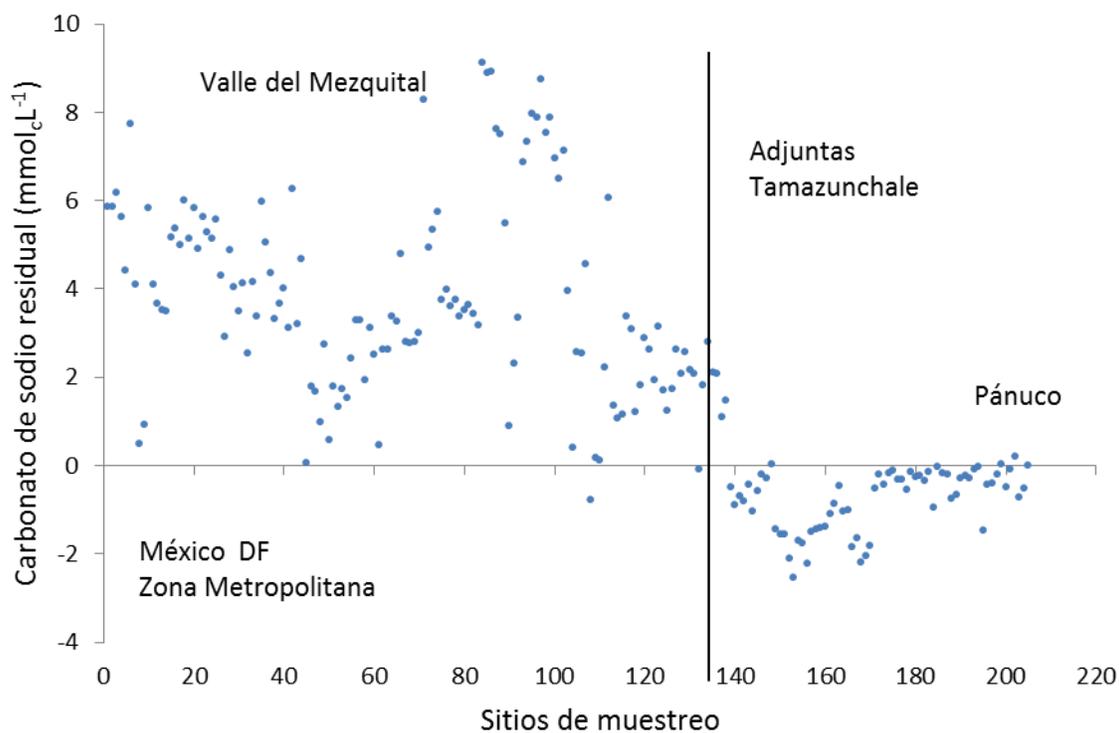


Figura 65. Distribución del carbonato de sodio residual en la red México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009 y verano 2010.

5.3.5 Variaciones de la relación de adsorción de sodio (RAS) y de la relación funcional $PSI - RAS$

En la Figura 66 se presenta las variaciones de la relación de sodio ($RAS_{or} - RAS_{aj} - RAS^\circ$) para la población total de aguas (205 muestras), de la red México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco. Se puede observar el predominio de altos valores del RAS ($RAS_{aj} > RAS^\circ > RAS_{or}$), en la parte de la red México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, debido a que el ión sodio (Na^+) se

comporta como: $\lim_{C_{Na^+} \rightarrow +\infty} \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}}}} = +\infty$. En la parte de la red Zimapán-Tamazunchale-

Pánuco, se observa una disminución marcada de los valores del RAS ($RAS_{aj} > RAS^\circ > RAS_{or}$), debido a que ión calcio (Ca^{2+}) se comporta como:

$$\lim_{C_{Ca^{2+}} \rightarrow +\infty} \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}}}} = 0.$$

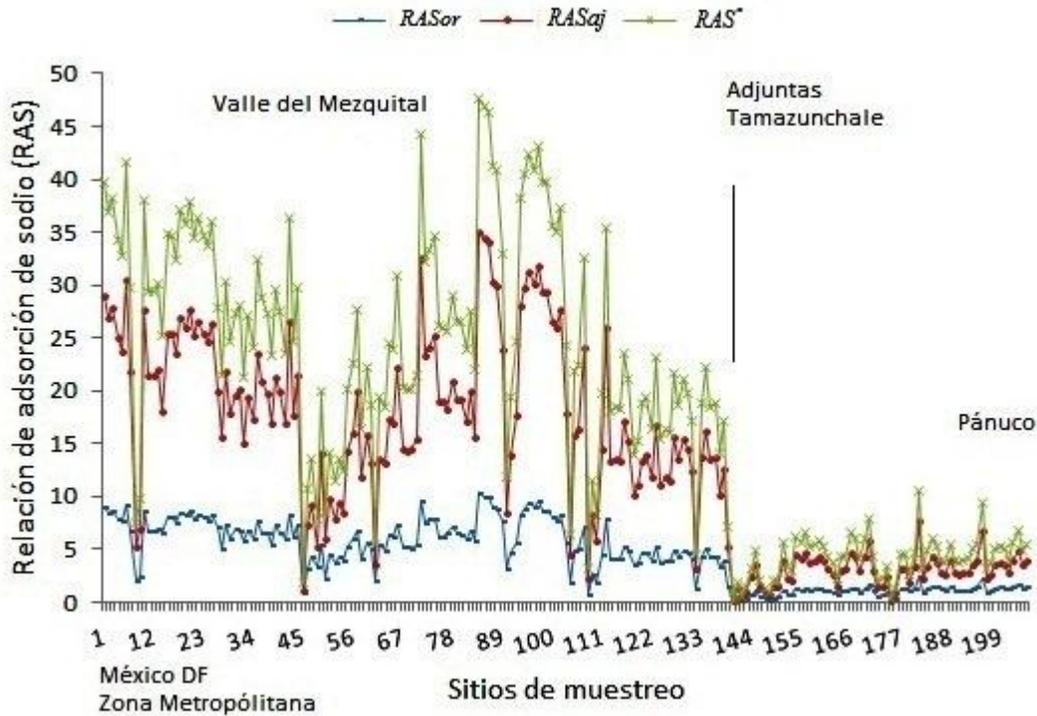


Figura 66. Variaciones del RAS ($RAS_{aj} > RAS^{\circ} > RAS_{or}$) en la red México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009 y verano 2010.

La relación funcional $PSI-RAS$, es un reflejo de las variaciones del RAS ($RAS_{aj} > RAS^{\circ} > RAS_{or}$), es decir en la zona del Valle del Mezquital, se generan los mayores valores del por ciento de sodio intercambiable (PSI), lo cual propicia una reacción alcalina ($pH > 8.0-9.0$) debido a los procesos de hidrólisis, causándose la solubilización gradual del silicio de los sistemas arcillosos de los suelos y por ende la destrucción de la estructura. En la Figura 67 se presenta la variación de la relación funcional $RAS-PSI$, para un coeficiente de selectividad iónica de 0.0168999, en la red hidrográfica en estudio para toda la población de aguas.

5.4 Aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México

5.4.1 Dinámica de las aguas freáticas

La variación de la profundidad de los mantos freáticos está íntimamente ligada con la precipitación, la recarga por riego y en menor proporción por causas circundantes. En el módulo de Riego de Temascalcingo, la principal fuente de recarga de los mantos freáticos es el riego por gravedad con aguas residuales del río Lerma. En el Cuadro 30, se presenta la variación de la profundidad del nivel freático para los muestreos de primavera de 2009 y verano de 2010. Las áreas con niveles freáticos entre 0 – 0.5 m y 0.5 – 1.0 m que se consideran como críticas por el efecto adverso en el suelo y la planta presentaron su mayor valor en primavera de 2009 (Figura 68), con 16.2 % (324 hectáreas) y 37.8 % (756 hectáreas) respectivamente. En verano de 2010, las áreas con estos rangos (0 – 0.5 m y 0.5 – 1.0 m), se redujeron a 5.0 % (100 hectáreas) y 11.1 % (220 hectáreas) respectivamente. Este comportamiento coincide, con estudios realizados en este Módulo de Riego por CNA-UACH (2003). La fluctuación de los mantos freáticos someros, permite inferir que es posible la salinización de los horizontes superficiales, debido a la evaporación de las aguas freáticas cuando estas contienen una alta concentración de sales.

Cuadro 30. Variación de la profundidad del nivel freático, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.

Profundidad del nivel freático <i>PNF</i> (m)	Primavera 2009		Verano 2010	
	%	Área (ha)	%	Área (ha)
0.0 – 0.5	16.2	324	5.0	100
0.5 – 1.0	37.8	756	11.1	220
1.0 – 1.5	32.4	648	47.8	956
1.5 – 2.0	8.1	162	21.7	434
> 2.0	5.5	110	17.4	348

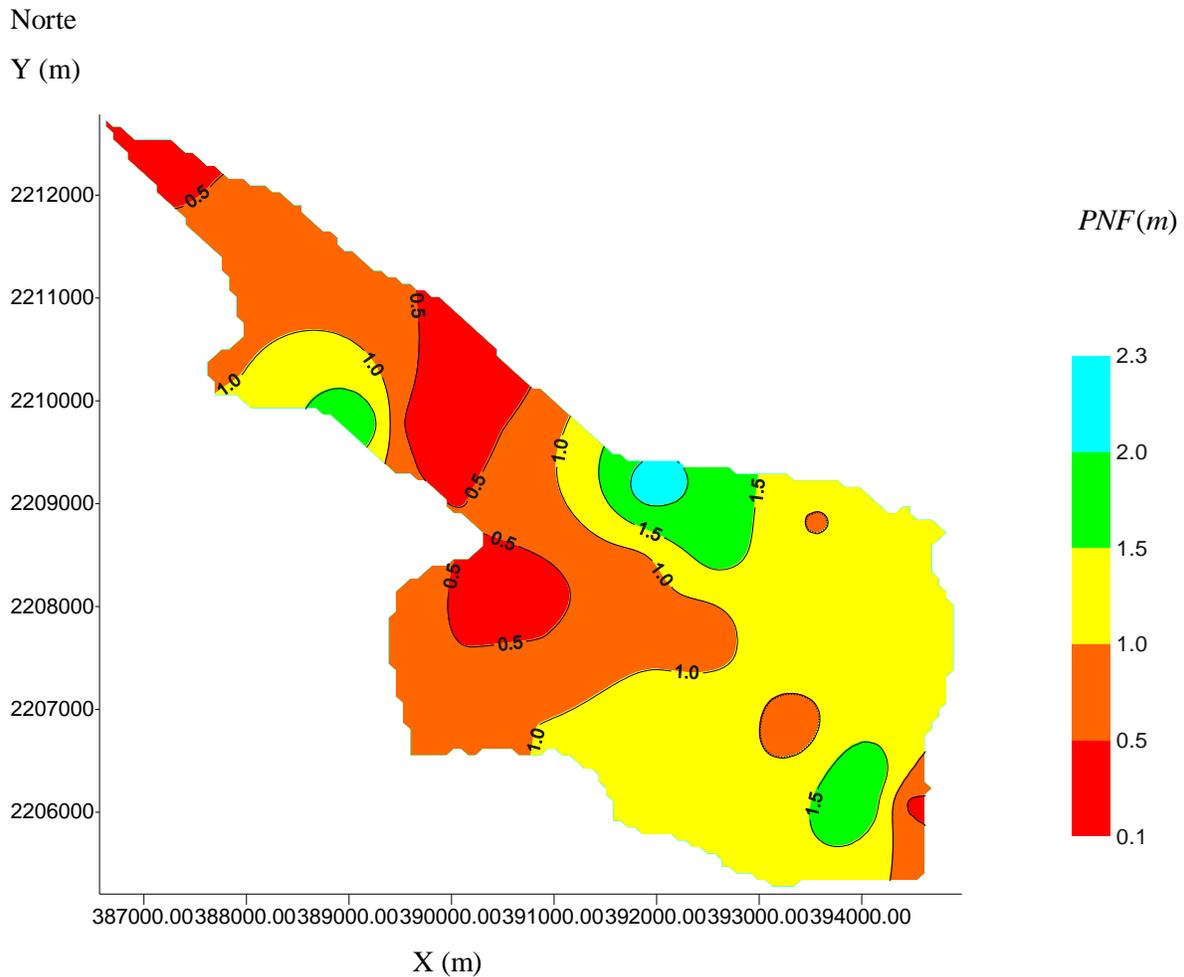


Figura 68. Plano de isobatas, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera de 2009.

Al analizar los planos de isohipsas de primavera 2009 y verano 2010, y los reportados por CNA-UACH (2003), se observa la tendencia que la dirección del flujo subterráneo es del Sureste y Suroeste hacia la parte central del Sureste del Módulo de Riego Temascalcingo; lo que indica que la zona de carga del manto freático está localizada en el Sureste y Suroeste, y la zona de descarga del flujo freático en la parte central del Módulo de Riego. En la Figura 69 se presenta el plano de isohipsas para el muestreo de primavera de 2009; donde el flujo convectivo a macro-escala funciona en la dirección del flujo de Darcy, el cual describe la dirección del flujo subterráneo, es decir, existe la posibilidad del transporte de sales desde la zona de carga hacia la zona de descarga del flujo freático.

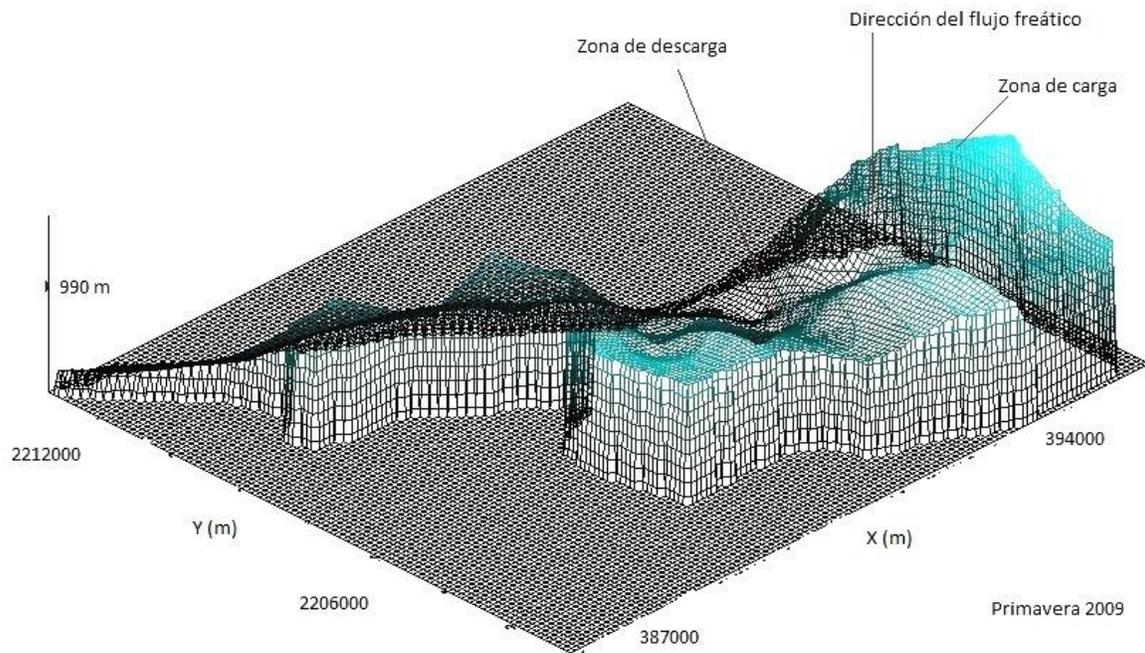


Figura 69. Plano de isohipsas, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera de 2009.

5.4.2 Composición iónica de las aguas freáticas

Los diferentes tipos de aguas de acuerdo con la relación iónica, se presentan en la Figura 70. Se puede observar que el 69.10 % de la población de aguas freáticas (38 muestras), tienen composición clorhídrica, y el 30.90 % (17 muestras) tienen composición sulfático-clorhídrica.

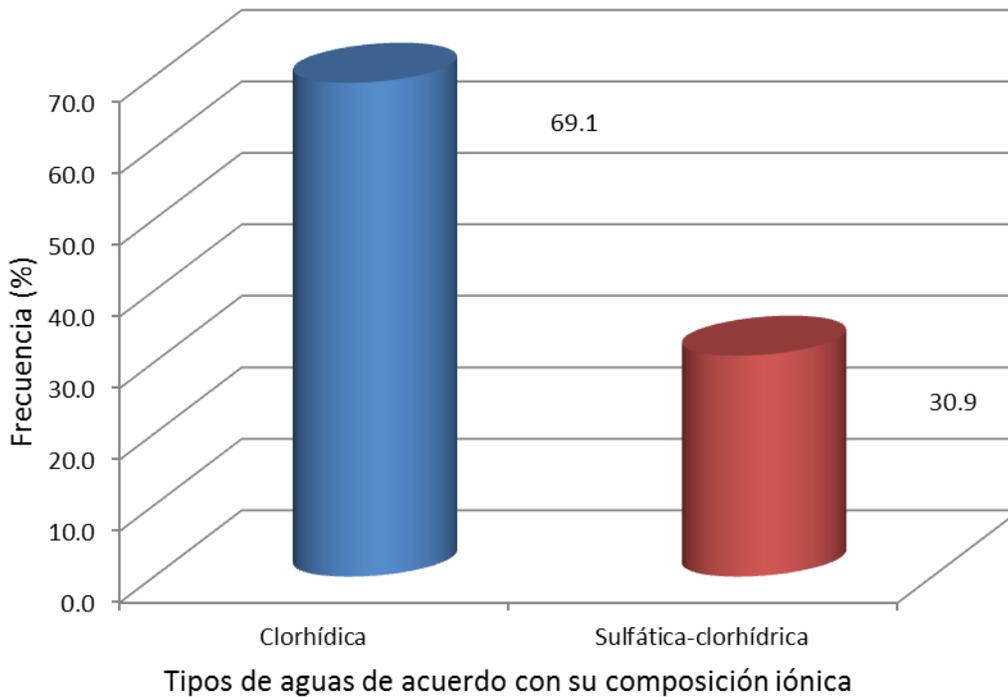


Figura 70. Tipos de aguas de acuerdo a su composición iónica, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.

En la Figura 71 se presentan las relaciones iónica $\frac{Ca^{2+}}{Mg^{2+}}, \frac{Na^+}{Ca^{2+}}, \frac{Na^+}{Mg^{2+}}$; se puede observar que en el 78.2 % (43 muestras) la relación $\frac{Ca^{2+}}{Mg^{2+}}$ es mayor de 1, lo cual indica que existen considerables cantidades de calcio con respecto al magnesio, y por otro lado, en lo concerniente a las relaciones $\frac{Na^+}{Ca^{2+}}$ y $\frac{Na^+}{Mg^{2+}}$; el 96.4 % (53 muestras) y 92.7 % (51 muestras) respectivamente, tienen valores menores de 1, lo cual indica el predominio del sodio con respecto a calcio y magnesio, lo cual se refleja en los valores de la relación de adsorción de sodio (*RAS*).

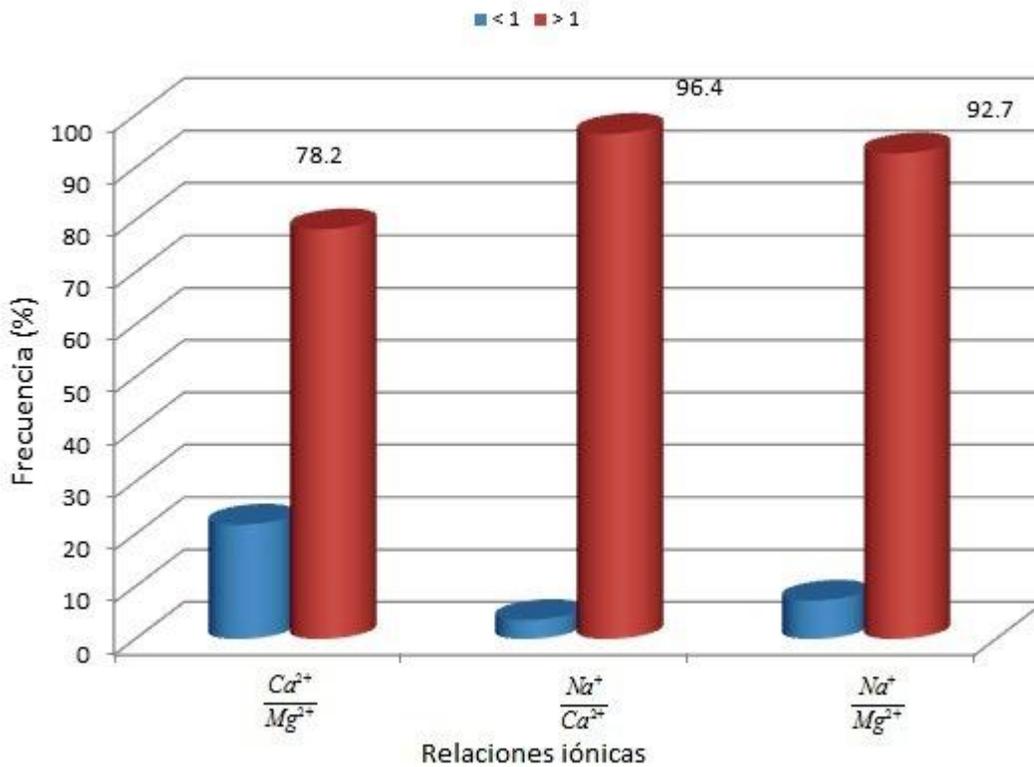


Figura 71. Relaciones iónicas entre Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.

5.4.3 Distribución de cationes y aniones

En las Figuras 72 y 73 se presentan las distribuciones de los cationes y aniones de los muestreos de primavera 2009 y verano 2010. Se observa en las dos figuras, que en el manto freático en lo referente a los cationes, el sodio (Na^+) ocupa la mayor superficie; y para los aniones es el bicarbonato (HCO_3), es decir predominan las sales bicarbonatadas de sodio, calcio y magnesio.

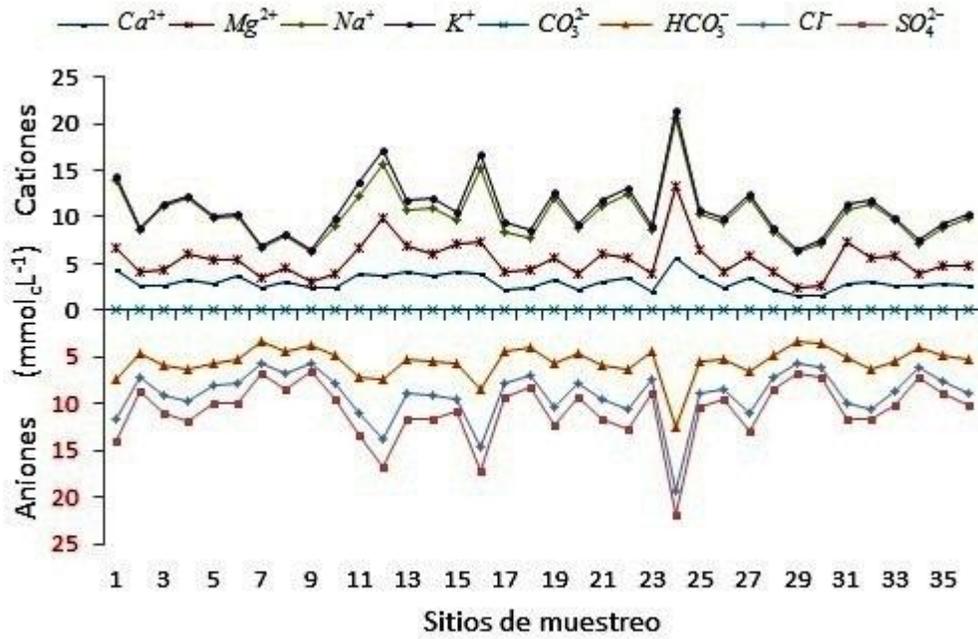


Figura 72. Composición iónica de las aguas freáticas, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera de 2009.

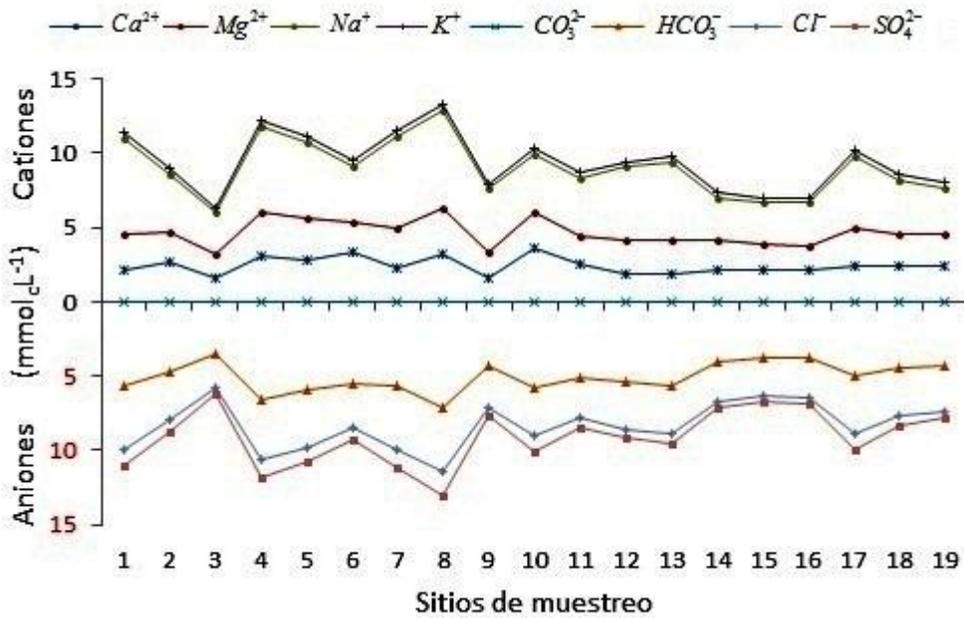


Figura 73. Composición iónica de las aguas freáticas, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, verano de 2010.

5.4.4 Distribución de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$)

En la Figura 74 se presenta la distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México. Se encontró, que de acuerdo en el diagrama de Richards (1973); el 12.70 % (7 muestras) fue C_2 ($250 - 750 \mu S cm^{-1}$) y el 87.30 % (48 muestras) fue C_3 ($750 - 2,250 \mu S cm^{-1}$). Es importante hacer notar que se encontró un valor medio de $1,055 \mu S cm^{-1}$ y un valor máximo de $2,146 \mu S cm^{-1}$. Teniendo en cuenta que la principal fuente de recarga de los mantos freáticos es el agua del río Lerma, derivada en la estación Andaró y suministrada por los canales margen izquierda y margen derecha a la zona de riego; y es de baja concentración (Anexo 5), se puede inferir que existe un proceso gradual de salinización del manto freático; ocasionado por las fluctuaciones de estas aguas freáticas; tal como se presenta en la figura 75, correspondiente al muestreo de primavera 2009; donde el 67 % (1,340 hectáreas) tiene conductividad eléctrica de $750 - 1,250 \mu S cm^{-1}$ y el 23.3 % (466 hectáreas) valores en el rango de $1,250 - 2,250 \mu S cm^{-1}$. Es importante mencionar que el rango de $750 - 1,250 \mu S cm^{-1}$ se incrementó a 70.6 % (1,412 hectáreas) en verano de 2010, debido a un proceso de reconcentración de las soluciones freáticas por evaporación y por ende un descenso de los niveles freáticos. Este comportamiento observado en el Módulo de Riego Temascalcingo tiene similitud a lo reportado por Mercado *et al.* (2011), en el Distrito de Riego La Doctrina, Colombia.

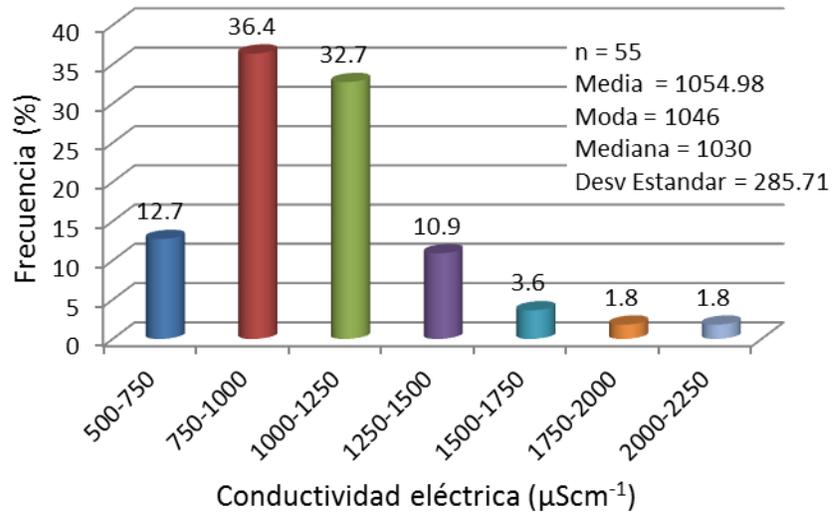


Figura 74. Distribución de frecuencia de la conductividad eléctrica (μScm^{-1}), aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.

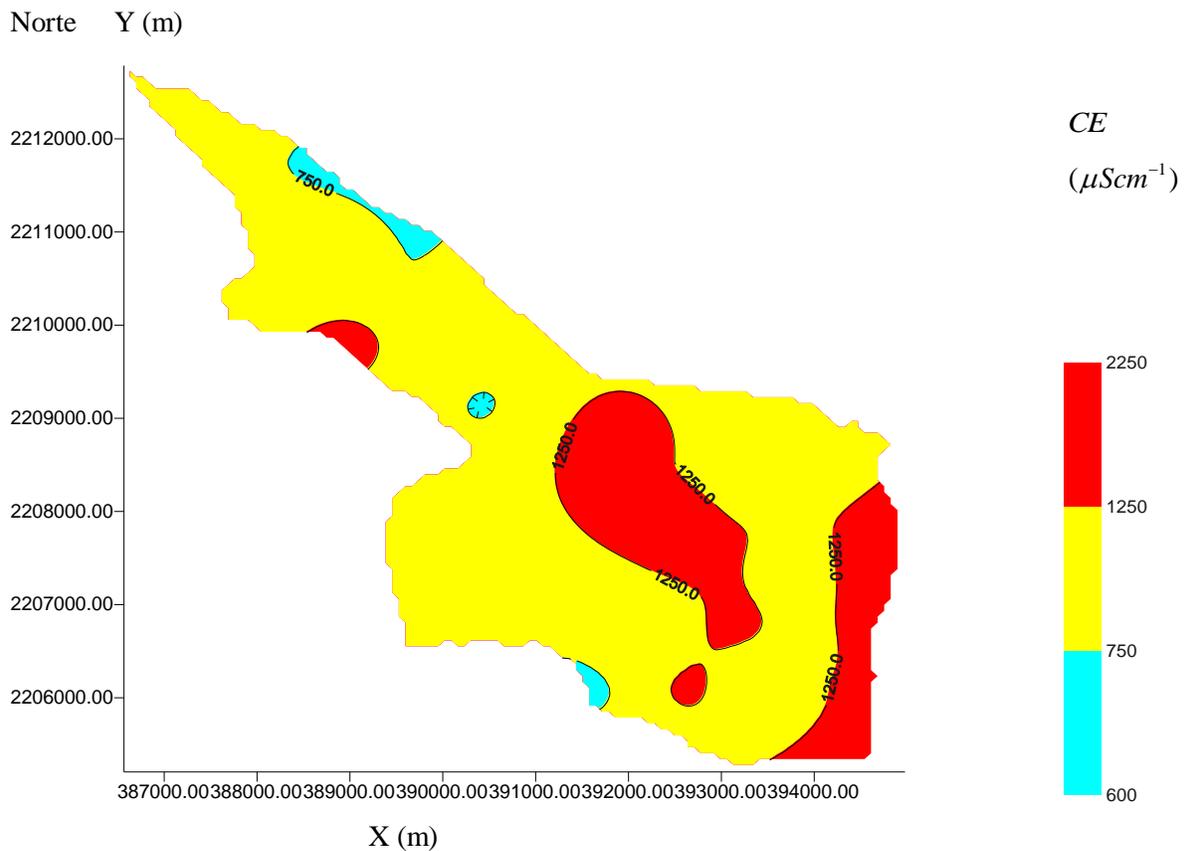


Figura 75. Plano de conductividad eléctrica (μScm^{-1}), Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2010.

En la Figura 76 se presenta la relación funcional, $CE_{teo} = fa(CE_{exp})$. De acuerdo con los valores de la pendiente (1.0649) y el coeficiente de correlación (0.9969) encontrados; se concluye que las mediciones experimentales de la conductividad eléctrica están correctas. Lo anterior indica que la ley de disociación electrolítica, explica que la conductividad eléctrica de una solución es proporcional a su concentración iónica.

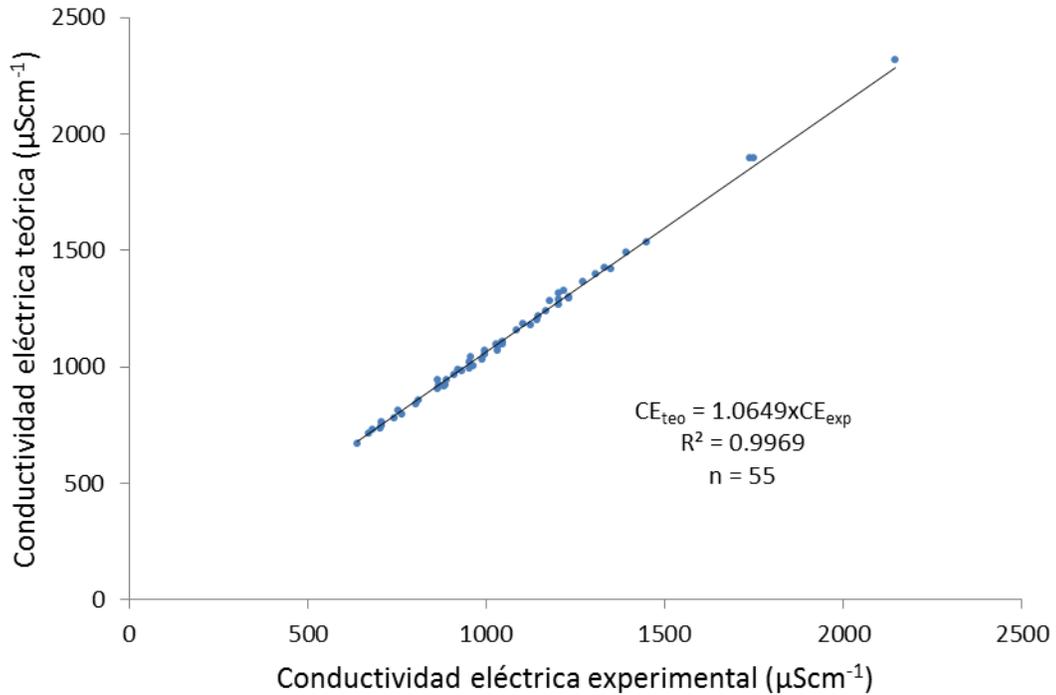


Figura 76. Relación funcional entre conductividad eléctrica teórica (μScm^{-1}) y conductividad eléctrica experimental (μScm^{-1}), Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.

5.4.5 Relación entre mgL^{-1} analíticos y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$)

La relación funcional, $mgL^{-1} = fa(CE_{exp})$, se presenta en la Figura 77; el valor de la pendiente encontrado fue de 0.6926, el cual corresponde a soluciones ricas en bicarbonato (HCO_3), en este caso se debe al predominio de sales como $NaHCO_3$, $Ca(HCO_3)_2$ y $Mg(HCO_3)_2$.

En los mantos freáticos del Módulo de Riego Temascalcingo, la concentración de la solución en el rango de 500 – 1,000 mgL^{-1} se incrementó de 79 % (1,580 hectáreas) en primavera de 2009 a 82.4 % (1,648 hectáreas) en verano de 2010 (Figura 78); debido a la ocurrencia de un proceso de reconcentración de la solución freática, por descenso de los niveles freáticos.

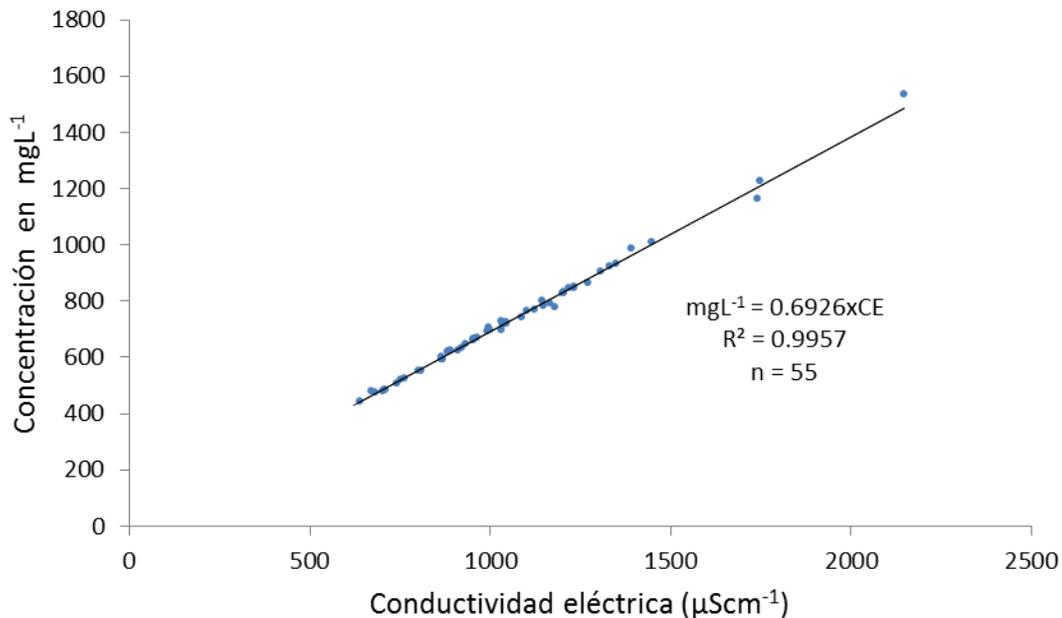


Figura 77. Relación entre concentración (mgL^{-1}) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, primavera 2009 y verano 2010.

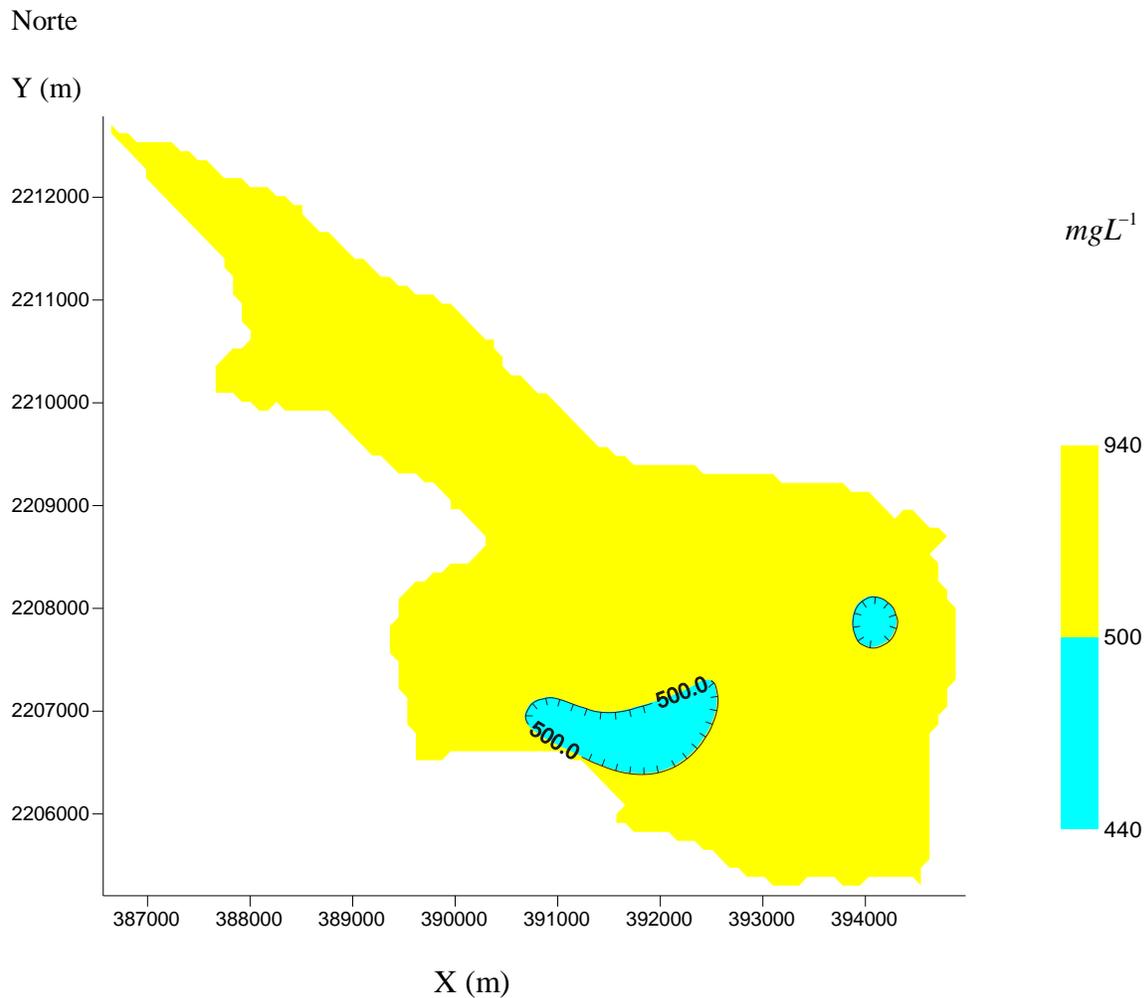


Figura 78. Plano de concentración (mgL^{-1}), Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, verano 2010.

5.4.6 Relación entre presión osmótica (atm) y conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$)

La presión osmótica se obtuvo al correlacionar las relaciones funcionales $mgL^{-1} = fa(CE)$ obtenida para estas aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo y $PO(atm) = fa(CE)$, reportada en muchas investigaciones (Velázquez, 2001; Mendoza, 2009), de la siguiente manera:

$$mgL^{-1} = 0.6926 \times CE(\mu S cm^{-1})$$

$$PO(atm) = 0.0004 \times CE(\mu S cm^{-1})$$

$$\text{Siendo, } PO(\text{atm}) = \frac{0.0004}{0.6926} \times \text{mgL}^{-1} = 0.000575 \times \text{mgL}^{-1},$$

donde, PO , es la presión osmótica en atmósfera, 0.0004 es la pendiente de la recta en la relación funcional $PO(\text{atm}) = fa(CE)$, 0.6926 es la pendiente de la recta en la relación funcional $\text{mgL}^{-1} = fa(CE)$ en la población de aguas y mgL^{-1} , expresa la concentración de la solución.

En la Figura 79 se presenta la relación funcional, $PO_{\text{teórica}}(\text{atm}) = fa(PO_{\text{experimental}})$, donde el valor de la pendiente es 0.9977, el cual corresponde a soluciones donde predomina el bicarbonato (HCO_3^-) en sales como Na_2HCO_3 , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ y $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$.

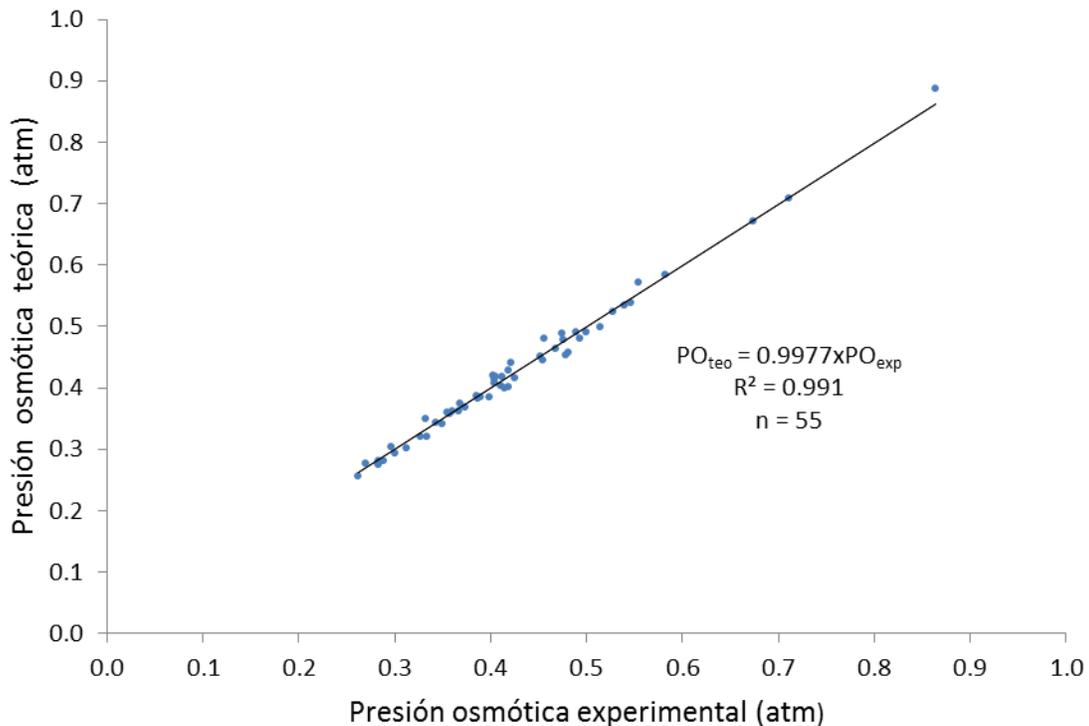


Figura 79. Relación entre presión osmótica teórica (atm) y presión osmótica experimental (atm), Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera de 2009 y verano de 2010.

En la Figura 80, se presenta el plano de presión osmótica del nivel freático para primavera de 2009. Se encontró que el 67.6 % (1,352 hectáreas) tienen valores de 0.3 – 0.5 atmósferas, y el 23.5 % (470 hectáreas) valores de 0.5 – 1.0 atmósferas; estos altos rangos de presión osmótica coinciden con las áreas freáticas de mayor conductividad eléctrica; lo cual es una evidencia de la relación funcional $PO(atm) = fa(CE)$.

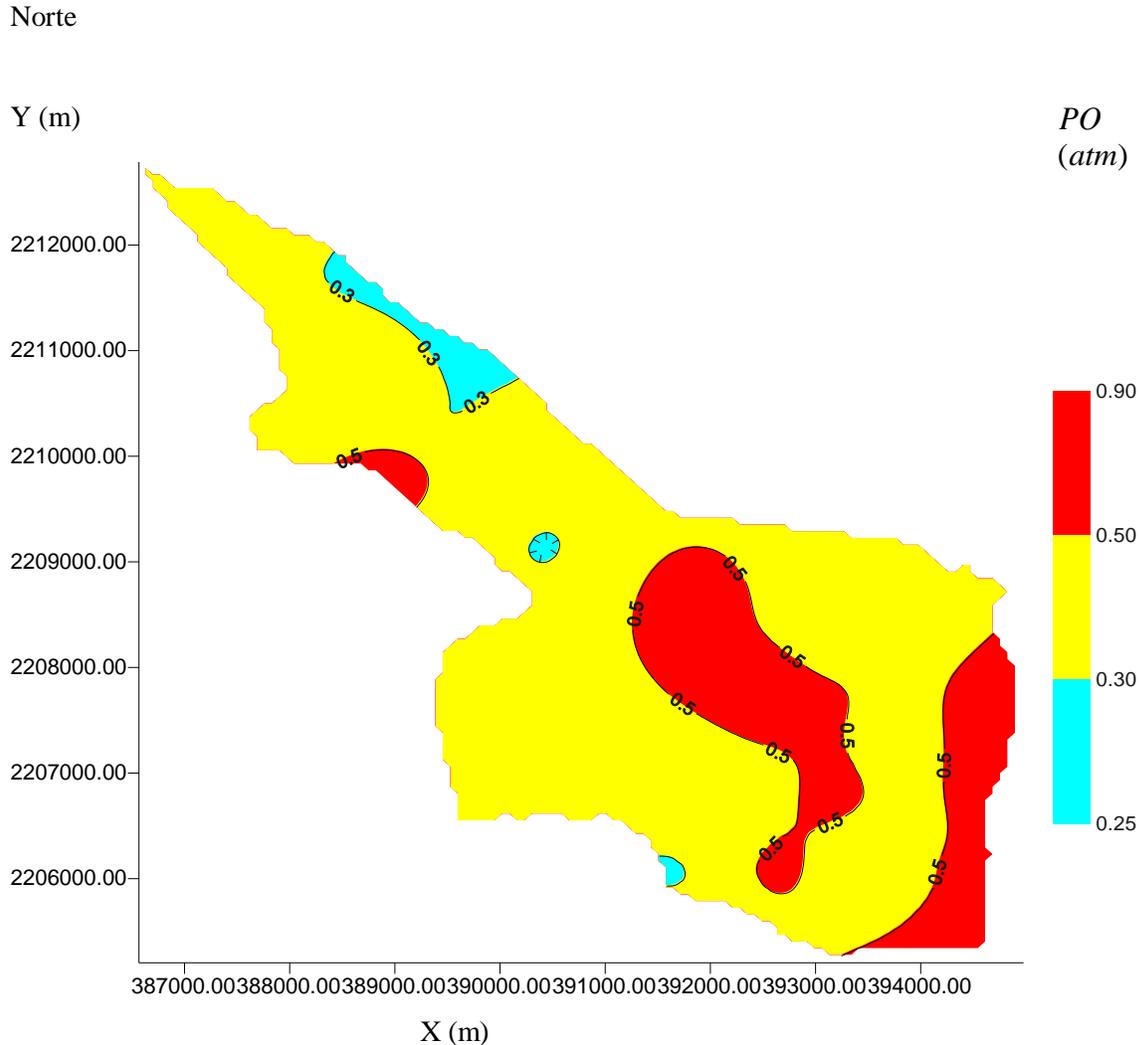


Figura 80. Plano de presión osmótica (atm) de las aguas freáticas, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera de 2009.

5.4.7 Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) y conductividad eléctrica (μScm^{-1})

En la Figura 81 se presenta la relación funcional, $I(ML^{-1}) = fa(CE)$; la fuerza iónica se calculó con la ecuación (3.2.1.15). El valor de la pendiente fue 0.00001; este valor coincide con los valores reportados por Griffin y Jurinak (1973), y Mihelcic *et al.* (2008).

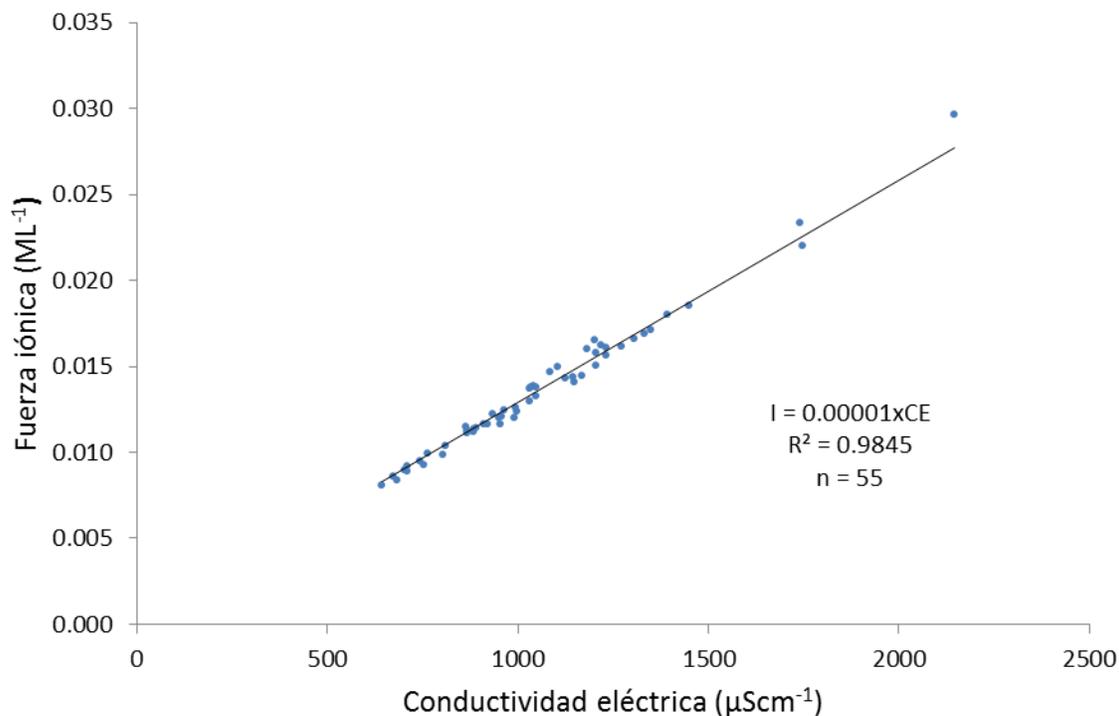


Figura 81. Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) y conductividad eléctrica (μScm^{-1}), aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.

5.4.8 Sales hipotéticas

Las sales hipotéticas se calcularon teniendo en cuenta la Solubilidad de las sales, los Klarcos, el principio de Langelier y la Geoquímica de los iones. En los Cuadros 31 y 32, se presenta el cálculo de las sales hipotéticas, correspondiente a la muestra del pozo de observación 5, del muestreo de primavera 2009.

Cuadro 31. Composición iónica, muestra pozo 5, aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009.

<i>pH</i>	<i>CE</i>	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	$\Sigma_{cationes}$	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	$\Sigma_{aniones}$	$\Delta\Sigma$
	$\mu S cm^{-1}$	$mmol_c L^{-1}$										
7.10	1032	2.90	2.40	4.69	0.20	10.19	0.00	5.75	2.20	1.98	9.93	0.26

Cuadro 32. Cálculo de sales hipotéticas, muestra pozo 5, aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009.

Reactivos ($mmol_c L^{-1}$)		Sales hipotéticas ($mmol_c L^{-1}$)		Residuos ($mmol_c L^{-1}$)	
Na^+	+	Cl^-	$NaCl$	Na^+	Cl^-
4.69		2.20	2.20	2.49	0.00
Na^+	+	HCO_3^-	$NaHCO_3$	HCO_3^-	Na^+
2.49	+	5.75	2.49	3.26	0.00
K^+	+	HCO_3^-	$KHCO_3$	HCO_3^-	K^+
0.20		3.26	0.20	3.06	0.00
Ca^{2+}	+	HCO_3^-	$Ca(HCO_3)_2$	HCO_3^-	Ca^{2+}
2.90		3.06	2.90	0.16	0.00
Mg^{2+}	+	HCO_3^-	$Mg(HCO_3)_2$	Mg^{2+}	HCO_3^-
2.40		0.16	0.16	2.24	0.00
Mg^{2+}	+	SO_4^{2-}	$MgSO_4$	Mg^{2+}	SO_4^{2-}
2.24		1.98	1.98	0.26	0.00
			9.93		

Los valores de las sales hipotéticas del Cuadro 32, equivalen a $0.0022 ML^{-1}$ de $NaCl$, $0.00249 ML^{-1}$ de $NaHCO_3$, $0.00020 ML^{-1}$ de $KHCO_3$, $0.00145 ML^{-1}$ de $Ca(HCO_3)_2$, $0.00008 ML^{-1}$ de $Mg(HCO_3)_2$ y $0.00099 ML^{-1}$ de $MgSO_4$. Con estos valores y utilizando la ecuación (3.2.1.22), el valor de la fuerza iónica de las sales

hipotéticas fue de 0.0134 ML^{-1} . Con este procedimiento se calcularon las sales hipotéticas y su respectiva fuerza iónica de cada una de las muestras de primavera 2009 y verano de 2010.

La distribución de los tipos de sales hipotéticas de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, se presentan en las Figuras 82 y 83. El orden de predominancia es: $\text{NaCl} > \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 > \text{NaHCO}_3 > \text{MgSO}_4 > \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 > \text{KHCO}_3$. Las relaciones conjuntas de la fuerza iónica de las muestras de agua, calculada para los iones individuales de las soluciones y la fuerza iónica calculada para las sales hipotéticas en los muestreos de primavera 2009 y verano 2010, se presentan en las figuras 84 y 85. Los valores de las pendientes (1.0201 y 1.0220) y de los coeficientes de correlación (1.0 y 0.9996) en las dos gráficas, indican que los dos métodos de cálculo de la fuerza iónica son correctos y precisos.

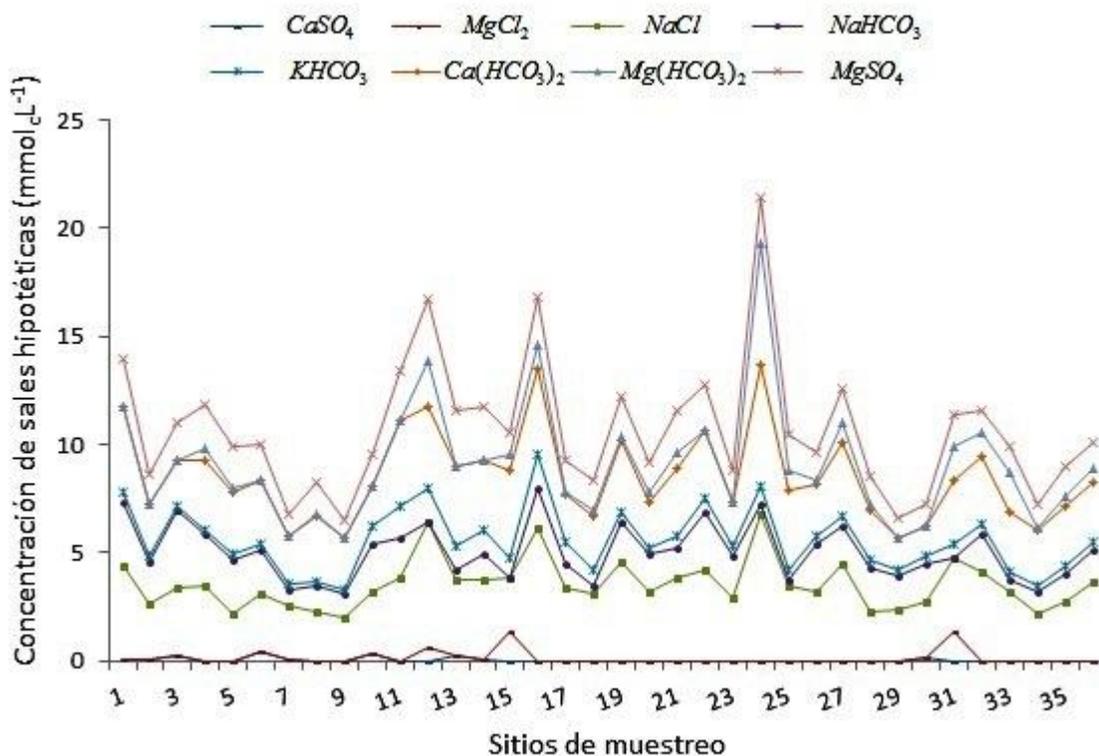


Figura 82. Distribución de las sales hipotéticas, aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009.

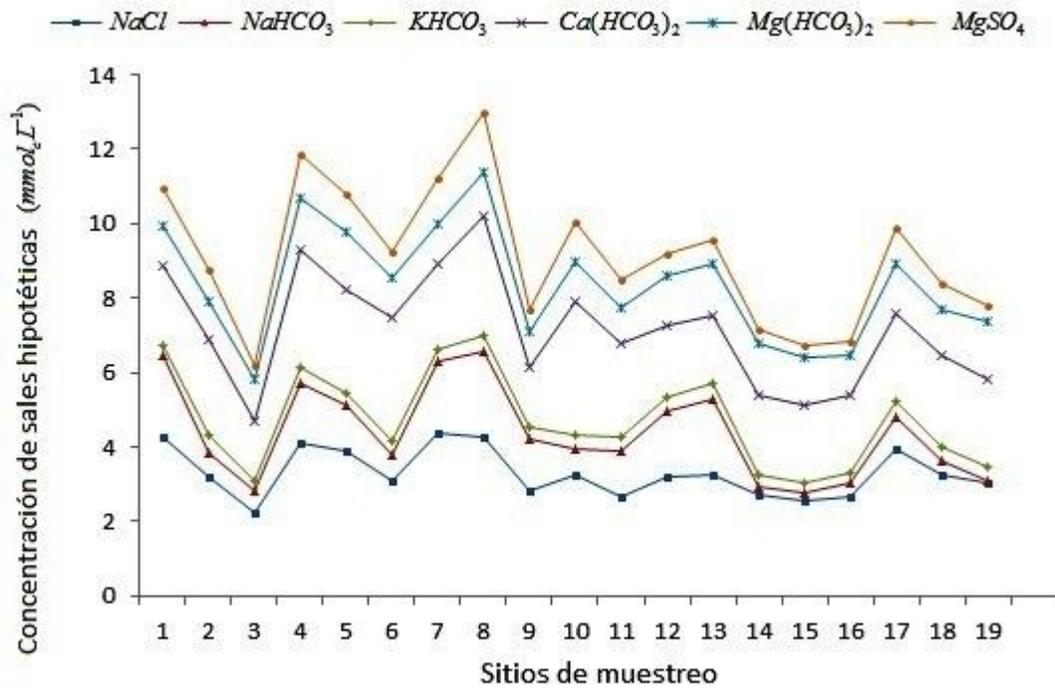


Figura 83. Distribución de las sales hipotéticas, aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, verano 2010.

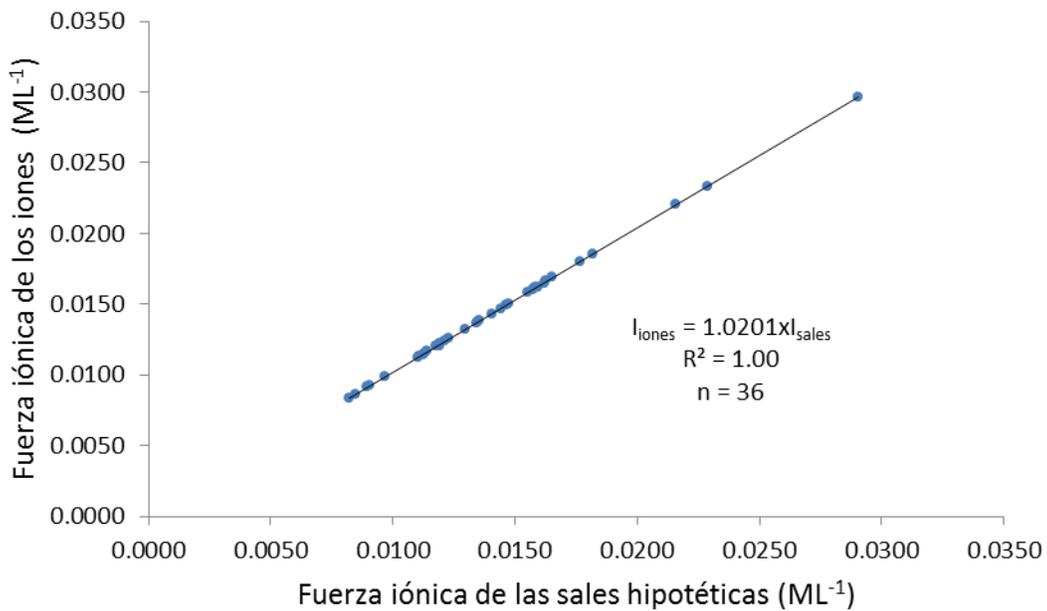


Figura 84. Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) de los iones individuales y fuerza iónica (ML^{-1}) de las sales hipotéticas, aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009.

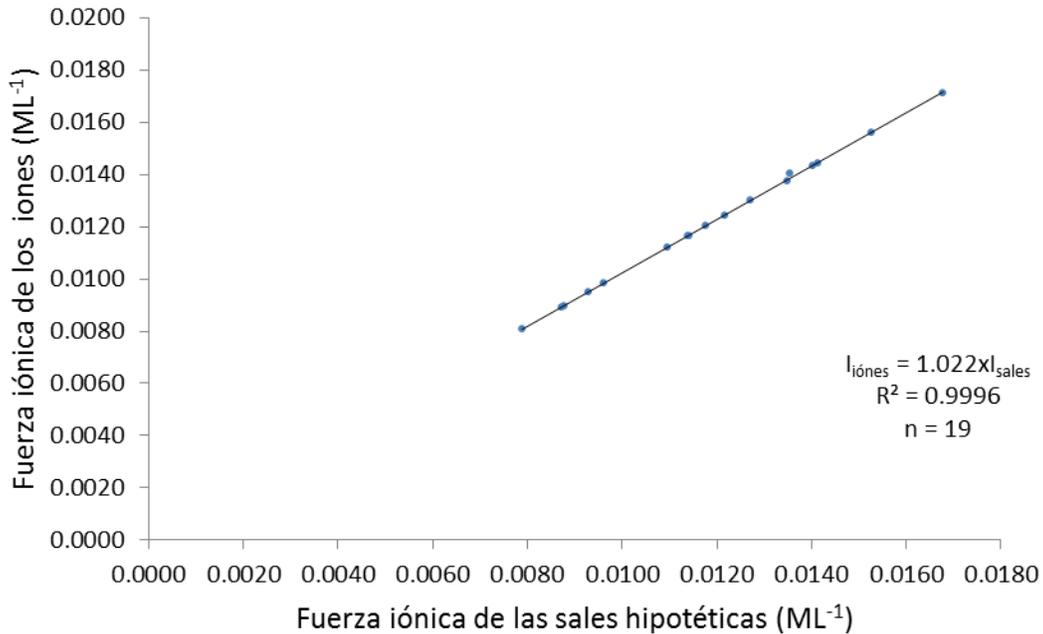


Figura 85. Relación entre fuerza iónica (ML^{-1}) de los iones individuales y fuerza iónica (ML^{-1}) de las sales hipotéticas, aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, verano 2010.

5.4.9 Clasificación de las aguas de acuerdo con la relación de adsorción de sodio (RAS)

En las Figuras 86 y 87 se presentan las relaciones funcionales, $RAS_{aj} = fa(RAS_{or})$ y $RAS^{\circ} = fa(RAS_{or})$. Con los valores numéricos de los diferentes conceptualizaciones del RAS , se pueden estimar los valores del porcentaje de sodio intercambiable PSI (ecuación 3.2.2.7).

En el Cuadro 33 y el Anexo 10 se presenta la distribución de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, de acuerdo con los valores numéricos de la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio.

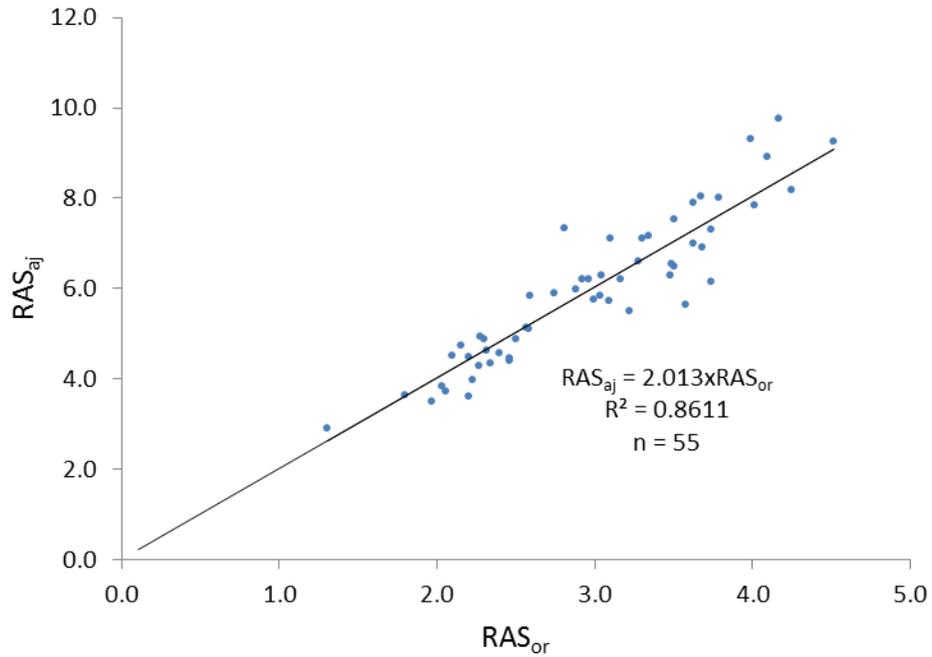


Figura 86. Relación entre RAS_{aj} y RAS_{or} , aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.

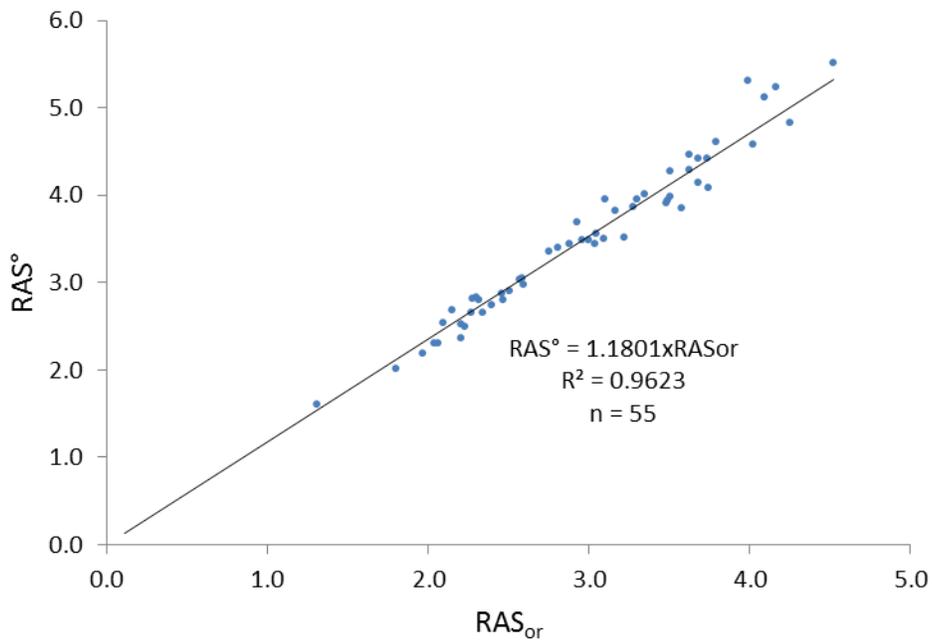


Figura 87. Relación entre RAS^o y RAS_{or} , aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.

Cuadro 33. Clasificación de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, de acuerdo con la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y los diferentes *RAS*.

Formulaciones del <i>RAS</i>	C_2S_1	C_3S_1	C_3S_2
	Número de muestras		
RAS_{or}	6	49	-
RAS_{aj}	7	21	27
RAS°	7	46	2

Aunque los valores del *RAS* del Cuadro 33 indican bajo riesgo de sodicidad, en la distribución espacial del RAS_{aj} (Figura 88), se encontró que el 47 % de la superficie freática (940 hectáreas) tienen valores de 3 – 6, y el 53 % (1,060 hectáreas) valores de 6 – 12; lo cual, bajo condiciones de baja concentración electrolítica de la solución, puede generar problemas de dispersión en el suelo por sodio (Na^+).

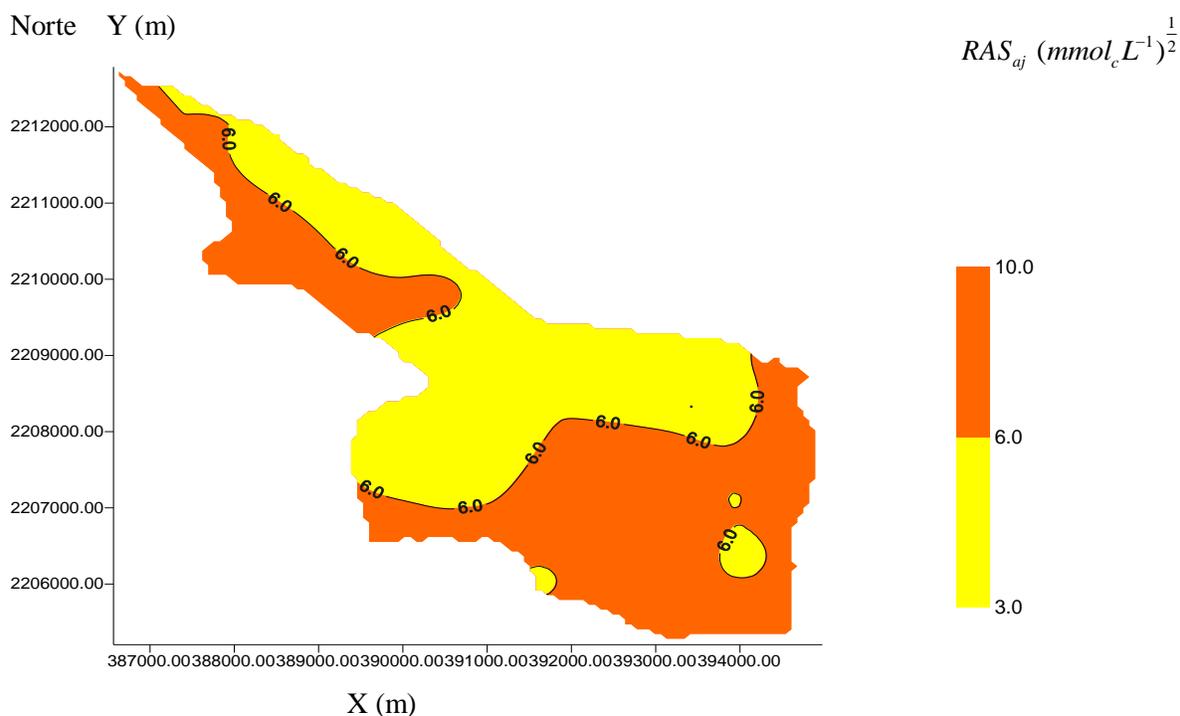


Figura 88. Plano de RAS_{aj} de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009.

5.4.10 Clasificación de las aguas de acuerdo al riesgo de disminución de la infiltración

En el Cuadro 34 y el Anexo 11 se presenta la clasificación por riesgo de reducción de la infiltración, de acuerdo con la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y la relación de adsorción de sodio en sus diferentes formulaciones (*RAS*). Esta clasificación toma en cuenta las variaciones que tienen las concentraciones de calcio, debido a la precipitación o disolución de la calcita ($CaCO_3$). Se puede observar que las tres formulaciones del *RAS* (RAS_{or} , RAS_{aj} , RAS°), indican que un alto porcentaje de las muestras (65.4, 96.4 y 72.7 % respectivamente), pueden ocasionar una reducción ligera a moderada de la infiltración, es decir, puede existir un efecto de dispersión ocasionado por el sodio (Na^+).

Cuadro 34. Clasificación de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, de acuerdo con el riesgo de reducción de la infiltración.

Formulaciones del <i>RAS</i>	Sin reducción	Reducción ligera a moderada	Reducción severa
	Número de muestras		
RAS_{or}	19	36	-
RAS_{aj}	2	53	-
RAS°	15	40	-

5.4.11 Clasificación de las aguas, de acuerdo con el carbonato de sodio residual (*CSR*)

En la Figura 89 se presenta la distribución de las aguas freáticas, de acuerdo al carbonato de sodio residual (*CSR*); se puede observar que el 5.5 % de la población de aguas, presenta valores de $1.25 - 2.50 \text{ mmol}_c L^{-1}$ (condicionadas). Las áreas freáticas de este rango del carbonato de sodio residual; coinciden con las áreas donde se presentan los mayores valores de la relación de adsorción de sodio *RAS* (Figura 90).

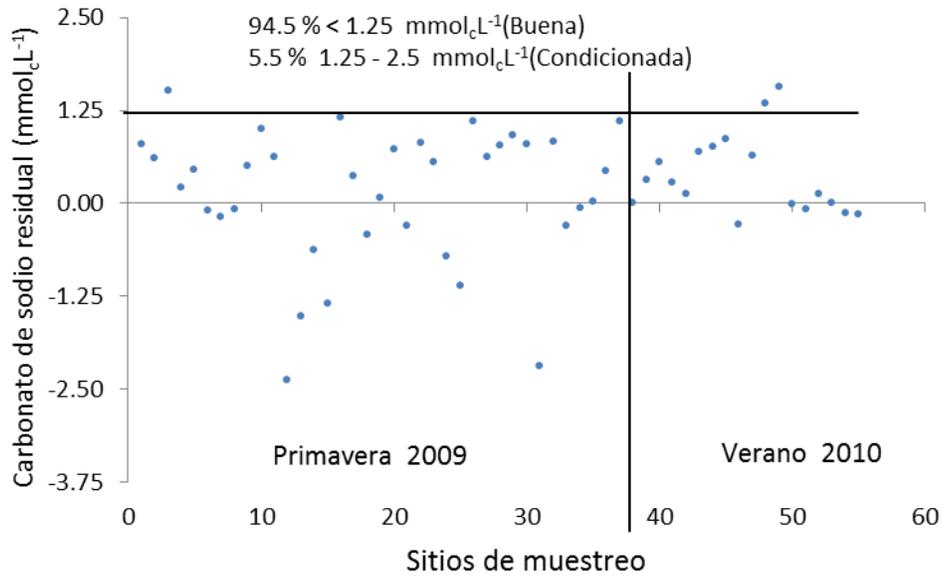


Figura 89. Distribución de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, de acuerdo al carbonato de sodio residual ($\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$), primavera 2009 y verano 2010.

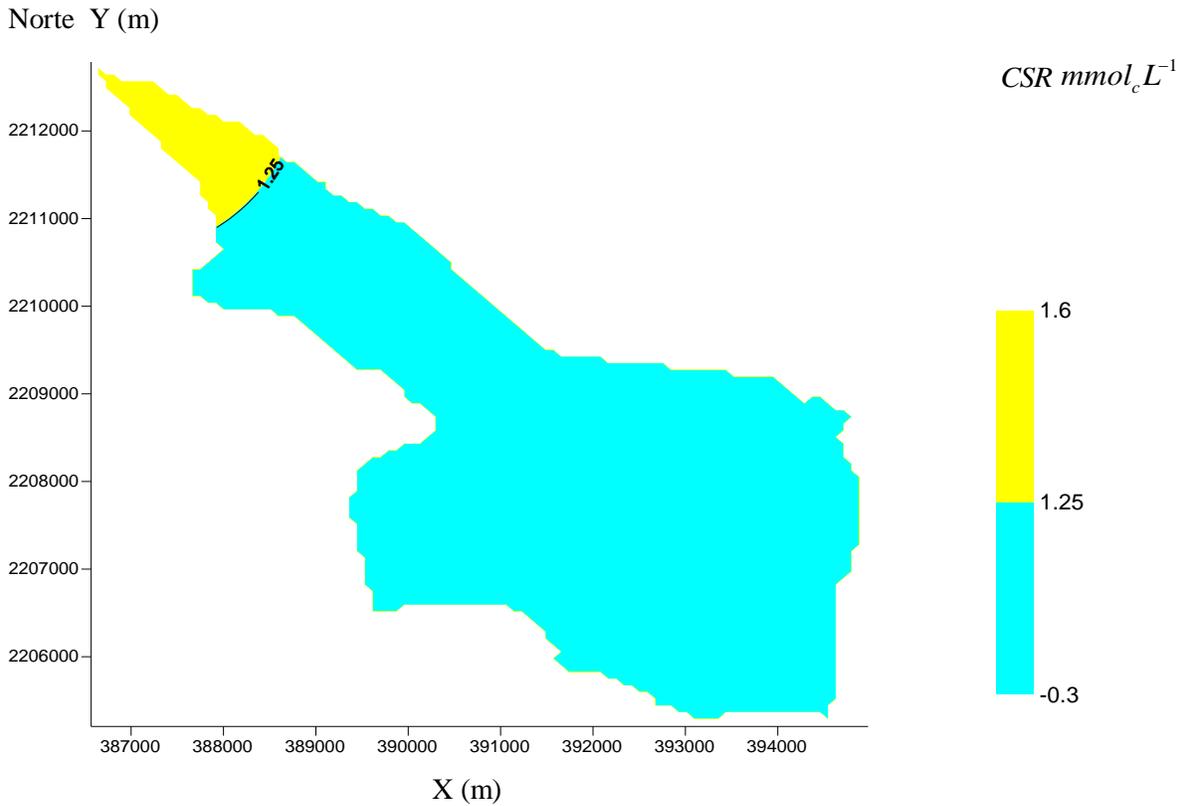


Figura 90. Plano de carbonato de sodio residual ($\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$) de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, verano 2010.

5.4.12 Relación funcional $PSI - RAS$

En las Figuras 91 y 92, y Anexo 12 se presentan las relaciones funcionales; $PSI = fa(RAS_{or})$, $PSI = fa(RAS_{aj})$ y $PSI = fa(RAS^\circ)$, calculada cada una con los siguientes valores de coeficiente de selectividad iónica $kg' = [mmol_c L^{-1}]^{-\frac{1}{2}}$: $K_1 = 0.0072444$; $K_2 = 0.01$; $K_3 = 0.0115220$; $K_4 = 0.0118610$; $K_5 = 0.0140113$; $K_6 = 0.0147500$; $K_7 = 0.015840$ y $K_8 = 0.0168999$. Se puede observar en las figuras de las relaciones funcionales, un conjunto de valores mínimos y máximos del porcentaje de sodio intercambiable (PSI), los cuales son muy importante conocer, para el diseño adecuado de dosis de calcio (yeso agrícola), para el mejoramiento de los suelos sódicos, que se puedan desarrollar bajo estas condiciones.

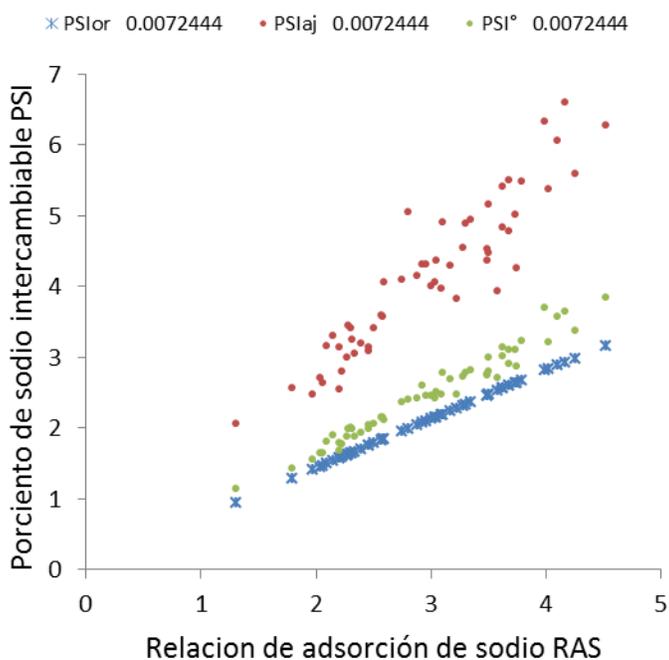


Figura 91. Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^\circ)$ para un $kg' = 0.0072444 [mmol_c L^{-1}]^{-\frac{1}{2}}$, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.

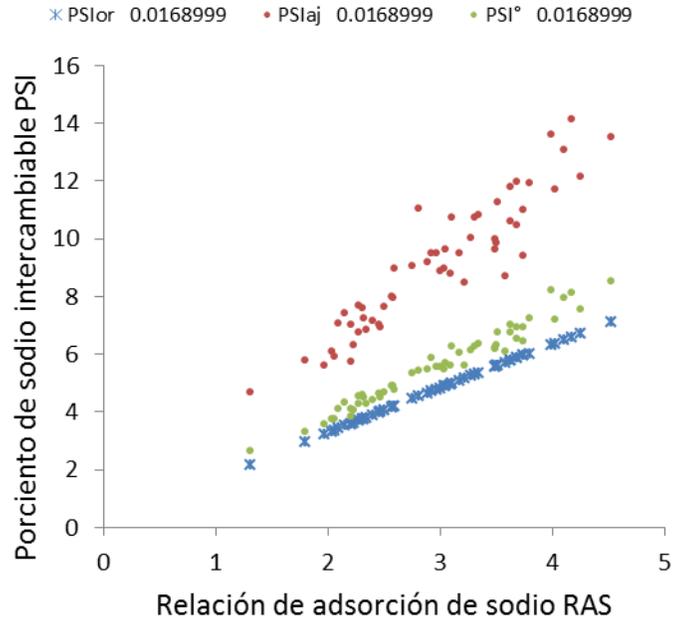


Figura 92. Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$ para un $kg' = 0.0168999 [mmol_c L^{-1}]^{-1/2}$, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.

Al realizar el análisis detallado de los valores del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) de las superficies freáticas, se encontró que se existen valores cercanos a 15 %, lo cual confiere características sódicas a los suelos, con sus respectivas consecuencias adversas como pérdida de permeabilidad y toxicidad por sodio. En la Figura 93 se presenta los valores del PSI_{aj} para un coeficiente de selectividad iónica de 0.0168999 en verano de 2010. Se encontró que el 70.6 % (1,412 hectáreas) de la superficie freática tiene valores de 5 – 10 % y el 29.4 % (588 hectáreas) valores de 10 – 15 %; los cuales pueden conferir propiedades sódicas a los suelos.

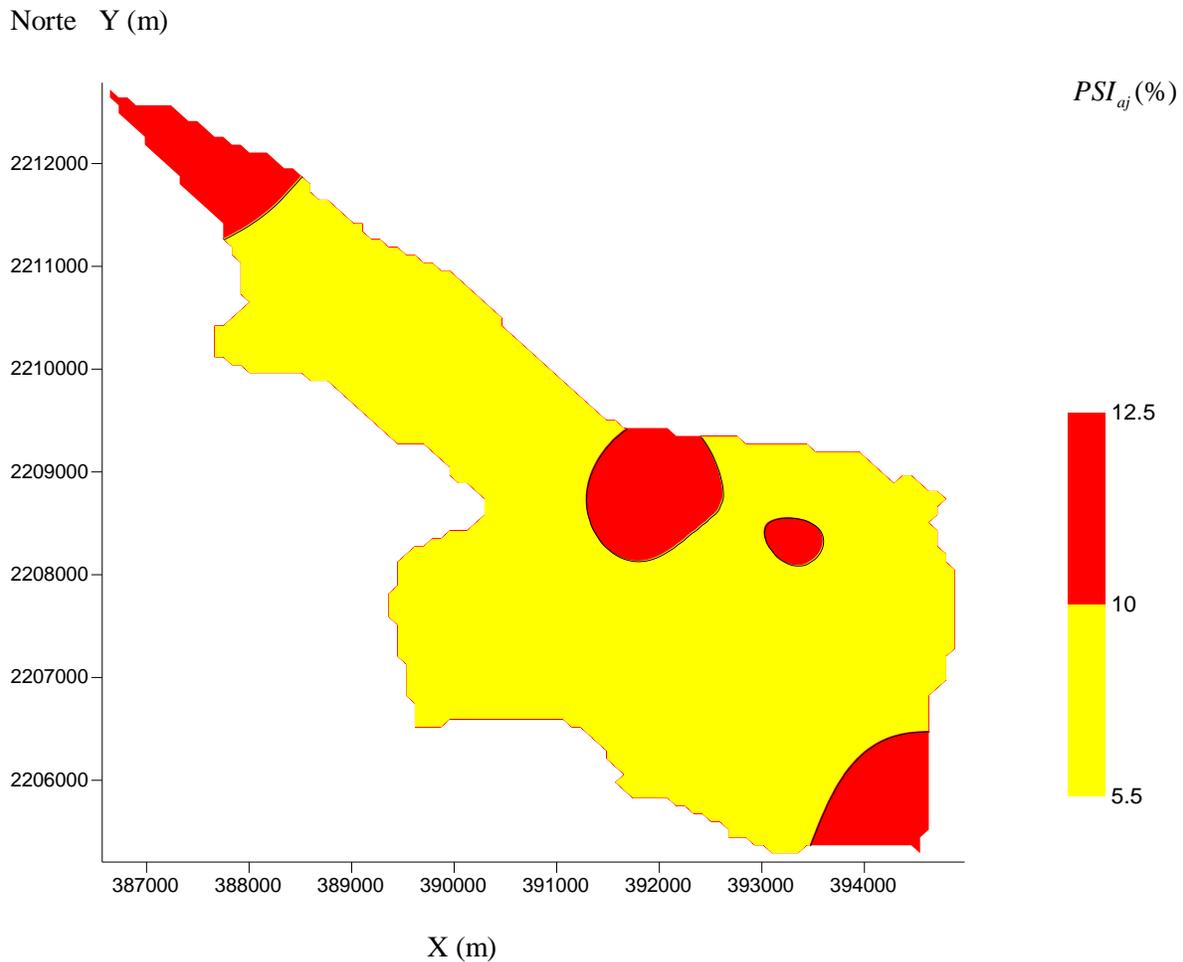


Figura 93. Plano de $PSI_{aj(0.0168999)}$, aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, verano de 2010.

5.2.13 Contenidos de boro, fosforo y nitratos en las aguas freáticas

Los muestreos de boro (B), fosforo (PO_4) y nitratos (NO_3), presentaron sus mayores valores en el muestreo de primavera 2009. En lo concerniente a boro, el 49 % (980 hectáreas) de la superficie freática, presentó valores de $0.3 - 4.0 \text{ mgL}^{-1}$ (condicionado). El fosfato, el 6 % (120 hectáreas) valores mayores de 2 mgL^{-1} (no recomendable), y nitrato, el 23.5 % (470 hectáreas) valores de $3 - 10 \text{ mgL}^{-1}$. Lo anterior permite inferir que en estas áreas, es posible se desarrollen problemas de toxicidad en los cultivos sensibles, especialmente por boro y fosfatos.

6. CONCLUSIONES

Sector México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán (Valle del Mezquital)

1. El tipo de aguas predominante de acuerdo a su composición iónica es la clorhídrica con un 99.3 % de la población total de aguas.
2. En lo referente a los cationes, el sodio ocupa la mayor proporción y para los aniones el bicarbonato, predominando las sales bicarbonatadas de sodio, magnesio y calcio. Estas concentraciones altas de iones de bicarbonato confieren a la solución un régimen físico-químico de tendencia alcalina.
3. El 63.77 % de la población de aguas (88 muestras) tiene concentración entre 10 – 20 $mmol_c L^{-1}$, con una conductividad eléctrica media de 1,510.18 $\mu S cm^{-1}$.
4. El coeficiente de la relación funcional $mgL^{-1} = fa(CE)$ tiene un valor de 0.7069, el cual corresponde a aguas de tipo bicarbonatadas.
5. El orden de predominancia de las sales hipotéticas es: $NaCl > NaHCO_3 > Ca(HCO_3)_2 > Mg(HCO_3)_2 > MgSO_4 > KHCO_3$.
6. Los resultados del cálculo de la fuerza iónica a partir de los iones individuales y con las sales hipotéticas, indican que los dos métodos son correctos y exactos.
7. Con pronóstico del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) a partir de las diferentes conceptualizaciones de la relación de adsorción de sodio $RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^\circ)$ se obtienen valores de $PSI_{máximo}$ y $PSI_{mínimo}$ en los suelos; lo cual permite manejar adecuadamente las dosis de fuentes de calcio para el mejoramiento de suelos sódicos.
8. En cuanto al riesgo de reducción de la infiltración, las tres formulaciones del RAS ocasionan reducción ligera a moderada en el siguiente orden: $RAS_{aj} = 97.1\%$, $RAS^\circ = 68.8\%$ y $RAS_{or} = 62.3\%$.
9. El 71.7 % de la población de aguas tiene valores mayores de 2.5 $mmol_c L^{-1}$ del carbonato de sodio residual, lo cual la califica como no recomendable. El uso

continuo de estas aguas para riego, se manifiesta en altas concentraciones de $NaHCO_3$.

10. El 76.1 % de las muestras tienen valores de $0.3 - 4.0 \text{ mgL}^{-1}$ de boro, con un valor máximo de 2.52 mgL^{-1} , lo cual la califica como de uso condicionada, pudiendo presentar efectos adversos en algunos cultivos que se desarrollan en el Valle del Mezquital, tales como: trigo, frijol, avena y maíz.
11. El 64.5 % de los contenidos de fosfatos tienen valores mayores de 2.0 mgL^{-1} , lo cual la califica como no recomendable. En los valores de nitratos el 10.4 % son de $10 - 20 \text{ mgL}^{-1}$; estas aguas corresponden a la categoría de eupolitróficas ($> 1.5 \text{ mgL}^{-1}$).

Sector Zimapán-Tamazunchale-Pánuco (zona de calizas SLP-VER)

1. De acuerdo con la relación iónica, el 85.1 % de la población de aguas es de tipo clorhídrica y el 14.9 % sulfático-clorhídrica.
2. En lo referente a los cationes, el calcio presenta los valores mayores y para los aniones el bicarbonato, por lo que predominan las sales bicarbonatadas de calcio y magnesio.
3. El 17.9 % de la población de aguas tiene concentración entre $10 - 15 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$ y una conductividad eléctrica media de $647.22 \text{ }\mu\text{Scm}^{-1}$.
4. El coeficiente de la relación funcional $\text{mgL}^{-1} = fa(CE)$ tiene un valor de 0.6912, el cual corresponde a soluciones con altos contenidos de bicarbonato, en este caso predominan sales como $Ca(HCO_3)_2$ y $Mg(HCO_3)_2$.
5. El orden de predominancia de las sales hipotéticas es: $Ca(HCO_3)_2 > NaCl > Mg(HCO_3)_2 > MgSO_4 > MgCl_2 > KHCO_3$. La fuerza iónica calculada para los iones individuales y para las sales hipotéticas, indica que los dos métodos son correctos y exactos.
6. Los valores del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) pronosticados con las diferentes conceptualizaciones del $RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^\circ)$ presentaron valores

relativamente bajos del $PSI_{m\acute{a}ximo}$ (1.7 – 8.0), lo cual indica que es bajo el riesgo de causar problemas con sodio; siendo coherente con los valores del carbonato de sodio residual (CSR), donde el 100 % de la poblaci3n de aguas tiene valores menores de 1.25 mmol_cL^{-1} que las califica como buenas; sin embargo de acuerdo con el riesgo de reducci3n de la infiltraci3n, las tres formulaciones del RAS presentan reducci3n ligera a moderada en el siguiente orden: $RAS_{aj} = 82.1\%$, $RAS^\circ = 67.2\%$ y $RAS_{or} = 64.2\%$, debido a la baja concentraci3n electrol3tica de estas aguas.

7. En cuanto al boro, solo el 14.9 % tiene valores de uso condicionado ($0.3 - 4.0\text{ mgL}^{-1}$). Los fosfatos y nitratos, el 100 % de la poblaci3n de aguas tienen valores que las califica como buenas; lo cual indica que el riesgo de presentarse efectos adversos es m3nimo.

S3ntesis de la red hidrogr3fica M3xico DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimap3n-Tamazunchale-P3nuco

1. Existe una alta variaci3n de cationes y aniones, siendo notable el predominio de valores altos de sodio y bicarbonato en el sector M3xico DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimap3n; disminuyendo considerablemente en el sector Zimap3n-Tamazunchale-P3nuco; comport3ndose de manera contraria el calcio; por lo cual en la primera parte de la red predominan las sales bicarbonatadas s3dicas y en la segunda parte las bicarbonatadas c3lcicas.
2. Las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital al pasar por la zona de calizas SLP-VER, disminuyen su concentraci3n y su relaci3n de adsorci3n de sodio por efectos de la diluci3n con aguas de baja concentraci3n.
3. La distribuci3n en toda la red hidrogr3fica de la concentraci3n de las sales hipot3ticas, del carbonato de sodio residual (CSR), de la relaci3n de adsorci3n de sodio (RAS), de la relaci3n funcional $PSI - RAS$; indica la predominancia relativa de los iones sodio, calcio, magnesio y bicarbonato en cada sector por donde circulan las aguas.

Aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo

1. En los mantos freáticos, en cuanto a los cationes, el orden de predominancia es $Na > Ca > Mg$ y de los aniones el HCO_3 , por lo que predominan las sales bicarbonatadas de sodio, calcio y magnesio.
2. La concentración media de las soluciones freáticas es mayor que la concentración media de las aguas del río Lerma, que es la principal fuente de recarga de los niveles freáticos; lo cual permite inferir que existe un proceso de salinización gradual de los mantos freáticos.
3. El coeficiente de la relación funcional, $mgL^{-1} = fa(CE)$ tiene un valor de 0.6926, el cual corresponde a soluciones con altos contenidos de bicarbonato, es decir predominan sales como $NaHCO_3$, $Ca(HCO_3)_2$ y $Mg(HCO_3)_2$.
4. El orden de predominancia de las sales hipotéticas es: $NaCl > Ca(HCO_3)_2 > NaHCO_3 > MgSO_4 > Mg(HCO_3)_2 > KHCO_3$. La fuerza iónica calculada para los iones individuales y para las sales hipotéticas, indica que los dos métodos son correctos y exactos.
5. Más del 54 % de la superficie freática tiene valores altos de conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$), concentración (mgL^{-1}), presión osmótica (atm) y profundidad del nivel freático menor de 1 m; lo cual representa un alto riesgo de salinidad o sodicidad para el suelo.
6. La variación de la distribución espacio temporal de la concentración de los mantos freáticos se debe a la ocurrencia de procesos de dilución o reconcentración.
7. El transporte de sales a macro-escala se da en la dirección del flujo freático, lo cual, ocasiona la salinización o sodificación progresiva del suelo.

7. RECOMENDACIONES

1. Continuar con los trabajos de caracterización físico-química de las aguas de la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, para precisar las variaciones iónicas y sus efectos en el suelo, cuando estas aguas son utilizadas para riego de cultivos.
2. Determinar experimentalmente los valores del coeficiente de selectividad iónica de Gapon para diferentes suelos de la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco.
3. Establecer redes de observación de niveles freáticos en la red hidrográfica objeto de este estudio, con el fin de conocer la dinámica de las sales en los mantos freáticos.
4. Con el fin de seguir el monitoreo de los mantos freáticos del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, se requiere rehabilitar y ampliar la red freática que se encuentra establecida.

8. LITERATURA CONSULTADA

- Abd-El-Naim, E. M. 1988. Usiing sewage wáter for irrigation. In: Wastewater reclamation and reuse. FAO. Regional Office for The Near East. The Cairo, Egypt.
- Abu-Sharar, T. M., F. T. Bingham., and J. D. Rhoades. 1987. Reduction in hidraulic conductivity in relation to clay dispertion and disaggregation. Soil Sci. Soc. Am. J. 51:342-346.
- Adams, F. 1971. Ionic concentration and activities in soil solutions. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35: 420-426.
- Aguilar, G., S. Cruz, y J. Flores. 2006. Una ojeada a la materia. FCE-SEP. México DF. 170p.
- Alcántara, I y Delgado, J. 2010. Geografía física de México. Instituto de Geografía. UNAM. México DF. 174p.
- Alvarado, R. 2002. Principios de termodinámica. 1ra Edición. Grupo Editorial Esfinge. 232p.
- American Public Health Association (APHA). 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 17th edition. APHA, AWWA, WEF. Edition Port City Press, Baltimore, Maryland.
- Arteaga, V. M. 2010. Calidad de las aguas residuales de la cuenca Lerma-Chapala. Tesis M.C. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. 169p.
- Asghar, A. G. 1961. Use of saline water for irrigation with special reference to saline soils. In: Salinity problems in the arid zones. Proceedings of the Teheran. UNESCO. 259-266.
- Ayers, R y Wescot, D. 1987. La calidad del agua para la agricultura. Riego y Drenaje. Libro 29. FAO. Roma.
- Álvarez, M. 1962. Apuntes de la clase de geología, paleogeografía y tectónica de México. Facultad de Ingeniería. UNAM. México DF. 150p.
- Babcock, K.L; R. M, Carlson; R. K. Schulz, and R. Overstreet. 1959. A study of the effect of irrigation water composition on soil properties. Hilgardia. A journal of Agricultural Science Published by the California Agricultural Experiment Station. 29 (3): 155-169.
- Benson, S. W. 1978. Cálculos químicos. Una introducción al uso de las matemáticas en la química. Editorial Limusa. México DF. 304p.

- Bower, C. A. 1961. Prediction of the effects of irrigation waters on soils. In: Salinity problems in the arid zones. Proceedings of the Teheran. UNESCO. 215-222.
- Bower, C. A., and J. T. Hatcher. 1961. Characterization of salt-affected soils with respect to sodium. United States Salinity Laboratory. 275-280.
- Bower, C.A; L. V, Wilcox, G. W. Akin, and M. G. Keyes. 1965. An index of the tendency of CaCO_3 to precipitation from irrigation waters, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 29: 91-92.
- Bresler, E., B. L. MacNeal, y D.L. Carter. 1982. Saline and sodic soils. Principles-Dynamics-Modeling. Springer-Verlag. 236p.
- Bui, E. N., L. Krogh, R. S. Lavado, F. O. Nachtergaele, T. Tóth, and R. W. Fitzpatrick. 1998. Distribution of Sodic Soils: The World Scene. In: Sumner, M. E, and R. Naidu (Ed). Sodic Soils. Distribution, Properties, Management and Environmental Consequences. Chapter 2. Oxford University Press. :3-17.
- Bustamante, H. 1993. Drenaje de tierras agrícolas y sus aplicaciones. Ediciones Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia. 247p.
- Cardona, A., y J. J. Carrillo-Rivera. 2006. Hidrogeoquímica de sistemas de flujo intermedio que circulan por sedimentos continentales derivados de rocas riolíticas. Ingeniería Hidráulica en México. XXI(3):69-86.
- Carmona, G. 2010. Termodinámica clásica. 2da Edición. Facultad de Ciencias. UNAM. 488p.
- Castellan, G. 1998. Fisicoquímica. Segunda edición. Pearson Addison Wesley. 1057p.
- Castro, I. 2011. Caracterización de las aguas y suelos de la red hidrográfica Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, Estado de Hidalgo, México. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 196p.
- Centro de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA). 1991. Efecto del nivel freático en la producción de caña de azúcar. Informe Anual CENICAÑA. Calí, Colombia. 32-33p.
- Cepeda, J. M. 2009. Química de suelos. Editorial Trilla. 167p.
- Chen, W. T., S. B. Ho, and D. L. Lee. 2009. Effect of pH on boron adsorption-desorption hysteresis of soil. Soil. Sci. 174(6):330-338.
- Cifuentes E., Bluentla U., G. Ruíz-Palacios., G. Bennett S., y A. Peasey. 1994. Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: El Valle del Mezquital, México. Salud Pública. 36(1):3-9.

- Comisión Nacional del Agua (CNA). 1994. Programa Nacional de Irrigación y Drenaje. CNA. México DF. 105p.
- Comisión Nacional del Agua-Universidad Autónoma de Chapingo (CNA-UACH). 2003. Convenio número SGIH-LSP-UACH-DR033-0301. Proyecto para el diagnóstico y modernización del módulo Temascalcingo del Distrito de Riego 033, Estado de México. 300p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2007. Manejo del régimen de humedad en suelos del trópico húmedo de México. CNA. México DF. 19p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2008. Estadística del Agua en México. CNA. México DF. 228p.
- Cressie, N., J. Zhang, and P. F. Craigmile. 2004. Geostatistical prediction of spatial extremes and their extent. In: Renard, P., H. Demougeot-Renard, and R. Froidevaux (Ed). Geostatistics for Environmental Applications. Springer:27-37.
- Crosbie, R. S., J. D. Hughes, J. Friend and B. J. Baldwin. 2007. Monitoring the hidrological impact of land use change in a small agricultural catchment affected by dryland salinity in central NSW, Australia. Agric. Water Manage. 88:43-53.
- Cruz, R. 1995. Drenajes en el cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Centro de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICANA). 211-233.
- Custodio, E y M, Llamas. 1983. Hidrología subterránea. Tomo I. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España. 1157p.
- Carrillo, J. 1965. Estudio de una parte del Anticlinorio de Huayacocotla. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, pp 73 – 96.
- Carrillo, J. 1971. La Plataforma Valles – San Luis Potosí. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. 23. Números 1 – 6, pp 1 - 112.
- Cserna, et al. 1977. Alóctono del Paleozoico Inferior en la Región de Ciudad Victoria, Estado de Tamaulipas. Revista del Instituto de Geología, UNAM, v. 1, pp 33 – 43.
- Dane, J. H., and A. Klute. 1977. Salt effects on the hydraulic properties of a swelling soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 41:1043-1049.
- Degioanni, A., J. Cisnero, A. Cantero, y H. Videla. 2006. Modelo de simulación del balance hídrico en suelos con agua freática poco profunda. Revista Sociedad Argentina de la Ciencia del Suelo. 24(1):1-10.
- Del Castillo, L. F. 2003. El fenómeno mágico de la ósmosis. FCE-SEP. México DF. 91p.

- Delgado, C., J. Pacheco, A. Cabrera, E. Batllori, R. Orellana, and F. Bautista. 2010. Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: The case of Yucatán, México. 97:1423-1433.
- Díaz, E. 1936. Estudio geológico del Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo. Secretaria de la Economía Nacional. 67p.
- Doneen, L. O. 1958. Quality of water for irrigation. pp: 208. In: L. D. Doneen (ed). 1958. Proc. Conf. on Quality of Water for Irrigation No. 14. Water Resources Center. California, USA.
- Eaton, F. M. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. Soil Sci. 69:123-133.
- Elrashidi, M. A., and G. A. O'Connor. 1982. Boron sorption and desorption in soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 46:27-31.
- Espino De la O. E. 1981. Reuse of municipal wastewater for industrial purposes in Mexico City. In: F.M. D'itri, J. Aguirre y M.M. Athie (Eds.). Municipal wastewater in agriculture. Academic Press. New York. Pp. 75-78.
- Espinoza, R. M. 1995. Estudio del comportamiento de los niveles freáticos con respecto al bombeo en el Valle del Yaqui, Sonora, México. Tesis Licenciatura. Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON). Hermosillo, Sonora, México. 100p.
- Evangelou, V. P. 1998. Environmental soil and water chemistry. Principles and applications. Wiley Interscience Publication. 564p.
- Evangelou, V. P., and R. E. Phillips. 1987. Sensitivity analysis on the comparison between the Gapon and Vanselow exchange coefficients. Soil. Sci. Soc. Am. J. 51:1473-1479.
- Evangelou, V. P., and F. J. Coale. 1987. Dependence of the Gapon coefficient on exchangeable sodium for mineralogically different soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 51:68-72.
- Fassbender, H. W y E. Bornemisza. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA. 380p.
- Figuroa, V. U., M. Ortega, M. Palomo y J. P. Flores. 1991. Lixiviación de sales y contaminación por metales pesados en suelos lavados con agua residual. Informe del proyecto CONACYT 0282-A9107. CIRNOC-INIFAT. Praxedis G. Gro., Chih.
- Ford, I. N. 1984. Dinámica mineral en el suelo. Algunos puntos de referencia para su estudio. 1ra Edición. UACH. 577p.
- Frear, G. L., and J. Johnston. 1929. The solubility of calcium carbonate (calcite) in certain aqueous solutions at 25°. This Journal. 51: 2082-2093.

- Frenkel, H. 1984. Reassessment of wáter quality criteria for irrigation. pp: 143-171. In: I. Shainberg and J. Shalhevet (ed). Soil Salinity under Irrigation Processes and Management. Springer-Verlag. Berlin, Germany.
- García-Colín, L. 2003. Y sin embargo se mueven... Teoría cinética de la materia. FCE-SEP. México DF. 127p.
- Giraldo, R. 2005. Introducción a la geoestadística. Teoría y aplicación. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Santafé de Bogotá. D.C. 94p.
- Goldberg, S., D. L. Corwin, P. J. Shouse, and D. L. Suarez. 2005. Prediction of boron adsorption by field samples of diverse textures. Soil Sci. Soc. Am. J. 69:1379-1388.
- 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.
- Guerasimov, Y., V. Dreving, E. Eriomin, A. Kiseliyov, V. Lebedev, G. Panchenkov, and A. Shliguin. 1977. Teoría de los electrolitos. In: Curso de Química-Física. Cap. 16. Tomo II. Editorial MIR. Moscú. 404-432p.
- Guisande, C., A. Barreiro, I. Maneiro, I. Riveiro, A. R. Vergara, y A. Vaamonde. 2006. Tratamiento de datos. Editorial Díaz De Santos. 356p.
- Hassan, E. 1994. Balance de agua y sales en un "Gypsic Xerochrept" situado en la cuenca media del río Guadiana. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. 180p.
- Helmy, A. K. 1963. On cation-exchange stoichiometry. Soil Sci. 95(3):204-205.
- Henley, S. 1981. Nonparametric geostatistics. Elsevier Applied Science Publishers. London. 145p.
- Hornbuckle, J. W., E. W. Christen, y R. D. Faulkner. 2007. Evaluating a multi-level subsurface drainage system for improved drainage wáter quality. Agricultural Water Management: 208-216.
- Hernández, H. 1966. Geología de una parte de la Sierra Madre Oriental entre Linares y Galeana, Estado de Nuevo León. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería. UNAM, México DF.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1992. Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1984. Geología de la república mexicana. INEGI. México DF. 88p.

- Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (IG-UNAM). 1976. Estructura de la Sierra Madre Oriental, sector transversal, Estado de Coahuila. III congreso latinoamericano de geología. México DF. 38p.
- James, D. W., R. J. Hanks, and J. J. Jurinak. 1982. Modern irrigated soils. A Wiley-Interscience Publication. 235p.
- Jurinak, J. J. 1984. Salt-affected soils: Thermodynamic aspects of the soil solution. In: Soil salinity under irrigation. Processes and management. Springer-Verlag:16-31.
- Jurinak, J. J., and D. L. Suarez. 1990. The chemistry of salt-affected soils and water. 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, USA. :42-67.
- Kelley, W. P. 1957. Adsorbed Na^+ , cation-exchange capacity and percentage Na^+ saturation of alkali soils. University of California. 473-478.
- Kelley, W. P. 1963. Use of saline irrigation water. Soil Sci. 95:385-391.
- Kovda, V. A. 1961. Principles of theory and practice of reclamation and utilization of saline soils in the arid zones. In: Salinity problems in the arid zones. Proceedings of the Teheran. UNESCO. 201-213.
- Kovda, V. A. 1973. Chemistry of saline and alkali soils of arid zones. In: Irrigation, drainage and salinity. An International Source Book. FAO/UNESCO. 122-154.
- Kovda, V. A. 1980. Land aridization and drought control. Westview Press Inc. 277p.
- Kutilek, M, y D. Nielsen. 1994. Soil hydrology. Geocology textbook. Madrid.
- Lal, R, and J. M. Kimble. 2000. Pedogenic carbonates and the global cycle. In: Global climate change and pedogenic carbonates. Lewis Publishers:1-14.
- Langelier, W. F. 1936. The analytical control of Anti-corroton water treatment. J. Am. Water Works Assn. 28(10): 1500-1521.
- Lázaro, P.R. 1998. Dinámica de los mantos freáticos someros en los distritos de riegos. Tesis M.C. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. 95p.
- Lázaro, P., C. Fuentes, J. Collaso, y B. De León. 2005. Modelación inversa de la recarga de los mantos freáticos someros en distritos de riego. Revista Ingeniería hidráulica en México. XX(1):89-98.

- Letey, L., G.J. Hoffman, J. W. Hopmans, S.R. Grattan, D. Suarez, D.L. Corwin, J. D. Oster, L. Wu, y C. Amrhein. 2011. Evaluation of soil salinity leaching requirement guidelines. *Agricultural Water Management*. 98:502-506.
- Levy, G. J., I. Shainbert, and W. P. Miller. 1998. Physical properties of sodic soils. In: Sumner, M. E., and R. Naidu (Ed). *Sodic soil. Distribution, properties, management and environmental consequences*. Chapter 5. Oxford University Press: 77-94.
- Levy, G. J., A. I. Mamedov, and Goldstein. 2003. Sodicyty and water quality effects on slaking aggregates from semi-arid soils. *Soil Sci*. 168(8):552-562.
- López Ramos, E. 1985. *Geología de México*. 3da edición. Instituto de Geología. UNAM. México DF. 454p.
- López Ramos, E. 1993. *Geología general y de México*. Editorial Trillas. México DF. 288p.
- MacNeal, B. L. 1968. Prediction of the effect of mixed-salt solutions on soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc*. 32:190-193.
- Malagon, D. 1975. *Mineralogía de los suelos: Sus relaciones con génesis, fertilidad y clasificación de suelos*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. Bogotá D.C. 828p.
- Mandel, S. 1973. Hydrology of arid zones. In: *Arid zone irrigation*. Springer:41-49.
- Marshall, C. E. 1964. *The physical chemistry and mineralogy of soils. Volume I. Soil materials*. Wiley and Sons. USA. 388p.
- Martínez, J. 1986. *Drenaje agrícola. Volumen I*. Ediciones Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 140p.
- Mendez, I., D. Namihira, L. Moreno, y C. Sosa. 1986. *El protocolo de investigación. Lineamientos para su elaboración y análisis*. Editorial Trillas. 210p.
- Mendoza, I. 2009. *Calidad de las aguas residuales urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital, Hidalgo, México*. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.
- Mercado, T. 1999. *Establecimiento de vectores de salinidad a través del análisis físico-químico de los mantos freáticos someros en el distrito 041, río Yaqui, Sonora*. Tesis M.C. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, Estado de México, México.
- Mercado, T., M. Ortega., E. Combatt y A. Arenas. 2011. Dinámica de las sales en el distrito de riego La Doctrina, Colombia. *Revista Idesia (Chile)* enero-abril. 29(1):83-90.

- Mihelcic, J., Auer, M., Hand, W., Honrath Jr, R., Penn, M., Perlinger, J y Urban, N. 2008. Fundamentos de ingeniería ambiental. Limusa Wiley. México DF. 386p.
- Murtaza, G., A. Ghofoor, and M. Qadir. 2006. Irrigation and soil management strategies for using saline-sodic water in a cotton-wheat rotation. *Agric. Water Manage.* 81:98-114.
- Naghshineh-Pour, B., G. W. Kunze, and C. D. Carson. 1970. The effect of electrolyte composition on hydraulic conductivity of certain Texas soils. *Soil Sci.* 110(2):124-127.
- Nelson, P. N., and J. M. Oades. 1998. Organic matter, sodicity, and soil structure. In: Sumner, M. E., and R. Naidu (ed). *Sodic soil. Distribution, properties, management and environmental consequences.* Chapter 4. Oxford University Press:51-75.
- Niazi, M., A. R. Ghumman, y W. Wolters. 2008. Evaluation of impact of Khushab subsurface pipe drainage project in Pakistan. *Irrigation and Drainage System:*35-45.
- Oda, B. 2009. Introducción al análisis gráfico de datos experimentales. Facultad de Ciencias. UNAM. 212p.
- Olea, R. A. 1999. *Geostatistics for engineers and earth scientists.* Kluwer Academic Publishers. 303p.
- Ortega, H. M. 2011. Presentación de resultados de análisis de aguas. Comunicación personal. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, Estado de México, México.
- Oster, J. D., and G. Sposito. 1980. The Gapon coefficient and the exchangeable sodium percentage-sodium adsorption ratio relation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:258-260.
- Oster, J. D., and N. S. Jayawardane. 1998. Agricultural management of sodic soils. In: Sumner, M. E., and R. Naidu (Ed). *Sodic soil. Distribution, properties, management and environmental consequences.* Chapter 8. Oxford University Press:125-147.
- Pal, B., and U. V. Singh. 1985. Effect of phosphorus on yield and nutrient content in berseem (*Trifolium alexandrinum* L.) irrigated with saline waters. *J. India Soc. Soil Sci.* 33:646-653.
- Papritz, A., C. Herzing, F. Borer, and R. Bono. 2004. Modelling the spatial distribution of copper in the soils around a metal smelter in Northwestern Switzerland. In: Renard, P., H. Demougeot-Renard, and R. Froidevaux (ed). *Geostatistics for environmental applications.* Springer:343-354.
- Pescod, M. B. 1992. Wastewater treatment and use in agricultural. *Irrigation and Drainage.* Paper 47. FAO. Rome. 125p.
- Peterson, L. A., and R. C. Newman. 1976. Influence of soil pH on the availability of added boron. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40:280-282.

- Pizarro, F. 1978. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Editorial Agrícola Española. Madrid, España. 203p.
- Ponnamperuma, F. N., E. M. Tianco, and T. A. Loy. 1966. Ionic strengths of the solutions of flooded soils and other natural aqueous solutions from specific conductance. *Soil Sci.* 102(6):408-413.
- Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa. 929p.
- Pulido, A. 2007. Nociones de hidrogeología para ambientólogos. Editorial Universidad de Almería. El Ejido, Almería, España. 492p.
- Ramos, R. 2006. Contaminación por metales pesados, salinidad y sodicidad en suelos de Chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Mixqui, DF. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. UNAM. 218p.
- Rana, T., S. Khan, y M. Rahimi. 2008. Spatio-temporal optimization of agricultural drainage using groundwater models and genetic algorithms: An example from the Murray Irrigation Area, Australia. *Hydrogeology Journal.* 16:1145-1157.
- Reeve, R. C., and G. H. Tamaddoni. 1965. Effect of electrolyte concentration on laboratory permeability and field intake rate of a sodic soil. *Soil Sci.* 99(4):261-266.
- Rengasamy, P., and M. E. Sumner. 1998. Processes involved in sodic behavior. In: Sumner, M. E., and R. Naidu (ed). *Sodic soil. Distribution, properties, management and environmental consequences.* Chapter 3. Oxford University Press:35-50.
- 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. 133p.
- Rhoades, I. D; Chanduvi, F y Lesch, S. 1999. Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. FAO. 150p.
- Richard, L. A. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual No 60. Departamento de Agricultura de los EE.UU. Laboratorio de Salinidad. Limusa. México. 172p.
- Ritzema, H., T. Satyanarayana, S. Raman, y J. Boonstra. 2008. Subsurface drainage to combat waterlogging and salinity in irrigated lands in India: Lessons learned in farms' fields. *Agricultural Water Management.* 95:179-189.
- Rodier, J. 1978. Análisis de las aguas. Editorial Omega. Barcelona, España. Pp. 159-197.
- Rodríguez, J. M., y R. Marín. 1999. Fisicoquímica de aguas. Editorial Díaz De Santos. Madrid, España. 466p.

- Samper, F. J., y J. Carrera, J. 1990. *Geoestadística: aplicación a la hidrología subterránea*. Barcelona, España.
- Santana, R. E. 1989. Determinación experimental de la formación de soda (Na_2CO_3 y $NaHCO_3$) mediante el camino biológico en espesores subyacentes de tres cuencas endorreicas: Cuitzeo, Texcoco y El Carmen. Tesis M.C. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAT) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2006. Estadísticas agrícolas de las unidades de riego. Año agrícola 2004-2005. México DF.
- Servicio Geológico Mexicano, Estado de Hidalgo (SGM-HGO). 1992. Monografía geológico-minera del Estado de Hidalgo. SGM. 109p.
- Servicio Geológico Mexicano, Estado de Querétaro (SGM-QRO). 1992. Monografía geológico-minera del Estado de Querétaro. SGM. 125p.
- Servicio Geológico Mexicano, Estado de México (SGM-MEX). 1996. Monografía geológico-minera del Estado de México. SGM. 153p.
- Servicio Geológico Mexicano, Estado de Veracruz (SGM-VER). 2007. Monografía geológico-minera del Estado de Veracruz. SGM. 119p.
- Servicio Geológico Mexicano, Estado de San Luís Potosí (SGM-SLP). 2008. Monografía geológico-minera del Estado de San Luís Potosí. SGM. 427p.
- Shaw, R. J., K. J. Coughlan, and L. C. Bell. 1998. Root Zone Sodicity. In: Sumner, M. E., and R. Naidu (Ed). *Sodic Soil. Distribution, properties, management and environmental consequences*. Chapter 6. Oxford University Press:95-106.
- Sidler, R., and K. Holliger. 2004. Kriging of scale-invariant data: Optimal parameterization of the autocovariance model. In: Renard, P., H. Demougeot-Renard, and R. Froidevaux (ed). *Geostatistics for environmental applications*. Springer:63-74.
- Skoog, D; West, D, Holler, J y Crouch, S. 2001. *Química analítica*. McGraw-Hill. 795p.
- Sokolenko, E'. A. 1986. *Water and salt regimes of soils. Modeling and management*. Balkema Rotterdam Editions. 246p.
- Sposito, G. 1977. The Gapon and the Vanselow selectivity coefficients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:1205-1206.
- Sposito, G., and S. V. Mattigod. 1977. On the chemical foundation of the sodium adsorption ratio. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:323-329.

- Suarez, D. L. 1977. Ion activity products of calcium in waters below the root zone. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:310-315.
- Suarez, D. L. 1981. Relation Between pH_c 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.
- Suarez, D. L. 1998. Thermodynamics of soil solution. In: Sparks, D. L (ed). *Soil physical chemistry*. Chapter 3. CRS Press. :97-134.
- Sumner, M. E., P. Rengasamy, and R. Naidu. 1998. Sodic soil. A reappraisal. In: Sumner, M. E., and R. Naidu (ed). *Sodic soil. Distribution, properties, management and environmental consequences*. Chapter 1. Oxford University Press:3-17.
- Tanji, K. K., and N. C. Kielen. 2002. *Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas*. FAO Irrigation and Drainage Paper 61. FAO. Rome. 188p.
- Thomas, G. W., and B. Yaron. 1967. Adsorption of sodium from irrigation water by four Texas soil. *Soil. Sci.* 106 (3): 213-219.
- Timm, L., J. De Oliveira, T. Tominaga, F. Cássaro, K. Reichardt, y O. Bacci. 2002. Water balance of a sugarcane crop: Quantitative and qualitative aspects of its measurement. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.* 6(1):57-62.
- Valera, J. P. 2005. *Apuntes de física general*. 1ra Edición. Facultad de Estudios Superiores Acatlán. UNAM. México DF. 381p.
- Velasco-Molina, H. A., A. R. Swoboda., and C. L. Godfrey. 1971. Dispersion of soils of different mineralogy in relation to sodium adsorption ratio and electrolytic concentration. *Soil Sci.* 111(5):282-287.
- Velázquez, M. A. 1995. Efecto de las sales y fertilización sobre la emergencia de plántulas de siete cultivares. Tesis M.C. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Texcoco, Estado de México, México.
- Velázquez, 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 Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. 116p.
- Velázquez, M. A., M. Ortega., A. Martínez., J. Kohashi, y N. García. 2002. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Terra.* 20(4):459-464.

- Wahhab, A. 1961. Effect of saline irrigation waters on some soil properties. In: Salinity problems in the arid zones. Proceedings of the Teheran. UNESCO. 233-237.
- Waldron, L. J., and G. K. Constantin. 1970. Soil hydraulic conductivity and bulk volume changes during cyclic calcium-sodium exchange. *Soil Sci.* 110(2): 81-85.
- Webster, R., and M. A. Oliver. 2004. *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley Sons Ltda. 271p.
- 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.
- Yang, X. 2008. Evaluation and application of DRAINMOD in Australian sugarcane field. *Agricultural Water Management.* 95:439-446.
- Yaron, B. 1973. Water suitability for irrigation. In: *Arid zone irrigation*. Springer:71-85.
- Zataráin, F. 1996. Transporte unidimensional de agua y solutos. Tesis M.C. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

9. ANEXOS

Anexo 1. Localización geográfica muestreos, red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009 y verano 2010.

No	Muestra	Sitios muestreos	Latitud (N)			Longitud (W)			Altitud (msnm)	T (°C)
			°	'	''	°	'	''		
Verano 2009: Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán										
1	1	Puente Pemex	19	37	25	99	02	42	2260	201.4
2	2	Canal de riego cuadrado Chiconautla	19	39	06	99	02	44	2257	21.2
3	3	Canal de riego antes Sta. Ma. Tonatitla	19	40	22	99	02	44	2255	21.1
4	4	Canal revestido Sta. Ma. Tonatitla	19	41	03	99	02	41	2252	21.8
5	5	Santa Ana Nextlalpan	19	44	05	99	49	05	2252	23.9
6	6	La Laminadora	19	47	16	99	05	32	2252	22.0
7	7	Canal principal Sta. Ana Nextlalpan	19	44	11	99	44	11	2253	22.3
8	8	Laguna de Zumpango	19	47	59	99	06	54	2251	24.7
9	9	Laguna de Zumpango Emisor Norte	19	47	12	99	47	12	2249	19.6
10	10	El Gran Canal, Teoloyucan	19	45	02	99	06	24	2240	23.5
11	11	Canal princial Sn. Pedro	19	46	30	99	07	05	2242	23.0
12	12	Puente de Tequixquiac	19	54	24	99	08	52	2241	22.8
13	13	Tequixquiac, Tajo	19	54	08	99	07	21	2241	23.0
14	14	Tajo	19	54	03	99	07	07	2241	21.2
15	15	Canal de tierra Tequixquiac	19	54	48	99	08	38	2240	22.3
16	16	Desviación Tlapanaoloya	19	55	44	99	08	37	2238	21.9
17	17	Balneario Las Canoas	19	56	41	99	09	25	2237	19.8
18	18	Presa Las Canoas	19	56	44	99	09	36	2238	22.2
19	19	Balneario La Atarjea manantial	19	56	50	99	10	09	2197	20.8
20	20	La Atarjea nacimiento manantial	19	56	45	99	56	45	2198	20.3
21	21	Apaxco, Río Tula	19	57	54	99	10	33	2195	21.9
22	22	Canal Factoria Apaxco	19	58	11	99	10	40	2189	21.7
23	23	Canal revestido Texas	20	01	53	99	12	10	2155	19.8
24	24	Canal revestido Atotonilco	20	01	34	99	12	17	2153	19.8
25	25	Río Tula	20	01	42	99	12	48	2152	19.3
26	26	Atitalaquia	20	03	24	99	13	11	2103	20.1
27	27	Canal Grande Atitalaquia	20	03	31	99	13	28	2095	19.3
28	28	Canal de la Quina, Atitalaquia	20	03	33	99	13	37	2094	20.1
29	29	Canal Grande de la Quina	20	03	03	99	13	30	2093	19.6
30	30	Canal Pemex, Atitalaquia	20	03	06	99	13	49	2095	20.4
31	31	Refineria Rexel	20	03	32	99	16	03	2097	20.3
32	32	Tula 1, Canal de aguas negras	20	03	19	99	18	15	2098	20.6
33	33	Tula 2, Hotel las Plazas	20	03	15	99	18	46	2097	21.0
34	34	Río Tula, Puente Metlac	20	03	11	99	20	11	2092	19.5
35	35	Tula, puente verde	20	03	59	99	19	46	2086	19.3
36	36	Canal Grande Tula, Gral. Dhendó	20	04	28	99	18	58	2096	21.3
37	37	Instituto Canadiense	20	04	37	99	20	07	2093	22.6
38	38	Tula, Tepetitlan.	20	04	59	99	20	13	2092	22.0
39	39	Col. Julián Villagran	20	05	55	99	20	31	2092	22.2
40	40	Canal Col. Benito Juarez	20	06	31	99	20	21	2082	22.4
41	41	Canal de tierra Ahuehuepan	20	07	43	99	20	60	2059	21.7
42	42	Presa Endhó	20	08	45	99	21	37	2037	24.3
43	43	Sifón, Presa Endhó	20	09	31	99	21	24	2017	22.1
44	44	Tepetitlan	20	11	22	99	22	53	2018	20.8
45	45	Pino Suárez	20	14	52	99	25	26	2191	16.0
46	46	Chapantongo	20	18	39	99	23	46	2074	21.0
47	47	Presa Rojo Gómez	20	21	30	99	19	21	1982	23.2
48	48	Presa Dolores	20	20	38	99	20	54	1981	24.2
49	49	Puente Alfajayucan	20	24	50	99	20	55	1953	21.8
50	50	Presa Vicente Aguirre	20	26	06	99	22	05	1946	32.2
51	51	Sn. Francisco (Cerro Prieto)	20	29	04	99	23	03	1752	22.5
52	52	Laguna (Camino Cerro Prieto)	20	29	06	99	21	59	1790	26.5
53	53	Presa Madhó Corrales	20	30	22	99	23	11	1789	26.9

Continuación... Anexo 1.

No	Muestra	Sitios muestreros	Latitud (N)		Longitud (W)		Altitud (msnm)	T (°C)
			°	'	°	'		
Continuación. Verano 2009: Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán								
54	54	Río Sn. Fco. Sachichilco	20	29 19	99	23 33	1788	22.7
55	55	Canal de Piedra, Ixmiquilpan	20	28 50	99	15 19	1787	22.2
56	56	Río Tula, Gran Canal Xothó, Ixmiquilpan	20	28 50	99	13 16	1777	22.0
57	57	Río Ixmiquilpan	20	28 57	99	12 57	1764	20.2
58	58	Canal cuadrado revestido después de Ixmiquilpan.	20	31 30	99	19 26	1772	18.5
59	59	Río Tula puente Tasquillo	20	34 34	99	20 47	1594	20.5
60	60	Presa Zimapan	20	39 40	99	29 18	1584	24.0
61	61	Cascadas Maconí	20	49 52	99	31 40	1587	23.1
62	62	Adjuntas	20	51 54	99	26 46	1590	20.5
63	63	Cañon Zimapan	20	50 31	99	26 19	1591	28.6
64	64	Canal revestido Col. Ignacio López Rayón	20	28 60	99	16 18	1593	19.4
65	65	Canal Dexthó	20	29 50	99	16 24	1731	19.4
66	66	Canal Av. Lazaro Cardenas	20	29 12	99	12 39	1732	19.6
67	67	Canal El Nith	20	29 25	99	11 40	1732	19.8
68	68	Canal Universidad Tecnológica del Valle del Mezq	20	29 32	99	10 57	1740	19.8
69	69	Canal de Piedra la Estación	20	29 44	99	09 50	1748	20.1
70	70	Sn. Pedro Capula	20	29 45	99	09 25	1782	20.1
71	71	Agua freática, Bandhó	20	30 11	99	08 42	1787	21.5
72	72	Canal cuadrado Bandaho	20	30 24	99	08 09	1786	20.3
73	73	Canal Debodhé	20	29 33	99	06 54	1788	20.3
74	74	Presa Debodhé	20	29 03	99	07 15	1816	22.8
75	75	Canal antes de Ixmiquilpan	20	26 58	99	10 44	1749	21.4
76	76	Canal Maguey Blanco	20	25 24	99	10 09	1753	20.3
77	77	Canal revestido el Mejay	20	23 49	99	11 29	1924	22.5
78	78	Canal revestido Ecoalberto	20	24 03	99	12 21	1848	21.5
79	79	Río Tula Ecoalberto	20	25 19	99	13 24	1781	21.0
80	80	Río Tula Tlacotlapilco	20	22 27	99	13 24	1782	20.6
81	81	Canal grasoso II	20	20 35	99	12 25	1943	22.0
88	88	Río Tula Chilcuautla	20	19 34	99	13 23	1833	20.8
83	83	Canal grasoso rumbo a Cerro Azul	20	19 51	99	15 51	1981	32.2
Verano 2009: Tamazunchale-Pánuco								
84	1	Vega larga, río Montezuma, SLP	21	15 26	98	50 29	132	21.7
85	2	Cascada vega larga, SLP	21	15 23	98	50 07	143	20.6
86	3	Río Amajac, Tamanzunchale, SLP	21	14 47	98	46 38	154	20.3
87	4	Río Claro, antes de tributar en Amajac, SLP	21	13 22	98	45 20	95	19.7
88	5	Unión ríos Claro y Amajac, SLP	21	13 23	98	45 21	95	19.7
89	6	Montezuma, Termo, SLP	21	18 26	98	44 01	106	19.7
90	7	Huezco, río Montezuma, SLP	21	22 24	98	45 58	84	20.6
91	8	Río Coy, hacienda Terrazas, SLP	21	25 22	98	52 42	91	20.3
92	9	Nacimiento río Huichihuayan, SLP	21	27 34	98	58 36	101	19.4
93	10	Arroyo El arrozal, delante de Huichihuayan, SLP	21	30 20	98	59 49	118	19.5
94	11	Puente río Coy, SLP	21	45 00	98	57 24	47	21.7
95	12	Río Tampaon, sobre el puente, SLP	21	50 52	98	56 22	69	21.4
96	13	Taninul, termal hotel, SLP	21	56 14	98	53 24	68	34.4
97	14	Río ciudad Valles, sobre el puente SLP	21	57 42	99	00 22	34	19.7
98	15	Cascada Los Micos, SLP	22	05 57	99	09 02	87	20.5
99	16	Nacimiento, sobre puente, Santa Anita, SLP	21	58 32	99	11 30	196	23.2
100	17	Río Gallinas, cultivo caña de azúcar, SLP	21	53 44	99	14 45	277	20.3
101	18	Cascada Tamasopo, SLP	21	56 25	99	23 46	336	21.8
102	19	Río Llanitos, Damian Carmona, SLP	22	10 44	99	19 06	450	20.8
103	20	Río Gallinas, en Chinchulin, SLP	21	48 25	99	11 06	188	20.8
104	21	Río Florido, después de Taninul, SLP	21	59 53	98	46 54	28	21.4
105	22	Río Gallinas, sobre puente, SLP	22	00 05	98	45 41	42	20.4
106	23	Tamtoc, monumento 32, SLP	21	55 39	98	49 02	32	23.9

Continuación... Anexo 1.

No	Muestra	Sitios muestreos	Latitud (N)			Longitud (W)			Altitud (msnm)	T (°C)
			°	'	''	°	'	''		
Continuación. Verano 2009: Tamazunchale-Pánuco										
107	24	Río Tempoal, cerca ingenio, SLP – Ver	21	46	25	98	27	29	44	21.8
108	25	Río Chicayan, puente Mascareña, Ver	21	59	27	98	14	25	62	24.3
109	26	Río Panuco, Panuco, Ver	22	03	38	98	10	35	8	23.3
110	27	La Cortadera, estero, Ver	22	10	60	98	01	08	13	23.9
111	28	Río Panuco, en Tampico, Ver	22	13	29	97	53	43	5	24.0
112	29	Río Tamesis, Tamesis, Ver	22	24	52	98	25	19	6	24.7
Verano 2010: Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapan										
1	1	Puente Pemex, Edo Mexico	19	31	16	98	53	38	2257	24.0
2	2	Canal cuadrado DR Chiconaultla, Edo México	19	39	06	99	02	44	2272	24.0
3	3	Santa Maria Tonanitla, Edo México	19	41	04	99	02	41	2248	26.0
4	4	Santana Nextlapan, Edo México	19	44	06	99	04	06	2257	26.0
5	5	Canal aguas negras, Sta Ana Nextlalpan, E Mex	19	42	03	99	05	00	2231	25.0
6	6	Canal La Fundidora, Zumpango, Edo México	19	47	16	99	05	32	2233	24.0
7	7	Laguna de regulación, Zumpango, Edo México	19	47	59	99	06	52	2249	23.0
8	8	Emisor Norte, Zumpango, Edo México	19	47	11	99	09	54	2263	22.0
9	9	Puente, canal en tierra, Atitalaquia, Edo Hgo	20	03	24	99	13	11	2105	23.0
10	10	Canal salida Avila Camacho, Tequisquiax, E Mex	19	54	15	99	08	45	2207	25.0
11	11	Canal río Tequisquiax (salida), Edo México	19	54	49	99	08	38	2205	26.0
12	12	El Tajo, Dr Palafox, Tequisquiax, Edo México	19	54	07	99	07	22	2184	25.0
13	13	Cruce Tlapanaoloya, Tequisquiax, Edo Mex	19	55	43	99	08	37	2222	24.0
14	14	Río Tula, puente Apaxco, Edo México	19	57	54	99	10	33	2161	21.0
15	15	Canal tierra frente cementera, Apaxco, Edo Mex	19	58	11	99	10	40	2187	22.0
16	16	Canal revestido 1, Atotonilco, Tula, Edo Hgo	20	01	35	99	12	18	2170	23.0
17	17	Río Tula, Atotonilco de Tula, Edo Hidalgo	20	01	15	99	12	48	2120	23.0
18	18	Canal revestido (Texas), Atotonilco, Tula, Hgo	20	01	46	99	12	11	2153	22.0
19	19	Canal pequeño paralelo al revestido, Atotonilco	20	01	53	99	12	10	2152	22.0
20	20	Presa Zimapan, Edo Hidalgo	20	39	40	99	29	18	1571	25.0
21	21	Río Maconí, Edo Querétaro	20	50	16	99	32	09	1575	22.0
22	22	Río Moctezuma, La Mora, Edo Querétaro	20	51	54	99	26	46	941	21.0
23	23	Río Tula, Ixmiquilpan, Edo Hidalgo	20	28	31	99	13	26	1752	20.0
24	24	Río Ixmiquilpan, Edo Hidalgo	20	28	50	99	12	46	1760	21.0
25	25	Río Arenalito, La Gloria, Edo Hidalgo	20	39	20	99	02	57	1721	23.0
26	26	Cascada La Gloria, Cardonal, La Mesa, Edo Hgo	20	38	55	99	00	29	1300	30.0
27	27	Cieneguilla (lutitas), Edo Hidalgo	20	42	28	99	02	06	2085	24.0
28	28	Canal tierra, salida Ixmiquilpan a Cardonal, Hgo	20	31	48	99	11	18	1739	26.0
29	29	Canal tierra chico, salida Ixmiquilpan a Cardonal	20	29	46	99	12	54	1730	23.0
30	30	Canal López Rayon, revestido 1, Ixmiquilpan, Hgo	20	28	59	99	16	18	1736	23.0
31	31	Canal Dexthó, Ixmiquilpan, Edo Hidalgo	20	29	49	99	16	24	1739	22.0
32	32	Canal piedra antes del López Rayon, Edo Hgo	20	28	49	99	15	17	1745	21.0
33	33	Canal cuadrado entre Ixmiquilpan y Tzindejé, Hgo	20	31	29	99	19	26	1760	22.0
34	34	Canal La Cruz, zona de escoria, Edo Hidalgo	20	29	48	99	21	15	1834	21.0
35	35	Presa Madhó Corrales, Alfajayucan, Edo Hidalgo	20	30	22	99	23	11	1736	24.0
36	36	Canal tierra entre Madhó y San Fco, Edo Hidalgo	20	29	10	99	23	26	1767	21.0
37	37	La Caída (basalto), San Fco, Edo Hidalgo	20	29	03	99	23	04	1760	22.0
38	38	Canal tierra en vuelta, Xigatza, Edo Hidalgo	20	29	02	99	23	18	1771	23.0
39	39	Canal La Caída, Edo Hidalgo	20	28	05	99	23	12	1795	22.0
40	40	Presa No 2 Madhó, Edo Hidalgo	20	29	05	99	21	59	1787	22.0
41	41	Canal tierra, escuela rural 18 marzo, Edo Hidalgo	20	28	29	99	21	56	1812	23.0
42	42	Canal rev salida Alfajayucan a San Fco, Edo Hgo	20	27	21	99	22	08	1848	25.0
43	43	Presa Vicente Aguirre, Alfajayucan, Edo Hidalgo	20	26	06	99	21	44	1862	23.0
44	44	Río Alfajayucan, Alfajayucan, Edo México	20	24	51	99	20	54	1875	23.0
45	45	Canal rev, San Agustín, Alfajayuca, Edo Hidalgo	20	22	31	99	19	56	1957	22.0
46	46	Canal de piedra (presa Rojo Gómez), Edo Hgo	20	22	05	99	19	44	1970	23.0
47	47	Canal de piedra grande (Rojo Gómez), Edo Hgo	20	21	38	99	19	38	1977	22.0

Continuación... Anexo 1.

No	Muestra	Sitios muestreros	Latitud (N)			Longitud (W)			Altitud (msnm)	T (°C)
			°	'	''	°	'	''		
Continuación. Verano 2010: Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán										
48	48	Bocatoma presa Rojo Gómez, Edo Hidalgo	20	21	31	99	19	21	1990	25.0
49	49	Presa Dolores (limpia), Chapantongo, Edo Hidalgo	20	20	39	99	20	53	1990	20.0
50	50	Canal piedra junto presa Dolores, Edo Hidalgo	20	20	46	99	20	47	1983	21.0
51	51	Canal revestido (Rojo Gómez), Cerro Azul, Hgo	20	20	52	99	20	29	1999	22.0
52	52	Canal revestido peq, Alfajayucan a Ixmiquilpan No 2	20	27	15	99	21	01	1877	20.0
53	53	Canal revestido peq, Alfajayucan a Ixmiquilpan No 1	20	27	09	99	21	16	1894	21.0
54	54	Canal rev gran, Alfajayucan a Ixmiquilpan No 3	20	27	32	99	20	30	1890	21.0
55	55	Canal rev gran, Alfajayucan a Ixmiquilpan No 4	20	27	51	99	20	4	1848	21.0
Verano 2010: Tamazunchale-Pánuco										
56	1	Vega Larga, SLP	21	11	22	98	47	40	132	26.1
57	2	Río Moctezuma, cerca Tamazunchales, Hgo	21	12	43	98	52	47	135	25.1
58	3	Pisa Flores, río Moctezuma, Hgo	21	10	58	98	59	55	237	25.5
59	4	Río Amajac, Hgo	21	05	46	98	53	38	270	29.1
60	5	San Simón, Hgo	21	00	35	98	49	01	350	25.2
61	6	Río Claro, Tamala, Hgo	20	59	45	98	47	55	442	29.5
62	7	Las Basculas, Hgo	20	58	29	98	43	52	1089	21.7
63	8	Cascada de escurrimiento, Hgo	21	01	44	98	37	17	1054	21.3
64	9	Río San Pedro, Santa María, Hgo	21	02	31	98	35	45	667	24.0
65	10	Río Tutunicapa, Hgo	21	09	29	98	35	35	201	26.0
66	11	Río Amajac, Tamazunchale, SLP	21	14	49	98	46	32	154	27.6
67	12	Río Claro, SLP	21	13	18	98	45	14	95	27.6
68	13	Río Amajac, aguas abajo desem Claro, SLP	21	13	18	98	45	21	95	27.6
69	14	Río Moctezuma, SLP	21	15	41	98	47	11	148	25.1
70	15	Río Tuntitlan, San Pedro, Hgo	21	09	47	98	36	54	209	24.3
71	16	Río Chapulhuacanito, SLP	21	12	28	98	40	05	215	25.9
72	17	Río Moctezuma, Termo, SLP	21	18	56	98	45	21	106	27.5
73	18	Arroyo Escalana, SLP	21	22	27	98	50	35	126	27.4
74	19	Río Tanquilin, puente Providencia, Matlapa, SLP	21	19	46	98	52	47	210	24.5
75	20	Río Tanquilin, puente, SLP	21	25	24	98	53	07	96	23.3
76	21	Hotel Taninul, SLP	21	56	33	98	52	57	68	29.3
77	22	Río Tampoan, SLP	21	51	06	98	56	24	66	27.7
78	23	Río Coy, SLP	21	44	58	98	57	18	47	25.2
79	24	Río, puente Valle 2	21	59	01	99	00	32	83	28.1
80	25	Cascada, Los Micos, SLP	22	06	07	99	09	17	87	26.3
81	26	Río El Salto, SLP	22	25	56	99	19	14	304	27.2
82	27	Río El Naranjo, SLP	22	31	42	99	19	20	271	26.7
83	28	Río Verde, puente Berástegui, SLP	21	55	33	99	59	22	990	27.6
84	29	Quebrada Tamasopo, SLP	21	54	60	99	23	38	336	22.6
85	30	Río Gallina, SLP	21	54	08	99	14	37	282	25.2
86	31	Río Tampoan, Tanuin, SLP	22	00	04	98	45	40	27	29.4
87	32	Río Moctezuma, El Higo, limite Ver, SLP	21	46	16	98	27	48	21	29.0
88	33	Río Moctezuma, Tanquian, SLP	21	36	12	98	38	25	46	27.5
89	34	Río Tempoal, Tempoal de Sánchez, SLP	21	31	10	98	23	17	61	28.8
90	35	Río Panuco, puente, Panuco, Ver	22	03	29	98	11	04	8	29.0
91	36	Río Panuco, cerca desembocadura, Ver	22	13	24	97	53	42	5	30.4
92	37	Mar, ciudad Madero, Tam	22	16	34	97	47	37	0	31.7
93	38	Río Tamesis, Tam	22	25	02	98	24	54	6	30.4
94	39	Río Extoraz, Bucareli, Peña Miller, Qro	21	01	38	99	34	49	1584	30.3

Anexo 2. Características fisiográficas de la red hidrográfica México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán-Tamazunchale-Pánuco.

A continuación se describe las características fisiográficas del área de estudio, la cual comprende parte de las provincias fisiográficas: Eje Neovolcánico, Sierra Madre Oriental y Llanura Costera del Golfo Norte y algunas formaciones como: Valle del Mezquital, Calizas El Doctor, Calizas El Abra y Anticlinorio Huayacococla (Díaz, 1936; Álvarez, 1962; Carrillo, 1965; Hernández, 1966; Carrillo, 1971; IG-UNAM, 1976; Cserna *et al.*, 1977; INEGI, 1984; López Ramos, 1985; INEGI, 1992; SGM-HGO, 1992; SGM-QRO, 1992; López Ramos, 1993; SGM-MEX, 1996; SGM-VER, 2007; SGM-SLP, 2008; Alcántara y Delgado, 2010).

EJE NEOVOLCÁNICO

En el Estado de México ésta provincia cubre la mayor parte del Estado en su porción Norte. Limita al Sur con la Sierra Madre del Sur. Está caracterizada geológicamente por el predominio de rocas volcánicas cenozoicas que datan del Terciario y del Cuaternario. Se encuentran algunos afloramientos de rocas triásicas, litológicamente clasificadas como filitas y pizarras. Dichos afloramientos están cartografiados en el noroeste, en el distrito minero de El Oro. Del Cretácico, afloran rocas sedimentarias marinas, de composición carbonatada; en Apaxco, éstas son explotadas para la industria de la construcción. También existen rocas sedimentarias clásticas, asociadas con piroclásticas (tobas) que afloran extensamente desde Atlacomulco hasta Toluca y en otras regiones como las de Chiconcuac y Coatepec de Harinas. Del cuaternario existen depósitos lacustres y aluviales que rellenan antiguos lagos de la cuenca de México y los valles de la cuenca del Lerma. Las principales estructuras de esta provincia son los aparatos volcánicos formados por conos cineríticos y derrames de lavas. De entre estos sobresalen el Popocatepetl, el Iztlaccihuatl y el Nevado de Toluca, que son los volcanes más notables del país, todos ellos formados por rocas andesíticas.

En lo correspondiente al estado de Hidalgo, la provincia del eje Neovolcánico, cubre una porción del estado, sobre todo en el sur, y está constituida predominantemente por rocas volcánicas terciarias y cuaternarias (brechas, tobas y derrames riolíticos, intermedios y basálticos), de composición y textura variada, las cuales forman en conjunto un extenso y grueso paquete que en algunas localidades, como Pachuca, alcanza varios miles de metros de espesor. Este conjunto ha sido superpuesto a las rocas sedimentarias mesozoicas por los fenómenos de vulcanismo. De estas últimas se encuentran algunos afloramientos que sobresalen en forma de cerros aislados en medio del dominio de las rocas ígneas, como en las localidades de Tula de Allende y Atotonilco de Tula, donde afloran cerros de caliza que tienen un uso industrial. La morfología de esta provincia es variada, se presentan diversos tipos de estructuras volcánicas bien conservadas, como son: conos cineríticos, volcanes compuestos, volcanes escudo y calderas, además de extensos flujos piroclásticos y derrames lávicos basálticos, que tienen forma de mesetas y planicies sobre las que se han originado algunos lagos, debido al cierre de las cuencas. De este tipo de fenómenos quedan huellas en el lago de Tecocomulco. La interacción entre el clima y la composición litológica de las rocas volcánicas se hace más evidente en las zonas húmedas, donde afloran extensos derrames de rocas basálticas que han sido alteradas profundamente por el

intemperismo fisicoquímico. El relieve estructural original está íntimamente relacionado con una intensa actividad volcánica, iniciada a principios del Terciario y desarrollada durante el Pleistoceno Inferior. El conjunto de estructuras que caracterizan al relieve de esta provincia evolucionaron sobre una paleogeografía; constituida por sedimentos mesozoicos plegados, los cuales correspondían a la Sierra Madre Oriental. La evolución de los fenómenos volcánicos propició las condiciones para la formación de cuencas endorreicas (cerradas, con drenaje interno), que posteriormente fueron rellenadas con aportes de materiales volcanoclásticos, los cuales tienen características litológicas de rocas volcánicas depositadas en un medio lacustre y aparecen estratificados. Algunas estructuras como la Caldera de el Astillero, cerca de Huichapán, son rasgos destruccionales del fenómeno de vulcanismo.

SIERRA MADRE ORIENTAL

La sierra Madre Oriental, corresponde a las formaciones plegadas y levantadas que resultan de la evolución estructural de sedimentos depositados dentro de un mar oriental mesozoico, presente desde el Oxfordiano hasta el Paleoceno. Los límites de la Sierra Madre Oriental son: Al Occidente con la Sierra Madre Occidental, enorme mesa volcánica con poca deformación, constituida por la acumulación de andesita e ignimbritas del Oligoceno-Mioceno y que se sigue desde la frontera con Estados Unidos hasta el Eje Neovolcánico Transmexicano; al Oriente con la Planicie Costera del Golfo de México, formada por los depósitos terrígenos marinos de tipo molasa, acumulados a partir del Eoceno y poco deformados; al Sur con el Eje Neovolcánico Transmexicano, formado desde el Plioceno, el cual se superpone transversalmente a las grandes unidades mexicanas más antiguas. El carácter unitario de la Sierra Madre Oriental es estratigráfico y en su dominio se distinguen: un zócalo, formado por rocas precámbricas metamorizadas y por formaciones paleozoicas metamórficas y sedimentarias, cubiertas en discordancia angular por una molasa roja continental del Pérmico-Triásico; y una cubierta sedimentaria depositada en forma de mar, la cual comprende un conjunto inferior calcáreo del Jurásico Superior-Cretácico medio, seguido en concordancia por un conjunto terrígeno del Cenomaniano Superior-Paleoceno. Esta característica de la Sierra Madre Oriental, la distingue del arco insular, ya que en éste la serie del Jurásico-Cretácico inferior es de origen vulcano-sedimentario y está metamorizado.

La Sierra Madre Oriental y las zonas adyacentes están constituidas principalmente por rocas sedimentarias mesozoicas que se depositaron y evolucionaron sobre un basamento paleozoico y precámbrico. La sierra constituye una faja montañosa orogénica que sigue, en su segmento sur, una trayectoria general Noereste-Sureste y, a la altura de Monterrey, se flexiona para seguir una trayectoria este-oeste hacia Torreón. La Sierra Madre está compuesta de estrechos pliegues con una orientación que sigue el rumbo general de la sierra. Rumbo a la Mesa del Centro los valles son más amplios, las sierras anticlinales menos estrechas, y hacia el occidente son cubiertos paulatinos por las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental. El basamento precámbrico y paleozoico se observa en afloramientos aislados que constituyen ventanas erosionables en la secuencia mesozoica plegada.

En el área de Ciudad Victoria ha sido descrita por muchos autores una importante secuencia del Paleozoico Superior que descansa sobre rocas metamórficas del paleozoico inferior y precámbrico. La secuencia metamórfica inferior está constituida por el Gneis Novillo de edad Precámbrica, la Cuarcita La Presa del Cámbrico y por el Esquisto Granjeno, posterior a ambas unidades. El Esquisto Granjeno se originó en un proceso metamórfico ocurrido en el intervalo Pensilvánico-Pérmico. Se sugiere que el esquisto fue colocado tectónicamente en yuxtaposición con la secuencia sedimentaria del Paleozoico Superior contemporánea a él. Se considera esta unidad como un alóctono colocado en contacto tectónico sobre el Gneis Novillo en un episodio posterior a la formación de la Cuarcita La Presa y anterior al depósito de la secuencia del Paleozoico Superior; por otra parte, estos autores han datado el fenómeno de metamorfismo del Esquisto Granjeno y lo han ubicado en el Ordovícico. El emplazamiento tectónico del Esquisto Granjeno ocurrió en el Paleozoico Tardío, al tiempo del plegamiento intenso de la secuencia del Paleozoico Superior. Según el método de este autor, el Esquisto Granjeno provino de una faja oriental perteneciente a la zona interna del cinturón Ouachita, en donde fue metamorfozido durante el carbonífero. La secuencia sedimentaria depositada en el intervalo Silúrico-Pérmico ha sido considerada por la mayoría de los autores como un autóctono tectónico desarrollado sobre el basamento continental representado por el Gneis Novillo y pertenecientes al cinturón Ouachita del sur de Norteamérica.

Otros afloramientos paleozoicos de la Sierra Madre Oriental son los que se localizan en el área de Huayacocotla, a la altura del paralelo 21. En estas localidades las rocas paleozoicas se encuentran expuestas en el núcleo de un gran anticlinorio cuyos flancos están compuestos de una gruesa secuencia sedimentaria mesozoica. Aquí, el Paleozoico está compuesto por una secuencia metamórfica de gneises, esquistos y metaconglomerados, probablemente pertenecientes a la parte inferior de esta era, y por una secuencia flysch de más de 2000 metros de espesor de edad pérmica; así mismo, se ha reportado afloramiento misisípicos de lutitas, areniscas y conglomerados en el área de Calnali, Hidalgo.

El Triásico está representado en la Sierra Madre y las zonas aledañas por los lechos rojos pertenecientes a la Formación Huizachal. Estos sedimentos continentales atestiguan un prolongado período de emersión para esta porción del país que se originó con posterioridad a las deformaciones orogénicas de fines del Paleozoico. En La Mesa del Centro existen numerosos afloramientos de secuencias metamórficas que pueden haber correspondido al Triásico o a las postrimerías del Paleozoico. En el área de Zacatecas, sobre esta secuencia metamórfica, descansan rocas sedimentarias marinas parcialmente metamorfozadas con contenido de fósiles del Triásico Superior, que constituyen, junto con Peñon Blanco y Charcas, S.L.P., los únicos afloramientos reconocidos del Triásico Marino en esta porción de México. Otros afloramientos de rocas esquistosas de probable edad Paleozoico Superior o Triásico Inferior se localizan en las áreas de Caopas, Zacatecas y Guanajuato. Durante el inicio del Jurásico continuó en la mayor parte de esta porción de México una historia continental con sedimentación de capas rojas, salvo en la región del Anticlinorio de Huayacocotlan en donde se verificó un avance de los mares que propició la sedimentación marina de una secuencia arcillosa en la Cuenca Liásica de Huayacocotla; esta secuencia sedimentaria nombrada, se deformó a finales a finales del Jurásico Inferior para que

volviera a predominar en toda la región la sedimentación continental durante el Jurásico Medio.

Con el Jurásico Superior se generaliza en todo el norte y noreste de México una transgresión marina relacionada con la apertura occidental del Mar de Tethys durante la disgregación del supercontinente Pangea. Por otra parte se considera que la apertura del golfo de México fue anterior a la apertura del Atlántico, lo que a su vez supondría que las transgresiones marinas de la primera mitad del Mesozoico pudieran venir del Pacífico mas que del este. La afinidad de las faunas del Oriente de México con las del Pacífico es un hecho que apuntala esta suposición. Para tiempos anteriores a la transgresión Jurásica, durante la sedimentación continental del Triásico, gran parte de lo que actualmente es México pertenecía al sector occidental del mencionado continente Pangea. Con la invasión de los mares del Jurásico Superior sobre gran parte del norte y noreste de México se comienzan a definir los elementos paleogeográficos que actúan durante todo el Mesozoico y que controlan la sedimentación y las deformaciones tectónicas. Entre los principales elementos que actuaron durante el Mesozoico, en el área de la Sierra Madre Oriental y zonas adyacentes, se encuentran la Cuenca Mesozoica de México o Geosinclinal Mexicano, la Plataforma San Luis-Valles, la Península o Isla de Coahuila, la Península o Archipiélago de Tamaulipas y el Antiguo Golfo de México.

La cuenca mesozoica desarrollada en la zona de la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental ha sido considerada por numerosos autores como un geosinclinal, en el sentido de un cinturón lineal de hundimiento en donde se acumularon considerables espesores de sedimentos y que posteriormente fue destruido por fenómenos tectónicos de tipo orogénico. El Jurásico superior en esta región se encontraba una gran entrante de mar bordeada por tierras positivas, salvo en el sureste, hacia el estado de Veracruz. En esta región el denominado Geosinclinal Mexicano, separado del que se desarrolló en el occidente de México, al cual se le denominó Geosinclinal del Pacífico, existiendo comunicación entre estos geosinclinales en los períodos Jurásico y Cretácico. Recientemente se ha considerado que la porción centro-oriental de México evolucionó como geosinclinal en el que se individualizaron dos cuencas; la del antiguo Golfo de México y la Cuenca Mesozoica de México, de orientación norte-noreste, en donde se depositaron sedimentos calcáreos pelágicos separados por una cresta, tal como la llamada Plataforma San Luis Luis-Valles, sobre la que se desarrolló una sedimentación nerítica. La presencia de un aulacógeno en el área de Huayacocotla durante el Jurásico Inferior, sugieren la posibilidad de que esta porción del país haya evolucionado como un sistema de aulacógenos durante la primera mitad del Mesozoico, es decir como una serie de depresiones tectónicas asociadas al inicio de la expansión del Atlántico, que fueron invadidas por los mares; la constante actividad de estas fosas ocasionó cambios drásticos en la batimetría, lo que provocó que en ciertas zonas se depositaran secuencias pelágicas asentadas en corteza continental sin que se lograra consumir un proceso de oceanificación. En gran parte de la Cuenca Mesozoica de México, como lo son la Mesa Central y la faja occidental de la Sierra Madre Oriental; la transgresión marina oxfordiana está enmarcada por el depósito inicial de los Yesos Minas Viejas que dan cuenta de aguas someras en condiciones de fuerte evaporación. Estos depósitos de yesos jugarían un papel muy importante en las deformaciones orogénicas de finales del Mesozoico. En el antiguo Golfo de México la transgresión oxfordiana, también

se inicia con depósitos evaporíticos. Es sólo en esta edad cuando ocurren depósitos de aguas someras en ambas cuencas, ya que en el resto del Mesozoico las condiciones de sedimentación fueron pelágicas, en contraste con aquéllas que se desarrollaron en las plataformas de San Luis-Valles, Coahuila y Tamaulipas en donde ocurrieron depósitos de aguas neríticas.

Los depósitos del Jurásico Superior en la Cuenca Mesozoica de México, constituyen en orden estratigráfico los Yesos Minas Viejas, la Caliza Zuloaga y las limolitas, calizas y lutitas de la Formación La Caja. Los depósitos clásticos, equivalentes de facies cercanas, a costa de las dos últimas formaciones, corresponden respectivamente a la Formación La Gloria y la Formación La Casita. La transgresión marina iniciada en el Oxfordiano no cubrió completamente la plataforma Valles – San Luís Potosí y algunas áreas permanecieron emergidas durante todo el Jurásico Superior; por otra parte, quedó parcialmente emergida la Plataforma de Tamaulipas y totalmente emergida la Plataforma Coahuila. Durante la primera parte del Cretácico Inferior, ocurrieron depósitos de mar abierto en la Cuenca Mesozoica de México (Formaciones Taraises y Tamaulipas Inferior) y en el Antiguo Golfo de México (Formación Tamaulipas Inferior), mientras que sobre la Plataforma San Luís – Valles se depositaba una secuencia, principalmente evaporítica (Formación Guaxcamá). Con el abanico se generaliza una transgresión marina que cubre los últimos elementos positivos y se desborda sobre la porción occidental de México. En el perímetro de la Plataforma San Luís – Valles se desarrolló, entonces, una franja arrecifal flanqueada por depósitos post-arrecifales y pre-arrecifales en un conjunto denominado Formación El Abra; similares desarrollos arrecifales se han interpretado para las Plataformas de Coahuila y El Burro, contemporáneas a la Formación Aurora y Cuesta del Cura, así como en la zona de Tuxpan en donde un arrecife en forma de atolón constituye la roca almacenadora de hidrocarburos de la llamada Faja de Oro.

En el inicio del Cretácico Superior cambia de manera drástica el régimen de sedimentación en el Oriente de México, con el aporte de sedimentos detríticos provenientes de occidente, en donde tenía lugar un levantamiento asociado a la actividad volcánica y plutónica. Durante esta época los mares se retiran paulatinamente hacia el Oriente, con deltas progradantes asociadas, y se desarrollan en el área de la Cuenca Mesozoica de México, los depósitos de las Formaciones Indidura del Turoniano (calizas y lutitas), Caracol del intervalo Coniaciano-Maestrichtiano (lutitas y areniscas), Lutita Parra del Santoniano y Difunta del Campaniano-Maestrichtiano (lutitas y areniscas). Sobre la Plataforma San Luís-Valles se desarrolló, durante gran parte del Cretácico Superior, un complejo calcáreo de tipo plataforma, constituido por calizas simples y calizas arcillosas de la Formación Tamasopo, del intervalo Turoniano Superior-Senoniano Superior, que subyace en las lutitas, areniscas y calizas de la Formación Cárdenas del Campaniano-Maestrichtiano. Estas formaciones son equivalente de plataforma de las Formaciones Agua Nueva, San Felipe y Méndez, del Antiguo Golfo de México.

Las primeras manifestaciones de las deformaciones orogénicas de los inicios del Cenozoico son los depósitos de tipo flysh, asociados a los deltas progradantes del Cretácico Superior y a las antefosas formadas en el área de Parras (Campaniano-Maestrichtiano) y Chicontepec (Paleoceno), en donde se depositan grandes secuencias de terrígenos en aguas profundas.

Con estas deformaciones empieza la edificación de la Sierra Madre Oriental y se inicia la historia continental de gran parte de este sector del país. En el período de máxima deformación orogénica se inician, en el área de la Mesa Central, los depósitos conglomeráticos de tipo molasa correspondientes a las formaciones Ahuichila y Conglomerado Rojo de Guanajuato. Generalmente se trata de conglomerados petromórficos derivados de la denudación de las formaciones mesozoicas plegadas. En las depresiones sinclinales y fosas tectónicas se acumularon gruesos espesores de sedimentos continentales de origen aluvial, lo que le imprimió un paisaje geomorfológico, característico de la Mesa central. El extremo occidental de esta zona de pliegues mesozoicos aparece cubierta por las mesetas ignimbríticas disectadas y afalladas de las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, originadas principalmente en el Oligoceno. En el Antiguo Golfo de México se individualizaron durante el Terciario dos cuencas sedimentarias principales, separadas por los pliegues laramídicos de las sierras de Tamaulipas y San Carlos. La cuenca de Burgos, ubicada al norte, presenta secuencias marinas, principalmente detríticas, de más de 1500 m con desarrollo de numerosas fallas de crecimiento reconocidas por las perforaciones de Petróleos Mexicanos.

Las actividades plutónica y volcánica en la Sierra Madre Oriental y la Llanura Costera del Golfo fueron muy incipientes durante el Cenozoico y solo se reconocen aislados plutones emplazados en la secuencia mesozoica y algunos derrames de los dominios de la Sierra Madre Occidental y Eje Neovolcánico, así como de la provincia alcalina del oriente de México. Los más importantes emplazamientos plutónicos corresponden a la Sierra de San Carlos, en Tamaulipas, en donde se encuentran sienitas nefelínicas, gabros y monzonita dispuestos en lacolitos, diques y mantos. Estas rocas constituyen la continuación hacia el sur de la provincia alcalina que se inicia hacia el norte en el área de Big Bend, en Texas. Estudios radiométricos de rocas intrusivas del área de Tamaulipas, realizados por Bloombield y Cepeda en 1973, revelaron fechas que varían entre 30 y 28 millones de años. Los derrames alcalinos de basalto, ubicados al norte de Tampico, representan un evento más tardío, el cual se atribuye a un fenómeno de distensión.

En resumen las características del basamento precámbrico y paleozoico sobre el que evolucionó la amplia secuencia mesozoica del oriente de México, no son claras, ya que en general son escasos los afloramientos. Los cinturones que conforman este basamento deben haber sido fuertemente dislocados por los movimientos laterales y verticales de la primera mitad del Mesozoico, cuando ocurrió la apertura del golfo de México. Estos movimientos tectónicos prepararon la distribución paleogeográfica de cuencas y plataformas que controlarían la sedimentación y las deformaciones Laramídicas de finales del Mesozoico. De cualquier forma, los afloramientos paleozoicos de la Sierra Madre Oriental han sido considerados como una prolongación del cinturón Ouachita del sureste de Estados Unidos, debido a la similitud de sus rocas. Durante el Triásico esta porción del país evolucionó en forma continental con el desarrollo de una tectónica distensiva que dio lugar a la formación de fosas y rellenos importantes de sedimentos continentales. En el período Jurásico se instauran en México dos dominios importantes como resultado de la apertura del Atlántico y el golfo de México, así como la migración de Norteamérica hacia el noreste. El primero de ellos, ubicado en el occidente de México, estaba representado por una margen convergente y una zona de arco magmático de tipo andino adyacente, resultado del

hundimiento de la placa Paleopacífica debajo del continente norteamericano; el segundo dominio, de tipo geosinclinal o de sistema de alaucógenos, se origina por la trasgresión marina del Jurásico Superior sobre el oriente del país, al tiempo de la apertura del Golfo de México. Esta transgresión dio lugar a considerables depósitos calcáreos en el marco de una subsidencia intermitente y a la presencia de elementos cratónicos en forma de porciones emergidas y altos fondos marinos. A principios del Cretácico Superior ocurre un marcado cambio en el régimen de sedimentación de esta región, como consecuencia del levantamiento y deformación del dominio occidental en donde continuaba actuando la subducción de la Placa Paleopacífica, debajo de la porción continental de México. Los sedimentos detríticos que comienzan a cubrir la secuencia calcárea del oriente se distribuyen ampliamente y llegan a alcanzar grandes espesores en las antefosas de Parras, el Cretácico Superior, y Chicontepec en el Paleoceno, cuya formación anuncia la actividad orogénica que afectaría toda la región. De esta manera los dominios occidental y oriental de México, que habían actuado de manera relativamente independiente y con características propias, se ven interrelacionados estrechamente con las deformaciones de finales del Mesozoico.

VALLE DEL MEZQUITAL

El Valle del Mezquital, es una cuenca de origen lacustre que como la del Valle de México, con la que colinda por el Sur y Suroeste, y otras del mismo carácter, han ocupado las depresiones formadas entre el relieve montañoso que se extiende y ramifica en la altiplanicie mexicana llamada Mesa Central. El Valle del Mezquital limita al Norte y Noroeste con los cerros de Juárez, La Muñeca, Picacho y Santuario; y por el Este limita con las estribaciones de la Sierra Madre Oriental, que principia por el cerro de Cuxmaye, y la sucesión de alturas entre las que se encuentra el cerro de Hundri, que se prolonga al Sur y al Sureste, enlazándose con la serranía de los Organos de Actópan, que separan por el Noreste y el Este la cuenca del Mezquital, de las vertientes de los ríos de San Andrés Tonicapa, San José y de las avenidas de Pachuca; por el Sur y Suroeste con las alturas situadas al Sur de los pueblos de Tlapacoya y Tlaxinca, la Sierra del Mexe que separa la vertiente meridional del Mezquital de la del Valle de México; por el Oeste, la cuenca queda limitada por las estribaciones Suroeste del cerro de Juárez, la Serranía que se prolonga hacia el Sur, cerros de San Juanico entre los que se abre paso el río Tula, que en esta parte se llama Ixmiquilpan, en el cañon de la Abra de San Juanico, continuando al Sur la serranía en que se distinguen los cerros de la oreja Desnit, Picudo, Dado, Pílon y Mixquiahuala, que separan la cuenca del Mezquital por el Oeste de la del río San Juan del Río.

Entre los flancos Suroeste del cerro del Pílon y Suroeste de la Sierra del Mexe, se extiende un lomerío entre las que se distinguen los cerros Xicuco y Huitel, entre éste último y los flancos meridionales del cerro Pílon pasa el río Tula que más al Norte se interna en la cuenca. Respecto al relieve interno de la cuenca puede señalarse como más importante, el macizo montañoso de San Miguel de la Cal. Este núcleo montañoso que se introduce en la parte occidental de la cuenca es un apéndice que en dirección Suroeste a Noreste, se desprende de la serranía que limita la cuenca por el Oeste; cortado después por el río Tula. La presencia de este macizo, permite dividir la cuenca del Mezquital en tres secciones; la primera que es conocida con el nombre de Valle de Ixmiquilpan, esta sección queda

comprendida entre los cerros que limitan la cuenca por el Norte y los flancos septentrionales de la sierra de San Miguel por el Sur, extendiéndose por el Sureste; la segunda sección puede considerarse el área de Actopan, por encontrarse en la población de Actopan, que es la más importante entre los flancos orientales de la sierra de San Miguel y la continuación de la sierra que limita la cuenca por el Oriente, hasta el Sur de Yolotepec; la tercera sección es la llamada Mexe, la cual corresponde a la parte de la cuenca comprendida entre los flancos meridionales de la Sierra de San Miguel de la Cal, y los septentrionales de la del Mexe entre la lomita aislada próxima a dicha sierra e inmediata al pueblo de San Miguel y el cerro de El Tuy, en la sierra del Mexe .

Después del macizo montañoso de la sierra de San Miguel de la Cal, el resto del relieve en la parte interna de la cuenca está formado por alturas de cierta consideración separados de los macizos limítrofes de la cuenca, por la acción de los agentes erosivos, principalmente el de las aguas, que han originado los contrafuertes y alturas aisladas de la misma naturaleza geológica que los macizos principales, pero más o menos separados de éstos, como observarse en la sección del Mexe. Otros lomeríos han sido originados por la acción de las aguas al circular entre los antiguos fondos de estas cuencas lacustres modelados por las corrientes superficiales que han formado lomeríos y barrancas más o menos profundas al abrir sus cauces. Las aguas superficiales que circulan en la cuenca del Mezquital, tienen salida por el río Tula, que penetra en la cuenca después de pasar por las poblaciones de Tula, Santa Ana, Atenco, Achichilco y Tezontepec, pasando por los flancos meridionales y orientales en el cerro de Mixquiahuala a inmediaciones de la población de Mixquiahuala y por la de Progreso, sigue después su curso entre la sierra que limita la cuenca del Mezquital por el Occidente y los flancos occidentales del macizo montañoso de San Miguel de la Cal, pasa en esta parte de su trayecto por las poblaciones de Tlacotlapilco y Alberto, para entrar en la sección del Valle del Ixmiquilpan, abriéndose pasa a través de la sierra, en esta sección recibe el nombre de río Ixmiquilpan, atraviesa esta parte de la cuenca para salir al Noroeste de Ixmiquilpan, después de pasar por la población, abriéndose paso en la sierra a inmediaciones del pueblo de San Juanico, a través del cañón llamado Abra de San Juanico, continuando su trayecto fuera de la cuenca hacia el Noroeste y reuniéndose al río San Juan del Río, para continuar su camino entre los límites de los Estados de Hidalgo y Querétaro en donde toma el nombre de río Moctezuma para dar salida a sus aguas en la vertiente del Golfo de México, por el río Panuco.

El río Tula antes de penetrar en el Valle del Mezquital, aumenta su caudal con aguas que recibe en la cuenca del Valle de México, provenientes del desagüe de esa cuenca, por los tajos de Nochistongo y Tequisquiac, el primero desemboca en el río El Salto y el segundo en el Tequisquiac, que a su vez son tributarios del río de Tula. Hacia la parte Oriental de la cuenca, el río Actopan, es el más importante, se forma a inmediaciones de las poblaciones de Estanzuela, Tilcuautla, Ixcuintlapilco y Santiago Tlapacoya al Este y Sureste de la sierra del Mexe, atraviesa este macizo entre los cerros de El Tepetate y El Tezontle, para continuar hacia el Norte de la cuenca pasando por los pueblos de Dexthó, hacienda de la Vega, Lagunilla; entra al Valle de Ixmiquilpan, hasta los terrenos del pueblo de Debohdé, desde donde cambia su dirección hacia el Occidente, designándosele con el nombre de Arroyo del Salitre para desembocar en el río de Tula, durante su trayecto, recibe las aguas que descienden de los flancos occidentales de la Serranía que limita la cuenca por el Este,

el Noreste y Norte; recibiendo también los arroyos que descienden de los flancos orientales y septentrionales de la sierra de San Miguel de la Cal y parte de la meridional de dicha sierra, así como parte de la septentrional del Mexe.

En lo concerniente a la geología, las rocas que afloran en la región, son: sedimentarias, ígneas y metamórficas. Entre las rocas sedimentarias se encuentran calizas, pizarras, margas, arcillas, arenas, areniscas, gravas, conglomerados, etc; las rocas ígneas son extrusivas e intrusivas, en las primeras están representadas por andesitas, rhyolitas, basaltos y materiales piroclásticos como cenizas volcánicas, tobas, arenas, brechas, etc. Entre las intrusivas se encuentran los granitos, aplitas, sienitas. Finalmente las rocas metamórficas, son producidas por el contacto entre las anteriores y las producidas por el dinamometamorfismo. Las calizas, son las rocas mas antiguas que afloran en la región del Valle de Mezquital, su color dominante es el gris; pero también son amarillentas y rosadas en algunos lugares, son compactas, de grano fino, forman capas de bastante espesor hasta de dos metros. Contienen núcleos e intercalaciones de pedernal negro; varias de estas capas contienen abundantes fósiles marinos, muy difíciles de extraer, debido a la compacidad de las que los contienen. Sobre éstas, descanza otro grupo que es inmediato en antigüedad, formado por capas de calizas más delgadas, grises y negras que a veces son apizarradas, que alternan con pizarras arcillosas margosas, hasta ceder su puesto a estas últimas. Contienen también estos depósitos, fósiles marinos. Las primeras, corresponden al cretácico medio mexicano y las segundas al cretácico superior. Las calizas del cretácico medio, son el constituyente principal del núcleo montañoso de San Miguel de la Cal y de esta misma naturaleza son casi en su totalidad las montañas que se extienden al noreste del macizo montañoso mencionado. La sierra de San Miguel de la Cal, hacia su parte meridional, en la sección del Mexe, muestra claramente las características tectónicas que han dado origen a esta sierra formada por una sucesión de pliegues anticlinales y sinclinales, que han sufrido la acción de la erosión hídrica.

El macizo montañoso San Miguel de la Cal hacia su parte Oriental principia por un sinclinal relativamente pequeño, su eje tiene una dirección Sureste a Noroeste y las capas que forman su rama oriental tienen un rumbo general Norte de 45° y su echado es al Noreste de 48° , los echados van saliendo menores a medida que se aproximan al fondo de esta que debido a la erosión, en encuentran descompuesta en lomas y colinas más o menos próximas. En la parte extrema meridional del Valle de Mezquital, se abre un amplio valle, en el cual se notan signos de fracturamiento, manifestados por la presencia de intrusiones ígneas basálticas bastante vigorosas que atravesaron la caliza. Los fenómenos de metamorfismo se observan en las márgenes de los arroyos del lugar, notándose algunas capas de pizarras y calizas metamorfizadas y arcillas amarillentas.

Hacia el Noreste de la Sierra de San Miguel de la Cal, continúa las calizas cretácicas formando parte del relieve en la parte plana de la cuenca del Valle del Mezquital. Estas mismas calizas constituyen parte del macizo que limita la cuenca por el Noreste entre los terrenos de la población de Santiago y el cerro de Cusmayá a inmediación y al Sur del pueblo de Cardonal al Noreste de la ciudad de Ixmiquilpan. En la parte occidental y septentrional de la sierra de San Miguel de la Cal, existe una sucesión de plegamientos separados por la intercalación de materiales más recientes; sobre estas calizas que han sido

referenciadas al cretácico medio, reposan en algunos lugares calizas pizarras y margas del cretácico superior, que a su vez se encuentran cubiertas por rocas ígneas y rhyolitas, al Norte y Noreste de Ixmiquilpan, y por basaltos en algunas cuevas cercanas a este lugar. En las calizas que han sido referenciadas al Cretácico Medio Mexicano, reposan otro grupo de rocas sedimentarias, correspondientes al cretácico superior, tales como calizas grises y negras, delgadas y apizarradas que alternan con capas de pizarras arcillosas grises y por alteración pardas, que se encuentran plegadas y fracturadas. Estas rocas constituyen la mayor parte del cerro de Mixquiahuala en la Sierra de San Miguel de la Cal. En el Valle de Ixmiquilpan, afloran calizas, pizarras y margas arcillosas que corresponden a la misma formación del cerro de Mixquiahuala, en donde las calizas y las pizarras se encuentran alternando y plegadas, predominando hacia arriba las pizarras y margas arcillosas, siendo éstas últimas las que al fin quedan cubiertas por una corriente de lava basáltica.

La zona de fractura que ha sido supuesta al Oeste de la sierra de San Miguel de la Cal, entre el cerro de Mixquiahuala y la población de Alberto, fue cubierta por los depósitos terciarios y cuaternarios, sobre los que se deslizaron más tarde las lavas basálticas entre las que finalmente ha cavado su cauce el río de Tula, abriéndose paso entre los macizos andesíticos para entrar en el Valle de Ixmiquilpan. Hacia el Sur y Sureste del cerro de Mixquiahuala, los depósitos cuaternarios y recientes cubren los vestigios de esta falla. Otro tanto puede decirse de la parte meridional y occidental de la sierra de San Miguel de la Cal, en donde los depósitos lacustres enmascaran los sedimentos cretácicos; existen además fracturas que han facilitado el paso de emisiones ígneas. Estas zonas de debilidad se muestran en la mitad occidental de la sierra, con intrusiones basálticas. Estos diques que se han abierto paso a través de los sedimentos del Cretácico Superior, afloran a poca distancia de la cima, muy cerca de la base de la corriente basáltica que cubre la cima del cerro de Mixquiahuala. Uno de estos diques se observa en la parte Noreste del cerro, es de poca anchura y de color café rojizo, la roca es muy compacta y contiene numerosos cristales de cuarzo diseminados en su masa.

FORMACIÓN EL DOCTOR

Historia de nomenclatura de la unidad.

Se propuso el término Banco Calizo El Doctor, en alusión al pueblo El Doctor, ubicado en el Estado de Querétaro a 25 km al noroeste de Zimapán, Hidalgo. Esta unidad se divide en cuatro facies: La Negra, San Joaquín, Socavón y Cerro Ladrón, esta última la dividieron en tres subfacies: una subfacies con rudistas, una subfacies de lodos calizos y una subfacies de conglomerado de grano fino. Segerstrom (1961a) propone el nombre de banco Ixmiquilpan como una facies más de la Caliza El Doctor el cual aflora al sur de Ixmiquilpan, Hidalgo. Carrasco 1970, realizó una revisión de la nomenclatura de los términos de las unidades El Abra y El Doctor, menciona que el nombre Caliza El Doctor ha sido usado en la Sierra Madre Oriental y en el Altiplano Mexicano por conveniencia geográfica, mientras que a la Formación El Abra a sido usada en la Sierra de El Abra y sus prolongaciones al norte y sur; este autor señala que la Formación El Abra fue depositada sobre una plataforma extensa, por lo que no se justifica usar dos nombres formacionales y propone abandonar el nombre

de Caliza El Doctor y usar únicamente el nombre de Formación El Abra para las rocas depositadas en la Plataforma Valles-San Luis Potosí.

Localidad tipo.

La localidad tipo corresponde al flanco noreste de un gran banco de caliza en donde se han distinguido cuatro facies de la unidad (López-Ramos, 1985), en las cercanías del poblado El Doctor, ubicado en el Estado de Querétaro a 25 km al noroeste de Zimapán, Hidalgo.

Descripción litológica.

Con base en sus diferencias litológicas propone la división de esta unidad en cuatro facies: La Negra, San Joaquín, El Socavón y Cerro Ladrón; La Negra consiste de estratos de caliza, de 10 a 20 cm de espesor, con pseudoestratos lenticulares de pedernal negro de 1 a 10 cm de espesor; los estratos de caliza están compuestos a su vez de láminas formadas por material clástico de grano fino, siendo comunes intercalaciones de lutita roja; la facies San Joaquín es una caliza gris oscura de estratificación gruesa y abundantes nódulos de pedernal negro, su composición es semejante a la de la facies La Negra, se presenta en una faja de 1 a 2 km de anchura, está interdigitada con la facies La Negra y la facies El Socavón; la facies El Socavón está restringida a una zona comprendida entre la facies San Joaquín y la facies Cerro Ladrón, a esta zona de clásticos calizos se le considera de 1 a 2 km de anchura, esta facies consiste de calcarenita de estratificación gruesa y conglomerado de grano fino con cantidades considerables de coquina clástica, sus condiciones de sedimentación quedan mejor indicadas por la presencia de conglomerado calizo de grano grueso, con bloques hasta de 2 m de diámetro, cuya composición y grado de redondez varían considerablemente de uno a otro, los bloques están compuestos de calcarenita, coquina, coquina clástica o caliza de grano fino, algunos están bien redondeados mientras que otros son tabuladores; la facies Cerro Ladrón, es una gran masa lenticular de caliza en forma de banco, desde su extremidad noroccidental, en el Río Extoraz, se extiende por unos 50 km, donde queda cubierto por rocas volcánicas del Cenozoico y está limitada por la caliza clástica de la facies El Socavón y la facies La Negra; consiste en estratos delgados de caliza alternada con lentes de pedernal negro y se pueden distinguir tres subfacies, una con rudistas, la cual consiste de numerosos biostromas de rudistas intercalados entre estratos de caliza de grano fino, su espesor es menor que el de las otras subfacies; una de lodos calizos litificados que se compone totalmente de caliza de estratificación gruesa y grano fino, contiene fósiles de gasterópodos, rudistas de concha delgada y miliólidos, esta subfacies es la más potente ya que alcanza hasta 1500 m de espesor y una de conglomerado de grano fino; el cual está interestratificado con una caliza de grano fino, llega a tener un kilómetro de ancho. Segerstrom, 1961, reconoce hacia el oriente y sur de Ixmiquilpan una facies a la cual llama banco Ixmiquilpan, que contiene biostromas, sin pedernal y de color gris claro; además menciona que a 2 km al poniente de Higuierillas, Querétaro, la parte basal de la Caliza El Doctor consiste de unos cuantos metros de brecha que contienen fragmentos angulares con diámetro máximo de 15 a 20 cm, compuestos de caliza y en menor proporción de pedernal, cuarcita, arcosa y grauvaca, en una matriz de caliza fétida y fósiles. Se describe a esta unidad diferenciándola en dos facies: la facies de plataforma que consiste de bancos gruesos bien estratificados de caliza de grano fino con miliólidos y la facies de borde de plataforma; la cual consiste de calcarenita y calcirudita con abundancia de

rudistas. Se menciona que la unidad consiste de caliza packstone con rudistas y gasterópodos en estratos desde medianos hasta masivos (40 cm a 2 m) de color gris en superficie fresca y gris claro al intemperismo; además incluye estratos de packstones de miliólidos y frecuentemente se observa recristalizada en los contactos por cabalgadura.

Espesores.

Presenta su mayor espesor hacia el oeste y suroeste del distrito El Doctor (porción oriental del estado de Querétaro hasta los límites con el Estado de Hidalgo), desapareciendo por completo en algunos lugares; el espesor de la facies La Negra no parece ser mayor de 300 m; el máximo espesor de la facies, Cerro Ladrón, se aproxima a los 1500 m. Se reporta un espesor para el banco Ixmiquilpan de 750 a 900 m, este espesor se reduce a 100 o 200 m en la Sierra de Juárez, situada a 16 km al norte de Ixmiquilpan y que en la región de Tolimán, al noreste de Querétaro, la unidad tiene espesores de 800, 300 y 200 m.

Distribución.

Ocupa la porción oriental del Estado de Querétaro y se extiende hasta los límites con el Estado de Hidalgo. Se menciona que esta unidad aflora a lo largo del Río Moctezuma, en su confluencia con el Río Tula; al poniente de Pontiú, Hidalgo; en las cercanías de Mesa de León; y al sudoeste de Zimapán, Hidalgo, en el cerro Daxí, Estado de México.

Relaciones estratigráficas.

La caliza El Doctor está cubierta por la formación Soyatal, del Turoniano, dicho contacto es concordante en algunos lugares y discordante en otros. Las rocas de ésta unidad subyacen sobre la Formación Santuario en la parte oriental del estado de Hidalgo y Estado de México, mientras que en la parte occidental yacen directamente sobre la formación Las Trancas, no es aparente una discordancia angular entre las calizas y las rocas subyacentes.

Contenido paleontológico.

Los rudistas y gasterópodos son los fósiles más abundantes en biostromas, además se pueden encontrar algunos corales, ostreas, pelecípodos y equinodermos; los rudistas más abundantes pertenecen a los géneros *Caprinuloides* y *Toucasia*, también se presentan ejemplares de los géneros *Radiolites*, *Eoradiolites* y *Monopleura*; los gasterópodos son principalmente de los géneros *Nerinea* y *Actaeonella*; los pelecípodos incluyen los géneros *Chondrodonta*, *Pinna* y *Neithea*. Por otro lado, los microfósiles son abundantes en algunas capas de caliza de grano fino, se identifican especies de la familia *Miliolidae* y en menor cantidad los géneros *Radiolaria* y *Pithonella*. Se menciona una abundante presencia de foraminíferos con los géneros *Nummoloculina Heidi*, *textuláridos*, *Bulumina sp*, además de numerosos ejemplares, tanto completos como fragmentos, de rudistas y gasterópodos no clasificados. Además se reporta la presencia de algas y ocasionalmente corales.

Ambiente de depósito.

La presencia ocasional de guijarros del Jurásico en un conglomerado basal de caliza, indican la existencia de un ambiente costero del Albiano-Cenomaniano; la facies La Negra se ha interpretado que fue depositada en la parte profunda de la zona nerítica; la facies San Joaquín representa sedimentos calcáreos semejantes a los de la facies La Negra, pero depositados a menor profundidad, de manera que fueron afectados por el oleaje durante las tormentas, la presencia en ésta de pequeños pliegues primarios sugieren que el depósito de los sedimentos tuvo lugar en un fondo con inclinación suficiente para causar hundimiento y resbalamiento submarino. La facies Cerro Ladrón constituye un banco que se formó en aguas someras; los sedimentos clásticos de la facies Socavón muestran que estuvieron a corta distancia de su lugar de aporte. Las características paleontológicas y litológicas de la unidad indican un ambiente de plataforma lagunar en la cual se desarrollaron bancos de rudistas y gasterópodos, no se reconocen facies arrecifales *sensu stricto*.

Edad.

Se menciona que en gran parte es del Albiano medio al Cenomaniano temprano. Asimismo, se ha interpretado que los microfósiles bentónicos de la Formación El Doctor son índices del Albiano-Cenomaniano.

Correlación.

Esta unidad se ha correlacionado con Formación El Abra, de la cuenca Tampico-Misantla y la expuesta en la Plataforma de Valles-San Luis Potosí. Se menciona que la facies La Negra es muy parecida a la caliza Cuesta del Cura (Albiano-Cenomaniano) del noreste de México; Se menciona una similitud en litología entre la Caliza Ahuacatlán y la facies nerítica de la Caliza El Doctor. Finalmente, se dice que se correlaciona con la Caliza Cuesta del Cura, con la parte alta de la Formación Peña Azul, con la Formación Orizaba de la Cuenca de Veracruz, con la Formación Morelos y con la Caliza Sierra Madre de Chiapas.

Estado de la nomenclatura.

Unidad formal, debido a que la propuesta de abandonar el nombre de Formación El Doctor carece de argumentos válidos, por lo cual se debe manejar por separado las formaciones El Abra y El Doctor hasta que se establezca apegado al Código de Nomenclatura Estratigráfica la posible sinonimia entre estas dos unidades.

FORMACIÓN EL ABRA

Historia nomenclatural de la unidad.

Estas rocas fueron originalmente incluidas en lo que se denominó Caliza Tamasopo; sin embargo, algunos autores posteriores basados principalmente en su litología y alcance estratigráfico consideraron que estas rocas no correspondían a la definición *sensu strictu* de la caliza Tamasopo. El término Caliza El Abra fue originalmente utilizado para las calizas de los campos petroleros de la Faja de Oro, correlacionándolas en edad con la Formación

Tamaulipas. Burckhardt, 1930, indicó que la formación Tamasopo está directamente suprayacente al Turoniano y que si el nombre Tamasopo se conserva en la literatura sedimentaria, debe reservarse solo para la facies de arrecife del Turoniano-Emscheriano (Coniaciano). Fue formalmente elevada a la categoría de formación en 1930, la cual se dividió en fase Miliolina y fase Taninul. Posteriormente, el nombre de Formación El Abra fue aplicado para un grupo de dos facies; la facies Taninul, con localidad tipo en el túnel Taninul, al oeste de la estación Taninul sobre el ferrocarril Tampico-San Luis Potosí y la facies El Abra, con localidad tipo en la estación El Abra a 9.4 km al oriente de Ciudad Valles. Se menciona que la Caliza El Abra, junto con las calizas Tamaulipas y Taninul son diferentes facies pertenecientes a la Formación Tamabra. Según el concepto de Carrillo-Bravo, 1971, la Caliza El Abra incluye los carbonatos de la Plataforma Valles-San Luis Potosí y de la Faja de Oro de edad Albiano-Cenomaniano, comprendiendo las facies pre-arrecifal (equivalente a la Formación Tamabra), la facies arrecifal (equivalente a la facies Taninul), y la facies post-arrecifal (equivalente a la facies El Abra); sin embargo, se incluye dentro de la Formación El Abra, independiente de su edad, a las facies El Abra (interior de la plataforma) y Taninul (borde de la plataforma); estas facies fueron cartografiadas por el autor como miembros de la Formación El Abra separadas de la facies de talud (Formación Tamabra). A partir de entonces se generalizó el uso de Formación El Abra bajo este contexto. Por otro lado, Wilson, 1955, en su definición de la Formación El Doctor (Facies La Negra, San Joaquín, Socavón y Cerro Ladrón), hizo notar la semejanza entre la subfacies de rudista de la facies Cerro Ladrón y la facies urgoniana de la Formación El Abra. Posteriormente, Caliza de la Formación El Abra, correspondiente a la zona lagunar del arrecife, en la localidad situada en la Cantera El Abra (cercanías de Ciudad Valles, San Luis Potosí). Se considera que las facies de banco calcáreo de la Formación El Doctor son semejantes en litología, elementos faunales y paleoecología, a la Formación El Abra. Se menciona que no existe diferencia en la litología de las formaciones El Abra y El Doctor; asimismo agrega que la Formación El Abra fue depositada en una plataforma extensa, por lo que no se justifica usar dos nombres formacionales, por lo que propone abandonar el nombre de Formación El Doctor y usar únicamente el nombre de Formación El Abra para las rocas depositadas en la Plataforma Valles-San Luis Potosí.

Localidad tipo.

Está ubicada en la estación El Abra, a lo largo del ferrocarril nacional, alrededor de 9 km al este de Ciudad Valles, San Luis Potosí.

Descripción litológica.

Esta unidad ha sido tradicionalmente dividida en las facies El Abra y Taninul, las cuales han sido descritas litológicamente por diferentes autores concordando de manera general; a continuación se presentan algunas de las descripciones más completas. Carrillo-Bravo, 1971, describe la facies Taninul como facies arrecifal representada por caliza masiva de color crema amarillento y gris crema, constituida principalmente por un conjunto de bancos arrecifales (de caprínidos y radiolítidos), separados por calcarenita, calcarenita oolítica y clásticos biogénicos; el cementante entre los fósiles generalmente es calcita de grano fino; por otro lado, subdivide la facies El Abra, en cinco litofacies, 1) unidad clástica post-arrecifal, constituida por calcirudita, calcarenita y caliza oolítica de color crema amarillento

y gris crema, en capas gruesas con estratificación cruzada en algunos sitios; 2) unidad de calcilita y calcarenita con miliolas y toucasias, de color gris y gris crema, en partes de color negro por impregnación de hidrocarburos, en capas de espesor grueso a masivo, toda la caliza contiene pelets, miliolidos y en ocasiones estas últimas son tan abundantes que llegan a formar calcarenita de miliolidos, también son frecuentes los biostromas de toucasias; 3) unidad de dolomita y caliza parcialmente dolomitizada, representadas por dolomita de grano fino a medio, ocasionalmente grueso, de color pardo grisáceo y gris acero, en capas mediana a gruesas, en algunas ocasiones se observa caliza parcialmente dolomitizada y algunas capas de calcilita y calcarenita con miliolidos y pequeños biostromas de rudistas; 4) unidad de calcilita y calcarenita con miliolidos y toucasias, constituida por calcilita, calcarenita biogénica, caliza oolítica y algunos horizontes de caliza dolomítica, de color crema amarillento y gris crema, en capas medianas y gruesas, con abundantes miliolidos y algunos desarrollos biostromales de toucasias o de radiolítidos, monopléuridos y muy escasos corales; 5) zona dolomítica basal, dolomita de grano fino a grueso, de color café grisáceo y gris acero, en capas gruesas. Por otro lado, Suter, 1990, menciona que la facies El Abra está constituido por carbonatos bien estratificados, sin horizontes internos de referencia, con capas de color gris claro de 30 cm a 3 m de espesor; mientras que la facies Taninul consiste de caliza de color gris claro, incluye biohermas tabulares de rudistas y capas lenticulares de caliza bioclástica de textura rudstone-grainstone. En un contexto textural, se menciona que el miembro El Abra consiste de mudstone de color crema a gris interestratificado con wackestone bien estratificado con estratos de 1 a 5 m de espesor, todos ricos en miliolidos y capas estromatolíticas y otros organismos bentónicos como gasterópodos, pelecípodos, ostrácodos; mientras que el miembro Taninul consiste de bancos de rudistas asociados con mudstone, wackestone y packstone.

Espesores.

Se menciona que la facies Taninul probablemente excede los 2000 m; mientras que para la facies El Abra registra una variedad de espesores que varían de 90 a 2000 m, dependiendo del área y/o de la litofacies. Por otro lado, se ha registrado para la facies El Abra un espesor de 1000 m en la ladera occidental del Cerro Grande, y de 1100 m en el núcleo de un Sinclinal entre Otates y Laguna Seca; y para la facies Taninul un espesor de 900 m en la ladera meridional del Cerro Peña Prieta, al norte de la carretera federal 120 y 1100 m en la ladera meridional del Cerro Sapo, en el cañón del río Moctezuma. Posteriormente, se han registrado espesores variados dependiendo de la localidad; 90 m en la localidad El Madroño, Querétaro, alrededor de 1800 m en la porción este de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, 100 m en algunas canteras de la localidad tipo y alrededor de 250 m en la cantera “Cementos Anáhuac”.

Distribución.

Esta unidad está ampliamente distribuida en la Plataforma Valles-San Luis Potosí y La Faja de Oro (Carrillo-Bravo, 1971). Se ha registrado su presencia en los afloramientos a lo largo de la carretera federal 120, entre Laguna Colorada y La Vuelta, a lo largo de la carretera federal 85, al poniente de Cuesta Colorada, a lo largo del camino Zoyapilca-La Soledad donde aflora la cima de la Formación El Abra, al norte del Valle de Guadalupe, en la parte

occidental de Cerro Grande, y en áreas cercanas al Municipio de San Joaquín, en el estado de Querétaro.

Relaciones estratigráficas.

En la Sierra de El Abra las rocas arrecifales (facies Taninul) subyacen discordantemente a la formación San Felipe al noroeste de Gómez Farias y al oriente de Jaumave, Tamaulipas; en el área de Miquihuana, Tamaulipas se encuentra cubierta discordantemente por margas de la formación Méndez; mientras que en la Sierra de Álvarez y área de Jalpan subyacen discordantemente a la Formación Soyatal. En el caso de la facies post-arrecifal (facies El Abra), en el frente este de la Sierra Madre Oriental subyace discordantemente a las formaciones Agua Nueva o San Felipe, desconociéndose sobre qué rocas descansa; en las áreas de Agua Nueva, Guaxcamá, Guadalcázar, San Luis Potosí, esta facies descansa concordantemente sobre la Formación Guaxcamá y en la margen sudoccidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí subyace discordantemente a la Formación Soyatal. Por su parte, Basañez *et al.*, 1993, mencionan que la Formación El Abra descansa concordantemente sobre la Formación Guaxcamá y la Arenisca Alamitos y puede estar cubierta concordantemente por las formaciones San Felipe, Agua Nueva, La Muralla o Tamasopo (miembro inferior), dependiendo de la ubicación dentro de la Plataforma Valles-San Luis Potosí.

Edad.

Esta unidad ha sido generalmente incluida dentro de un rango entre el Albiano-Cenomaniano con base en la presencia de foraminíferos de los géneros *Dictyoconus*, *Orbitolina* y *Dicyclina* sp; los rudistas *Radiolites abraensis*, *Sauvagesia texana*, *Caprinuloidea multitubifera*, *Mexicaprina*; *Texicaprina*, *Kimbleia* y *Eoradiolites davidson*, los bivalvos *Kingenia wacoensis*, *Chondronta cf. munsoni*, *Pecten roemeri*; el hidrozoario *Parkeria sphaerica* y el amonite *Mariella (Plesioturrites) bosquensis*. Estudios posteriores han atribuido a esta formación un rango estratigráfico más amplio; tal es el caso de Alencáster *et al*, 1999, quienes registran para la parte inferior de la sucesión ubicada entre San Luis Potosí y Matehuala a las especies de rudistas *Coalcomana ramosa*, *Caprinuloidea perfecta*, *Kimbleia albrittoni*, *Mexicaprina corneta*, *M. quadrata*, *Eoradiolites davidson* y *Toucasia texana* que indican una edad del Albiano; en estratos inmediatamente encima registran foraminíferos de las especies *Merlingina cretacea*, *Cuneolina pavonea*, *Peneroplis parvus* y *Dicyclina schlumbergeri* cuya edad es del Cenomaniano medio-tardío; mientras que para la parte superior registran especímenes de *Durania austinensis* de edad Coniaciano-Santoniano y ejemplares de *Vaccinites*, los cuales son similares a las especies del Campaniano, aunque mencionan que posteriormente se realizará la determinación más precisa de estos últimos. Se menciona que la especie *radiolites abraensis* ha sido reinterpretada como del Albiano Medio-Tardío; asimismo, considera que en su mayoría, la parte superior de la Formación El Abra en el este de México, es del Albiano Superior y contienen *Coalcomana*, *Caprinuloidea*, *Kimbleia*, *Mexicaprina* y *Guzzyella* y que la sugerencia de que este rango alcance el Cenomaniano Inferior está basado en taxa endémicos. Asimismo, menciona que la única especie reportada para el Cenomaniano Inferior es *Pecten roemeri* en la Formación Buda en el centro de Texas, el resto son del Albiano Superior; sin embargo, recalca que estos ejemplares nunca

han sido ilustrados o descritos, por lo que la edad Cenomaniana en esta parte de la plataforma para la Formación El Abra no está fundada en fósiles cuyo estatus sistemático sea inequívoco. Mientras que para la parte oeste de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, no descarta que su edad si pueda ser más joven que el Albiano. Finalmente, se mencionan que el contenido de radiolítidos y foraminíferos en la localidad Laguna Colorada, Querétaro indican que la edad del depósito está restringida al Albiano Medio-Tardío.

Ambiente de depósito.

Se interpreta que el ambiente de depósito de esta unidad corresponde al de una plataforma amplia y estable de aguas someras, con dos facies principales: la post-arrecifal o lagunar y la arrecifal. Se menciona que El Abra en su localidad tipo es un complejo arrecifal depositado en el margen este de la plataforma Valles-San Luis Potosí, y agrega que esta unidad es definida por dos grandes ambientes sedimentarios: 1) arrecife de rudistas (“*foreslope reef* y *shelf-edge reef*”) y 2) post-arrecife (“*near-back reef-lagoon, tidal-flat lagoon* y *lagoon*”) estas fueron reconocidas por medio de su posición estratigráfica lateral, litofacies, biofacies, estructuras sedimentarias primarias y patrones diagenéticos. Finalmente, se mencionan que esta formación consiste de tres ambientes deposicionales: arrecifal, lagunar y laguna evaporítica.

Correlación.

Se dice que la unidad definida como Formación Morelos La facies Taninul cambia lateralmente a la Formación Tamabra en el camino Cuesta Colorada-La Ciénega, al poniente de La Misión, a lo largo de la carretera federal 120 y en la cuesta arriba de Olitla del Pino.

Importancia económica.

Esta unidad es relevante en el subsuelo de la porción media oriental de la Cuenca Tampico-Misantla en la región conocida como La Faja de Oro, por la producción de hidrocarburos, obtenida de las facies arrecifal, de talud y de post- arrecife.

Estado de la nomenclatura.

Unidad Formal, con el nombre de Formación El Abra; sin embargo en relación al uso de los miembros de esta unidad se consideran informales según el artículo 19f, el cual establece que no se puede aplicar el mismo nombre a la unidad como un todo y a una parte de la misma (Formación El Abra: facies El Abra y facies Taninul). Por otro lado, se recomienda realizar un estudio detallado con la finalidad de delimitar el alcance (geográfico, estratigráfico, litológico, etc.) entre las formaciones El Abra y Tamasopo, ya que en algunas áreas geográficas, principalmente en la Plataforma Valles-San Luis Potosí y áreas circundantes es difícil el reconocimiento del límite entre estas dos unidades e incluso se ha considerado la posibilidad de que en esa área solo se encuentra aflorando la Formación El Abra. Finalmente, dado que la propuesta de Carrasco, 1970, de abandonar el nombre de Formación El Doctor carece de argumentos, aquí se manejarán por separado las

formaciones El Abra y El Doctor hasta que se establezca apegado al Código de Nomenclatura Estratigráfica la posible sinonimia entre estas dos unidades.

ANTICLINORIO HUAYACOCOTLA

Localidad tipo

A lo largo del Río Vinasco, al sur de Huayacocotla, Veracruz, entre Rancho Calera al Oeste y Rancho Bada al Este.

Descripción litológica

Lutita oscura con intercalaciones de arenisca y conglomerado y escasos lentes de caliza distingue que la Formación Huayacocotla contiene abundantes fósiles de plantas hacia su base y carbón y plantas hacia la cima. Las capas marinas se encuentran en la parte media de la formación, evidenciadas por la presencia de amonites.

Se señala que el contenido de arenisca de la formación parece incrementarse de Sur a Norte y hacia la cima de la sección: en el Norte de Puebla, la Formación Huayacocotla está casi en su totalidad de lutita negra y limonita. Hacia el norte de ésta área capas delgadas de arenisca de grano fino a medio se vuelven más abundantes en la sección, particularmente hacia la cima. En los afloramientos y subsuelo más al norte la Formación Huayacocotla está compuesta predominantemente de arenisca y limonita con abundancia de arenisca y carbonatos hacia la cima, conteniendo abundantes restos de plantas. La base de la formación, cuando está expuesta, es generalmente representada por una sección de 20 m de conglomerado y arenisca de grano grueso, sobreyacida por un intervalo de caliza arenosa de 40 a 50 m de espesor. El conglomerado contiene clastos de la subyacente Formación Huizachal. Se distinguen tres miembros en la Formación Huayacocotla, observados en diferentes secciones en el área Molango en Ixtlahuaco-Calnali, Cuxhuacan-Ixcuicuila y Chacalapa; los cuales son: (1) el miembro inferior formado por conglomerado, arenisca, limolita lutita con exoclastos que contienen fósiles retrabajados de fusulínidos y crinoides y se caracteriza por la ausencia de fósiles autóctonos, (2) el miembro intermedio constituido por conglomerado, arenisca, limonita y lutita, con amonites (*Arietites* y *Arnioceras*), (3) el miembro superior está conformado por arenisca, limolita, lutita y conglomerado y se caracteriza por la presencia de plantas continentales. En la región de Molango, se identificó, en la cima de la unidad, la secuencia litoestratigráfica denominada “lutita con plantas” .

Historia de la unidad:

Rocas sedimentarias pertenecientes a esta formación han sido estudiadas desde finales del siglo pasado, siendo nombradas como Pizarras. El termino formal de la secuencia fue establecido en 1948, después de un estudio bioestratigráfico asigna una edad Sinemuriano–Pliensbachiano, reconociendo dos facies dentro de la formación a las que asigna nombres de Totolapa y Divisadero. Se situa la sección aflorante en el Valle Cahuasas, cerca de Chapulhuacán, Hgo, al Pliensbachiano.

Se reporta estas rocas sedimentarias ricas en materiales oscuros, carbonosos y bituminosos, con flora constituida por troncos de árboles que clasifica F. Bonet con edades del Sinemuriiano-Pliensbachiano, no reconociendo las amonitas y pelecípodos también colectados al NE de Cahuwasas. Posteriormente se asignó a esta formación una edad HettangianoTardío- Pliensbachiano con base en amonitas. Posteriormente Flores (1974) asigna una edad Sinemurensis para los fragmentos de pelecípodos y amonitas (*Vermiceras* sp.) encontrados en núcleos recuperados de los pozos Iztazoquico-1 y Santa Cruz-1a perforados al noreste de Hidalgo cerca de la población de Huayacocotla, y conservados en rocas constituidas por terrígenos finos a muy finos. Este género de amonita del Sinemuriano fue considerado como de edad Hettangiano Tardío.

Edad:

Sinemuriano y parte del Pliensbaquiano; Sinemuriano – Pliensbaquiano inferior. Hettangiano-Pliensbachiano. Se asignó a esta formación una edad Hettangiano tardío-Pliensbachiano con base en amonitas estudiadas por Imlay de los géneros *Vermiceras* sp., *Arnioceras* sp. Y *Coroniceras (Metophioceras)* sp., colectadas en el camino Xochicoatlán-Manitla, entre los ríos Tianguistengo y Chinameca, y en el camino a Xochicoatlán-Río Chinameca. Las amonitas y en particular *Vermiceras* sp., asignan una edad Sinemuriano y no Hettangiano Tardío. Hasta ahora no existe evidencia fósil que permita asignar una edad Hettangiano a la Formación Huayacocotla.

Distribución:

Aflora principalmente en la región nororiental del Estado de Hidalgo, noroeste del Estado de Puebla, y una franja del en la parte norte del Estado de Veracruz que penetra al oriente del Estado de Hidalgo y Este de San Luis Potosí. Tales áreas conforman al denominado Anticlinorio de Huayacocotla, situado en la Sierra Madre Oriental en las montañas que rodean la región de Las Huastecas. La Formación Huayacocotla ha sido reportada previamente con una gran distribución regional y aparentemente solo porciones aisladas de esta formación se encuentran a nivel local.

Espesores:

La Formación Huayacocotla parece adelgazarse progresivamente de los afloramientos del Sur hacia el Norte y Este. Se encuentra ausente en superficie de la Plataforma de Tuxpan. En los afloramientos a lo largo del Anticlinorio de Huayacocotla, la Formación ha sido reportada con espesores de 900 y 1500 m de espesor. Se encontró espesores de 560 m en el Río Coyumetla, Hgo., más de 800 m en el Río Chinameca, Hgo., y más de 1000 m en los Ríos Tianguistengo y Tlahualompa, también en el Estado de Hidalgo. Una sección medida cerca del Río Jalpa, Ver., se expone un espesor de 900 m, aunque la base no está expuesta (Ochoa-Camarillo *et al.*, 1998 y 1999). En el subsuelo, pozos perforados por PEMEX en la Planicie Costera del Golfo, han penetrado secciones completas de la formación, obteniendo espesores que van de 425 a 1350 m en el Sur y Oeste, y de 125 a 150 m hacia el Norte y Este. Otros pozos han perforado secciones incompletas de Huayacocotla de más de 1000 m sin alcanzar la base de la formación.

Relaciones estratigráficas:

Subyace discordantemente a la Formación Cahuizas y suprayace de igual manera a la Formación Huizachal. Se indica que la Formación Huayacocotla es sobreyacida por una caliza marina jurásica, esta discordancia es considerada como un límite de secuencia. La Formación Huayacocotla sobreyace a la Formación Guacamaya con un marcado hiatos asociado con una discordancia angular. En los flancos suroeste y noreste del Anticlinorio de Huayacocotla, subyace en aparente concordancia por cambio de facies la Formación Rosario, de edad Pliensbachiano-Toarciario. La Formación Huayacocotla se encuentra generalmente subyacida por los “lechos rojos” de la Formación Huizachal (Triásico Superior-Jurásico Inferior), y es discordantemente sobreyacida por “lechos rojos” de la Formación Cahuizas (Jurásico Medio), o por otras formaciones del Jurásico Superior. No se descarta la posibilidad de que la Formación Huayacocotla cambie hacia el Norte y Este a depósitos no marinos que son difíciles de distinguir de aquellos de la Formación Huizachal. Se desconocen la relación estratigráfica de las rocas del Jurásico Inferior con las del Paleozoico.

Correlación:

Formación Huizacha y Aloformación La Boca en las regiones de Huizachal-Peregrina, Tamaulipas.

Ambiente de depósito:

Bahía de circulación deficiente-litoral o litoral con influencia continental de carácter palustre. Se propone con base a las características litológicas y contenido fosilífero el depósito en un ambiente marino, observado hacia la zona sur (norte de Puebla, oriente de Hidalgo, y partes adyacentes de Veracruz), el ambiente marino cambia gradualmente a depósitos fluvio-deltaicos rumbo a la parte norte y occidente. Durante el Triásico Superior el “embahamiento” del Océano Pacífico se extendió solo a las inmediaciones de lo que ahora es Zacatecas y parte occidental de San Luis Potosí, durante el Jurásico Inferior, o al menos durante el Sinemuriano, este embahamiento oceánico se dispersó hacia el occidente, alcanzando una graben de dirección NNW-SSE en el cual sólo sedimentos no marinos se habían acumulado hasta entonces. La invasión marina del Pacífico se extendió con dirección este tan lejos como la zona límite del graben lo permitió hacia el norte y este de Hidalgo, sur de San Luis Potosí y partes adyacentes de Veracruz. Una conexión del centro-este de México y el Océano Atlántico. La evidencia indica que la parte sur del Atlántico Norte no se abrió hasta más tarde durante el Jurásico Medio.

Importancia económica:

Las características litológicas sobre todo en la parte superior de la Formación Huayacocotla, permiten considerarla como roca potencialmente generadora de Hidrocarburos).

Estado nomenclatural: Unidad formal.

LLANURA COSTERA DEL GOLFO NORTE

Esta provincia es de forma irregular y tiene su borde más amplio de 300 Km, en el sector Norte, desde donde se angosta hacia el sur, hasta desaparecer frente a las estribaciones del Eje Neovolcánico, donde apenas alcanza los 75 Km de anchura. El origen de la llanura está en el levantamiento tectónico de antiguos paquetes sedimentarios del Paleozoico, recubiertos de sedimentos y retrabajados por las corrientes que descienden de la Sierra madre Oriental, siendo las más importantes los ríos Bravo, Soto, La Marina, Tuxpan, Cazones, Tecolutla y el río Pánuco, que es el eje de uno de los sistemas hidrográficos más extensos de México.

Las rocas aflorantes son en gran medida sedimentos marinos no consolidados (arcillas, arenas, y conglomerados) cuya edad aumenta conforme a su distancia de la costa (desde el Cuaternario pasando por pliocénicos, oligocénicos y eocénicos del Terciario, hasta el Cretácico en la proximidad de la Sierra Madre Oriental). Una pequeña porción, en el extremo sureste del Estado de San Luís Potosí, queda comprendida dentro de la subprovincia de Llanuras y Lomeríos, caracterizada por un paisaje monótono con predominio de llanuras planas y ondulantes, dentro de esta Subprovincia, queda la llanura de inundación del río Panuco que comparten San Luis Potosí y Veracruz. El sistema de topofomas que caracterizan esta Subprovincia está conformada por: bajada con lomeríos, llanura aluvial con lomeríos, valles y valles con llanuras aluviales.

El clima de la llanura es predominantemente seco, con escasas lluvias durante todo el año, tornándose a cálido húmedo con abundantes lluvias en verano en el Sur de la provincia. Allí, la vegetación característica es el Bosque tropical perennifolio que se asocia frecuentemente a suelos calizos.

Anexo 3. Muestreos de la red freática del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.

Pozo No o fuente	Muestra	Coordenadas planas		CNT (m)	CNF (m)	T (°C)
		X (m)	Y (m)			
Primavera 2009						
Pozo 1	1	389123.5566	2209778.2749	991.566	2.01	17.5
Pozo 2	2	389556.7998	2209301.3190	992.722	0.62	16.2
Pozo 3	3	388060.7299	2210128.8459	992.111	1.05	17.0
Pozo 4	4	390393.2179	2209780.6326	988.362	0.42	16.5
Pozo 5	5	387413.1660	2212173.0240	987.174	0.40	18.0
Pozo 6	6	387883.6579	2211980.1572	987.154	0.60	18.5
Pozo 7	7	388400.8257	2211744.3735	986.872	0.53	18.6
Pozo 8	8	390432.7065	2210368.8426	987.788	0.10	18.9
Pozo 10	9	390459.7780	2209198.0422	990.927	0.61	19.0
Pozo 11	10	389666.3034	2209778.9722	989.741	0.00	19.5
Pozo 16	11	392486.7724	2207750.0727	988.931	0.58	19.0
Pozo 17	12	391816.7320	2208391.5103	988.937	0.70	15.5
Pozo 18	13	392572.1095	2208495.1727	988.34	1.72	15.6
Pozo 20	14	394041.7848	2207984.2417	991.284	1.32	16.0
Pozo 22	15	393419.6097	2208312.3238	991.892	1.21	17.0
Pozo 23	16	394607.6146	2206945.4861	993.85	1.17	17.8
Pozo 24	17	393944.1129	2207113.2404	991.869	1.18	19.0
Pozo 25	18	394090.2658	2206378.7870	994.079	1.93	20.5
Pozo 26	19	393205.0141	2207738.4441	989.634	1.45	21.1
Pozo 28	20	394297.3520	2208921.8148	990.633	1.22	15.5
Pozo 29	21	392641.4829	2206976.7314	991.622	1.34	16.5
Pozo 31	22	393344.2639	2206790.2781	990.38	0.66	16.4
Pozo 32	23	394016.5818	2206012.6781	992.092	1.90	16.9
Pozo 33	24	394468.0357	2206072.8835	991.488	0.37	17.3
Pozo 35	25	393514.8042	2208815.3340	988.64	0.93	18.6
Pozo 37	26	392020.5747	2206782.7643	990.641	1.40	19.2
Pozo 38	27	392534.9831	2206077.1112	991.388	1.12	19.0
Pozo 39	28	391708.0134	2206047.8918	990.776	1.27	19.6
Pozo 41	29	390746.0527	2206937.1797	991.167	0.97	19.6
Pozo 43	30	390136.5860	2207544.2312	990.072	0.51	15.6
Pozo 44	31	389980.6580	2206801.4164	990.817	0.56	14.9
Pozo 47	32	390849.2174	2208226.5934	988.581	0.33	15.6
Pozo 48	33	391975.0786	2207856.1465	988.224	0.93	15.9
Pozo 49	34	389547.8496	2210397.6818	988.832	0.64	16.1
Pozo 50	35	390920.9976	2207610.9965	990.558	0.54	16.3
Pozo X3	36					
Río Lerma derivadora Andaró	37					
Canal principal margen derecha carretera	38					
Exhacienda Solis–Amealco						
Canal principal margen izquierda (distancia media)	39					
Río Lerma en Exhacienda Solis (puente)	40					
Parte final canal principal margen derecha	41					

Continuación... Anexo 3.

Pozo No o fuente	Muestra	Coordenadas planas		CNT (m)	PNF (m)	T (°C)
		X (m)	Y (m)			
Verano 2010						
Derivadora Andaró, río Lerma	1					17.5
Río Lerma, puente Solís	2					17.2
Pozo 33	3	394468.0357	2206072.8835	991.488	0.45	15.0
Pozo 23	4	394607.6146	2206945.4861	993.850	0.97	19.0
Pozo 26	5	393205.0141	2207738.4441	989.634	1.48	19.1
Pozo 20	6	394041.7848	2207984.2417	991.284	1.57	22.6
Pozo 28	7	394297.3520	2208921.8148	990.633	1.33	18.5
Pozo 35	8	393514.8042	2208815.3340	988.640	1.26	14.0
Pozo 22	9	393419.6097	2208312.3238	991.892	1.79	16.0
Pozo 17	10	391816.7320	2208391.5103	988.937	0.90	20.1
Pozo X ₃	11				1.25	22.0
Pozo 4	12	390393.2179	2209780.6326	988.362	1.37	18.8
Pozo 11	13	389666.3034	2209778.9722	989.741	1.53	18.1
Pozo 7	14	388400.8257	2211744.3735	986.872	1.38	18.8
Pozo 6	15	387883.6579	2211980.1572	987.154	1.68	19.1
Pozo 16	16	392486.7724	2207750.0727	988.931	1.41	20.1
Pozo 37	17	392020.5747	2206782.7643	990.641	1.44	21.0
Dren colector margen izquierda	18					21.7
Pozo 41	19	390746.0527	2206937.1797	991.167	1.35	22.2
Pozo 44	20	389980.6580	2206801.4164	990.817	1.00	21.1
Pozo 43	21	390136.5860	2207544.2312	990.072	1.29	20.6
Pozo 50	22	390920.9976	2207610.9965	990.558	1.60	22.7

CNT = Cota nivel del terreno; PNF = Profundidad del nivel freático

Anexo 4. Composición iónica de las aguas de la red México DF-Zona Metropolitana-Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapan-Tamazunchale-Pánuco, verano 2009 y verano 2010.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE
													%	
			mmol _c L ⁻¹				mmol _c L ⁻¹				ΣmgL^{-1}			
											ΣmmolL^{-1}	mgL ⁻¹		
Verano 2009	6.8	2210	2.40	2.91	14.70	1.60	21.61	0.00	11.16	7.96	1.92	21.04	1.34	1515.4
V Mezquital			48.09	35.36	337.94	62.56		0.00	680.93	282.21	92.22		1539.31	
1			1.20	1.46	14.70	1.60		0.00	11.16	7.96	0.96		39.04	
2	7.0	2174	2.42	3.02	13.83	2.20	21.47	0.00	11.29	7.72	1.90	20.91	1.32	1490.7
			48.49	36.70	317.94	86.02		0.00	688.87	273.70	91.26		1542.97	
			1.21	1.51	13.83	2.20		0.00	11.29	7.72	0.95		38.71	
3	7.2	2186	2.50	3.10	14.39	1.60	21.59	0.00	11.79	7.75	1.49	21.03	1.31	1498.9
			50.10	37.67	330.81	62.56		0.00	719.37	274.76	71.57		1546.84	
			1.25	1.55	14.39	1.60		0.00	11.79	7.75	0.75		39.08	
4	7.2	2108	2.34	3.30	13.10	2.08	20.82	0.00	11.28	7.48	1.52	20.28	1.31	1445.5
			46.89	40.10	301.16	81.32		0.00	688.26	265.19	73.01		1495.93	
			1.17	1.65	13.10	2.08		0.00	11.28	7.48	0.76		37.52	
5	6.9	1866	2.16	3.00	12.29	0.98	18.43	0.00	9.58	6.75	1.60	17.93	1.38	1279.5
			43.28	36.46	282.53	38.32		0.00	584.53	239.31	76.85		1301.28	
			1.08	1.50	12.29	0.98		0.00	9.58	6.75	0.80		32.98	
6	7.3	2550	2.80	3.68	16.41	2.29	25.18	0.00	14.21	8.42	1.90	24.53	1.31	1748.5
			56.11	44.72	377.25	89.53		0.00	867.03	298.51	91.26		1824.42	
			1.40	1.84	16.41	2.29		0.00	14.21	8.42	0.95		45.52	
7	7.1	2019	2.72	3.40	11.78	2.04	19.94	0.00	10.22	7.62	1.58	19.42	1.32	1384.4
			54.51	41.32	270.81	79.76		0.00	623.58	270.15	75.89		1416.01	
			1.36	1.70	11.78	2.04		0.00	10.22	7.62	0.79		35.51	
8	6.9	570	1.62	1.05	2.36	0.60	5.63	0.00	3.16	1.90	0.42	5.48	1.35	390.8
			32.46	12.76	54.25	23.46		0.00	192.81	67.36	20.17		403.28	
			0.81	0.53	2.36	0.60		0.00	3.16	1.90	0.21		9.57	
9	6.9	810	1.86	1.78	3.34	1.02	8.00	0.00	4.56	2.61	0.62	7.79	1.33	555.4
			37.27	21.63	76.78	39.88		0.00	278.23	92.53	29.78		576.11	
			0.93	0.89	3.34	1.02		0.00	4.56	2.61	0.31		13.66	
10	7.2	2158	2.30	3.02	14.17	1.82	21.31	0.00	11.14	8.12	1.50	20.76	1.31	1479.7
			46.09	36.70	325.75	71.16		0.00	679.71	287.88	72.05		1519.34	
			1.15	1.51	14.17	1.82		0.00	11.14	8.12	0.75		38.66	
11	7.1	1938	2.42	3.26	11.42	2.04	19.14	0.00	9.78	7.20	1.68	18.66	1.27	1328.9
			48.49	39.62	262.53	79.76		0.00	596.73	255.26	80.69		1363.09	
			1.21	1.63	11.42	2.04		0.00	9.78	7.20	0.84		34.12	
12	7.1	1933	2.62	3.42	11.64	1.42	19.10	0.00	9.70	7.32	1.58	18.60	1.33	1325.5
			52.50	41.56	267.59	55.52		0.00	591.85	259.52	75.89		1344.43	
			1.31	1.71	11.64	1.42		0.00	9.70	7.32	0.79		33.89	
13	7.3	2006	2.70	3.52	12.13	1.46	19.81	0.00	9.74	7.90	1.66	19.30	1.30	1375.5
			54.11	42.78	278.86	57.08		0.00	594.29	280.08	79.73		1386.92	
			1.35	1.76	12.13	1.46		0.00	9.74	7.90	0.83		35.17	
14	7.5	1229	1.32	1.86	8.18	0.78	12.14	0.00	6.67	4.30	0.86	11.83	1.29	842.7
			26.45	22.60	188.05	30.50		0.00	406.97	152.45	41.31		868.33	
			0.66	0.93	8.18	0.78		0.00	6.67	4.30	0.43		21.95	

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE
													%	
													ΣmgL^{-1}	ΣmmolL^{-1}
			$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$				$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$							
15	7.4	1912	2.14	2.86	12.82	1.06	18.88	0.00	10.18	6.90	1.31	18.39	1.31	1311.1
			42.88	34.76	294.72	41.44		0.00	621.14	244.63	62.92		1342.49	
			1.07	1.43	12.82	1.06		0.00	10.18	6.90	0.66		34.12	
16	7.3	1969	2.18	3.12	13.07	1.08	19.45	0.00	10.68	6.92	1.35	18.95	1.30	1350.1
			43.69	37.92	300.47	42.23		0.00	651.65	245.33	64.84		1386.12	
			1.09	1.56	13.07	1.08		0.00	10.68	6.92	0.68		35.08	
17	7.3	1814	2.20	2.86	11.90	0.95	17.91	0.00	10.05	6.12	1.28	17.45	1.30	1243.9
			44.09	34.76	273.57	37.14		0.00	613.21	216.97	61.48		1281.21	
			1.10	1.43	11.90	0.95		0.00	10.05	6.12	0.64		32.19	
18	7.7	1989	2.16	2.78	13.42	1.28	19.64	0.00	10.96	6.82	1.35	19.13	1.32	1363.9
			43.28	33.78	308.51	50.05		0.00	668.73	241.79	64.84		1410.99	
			1.08	1.39	13.42	1.28		0.00	10.96	6.82	0.68		35.63	
19	7.8	1918	2.12	2.76	13.00	1.06	18.94	0.00	10.03	7.10	1.32	18.45	1.31	1315.2
			42.48	33.54	298.86	41.44		0.00	611.99	251.72	63.40		1343.43	
			1.06	1.38	13.00	1.06		0.00	10.03	7.10	0.66		34.29	
20	7.6	2085	2.16	3.12	14.19	1.12	20.59	0.00	11.10	7.60	1.36	20.06	1.30	1429.7
			43.28	37.92	326.21	43.79		0.00	677.27	269.44	65.32		1463.24	
			1.08	1.56	14.19	1.12		0.00	11.10	7.60	0.68		37.33	
21	7.1	1994	2.28	3.16	13.15	1.10	19.69	0.00	10.34	7.30	1.54	19.18	1.31	1367.3
			45.69	38.40	302.31	43.01		0.00	630.90	258.81	73.97		1393.08	
			1.14	1.58	13.15	1.10		0.00	10.34	7.30	0.77		35.38	
22	7.5	2079	2.30	3.26	13.85	1.12	20.53	0.00	11.18	7.26	1.56	20.00	1.31	1425.6
			46.09	39.62	318.40	43.79		0.00	682.15	257.39	74.93		1462.37	
			1.15	1.63	13.85	1.12		0.00	11.18	7.26	0.78		36.97	
23	7.1	2026	2.28	3.30	13.35	1.08	20.01	0.00	10.87	7.14	1.48	19.49	1.32	1389.2
			45.69	40.10	306.90	42.23		0.00	663.24	253.13	71.09		1422.38	
			1.14	1.65	13.35	1.08		0.00	10.87	7.14	0.74		35.97	
24	7.4	2005	2.24	3.40	13.07	1.09	19.80	0.00	10.78	7.16	1.36	19.30	1.28	1374.8
			44.89	41.32	300.47	42.62		0.00	657.75	253.84	65.32		1406.20	
			1.12	1.70	13.07	1.09		0.00	10.78	7.16	0.68		35.60	
25	7.3	2028	2.18	3.20	13.63	1.02	20.03	0.00	10.94	7.20	1.38	19.52	1.29	1390.6
			43.69	38.89	313.34	39.88		0.00	667.51	255.26	66.28		1424.85	
			1.09	1.60	13.63	1.02		0.00	10.94	7.20	0.69		36.17	
26	6.9	1240	1.32	1.66	8.64	0.63	12.25	0.00	7.27	3.81	0.85	11.93	1.32	850.3
			26.45	20.17	198.62	24.63		0.00	443.58	135.08	40.83		889.37	
			0.66	0.83	8.64	0.63		0.00	7.27	3.81	0.43		22.27	
27	7.2	1453	2.16	3.10	8.27	0.82	14.35	0.00	8.17	4.70	1.12	13.99	1.27	996.3
			43.28	37.67	190.12	32.06		0.00	498.50	166.63	53.79		1022.06	
			1.08	1.55	8.27	0.82		0.00	8.17	4.70	0.56		25.15	
28	6.6	1454	1.60	2.02	9.92	0.82	14.36	0.00	8.51	4.46	1.02	13.99	1.31	997.0
			32.06	24.55	228.05	32.06		0.00	519.24	158.12	48.99		1043.08	
			0.80	1.01	9.92	0.82		0.00	8.51	4.46	0.51		26.03	

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Σ	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Σ	Error %	RSE	
			$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$				$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$				ΣmgL^{-1}	ΣmmolL^{-1}	mgL^{-1}		
29	7.1	1505	1.82	2.86	9.06	1.12	14.86	0.00	8.72	4.72	1.08	14.52	1.16	1032.0	
			36.47	34.76	208.28	43.79		0.00	532.06	167.34	51.87		1074.56		
			0.91	1.43	9.06	1.12		0.00	8.72	4.72	0.54		26.50		
30	6.7	1298	1.48	1.74	8.74	0.86	12.82	0.00	6.70	4.80	0.96	12.46	1.42	890.0	
			29.66	21.15	200.92	33.62		0.00	408.80	170.17	46.11		910.44		
			0.74	0.87	8.74	0.86		0.00	6.70	4.80	0.48		23.19		
31	6.7	1400	1.70	1.96	9.21	0.96	13.83	0.00	7.80	4.60	1.10	13.50	1.21	960.0	
			34.07	23.82	211.73	37.53		0.00	475.92	163.08	52.83		998.99		
			0.85	0.98	9.21	0.96		0.00	7.80	4.60	0.55		24.95		
32	6.7	1033	1.12	1.60	6.68	0.80	10.20	0.00	5.26	3.90	0.76	9.92	1.39	708.3	
			22.44	19.44	153.57	31.28		0.00	320.94	138.27	36.50		722.44		
			0.56	0.80	6.68	0.80		0.00	5.26	3.90	0.38		18.38		
33	6.9	1338	1.52	2.04	8.93	0.72	13.21	0.00	7.73	4.46	0.70	12.89	1.23	917.5	
			30.46	24.79	205.29	28.15		0.00	471.65	158.12	33.62		952.09		
			0.76	1.02	8.93	0.72		0.00	7.73	4.46	0.35		23.97		
34	6.9	1199	1.50	1.82	7.82	0.70	11.84	0.00	6.69	3.92	0.92	11.53	1.33	822.2	
			30.06	22.12	179.77	27.37		0.00	408.19	138.98	44.19		850.68		
			0.75	0.91	7.82	0.70		0.00	6.69	3.92	0.46		21.25		
35	6.9	1574	1.76	2.22	10.82	0.74	15.54	0.00	9.96	4.16	1.02	15.14	1.30	1079.3	
			35.27	26.98	248.74	28.93		0.00	607.72	147.48	48.99		1144.11		
			0.88	1.11	10.82	0.74		0.00	9.96	4.16	0.51		28.18		
36	7.4	1515	2.14	2.26	9.88	0.68	14.96	0.00	9.46	4.28	0.86	14.60	1.22	1038.8	
			42.88	27.46	227.13	26.59		0.00	577.21	151.74	41.31		1094.32		
			1.07	1.13	9.88	0.68		0.00	9.46	4.28	0.43		26.93		
37	7.0	1534	1.80	2.70	9.83	0.82	15.15	0.00	8.85	4.75	1.16	14.76	1.30	1051.9	
			36.07	32.81	225.98	32.06		0.00	539.99	168.40	55.72		1091.03		
			0.90	1.35	9.83	0.82		0.00	8.85	4.75	0.58		27.08		
38	6.9	1502	2.12	3.02	8.83	0.86	14.83	0.00	8.46	4.80	1.18	14.44	1.33	1029.9	
			42.48	36.70	202.99	33.62		0.00	516.19	170.17	56.68		1058.84		
			1.06	1.51	8.83	0.86		0.00	8.46	4.80	0.59		26.11		
39	7.1	1518	1.70	2.26	10.21	0.82	14.99	0.00	7.64	5.69	1.26	14.59	1.35	1040.9	
			34.07	27.46	234.72	32.06		0.00	466.16	201.73	60.52		1056.71		
			0.85	1.13	10.21	0.82		0.00	7.64	5.69	0.63		26.97		
40	6.8	1527	1.82	2.62	9.86	0.78	15.08	0.00	8.44	5.13	1.14	14.71	1.24	1047.1	
			36.47	31.84	226.67	30.50		0.00	514.97	181.87	54.75		1077.08		
			0.91	1.31	9.86	0.78		0.00	8.44	5.13	0.57		27.00		
41	7.2	1307	1.48	2.42	8.31	0.70	12.91	0.00	7.01	4.62	0.96	12.59	1.25	896.2	
			29.66	29.41	191.04	27.37		0.00	427.72	163.79	46.11		915.10		
			0.74	1.21	8.31	0.70		0.00	7.01	4.62	0.48		23.07		
42	6.7	2000	2.26	2.96	13.37	1.16	19.75	0.00	11.49	6.16	1.60	19.25	1.28	1371.4	
			45.29	35.97	307.36	45.35		0.00	701.07	218.39	76.85		1430.28		
			1.13	1.48	13.37	1.16		0.00	11.49	6.16	0.80		35.59		

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE	
													%		
													ΣmgL^{-1}	ΣmmolL^{-1}	
			$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$				$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$								
43	6.8	1299	1.68	2.10	8.39	0.66	12.83	0.00	7.00	4.55	0.95	12.50	1.30	890.7	
			33.67	25.52	192.88	25.80		0.00	427.11	161.31	45.63			911.92	
			0.84	1.05	8.39	0.66		0.00	7.00	4.55	0.48			22.97	
44	7.3	1392	1.50	1.92	9.61	0.72	13.75	0.00	8.09	4.32	0.98	13.39	1.33	954.5	
			30.06	23.33	220.92	28.15		0.00	493.62	153.16	47.07			996.31	
			0.75	0.96	9.61	0.72		0.00	8.09	4.32	0.49			24.94	
45	6.7	129	0.26	0.38	0.55	0.08	1.27	0.00	0.70	0.42	0.12	1.24	1.20	88.5	
			5.21	4.62	12.64	3.13		0.00	42.71	14.89	5.76			88.96	
			0.13	0.19	0.55	0.08		0.00	0.70	0.42	0.06			2.13	
46	7.0	425	0.85	0.36	2.49	0.50	4.20	0.00	3.00	0.95	0.14	4.09	1.33	291.4	
			17.03	4.37	57.24	19.55		0.00	183.05	33.68	6.72			321.65	
			0.43	0.18	2.49	0.50		0.00	3.00	0.95	0.07			7.62	
47	6.5	501	0.58	0.67	3.44	0.26	4.95	0.00	2.92	1.54	0.36	4.82	1.33	343.5	
			11.62	8.14	79.08	10.17		0.00	178.17	54.60	17.29			359.07	
			0.29	0.34	3.44	0.26		0.00	2.92	1.54	0.18			8.97	
48	7.2	265	0.28	0.35	1.86	0.13	2.62	0.00	1.62	0.76	0.18	2.56	1.16	181.7	
			5.61	4.25	42.76	5.08		0.00	98.85	26.94	8.65			192.14	
			0.14	0.18	1.86	0.13		0.00	1.62	0.76	0.09			4.78	
49	7.6	905	1.04	1.38	5.96	0.56	8.94	0.00	5.15	2.88	0.68	8.71	1.30	620.6	
			20.84	16.77	137.01	21.89		0.00	314.23	102.10	32.66			645.52	
			0.52	0.69	5.96	0.56		0.00	5.15	2.88	0.34			16.10	
50	7.2	675	1.54	1.78	2.93	0.42	6.67	0.00	3.90	2.12	0.48	6.50	1.29	462.8	
			30.86	21.63	67.36	16.42		0.00	237.96	75.16	23.05			472.45	
			0.77	0.89	2.93	0.42		0.00	3.90	2.12	0.24			11.27	
51	7.9	575	0.66	0.86	3.84	0.32	5.68	0.00	3.30	1.82	0.40	5.52	1.43	394.3	
			13.23	10.45	88.28	12.51		0.00	201.35	64.52	19.21			409.55	
			0.33	0.43	3.84	0.32		0.00	3.30	1.82	0.20			10.24	
52	8.0	503	0.58	0.84	3.15	0.40	4.97	0.00	2.76	1.70	0.38	4.84	1.33	344.9	
			11.62	10.21	72.42	15.64		0.00	168.40	60.27	18.25			356.81	
			0.29	0.42	3.15	0.40		0.00	2.76	1.70	0.19			8.91	
53	7.3	555	0.61	0.82	3.63	0.42	5.48	0.00	3.15	1.80	0.38	5.33	1.39	380.6	
			12.22	9.97	83.45	16.42		0.00	192.20	63.82	18.25			396.33	
			0.31	0.41	3.63	0.42		0.00	3.15	1.80	0.19			9.91	
54	7.7	535	0.68	0.86	3.38	0.36	5.28	0.00	3.07	1.72	0.36	5.15	1.25	366.8	
			13.63	10.45	77.70	14.08		0.00	187.32	60.98	17.29			381.44	
			0.34	0.43	3.38	0.36		0.00	3.07	1.72	0.18			9.48	
55	7.4	1055	1.42	1.82	6.60	0.58	10.42	0.00	5.67	3.66	0.80	10.13	1.41	723.4	
			28.46	22.12	151.73	22.68		0.00	345.96	129.76	38.42			739.12	
			0.71	0.91	6.60	0.58		0.00	5.67	3.66	0.40			18.53	
56	7.7	1073	1.16	1.68	7.06	0.70	10.60	0.00	6.14	3.42	0.74	10.30	1.44	735.8	
			23.25	20.42	162.30	27.37		0.00	374.64	121.25	35.54			764.76	
			0.58	0.84	7.06	0.70		0.00	6.14	3.42	0.37			19.11	

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Σ	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Σ	Error %	RSE
			$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$					$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$					ΣmgL^{-1}	mgL^{-1}
													ΣmmolL^{-1}	
57	7.5	1526	1.88	2.46	9.91	0.82	15.07	0.00	7.64	5.86	1.16	14.66	1.38	1046.4
			37.67	29.90	227.82	32.06	0.00	466.16	207.75	55.72	1057.08			
			0.94	1.23	9.91	0.82	0.00	7.64	5.86	0.58	26.98			
58	7.7	1060	1.56	2.40	5.89	0.62	10.47	0.00	5.89	3.46	0.82	10.17	1.45	726.8
			31.26	29.17	135.41	24.24	0.00	359.38	122.67	39.39	741.51			
			0.78	1.20	5.89	0.62	0.00	5.89	3.46	0.41	18.25			
59	7.9	1137	1.36	1.92	7.29	0.66	11.23	0.00	6.40	3.68	0.86	10.94	1.31	779.6
			27.25	23.33	167.59	25.80	0.00	390.50	130.47	41.31	806.25			
			0.68	0.96	7.29	0.66	0.00	6.40	3.68	0.43	20.10			
60	8.0	915	1.04	1.62	5.88	0.50	9.04	0.00	5.17	2.86	0.76	8.79	1.40	627.4
			20.84	19.69	135.18	19.55	0.00	315.45	101.40	36.50	648.60			
			0.52	0.81	5.88	0.50	0.00	5.17	2.86	0.38	16.12			
61	7.5	302	0.38	0.82	1.60	0.18	2.98	0.00	1.66	1.02	0.22	2.90	1.36	207.1
			7.61	9.97	36.78	7.04	0.00	101.29	36.16	10.57	209.41			
			0.19	0.41	1.60	0.18	0.00	1.66	1.02	0.11	5.17			
62	7.9	841	0.98	1.16	5.53	0.64	8.31	0.00	4.76	2.72	0.60	8.08	1.40	576.7
			19.64	14.10	127.13	25.02	0.00	290.43	96.43	28.82	601.57			
			0.49	0.58	5.53	0.64	0.00	4.76	2.72	0.30	15.02			
63	7.9	958	1.15	1.82	5.99	0.50	9.46	0.00	5.61	2.92	0.66	9.19	1.45	656.9
			23.04	22.12	137.70	19.55	0.00	342.30	103.52	31.70	679.94			
			0.58	0.91	5.99	0.50	0.00	5.61	2.92	0.33	16.84			
64	7.9	1066	1.22	1.40	7.32	0.58	10.52	0.00	6.01	3.48	0.76	10.25	1.30	731.0
			24.45	17.01	168.28	22.68	0.00	366.70	123.38	36.50	759.00			
			0.61	0.70	7.32	0.58	0.00	6.01	3.48	0.38	19.08			
65	8.0	1074	1.26	1.46	7.27	0.62	10.61	0.00	5.97	3.56	0.78	10.31	1.43	736.4
			25.25	17.74	167.13	24.24	0.00	364.26	126.21	37.46	762.30			
			0.63	0.73	7.27	0.62	0.00	5.97	3.56	0.39	19.17			
66	7.7	1533	1.80	2.14	10.34	0.86	15.14	0.00	8.74	4.90	1.12	14.76	1.27	1051.2
			36.07	26.01	237.71	33.62	0.00	533.28	173.72	53.79	1094.20			
			0.90	1.07	10.34	0.86	0.00	8.74	4.90	0.56	27.37			
67	8.0	1073	1.36	1.92	6.74	0.58	10.60	0.00	6.07	3.42	0.82	10.31	1.39	735.8
			27.25	23.33	154.95	22.68	0.00	370.36	121.25	39.39	759.21			
			0.68	0.96	6.74	0.58	0.00	6.07	3.42	0.41	18.86			
68	8.0	1064	1.34	1.90	6.63	0.64	10.51	0.00	6.02	3.40	0.78	10.20	1.50	729.6
			26.85	23.09	152.42	25.02	0.00	367.31	120.54	37.46	752.70			
			0.67	0.95	6.63	0.64	0.00	6.02	3.40	0.39	18.70			
69	7.8	1147	1.48	2.24	6.95	0.66	11.33	0.00	6.53	3.66	0.86	11.05	1.25	786.5
			29.66	27.22	159.77	25.80	0.00	398.43	129.76	41.31	811.95			
			0.74	1.12	6.95	0.66	0.00	6.53	3.66	0.43	20.09			
70	8.0	1113	1.38	1.90	7.07	0.64	10.99	0.00	6.29	3.68	0.74	10.71	1.29	763.2
			27.65	23.09	162.53	25.02	0.00	383.79	130.47	35.54	788.10			
			0.69	0.95	7.07	0.64	0.00	6.29	3.68	0.37	19.69			

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE
													%	
													ΣmgL^{-1}	ΣmmolL^{-1}
			$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$				$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$							
71	7.7	2578	2.82	3.72	17.47	1.45	25.46	0.00	14.84	7.96	2.02	24.82	1.27	1767.7
			56.51	45.21	401.62	56.69		0.00	905.47	282.21	97.02		1844.73	
			1.41	1.86	17.47	1.45		0.00	14.84	7.96	1.01		46.00	
72	7.8	1682	2.12	2.34	11.19	0.96	16.61	0.00	9.39	5.58	1.18	16.15	1.40	1153.3
			42.48	28.44	257.25	37.53		0.00	572.94	197.83	56.68		1193.14	
			1.06	1.17	11.19	0.96		0.00	9.39	5.58	0.59		29.94	
73	7.9	1673	1.86	2.36	11.43	0.87	16.52	0.00	9.55	5.38	1.15	16.08	1.35	1147.2
			37.27	28.68	262.76	34.02		0.00	582.70	190.74	55.24		1191.40	
			0.93	1.18	11.43	0.87		0.00	9.55	5.38	0.58		29.92	
74	7.4	1896	2.32	2.80	12.62	0.98	18.72	0.00	10.86	5.96	1.40	18.22	1.35	1300.1
			46.49	34.03	290.12	38.32		0.00	662.63	211.30	67.24		1350.13	
			1.16	1.40	12.62	0.98		0.00	10.86	5.96	0.70		33.68	
75	8.0	1507	2.04	2.62	9.46	0.76	14.88	0.00	8.41	4.96	1.10	14.47	1.40	1033.3
			40.88	31.84	217.48	29.71		0.00	513.14	175.85	52.83		1061.73	
			1.02	1.31	9.46	0.76		0.00	8.41	4.96	0.55		26.47	
76	8.1	1520	1.86	2.80	9.55	0.80	15.01	0.00	8.65	4.89	1.12	14.66	1.18	1042.3
			37.27	34.03	219.54	31.28		0.00	527.78	173.37	53.79		1077.07	
			0.93	1.40	9.55	0.80		0.00	8.65	4.89	0.56		26.78	
77	7.3	1197	1.32	1.76	8.13	0.61	11.82	0.00	6.70	3.86	0.92	11.48	1.46	820.8
			26.45	21.39	186.90	23.85		0.00	408.80	136.85	44.19		848.43	
			0.66	0.88	8.13	0.61		0.00	6.70	3.86	0.46		21.30	
78	8.0	1547	1.82	2.42	10.25	0.78	15.27	0.00	8.00	5.77	1.09	14.86	1.36	1060.8
			36.47	29.41	235.64	30.50		0.00	488.12	204.56	52.35		1077.06	
			0.91	1.21	10.25	0.78		0.00	8.00	5.77	0.55		27.47	
79	8.1	1543	1.76	2.82	9.84	0.82	15.24	0.00	7.97	5.78	1.10	14.85	1.30	1058.0
			35.27	34.27	226.21	32.06		0.00	486.29	204.92	52.83		1071.86	
			0.88	1.41	9.84	0.82		0.00	7.97	5.78	0.55		27.25	
80	8.0	1554	1.82	2.86	9.81	0.86	15.35	0.00	8.21	5.62	1.08	14.91	1.45	1065.6
			36.47	34.76	225.52	33.62		0.00	500.94	199.25	51.87		1082.43	
			0.91	1.43	9.81	0.86		0.00	8.21	5.62	0.54		27.38	
81	7.1	1226	1.42	2.02	7.93	0.74	12.11	0.00	7.09	3.84	0.88	11.81	1.25	840.7
			28.46	24.55	182.30	28.93		0.00	432.60	136.14	42.27		875.25	
			0.71	1.01	7.93	0.74		0.00	7.09	3.84	0.44		21.76	
82	8.0	1547	1.75	2.65	10.00	0.88	15.28	0.00	7.84	5.98	1.06	14.88	1.33	1060.8
			35.07	32.20	229.89	34.41		0.00	478.36	212.01	50.91		1072.85	
			0.88	1.33	10.00	0.88		0.00	7.84	5.98	0.53		27.43	
83	8.1	1037	1.24	1.57	6.81	0.62	10.24	0.00	6.00	3.20	0.76	9.96	1.39	711.1
			24.85	19.08	156.56	24.24		0.00	366.09	113.45	36.50		740.77	
			0.62	0.79	6.81	0.62		0.00	6.00	3.20	0.38		18.42	

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE
													%	
													ΣmgL^{-1}	ΣmmolL^{-1}
			$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$					$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$				mgL^{-1}		
Verano 2009	8.2	1123.0	4.06	3.51	3.06	0.46	11.09	0.00	7.09	3.20	0.51	10.80	1.32	753.0
SLP-Ver			81.36	42.66	70.35	17.99		0.00	432.60	113.45	24.60		782.99	
84			2.03	1.76	3.06	0.46		0.00	7.09	3.20	0.26		17.85	
85	7.9	306.0	2.75	0.21	0.05	0.01	3.02	0.00	2.08	0.80	0.06	2.94	1.39	205.2
			55.11	2.55	1.15	0.39		0.00	126.91	28.36	2.75		217.22	
			1.38	0.11	0.05	0.01		0.00	2.08	0.80	0.03		4.45	
86	8.2	425.0	2.72	0.79	0.61	0.08	4.20	0.00	2.82	0.70	0.57	4.09	1.31	285.0
			54.51	9.60	14.02	3.13		0.00	172.06	24.82	27.46		305.59	
			1.36	0.40	0.61	0.08		0.00	2.82	0.70	0.29		6.25	
87	8.0	305.0	2.34	0.48	0.17	0.02	3.01	0.00	2.00	0.68	0.27	2.95	1.01	204.5
			46.89	5.83	3.91	0.78		0.00	122.03	24.11	12.97		216.52	
			1.17	0.24	0.17	0.02		0.00	2.00	0.68	0.14		4.42	
88	8.1	394.0	2.37	0.98	0.47	0.07	3.89	0.00	2.92	0.50	0.35	3.77	1.63	264.2
			47.49	11.91	10.80	2.74		0.00	178.17	17.73	16.59		285.42	
			1.19	0.49	0.47	0.07		0.00	2.92	0.50	0.17		5.81	
89	8.0	764.0	3.60	2.40	1.30	0.25	7.55	0.00	4.95	1.80	0.60	7.35	1.37	512.3
			72.14	29.17	29.89	9.77		0.00	302.03	63.82	28.60		535.41	
			1.80	1.20	1.30	0.25		0.00	4.95	1.80	0.30		11.60	
90	8.0	750.0	3.61	1.73	1.85	0.22	7.41	0.00	4.77	2.00	0.44	7.21	1.36	502.9
			72.34	21.02	42.53	8.60		0.00	291.04	70.91	21.16		527.61	
			1.81	0.87	1.85	0.22		0.00	4.77	2.00	0.22		11.73	
91	8.0	452.0	3.20	0.52	0.65	0.09	4.46	0.00	3.53	0.50	0.30	4.33	1.51	303.1
			64.12	6.32	14.94	3.52		0.00	215.39	17.73	14.30		336.32	
			1.60	0.26	0.65	0.09		0.00	3.53	0.50	0.15		6.78	
92	8.0	294.0	1.50	0.92	0.42	0.06	2.90	0.00	2.12	0.55	0.17	2.84	1.04	197.1
			30.06	11.18	9.66	2.35		0.00	129.35	19.50	8.18		210.27	
			0.75	0.46	0.42	0.06		0.00	2.12	0.55	0.09		4.45	
93	7.2	385.0	2.35	1.10	0.33	0.02	3.80	0.00	3.48	0.20	0.02	3.70	1.39	258.1
			47.09	13.37	7.59	0.78		0.00	212.33	7.09	0.74		289.00	
			1.18	0.55	0.33	0.02		0.00	3.48	0.20	0.01		5.76	
94	7.7	887.0	5.20	2.60	0.88	0.08	8.76	0.00	6.36	1.60	0.60	8.56	1.15	594.7
			104.20	31.60	20.23	3.13		0.00	388.06	56.72	28.82		632.76	
			2.60	1.30	0.88	0.08		0.00	6.36	1.60	0.30		13.12	
95	8.1	799.0	4.97	2.00	0.86	0.06	7.89	0.00	5.40	1.65	0.60	7.65	1.54	535.7
			99.59	24.31	19.77	2.35		0.00	329.48	58.50	28.82		562.82	
			2.49	1.00	0.86	0.06		0.00	5.40	1.65	0.30		11.76	
96	7.4	1048.0	5.99	1.77	2.29	0.30	10.35	0.00	6.19	3.20	0.68	10.07	1.37	702.7
			120.03	21.51	52.64	11.73		0.00	377.69	113.45	32.66		729.71	
			3.00	0.89	2.29	0.30		0.00	6.19	3.20	0.34		16.20	
97	7.9	936.0	5.83	1.75	1.34	0.32	9.24	0.00	5.47	2.90	0.60	8.97	1.48	627.6
			116.83	21.27	30.81	12.51		0.00	333.76	102.81	28.82		646.80	
			2.92	0.88	1.34	0.32		0.00	5.47	2.90	0.30		14.12	

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE	
													%		
													ΣmgL^{-1}	ΣmmolL^{-1}	
98	8.0	911.0	5.23	2.19	1.26	0.30	8.98	0.00	4.89	3.15	0.70	8.74	1.35	610.8	
			104.80	26.61	28.97	11.73		0.00	298.37	111.68	33.62			615.78	
			2.62	1.10	1.26	0.30		0.00	4.89	3.15	0.35			13.66	
99	7.6	1252.0	6.35	2.90	2.75	0.36	12.36	0.00	7.56	3.32	1.12	12.00	1.48	839.5	
			127.25	35.24	63.22	14.08		0.00	461.28	117.70	53.79			872.56	
			3.18	1.45	2.75	0.36		0.00	7.56	3.32	0.56			19.18	
100	7.9	1106.0	5.15	2.99	2.42	0.36	10.92	0.00	6.37	3.30	0.98	10.65	1.25	741.6	
			103.20	36.34	55.63	14.08		0.00	388.67	116.99	47.07			761.98	
			2.58	1.50	2.42	0.36		0.00	6.37	3.30	0.49			17.01	
101	7.8	1357.0	6.64	3.30	2.97	0.39	13.30	0.00	7.73	4.03	1.19	12.95	1.33	909.9	
			133.06	40.10	68.28	15.25		0.00	471.65	142.88	57.16			928.37	
			3.32	1.65	2.97	0.39		0.00	7.73	4.03	0.60			20.69	
102	7.7	996.0	4.57	2.70	2.16	0.40	9.83	0.00	5.78	2.94	0.87	9.59	1.24	667.8	
			91.58	32.81	49.66	15.64		0.00	352.67	104.23	41.79			688.37	
			2.29	1.35	2.16	0.40		0.00	5.78	2.94	0.44			15.35	
103	8.0	1029.0	4.65	2.78	2.32	0.41	10.16	0.00	5.99	2.98	0.91	9.88	1.40	689.9	
			93.18	33.78	53.33	16.03		0.00	365.48	105.65	43.71			711.17	
			2.33	1.39	2.32	0.41		0.00	5.99	2.98	0.46			15.87	
104	7.7	1052.0	4.48	2.97	2.50	0.44	10.39	0.00	6.05	3.02	1.02	10.09	1.46	705.4	
			89.77	36.09	57.47	17.20		0.00	369.14	107.07	48.99			725.75	
			2.24	1.49	2.50	0.44		0.00	6.05	3.02	0.51			16.25	
105	8.0	1000.0	4.35	2.90	2.25	0.38	9.88	0.00	5.86	2.89	0.88	9.63	1.28	670.5	
			87.17	35.24	51.73	14.86		0.00	357.55	102.46	42.27			691.27	
			2.18	1.45	2.25	0.38		0.00	5.86	2.89	0.44			15.45	
106	7.8	770.0	3.35	2.23	1.73	0.29	7.60	0.00	4.49	2.23	0.68	7.40	1.33	516.3	
			67.13	27.10	39.77	11.34		0.00	273.96	79.06	32.66			531.02	
			1.68	1.12	1.73	0.29		0.00	4.49	2.23	0.34			11.87	
107	8.0	610.0	2.65	1.77	1.37	0.23	6.02	0.00	3.56	1.76	0.54	5.86	1.35	409.0	
			53.10	21.51	31.49	8.99		0.00	217.22	62.40	25.94			420.65	
			1.33	0.89	1.37	0.23		0.00	3.56	1.76	0.27			9.40	
108	7.9	314.0	1.36	0.91	0.71	0.12	3.10	0.00	1.82	0.91	0.28	3.01	1.47	210.5	
			27.25	11.06	16.32	4.69		0.00	111.05	32.26	13.45			216.08	
			0.68	0.46	0.71	0.12		0.00	1.82	0.91	0.14			4.84	
109	7.8	742.0	3.23	2.15	1.67	0.28	7.33	0.00	4.35	2.14	0.65	7.14	1.31	497.5	
			64.73	26.13	38.39	10.95		0.00	265.42	75.87	31.22			512.70	
			1.62	1.08	1.67	0.28		0.00	4.35	2.14	0.33			11.46	
110	7.9	756.0	3.31	2.15	1.71	0.30	7.47	0.00	4.45	2.20	0.66	7.31	1.08	506.9	
			66.33	26.13	39.31	11.73		0.00	271.52	78.00	31.70			524.71	
			1.66	1.08	1.71	0.30		0.00	4.45	2.20	0.33			11.72	
111	7.9	1318.0	5.73	3.82	2.97	0.50	13.02	0.00	7.70	3.81	1.16	12.67	1.36	883.7	
			114.82	46.42	68.28	19.55		0.00	469.82	135.08	55.72			909.68	
			2.87	1.91	2.97	0.50		0.00	7.70	3.81	0.58			20.34	

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE
													%	
													ΣmgL^{-1}	ΣmmolL^{-1}
			$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$				$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$					mgL^{-1}		
112	7.9	1173.0	5.10	3.40	2.64	0.45	11.59	0.00	6.85	3.39	1.03	11.27	1.40	786.5
			102.20	41.32	60.69	17.59		0.00	417.96	120.19	49.47		809.42	
			2.55	1.70	2.64	0.45		0.00	6.85	3.39	0.52		18.10	
Verano 2010 V Mezquital	7.7	2633	2.80	3.50	18.37	1.33	26.00	0.00	15.43	8.10	1.80	25.33	1.31	1805.4
			56.11	42.53	422.31	52.00		0.00	941.47	287.17	86.37		1887.96	
			1.40	1.75	18.37	1.33		0.00	15.43	8.10	0.90		47.28	
1	7.9	2674	3.09	3.62	18.40	1.30	26.41	0.00	15.60	8.30	1.84	25.74	1.28	1833.6
			61.92	43.99	423.00	50.83		0.00	951.84	294.26	88.38		1914.22	
			1.55	1.81	18.40	1.30		0.00	15.60	8.30	0.92		47.88	
3	7.8	2685	3.12	3.70	18.36	1.34	26.52	0.00	15.75	8.32	1.76	25.83	1.32	1841.1
			62.52	44.96	422.08	52.39		0.00	961.00	294.97	84.53		1922.45	
			1.56	1.85	18.36	1.34		0.00	15.75	8.32	0.88		48.06	
4	7.8	2369	2.86	3.42	15.94	1.18	23.40	0.00	13.91	7.36	1.55	22.82	1.25	1624.1
			57.31	41.56	366.44	46.14		0.00	848.73	260.93	74.45		1695.56	
			1.43	1.71	15.94	1.18		0.00	13.91	7.36	0.78		42.31	
5	7.7	2434	2.98	3.64	16.16	1.26	24.04	0.00	14.13	7.68	1.62	23.43	1.29	1669.0
			59.72	44.24	371.50	49.26		0.00	862.15	272.28	77.81		1736.96	
			1.49	1.82	16.16	1.26		0.00	14.13	7.68	0.81		43.35	
6	8.1	1751	2.04	2.62	11.70	0.93	17.29	0.00	10.15	5.53	1.16	16.84	1.32	1200.7
			40.88	31.84	268.97	36.36		0.00	619.31	196.06	55.72		1249.13	
			1.02	1.31	11.70	0.93		0.00	10.15	5.53	0.58		31.22	
7	8.2	724	1.52	1.40	3.85	0.38	7.15	0.00	3.81	2.68	0.46	6.95	1.42	496.1
			30.46	17.01	88.51	14.86		0.00	232.47	95.01	22.09		500.42	
			0.76	0.70	3.85	0.38		0.00	3.81	2.68	0.23		12.41	
8	7.9	1236	2.24	2.36	6.99	0.62	12.21	0.00	6.90	4.33	0.66	11.89	1.33	847.5
			44.89	28.68	160.69	24.24		0.00	421.01	153.51	31.70		864.72	
			1.12	1.18	6.99	0.62		0.00	6.90	4.33	0.33		21.47	
9	7.6	1491	2.84	2.28	8.88	0.72	14.72	0.00	8.48	4.68	1.16	14.32	1.36	1022.4
			56.91	27.71	204.14	27.96		0.00	517.41	165.92	55.72		1055.76	
			1.42	1.14	8.88	0.72		0.00	8.48	4.68	0.58		25.90	
10	7.7	2339	2.98	3.70	15.27	1.15	23.10	0.00	13.55	7.37	1.58	22.50	1.30	1603.5
			59.72	44.96	351.04	44.77		0.00	826.76	261.29	75.89		1664.43	
			1.49	1.85	15.27	1.15		0.00	13.55	7.37	0.79		41.47	
11	7.6	2426	2.92	3.72	16.14	1.18	23.96	0.00	13.96	7.76	1.62	23.34	1.31	1663.5
			58.51	45.21	371.04	46.14		0.00	851.78	275.12	77.81		1725.60	
			1.46	1.86	16.14	1.18		0.00	13.96	7.76	0.81		43.17	
12	7.9	2421	2.57	3.62	16.55	1.17	23.91	0.00	14.17	7.64	1.45	23.26	1.36	1659.7
			51.50	43.99	380.47	45.55		0.00	864.59	270.86	69.78		1726.75	
			1.29	1.81	16.55	1.17		0.00	14.17	7.64	0.73		43.35	
13	8.0	2405	2.68	3.76	16.15	1.16	23.75	0.00	14.33	7.54	1.26	23.13	1.32	1648.8
			53.70	45.69	371.27	45.35		0.00	874.35	267.32	60.52		1718.21	
			1.34	1.88	16.15	1.16		0.00	14.33	7.54	0.63		43.03	

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE
													%	
													ΣmgL^{-1}	ΣmmolL^{-1}
			$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$				$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$							
14	7.9	2452	2.48	3.70	16.80	1.24	24.22	0.00	14.93	7.26	1.42	23.61	1.28	1681.0
			49.70	44.96	386.22	48.48		0.00	910.96	257.39	68.07		1765.78	
			1.24	1.85	16.80	1.24		0.00	14.93	7.26	0.71		44.03	
15	7.8	2527	2.86	4.36	16.56	1.18	24.96	0.00	14.76	7.94	1.60	24.30	1.33	1732.8
			57.31	52.98	380.70	45.94		0.00	900.59	281.50	76.85		1795.87	
			1.43	2.18	16.56	1.18		0.00	14.76	7.94	0.80		44.85	
16	8.0	2492	2.90	4.20	16.36	1.15	24.61	0.00	14.97	7.30	1.68	23.95	1.36	1708.4
			58.11	51.04	376.10	44.96		0.00	913.40	258.81	80.69		1783.12	
			1.45	2.10	16.36	1.15		0.00	14.97	7.30	0.84		44.17	
17	8.0	2636	2.16	5.82	16.29	1.76	26.03	0.00	14.94	7.58	2.86	25.38	1.26	1807.2
			43.28	70.73	374.49	68.81		0.00	911.57	268.73	137.4		1874.99	
			1.08	2.91	16.29	1.76		0.00	14.94	7.58	1.43		45.99	
18	7.8	2532	2.96	5.02	15.34	1.69	25.01	0.00	14.49	7.46	2.40	24.35	1.34	1736.2
			59.32	61.01	352.65	66.08		0.00	884.12	264.48	115.3		1802.92	
			1.48	2.51	15.34	1.69		0.00	14.49	7.46	1.20		44.17	
19	7.7	2517	2.90	4.52	15.75	1.69	24.86	0.00	14.54	7.96	1.72	24.22	1.30	1725.6
			58.11	54.93	362.08	66.08		0.00	887.17	282.21	82.61		1793.18	
			1.45	2.26	15.75	1.69		0.00	14.54	7.96	0.86		44.51	
20	7.9	1620	2.18	3.42	9.51	0.89	16.00	0.00	9.55	4.62	1.43	15.60	1.27	1110.5
			43.69	41.56	218.63	34.80		0.00	582.70	163.79	68.68		1153.84	
			1.09	1.71	9.51	0.89		0.00	9.55	4.62	0.72		28.09	
21	7.7	510	1.16	1.52	2.12	0.24	5.04	0.00	3.08	1.46	0.38	4.92	1.20	349.4
			23.25	18.47	48.74	9.38		0.00	187.93	51.76	18.25		357.78	
			0.58	0.76	2.12	0.24		0.00	3.08	1.46	0.19		8.43	
22	8.0	1546	3.40	2.68	8.41	0.78	15.27	0.00	8.64	4.72	1.51	14.87	1.33	1059.7
			68.13	32.57	193.34	30.50		0.00	527.17	167.34	72.53		1091.57	
			1.70	1.34	8.41	0.78		0.00	8.64	4.72	0.76		26.35	
23	7.7	1719	3.26	3.62	9.24	0.86	16.98	0.00	9.41	5.38	1.75	16.54	1.31	1178.4
			65.33	43.99	212.42	33.62		0.00	574.16	190.74	84.05		1204.31	
			1.63	1.81	9.24	0.86		0.00	9.41	5.38	0.88		29.21	
24	8.0	2402	3.60	4.48	14.16	1.48	23.72	0.00	12.63	7.86	2.63	23.12	1.28	1647.1
			72.14	54.44	325.52	57.87		0.00	770.63	278.66	126.3		1685.58	
			1.80	2.24	14.16	1.48		0.00	12.63	7.86	1.32		41.49	
25	7.8	526	2.50	1.45	1.12	0.12	5.19	0.00	3.18	1.32	0.56	5.06	1.27	360.3
			50.10	17.62	25.75	4.69		0.00	194.03	46.80	26.90		365.88	
			1.25	0.73	1.12	0.12		0.00	3.18	1.32	0.28		8.00	
26	7.8	1199	3.86	2.70	4.58	0.70	11.84	0.00	6.73	3.20	1.60	11.53	1.33	821.8
			77.35	32.81	105.29	27.37		0.00	410.63	113.45	76.85		843.75	
			1.93	1.35	4.58	0.70		0.00	6.73	3.20	0.80		19.29	
27	7.5	819	2.89	1.92	3.02	0.26	8.09	0.00	4.93	2.14	0.82	7.89	1.25	561.2
			57.91	23.33	69.43	10.17		0.00	300.81	75.87	39.39		576.90	
			1.45	0.96	3.02	0.26		0.00	4.93	2.14	0.41		13.17	

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Σ	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Σ	Error %	RSE
			$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$					$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$					ΣmgL^{-1}	mgL^{-1}
													ΣmmolL^{-1}	
28	7.9	1641	2.60	4.30	8.44	0.87	16.21	0.00	9.12	5.22	1.45	15.79	1.31	1125.2
			52.10	52.26	194.03	34.02		0.00	556.46	185.06	69.64		1143.57	
			1.30	2.15	8.44	0.87		0.00	9.12	5.22	0.73		27.83	
29	8.1	2301	2.83	4.12	14.57	1.20	22.72	0.00	13.00	6.70	2.42	22.12	1.34	1577.8
			56.71	50.07	334.95	46.92		0.00	793.20	237.54	116.2		1635.62	
			1.42	2.06	14.57	1.20		0.00	13.00	6.70	1.21		40.16	
30	7.8	1700	3.40	4.50	8.01	0.88	16.79	0.00	9.27	5.40	1.70	16.37	1.27	1165.3
			68.13	54.69	184.14	34.41		0.00	565.61	191.45	81.65		1180.08	
			1.70	2.25	8.01	0.88		0.00	9.27	5.40	0.85		28.36	
31	8.0	1731	3.20	4.70	8.29	0.90	17.09	0.00	8.97	5.30	2.40	16.67	1.24	1186.9
			64.12	57.12	190.58	35.19		0.00	547.31	187.90	115.3		1197.49	
			1.60	2.35	8.29	0.90		0.00	8.97	5.30	1.20		28.61	
32	8.0	1715	3.60	4.40	8.08	0.86	16.94	0.00	9.17	5.22	2.10	16.49	1.35	1175.6
			72.14	53.47	185.75	33.62		0.00	559.51	185.06	100.9		1190.43	
			1.80	2.20	8.08	0.86		0.00	9.17	5.22	1.05		28.38	
33	8.1	1746	2.80	3.60	9.49	0.92	16.81	0.00	9.78	5.60	1.86	17.24	1.26	1196.9
			56.11	43.75	218.17	35.97		0.00	596.73	198.54	89.34		1238.60	
			1.40	1.80	9.49	0.92		0.00	9.78	5.60	0.93		29.92	
34	8.0	1456	2.40	2.90	7.96	0.75	14.01	0.00	8.40	4.86	1.12	14.38	1.32	998.0
			48.09	35.24	182.99	29.13		0.00	512.53	172.30	53.79		1034.08	
			1.20	1.45	7.96	0.75		0.00	8.40	4.86	0.56		25.18	
35	7.9	1045	1.98	2.50	5.20	0.64	10.32	0.00	5.68	3.42	0.96	10.06	1.28	716.6
			39.68	30.38	119.54	25.02		0.00	346.57	121.25	46.11		728.55	
			0.99	1.25	5.20	0.64		0.00	5.68	3.42	0.48		17.66	
36	8.7	1082	2.08	2.20	5.46	0.66	10.40	0.45	5.65	3.81	0.78	10.69	1.38	741.6
			41.68	26.74	125.52	25.80		13.50	344.74	135.08	37.46		750.52	
			1.04	1.10	5.46	0.66		0.23	5.65	3.81	0.39		18.34	
37	8.2	999	1.80	1.52	5.94	0.61	9.87	0.32	5.89	2.80	0.60	9.61	1.36	685.0
			36.07	18.47	136.55	23.85		9.60	359.38	99.27	28.60		711.80	
			0.90	0.76	5.94	0.61		0.16	5.89	2.80	0.30		17.36	
38	8.8	1105	2.10	1.70	6.44	0.67	10.91	0.42	6.01	3.46	0.74	10.63	1.28	757.7
			42.08	20.66	148.05	26.00		12.60	366.70	122.67	35.54		774.31	
			1.05	0.85	6.44	0.67		0.21	6.01	3.46	0.37		19.06	
39	8.9	1084	2.07	2.16	5.78	0.70	10.71	0.38	5.78	3.42	0.84	10.42	1.37	743.3
			41.48	26.25	132.88	27.37		11.40	352.67	121.25	40.35		753.64	
			1.04	1.08	5.78	0.70		0.19	5.78	3.42	0.42		18.41	
40	8.6	1417	2.60	2.30	8.29	0.80	13.99	0.36	7.68	4.44	1.14	13.62	1.34	971.6
			52.10	27.95	190.58	31.28		10.80	468.60	157.41	54.75		993.48	
			1.30	1.15	8.29	0.80		0.18	7.68	4.44	0.57		24.41	
41	8.7	1055	2.12	2.16	5.48	0.66	10.42	0.56	5.42	3.42	0.74	10.14	1.34	723.4
			42.48	26.25	125.98	25.61		16.80	330.70	121.25	35.54		724.62	
			1.06	1.08	5.48	0.66		0.28	5.42	3.42	0.37		17.77	

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error %	RSE
		μScm ⁻¹	mmol _c L ⁻¹				mmol _c L ⁻¹				ΣmgL ⁻¹	mgL ⁻¹		
												ΣmmolL ⁻¹		
42	8.9	1074.0	2.20	1.96	5.80	0.65	10.61	0.40	5.01	3.93	0.98	10.32	1.39	736.4
			44.09	23.82	133.34	25.41		12.00	305.69	139.33	47.07		730.74	
			1.10	0.98	5.80	0.65		0.20	5.01	3.93	0.49		18.16	
43	8.8	1081.0	1.80	2.40	5.81	0.67	10.68	0.32	5.60	3.63	0.85	10.40	1.33	741.2
			36.07	29.17	133.57	26.20		9.60	341.69	128.69	40.83		745.81	
			0.90	1.20	5.81	0.67		0.16	5.60	3.63	0.43		18.40	
44	8.0	1484.0	2.88	2.76	8.20	0.82	14.66	0.00	8.27	4.52	1.48	14.27	1.35	1017.6
			57.71	33.54	188.51	32.06		0.00	504.60	160.25	71.09		1047.76	
			1.44	1.38	8.20	0.82		0.00	8.27	4.52	0.74		25.37	
45	8.7	1366.0	3.02	2.64	7.11	0.72	13.49	0.40	7.35	4.31	1.08	13.14	1.31	936.7
			60.52	32.08	163.45	28.15		12.00	448.46	152.80	51.87		949.34	
			1.51	1.32	7.11	0.72		0.20	7.35	4.31	0.54		23.06	
46	8.2	1479.0	2.45	3.15	8.23	0.78	14.61	0.00	8.17	4.70	1.36	14.23	1.32	1014.2
			49.10	38.28	189.20	30.50		0.00	498.50	166.63	65.32		1037.52	
			1.23	1.58	8.23	0.78		0.00	8.17	4.70	0.68		25.36	
47	8.7	1464.0	2.60	3.20	7.84	0.82	14.46	0.72	7.26	4.83	1.28	14.09	1.30	1003.9
			52.10	38.89	180.23	32.06		21.60	442.97	171.24	61.48		1000.58	
			1.30	1.60	7.84	0.82		0.36	7.26	4.83	0.64		24.65	
48	8.8	1125.0	2.12	2.20	6.11	0.68	11.11	0.68	5.72	3.44	0.98	10.82	1.30	771.4
			42.48	26.74	140.46	26.39		20.40	349.01	121.96	47.07		774.51	
			1.06	1.10	6.11	0.68		0.34	5.72	3.44	0.49		18.94	
49	8.1	364.0	1.20	0.75	1.36	0.29	3.60	0.00	1.87	1.32	0.32	3.51	1.20	249.6
			24.05	9.11	31.27	11.14		0.00	114.10	46.80	15.37		251.84	
			0.60	0.38	1.36	0.29		0.00	1.87	1.32	0.16		5.97	
50	8.7	1506.0	2.70	3.62	7.71	0.84	14.87	0.70	7.44	4.82	1.53	14.49	1.29	1032.7
			54.11	43.99	177.25	32.84		21.00	453.96	170.88	73.49		1027.51	
			1.35	1.81	7.71	0.84		0.35	7.44	4.82	0.77		25.09	
51	8.2	1608.0	2.98	3.20	8.78	0.92	15.88	0.00	8.99	4.86	1.62	15.47	1.31	1102.6
			59.72	38.89	201.84	35.97		0.00	548.53	172.30	77.81		1135.06	
			1.49	1.60	8.78	0.92		0.00	8.99	4.86	0.81		27.45	
52	8.2	1447.0	2.80	3.32	7.39	0.78	14.29	0.00	8.24	4.32	1.36	13.92	1.31	992.2
			56.11	40.35	169.89	30.50		0.00	502.77	153.16	65.32		1018.09	
			1.40	1.66	7.39	0.78		0.00	8.24	4.32	0.68		24.47	
53	8.0	1451.0	2.78	3.26	7.48	0.81	14.33	0.00	8.13	4.43	1.40	13.96	1.31	995.0
			55.71	39.62	171.96	31.67		0.00	496.06	157.06	67.24		1019.31	
			1.39	1.63	7.48	0.81		0.00	8.13	4.43	0.70		24.57	
54	8.6	1171.0	2.28	3.05	5.54	0.69	11.56	0.58	5.84	3.68	1.16	11.26	1.29	803.0
			45.69	37.07	127.36	26.78		17.40	356.33	130.47	55.72		796.81	
			1.14	1.53	5.54	0.69		0.29	5.84	3.68	0.58		19.28	
55	8.2	1447.0	2.80	3.60	7.07	0.82	14.29	0.00	7.88	4.62	1.42	13.92	1.31	992.2
			56.11	43.75	162.53	32.06		0.00	480.80	163.79	68.20		1007.25	
			1.40	1.80	7.07	0.82		0.00	7.88	4.62	0.71		24.30	

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE
													%	
													ΣmgL^{-1}	ΣmmolL^{-1}
56	7.7	904	3.70	3.10	1.80	0.32	8.92	0.00	4.60	2.88	1.21	8.69	1.25	605.4
			74.14	37.67	41.38	12.32		0.00	280.67	102.10	58.34		606.63	
			1.85	1.55	1.80	0.32		0.00	4.60	2.88	0.61		13.60	
57	8.0	1045	4.04	3.30	2.60	0.38	10.32	0.00	5.30	3.60	1.14	10.04	1.38	700.3
			80.96	40.10	59.77	14.86		0.00	323.38	127.63	54.75		701.46	
			2.02	1.65	2.60	0.38		0.00	5.30	3.60	0.57		16.12	
58	8.1	1153	4.75	2.80	3.40	0.44	11.39	0.00	5.74	3.60	1.77	11.11	1.24	772.3
			95.19	34.03	78.16	17.20		0.00	350.23	127.63	85.01		787.45	
			2.38	1.40	3.40	0.44		0.00	5.74	3.60	0.89		17.84	
59	8.2	576	2.62	1.45	1.50	0.12	5.69	0.00	3.55	1.10	0.89	5.54	1.34	385.6
			52.50	17.62	34.48	4.69		0.00	216.61	39.00	42.75		407.65	
			1.31	0.73	1.50	0.12		0.00	3.55	1.10	0.45		8.75	
60	7.9	295	1.15	1.05	0.65	0.06	2.91	0.00	1.99	0.52	0.32	2.83	1.39	197.8
			23.04	12.76	14.94	2.35		0.00	121.42	18.44	15.37		208.32	
			0.58	0.53	0.65	0.06		0.00	1.99	0.52	0.16		4.48	
61	7.9	310	1.48	0.80	0.70	0.08	3.06	0.00	1.85	0.88	0.25	2.98	1.32	207.8
			29.66	9.72	16.09	3.13		0.00	112.88	31.20	12.01		214.68	
			0.74	0.40	0.70	0.08		0.00	1.85	0.88	0.13		4.78	
62	7.8	373	1.30	1.14	1.12	0.12	3.68	0.00	2.26	1.02	0.30	3.58	1.38	249.9
			26.05	13.85	25.75	4.69		0.00	137.90	36.16	14.41		258.81	
			0.65	0.57	1.12	0.12		0.00	2.26	1.02	0.15		5.89	
63	8.5	53	0.20	0.18	0.12	0.02	0.52	0.00	0.28	0.16	0.06	0.50	1.96	35.5
			4.01	2.19	2.76	0.78		0.00	17.08	5.67	2.88		35.37	
			0.10	0.09	0.12	0.02		0.00	0.28	0.16	0.03		0.80	
64	7.6	192	0.80	0.66	0.38	0.06	1.90	0.00	1.15	0.58	0.12	1.85	1.33	128.6
			16.03	8.02	8.74	2.35		0.00	70.17	20.56	5.76		131.63	
			0.40	0.33	0.38	0.06		0.00	1.15	0.58	0.06		2.96	
65	7.3	463	1.76	1.20	1.50	0.11	4.57	0.00	2.64	1.12	0.69	4.45	1.33	310.3
			35.27	14.58	34.48	4.30		0.00	161.08	39.71	33.14		322.57	
			0.88	0.60	1.50	0.11		0.00	2.64	1.12	0.35		7.20	
66	7.7	452	1.70	1.12	1.52	0.12	4.46	0.00	2.27	1.54	0.52	4.33	1.48	302.6
			34.07	13.61	34.94	4.69		0.00	138.51	54.60	24.98		305.39	
			0.85	0.56	1.52	0.12		0.00	2.27	1.54	0.26		7.12	
67	7.8	211	0.64	0.58	0.80	0.06	2.08	0.00	1.07	0.72	0.24	2.03	1.22	141.5
			12.82	7.05	18.39	2.35		0.00	65.29	25.53	11.53		142.95	
			0.32	0.29	0.80	0.06		0.00	1.07	0.72	0.12		3.38	
68	7.8	422	1.39	1.13	1.54	0.11	4.17	0.00	2.26	1.34	0.46	4.06	1.34	282.8
			27.85	13.73	35.40	4.30		0.00	137.90	47.51	22.09		288.79	
			0.70	0.57	1.54	0.11		0.00	2.26	1.34	0.23		6.74	
69	7.8	1029	3.36	2.32	4.12	0.36	10.16	0.00	5.46	3.60	0.84	9.90	1.30	689.2
			67.33	28.19	94.71	14.08		0.00	333.15	127.63	40.35		705.44	
			1.68	1.16	4.12	0.36		0.00	5.46	3.60	0.42		16.80	

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Σ	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Σ	Error %	RSE
			$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$				$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$				ΣmgL^{-1}			
			ΣmmolL^{-1}	mgL^{-1}										
70	7.9	352	1.30	1.06	1.03	0.09	3.48	0.00	2.01	1.16	0.22	3.39	1.31	236.1
			26.05	12.88	23.68	3.52		0.00	122.64	41.13	10.57		240.46	
			0.65	0.53	1.03	0.09		0.00	2.01	1.16	0.11		5.58	
71	7.7	494	1.92	1.18	1.62	0.16	4.88	0.00	2.95	1.28	0.52	4.75	1.35	330.7
			38.47	14.34	37.24	6.26		0.00	180.00	45.38	24.98		346.66	
			0.96	0.59	1.62	0.16		0.00	2.95	1.28	0.26		7.82	
72	8.0	862	3.17	2.66	2.40	0.28	8.51	0.00	4.87	2.58	0.84	8.29	1.31	577.6
			63.52	32.33	55.17	10.95		0.00	297.15	91.47	40.35		590.93	
			1.59	1.33	2.40	0.28		0.00	4.87	2.58	0.42		13.47	
73	7.8	493	1.76	1.16	1.73	0.22	4.87	0.00	2.89	1.39	0.46	4.74	1.35	330.0
			35.27	14.10	39.77	8.60		0.00	176.34	49.28	22.09		345.45	
			0.88	0.58	1.73	0.22		0.00	2.89	1.39	0.23		7.92	
74	7.9	317	1.11	0.70	1.22	0.10	3.13	0.00	1.65	1.12	0.28	3.05	1.29	212.3
			22.24	8.51	28.05	3.91		0.00	100.68	39.71	13.45		216.54	
			0.56	0.35	1.22	0.10		0.00	1.65	1.12	0.14		5.14	
75	7.8	341	1.33	0.76	1.18	0.10	3.37	0.00	1.89	1.13	0.26	3.28	1.35	228.3
			26.65	9.24	27.13	3.91		0.00	115.32	40.06	12.49		234.79	
			0.67	0.38	1.18	0.10		0.00	1.89	1.13	0.13		5.48	
76	7.2	702	2.41	2.22	2.12	0.18	6.93	0.00	3.87	2.42	0.46	6.75	1.32	470.4
			48.29	26.98	48.74	7.04		0.00	236.13	85.80	22.09		475.07	
			1.21	1.11	2.12	0.18		0.00	3.87	2.42	0.23		11.14	
77	7.5	519	2.13	1.45	1.42	0.13	5.13	0.00	2.93	1.35	0.72	5.00	1.28	347.8
			42.68	17.62	32.64	5.08		0.00	178.78	47.86	34.58		359.25	
			1.07	0.73	1.42	0.13		0.00	2.93	1.35	0.36		7.98	
78	7.6	425	1.50	1.32	1.26	0.12	4.20	0.00	2.54	1.08	0.47	4.09	1.33	284.5
			30.06	16.04	28.97	4.69		0.00	154.98	38.29	22.57		295.60	
			0.75	0.66	1.26	0.12		0.00	2.54	1.08	0.24		6.65	
79	7.7	464	1.82	1.30	1.32	0.14	4.58	0.00	2.88	1.16	0.42	4.46	1.33	310.9
			36.47	15.80	30.35	5.47		0.00	175.72	41.13	20.17		325.11	
			0.91	0.65	1.32	0.14		0.00	2.88	1.16	0.21		7.27	
80	7.7	455	1.75	1.26	1.36	0.12	4.49	0.00	2.72	1.26	0.38	4.36	1.47	304.9
			35.07	15.31	31.27	4.69		0.00	165.96	44.67	18.25		315.22	
			0.88	0.63	1.36	0.12		0.00	2.72	1.26	0.19		7.16	
81	7.7	495	1.67	1.36	1.68	0.18	4.89	0.00	2.94	1.46	0.36	4.76	1.35	331.4
			33.47	16.53	38.62	7.04		0.00	179.39	51.76	17.29		344.09	
			0.84	0.68	1.68	0.18		0.00	2.94	1.46	0.18		7.96	
82	7.6	514	1.86	1.24	1.82	0.16	5.08	0.00	3.07	1.32	0.54	4.93	1.50	344.1
			37.27	15.07	41.84	6.26		0.00	187.32	46.80	25.94		360.49	
			0.93	0.62	1.82	0.16		0.00	3.07	1.32	0.27		8.19	
83	7.4	1000	3.27	2.31	3.80	0.50	9.88	0.00	4.12	2.86	2.64	9.62	1.33	670.1
			65.53	28.07	87.36	19.55		0.00	251.38	101.40	126.8		680.09	
			1.64	1.16	3.80	0.50		0.00	4.12	2.86	1.32		15.39	

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE
													%	
													ΣmgL^{-1}	
			$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$					$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$					ΣmmolL^{-1}	mgL^{-1}
84	7.7	376	1.63	0.98	1.02	0.08	3.71	0.00	2.19	1.22	0.20	3.61	1.37	252.0
			32.66	11.91	23.45	3.13		0.00	133.62	43.25	9.61		257.63	
			0.82	0.49	1.02	0.08		0.00	2.19	1.22	0.10		5.92	
85	7.6	451	1.83	1.20	1.28	0.14	4.45	0.00	2.62	1.38	0.32	4.32	1.48	302.2
			36.67	14.58	29.43	5.47		0.00	159.86	48.93	15.37		310.31	
			0.92	0.60	1.28	0.14		0.00	2.62	1.38	0.16		7.10	
86	7.6	532	1.75	1.60	1.75	0.15	5.25	0.00	3.14	1.36	0.61	5.11	1.35	356.5
			35.07	19.44	40.23	5.86		0.00	191.59	48.22	29.30		369.71	
			0.88	0.80	1.75	0.15		0.00	3.14	1.36	0.31		8.38	
87	7.7	479	1.29	1.46	1.80	0.18	4.73	0.00	2.79	1.40	0.42	4.61	1.28	321.0
			25.85	17.74	41.38	7.04		0.00	170.23	49.63	20.17		332.05	
			0.65	0.73	1.80	0.18		0.00	2.79	1.40	0.21		7.76	
88	7.8	610	2.30	1.68	1.82	0.22	6.02	0.00	3.50	1.45	0.90	5.85	1.43	408.8
			46.09	20.42	41.84	8.60		0.00	213.55	51.41	43.23		425.14	
			1.15	0.84	1.82	0.22		0.00	3.50	1.45	0.45		9.43	
89	7.9	362	1.15	1.02	1.26	0.14	3.57	0.00	2.09	1.12	0.26	3.47	1.42	242.2
			23.04	12.40	28.97	5.47		0.00	127.52	39.71	12.49		249.60	
			0.58	0.51	1.26	0.14		0.00	2.09	1.12	0.13		5.83	
90	7.8	488	1.62	1.12	1.82	0.26	4.82	0.00	2.93	1.36	0.42	4.71	1.15	326.7
			32.46	13.61	41.84	10.17		0.00	178.78	48.22	20.17		345.24	
			0.81	0.56	1.82	0.26		0.00	2.93	1.36	0.21		7.95	
91	7.8	759	2.35	2.32	2.62	0.21	7.50	0.00	3.95	2.62	0.74	7.31	1.28	508.3
			47.09	28.19	60.23	8.21		0.00	241.01	92.89	35.54		513.17	
			1.18	1.16	2.62	0.21		0.00	3.95	2.62	0.37		12.11	
92	7.8	44675	75.00	105.00	256.20	5.00	441.20	0.00	12.90	401.88	15.00	429.78	1.31	29936.7
			1502.93	1276.01	5889.78	195.49		0.00	787.10	14247.85	720.46		24619.62	
			37.50	52.50	256.20	5.00		0.00	12.90	401.88	7.50		773.48	
93	8.0	642	2.61	1.72	1.78	0.23	6.34	0.00	3.80	1.60	0.78	6.18	1.28	430.2
			52.30	20.90	40.92	8.99		0.00	231.86	56.72	37.46		449.16	
			1.31	0.86	1.78	0.23		0.00	3.80	1.60	0.39		9.97	
94	8.1	500	1.86	1.06	1.80	0.22	4.94	0.00	2.93	1.52	0.36	4.81	1.33	335.1
			37.27	12.88	41.38	8.60		0.00	178.78	53.89	17.29		350.09	
			0.93	0.53	1.80	0.22		0.00	2.93	1.52	0.18		8.11	
D ₀	7.7	2633	2.80	3.50	18.37	1.33	26.00	0.00	15.43	8.10	1.80	25.33	1.31	1805.4
			56.11	42.53	422.31	52.00		0.00	941.47	287.17	86.45		1888.05	
			1.40	1.75	18.37	1.33		0.00	15.43	8.10	0.90		47.28	
D ₁	7.4	2300	2.44	3.05	16.06	1.16	22.71	0.00	13.49	7.05	1.58	22.12	1.32	1577.1
			48.90	37.07	369.20	45.35		0.00	823.10	249.94	75.89		1649.45	
			1.22	1.53	16.06	1.16		0.00	13.49	7.05	0.79		41.30	
D ₂	7.5	2000.0	2.13	2.66	13.95	1.01	19.75	0.00	11.73	6.16	1.37	19.26	1.26	1371.4
			42.68	32.33	320.70	39.49		0.00	715.71	218.39	65.80		1435.10	
			1.07	1.33	13.95	1.01		0.00	11.73	6.16	0.69		35.93	

Continuación... Anexo 4.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE	
													%		
													ΣmgL^{-1}	ΣmmolL^{-1}	
			$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$				$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$								
D ₃	7.6	1650.0	1.79	2.22	11.52	0.76	16.29	0.00	9.09	5.60	1.20	15.89	1.24	1131.4	
			35.87	26.98	264.83	29.71		0.00	554.63	198.54	57.64			1168.20	
			0.90	1.11	11.52	0.76		0.00	9.09	5.60	0.60			29.58	
D ₄	7.6	1390.0	1.48	1.86	9.69	0.70	13.73	0.00	8.13	4.29	0.95	13.37	1.33	953.1	
			29.66	22.60	222.76	27.37		0.00	496.06	152.09	45.63			996.17	
			0.74	0.93	9.69	0.70		0.00	8.13	4.29	0.48			24.96	
D ₅	7.6	1215.0	1.32	1.64	8.47	0.57	12.00	0.00	7.03	3.73	0.90	11.66	1.44	833.1	
			26.45	19.93	194.72	22.29		0.00	428.94	132.24	43.23			867.79	
			0.66	0.82	8.47	0.57		0.00	7.03	3.73	0.45			21.73	
D ₆	7.7	1000.0	1.08	1.36	7.00	0.44	9.88	0.00	5.64	3.16	0.82	9.62	1.33	685.7	
			21.64	16.53	160.92	17.20		0.00	344.13	112.03	39.39			711.84	
			0.54	0.68	7.00	0.44		0.00	5.64	3.16	0.41			17.87	
D ₇	7.7	750.0	0.80	1.01	5.23	0.37	7.41	0.00	4.34	2.32	0.56	7.22	1.30	514.3	
			16.03	12.27	120.23	14.47		0.00	264.81	82.25	26.90			536.96	
			0.40	0.51	5.23	0.37		0.00	4.34	2.32	0.28			13.45	
D ₈	7.7	580.0	0.64	0.76	4.08	0.25	5.73	0.00	3.30	1.84	0.44	5.58	1.33	397.7	
			12.82	9.24	93.80	9.77		0.00	201.35	65.23	21.13			413.35	
			0.32	0.38	4.08	0.25		0.00	3.30	1.84	0.22			10.39	
D ₉	7.9	320.0	0.36	0.40	2.23	0.17	3.16	0.00	1.84	1.02	0.23	3.09	1.12	219.4	
			7.21	4.86	51.27	6.65		0.00	112.27	36.16	11.05			229.46	
			0.18	0.20	2.23	0.17		0.00	1.84	1.02	0.12			5.76	

Anexo 5. Composición iónica de las aguas freáticas del Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE
													%	
			mmol _c L ⁻¹				mmol _c L ⁻¹				ΣmgL^{-1}			
											ΣmmolL^{-1}	mgL ⁻¹		
Primavera 2009	6.7	1449	4.40	2.20	7.25	0.46	14.31	0.00	7.39	4.30	2.25	13.94	1.31	973.4
1			88.17	26.74	166.67	17.99		0.00	450.91	152.45	108.1		1010.98	
			2.20	1.10	7.25	0.46		0.00	7.39	4.30	1.13		23.83	
2	7.2	890	2.68	1.34	4.49	0.28	8.79	0.00	4.62	2.62	1.37	8.61	1.03	597.9
			53.70	16.28	103.22	10.95		0.00	281.89	92.89	65.80		624.74	
			1.34	0.67	4.49	0.28		0.00	4.62	2.62	0.69		14.71	
3	7.2	1144	2.70	1.70	6.70	0.20	11.30	0.00	5.92	3.10	1.98	11.00	1.35	768.5
			54.11	20.66	154.03	7.82		0.00	361.21	109.90	95.10		802.83	
			1.35	0.85	6.70	0.20		0.00	5.92	3.10	0.99		19.11	
4	7.0	1233	3.20	2.90	5.84	0.24	12.18	0.00	6.32	3.50	2.04	11.86	1.33	828.3
			64.12	35.24	134.26	9.38		0.00	385.62	124.09	97.98		850.69	
			1.60	1.45	5.84	0.24		0.00	6.32	3.50	1.02		19.97	
5	7.1	1032	2.90	2.40	4.69	0.20	10.19	0.00	5.75	2.20	1.98	9.93	1.29	693.3
			58.11	29.17	107.82	7.82		0.00	350.84	78.00	95.10		726.85	
			1.45	1.20	4.69	0.20		0.00	5.75	2.20	0.99		16.48	
6	6.9	1041	3.60	1.70	4.76	0.22	10.28	0.00	5.20	2.70	2.10	10.00	1.38	699.3
			72.14	20.66	109.43	8.60		0.00	317.28	95.72	100.9		724.70	
			1.80	0.85	4.76	0.22		0.00	5.20	2.70	1.05		16.58	
7	6.4	709	2.45	1.01	3.24	0.30	7.00	0.00	3.27	2.50	1.04	6.81	1.38	476.3
			49.10	12.27	74.48	11.73		0.00	199.52	88.63	49.95		485.69	
			1.23	0.51	3.24	0.30		0.00	3.27	2.50	0.52		11.56	
8	6.7	864	2.99	1.58	3.50	0.18	8.25	0.00	4.49	2.24	1.74	8.47	1.32	580.4
			59.92	19.20	80.46	7.04		0.00	273.96	79.41	83.57		603.56	
			1.50	0.79	3.50	0.18		0.00	4.49	2.24	0.87		13.57	
9	6.8	672	2.34	0.82	3.09	0.22	6.47	0.00	3.66	2.00	0.98	6.64	1.30	451.4
			46.89	9.97	71.04	8.60		0.00	223.32	70.91	47.07		477.79	
			1.17	0.41	3.09	0.22		0.00	3.66	2.00	0.49		11.04	
10	6.8	995	2.40	1.50	5.06	0.87	9.83	0.00	4.91	2.84	1.82	9.57	1.34	668.4
			48.09	18.23	116.32	34.02		0.00	299.59	100.69	87.42		704.35	
			1.20	0.75	5.06	0.87		0.00	4.91	2.84	0.91		16.54	
11	6.9	1391	4.00	2.60	5.63	1.51	13.74	0.00	7.23	3.85	2.30	13.38	1.33	934.5
			80.16	31.60	129.43	59.04		0.00	441.14	136.49	110.5		988.33	
			2.00	1.30	5.63	1.51		0.00	7.23	3.85	1.15		22.67	
12	6.9	1740	3.73	6.10	5.75	1.60	17.18	0.00	7.45	6.40	2.88	16.73	1.33	1168.9
			74.75	74.13	132.19	62.56		0.00	454.57	226.90	138.3		1163.41	
			1.87	3.05	5.75	1.60		0.00	7.45	6.40	1.44		27.56	
13	6.9	1202	4.23	2.57	3.97	1.10	11.87	0.00	5.28	3.50	2.77	11.55	1.37	807.5
			84.76	31.23	91.27	43.01		0.00	322.16	124.09	133.0		829.56	
			2.12	1.29	3.97	1.10		0.00	5.28	3.50	1.39		18.64	
14	7.2	1217	3.60	2.50	4.80	1.12	12.02	0.00	5.48	3.65	2.60	11.73	1.22	817.6
			72.14	30.38	110.35	43.79		0.00	334.37	129.40	124.9		845.31	
			1.80	1.25	4.80	1.12		0.00	5.48	3.65	1.30		19.40	

Continuación... Anexo 5.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE	
													%		
													ΣmgL^{-1}	ΣmmolL^{-1}	
15	6.7	1103	4.02	3.10	2.47	0.98	10.57	0.00	5.77	3.80	1.32	10.89	1.49	741.0	
			80.56	37.67	56.78	38.32			0.00	352.06	134.72	63.40		763.51	
			2.01	1.55	2.47	0.98			0.00	5.77	3.80	0.66		17.24	
16	6.8	1748	4.00	3.30	7.96	1.55	16.81	0.00	8.46	6.12	2.68	17.26	1.32	1174.3	
			80.16	40.10	182.99	60.60			0.00	516.19	216.97	128.7		1225.74	
			2.00	1.65	7.96	1.55			0.00	8.46	6.12	1.34		29.08	
17	6.7	956	2.20	1.82	4.38	1.04	9.44	0.00	4.38	3.37	1.47	9.22	1.18	642.2	
			44.09	22.12	100.69	40.66			0.00	267.25	119.48	70.60		664.89	
			1.10	0.91	4.38	1.04			0.00	4.38	3.37	0.74		15.92	
18	7.0	866	2.44	1.90	3.45	0.76	8.55	0.00	3.92	3.06	1.34	8.32	1.36	581.8	
			48.90	23.09	79.31	29.71			0.00	239.18	108.49	64.36		593.04	
			1.22	0.95	3.45	0.76			0.00	3.92	3.06	0.67		14.03	
19	6.7	1272	3.30	2.40	6.40	0.46	12.56	0.00	5.77	4.60	1.85	12.22	1.37	854.5	
			66.13	29.17	147.13	17.99			0.00	352.06	163.08	88.86		864.41	
			1.65	1.20	6.40	0.46			0.00	5.77	4.60	0.93		21.01	
20	6.8	952	2.10	1.80	4.89	0.35	9.14	0.00	4.63	3.20	1.57	9.40	1.40	639.6	
			42.08	21.87	112.42	13.68			0.00	282.50	113.45	75.41		661.42	
			1.05	0.90	4.89	0.35			0.00	4.63	3.20	0.79		15.81	
21	6.9	1205	3.10	3.00	5.17	0.63	11.90	0.00	5.80	3.80	2.00	11.60	1.28	809.5	
			62.12	36.46	118.85	24.63			0.00	353.89	134.72	96.06		826.74	
			1.55	1.50	5.17	0.63			0.00	5.80	3.80	1.00		19.45	
22	6.7	1333	3.41	2.20	6.86	0.69	13.16	0.00	6.42	4.18	2.20	12.80	1.39	895.5	
			68.33	26.74	157.70	26.98			0.00	391.72	148.19	105.7		925.33	
			1.71	1.10	6.86	0.69			0.00	6.42	4.18	1.10		22.06	
23	6.7	921	2.01	1.80	4.81	0.48	9.10	0.00	4.37	2.93	1.54	8.84	1.45	618.7	
			40.28	21.87	110.58	18.77			0.00	266.64	103.88	73.97		635.98	
			1.01	0.90	4.81	0.48			0.00	4.37	2.93	0.77		15.27	
24	7.2	2146	5.54	7.73	7.23	0.87	21.37	0.00	12.55	6.73	2.65	21.93	1.29	1441.7	
			111.02	93.94	166.21	34.02			0.00	765.75	238.60	127.3		1536.81	
			2.77	3.87	7.23	0.87			0.00	12.55	6.73	1.33		35.34	
25	7.2	1086	3.70	2.80	3.78	0.44	10.72	0.00	5.40	3.43	1.65	10.48	1.13	729.6	
			74.14	34.03	86.90	17.20			0.00	329.48	121.60	79.25		742.61	
			1.85	1.40	3.78	0.44			0.00	5.40	3.43	0.83		17.13	
26	6.9	998	2.40	1.70	5.35	0.41	9.86	0.00	5.21	3.15	1.24	9.60	1.34	670.5	
			48.09	20.66	122.99	16.03			0.00	317.89	111.68	59.56		696.90	
			1.20	0.85	5.35	0.41			0.00	5.21	3.15	0.62		16.79	
27	6.8	1306	3.40	2.47	6.21	0.47	12.55	0.00	6.49	4.50	1.91	12.90	1.38	877.4	
			68.13	30.02	142.76	18.38			0.00	395.99	159.54	91.74		906.56	
			1.70	1.24	6.21	0.47			0.00	6.49	4.50	0.96		21.56	
28	6.9	884	2.31	1.80	4.30	0.32	8.73	0.00	4.89	2.30	1.30	8.49	1.39	593.9	
			46.29	21.87	98.85	12.51			0.00	298.37	81.54	62.44		621.88	
			1.16	0.90	4.30	0.32			0.00	4.89	2.30	0.65		14.52	

Continuación... Anexo 5.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE
													%	
													ΣmgL^{-1}	ΣmmolL^{-1}
			$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$				$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$				mgL^{-1}			
29	6.8	681	1.50	0.90	3.92	0.25	6.57	0.00	3.31	2.40	1.02	6.73	1.20	457.5
			30.06	10.94	90.12	9.77		0.00	201.96	85.09	48.99		476.93	
			0.75	0.45	3.92	0.25		0.00	3.31	2.40	0.51		11.59	
30	6.7	754	1.67	1.02	4.34	0.42	7.45	0.00	3.48	2.64	1.13	7.25	1.36	506.5
			33.47	12.40	99.77	16.42		0.00	212.33	93.60	54.27		522.26	
			0.84	0.51	4.34	0.42		0.00	3.48	2.64	0.57		12.79	
31	6.9	1180	2.93	4.39	3.44	0.59	11.35	0.00	5.13	4.79	1.73	11.65	1.30	792.7
			58.71	53.35	79.08	23.07		0.00	313.01	169.82	83.09		780.14	
			1.47	2.20	3.44	0.59		0.00	5.13	4.79	0.87		18.48	
32	6.5	1204	3.14	2.45	5.86	0.44	11.89	0.00	6.42	4.13	1.02	11.57	1.36	808.8
			62.92	29.77	134.72	17.20		0.00	391.72	146.42	48.99		831.75	
			1.57	1.23	5.86	0.44		0.00	6.42	4.13	0.51		20.16	
33	6.7	1035	2.70	3.11	3.76	0.37	9.94	0.00	5.50	3.20	1.52	10.22	1.39	695.3
			54.11	37.79	86.44	14.47		0.00	335.59	113.45	73.01		714.85	
			1.35	1.56	3.76	0.37		0.00	5.50	3.20	0.76		16.50	
34	6.9	764	2.60	1.38	3.20	0.27	7.45	0.00	3.92	2.20	1.12	7.24	1.43	513.3
			52.10	16.77	73.56	10.56		0.00	239.18	78.00	53.79		523.97	
			1.30	0.69	3.20	0.27		0.00	3.92	2.20	0.56		12.14	
35	6.8	933	2.80	2.07	4.01	0.33	9.21	0.00	4.90	2.68	1.37	8.95	1.43	626.8
			56.11	25.16	92.19	12.90		0.00	298.98	95.01	65.80		646.15	
			1.40	1.04	4.01	0.33		0.00	4.90	2.68	0.69		15.04	
36	6.8	1046	2.73	2.12	5.10	0.38	10.33	0.00	5.28	3.60	1.20	10.08	1.22	702.7
			54.71	25.76	117.24	14.86		0.00	322.16	127.63	57.64		720.00	
			1.37	1.06	5.10	0.38		0.00	5.28	3.60	0.60		17.39	
37	6.6	717	2.03	1.58	2.84	0.63	7.08	0.00	3.69	2.10	1.11	6.90	1.29	481.7
			40.68	19.20	65.29	24.63		0.00	225.15	74.45	53.31		502.71	
			1.02	0.79	2.84	0.63		0.00	3.69	2.10	0.56		11.62	
38	6.7	701	1.98	1.54	2.78	0.62	6.92	0.00	3.17	2.48	1.09	6.74	1.32	470.9
			39.68	18.71	63.91	24.24		0.00	193.42	87.92	52.35		480.24	
			0.99	0.77	2.78	0.62		0.00	3.17	2.48	0.55		11.36	
39	6.6	700	2.02	1.36	2.80	0.54	6.72	0.00	3.33	2.50	1.08	6.91	1.39	470.3
			40.48	16.53	64.37	21.11		0.00	203.18	88.63	51.87		486.18	
			1.01	0.68	2.80	0.54		0.00	3.33	2.50	0.54		11.40	
40	6.6	705	2.08	1.49	2.85	0.54	6.96	0.00	3.27	2.46	1.06	6.79	1.24	473.6
			41.68	18.11	65.52	21.11		0.00	199.52	87.21	50.91		484.07	
			1.04	0.75	2.85	0.54		0.00	3.27	2.46	0.53		11.44	
41	6.6	713	2.01	1.56	2.92	0.55	7.04	0.00	3.20	2.44	1.24	6.88	1.15	479.0
			40.28	18.96	67.13	21.50		0.00	195.25	86.51	59.56		489.18	
			1.01	0.78	2.92	0.55		0.00	3.20	2.44	0.62		11.52	
Verano 2010	9.57	471.0	2.21	0.82	1.35	0.27	4.65	0.20	2.69	1.12	0.52	4.53	1.31	316.4
1			44.29	9.97	31.04	10.56		6.00	164.13	39.71	24.98		330.66	
			1.11	0.41	1.35	0.27		0.10	2.69	1.12	0.26		7.31	

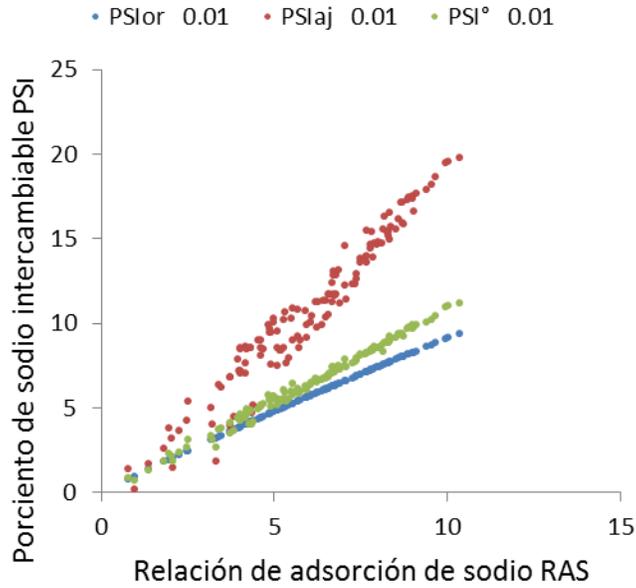
Continuación... Anexo 5.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE	
													%		
													ΣmgL^{-1}	ΣmmolL^{-1}	
			$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$				$\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$								
2	9.91	427.0	1.74	0.96	1.24	0.28	4.22	0.16	2.32	1.14	0.48	4.10	1.49	286.9	
			34.87	11.67	28.51	10.95		4.80	141.56	40.42	22.88			295.64	
			0.87	0.48	1.24	0.28		0.08	2.32	1.14	0.24			6.65	
3	8.23	1148.0	2.10	2.50	6.45	0.29	11.34	0.00	5.70	4.25	1.10	11.05	1.30	771.2	
			42.08	30.38	148.28	11.34		0.00	347.79	150.68	52.83			783.38	
			1.05	1.25	6.45	0.29		0.00	5.70	4.25	0.55			19.54	
4	7.85	911.0	2.60	2.10	3.84	0.46	9.00	0.00	4.70	3.20	0.86	8.76	1.32	612.0	
			52.10	25.52	88.28	17.79		0.00	286.77	113.45	41.31			625.22	
			1.30	1.05	3.84	0.46		0.00	4.70	3.20	0.43			14.98	
5	8.13	641.0	1.60	1.63	2.80	0.30	6.33	0.00	3.55	2.25	0.37	6.17	1.28	430.6	
			32.06	19.81	64.37	11.73		0.00	216.61	79.77	17.77			442.12	
			0.80	0.82	2.80	0.30		0.00	3.55	2.25	0.19			10.70	
6	8.27	1232.0	3.12	2.90	5.73	0.42	12.17	0.00	6.57	4.12	1.16	11.85	1.33	827.7	
			62.52	35.24	131.73	16.42		0.00	400.87	146.07	55.72			848.57	
			1.56	1.45	5.73	0.42		0.00	6.57	4.12	0.58			20.43	
7	7.79	1124.0	2.80	2.86	5.12	0.32	11.10	0.00	5.94	3.86	1.02	10.82	1.28	755.1	
			56.11	34.76	117.70	12.51		0.00	362.43	136.85	48.99			769.35	
			1.40	1.43	5.12	0.32		0.00	5.94	3.86	0.51			18.58	
8	7.81	963.0	3.29	2.04	3.76	0.42	9.51	0.00	5.46	3.08	0.72	9.26	1.33	646.9	
			65.93	24.79	86.44	16.42		0.00	333.15	109.20	34.58			670.50	
			1.65	1.02	3.76	0.42		0.00	5.46	3.08	0.36			15.75	
9	8.17	1167.0	2.28	2.62	6.29	0.33	11.52	0.00	5.60	4.38	1.24	11.22	1.32	784.0	
			45.69	31.84	144.60	12.90		0.00	341.69	155.28	59.56			791.56	
			1.14	1.31	6.29	0.33		0.00	5.60	4.38	0.62			19.67	
10	7.85	1349.0	3.20	3.12	6.54	0.46	13.32	0.00	7.09	4.28	1.61	12.98	1.30	906.3	
			64.12	37.92	150.35	17.99		0.00	432.60	151.74	77.22			931.93	
			1.60	1.56	6.54	0.46		0.00	7.09	4.28	0.80			22.33	
11	7.74	802.0	1.60	1.80	4.20	0.32	7.92	0.00	4.26	2.82	0.63	7.71	1.34	538.8	
			32.06	21.87	96.55	12.51		0.00	259.93	99.98	30.32			553.22	
			0.80	0.90	4.20	0.32		0.00	4.26	2.82	0.32			13.62	
12	7.54	1046.0	3.60	2.42	3.95	0.36	10.33	0.00	5.74	3.22	1.10	10.06	1.35	702.7	
			72.14	29.41	90.81	14.08		0.00	350.23	114.16	52.62			723.44	
			1.80	1.21	3.95	0.36		0.00	5.74	3.22	0.55			16.83	
13	8.15	883.0	2.54	1.92	3.86	0.40	8.72	0.00	5.11	2.65	0.72	8.48	1.40	593.2	
			50.90	23.33	88.74	15.64		0.00	311.79	93.95	34.58			618.93	
			1.27	0.96	3.86	0.40		0.00	5.11	2.65	0.36			14.61	
14	8.12	954.0	1.92	2.16	4.98	0.36	9.42	0.00	5.42	3.20	0.56	9.18	1.29	640.9	
			38.47	26.25	114.49	14.08		0.00	330.70	113.45	26.90			664.34	
			0.96	1.08	4.98	0.36		0.00	5.42	3.20	0.28			16.28	
15	7.69	991.0	1.86	2.24	5.27	0.42	9.79	0.00	5.66	3.26	0.62	9.54	1.29	665.8	
			37.27	27.22	121.15	16.42		0.00	345.35	115.58	29.78			692.77	
			0.93	1.12	5.27	0.42		0.00	5.66	3.26	0.31			16.97	

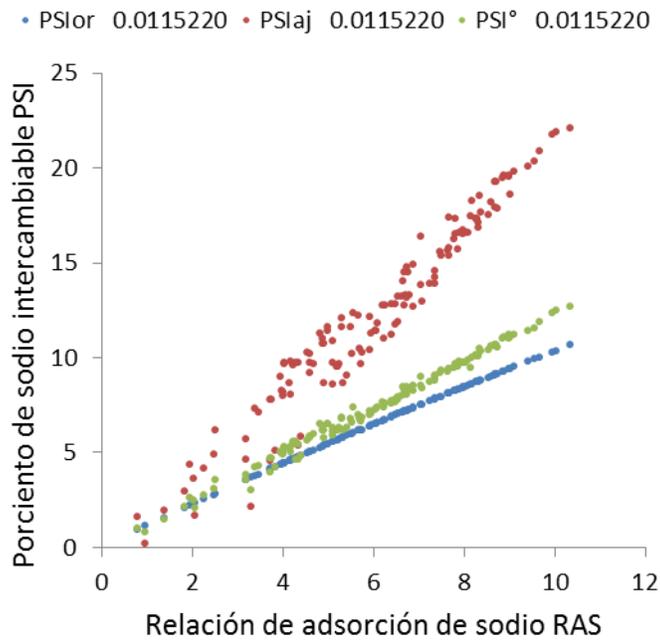
Continuación... Anexo 5.

Muestra	pH	CE μScm^{-1}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	Error	RSE	
													%		
													ΣmgL^{-1}	ΣmmolL^{-1}	
16	7.56	743.0	2.12	1.96	2.94	0.32	7.34	0.00	4.07	2.70	0.38	7.15	1.31	499.1	
			42.48	23.82	67.59	12.51		0.00	248.33	95.72	18.25			508.71	
			1.06	0.98	2.94	0.32		0.00	4.07	2.70	0.19			12.26	
17	7.70	702.0	2.08	1.82	2.75	0.28	6.93	0.00	3.83	2.56	0.36	6.75	1.32	471.6	
			41.68	22.12	63.22	10.95		0.00	233.69	90.76	17.29			479.71	
			1.04	0.91	2.75	0.28		0.00	3.83	2.56	0.18			11.55	
18	8.10	1639.0	3.20	3.38	9.09	0.52	16.19	0.00	8.86	5.18	1.72	15.76	1.35	1101.1	
			64.12	41.08	208.97	20.33		0.00	540.60	183.65	82.61			1141.36	
			1.60	1.69	9.09	0.52		0.00	8.86	5.18	0.86			27.80	
19	7.88	708.0	2.10	1.60	3.03	0.26	6.99	0.00	3.82	2.65	0.34	6.81	1.30	475.6	
			42.08	19.44	69.66	10.17		0.00	233.08	93.95	16.33			484.71	
			1.05	0.80	3.03	0.26		0.00	3.82	2.65	0.17			11.78	
20	7.68	1030.0	2.36	2.60	4.78	0.43	10.17	0.00	4.97	3.96	0.96	9.89	1.40	692.0	
			47.29	31.60	109.89	16.81		0.00	303.25	140.39	46.11			695.34	
			1.18	1.30	4.78	0.43		0.00	4.97	3.96	0.48			17.10	
21	8.00	868.0	2.45	2.12	3.62	0.38	8.57	0.00	4.44	3.24	0.68	8.36	1.24	583.1	
			49.10	25.76	83.22	14.86		0.00	270.91	114.87	32.66			591.37	
			1.23	1.06	3.62	0.38		0.00	4.44	3.24	0.34			14.31	
22	7.68	810.0	2.36	2.16	3.06	0.42	8.00	0.00	4.37	3.02	0.42	7.81	1.20	544.2	
			47.29	26.25	70.35	16.42		0.00	266.64	107.07	20.17			554.19	
			1.18	1.08	3.06	0.42		0.00	4.37	3.02	0.21			13.34	

Anexo 6. Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$ para diferentes coeficientes de selectividad iónica, Valle del Mezquital, verano 2009 y verano 2010.

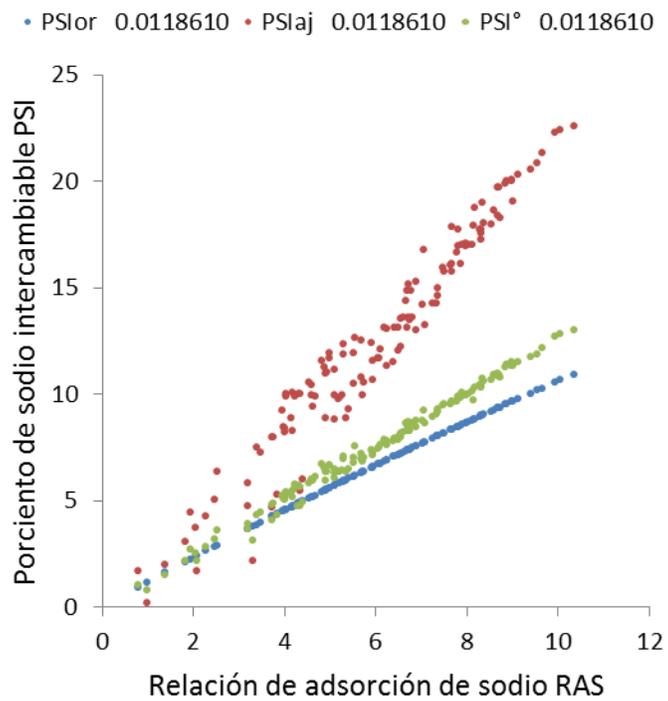


$$kg' = K_2 = 0.01$$

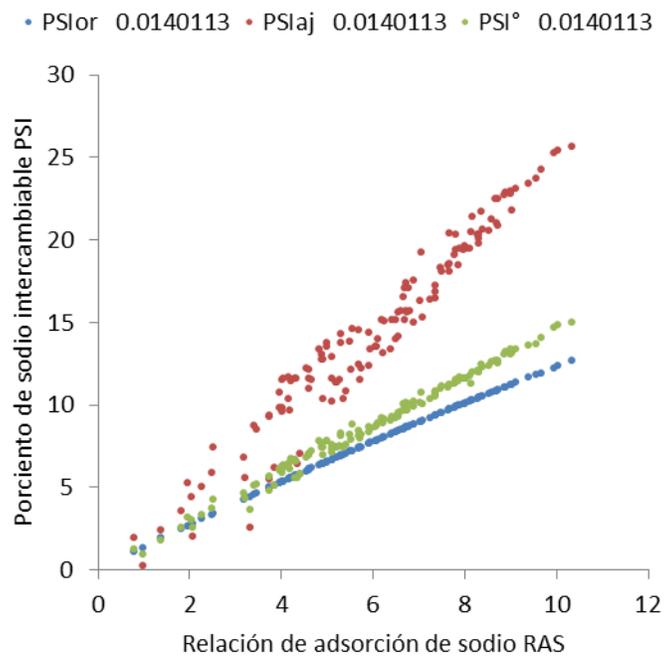


$$kg' = K_3 = 0.0115220$$

Continuación... Anexo 6

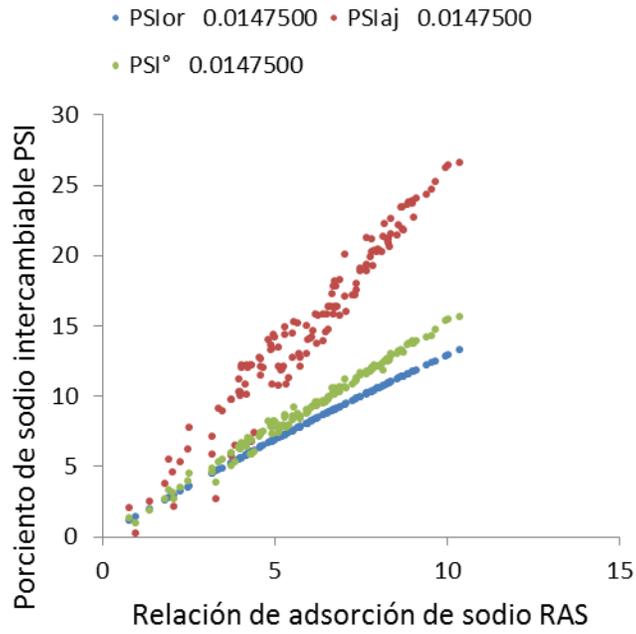


$$kg' = K_4 = 0.0118610$$

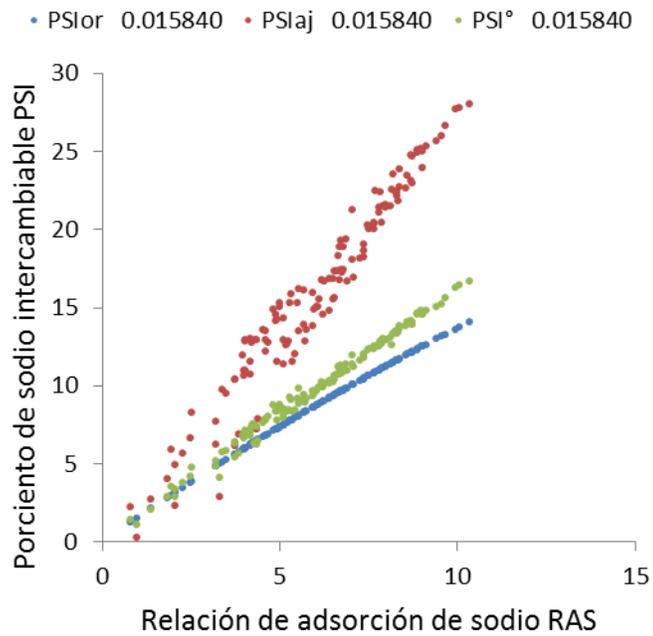


$$kg' = K_5 = 0.0140113$$

Continuación... Anexo 6

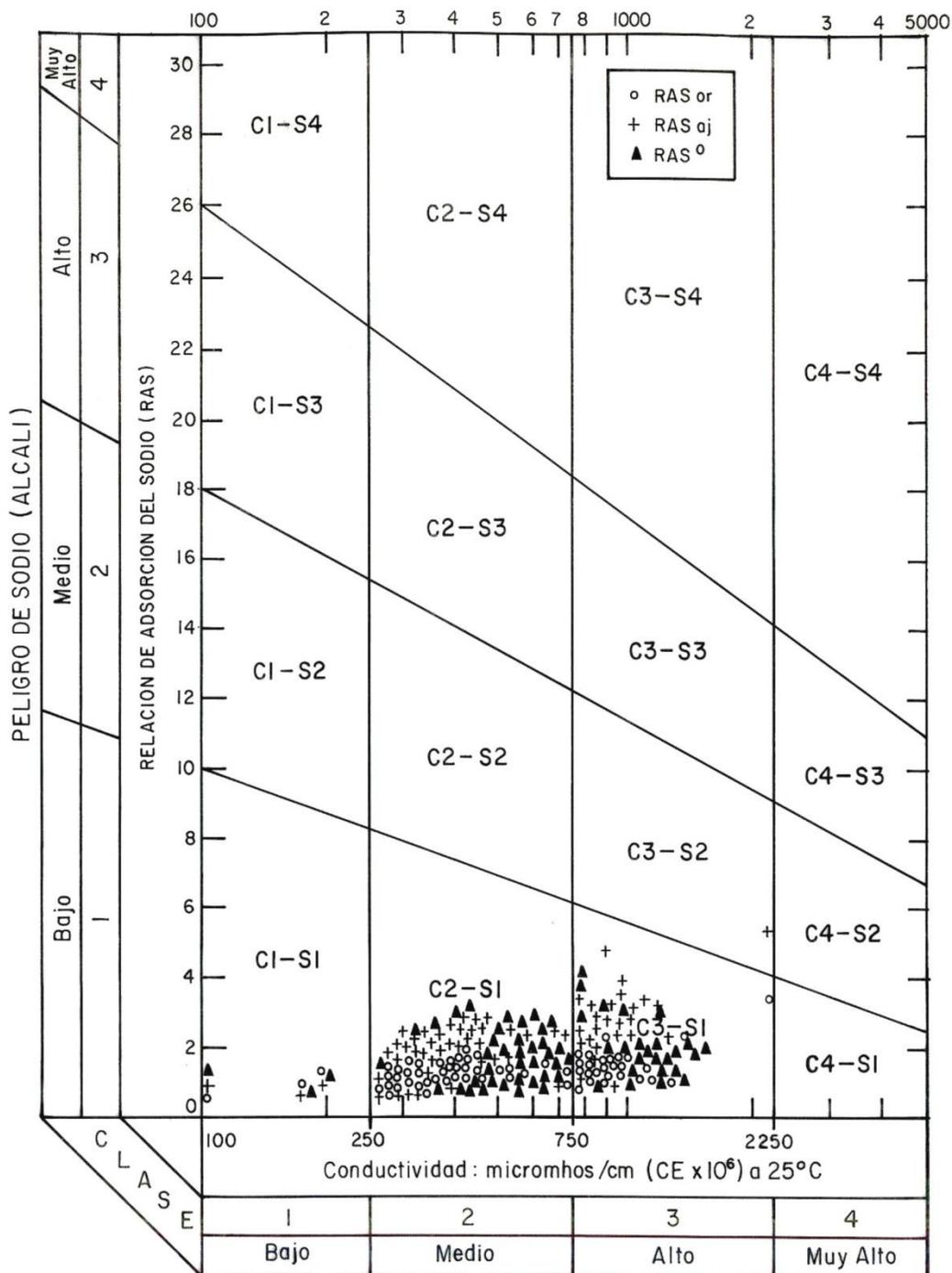


$$kg' = K_6 = 0.0147500$$

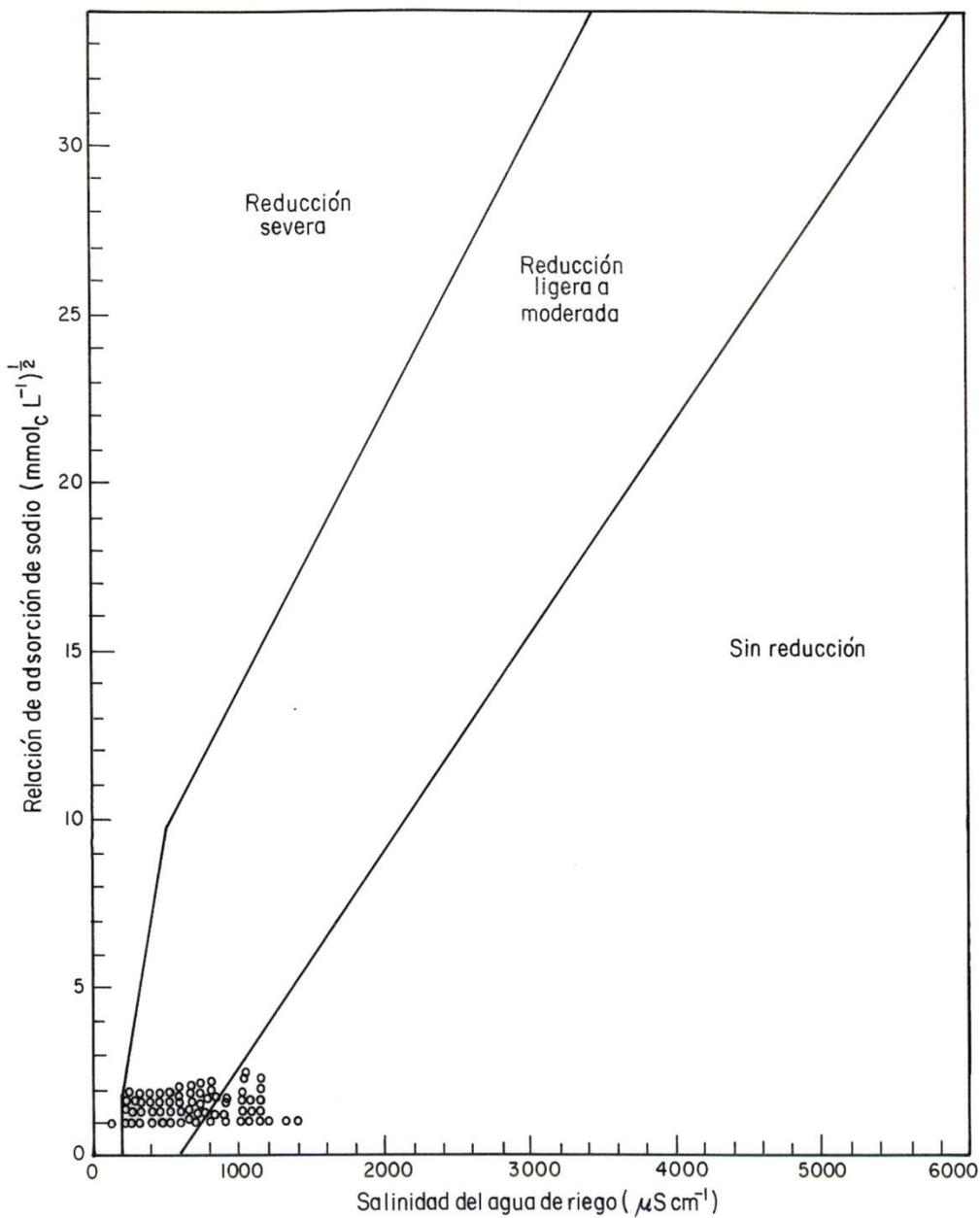


$$kg' = K_7 = 0.015840$$

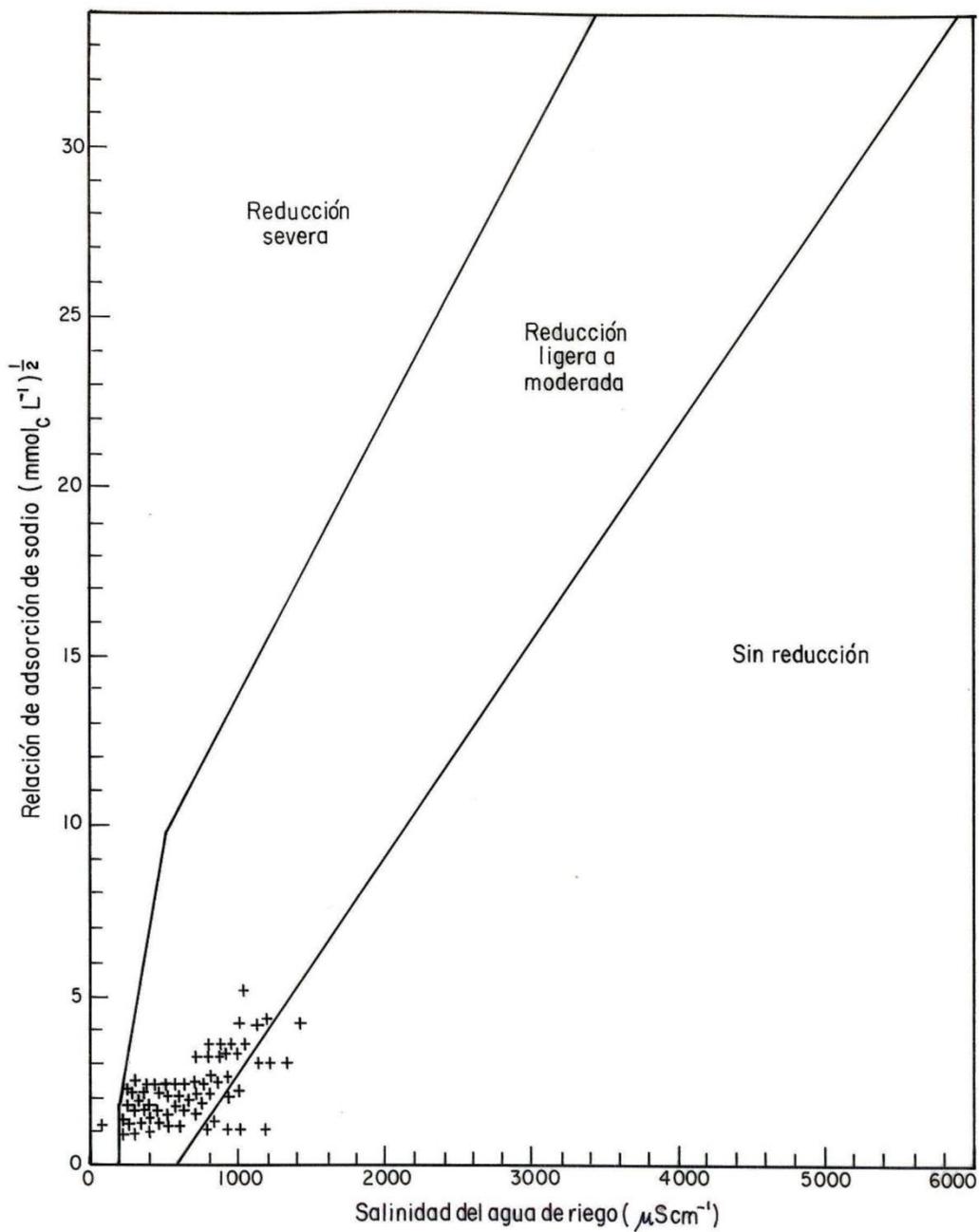
Anexo 7. Distribución de las aguas de la zona de calizas SLP-VER de acuerdo con la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y el RAS .



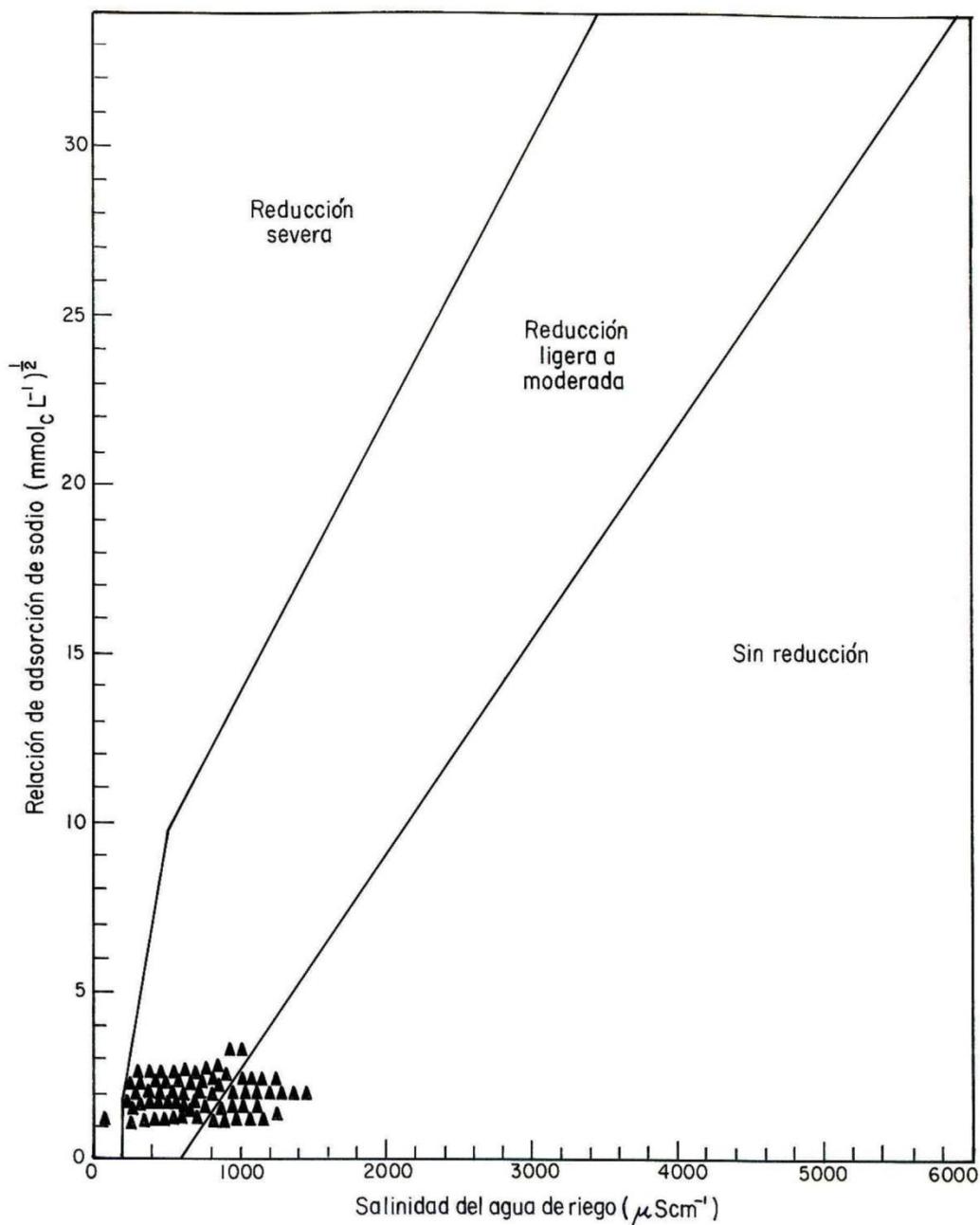
Anexo 8. Clasificación de las aguas de la zona de calizas SLP-VER de acuerdo al riego de reducción de la infiltración, verano 2009 y verano 2010.



CE y RAS_{or}

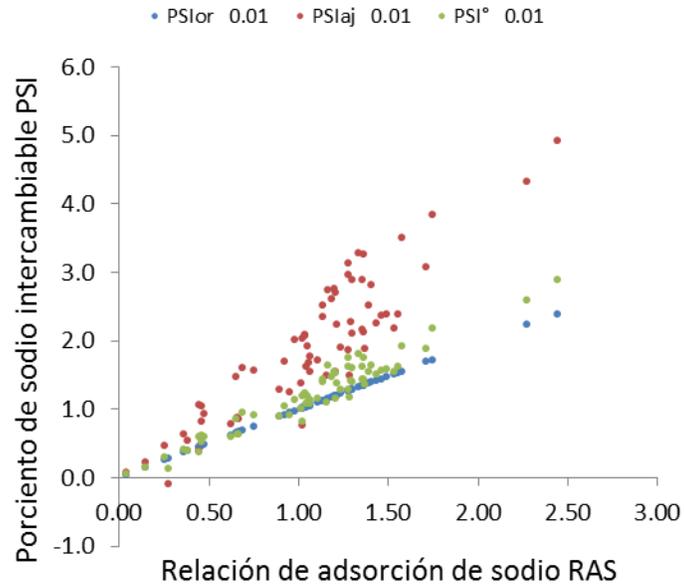


CE y RAS_{aj}

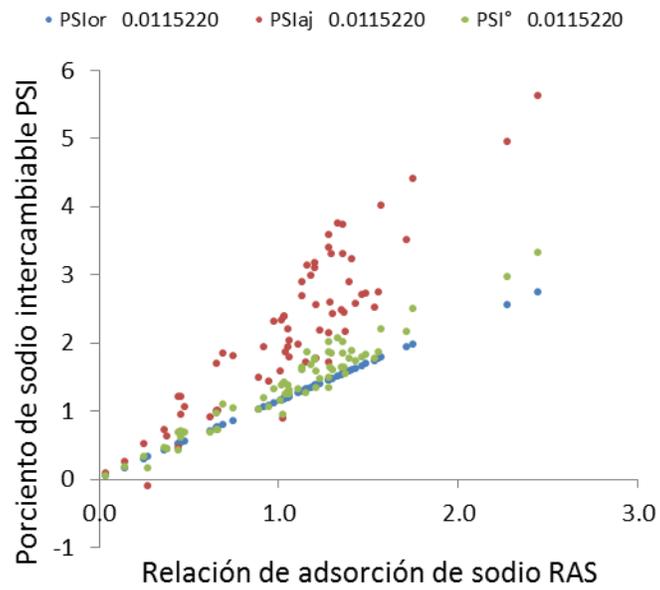


CE y RAS^o

Anexo 9. Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$ para diferentes coeficientes de selectividad iónica, zona de calizas SLP-VER, verano 2009 y verano 2010.

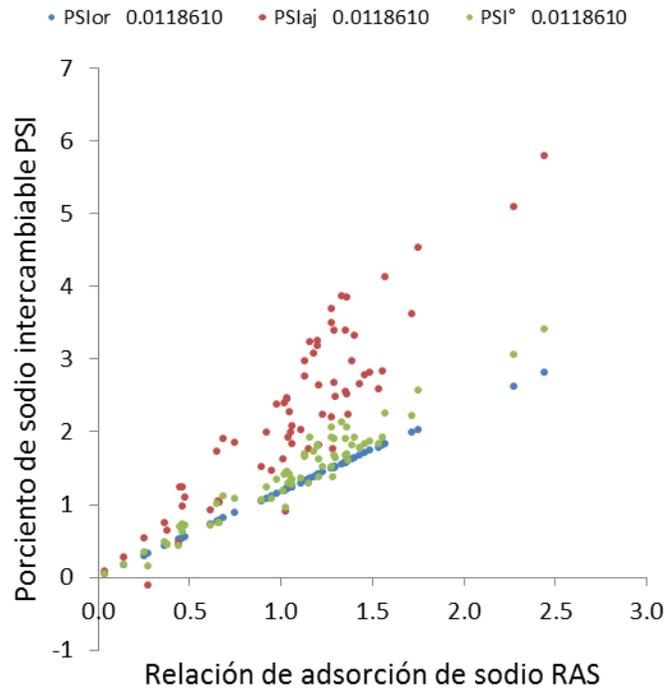


$$kg' = K_2 = 0.01$$

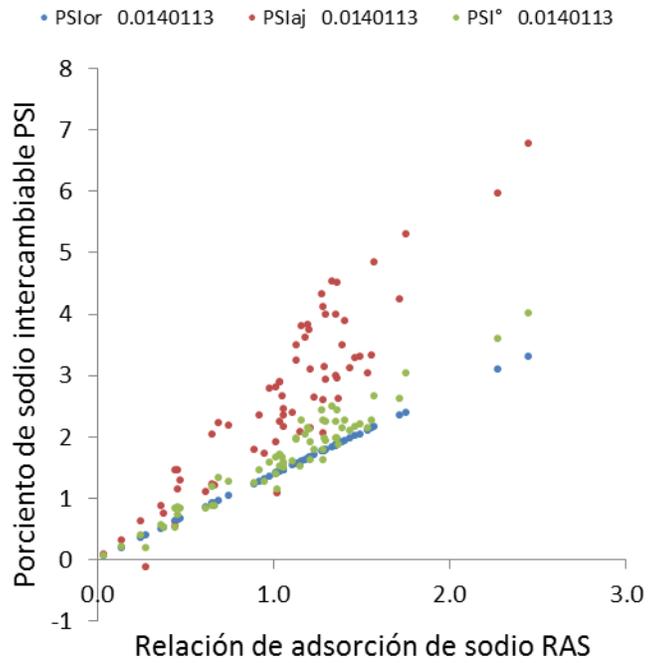


$$kg' = K_3 = 0.0115220$$

Continuación... Anexo 9

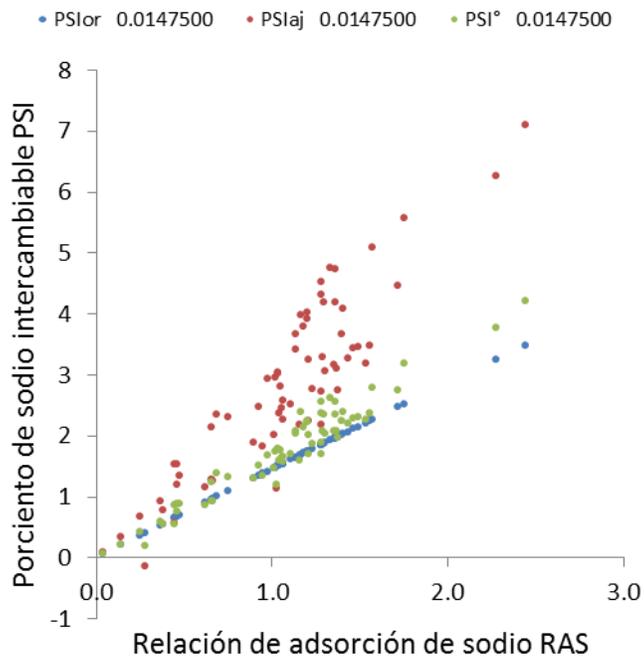


$$kg' = K_4 = 0.0118610$$

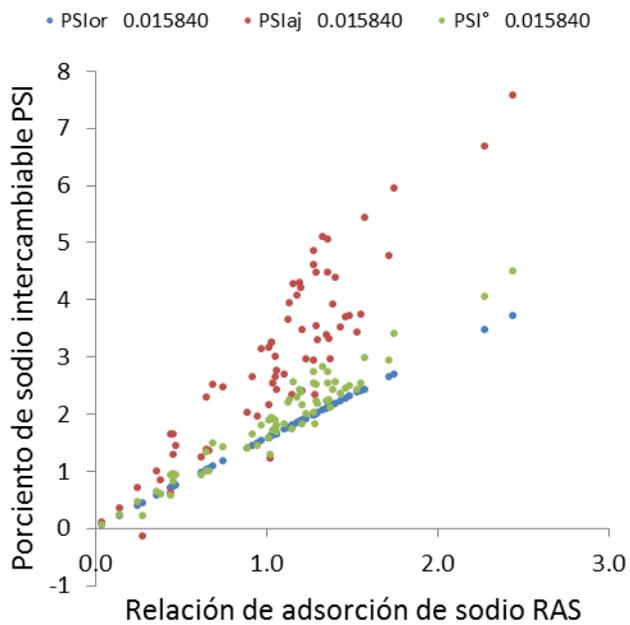


$$kg' = K_5 = 0.0140113$$

Continuación... Anexo 9

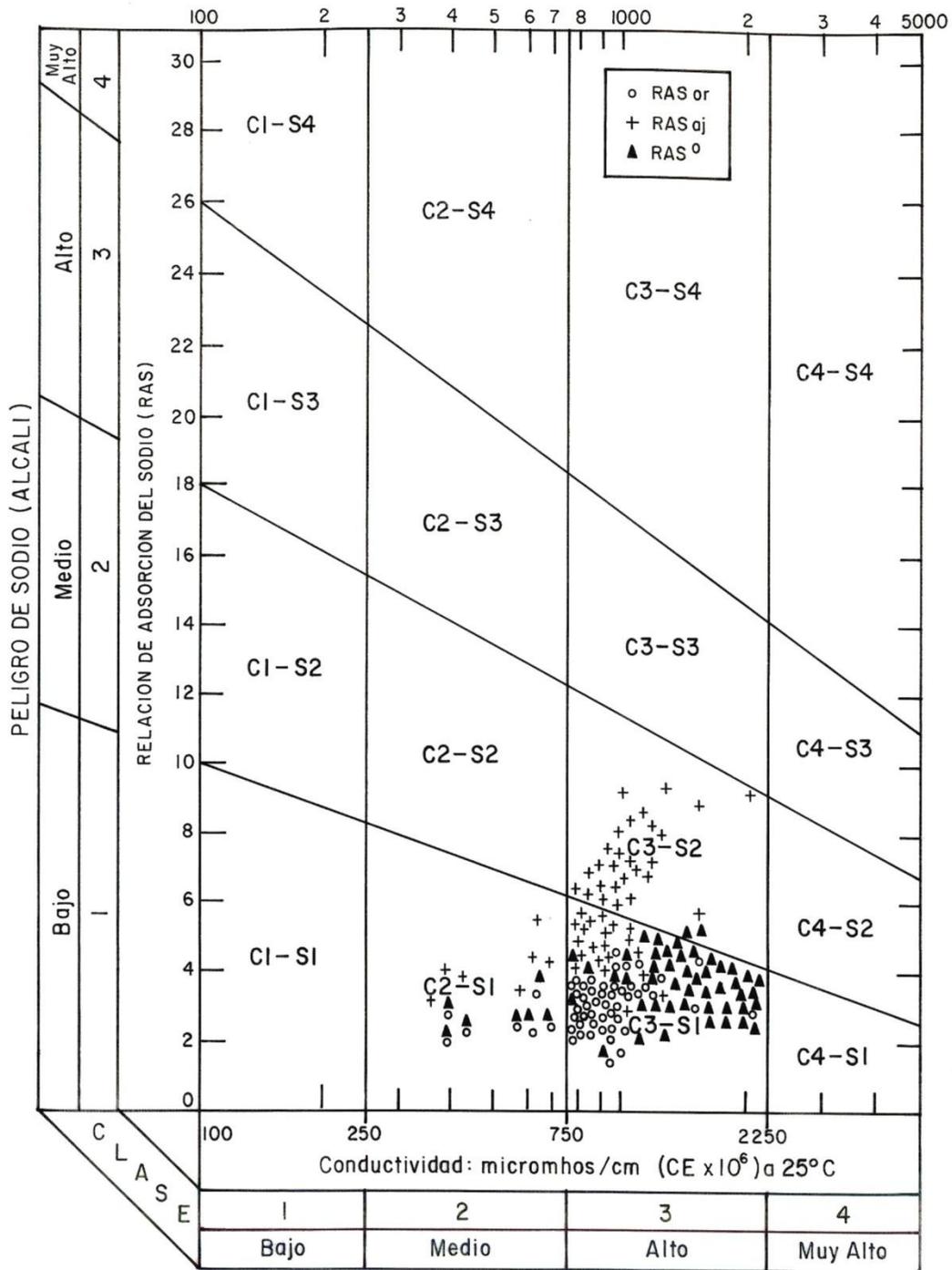


$$kg' = K_6 = 0.0147500$$

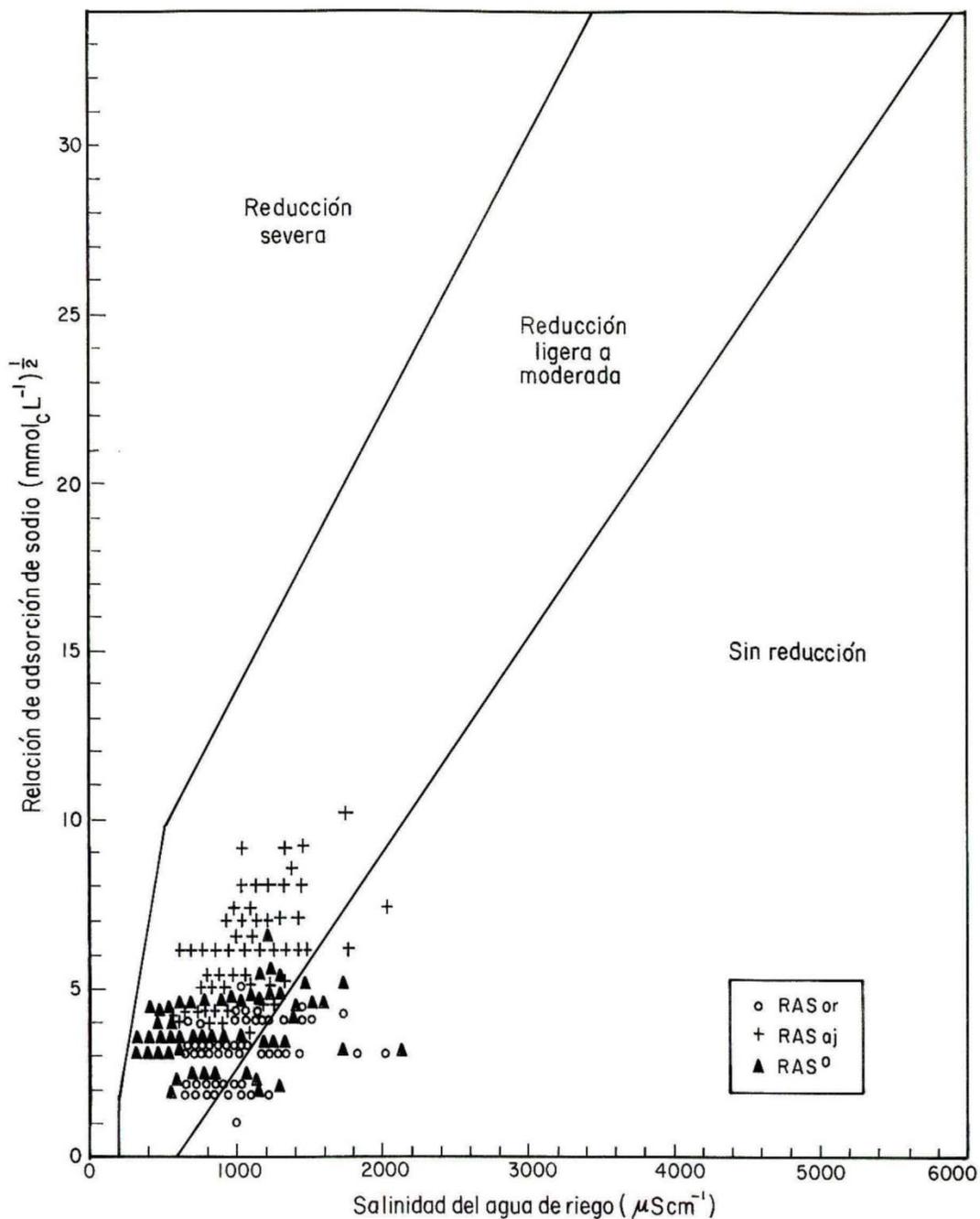


$$kg' = K_7 = 0.015840$$

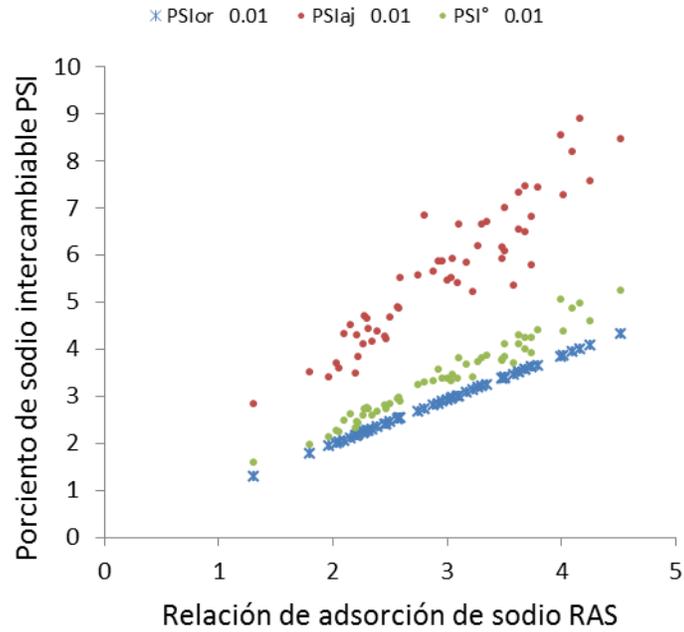
Anexo 10. Distribución de las aguas freáticas de acuerdo con la conductividad eléctrica ($\mu S cm^{-1}$) y el $RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.



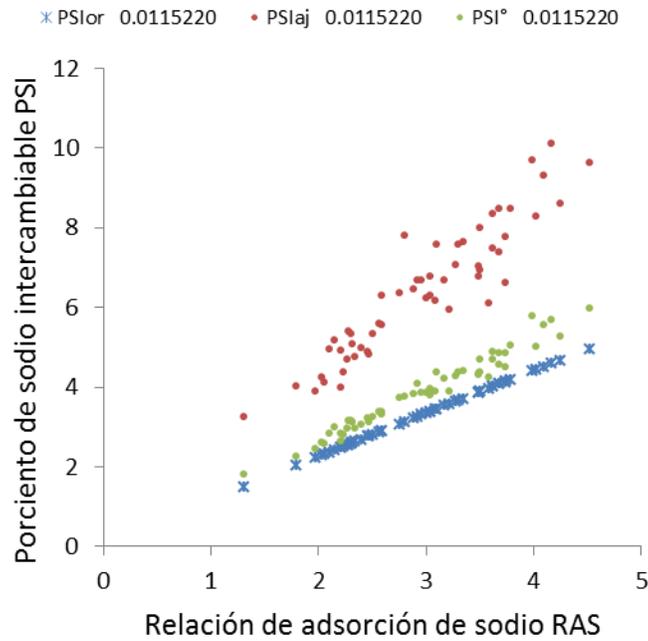
Anexo 11. Clasificación de las aguas freáticas por riesgo de reducción de la infiltración, Módulo de Riego Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.



Anexo 12. Relación funcional $PSI - RAS(RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS^{\circ})$ para diferentes coeficientes de selectividad iónica, MR Temascalcingo, Estado de México, primavera 2009 y verano 2010.

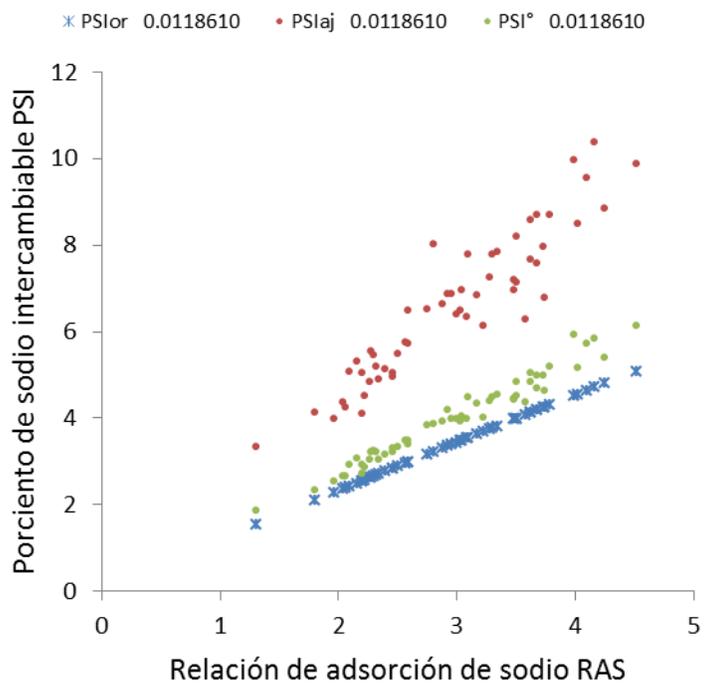


$$kg' = K_2 = 0.01$$

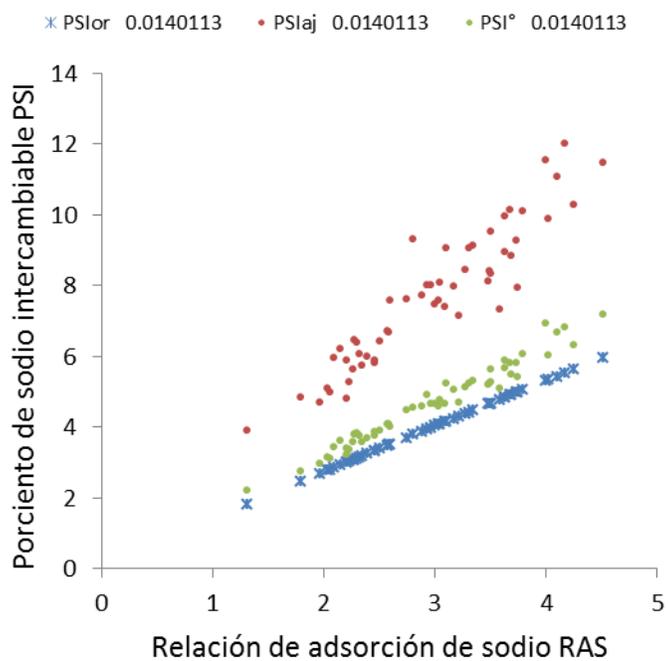


$$kg' = K_3 = 0.0115220$$

Continuación... Anexo 12

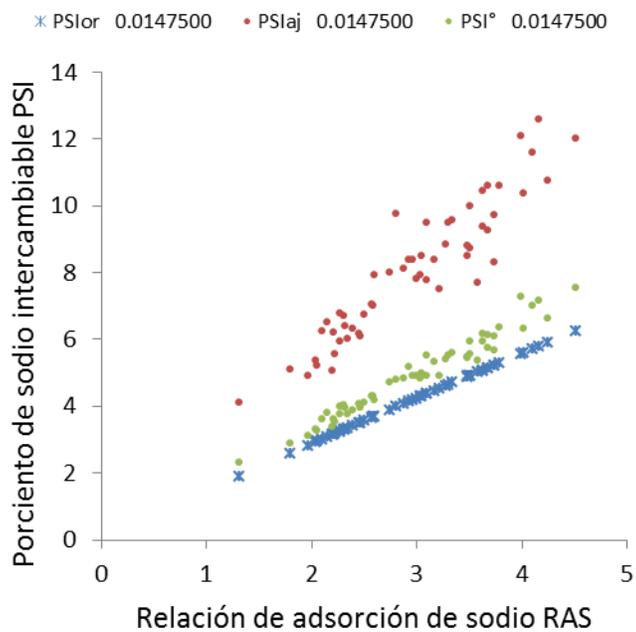


$$kg' = K_4 = 0.0186610$$

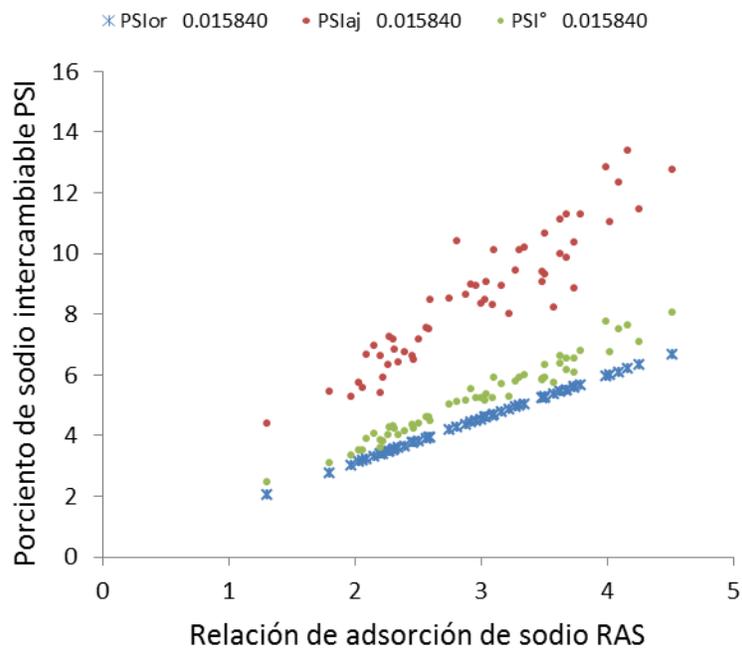


$$kg' = K_5 = 0.0140113$$

Continuación... Anexo 12



$$kg' = K_6 = 0.0147500$$



$$kg' = K_7 = 0.015840$$