COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

ÍNDICES DE SALINIDAD Y DE SODICIDAD EN LAS AGUAS RESIDUALES DEL ALTO Y BAJO PÁNUCO

JUAN URIEL AVELAR ROBLERO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2021

La presente tesis titulada: **Índices de salinidad y de sodicidad en las aguas residuales del alto y bajo Pánuco**, realizada por el alumno: **Juan Uriel Avelar Roblero** 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. HÉCTOR MANUEL ORTEGA ESCOBAR

ASESOR: _____

DR. OSCAR RAÚL MANCILLA VILLA

ASESOR: _____

DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA

ASESOR: _____

DR. ABDUL KHALIL GARDEZI

ASESORA: _____

DRA. ISABEL MENDOZA SALDIVAR

Montecillo, Texcoco, México, agosto de 2021

ÍNDICES DE SALINIDAD Y DE SODICIDAD EN LAS AGUAS RESIDUALES DEL ALTO Y BAJO PÁNUCO

Juan Uriel Avelar Roblero, D. C.

Colegio de Postgraduados, 2021

RESUMEN

La región hidrológica 26 Pánuco nace en el Valle de México y desemboca en el Golfo de México. En su territorio existen zonas agrícolas importantes como los distritos de riego 003 Tula, 100 Alfajayucan y 092 Pánuco. Los distritos 003 y 100 forman parte del área conocida como Valle del Mezquital, donde se riegan unas 90,000 ha con aguas residuales provenientes de la Zona Metropolitana del Valle de México desde hace más de 120 años. Aunque el uso de las aguas residuales para el riego incrementa el volumen disponible de agua y aumenta la fertilidad de las tierras, se producen daños en las propiedades del suelo, por la salinización y sodificación, que se convierten en un problema para la producción agrícola. En el presente trabajo de investigación se realizó una evaluación de la calidad del agua, mediante criterios agronómicos, de la red hidrográfica de la cuenca o región hidrológica 26 Pánuco. Con este fin, se realizaron dos expediciones científicas y se tomaron muestras de agua, de 84 y 98 sitios, respectivamente, en las zonas alta y baja de la cuenca. A estas muestras se les midieron las variables temperatura (°t), pH, conductividad eléctrica (CE), y se determinaron los iones: Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, CO_3^{2-}, HCO_3^{-}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, $P\text{-}PO_4^{3-}$, $N\text{-}NO_3^{-}$, B^{3+} y SiO_2. Para el análisis de los datos, se utilizaron índices de salinidad y de sodicidad como la relación de adsorción de sodio (RAS), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación catiónica de la estabilidad estructural del suelo (CROSS). Los resultados indican que las aguas de la parte alta del Pánuco no son recomendables para el riego por un elevado riesgo de salinización y sodificación del suelo. En la parte baja del Pánuco en general el agua es aceptable para el riego. Aunque se pueden establecer diferencias entre las dos regiones, cada sitio de muestreo tiene sus particularidades en el grado de restricción para el riego.

Palabras clave: calidad del agua, riego, sales, hidroquímica, toxicidad

SALINITY AND SODICITY INDEXES IN THE UPPER AND LOWER PÁNUCO WASTEWATER

Juan Uriel Avelar Roblero, D. C.

Colegio de Postgraduados, 2021

ABSTRACT

The 26 Pánuco hydrological region originates in the Valley of Mexico and flows into the Gulf of Mexico. There are important agricultural areas such as irrigation districts 003 Tula, 100 Alfajayucan and 092 Pánuco. Districts 003 and 100 are part of the area known as Valle del Mezquital, where some 90,000 ha have been irrigated with wastewater from the Metropolitan Zone of the Valley of Mexico for more than 120 years. Although the use of wastewater for irrigation increases the available volume of water and increases the fertility of the land, damage to soil properties is caused by salinization and sodification, which become a problem for agricultural production. In this research, an evaluation of water quality was made, using agronomic criteria, in the watershed 26 Pánuco. For this purpose, two scientific expeditions were carried out and water samples were taken from 84 and 98 sites, respectively, in the upper and lower watershed. These samples were measured to determine temperatura (°t), pH, electrical conductivity (EC), and the following ions: Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, CO_3^{2-}, HCO_3^{-}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, $P\text{-}PO_4^{3-}$, $N\text{-}NO_3^{-}$, B^{3+} y SiO_2. For data analysis, salinity and sodicity indices such as sodium adsorption ratio (SAR), percent exchangeable sodium (ESP) and cation ratio of soil structural stability (CROSS) were used. The results indicate that the waters of the upper part of the Pánuco are not recommended for irrigation due to a high risk of salinization and soil sodification. In the lower part of the Panuco, the water is generally acceptable for irrigation. Although differences can be established between the two regions, each sampling site has its particularities in the degree of restriction for irrigation.

Keywords: water quality, irrigation, salts, hydrochemistry, toxicity.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por financiar el Programa de Becas de Estudios de Posgrado que me permitió llevar a cabo la presente investigación.

Al **Colegio de Postgraduados** como institución y a todo el personal académico, administrativo y operativo que contribuyeron de diferentes maneras en mi formación académica.

Al **Postgrado de Hidrociencias** que, mediante el trabajo de sus profesores, personal administrativo y operativo contribuyen de diferentes maneras en la formación académica de sus estudiantes.

Al **Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar** por dirigir esta investigación con dedicación y compromiso. Por compartir su visión y pasión por la ciencia y por la vida.

A los asesores: **Dr. Carlos Ramírez Ayala**, **Dr. Oscar Raúl Mancilla Villa**, **Dr. Abdul Khalil Gardezi** y **Dra. Isabel Mendoza Saldivar**, quienes cumplieron con su papel oportunamente, contribuyendo a que este trabajo de investigación se terminara con éxito.

A **Elvia Amalia Sosa Galán** y a **Dulce Rubí Sosa González** por la ayuda sin reservas en los trámites administrativos.

A **J. Santos de la Cruz Frutero** y personal del Laboratorio de Ciencias Ambientales por la orientación y apoyo en las determinaciones analíticas.

A los compañeros y amigos del área en el posgrado, **Adriana Camacho**, **Betsy Pallares** y **Edrodes Vicente,** con quienes coincidimos en el tiempo, y compartimos ideas, opiniones, visiones en el trabajo y en la convivencia.

A la maravillosa mujer que me impulsa con amor
a cumplir los objetivos propuestos, *mi esposa Elvira.*

A *mis hijos Uriel y Santiago,* que me regalan
los mejores momentos de mi vida.

CONTENIDO

RESUMEN ..... **iii**

ABSTRACT ..... **iv**

LISTA DE CUADROS ..... **xi**

LISTA DE FIGURAS ..... **xiv**

1 INTRODUCCIÓN **1**

2 REVISIÓN DE LITERATURA **3**

2.1 El agua en el mundo 3

2.2 El agua en México 3

2.3 Origen de las sales en suelos y aguas 4

2.3.1 Procesos del intemperismo 5

2.3.2 Factores externos que afectan el intemperismo 10

2.3.3 Otras fuentes de sales 10

2.3.4 Acumulación de sales 11

2.4 Sales principales en suelos salinos y sódicos 12

2.4.1 Sales del ácido carbónico 13

2.4.2 Sales del ácido clorhídrico 16

2.4.3 Sales del ácido sulfúrico 17

2.5 Solubilidad de las sales 18

2.6 Índices de calidad del agua para riego 21

2.6.1 Indicadores de salinidad 22

2.6.1.1 Conductividad eléctrica 24

2.6.1.2 Índice de salinidad efectiva (SE) 25

2.6.1.3 Índice de salinidad potencial (SP) 26

2.6.1.4 Presión osmótica 27

2.6.2 Indicadores de sodicidad 29

2.6.2.1 Relación de adsorción de sodio (RAS) 35

2.6.2.2 Relación catiónica de la estabilidad estructural (CROSS) 41

2.6.2.3 Carbonato de sodio residual 43
2.6.3 Fuerza iónica 45
2.6.3.1 Coeficientes de actividad iónica 46
2.6.4 Indicadores de toxicidad 47
2.6.4.1 Cloruro 47
2.6.4.2 Sodio 48
2.6.4.3 Boro 49
2.6.4.4 Fósforo de los fosfatos ($P\text{-}PO_4$) 50
2.6.4.5 Sulfatos 50
2.6.4.6 Nitrógeno de los nitratos ($N\text{-}NO_3$) 51
2.6.4.7 Silicio 51
2.6.5 Otros problemas originados por la calidad del agua 55
2.6.5.1 Exceso de nitrógeno 55
2.6.5.2 pH inadecuado para suelos fértiles 55
2.6.5.3 Acumulaciones en hojas, flores y frutos 56
2.6.5.4 Problemas de magnesio 56
2.7 Sales hipotéticas 56
3 MATERIALES Y MÉTODOS 58
3.1 Descripción de la zona de estudio 58
3.1.1 Fisiografía 59
3.1.2 Geología 61
3.1.3 Suelos 63
3.1.4 Clima 65
3.1.5 Uso del suelo y vegetación 67
3.1.6 Hidrología 69
3.2 Toma de muestras 71
3.3 Análisis en laboratorio 74
3.4 Análisis de los datos 75

3.4.1 Comprobación de la exactitud de los datos 75
3.4.1.1 Equilibrio entre aniones y cationes 75
3.4.1.2 Sólidos totales disueltos (STD) medidos y calculados 76
3.4.1.3 Conductividad eléctrica (CE) medida y calculada 76
3.4.1.4 Conductividad eléctrica (CE) medida y suma de iones 77
3.4.1.5 Sólidos totales disueltos calculados (suma de iones) y CE 77
3.4.2 Asociación estadística de variables 78
3.5 Evaluación física y química de la calidad del agua 79
3.6 Cálculo de las sales hipotéticas 81
3.7 Clasificación hidrogeoquímica de las aguas 82
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 85
4.1 Sitios de muestreo 85
4.2 Composición iónica del agua 93
4.3 Análisis de frecuencias de la CE y los SDT 110
4.4 Indicadores de salinidad del agua 111
4.4.1 Conductividad eléctrica 111
4.4.2 Salinidad efectiva 113
4.4.3 Salinidad potencial 115
4.4.4 Comparación del índice de SE con el índice de SP 115
4.4.5 Presión osmótica 119
4.5 Indicadores de sodicidad 122
4.5.1 Relación de adsorción de sodio y porcentaje de sodio intercambiable 122
4.5.1.1 Clasificación de las aguas utilizando la RAS y la CE 124
4.5.2 Riesgo de disminución de la capacidad de infiltración del suelo 143
4.5.3 Relación catiónica de la estabilidad estructural de los suelos (CROSS) 149
4.5.4 Carbonato de sodio residual (CSR) 161
4.6 Formación hipotética de sales 163
4.7 Clasificación hidrogeoquímica de las aguas del alto y bajo Pánuco 165

4.8 Fuerza iónica de iones y de sales 175
4.9 Toxicidad por iones específicos 182
4.9.1 Cloruro 183
4.9.2 Boro 189
4.9.3 Sodio 198
4.10 Fósforo de los fosfatos, nitrógeno de los nitratos y silicio 204
4.10.1 Fósforo de los fosfatos ($P\text{-}PO_4$) 204
4.10.2 Nitrógeno de los nitratos ($N\text{-}NO_3$) 206
4.10.3 Silicio 208
5 CONCLUSIONES 214
6 RECOMENDACIONES 215
7 LITERATURA CITADA 216

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Máxima solubilidad en agua para algunas sales encontradas en suelos a diferentes temperaturas y en solución saturada. 19

Cuadro 2. Concentración de Ca_{aj} en el agua del suelo que se encuentra cerca de la superficie del suelo, que resultaría de regar con aguas de determinado valor de (HCO_3/Ca) y una conductividad eléctrica determinada. 38

Cuadro 3. Valores de ***ai*** expresados en Å que se utilizan en la ecuación de Debye y Hükel. 47

Cuadro 4. Métodos utilizados en las determinaciones de laboratorio. 74

Cuadro 5. Criterios de aceptación de la diferencia entre aniones y cationes en el agua 76

Cuadro 6. Factores de conductividad eléctrica para los iones habituales en el agua. 77

Cuadro 7. Lineamientos para evaluar la calidad del agua para riego. 80

Cuadro 8. Sitios de muestreo en la primavera de 2018. 85

Cuadro 9. Sitios de muestreo en el verano de 2019. 88

Cuadro 10. Composición iónica de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco, en la primavera de 2018. 93

Cuadro 11. Composición iónica de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco, en el verano de 2019. 100

Cuadro 12. Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales en el muestreo de aguas superficiales del alto y bajo Pánuco. 111

Cuadro 13. Clasificación de las aguas del alto y bajo Pánuco, de acuerdo con el riesgo de salinidad. 112

Cuadro 14. Número de muestras por clase de salinidad efectiva en el alto y bajo Pánuco. 114

Cuadro 15. Número de muestras por clase de salinidad potencial en las aguas del alto y bajo Pánuco. 115

Cuadro 16. Clasificación de las aguas del alto y bajo Pánuco de acuerdo con los índices de salinidad efectiva (SE) y salinidad potencial (SP). Buena (B); Condicionada (C); No recomendable (NR). 116

Cuadro 17. Nomenclatura utilizada para clasificar el riesgo de salinidad y sodicidad. 125

Cuadro 18. Valores de la relación de adsorción de sodio en tres formulaciones, y clasificación de cada muestra de agua con base en la RAS y la CE, del muestreo 1. 135

Cuadro 19. Valores de la relación de adsorción de sodio en tres formulaciones, y clasificación de cada muestra de agua con base en la RAS y la CE, del muestreo 2. 138

Cuadro 20. Número de muestras por clase de agua, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio, utilizando las tres formulaciones de la RAS. Muestreo 1 en primavera de 2018 y muestreo 2 en verano de 2019. 142

Cuadro 21. Obtención de la CROSS optimizada para las muestras obtenidas del alto y bajo Pánuco, en la primavera de 2018. 150

Cuadro 22. Obtención de la CROSS optimizada para las muestras obtenidas del alto y bajo Pánuco, en el verano de 2019. 153

Cuadro 23. Clasificación hidroquímica de las muestras tomadas en la primavera de 2018. 168

Cuadro 24. Clasificación hidroquímica de las muestras tomadas en la primavera de 2018. 170

Cuadro 25. Estadísticos descriptivos de la fuerza iónica calculada a partir de las ecuaciones de diferentes autores. 180

Cuadro 26. Clasificación de las muestras de agua por la concentración de cloruros. 185

Cuadro 27. Clasificación de las aguas con fines de riego, con respecto a la concentración de boro, en el muestreo 1. 192

Cuadro 28. Clasificación de las aguas con fines de riego, con respecto a la concentración de boro, en el muestreo 2. 195

Cuadro 29. Clasificación de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco, con respecto a la concentración y toxicidad del sodio en el agua de riego. 200

Cuadro 30. Concentración de $P\text{-}PO_4$, $N\text{-}NO_3$ y SiO_2 en los sitios muestreados. 210

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Contenido de los elementos más comunes en la corteza terrestre. 12

Figura 2. Solubilidad de sales en el agua en un rango de temperaturas de 0 a 100°C. 21

Figura 3. Efectos de la calidad del agua de riego en el suelo y los cultivos y criterios para la evaluación. 22

Figura 4. Escala de clasificación del riesgo de salinidad por la conductividad eléctrica. 24

Figura 5. Escala de clasificación del agua con base en la salinidad efectiva. 26

Figura 6. Escala de clasificación del agua con base en la salinidad potencial. 26

Figura 7. Diagrama para clasificar las aguas de riego por el riesgo de salinización y sodificación. 41

Figura 8. Clasificación de las aguas de riego de acuerdo con el carbonato de sodio residual. 44

Figura 9. Escala de clasificación del riesgo por cloruros. 48

Figura 10. Localización y altitudes de la región hidrológica (RH) 26 Pánuco. 58

Figura 11. Mapa de la fisiografía de la región hidrológica 26 Pánuco. 60

Figura 12. Mapa de la geología de la región hidrológica 26 Pánuco. 62

Figura 13. Mapa de los tipos de suelos en la región hidrológica 26 Pánuco. 64

Figura 14. Mapa de los tipos de climas en la región hidrológica 26 Pánuco. 66

Figura 15. Mapa del uso del suelo y de la vegetación en la región hidrológica 26 Pánuco. 68

Figura 16. Mapa de la hidrología de la región hidrológica 26 Pánuco. 70

Figura 17. Mapa de los sitios de muestreo en la primavera de 2018. 72

Figura 18. Mapa de los sitios de muestreo en el verano de 2019. 73

Figura 19. Ejemplo de cálculo de las sales hipotéticas en una muestra de agua extraída de la Presa Zimapán, Hidalgo. 82

Figura 20. Pantalla principal del software Qualigraf, para análisis de los parámetros más comunes de calidad del agua. 83

Figura 21. Forma correcta de crear una hoja de cálculo en Excel para su utilización en Qualigraf, cuando se utilizan varias muestras. 84

Figura 22. Altitudes de los sitios de muestreo, a) en la primavera de 2018 y b) en el verano de 2019. 92

Figura 23. Composición iónica de las aguas del alto y bajo Pánuco, primavera de 2018. 108

Figura 24. Composición iónica de las aguas del alto y bajo Pánuco, verano de 2019. 109

Figura 25. Relación entre la conductividad eléctrica y la concentración de sólidos disueltos totales, en la red hidrográfica del alto y bajo Pánuco, a) muestreo 1 y b) muestreo 2. 113

Figura 26. Relación entre la conductividad eléctrica y la presión osmótica teórica, de las muestras tomadas en la red hidrográfica del alto y bajo Pánuco; a) primer muestreo y b) segundo muestreo. 120

Figura 27. Coincidencia entre la presión osmótica teórica y la presión osmótica experimental, de las muestras tomadas en el alto y bajo Pánuco; a) primer muestreo, b) segundo muestreo. 121

Figura 28. Relación entre el PSI y la RAS_{or} de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco, a) primer muestreo y b) segundo muestreo. 123

Figura 29. Relación entre el PSI y la RAS_{aj} de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco, a) primer muestreo y b) segundo muestreo. 123

Figura 30. Relación entre el PSI y la RAS_{corr} de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco, a) primer muestreo y b) segundo muestreo. 124

Figura 31. Clasificación de las aguas muestreadas en primavera de 2018, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{or}). 126

Figura 32. Clasificación de las aguas muestreadas en la primavera de 2018, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{aj}). 127

Figura 33. Clasificación de las aguas muestreadas en primavera de 2018, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{corr}). 128

Figura 34. Clasificación de las aguas muestreadas en primavera de 2018, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{or}, RAS_{aj} y RAS_{corr}). 129

Figura 35. Clasificación de las aguas muestreadas en verano de 2019, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{or}). 130

Figura 36. Clasificación de las aguas muestreadas en verano de 2019, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{aj}). 131

Figura 37. Clasificación de las aguas muestreadas en verano de 2019, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{corr}). 132

Figura 38. Clasificación de las aguas muestreadas en verano de 2019, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{or}, RAS_{aj} y RAS_{corr}). 133

Figura 39. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio original (RAS_{or}) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en la primavera de 2018..... 144

Figura 40. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio ajustada (RAS_{aj}) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en la primavera de 2018..... 145

Figura 41. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio corregida (RAS_{corr}) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en primavera de 2018. 146

Figura 42. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio original (RAS_{or}) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en el verano de 2019. 147

Figura 43. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio ajustada (RAS_{aj}) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en el verano de 2019. 148

Figura 44. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio corregida (RAS_{corr}) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en el verano de 2019. 149

Figura 45. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación catiónica de la estabilidad estructural ($CROSS_{opt}$) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en la primavera de 2018. 157

Figura 46. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación catiónica de la estabilidad estructural ($CROSS_{opt}$) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en el verano de 2019. 158

Figura 47. Clasificación de las aguas muestreadas en la primavera de 2018 con base en la conductividad eléctrica y la relación catiónica de la estabilidad estructural ($CROSS_{opt}$). 159

Figura 48. Clasificación de las aguas muestreadas en el verano de 2019 con base en la conductividad eléctrica y la relación catiónica de la estabilidad estructural ($CROSS_{opt}$). 160

Figura 49. Clasificación de las aguas muestreadas de acuerdo con el índice de carbonato de sodio residual, muestreo en la primavera de 2018..... 162

Figura 50. Clasificación de las aguas muestreadas de acuerdo con el índice de carbonato de sodio residual, muestreo en el verano de 2019. 163

Figura 51. Concentración de las sales hipotéticas de las aguas muestreadas en la primavera de 2018..... 165

Figura 52. Concentración de las sales hipotéticas de las aguas muestreadas en el verano de 2019. 165

Figura 53. Diagrama hidroquímico de Piper de las aguas muestreadas en la primavera de 2018. 166

Figura 54. Diagrama hidroquímico de Piper de las aguas muestreadas en el verano de 2019. 167

Figura 55. Diagrama hidroquímico de Durov de las aguas muestreadas en la primavera de 2019. 174

Figura 56. Diagrama hidroquímico de Durov de las aguas muestreadas en el verano de 2019. 175

Figura 57. Relación entre la fuerza iónica experimental y la conductividad eléctrica en el muestreo realizado en la primavera de 2018. 176

Figura 58. Relación entre la fuerza iónica experimental y la conductividad eléctrica en el muestreo realizado en el verano de 2019. 177

Figura 59. Relación entre la fuerza iónica (de acuerdo con Bower et al., 1965) y la conductividad eléctrica en el muestreo realizado en la primavera de 2018. 178

Figura 60. Relación entre la fuerza iónica (de acuerdo con Bower et al., 1965) y la conductividad eléctrica en el muestreo realizado en el verano de 2019. 178

Figura 61. Comparación del promedio de las fuerzas iónicas obtenidas con ecuaciones de diferentes autores. 181

Figura 62. Relación entre la conductividad eléctrica y la fuerza iónica calculada con ecuaciones obtenidas por diferentes autores..... 182

Figura 63. Concentración de cloruro en las aguas del muestreo 1. 184

Figura 64. Concentración de cloruro en las aguas del muestreo 2. 185

Figura 65. Concentración de boro en las aguas del muestreo 1. 191
Figura 66. Concentración de boro en las aguas del muestreo 2. 191
Figura 67. Concentración de sodio en las aguas del muestreo 1. 199
Figura 68. Concentración de sodio en las aguas del muestreo 2. 200
Figura 69. Concentración de fósforo de los fosfatos ($P\text{-}PO_4$) en las aguas del muestreo 1. 205
Figura 70. Concentración de fósforo de los fosfatos ($P\text{-}PO_4$) en las aguas del muestreo 2. 205
Figura 71. Concentración de nitrógeno de los nitratos ($N\text{-}NO_3$) en las aguas del primer muestreo 207
Figura 72. Concentración de nitrógeno de los nitratos ($N\text{-}NO_3$) en las aguas del segundo muestreo 208
Figura 73. Concentración de silicio en el primer muestreo. 209
Figura 74. Concentración de silicio en el segundo muestreo. 210

1 INTRODUCCIÓN

La región hidrológica 26 Pánuco es una de las 37 grandes cuencas en las que se divide hidrológicamente la República Mexicana. La corriente superficial principal de la cuenca adquiere diferentes nombres desde su nacimiento en el Valle de México hasta su desembocadura en el Golfo de México (río Salado, río Tula, río Moctezuma y río Pánuco en la parte baja).

Una de las particularidades de la cuenca del río Pánuco es la presencia de la zona denominada Valle del Mezquital en su territorio. El Valle del Mezquital es una región agrícola altamente productiva del estado de Hidalgo, cuyas fuentes principales del agua para riego son las aguas residuales provenientes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Esta región semiárida con baja precipitación y suelos con poca aptitud agrícola se ha convertido en una de las mayores zonas agrícolas del país, como consecuencia del aporte de aguas residuales hace poco más de 120 años.

El Valle del Mezquital no es el único lugar donde se riega con aguas residuales. En todo el mundo se riegan con aguas residuales, sin tratar o parcialmente tratadas, aproximadamente 20 millones de hectáreas en 50 países, lo que representa una décima parte del total de las tierras con riego agrícola permanente. China ocupa el primer lugar en utilizar aguas residuales no tratadas para el riego y México el segundo.

Los beneficios económicos en contraste con los daños ocasionados al medio ambiente y a la salud humana han sido motivo de controversia durante muchos años. Algunos beneficios importantes del uso de aguas residuales en el riego son: el incremento en la productividad de las tierras, el reciclaje de nutrientes, la inmovilización de contaminantes y la reutilización del agua que contribuye a compensar la escasez. En contraste con los beneficios, se han realizado estudios que demuestran los daños ocasionados a la salud humana y al medio ambiente.

En el suelo, los daños que se ocasionan son principalmente tres: acumulación de sales solubles, sodificación y efectos de iones tóxicos como metales pesados. La acumulación de sales solubles reduce la fertilidad de los suelos por su interferencia negativa en el crecimiento de la mayoría de los cultivos. La sodificación del suelo afecta negativamente

a la producción vegetal por la toxicidad y por la modificación de la estructura del suelo, reduciendo drásticamente las tasas de infiltración del agua en el suelo. Para controlar los procesos de salinización y sodificación es necesario aplicar costosos tratamientos como el lavado de suelos y aplicación de mejoradores.

Si se utilizan agua de mala calidad en el riego es necesario elegir cultivos tolerantes a la salinidad, adoptar tecnologías modernas como el riego por goteo y mantener las propiedades físicas del suelo para asegurar la permeabilidad adecuada (Oster, 1994).

Cuando se realiza la caracterización fisicoquímica de las aguas, es fundamental determinar la concentración de los iones que contribuyen a salinizar y sodificar los suelos, así como la concentración de metales pesados. El análisis de la composición de estos iones permite evaluar el riesgo que representa no solamente para la salud humana, sino también para la sanidad del suelo que afecta directamente a todos los seres vivos.

La presente investigación descriptiva y analítica, consistió en determinar y analizar las variaciones de las concentraciones electrolíticas de las aguas superficiales, con influencia de las aguas residuales, a lo largo del gran canal de desagüe del Valle de México, río Salado, río Tula, río Moctezuma y río Pánuco, con el objetivo de evaluar el riesgo de salinidad y sodicidad que conduce a la reducción de la productividad y a la degradación paulatina del suelo. La evaluación realizada partió de dos expediciones por el territorio que permitieron la observación y la toma de muestras de agua en 84 y 98 sitios, respectivamente. El trabajo posterior fue realizar las determinaciones fisicoquímicas en laboratorio que se especifican en la metodología y el análisis de los resultados con base en las observaciones. Esto permitió aplicar los índices de salinidad y sodicidad con el fin de evaluar la calidad del agua y advertir sobre los riesgos de su uso en el riego agrícola.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El agua en el mundo

Se estima que el volumen de agua en el planeta Tierra es de 1,386 millones de kilómetros cúbicos. El 97.5% de ese volumen es salada, está en los mares y en los océanos; del 2.5% restante que es agua dulce, solamente el 0.77% se encuentra accesible para uso humano (Clarke y King, 2004; CONAGUA, 2018). El resto es inaccesible porque forma parte de los glaciares, nieve, hielo, humedad atmosférica, humedad del suelo, o se encuentra atrapada en las rocas de la corteza terrestre.

Dentro del ciclo hidrológico, la precipitación pluvial es un elemento fundamental, debido a que produce el agua renovable del planeta y esta varía dependiendo de la región. Esto provoca grandes diferencias en la distribución del agua en el mundo. Mientras que en Canadá se tiene una disponibilidad de 80,746 m^3 de agua renovable por persona al año, en Sudáfrica el valor es de 942 m^3; México ocupa el lugar 94 con 3,656 m^3 por habitante por año (CONAGUA, 2018). El crecimiento económico y demográfico no está correlacionado con la disponibilidad del agua, lo que obliga a obtenerla de lugares cada vez más lejanos o de los mantos acuíferos a mayores profundidades. Esta situación ha provocado además la reutilización de aguas residuales en el riego agrícola, que resuelve muchos problemas, pero genera otros.

2.2 El agua en México

Como consecuencia de sus procesos orogénicos durante una cierta longitud de tiempo geológico, en México existe una gran variedad de climas. Estos factores naturales tienen influencia en la intensidad y distribución de la precipitación. La precipitación promedio a nivel nacional es de 740 mm anuales, pero este dato aporta una limitada información sobre la disponibilidad de agua debido a las diferencias tan marcadas en el territorio mexicano: mientras que en algunas regiones del sur del país se han registrado más de 4,000 mm anuales, en la región del noroeste la precipitación media anual es inferior a 300 mm. Adicionalmente, el 77% de la población se concentra en donde se encuentra sólo el 33% del agua renovable (Arreguín-Cortés *et al*., 2020). En México, el agua

renovable anual es de 447.26 km^3 (Montesillo, 2017). El agua renovable, definida como “la cantidad máxima de agua que es factible explotar anualmente en un país sin alterar el ecosistema y que se renueva por medio de la lluvia”, se desprende del ciclo hidrológico y llega a formar parte de las aguas superficiales y de las aguas subterráneas.

Las aguas superficiales están delimitadas en cuencas hidrográficas. De acuerdo con la CONAGUA (2018), el territorio mexicano está clasificado en 757 cuencas reagrupadas por la Comisión Nacional del Agua en 37 regiones hidrológicas, que para efectos de administración se agrupan en 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA). La región hidrológica 26 Pánuco abarca dos regiones hidrológica-administrativas: RHA IX Golfo Norte y RHA XIII Aguas del Valle de México.

Las aguas subterráneas desempeñan un papel determinante en el desarrollo económico y en la satisfacción de las necesidades hídricas de la población. De acuerdo con el Diario Oficial de la Federación (DOF) del 4 de enero de 2018, el país está dividido en 653 acuíferos. El 39% del total del agua concesionada (alrededor de 34,000 millones de metros cúbicos) procede de los acuíferos (DOF, 2018). Del número total de acuíferos, el 31 de diciembre de 2017 se reportaron 105 sobreexplotados, 18 con intrusión marina y 32 tenían problemas de salinización (Hoogesteger, 2018).

Según la CONAGUA (2018), 61% del agua utilizada en México proviene de fuentes superficiales y 39% de fuentes subterráneas. El mayor volumen concesionado para usos consuntivos es con el fin de satisfacer las distintas actividades agrícolas (76%); en segundo lugar, para abastecimiento público (14.4%); en tercer lugar, para la industria autoabastecida (4.9%) y, en cuarto lugar, para la energía eléctrica, excluyendo la hidroelectricidad (4.7%).

2.3 Origen de las sales en suelos y aguas

El término sales solubles se refiere a los solutos inorgánicos disueltos en la solución del suelo. La salinidad del suelo se describe y caracteriza en términos de la concentración o el contenido de sales solubles. El origen de las sales solubles en el suelo y en el agua es principalmente el intemperismo geoquímico permanente de las rocas, de los

espesores superficiales de la corteza terrestre. Por lo tanto, el tipo y cantidad de sales en el agua depende de los materiales geológicos con los que ha estado en contacto.

2.3.1 Procesos del intemperismo

El intemperismo es un proceso complejo que comprende la desagregación física y descomposición química de las rocas que transforman minerales de estructura compleja en otras más simples (Custodio y Llamas, 1983). La descomposición biológica puede formar parte de ambos procesos. El intemperismo no debe confundirse con erosión, ya que el primer proceso ocurre con poco o nulo movimiento de partículas, mientras que la erosión implica el transporte y deposición en otros sitios.

Para explicar el origen de las sales en los suelos, es importante tomar en cuenta que, para la formación de un suelo salino, normalmente el agua juega un papel relevante como medio de transporte de las sales desde otros sitios; el agua superficial y subterránea es la fuente directa de sales más común en los suelos, debido a los materiales geológicos con que ha estado en contacto. También existen suelos salinos que se originaron por depósitos marinos que se asentaron durante periodos geológicos antiguos, y que han emergido desde entonces. El océano también puede ser fuente de sales en los suelos bajos que se encuentran a lo largo de las costas.

En el intemperismo químico se produce la desintegración de los minerales primarios y 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 el tiempo geológico, es la fuente de sales más importante en el suelo y en aguas naturales; también representa un eslabón entre el intercambio geoquímico de materia entre continentes y océanos (Bresler *et al*., 1982; James *et al.*, 1982; Fassbender y Bornemisza, 1987; Jurinak y Suarez, 1990).

La mayoría de rocas que conforman la corteza terrestre se han formado bajo condiciones de altas temperaturas y presiones, por lo que son termodinámicamente inestables cuando se exponen a condiciones atmosféricas. Por lo tanto, el intemperismo es un proceso espontáneo que transforma a los minerales primarios en otros minerales

que son más estables en la superficie de la corteza terrestre. Los factores involucrados en el intemperismo geoquímico son: el agua atmosférica, el oxígeno, el bióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4); y el ácido sulfhídrico (H_2S). 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.

El intemperismo geoquímico de los minerales formadores de rocas se lleva a cabo mediante tres tipos de reacciones: disolución congruente, disolución incongruente y reacciones de óxido-reducción (Suarez y Jurinak, 2011). Algunas de estas son reversibles y otras son irreversibles.

Disolución congruente: En esta reacción, los productos de la solución existen en la misma proporción en que se encuentran en el mineral. Los minerales primarios se transforman en especies solubles.

Ejemplos de procesos de intemperización congruente:

$CaCO_3$ (calcita) + H_2O + CO_2 ⇆ Ca^{2+} + $2HCO_3^-$

SiO_2 (cuarzo) + $2H_2O$ ⇆ H_4SiO_4 (ácido ortosilícico)

La mayoría, pero no todos, los minerales que liberan sal en los suelos se disuelven congruentemente. Estos incluyen cloruro, sulfato y la mayoría de las sales de carbonato.

Disolución incongruente: En esta reacción, parte del mineral se disuelve y deja una fase sólida secundaria (minerales de arcilla de silicato de aluminio secundario) que difiere en composición del mineral original.

Ejemplos de procesos de intemperización incongruente:

$2NaAlSi_3O_8$ (albita) + $3H_2O$ → $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ (kaolinita) + $4SiO_2$ (cuarzo) + $2Na^+$ + OH^-

$3KAlSi_3O_8$ (ortoclase) + $2CO_2$ + $14H_2O$ → $2K^+$ + $2HCO_3^-$ + $6H_4SiO_4$ + $KAlSi_3O_{10}(OH)_2$ (mica) + $4H_2O$

Los minerales de silicato, incluidos los que se encuentran en los suelos, controlan la química de la superficie terrestre en condiciones naturales a lo largo del tiempo geológico. Sin embargo, las reacciones de disolución de silicato son en su mayoría tan lentas en condiciones naturales (Suarez y Wood, 1996) que pueden descuidarse en

términos de escalas de tiempo antropogénicas para la carga de sal y la predicción de la composición de la solución del suelo en tierras áridas y semiáridas.

Reacciones de óxido-reducción (redox): Los cambios en los estados de oxidación de los minerales modifican el proceso de intemperización. Las reacciones redox entre iones disueltos en solución y minerales en contacto con esa solución a menudo influyen en el pH de la solución y, posteriormente, en su composición.

La oxidación de materiales de S reducidos (incluido el S elemental) se ha utilizado en la recuperación de suelos sódicos calcáreos. En este caso, las reacciones: $2S + 3O_2 \leftrightarrows 2SO_3$ y $SO_3 + H_2O \leftrightarrows 2H^+ + SO_4^{2-}$ ocurren lentamente, liberando H^+ que a su vez reacciona con la calcita en el suelo: $CaCO_3 + 2H^+ \leftrightarrows Ca^{2+} + CO_2 + H_2O$, lo que resulta en la liberación neta de Ca^{2+} y SO_4^{2-}.

Independientemente del **tipo de reacción**, se presentan a continuación varios ejemplos de **reacciones químicas del intemperismo** en las que algunos minerales se transforman en especies solubles:

Intemperismo de silicatos de calcio y de magnesio:

$(CaMg)(SiO_3)_2 + 4H_2O + 2CO_2 \rightarrow CaCO_3 + MgCO_3 + 2SiO_2 4H_2O$

Intemperismo de aluminosilicatos que contienen calcio:

$CaAl_2Si_6O_{16} + 3H_2O + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2Al_2Si_2O_8 + 4SiO_2 2H_2O$

Intemperismo de silicatos magnésicos:

$MgSiO_3 + nH_2O + CO_2 \rightarrow MgCO_3 + SiO_2 nH_2O$

Intemperismo de aluminosilicatos que contienen sodio:

$Na_2Al_2Si_6O_{16} + 3H_2O + CO_2 \rightarrow Na_2CO_3 + H_2Al_2Si_2O_8 + 4SiO_2 2H_2O$

Intemperismo de aluminosilicatos que contienen potasio:

$K_2Al_2Si_6O_{16} + 3H_2O + CO_2 \rightarrow K_2CO_3 + H_2Al_2Si_2O_8 + 4SiO_2 2H_2O$

Intemperismo de aluminosilicatos que contienen potasio:

$K_2Al_2Si_6O_{16} + 3H_2O + CO_2 \rightarrow K_2CO_3 + H_2Al_2Si_2O_8 + 4SiO_2 2H_2O$

Reducción de NO_3^-, SO_4^{2-} y óxidos de fierro por la actividad biológica de microorganismos, con participación de la materia orgánica (MO). Aquí el CH_2O representa a la MO.

$5CH_2O + 4NO_3^- \rightarrow 4HCO_3^- + CO_2 + 2N_2 + 3H_2O$

$2CH_2O + SO_4^{2-} \rightarrow 2HCO_3^- + H_2S$

$CH_2O + 2Fe_2O_3 + 7CO_2 + 3H_2O \rightarrow 4Fe^{3+} + 8HCO_3^-$

$S^{2-} + 2Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+} + S$

$Fe^{2+} + S^{2-} \rightarrow FeS$

Los principales procesos de intemperización química son: hidrólisis, disolución, hidratación, oxidación, reducción y carbonatación. El agua desempeña un papel principal en cada uno de ellos (Kovács y Czigány, 2017).

Hidrólisis (división de las moléculas de agua) es el proceso por el que el agua, que contiene iones H^+ y OH^-, provoca la ruptura de la estructura interna de los minerales primarios como los silicatos, liberando al menos dos compuestos, uno de carácter ácido y otro básico. Son los iones de hidrógeno los que atacan y sustituyen a otros iones positivos encontrados en el retículo cristalino. Con la introducción de los iones hidrógeno en la estructura cristalina, se destruye la disposición ordenada original de los átomos y se descompone el mineral. En la hidrólisis, los iones de hidrógeno (H^+) en las moléculas de agua reemplazan a otros iones en los minerales. Debido a este reemplazo, el mineral se vuelve susceptible a la descomposición por hidrólisis adicional u otras reacciones químicas. Es el proceso más frecuente en la descomposición de los minerales del grupo de los silicatos (por ejemplo, feldespatos, micas y piroxenos).

Ejemplo: $2KAlSi_3O_8 + 2H_2O \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + K_2O + 4SiO_2$

Disolución es una mezcla homogénea de especies químicas diversas a escala molecular, es decir, una fase simple. La acción disolvente del agua y de los iones que arrastra se producen cuando circula alrededor y/o a través de las rocas y demás minerales. Es la disolución de sales simples como carbonatos y cloruros, que se encuentran presentes como granos minerales en materiales del suelo. El agua actúa como medio de reacción y no como reactivo.

Ejemplo: $NaCl + H_2O \rightarrow Cl^- + Na^+ [+H^2O]$

Hidratación se refiere a la asociación de moléculas de agua con minerales. Durante el proceso de hidratación, las moléculas de agua forman una capa de hidratación alrededor de los iones de sales disociadas. La hidratación afecta principalmente las superficies minerales y los bordes (rotos) de los minerales, pero en algunos casos puede disolver todo el mineral (disolución congruente).

Ejemplo: $CaSO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Oxidación implica el cambio del estado de valencia de los metales que contiene en presencia de oxígeno libre. En la oxidación, un elemento sufre pérdida de electrones al formar un compuesto. La oxidación es el proceso de adición de oxígeno a los minerales. La absorción es generalmente de O_2 disuelto en el agua subterránea y presente en la atmósfera. Se produce en rocas bien aireadas, en materiales de suelos con el contenido de oxígeno alto y demandas biológicas bajas de ese elemento. El caso más conocido es el paso del Fe^{2+} a Fe^{3+}, que afecta a minerales como pirita, olivino, piroxeno, biotita, este proceso rompe la estructura de los minerales. El hierro liberado de los minerales primarios, se une con el hidroxilo (OH^-) u oxígeno para formar óxidos o hidróxidos. La oxidación en minerales ocurre cuando el oxígeno reacciona con minerales que contienen hierro para formar minerales de óxido de hierro (oxidación de hierro), por ejemplo, goethita.

Ejemplo: $4FeO + O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3$

La **reducción** se produce en ambientes saturados de agua donde la existencia de oxígeno es baja y la demanda biológica de este elemento es elevada. El entorno en el que se forman los suelos también puede estar reduciéndose, generalmente cuando existen condiciones de anegamiento. La reducción es importante para la meteorización en tales suelos, porque muchos cationes son más solubles cuando se reducen que cuando se oxidan (Singer y Munns, 2002).

Ejemplo: $MnO_4^- + 8H^+ + 5\ e^- \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$

La **carbonatación** es un proceso muy activo del intemperismo químico en el que interviene el ácido carbónico (H_2CO_3), y afecta principalmente a los tipos de roca de

carbonato como la piedra caliza y la dolomita. El ácido carbónico se produce naturalmente por disolución de CO_2 en agua. El dióxido de carbono está disponible en la atmósfera y existe en niveles altos en el regolito, porque se agrega como producto de la respiración microbiana y de la raíz. Por lo tanto, la mayoría de los procesos de carbonatación son de naturaleza bioquímica.

2.3.2 Factores externos que afectan el intemperismo

El clima afecta fuertemente la intensidad y extensión de las reacciones de intemperismo o meteorización. El agua funciona como un reactivo en la transformación de minerales y funciona como el medio que transporta la materia disuelta y suspendida del sistema. Por lo tanto, la lluvia mueve las sales solubles a través del suelo al agua subterránea, a los ríos y por último a los océanos. Debido a ello, los suelos afectados por sales de manera natural, se presentan generalmente en climas áridos y semiáridos, con escasa precipitación y alta evaporación.

2.3.3 Otras fuentes de sales

A través del tiempo geológico han emergido grandes superficies que anteriormente eran mares salinos y que ahora son una fuente importante de sales para aguas superficiales y subterráneas. Los depósitos secundarios (rocas sedimentarias) que se forman a partir de esas rocas y la erosión de las rocas continentales durante la inundación son las principales fuentes de salinidad y sodicidad.

La atmósfera puede aportar una alta cantidad de sales en tierras áridas, sobre todo en paisajes altamente meteorizados y cercanos al mar. Debido a su solubilidad, los tipos de sales depositadas por la atmósfera varían con la distancia a la fuente. En las costas predominan las sales NaCl y a medida que la masa de aire se adentra hacia los continentes, la atmósfera se vuelve proporcionalmente mayor en iones Ca^{2+} y SO_4^{2-} (Bresler *et al*., 1982).

Algunas actividades de origen humano propician la salinización de suelos, como las siguientes: las lluvias ácidas originadas por la industrialización; las actividades mineras

que traen a la superficie materiales salinos y sódicos; la agricultura, principalmente por la cantidad de sales que el agua de riego aporta a los perfiles del suelo.

2.3.4 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, 1980; Velázquez-Machuca, 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, que son 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: salinización de suelos bajo riego por ascenso de las aguas freáticas; salinización por sobrepastoreo en zonas donde la cubierta natural del suelo es pobre; riego con aguas de elevada concentración salina sin considerar acciones que permitan evitar su acumulación en el suelo.

2.4 Sales principales en suelos salinos y sódicos

Los elementos principales, cuyas combinaciones dan lugar a la formación de suelos salinos, son Ca, Mg, Na, K, Cl, S, C, N, I y B. Además de estos, Cu, Zn y B a menudo se acumulan, en micro-cantidades, en suelos salinos (Kovda, 1973). Los elementos a partir de los cuales se pueden formar sales solubles son algunos de los más comunes que se encuentran en la corteza terrestre; y están, de hecho, entre los primeros quince elementos predominantes (Figura 1). Estos 15 elementos predominantes constituyen alrededor del 99.61% del peso total de la corteza terrestre, el restante 0.39% lo conforman los demás elementos.

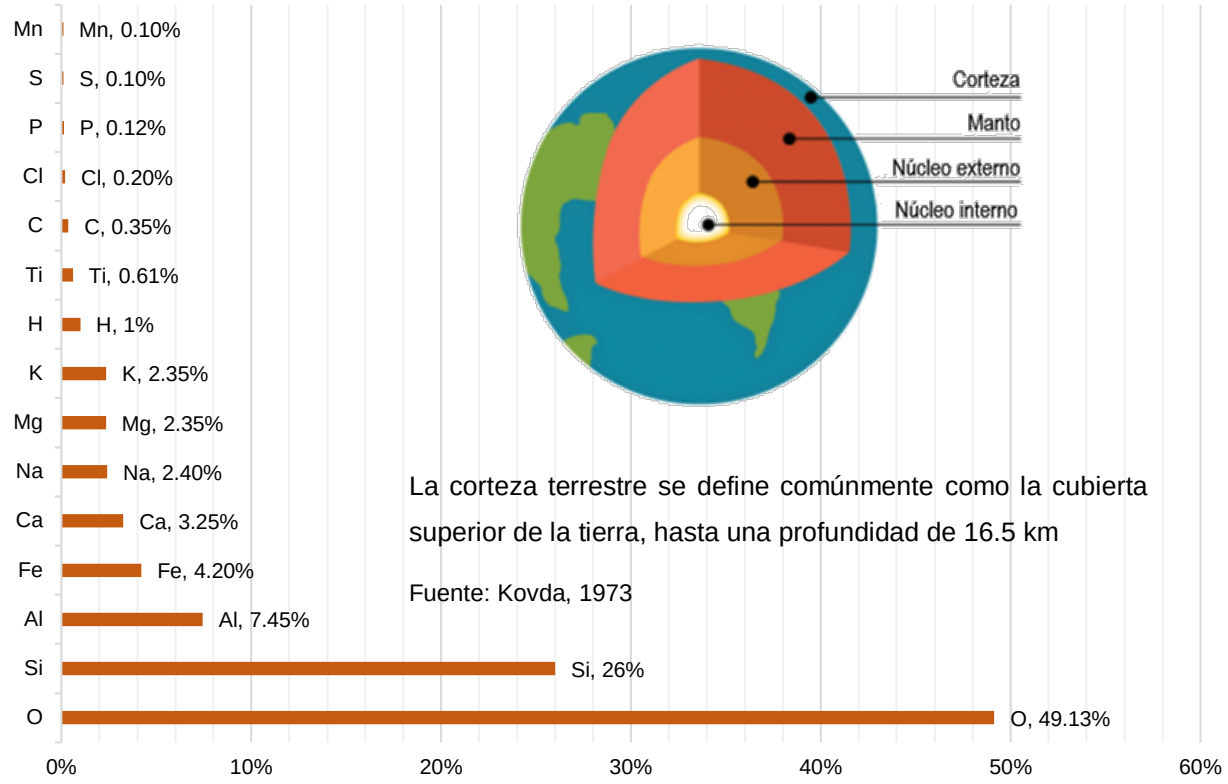


Figura 1. Contenido de los elementos más comunes en la corteza terrestre.

De los elementos mencionados, los que participan en la formación de las sales fácilmente solubles que conducen a la salinidad del suelo son: oxígeno, calcio, sodio, magnesio, potasio, hidrógeno, carbono, cloro, y azufre. Estos elementos, con pocas excepciones, juegan un papel limitado o incluso extremadamente limitado en los

diversos procesos biológicos y, por lo tanto, no se acumulan en residuos orgánicos (Kovda, 1973).

Casi todos los ácidos conocidos forman sales que se encuentran en cantidades variables en los suelos. 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-Machuca, 1995). La siguiente descripción de sales fue extraída principalmente de *Irrigation, Drainage and Salinity* (Kovda, 1973).

2.4.1 Sales del 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 diferentes niveles de su solubilidad. Las sales más importantes de este grupo son:

Carbonato de sodio (Na_2CO_3): También conocida como “soda”, el carbonato de sodio es la sal del ácido carbónico y el hidróxido de sodio. Cuando se disuelve en agua, sus componentes se separan. El carbonato de sodio tiene una solubilidad de 178 g/L a 20°C. La hidrólisis del Na_2CO_3 provoca alta alcalinidad, hasta un pH de 12, además de la pérdida de la estructura y disminución de la permeabilidad del suelo. Su existencia en suelos, incluso en cantidades de 0.05 a 0.1%, reduce la fertilidad natural, debido a la alcalinidad y a la falta de estructura. Cuando se coloca en una solución ligeramente ácida, se descompone y forma burbujas. Este efecto, llamado efervescencia, se encuentra en muchos productos antiácidos comerciales que usan carbonato de sodio como ingrediente activo. La formación de bicarbonato de sodio se produce durante la reacción del Na_2CO_3 con ácido carbónico libre, de acuerdo con la siguiente reacción:

$$Na_2CO_3 + H_2O + CO_2 \rightarrow 2NaHCO_3$$

La tendencia del Na_2CO_3 a convertirse en bicarbonato de sodio se acentúa con el aumento del contenido de ácido carbónico en el aire y la solución del suelo, es decir, en condiciones de descomposición intensiva de materia orgánica y a baja temperatura. Por

otro lado, con un contenido moderado de ácido carbónico en el aire del suelo, es decir, con una actividad débil de microorganismos y un pequeño contenido de materia orgánica, o cuando la solución del suelo se calienta, el bicarbonato se transforma fácilmente en carbonato normal de acuerdo con la siguiente reacción:

$2NaHCO_3 \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O + CO_2$

La mayoría de las aguas naturales (río, manantial, subterráneo, lacustre) con una concentración de 0.5 a 3.0 g / 1 (sólidos disueltos) contienen cantidades sustanciales de carbonatos y biocarbonatos de sodio. Los depósitos y suelos formados con la participación y bajo la influencia de tales aguas siempre serán alcalinos, altamente coloidales si contienen montmorillonita, pero no muy permeables y compactos.

En presencia de yeso, la soda se convierte en carbonato de calcio de acuerdo con la siguiente ecuación química:

$Na_2CO_3 + CaSO_4 \rightarrow CaCO_3 + Na_2SO_4$

Es por esta reacción que es raro encontrar acumulaciones de soda en los suelos, sobre todo en zonas áridas y semiáridas, por la alta presencia del yeso. Por lo tanto, es solo en los sedimentos que no contienen yeso que la soda libre y el bicarbonato de sodio pueden acumularse en cantidades sustanciales.

Los carbonatos y bicarbonatos, una vez acumulados en los suelos, tienden a conservarse allí y se ven poco afectados por influencias externas, naturales o debidas a las actividades del hombre. Los suelos que contienen cantidades considerables de carbonatos y bicarbonatos de sodio son suelos salinos alcalinos con poca fertilidad natural y su desarrollo requiere medidas radicales de recuperación química junto con drenaje y lixiviación en verano, combinados con riego.

Bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$): El bicarbonato de sodio es la sal monosódica del ácido carbónico con propiedades alcalinizantes y de reemplazo de electrolitos. Tras la disociación, el bicarbonato de sodio forma iones de sodio y bicarbonato. Los suelos salinos de bicarbonato de sodio contienen muchos minerales arcillosos como la montmorillonita, que absorben una gran cantidad de catión de sodio intercambiable en

sus cristales. Las partículas de arcilla con alta difusión y muy baja permeabilidad hidráulica se convierten en un obstáculo principal para la mejora del suelo.

Carbonato de calcio ($CaCO_3$): Es una sal de muy baja solubilidad, con valor de 0.013 g/L. En vista de su baja solubilidad, la presencia de carbonato de calcio en los suelos no es perjudicial para la mayoría de las plantas agrícolas; aunque los cultivos de suelos ácidos subtropicales y tropicales (como cacao, café, plátano, té, cítricos) no prosperan en suelos con un alto contenido de carbonato de calcio, reduciendo así la cantidad y la calidad de las cosechas. La solubilidad del carbonato de calcio aumenta considerablemente con el contenido de CO_2 disuelto en el agua y con la presencia de H_2CO_3, debido a la formación de $Ca(HCO_3)_2$. Los carbonatos de calcio se detectan fácilmente, morfológicamente hablando, debido al color blanquecino de los horizontes de carbonatos, las venas blancas (micelio) y las acumulaciones harinosas y concreciones; También haciendo un análisis cualitativo con ácido clorhídrico, que produce una reacción violenta de escape de CO_2, de acuerdo con la siguiente reacción:

$$CaCO_3 + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + CO_2 + H_2O$$

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, el cual puede causar estrés en las plantas. Por lo tanto, la presencia de carbonato de magnesio libre en los suelos puede considerarse como un factor negativo, lo que provoca una disminución de la fertilidad. Sin embargo, la acumulación de carbonato de magnesio en suelos en forma libre es rara.

Carbonato de potasio (K_2CO_3): También conocida como potasa, esta sal existe en cantidades muy pequeñas en los suelos, incluso en cantidades más pequeñas que el carbonato de sodio. En cuanto a su alta solubilidad, su hidrólisis alcalina, que le da a la solución una alta alcalinidad, su toxicidad para las plantas y su efecto desagregante sobre la estructura del suelo, el carbonato de potasio es prácticamente idéntico al carbonato de sodio.

2.4.2 Sales del ácido clorhídrico

Los cloruros, son los iones más importantes 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:

Cloruro de sodio (NaCl): Junto con el sulfato de sodio y el sulfato de magnesio, el cloruro de sodio es la sal más frecuente en los suelos y aguas freáticas salinas; se caracteriza por su alta solubilidad, la cual alcanza un valor de 264 g/L, la cual no es afectada por la temperatura, por lo tanto, es extremadamente tóxica para las plantas. Incluso con un contenido de aproximadamente 0.1% de NaCl, las plantas sufren y no se desarrollan normalmente. Muchos suelos salinos contienen de 2 a 5% de NaCl y son totalmente estériles.

Cloruro de calcio ($CaCl_2$): Esta sal en pocas ocasiones existe en los suelos y aguas salinas, debido a que reacciona con el sulfato de sodio y carbonato de sodio, precipitándose en la solución en forma de sulfato de calcio y carbonato de calcio. Por lo tanto, esta sal sólo aparecerá en condiciones fuertemente salinas, de 400 a 500 g/L. 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 intercambiable, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$X = Ca^{2+} + 2NaCl \leftrightarrow X\frac{Na^{+}}{Na^{+}} + CaCl_2 \qquad (1)$$

El cloruro de calcio es tóxico para las plantas, pero en menor grado que el cloruro de magnesio o el cloruro de sodio.

Cloruro de magnesio ($MgCl_2$): Es una sal con solubilidad de 353 g/L 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. Por su alta solubilidad es extremadamente tóxica y perjudicial para las plantas.

De la misma manera que el cloruro de calcio, el cloruro de magnesio es una sal extremadamente higroscópica, que absorbe el agua vaporizada de la atmósfera a bajas

temperaturas del aire. Por esa razón, los suelos Solonchak que contienen cloruro de calcio y cloruro de magnesio en su superficie permanecen húmedos durante mucho tiempo después de la lluvia o el rocío. Los Solonchaks que contienen una gran cantidad de cloruro de magnesio son difíciles de recuperar y necesitan una lixiviación y drenaje intensivos para eliminar esta sal dañina.

2.4.3 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:

Sulfato de magnesio ($MgSO_4$): También llamada “epsomita” en su forma hidratada, es un componente típico de los suelos salinos, aguas freáticas y lagos salinizados; su solubilidad es de 262 g/L, lo cual la hace una de las sales más perjudiciales para las plantas. No se acumula en los suelos en forma pura, sino en combinación con otras sales fácilmente solubles.

Sulfato de sodio (Na_2SO_4): También conocida como “mirabilita” cuando está hidratada, esta sal tiene una toxicidad dos a tres 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.

En las estaciones cálidas del año, el sulfato de sodio se eleva a la superficie del suelo junto con las sales más solubles (sulfato de magnesio, magnesio y cloruros de sodio). En la estación fría, por otro lado, el sulfato de sodio, debido a la disminución de su solubilidad, no se lixivia.

La recuperación de suelos con sulfato de sodio requiere lixiviación por grandes cantidades de agua; cuando sea posible, esta operación debe llevarse a cabo durante la estación cálida del año combinada con riego.

Sulfato de calcio ($CaSO_4$): Esta sal, más comúnmente conocida como “yeso”, es de baja solubilidad, con valor de 1.9 g/L , por lo tanto, no es perjudicial a las plantas. Los suelos y rocas formadoras de semi-desiertos y desiertos contienen con frecuencia grandes cantidades de yeso, acumulado durante la evaporación de las aguas lacustres o aguas subterráneas salinas, que se encuentran cerca de la superficie. A menudo se encuentran, en los desiertos, suelos gypsíferos de origen antiguo que ya no contienen aguas subterráneas. El yeso se usa ampliamente para la recuperación de suelos alcalinos que contienen soda y sodio adsorbido. Se encuentra junto con cloruros y otros sulfatos que se acumulan en suelos salinos. En suelos con un contenido de yeso muy alto, el yeso forma una masa compacta, esponjosa y porosa, que causa la cementación de todo el horizonte. Tales acumulaciones compactas de yesos en los suelos los hacen mecánicamente impenetrables para las raíces, el agua y el aire, lo que dificulta el desarrollo de las plantas.

Sulfato de potasio (K_2SO_4): No se acumula en los suelos en grandes cantidades. Sus propiedades son similares a las del sulfato de sodio, pero su toxicidad es considerablemente menor. La presencia de grandes cantidades de sulfato de potasio se ha comprobado en algunas formaciones salinas, donde se extrae para su uso como fertilizante.

2.5 Solubilidad de las sales

La solubilidad es una medida de la cantidad de soluto que se disolverá en cierto disolvente a una temperatura específica. Para el estudio de los procesos de salinización de las sales, es indispensable tomar en cuenta las diferentes solubilidades de las sales puesto que afecta su movilidad y precipitación, regula su máxima concentración en la solución del suelo. A medida que aumenta la solubilidad de una sal, mayor riesgo representa para el desarrollo de las plantas porque presenta mayor movilidad.

Los cloruros y los nitratos son los más solubles, después los bicarbonatos y los sulfatos. Los menos solubles son los carbonatos. En la mayoría de las sales la solubilidad aumenta con el aumento de la temperatura (Cuadro 1).

La solubilidad de las sales ha sido determinante en los procesos geológicos de redistribución de las sales en la corteza terrestre, donde el balance está a favor del océano que ha incrementado la reserva total de sales. El grado de solubilidad provoca una acumulación diferenciada, dando como resultado que los sulfatos y carbonatos (que tienen baja solubilidad) se acumulen en los continentes, y los cloruros (que tienen alta solubilidad) se muevan hacia los océanos donde se han acumulado en mayor cantidad.

Cuadro 1. Máxima solubilidad en agua para algunas sales encontradas en suelos a diferentes temperaturas y en solución saturada.

Sal	En g por 100 g de solución Temperatura en °C						En g por litro de solución Temperatura en °C					
	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50
Na_2CO_3*	6.5	10.9	17.9	28.4	32.4	32.1	70	122	213	371	441	429
$NaHCO_3$	6.5	7.5	8.7	10.0	11.3	12.7	68	80	93	107	121	137
Na_2SO_4**	4.3	8.3	16.1	29.0	32.6	31.8	45	90	185	373	430	415
NaCl	26.3	26.3	26.4	26.5	26.7	26.9	318	317	317	317	318	319
$MgSO_4$	18.0	22.0	25.2	28.0	30.8	33.4	-	-	-	-	-	-
$MgCl_2$	38.8	39.8	41.0	48.6	51.8	54.5	-	-	-	-	-	-
$CaCl_2$***	37.3	39.4	42.7	50.7	53.4	56.0	-	-	-	-	-	-
$NaNO_3$	42.1	44.4	46.7	49.0	51.2	53.3	570	607	686	686	724	762
KNO_3	11.6	17.5	24.0	31.5	39.0	46.1	125	194	279	384	498	614
K_2CO_3	51.7	52.2	52.6	53.2	53.9	54.7	814	823	829	839	852	867
$KHCO_3$	18.4	21.5	25.2	28.5	32.2	36.0	-	-	-	-	-	-
K_2SO_4	6.7	8.5	10.0	11.5	12.9	14.2	71	91	108	125	142	157
KCl	21.9	23.8	25.6	27.2	28.7	3.01	253	277	301	322	341	359

*Hasta 30°C, el precipitado contiene sal decahidratada; por encima de esa temperatura, es anhidro

**Hasta 30°C, el precipitado contiene sal decahidratada; por encima de esa temperatura, sal rómbica

***Hasta 30°C, el precipitado contiene sal de hexahidrato; por encima de esa temperatura, tetrahidrato

Nota: Las últimas seis sales enumeradas no se encuentran en suelos en forma de soluciones saturadas.

Fuente: Kovda, 1973

La solubilidad de los solutos se toma en cuenta para predecir la formación de precipitados. Y la precipitación de una sal ocurre cuando se alcanza una determinada concentración que se denomina “de saturación”, para los iones determinados que forman la sal.

La precipitación de una sal en una solución acuosa, bajo ciertas condiciones ambientales, se produce cuando la concentración de los iones en solución que constituyen la sal es tal que el producto solubilidad es igual o superior a la constante de equilibrio. Cuando ambas funciones son iguales, la condición es de equilibrio y la solución se denomina saturada, mientras que cuando el producto de solubilidad es mayor que la constante de equilibrio, la condición es de desequilibrio y la solución se denomina sobresaturada.

El producto de solubilidad de un compuesto se define como: el producto de las concentraciones molares de los iones constituyentes, cada una elevada a la potencia de su coeficiente estequimétrico en la ecuación de equilibrio. El equilibrio químico se alcanza cuando las rapideces de las reacciones en un sentido y en otro se igualan, y las concentraciones de los reactivos y productos permanecen constantes.

La solubilidad de un soluto dado en un disolvente dado depende típicamente de la temperatura. Muchas sales muestran un gran aumento en la solubilidad a medida que este parámetro aumenta. Sin embargo, hay solutos que muestraan una solubilidad que es bastante independiente de la temperatura. Otros, como el sulfato de cerio, se vuelven menos solubles en agua a medida que aumenta la temperatura. Esta dependencia de la temperatura a veces se denomina solubilidad retrógrada o inversa, y existe cuando la disolución de una sal es exotérmica; esto puede explicarse porque, de acuerdo con el principio de Le Chatelier, el calor adicional hará que el equilibrio de un proceso exotérmico se desplace hacia los reactivos.

En la Figura 2 se observa cómo la solubilidad del NaCl es relativamente constante independientemente de la temperatura, mientras que la solubilidad del Na_2SO_4 aumenta exponencialmente entre 0 y 35 grados Celsius y luego comienza a disminuir abruptamente.

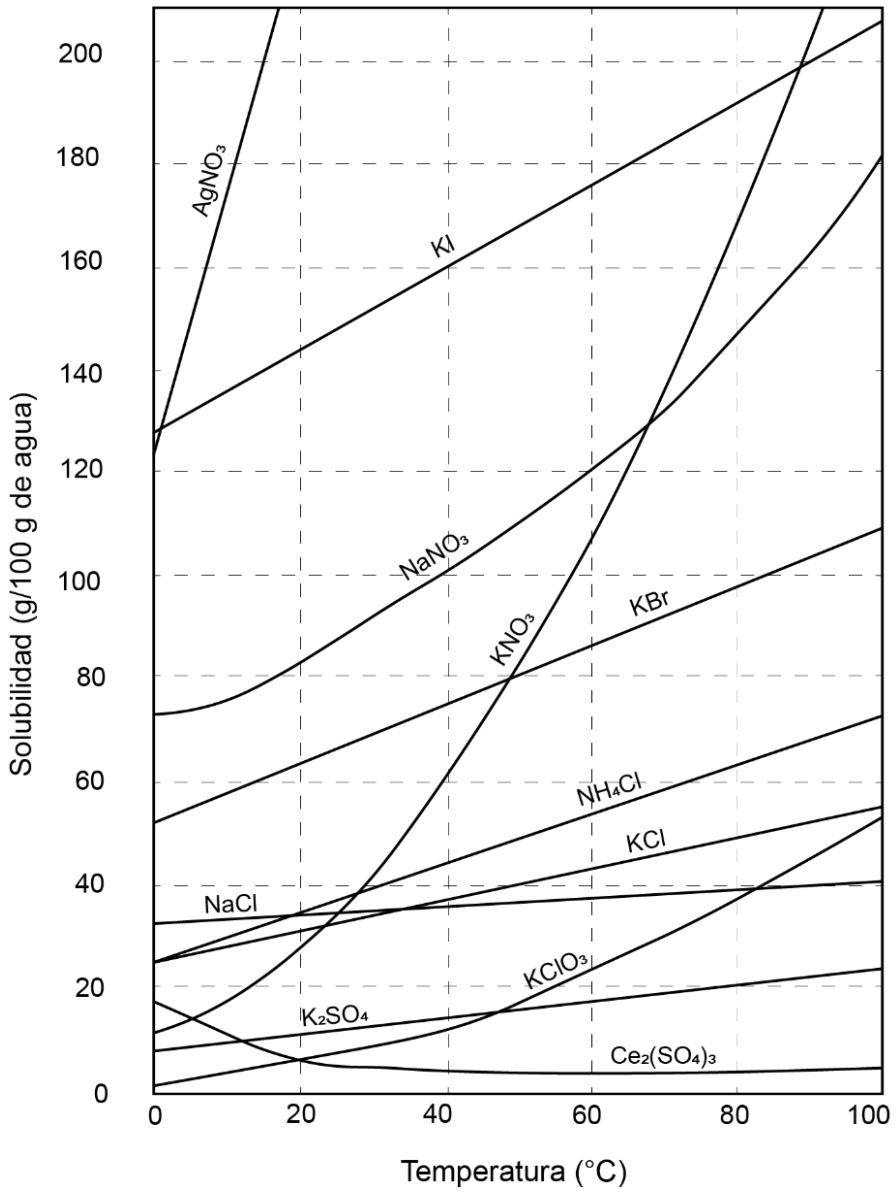


Figura 2. Solubilidad de sales en el agua en un rango de temperaturas de 0 a 100°C.

2.6 Índices de calidad del agua para riego

Existen criterios que se utilizan como indicadores para la evaluación de los problemas relacionados con la calidad del agua como la salinidad, sodicidad y toxicidad (Figura 3). La calidad del agua para riego puede variar significativamente según el tipo y la cantidad de sales disueltas. El criterio de calidad del agua de riego desarrollado por la clasificación del USDA ha recibido una amplia aceptación en varios países, incluyendo México.

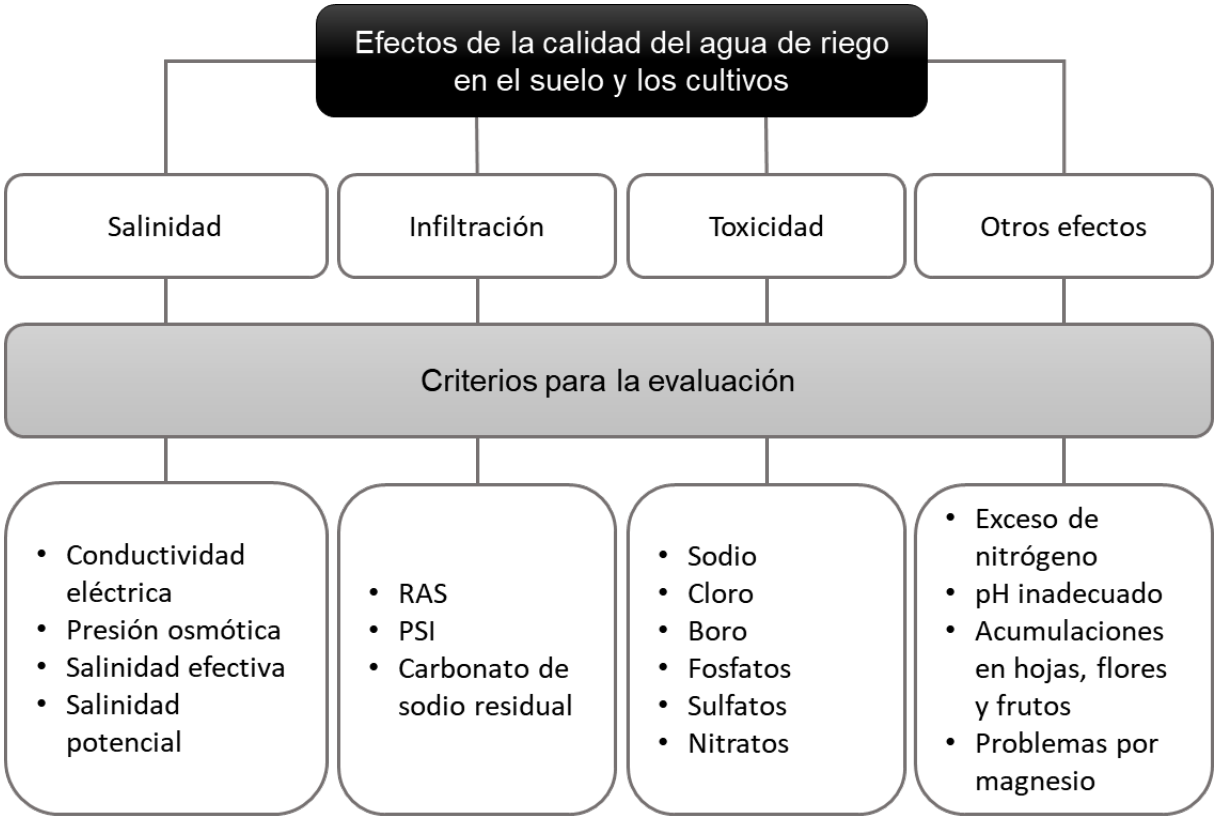


Figura 3. Efectos de la calidad del agua de riego en el suelo y los cultivos y criterios para la evaluación.

Para determinar la calidad del agua utilizada en la irrigación de cultivos agrícolas, se toman en cuenta las siguientes variables: pH, CE, concentración de aniones y cationes, mediante las cuales se estiman los factores limitantes para su uso en diversos cultivos, tales como el riesgo de salinidad, riesgo de sodificación, y toxicidad por iones específicos, principalmente.

2.6.1 Indicadores de salinidad

La salinidad es la concentración de sales minerales presentes y disueltas en las aguas de riego y en las soluciones de suelos sobre una base de volumen o peso. Los solutos más comunes que comprenden las sales minerales disueltas son los cationes Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+} y los aniones CO^{2-}, HCO^{-}, Cl^{-}, SO^{2-} y se considera algunas veces el ion nitrato NO_3^{-}, el ion fosfato PO_4^{3-}, así como el boro (B) y el silicio (Si). También se señalan

otros constituyentes que contribuyen a la salinidad en las aguas y en las soluciones de suelos hipersalinos y estas incluyen: B^{3+}, Sr^{2+}, Li^{+}, SO^{2-}, Rb^{+}, F^{-}, Mn^{2+}, Ba^{2+} y Al^{3+}.

El efecto de la salinidad sobre las plantas es diverso y variable. Con respecto a la tolerancia de las plantas a las sales, se han presentado dos teorías diferentes: la primera dice que el efecto nocivo de las sales de las plantas se debe a la presión osmótica de la solución externa; la segunda lo atribuye a la acción tóxica de las sales. Algunos autores afirman que el crecimiento y desarrollo de las plantas en condiciones salinas depende más de la presión osmótica de las sales que del efecto específico de los iones; mientras que otros sostienen que las diferencias observadas en el crecimiento y el metabolismo de las plantas expuestas a los efectos de las sales no se deben a la presión osmótica del sustrato, sino al efecto tóxico específico de los iones individuales (Kovda, 1973).

Lo cierto es que varias investigaciones han demostrado que los dos procesos ocurren y uno adicional: en primer lugar, la presencia de sal en la solución del suelo reduce la capacidad de la planta de absorber agua y esto conduce a reducciones en la tasa de crecimiento, esto se conoce como el efecto osmótico o de déficit de agua de la salinidad. En segundo lugar, si cantidades excesivas de sal ingresan a la planta en la corriente de transpiración, habrá daño a las células en las hojas que transpiran y esto puede causar reducciones adicionales en el crecimiento (Parihar *et al.*, 2015). Un tercer efecto es la modificación del estado nutricional de los iones esenciales para el crecimiento y el desarrollo por el desbalance iónico (Rejili *et al*., 2007; Parida y Das, 2005).

En la germinación, la salinidad afecta todo el proceso. Altera las imbibiciones del agua por las semillas debido al menor potencial osmótico de los medios de germinación, causa toxicidad que cambia las actividades de las enzimas del metabolismo de los ácidos nucleicos (Gomes-Filho *et al*., 2008), altera el metabolismo de las proteínas (Dantas *et al*., 2007), perturba el equilibrio hormonal (Khan y Rizvi, 1994) y reduce la utilización de las reservas de semillas (Othman *et al*. 2006).

2.6.1.1 Conductividad eléctrica

Algunos de los criterios para evaluar la salinidad del agua de riego son la conductividad eléctrica (CE) y la concentración total de iones. La CE es una de las variables más utilizadas para la evaluación y clasificación del agua, debido a su fácil determinación, alta correlación y dependencia de la concentración iónica; sin embargo, mediante la CE no se puede conocer el tipo y concentración de iones disueltos en el agua.

Con respecto de la salinidad, Ayers y Westcot (1985) indicaron que cuando el agua tiene una CE menor de 0.700 dS m^{-1} no tiene restricción de uso, mientras que con una CE entre 0.700 dS m^{-1} y 3.00 dS m^{-1} la restricción es moderada, y el uso es muy restringido con valores de CE mayores de 3.00 dS m^{-1}, ya que se afecta la disponibilidad del agua para algunos cultivos (Figura 4).

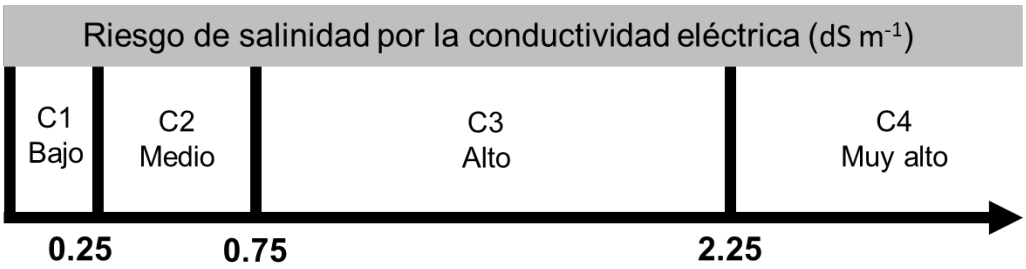


Figura 4. Escala de clasificación del riesgo de salinidad por la conductividad eléctrica.

Este criterio de clasificación difiere del que propuso Richards *et al*. (1974) para el Laboratorio de Salinidad de Riverside (Estados Unidos). De acuerdo con este criterio, el agua con una CE menor que 250 μS cm^{-1} presenta bajo riesgo de salinidad y es satisfactoria para el riego; si la CE está entre 250 y 750 μS cm^{-1}, el riesgo de salinidad es medio y los cultivos sensibles podrían ser afectados; si la CE está entre 750 y 2,250 μS cm^{-1}, el riesgo de salinidad es alto y se requiere lavado y drenaje de suelos para que se obtenga crecimiento adecuado de las plantas; y cuando la CE es mayor que 2,250 μS cm^{-1}, el riesgo de salinidad es muy alto y solamente los cultivos más tolerantes pueden prevalecer.

2.6.1.2 Índice de salinidad efectiva (SE)

Este índice establecido por Doneen (1975) hace una estimación del peligro que presentan las sales solubles del agua de riego al pasar a formar parte de la solución del suelo, dado que toma en cuenta la precipitación de las sales menos solubles: carbonatos de calcio y magnesio, y sulfato de calcio, las que, por consiguiente, dejan de participar en el incremento de la presión osmótica de la solución del suelo.

El valor de la SE indica la cantidad de sales que quedarán en solución y serán potencialmente nocivas para los cultivos. Este proceso es más notable cuando las aguas tienen un contenido alto de carbonatos y bicarbonatos. La salinidad efectiva se calcula con alguna de las siguientes fórmulas y bajo las condiciones siguientes:

1. Si, Ca > (CO_3 + HCO_3 + SO_4) entonces:

$$SE = \Sigma cationes - (CO_3 + HCO_3 + SO_4) \quad (2)$$

2. Si, Ca < (CO_3 + HCO_3 + SO_4); pero Ca > (CO_3 + HCO_3); entonces:

$$SE = \Sigma cationes - Ca \quad (3)$$

3. Si, Ca < (CO_3 + HCO_3 + SO_4); pero (Ca + Mg) > (CO_3 + HCO_3); entonces:

$$SE = \Sigma cationes - (CO_3 + HCO_3) \quad (4)$$

4. Si, (Ca + Mg) < (CO_3 + HCO_3); entonces:

$$SE = \Sigma cationes - (Ca + Mg) \quad (5)$$

Todos los iones están expresados en $mmol_c\ L^{-1}$. Esta es una unidad equivalente a la que se utiliza en otras publicaciones como meq L^{-1}. Sin embargo, se utiliza $mmol_c\ L^{-1}$ debido a que es una derivación de la unidad de cantidad de sustancia (mol) en el Sistema Internacional de Unidades.

Los valores recomendados de acuerdo al índice de salinidad efectiva (Doneen, 1975), se presentan en escala de la Figura 5.

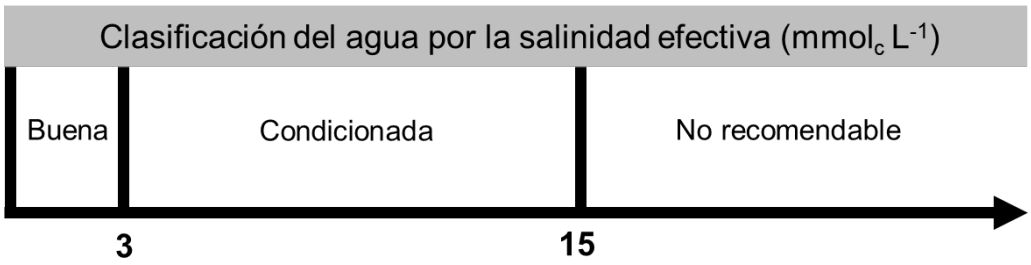


Figura 5. Escala de clasificación del agua con base en la salinidad efectiva.

2.6.1.3 Índice de salinidad potencial (SP)

Este índice determina la cantidad de Cl^- y SO_4^{2-} que puede ser perjudicial a los cultivos debido al incremento de la presión osmótica de la solución del suelo. Los cloruros y sulfatos son sales que se quedan en la solución del suelo, cuando la humedad aprovechable por las plantas es <50% (Doneen, 1975). La ecuación para determinar la salinidad potencial es la siguiente:

$$SP = Cl^- + \frac{1}{2}SO_4^{2-} \quad (6)$$

Las concentraciones de estos iones están expresadas en mmol$_c$ L^{-1}.

La escala de la Figura 6 muestra la clasificación del agua con base en la salinidad potencial, donde, los valores de 0 a 3 indican que el agua es buena para el riego, de 3 a 15 es condicionada y mayor a 15, no recomendable.

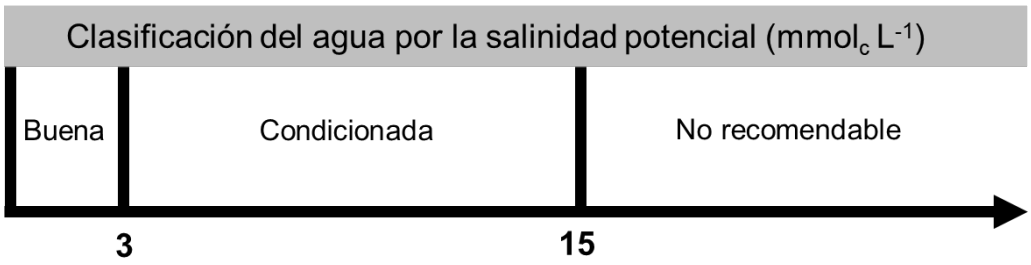


Figura 6. Escala de clasificación del agua con base en la salinidad potencial.

2.6.1.4 Presión osmótica

El proceso de ósmosis fue estudiado por primera vez en 1877 por un fisiólogo de plantas alemán, Wilhelm Pfeffer. Anteriormente ya se habían realizado estudios menos precisos de las membranas utilizando vejigas de animales y el paso de solutos a través de ellas. El término general *osmose* (ahora ósmosis) fue introducido en 1854 por un químico británico, Thomas Graham.

La ósmosis ocurre en la naturaleza en todos los seres vivos. Se define como "la difusión natural de solventes o agua a través de una membrana semipermeable mientras se evita el paso de solutos" (Cath *et al*., 2006). Si una solución y un disolvente están segregados por una membrana semipermeable, la solución comienza a diluirse atrayendo el disolvente a través de la membrana. En caso de que se aplique una fuerza externa sobre la solución que impida el paso del disolvente a través de la membrana y mantenga un equilibrio, esta fuerza se denomina "presión osmótica" (Chang, 2017; Nasr y Sewilam, 2018).

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).

La presión osmótica es una de las propiedades coligativas de las soluciones, y al ser las aguas naturales una solución, esta propiedad es muy importante, sobre todo por sus aplicaciones biológicas. Con respecto a las soluciones, la presión osmótica se puede definir como la tendencia a diluirse de una disolución separada del disolvente puro por una membrana semipermeable. Un soluto ejerce presión osmótica al enfrentarse con el disolvente sólo cuando no es capaz de atravesar la membrana que los separa.

La presión osmótica de una disolución equivale a la presión mecánica necesaria para evitar la entrada de agua cuando está separada del disolvente por una membrana semipermeable. En el riego agrícola, la presión osmótica, está relacionada con el flujo

de agua entre la solución del suelo y la concentración de solutos en las raíces de las plantas.

La presión osmótica de una disolución es la presión que se requiere para detener la ósmosis se expresa en atmósferas y ésta dada por:

$$PO = MRT \tag{7}$$

PO es la presión osmótica; M es la concentración molar de la disolución (M L^{-1}); R es la constante de los gases (0.082057 L atm/ K mol); T es la temperatura absoluta (ºK).

Debido a que las mediciones de la presión osmótica se llevan a cabo a temperaturas constantes, la concentración se expresa en unidades de molaridad. Al igual que la elevación del punto de ebullición y la disminución del punto de congelación, la relación es directamente proporcional a la concentración de la disolución.

La presión osmótica es directamente proporcional a la conductividad eléctrica, por lo que, cuanto mayor sea la concentración de sales, mayor será la presión osmótica que las raíces de las plantas han de superar para poder absorber agua.

Richards *et al*. (1974) con base en datos experimentales realizados en el Valle Imperial, Estados Unidos, propusieron una ecuación para estimar la presión osmótica, la cual se presenta de la siguiente manera:

$$PO = 0.36 \times CE \tag{8}$$

Donde, PO se refiere a la presión osmótica en atm o Mpa, y CE a la conductividad eléctrica en mS cm^{-1}.

A esta ecuación se le puede dar una mayor confiabilidad si se relaciona con datos experimentales de sólidos disueltos totales (SDT) obtenidos en laboratorio:

$$SDT = 640 \times CE \tag{9}$$

Cuando se combinan estas dos ecuaciones despejando la CE, se obtiene lo siguiente:

Si CE = PO/0.36 y CE = SDT/640, entonces al igualar las ecuaciones se obtiene:

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

$$PO = \left(\frac{0.36}{640}\right) \times SDT$$

$$PO = 0.0005625 \times SDT \quad (10)$$

Donde, PO se refiere a la presión osmótica en atm o Mpa y SDT a los sólidos disueltos totales, expresados en mg L^{-1}.

Los coeficientes 0.36 y 640 dependen del tipo de salinidad cuando la CE se expresa en mS cm^{-1}.

2.6.2 Indicadores de sodicidad

El aumento de la proporción de sodio retenido, con respecto a otros cationes en el complejo de intercambio del suelo, se le conoce como sodificación. Las causas más frecuentes son la utilización de aguas de mala calidad en el riego (Crescimanno y Garofalo, 2006; Heidarpour *et al*., 2007). Por lo general, los suelos sódicos se desarrollan cuando son sometidos al riego con agua que tiene alta relación de adsorción de sodio (mayor a 5) y/o una alta proporción de sales de bicarbonato (Bower, 1969). También se forman por el movimiento ascendente del agua suberránea.

La disminución progresiva de iones Ca^{2+} en las soluciones de los suelos y aguas de riego conlleva a que la relación Na/Ca se incremente. En estas condiciones, los procesos de sodificación de los suelos como la dispersión, pérdida de permeabilidad, solubilidad de moléculas orgánicas y aumento de pH, se desarrollan con mucha intensidad (Ortega y García, 1994).

Los efectos perjudiciales causados por la presencia de sodio en suelos han sido detectados en regiones áridas y semiáridas, donde se han utilizado aguas salinas y sódicas para riego (Chirinos y Mattiazzo, 2004).

La relación de adsorción de sodio (RAS) de las aguas de riego está altamente relacionada con el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en los sitios de intercambio, cuando el suelo está en equilibrio con el agua de riego, por lo que la RAS se puede

utilizar como un valor aproximado de la sodicidad después del riego (Hussein y Rabenhorst, 2001).

Los efectos en suelos debido al sodio intercambiable, son evidentes debido al encharcamiento y a la disminución de la velocidad de infiltración del agua de riego. La toxicidad del ion sodio se manifiesta generalmente mediante coloraciones cafés en las hojas y por la caída simultanea de las hojas.

Un problema de infiltración en los suelos se presenta cuando el agua de riego no atraviesa la superficie del suelo a una velocidad lo suficientemente rápida, como para no permitir que se restituya el agua que se ha consumido por los cultivos agrícolas en diferentes riegos. Esta disminución en la velocidad del paso del agua a través del suelo se debe a modificaciones del medio poroso de los suelos (McNeal and Coleman, 1966).

Los factores de calidad del agua que suelen influir en la infiltración, son el contenido total de sales y el contenido de sodio en relación a los contenidos de calcio y magnesio. Una alta salinidad aumenta la velocidad de infiltración, mientras que una baja salinidad, o una proporción alta de sodio sobre el calcio, la disminuyen. Ambos factores (salinidad y proporción de sodio) pueden actuar simultáneamente. Los problemas de infiltración ocasionados por la deficiente calidad del agua, ocurren por lo general en los primeros centímetros del suelo y están ligados con la estabilidad estructural del suelo y con el contenido de sodio en relación al calcio (Ayers y Westcot, 1985).

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

La dispersión de los suelos y la destrucción de su estructura se producen únicamente cuando el contenido de sodio en el suelo supera al de calcio en una proporción por encima de 3:1. Este contenido relativo de sodio provoca serios problemas de infiltración, de la misma manera que una salinidad muy baja del agua. Esto se debe a la falta de suficiente calcio para contrarrestar los efectos dispersantes del sodio. Tanto la salinidad

del agua (CE) como su relación de adsorción de sodio (RAS) afectan la velocidad de infiltración (Ayers y Westcot, 1985; Kumar *et al*., 2008).

Por los efectos del sodio en el suelo, en la determinación de los criterios de calidad del agua, es indispensable definir la relación de adsorción de sodio.

Ecuación de intercambio catiónico de Gapon

La importancia de la ecuación de intercambio catiónico de Gapon radica en que de ella se deriva la relación de adsorción de sodio (RAS), utilizando la ley de acción de masas, y mediante la cual se predice el porcentaje de sodio intercambiable en los suelos. La reacción de intercambio de cationes de Gapon, ha sido utilizada ampliamente en los estudios de salinidad y sodicidad (Phogat *et al*., 2020; Farahani *et al*., 2019; Jalali *et al*., 2020; Pratt *et al*., 1962; Bower, 1959; Endo *et al*., 2002; Evangelou y Coale, 1987; Oster y Sposito, 1980; Ahmed *et al*., 2007; Mau & Porporato, 2015; Singh *et al*., 2018).

La relación del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) - Relación de Adsorción de Sodio (RAS), se encuentra en completa correspondencia con las relaciones teóricas desarrolladas por Gapon en sistemas Na-Ca de intercambio catiónico, durante los procesos de interacción suelo-agua. Esta relación caracteriza el intercambio de Na^{+} por Ca^{2+} y Mg^{2+} en el suelo. Tiene como objeto poder predecir el cambio en el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) que se presentará en el suelo al introducir agua con una calidad determinada.

Ley de acción de masas

Existen reacciones, denominadas irreversibles, que se caracterizan por transcurrir disminuyendo progresivamente la cantidad de sustancias reaccionantes y terminar cuando alguno de ellos se agota (reactivo limitante). Así, los reactivos se transforman totalmente en productos.

Sin embargo, es frecuente que los productos de reacción puedan combinarse entre sí y formar de nuevo las sustancias reaccionantes, se habla entonces de reacciones reversibles. En estos casos, la transformación de reactivos en productos es parcial, alcanzándose el denominado *estado de equilibrio*, que se produce cuando las

velocidades de las reacciones directa e inversa se igualan (aunque esto no implica que dicha reacción transcurra en una sola etapa).

El equilibrio químico es un proceso dinámico, aunque a nivel macroscópico no se observe cambio alguno, a nivel molecular las reacciones inversa y directa se están produciendo.

El 11 de marzo de 1864, Cato M. Guldberg (1836-1902) y Peter Waage (1833-1900) enunciaron la **Ley de Acción de Masas**; que establece que, *para una reacción reversible en equilibrio, a una temperatura fija, la relación entre el producto de las concentraciones de los productos (elevadas cada una a una potencia igual a su coeficiente estequiométrico) y el producto de las concentraciones de los reactivos (elevadas cada una a una potencia igual a su coeficiente estequiométrico) es una* ***constante***. Llegaron a esta conclusión basándose en ideas anticipadas por Claude Berthollet (1748-1822) y a partir de datos experimentales de velocidades de reacción. Es una de las leyes fundamentales de la Química.

Goldberg y Waage encontraron que para muchas reacciones químicas elementales la velocidad de reacción es proporcional a la concentración de cada uno de los reactivos elevada a su coeficiente estequiométrico:

$aA + bB \leftrightarrows cC + dD$

Para la reacción directa: $vd = kd\ [A]^a\ [B]^b$

Para la reacción inversa: $vi = ki\ [C]^c\ [D]^d$

vd: velocidad de la reacción directa, vi: velocidad de la reacción inversa

En el equilibrio: $vd = vi$

Por lo tanto:

$kd\ [A]^a\ [B]^b = ki\ [C]^c\ [D]^d$

De ahí se obtiene la expresión de la Ley de Acción de Masas que nos indica que la extensión en que se verifica un proceso químico es independiente del mecanismo y velocidad según el que se desarrolla el proceso:

$$K = \frac{C^C D^D}{A^A B^B} \quad (11)$$

Siendo todas ellas las concentraciones de las distintas sustancias en el equilibrio.

Aplicación de la ley de acción de masas en la ecuación de intercambio de Gapon

Aplicando la ley de acción de masas se puede establecer el intercambio iónico en los suelos, mediante la ecuación de intercambio de Gapon en estudios de suelos salinos y sódicos. La expresión original de iones Na^+ y Ca^{2+} se expresa de la siguiente manera:

$$X_{1/2}Ca^{2+} + Na^+ \leftrightarrow XNa^+ + \frac{1}{2}Ca^{2+} \quad (12)$$

En condiciones de equilibrio la reacción anterior se puede escribir de la siguiente manera:

$$KG = \frac{(XNa^+)(C_{Ca^{2+}})^{1/2}}{(X_{1/2}Ca^{2+})(C_{Na^+})} \quad (13)$$

Donde: K_G es el coeficiente de selectividad de Gapon (mol $L^{-1})^{-1/2}$; C_{Ca}^{2+} y C_{Na}^+ son las concentraciones de los iones en la solución en mol L^{-1}; $X_{1/2}Ca^{2+}$ y XNa^+ son las concentraciones de los iones en el complejo de intercambio catiónico expresadas en meq/100 g.

La relación de iones adsorbidos y en solución, por consiguiente, se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{XNa}{XCa_{1/2}} = K_G = \frac{(C_{Na^+})}{\sqrt{C_{Ca^{2+}}}}$$

El laboratorio de salinidad de los Estados Unidos,1954 (Richards *et al*., 1974) consideraron que el ion magnesio Mg^{2+} se comporta similarmente al ion calcio Ca^{2+}, en la fase adsorbida del complejo de intercambio catiónico. Si se toma en cuenta la modificación introducida a la ecuación de Gapon, entonces, esta se expresa como sigue:

$$\frac{XNa}{XCa - XMg} = K_G = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}} = K_G * RAS$$

Donde: K_G es el coeficiente de selectividad iónica de Gapon modificado, expresado en $(mmol\ L^{-1})^{-½}$ y RAS es la relación de adsorción de sodio que se encuentra definida como sigue:

$$RAS = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}} \quad (14)$$

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

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

$$\frac{XNa}{CIC - XNa} = K_G \quad RAS * K_G = PSI$$

Donde, PSI es el porcentaje de sodio intercambiable.

En términos del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{PSI}{100 - PSI} = K_G \quad (15)$$

$$RAS * K_G = PSI$$

Donde, PSI = (XNa/CIC)100

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

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

La ecuación de Gapon describe la adsorción preferencial de cationes divalentes, a expensas de los cationes monovalentes, lo que implica que, si las concentraciones de cationes monovalentes y divalentes son iguales, el complejo de intercambio catiónico estará ocupado principalmente por cationes divalentes.

En diversas investigaciones se han determinado diferentes valores del coeficiente de selectividad iónica de Gapon (K_G) obteniéndose un rango de valores de 0.016 a 0.008 $(mmol_c\ L^{-1})^{-½}$. El laboratorio de salinidad de los Estados Unidos, para los suelos de zonas áridas y semiáridas del Oeste de Estados Unidos recomienda un valor del coeficiente de selectividad iónica de Gapon de 0.015 $(mmol_c\ L^{-1})^{-½}$.

Para determinar con exactitud el valor del coeficiente de selectividad iónica de Gapon (K_G), es necesario evaluar este coeficiente experimental entre los suelos en los que se requiere estimar el coeficiente de Gapon. Las variaciones del coeficiente de selectividad iónica de Gapon dependen de la mineralogía de los cristales arcillosos y de los grupos funcionales de las moléculas orgánicas.

2.6.2.1 Relación de adsorción de sodio (RAS)

A través del tiempo, diversos estudios experimentales han llevado a establecer y aceptar tres diferentes formulaciones de la RAS que tienen aplicaciones específicas. La primera de ellas, que es la expresión matemática original de la RAS, es la siguiente:

$$RAS_{or} = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}} \qquad (16)$$

En la ecuación anterior, RAS_{or} se refiere a la ecuación original de la RAS y las concentraciones de Na, Ca y Mg están en $mmol_c\ L^{-1}$.

Esta relación es un índice efectivo para determinar el peligro potencial de un agua en equilibrio con el suelo, debido al exceso de sodio sobre el calcio y el magnesio. Sin

embargo, no considera las diferencias fisicoquímicas esenciales de los iones calcio y magnesio, más bien los considera como si se comportaran de la misma manera (Sposito y Mattigod, 1977). El radio iónico y el radio de hidratación es muy distinto en el ion calcio comparado con el ion magnesio, lo cual influye en la intensidad con la que ocurren los procesos de hidrólisis. La energía de adsorción es distinta en los iones calcio y magnesio, esto influye en su movilidad y procesos de migración en las soluciones de los suelos y el agua superficial (Velázquez-Machuca *et al.*, 2002). Otra desventaja de esta ecuación es que no considera las variaciones en la concentración de calcio cuando este precipita en condiciones de alcalinidad elevada, normalmente en pH mayor que 8.2.

Bower *et al*. (1968) propusieron una ecuación que ajusta la original, incluyendo el índice de saturación de Langelier para tomar en cuenta los procesos de precipitación y dilución del carbonato de calcio ($CaCO_3$).

$$RAS_{aj} = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}}[1 + (8.4 - pH_c)] \tag{17}$$

Donde RAS_{aj} se refiere a la ecuación ajustada por Bower *et al*. (1968) y las concentraciones de Na, Ca y Mg están en $mmol_c\ L^{-1}$.

Al añadir el índice de saturación en la ecuación, se estima la precipitación del calcio al alcanzar el punto de saturación en presencia de bicarbonatos. Se expresa como la diferencia entre el pH del agua establecido en un valor de 8.4 y el pH teórico que alcanzaría el agua en equilibrio con el $CaCO_3$ (Bower y Maasland, 1963).

El índice de saturación (IS) de Langelier se calcula de la siguiente manera: $IS = pH_a - pH_c$. Langelier mencionó que cuando los valores del IS son positivos, el $CaCO_3$ precipitará, y cuando son negativos el agua diluirá al $CaCO_3$. pH_a es el pH del agua, mientras que pH_c es un valor teórico que se calcula de la siguiente forma:

$$pH_c = (pk_2' - pk_c') + p(Ca) + pAlk \tag{18}$$

- *pk_2' – pkc':* logaritmos negativos de la segunda constante de disociación del ácido carbónico H_2CO_3 y de la constante de solubilidad del carbonato de calcio $CaCO_3$ respectivamente, ambos corregidos por su fuerza iónica (μ).
- *p(Ca):* logaritmo negativo de la concentración molar de (Ca)
- *pAlk*: logaritmo negativo de la concentración equivalente de (CO_3 + HCO_3)

Suarez (1981) propuso una corrección a la forma de tomar en cuenta la concentración de los iones de calcio, cuando este valor se introduce en la fórmula de la RAS. Suarez menciona que debe tomarse en cuenta la presión parcial del bióxido de carbono CO_2 del aire en los primeros milímetros del suelo. Y propone que la presión parcial del bióxido de carbono debe ser de 0.0007 atmósferas o 0.07 kPa.

Por lo tanto, la fórmula de la RAS que toma en cuenta la presión parcial del CO_2 es la siguiente:

$$RAS_{corr} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca_{aj} + Mg}{2}}} \tag{19}$$

Donde RAS_{corr} es la relación de adsorción de sodio que toma en cuenta las fuentes de calcio debido al $CaCO_3$ y la presión parcial del CO_2 (P_{CO2} = 0.0007 atm). Ca_{aj} es el contenido corregido de calcio en el agua debido a la salinidad. Se obtiene a partir de la relación de HCO_3/Ca expresada en $mmol_c\ L^{-1}$, y la conductividad eléctrica expresada en $mS\ cm^{-1}$ (Cuadro 2).

La solubilidad del bióxido de carbono en el agua de riego se representa con la siguiente ecuación:

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$$

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

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \leftrightarrow Ca^+ + 2HCO_3^-$$

Cuadro 2. Concentración de Ca_{aj} en el agua del suelo que se encuentra cerca de la superficie del suelo, que resultaría de regar con aguas de determinado valor de (HCO_3/Ca) y una conductividad eléctrica determinada.

		Salinidad del agua de riego aplicada CE mS cm^{-1}											
		0.10	**0.20**	**0.30**	**0.50**	**0.70**	**1.00**	**1.50**	**2.00**	**3.00**	**4.00**	**6.00**	**8.00**
Valor de Ca_{aj} (HCO_3/Ca)	**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	5.77	6.04
	0.35	3.61	3.72	3.80	3.94	4.04	4.17	4.35	4.49	4.72	4.91	5.21	5.45
	0.40	3.30	3.40	3.48	3.60	3.70	3.82	3.98	4.11	4.32	4.49	4.77	4.98
	0.45	3.05	3.14	3.22	3.33	3.42	3.53	3.68	3.80	4.00	4.15	4.41	4.61
	0.50	2.84	2.93	3.00	3.10	3.19	3.29	3.43	3.54	3.72	3.87	4.11	4.30
	0.75	2.17	2.24	2.29	2.37	2.43	2.51	2.62	2.70	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: Ayers y Westcot, 1985

Se asume que la fuente de calcio proviene de silicatos o caliza $CaCO_3$, que no existe precipitación del magnesio y que la presión relativa del CO_2 de la superficie del suelo es de 0.0007 atmósferas.

Las unidades de Ca_{aj} y HCO_3/Ca son $mmol_c\ L^{-1}$ y la CE está expresada en mS cm^{-1}

La RAS se utiliza para clasificar el suelo por el peligro de sodicidad en combinación con la conductividad eléctrica por el peligro de salinidad. El significado e interpretación de las clases por calidad en el diagrama de Richards (1974) se describe a continuación.

Clasificación por salinidad

- Agua de baja salinidad (C1): Puede usarse para riego de la mayor parte de los cultivos, en casi cualquier tipo de suelo con poca probabilidad de que se desarrolle salinidad. Se necesita algún lavado, pero este se logra en condiciones normales de riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.
- Agua de salinidad media (C2): Puede usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, se pueden producir las plantas moderadamente tolerantes a las sales.
- Agua de baja salinidad (C1): Puede usarse para riego de la mayor parte de los cultivos, en casi cualquier tipo de suelo con poca probabilidad de que se desarrolle salinidad. Se necesita algún lavado, pero este se logra en condiciones normales de riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.
- Agua altamente salina (C3): No puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aun con drenaje adecuado se puede necesitar prácticas especiales de control de la salinidad, debiendo, por lo tanto, seleccionar únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a las sales.
- Agua muy altamente salina (C4): No es apropiada para riego en condiciones ordinarias, pero puede usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado, debiendo aplicarse un exceso de agua para lograr un buen lavado; en este caso se deben seleccionar cultivos altamente tolerantes a las sales.

Clasificación por sodicidad

- Agua baja en sodio (S1): Puede usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No

obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

- Agua media en sodio (S2): En suelos de textura fina el sodio representa un peligro considerable, más cuando poseen una alta capacidad de intercambio de cationes, y en condiciones de lavado deficiente. Estas aguas solo pueden usarse en suelos de textura gruesa, en suelos orgánicos de buena permeabilidad, o que contengan yeso.
- Agua alta en sodio (S3): Puede producir niveles tóxicos de sodio intercambiable en la mayor parte de los suelos, por lo que necesitarán buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos pueden librarse de los efectos negativos. Pueden aplicarse mejoradores químicos para sustituir el sodio intercambiable.
- Agua muy alta en sodio (S4): Es inadecuada para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y la aplicación de yeso u otros mejoradores no hace inviable económicamente el empleo de esta clase de aguas.

Con base en la clasificación anterior utilizando la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio, el Laboratorio de Salinidad de Estados Unidos elaboró el diagrama de la Figura 7, con el objetivo de evaluar los peligros por salinización y sodificación del suelo.

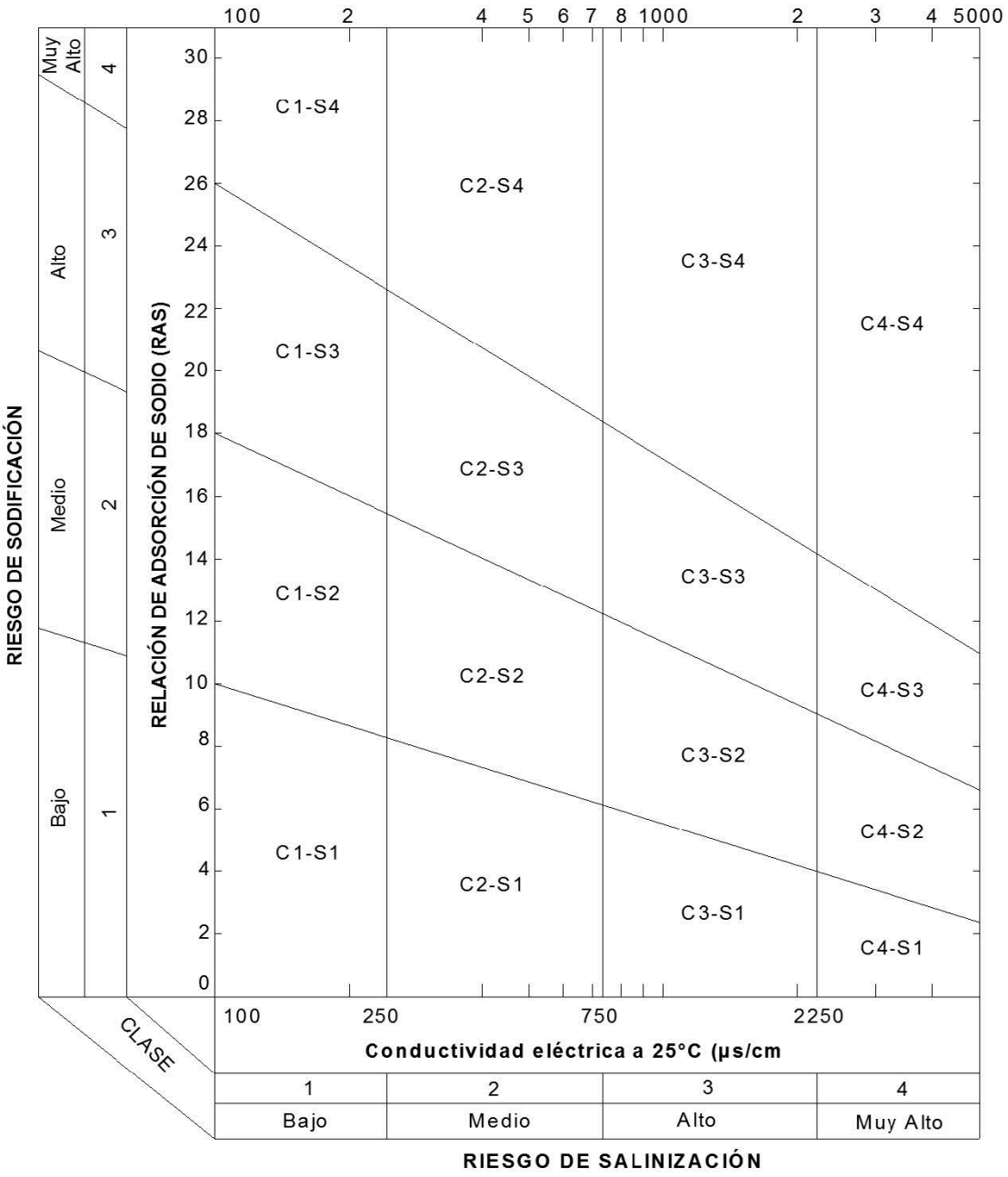


Figura 7. Diagrama para clasificar las aguas de riego por el riesgo de salinización y sodificación.

2.6.2.2 Relación catiónica de la estabilidad estructural (CROSS)

El uso de aguas residuales es cada vez más común en el riego agrícola por la necesidad de contar con un mayor volumen de agua disponible, y para evitar procesos costosos de tratamiento. Sin embargo, la alta salinidad y sodicidad de estas aguas generan un

problema importante por los impactos negativos en la infiltración, la disponibilidad de agua y el crecimiento de las plantas. Estudios recientes demuestran que también el K y el Mg (que se encuentran en altas concentraciones en las aguas residuales) causan estos efectos nocivos sobre las propiedades hidráulicas de los suelos (Buelow *et al*., 2015; Smith *et al*., 2015).

Durante varias décadas se ha utilizado la relación de adsorción de sodio (RAS) como un parámetro para evaluar el peligro de sodicidad en el agua de riego y sus efectos perjudiciales en la permeabilidad del suelo. Sin embargo, aunque el orden decreciente de estos efectos (Na>K>Mg>Ca) es ampliamente aceptado, el K y el Mg no se toman en cuenta, y, por consiguiente, se asume que no representan ningún peligro para la permeabilidad del suelo. La RAS no incluye al K y asume que el Mg es igual al Ca, pero se ha demostrado que el K puede influir en la estabilidad estructural del suelo y los efectos del Mg pueden ser diferentes a los del Ca (Rengasamy, 2018).

La razón de que el K no se tome en cuenta es que las concentraciones de Na en suelos de riego son mucho más altas que las de K, pero la razón más importante es que el Manual 60 del USDA concluye que “el potasio intercambiable sólo tiene un efecto adverso leve o nulo sobre las propiedades físicas de los suelos”. Esta conclusión ha influido en la determinación de los criterios para evaluar la calidad del agua de riego.

Como resultado de diversos trabajos de investigación, Rengasamy y Marchuk (2011) propusieron una generalización de la RAS que toma en cuenta los efectos del Na y el K como cationes dispersantes que disminuyen la permeabilidad del suelo, y los efectos del Mg y el Ca como cationes floculantes que mejoran la permeabilidad del suelo. Este nuevo parámetro, relación catiónica de estabilidad estructural de los suelos (CROSS, por sus siglas en inglés), se expresa en la ecuación 20:

$$CROSS_f = \frac{(Na + 0.56K)}{[(Ca + 0.6Mg)/2]^{0.5}} \qquad (20)$$

Donde, la concentración de los iones (Na, K, Ca y Mg) están expresados en $mmol_c\ L^{-1}$.

Se agrega el subíndice *f* para indicar que los coeficientes numéricos 0.56 y 0.6 se basan en el poder floculante relativo de K y Mg.

Posteriormente, Oster *et al*. (2016) propusieron una optimización de la ecuación que proviene de relacionar la $CROSS_f$ con el umbral de concentración de electrolitos disueltos en el que la conductividad hidráulica disminuye del 10 al 15%. Este umbral de concentración de electrolitos (TEC, por sus siglas en inglés) es una medida ampliamente aceptada del impacto de los cationes en la permeabilidad del suelo. La CROSS optimizada se define en la ecuación 21:

$$CROSS_{opt} = \frac{(Na + 0.335(\pm 0.038)K)}{[(Ca + 0.0758(\pm 0.012)Mg)/2]^{0.5}} \quad (21)$$

Donde, $CROSS_{opt}$ se refiere a la optimización de la $CROSS_f$ y la concentración de los cationes (Na, K, Ca y Mg) se expresan en $mmol_c\ L^{-1}$.

2.6.2.3 Carbonato de sodio residual

En los inicios de estudios sobre la calidad de las aguas superficiales y subterráneas para riego, se observó experimentalmente que los distintos tipos de aguas se infiltraban de manera diferente en los suelos agrícolas bajo riego; y como consecuencia de estas observaciones, se estableció que sus variadas composiciones químicas afectaban las propiedades físicas de los suelos, de manera diferente. Por lo que en esos tiempos se mencionaba que aguas duras formaban suelos blandos y aguas blandas formaban suelos duros. Hoy se sabe que las aguas blandas, ricas en bicarbonato de sodio propician considerablemente la acumulación de sodio intercambiable en los suelos. Cabe mencionar que uno de los procedimientos que se han utilizado para determinar los posibles problemas de infiltración fue el método del carbonato de sodio residual (CSR).

Para inferir experimentalmente sobre los problemas posibles de infiltración, durante el uso de las aguas de riego, se usa ampliamente el método de carbonato de sodio residual (CSR). Actualmente este parámetro (CSR), se utiliza para evaluar la calidad de las aguas de riego ricas en bicarbonatos de sodio, ya que, por lo general en la actualidad, debido a la demanda que se tiene de aguas de riego, se están aplicando aguas de la más diversa composición química y que son de baja y mediana concentración (Beletse

et al., 2008; Chahal y Kundu, 1985; Naidu y Rengasamy, 1993; Rahil y Antononopoulos, 2007).

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

1. Por ciento de sodio encontrado

$$\frac{Na^{+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+}}$$

2. Por ciento de sodio posible

$$\frac{Na * 100}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+}) - (CO_3^{2-} + HCO_3^{-}}$$

3. Carbonato de sodio (Na_2CO_3) residual

$$(CO_3^{2-} + HCO_3^{-}) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

La concentración iónica en estas relaciones se expresa en $mmol_c\ L^{-1}$.

Por lo tanto, el carbonato de sodio residual se calcula de acuerdo con la relación de la ecuación 22, y la clasificación para el riego como se indica en la Figura 8:

$$CSR = (CO_3^{2-} + HCO_3^{-}) - (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \quad (22)$$

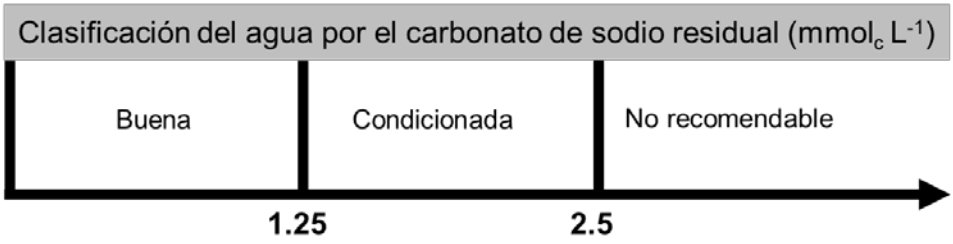


Figura 8. Clasificación de las aguas de riego de acuerdo con el carbonato de sodio residual.

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

Las aguas que contienen CSR>2.5 $mmol_c\ L^{-1}$ han sido consideradas como insatisfactorias para riego, sin embargo, Gupta (1983) reportó que las aguas de riego que contienen CSR>10 $mmol_c\ L^{-1}$, y una conductividad eléctrica de 2 mS cm^{-1} así como un RAS<10, pueden aplicarse prácticamente sin afectar el rendimiento del trigo en un suelo franco-arenoso calcáreo.

2.6.3 Fuerza iónica

La fuerza iónica es en esencia la concentración de la carga iónica en solución. Aporta información más útil del comportamiento de una solución que cuando se utiliza solamente la concentración. Se utiliza para comparar soluciones de diversas composiciones porque se toman en cuenta los efectos eléctricos específicos de las interacciones de los iones presentes.

Se ha demostrado que la fuerza iónica es uno de los factores que influyen en la dispersión de las arcillas (Emerson, 1977; Mullins *et al*., 1990). Con un aumento en la concentración de electrolitos, hay una reducción en el estrés osmótico entre las partículas de arcilla hasta tal punto que las fuerzas de Van der Waals de corto alcance se vuelven dominantes y causan la floculación (Alhammadi y Miller, 2006).

La fuerza iónica se utiliza como indicador de deterioro biológico en ecosistemas acuáticos. Valores altos de fuerza iónica o grandes fluctuaciones en periodos de tiempo cortos afectan la biota del agua dulce a través de varios modos de acción, incluyendo el estrés osmótico y mayor intercambio iónico.

En las plantas, la actividad iónica es un mejor predictor de la respuesta de crecimiento que la concentración electrolítica (Alva *et al*., 1991). Por lo general, la fuerza iónica del agua dulce oscila entre 0.001 y 0.01 M, y la fuerza iónica del agua del océano es de alrededor de 0.7 M (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

La fuerza iónica de una solución electrolítica es una medida de las interacciones electrostáticas promedio de los iones en solución que puede determinarse mediante la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{1}{2} \sum_{i=iones}^{n} C_i Z_i^2 \qquad (23)$$

Donde μ es la fuerza iónica, C_i *es* la concentración de cada ion en molaridad (M L^{-1}) y *Zi* es la carga o valencia del ion en la solución.

Para calcular la fuerza iónica de este modo es necesario conocer la concentración de cada ion en la solución. Sin embargo, debido a la importancia de conocer la fuerza iónica para calcular la actividad iónica, cuando no se cuenta con datos de concentración, se recomienda estimar la fuerza iónica a partir de la conductividad eléctrica a partir de las ecuaciones obtenidas por diversos autores.

2.6.3.1 Coeficientes de actividad iónica

A partir de la fuerza iónica se pueden obtener los coeficientes de actividad de los iones en solución mediante la siguiente ecuación de Debye y Hükel:

$$-\log f_i = \frac{AZi^2(\mu)^{1/2}}{1 + Bai(\mu)^{1/2}} \qquad (24)$$

Donde *A* y *B*, son constantes que dependen de la temperatura, μ es la fuerza iónica de la solución en M L^{-1}; *ai* es un parámetro que se debe al tamaño de cada ion en unidades ángstrom (Å); *ƒ*i es el coeficiente de actividad del ion *i*.

Las constantes para la ecuación de Debye y Hückel en una escala molar a 25°C son: A = 0.509 y B = 0.329, que son tamaños de radio iónico en Å. Los valores de *ai* se pueden obtener del Cuadro 3.

Cuadro 3. Valores de ***ai*** expresados en Å que se utilizan en la ecuación de Debye y Hükel.

Ion	Valor de ***ai***
H^+, Al^{3+}, Fe^{3+}	9.0
Mg^{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^-, $H_2PO_4^-$	4.5
SO_4^{2-}, HPO_4^{2-}, PO_4^{3-}	4.0
OH^-, F^-	3.5
K^+, Cl^-, NO_3^-	3.0
Rb^+, Cs^+, NH_4^+	2.5

Fuente: Adams, 1971

2.6.4 Indicadores de toxicidad

Los problemas de toxicidad surgen cuando ciertos iones del suelo o del agua, son absorbidos por las plantas y acumulados en sus tejidos, en concentraciones lo suficientemente altas como para provocar daños y reducir los rendimientos de los cultivos. La magnitud de estos daños depende de la cantidad de iones absorbidos y de la sensibilidad de las plantas (Munns y Tester, 2008). Los iones que con mayor frecuencia ocasionan toxicidad son sodio, cloro y boro (Pescod, 1992; Verma, 1983). Los problemas de toxicidad pueden ocurrir aun cuando estos iones se encuentren en concentraciones bastante bajas. Sin embargo, los problemas de toxicidad a menudo complican y complementan los problemas de salinidad y de infiltración.

2.6.4.1 Cloruro

La toxicidad más común es el cloruro en el agua de riego. El cloruro no es adsorbido ni retenido por los suelos, por lo tanto, se mueve fácilmente con el agua del suelo, es absorbido por el cultivo, se mueve en la corriente de transpiración y se acumula en las hojas. Si la concentración de cloruro en las hojas excede la tolerancia del cultivo, se desarrollan síntomas de lesiones tales como quemaduras o secado del tejido de la hoja. Normalmente, la lesión de la planta ocurre primero en las puntas de las hojas (que es

común para la toxicidad del cloruro) y progresa desde la punta hacia los bordes a medida que aumenta la gravedad. La necrosis excesiva (tejido muerto) a menudo se acompaña de caída temprana de la hoja o defoliación. Con cultivos sensibles, estos síntomas ocurren cuando las hojas acumulan de 0.3 a 1.0 por ciento de cloruro en peso seco, pero la sensibilidad varía entre estos cultivos. En el agua que se utiliza para riego, cuando se exceden 4 $mmol_c\ L^{-1}$ la restricción es ligera a moderada y es severa cuando excede 10 $mmol_c\ L^{-1}$ (Figura 9).

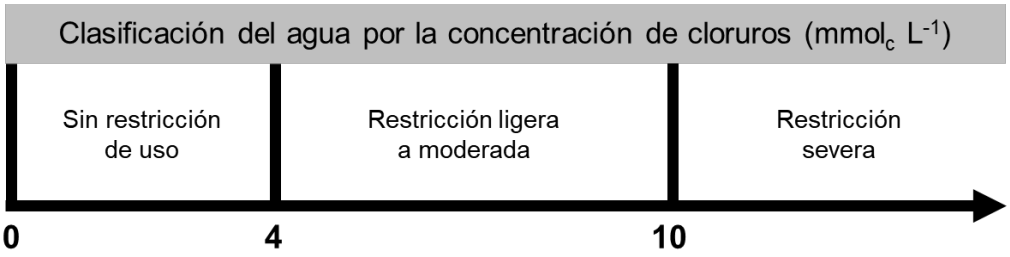


Figura 9. Escala de clasificación del riesgo por cloruros.

2.6.4.2 Sodio

El sodio es perjudicial para los cultivos por varios motivos: a) es tóxico para la mayor parte de las plantas; b) dificulta la absorción de otros cationes necesarios para las plantas (antagonismo iónico); c) puede alcalinizar el suelo con lo que dispersa a la fase coloidal, destruyendo la estructura y reduciendo la permeabilidad y d) por su elevada solvatación aumenta el volumen de agua no accesible por las plantas (Ortega y Orellana, 2007; Ortega, 1983). El sodio, además de su efecto indirecto por alteración de la estructura del suelo, provoca en las plantas daños similares a los originados por los cloruros y causa desequilibrios nutricionales que afectan la asimilación del calcio, magnesio y potasio (González, 2001; Maathuis, 2006).

La toxicidad del sodio no se diagnostica tan fácilmente como la toxicidad del cloruro, pero se han registrado casos claros de la primera como resultado de concentraciones relativamente altas de sodio en el agua. Los síntomas típicos de toxicidad son quemaduras de las hojas, quemaduras y tejido muerto a lo largo de los bordes exteriores de las hojas en contraste con los síntomas de toxicidad por cloruro que normalmente ocurren inicialmente en la punta extrema de la hoja. Normalmente se requiere un

período de tiempo prolongado (muchos días o semanas) antes de que la acumulación alcance concentraciones tóxicas. Los síntomas aparecen primero en las hojas más viejas, comenzando en los bordes exteriores y, a medida que aumenta la gravedad, se mueven progresivamente hacia adentro entre las venas hacia el centro de la hoja. Los cultivos sensibles incluyen frutas de hoja caduca, nueces, cítricos, aguacates y frijoles, pero hay muchos otros.

La restricción de uso para riego de acuerdo con la concentración de sodio depende del tipo de riego que se realice (si es riego superficial o por aspersión), sin embargo, una concentración mayor que 3.0 $mmol_c\ L^{-1}$ ya se considera con algún grado de restricción.

2.6.4.3 Boro

Actualmente se conoce que la función primordial del B es su papel estructural en la pared celular, lo cual indica que juega un papel determinante en el desarrollo de los tejidos; sin embargo, existe una creciente evidencia de un posible papel de B en otros procesos, como el mantenimiento de la función de la membrana plasmática y varias vías metabólicas (Bolaños *et al*., 2004). Recientemente se ha informado que la deficiencia de boro y la toxicidad inducen genes sensibles al estrés (Herrera-Rodríguez *et al.,* 2010). La deficiencia de boro inhibe el crecimiento de las partes vegetativas y reproductivas de las plantas, por lo que es necesario que la planta pueda disponer de este elemento en todas sus etapas fenológicas (Dell y Huang, 1997).

La toxicidad del boro se presenta en concentraciones arriba de 1.25 mg L^{-1} para la mayoría de las plantas (Gupta *et al*., 1985; Munns y Tester, 2008; Fox, 1968; Ryan *et al*., 1977; Verma, 1983). Las plantas pueden crecer normalmente en cultivos sobre arena con trazas de boro (0.03-0.04 mg L^{-1}) y se presenta toxicidad cuando la concentración llega a 1 mg L^{-1} (Fox, 1968; Richards *et al*., 1974) y es suficiente para ocasionar sensibilidad en plantas de limón y naranjo, en tanto que la alfalfa logra desarrollo máximo si el agua de riego posee de 1 a 2 mg L^{-1} (Kelley, 1963). Las aguas superficiales naturales rara vez contienen niveles tóxicos de boro, pero las aguas de manantiales y aguas de pozos pueden contener concentraciones tóxicas, principalmente en la cercanía de fallas tectónicas y en las zonas geotérmicas.

2.6.4.4 Fósforo de los fosfatos ($P\text{-}PO_4$)

El fosforo puede existir en aguas en solución o suspensión, en estado mineral y orgánico y en forma de diferentes compuestos. La interacción del fósforo con la salinidad es altamente dependiente de la especie y etapa de desarrollo de la planta, concentración y tipo de salinidad, así como de la concentración de P en el sustrato (Grattan y Grieve, 1994; Pal y Singh, 1985). En las directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego; Ayers y Wescot (1985) señalan que el contenido de fósforo en aguas de riego normalmente es de 0.0-2.0 mg L^{-1}.

La principal fuente de fósforo en el agua residual puede deberse a los detergentes presentes en las aguas residuales domésticas e industriales, ya que algunos detergentes contienen fosfato de sodio. Otra causa puede ser la lixiviación de fertilizantes fosfatados en áreas agrícolas (Velázquez-Machuca, 2001).

2.6.4.5 Sulfatos

Los sulfatos están presentes de forma natural en muchos minerales y se utilizan comercialmente, sobre todo en la industria química. Se liberan al agua procedentes de residuos industriales y mediante precipitación desde la atmósfera; no obstante, las concentraciones más altas suelen encontrarse en aguas subterráneas y provienen de fuentes naturales.

Junto con los cloruros, los sulfatos son los principales aniones presentes en las aguas y son importantes en suelos salinos, pero su control se efectúa adecuadamente considerando volúmenes extra de agua en riegos para asegurar su salida fuera de la zona radical. Las plantas pueden presentar sensibilidad a concentraciones altas de sulfatos ya que estas pueden limitar la absorción del sodio y alterar el balance catiónico óptimo dentro de la planta, tal sensibilidad se encuentra relacionada con la tendencia de las altas concentraciones de sulfatos a limitar la absorción de calcio por las plantas.

Con la disminución de calcio, se encuentran asociados los incrementos en la absorción de sodio y potasio, de tal manera que los efectos de la alta concentración de sulfatos en

el substrato pueden estar relacionados a una alteración del balance catiónico óptimo dentro de la planta (Richards *et al*., 1974).

El sulfato (SO_4) es relativamente común en el agua y no tiene un impacto importante en el suelo aparte de contribuir al contenido total de sal. El agua de riego con alto contenido de iones sulfato reduce la disponibilidad de fósforo para las plantas. Valores menores que 400 mg L^{-1} se considera aceptable en el riego, aunque depende mucho de su relación con otros iones y no se debe tomar por si solo como un parámetro para determinar la calidad del agua.

2.6.4.6 Nitrógeno de los nitratos ($N\text{-}NO_3$)

El nitrógeno contenido en el agua de riego se encuentra disponible para las plantas, por lo tanto, debe considerarse como parte integral del nitrógeno total requerido por los cultivos y del programa de fertilización. Por su parte, 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 provocará un retraso en la maduración y baja calidad del producto (Ayers y Westcot, 1985).

La alta concentración de nitratos y fosfatos puede atribuirse a la aplicación excesiva de fertilizantes que provoca lixiviados y contaminación del agua subterránea, además de inducir eutrofización de los cuerpos de agua (Pérez, 2018).

2.6.4.7 Silicio

El silicio es un elemento químico de gran importancia para plantas y animales. Es el segundo más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno. El silicio se encuentra principalmente como silicatos que forman rocas, sedimentos y está presente en casi todos los materiales parentales. Es uno de los componentes básicos en la mayoría de los suelos (desde 1% en los histosoles hasta 45% en podzoles muy antiguos desarrollados en arenas de cuarzo). Existen horizontes secundarios que están construidos casi en su totalidad por silicio (Osterrieth *et al*., 2019; Sommer *et al*., 2006).

Un reservorio importante de sílice en la Tierra se ha dado a través del tiempo geológico en las diatomeas, que son importantes para el ciclo biogeoquímico del silicio y la fijación global del CO_2 a través de la fotosíntesis. Según Conley y Carey (2015), el ciclo del silicio a lo largo de la historia del planeta Tierra está íntimamente relacionado con las tasas de intemperismo y la absorción biogénica. Los cambios en las tasas de intemperismo y la retención de silicio en la tierra han alterado la disponibilidad de sílice en los océanos durante cientos de millones de años. En el tiempo geológico, las concentraciones atmosféricas de CO_2 están fuertemente reguladas por la meteorización de silicatos minerales en los continentes. La fijación de carbono por diatomeas marinas silíceas contribuye aproximadamente a la mitad de la producción primaria neta marina.

Silicio en las plantas

El silicio no se considera tóxico para las plantas. Por el contrario, se considera como un elemento necesario para aminorar el daño causado por la toxicidad de otros elementos. Sobre su esencialidad se ha discutido mucho, pero actualmente se dice que es esencial solamente para las plantas que requieren altas cantidades de silicio para su desarrollo; algunas de estas plantas son cebada, girasol, remolacha y arroz. En el caso del arroz, la cantidad de silicio disponible es clave para mantener una producción sostenible, y, por el contrario, la falta de silicio puede limitar su producción (Nwite *et al*., 2019). Es importante tomar en cuenta que el arroz es el segundo cereal más consumido por el hombre (después del trigo) y un alimento básico para más del 40% de la población mundial. La importancia de su aporte calórico y la cantidad de personas que se benefician con su producción, coloca al arroz como una fuente importante de alimento y recursos para los países en vías de desarrollo (Tolentino, 2014). Lo anterior acentúa la importancia del silicio como un elemento que incide en la producción de arroz en el mundo.

Se ha comprobado que el silicio induce una excelente resistencia contra enfermedades relacionadas con *Rhizoctonia, Pyricularia, Helminthosporium, Rynchosporium, Sarocladium*; al ataque de insectos y al “acame” de las plantas por su acumulación en la epidermis de las hojas (Furcal y Herrara, 2013).

Desde un punto de vista fisiológico, para el crecimiento y desarrollo de las plantas, el silicio ha demostrado efectos benéficos sobre el crecimiento y el desarrollo de las plantas en el aumento de la producción de diversos cultivos. La aplicación de silicio puede ser un medio fácil para aumentar el rendimiento de los cultivos durante la sequía. Además, debido a que el silicio puede mejorar la tolerancia a la sequía de las plantas, su aplicación puede ayudar a reducir la necesidad de riego. Por lo tanto, la aplicación de silicio podría mejorar la producción de cultivos en condiciones climáticas y de suelo adversas.

Zhu y Gong (2013) hicieron una revisión de los avances recientes en la absorción, el transporte y la acumulación de silicio en las plantas y cómo el silicio alivia la toxicidad de la salinidad y el estrés por sequía. Los puntos principales que encontraron fueron los siguientes: (1) la absorción de silicio pasiva y activa puede coexistir en las plantas; (2) aunque se han identificado transportadores de silicio en algunas plantas, aún quedan por identificar más transportadores de silicio, y el proceso de transporte de silicio necesita mayor aclaración; (3) los mecanismos para la tolerancia a la salinidad y la sequía mediada por el silicio han sido ampliamente investigados a nivel fisiológico y bioquímico. Los aspectos fisiológicos incluyen aumentar la absorción de agua por las raíces, mantener el equilibrio de nutrientes, disminuir la pérdida de agua de las hojas y promover la tasa fotosintética. A nivel bioquímico, el silicio puede mejorar las capacidades de defensa antioxidante al aumentar las actividades de las enzimas antioxidantes y el contenido de antioxidantes no enzimáticos; el silicio también puede contribuir al ajuste osmótico y aumentar las actividades enzimáticas fotosintéticas; y (4) el silicio puede regular los niveles de hormonas vegetales endógenas en condiciones de estrés, mientras que la participación del silicio en la señalización y regulación de la expresión génica relacionada con el aumento de la tolerancia al estrés aún no se ha explorado. En la Figura 6 se observan los mecanismos de tolerancia a la salinidad y a la sequía en los que interviene el silicio.

Suriyaprabha *et al*. (2012) estudiaron el efecto de las nanopartículas de sílice (NPS) extraídas de la cáscara de arroz sobre los cambios fisiológicos y anatómicos durante el crecimiento del maíz y realizaron una comparación con sílice granulado. Los cambios fisiológicos observados muestran que la expresión de compuestos orgánicos como

proteínas, clorofila y fenoles favoreció al maíz tratado con NPS especialmente a 15 kg ha^{-1} en comparación con el silicio granulado y el control. Los regímenes de sílice a nanoescala a con una dosis de 15 kg ha^{-1} tienen una respuesta positiva del maíz que el silicio granular, lo que ayuda a mejorar la agricultura sostenible del cultivo de maíz como fuente alternativa de fertilizante de sílice.

El silicio en el suelo

El silicio y los silicatos forman una parte importante de la fracción mineral de la mayoría de los suelos. El silicio se encuentra en las soluciones del suelo casi por completo como ácido monosilícico $Si(OH)_4$. El silicio que se encuentra en el suelo procede principalmente de la degradación de las rocas ígneas. En él se encuentra SiO_2, y como constituyente de muchos silicatos y minerales arcillosos. Las plantas absorben el silicio en forma de $Si(OH)_4$ que se encuentra en la solución del suelo y su concentración está regulada por el pH, que también limita sus reacciones de adsorción con hidróxidos de hierro y aluminio.

Se ha demostrado una correlación entre el silicio y el fósforo. El aporte al suelo de fertilizantes silícicos solubles incrementa la asimilación de fósforo por la planta, posiblemente debido a un intercambio de los fosfatos adsorbidos a los hidróxidos por silicatos.

El uso de fertilizantes de silicio comenzó en la década de 1950 en Japón y ahora está muy extendido, siendo las fuentes más comunes las escorias industriales (Haynes, 2014), así como la paja vegetal, típicamente de arroz. Estas aplicaciones han sido efectivas para mejorar el rendimiento y la calidad de muchos cultivos agrícolas, incluidas las monocotiledóneas como el arroz, el trigo, el maíz, la cebada, el mijo, el sorgo y la caña de azúcar, y las dicotiledóneas como el algodón y la soja (Coskun *et al*., 2016).

2.6.5 Otros problemas originados por la calidad del agua

2.6.5.1 Exceso de nitrógeno

El nitrógeno es un nutriente vegetal y estimula el crecimiento de los cultivos. El nitrógeno natural del suelo o los fertilizantes agregados son las fuentes habituales, pero el nitrógeno en el agua de riego tiene el mismo efecto que el nitrógeno fertilizante aplicado al suelo y un exceso causará problemas, al igual que un exceso de fertilizante. Si hay cantidades excesivas presentes o aplicadas, la producción de varios cultivos comúnmente cultivados puede verse afectada debido a la sobreestimulación del crecimiento, la madurez tardía o la mala calidad.

Las formas más fácilmente disponibles de nitrógeno son nitrato y amonio, pero el nitrato (NO_3 -N) ocurre con mayor frecuencia en el agua de riego. El nitrógeno de amonio rara vez está presente en exceso de 1 mg L^{-1} a menos que se agregue fertilizante de amoníaco o aguas residuales al suministro de agua. La concentración en la mayoría de las aguas superficiales y subterráneas suele ser inferior a 5 mg L^{-1} de NO_3-N pero algunas aguas subterráneas inusuales pueden contener cantidades superiores a 50 mg L^{-1}. El agua de drenaje desde debajo de la zona de la raíz con frecuencia tiene niveles más altos de nitrógeno debido a la lixiviación profunda de los fertilizantes. Dado que el nitrógeno está presente en tantos suministros de agua, se recomienda controlar el contenido de nitrógeno de toda el agua de riego y que el nitrógeno presente se incluya como parte integral del programa de fertilización planificado.

2.6.5.2 pH inadecuado para suelos fértiles

El pH es una de las mediciones que aportan más información acerca de las características del suelo. Por ejemplo, la disponibilidad de nutrientes y la toxicidad de otros elementos están relacionadas con este parámetro. En el agua de riego, el rango de pH aceptable es de 6.5 a 8.4 (Ayers y Westcot, 1985). Un valor superior o inferior a este rango, sugiere una evaluación de otros factores, para corregir los problemas que conduzcan a desequilibrios nutricionales o toxicidad por iones específicos.

2.6.5.3 Acumulaciones en hojas, flores y frutos

El agua de riego que contiene una alta proporción de sales ligeramente solubles como calcio, bicarbonato y sulfato presenta un problema continuo de formación de escamas blancas en las hojas o frutos cuando se usan rociadores. Aunque no hay toxicidad involucrada, los depósitos a menudo se acumulan en las hojas y la fruta y son de especial preocupación cuando se cultivan flores, vegetales o frutas para el mercado de productos frescos. El depósito reduce la comerciabilidad de la fruta y el follaje y, en el caso de frutas como manzanas y peras, requiere un tratamiento costoso (lavado con ácido) antes de la comercialización. (Los pequeños emisores de goteo también están sujetos a deposiciones que se acumulan cerca de pequeñas aberturas, lo que resulta en obstrucción.

2.6.5.4 Problemas de magnesio

Los suelos que contienen altos niveles de magnesio intercambiable a menudo causan problemas de infiltración en el suelo. Aunque no está bien documentado el papel del magnesio en la causa de este problema, en la actualidad existe un consenso en que el magnesio actúa en los suelos de una manera que se parece más al calcio que al sodio, y que el suelo lo adsorbe preferentemente en un grado mucho mayor que el sodio, pero en un grado ligeramente menor que el calcio.

En un agua dominada por magnesio (proporción de Ca/Mg<1) o en un suelo de magnesio (proporción suelo-agua de Ca/Mg<1), el efecto potencial del sodio puede aumentar ligeramente. En otras palabras, un valor de RAS dado mostrará un poco más de daño si la relación Ca/Mg es menor que 1. Cuanto más baja es la relación, más dañina es la RAS.

2.7 Sales hipotéticas

Al introducir al suelo una muestra de agua con una determinada composición, se debe de tener presente que los cationes y aniones que la conforman son iones que, al entrar en contacto con el complejo de intercambio, pueden formar parte de reacciones de

intercambio llegando a formar sales hipotéticas (Sánchez-Bernal *et al*., 2012), el tipo de sal dependerá de su solubilidad, la concentración y de las propiedades físicas y químicas de los iones como la movilidad.

Como se ha mencionado, la formación hipotética de sales está directamente relacionada con la solubilidad de las sales, es decir, la movilidad de los iones que las conforman. Sánchez-Bernal *et al*. (2012) estudiaron el desplazamiento de sales de la capa arable mediante su lixiviación con aguas residuales tratadas, como alternativa de uso sustentable para evitar su descarga sin tratar en la zona intermareal de Colotepec, Oaxaca, así como la sobre extracción de aguas subterráneas por el riego. Se experimentó en condiciones de invernadero el lavado de sales en columnas de suelo colectadas en campo. Los resultados que obtuvieron fueron los siguientes:

Las aguas experimentales solubilizaron en los primeros extractos y a través del curso de lavado una gran cantidad de iones Na^{+}, Mg^{2+} , Cl^{-} y SO_4^{2-}, y en menor cantidad iones Ca^{2+}, K^{+}, HCO_3^{-} y CO_3^{2-}, en ese orden, lo que hace evidente que los iones citados en primer término tienden a formar las sales hipotéticas NaCl, $MgCl_2$ y Na_2SO_4 cuya alta solubilidad (264 g L^{-1}, 353 g L^{-1} y 280 g L^{-1} respectivamente), permite que sean las más lixiviadas en comparación con las sales de baja solubilidad como el $Ca(HCO_3)_2$ y el $Mg(HCO_3)_2$ (0.013 g L^{-1}), o la sal $CaSO_4$ (1.9 g L^{-1}) formados por el segundo grupo de iones que son poco móviles y precipitan a horizontes medios e inferiores, pero no son lixiviados.

Los resultados del experimento demuestran la relación de la solubilidad con la formación hipotética de sales. Este comportamiento guarda similitud con lo descrito por Volovuyeb, citado por Sánchez-Bernal *et al*. (2012) quien determinó que en un proceso de lavado son desplazadas con más intensidad las sales de fácil solubilidad, mientras que las de mediana y baja solubilidad son lixiviadas en menor cantidad.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción de la zona de estudio

El presente trabajo de investigación estuvo dirigido a la zona de estudio denominada “alto y bajo Pánuco”, que hace referencia a las diferencias altitudinales que existen en la cuenca del río Pánuco, nombrada por la CONAGUA como región hidrológica (RH) número 26 Pánuco. Su territorio abarca los estados de Tamaulipas, Veracruz, San Luis Potosí, Querétaro, Guanajuato, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala, México y CDMX (Figura 10). Esta cuenca, cuyo cauce principal nace en el estado de México y descarga sus aguas en el Golfo de México, tiene sus mayores altitudes en los volcanes Popocatépetl e Iztaccíhuatl, que superan los 5 000 msnm. El río Pánuco, que es la corriente principal, adquiere varios nombres a lo largo de su recorrido, entre ellos Moctezuma y Tula.

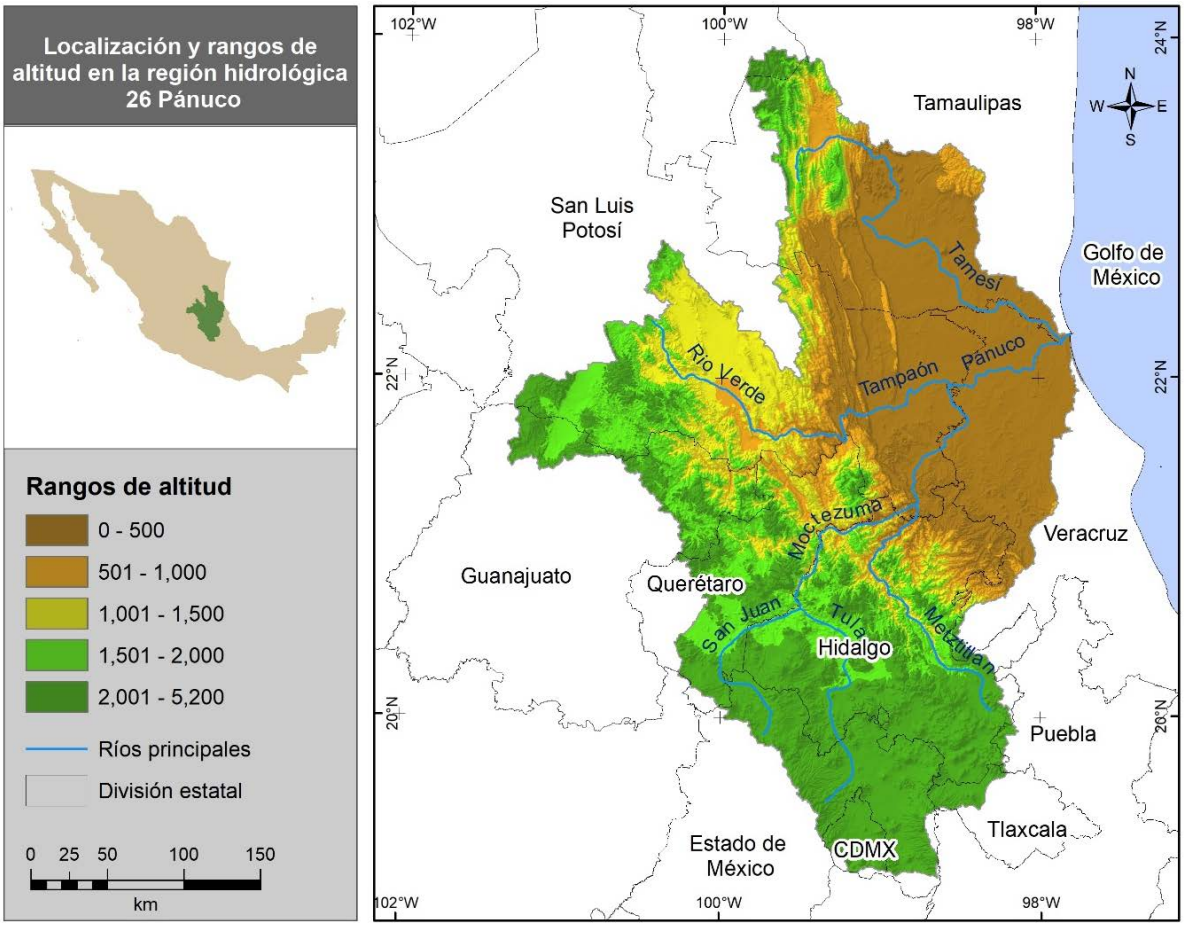


Figura 10. Localización y altitudes de la región hidrológica (RH) 26 Pánuco.

3.1.1 Fisiografía

La Región Hidrológica 26 Pánuco abarca parte de cuatro provincias fisiográficas: Eje Neovolcánico, Sierra Madre Oriental, Llanura Costera del Golfo Norte y Mesa del Centro. Los sitios donde se tomaron las muestras de agua abarcan las primeras tres regiones.

La provincia del Eje Neovolcánico llega del oeste por el Oceano Pacífico y se dirige hacia el este en dirección del Golfo de México. Consiste en una enorme masa de rocas volcánicas de diferentes tipos, que se acumuló en varias etapas sucesivas desde hace unos 35 millones de años. En su territorio se encuentra la cadena de grandes volcanes denominada Eje Neovolcánico: Volcán de Colima, Tancítaro, Zinantécatl (Nevado de Toluca), Popocatépetl, Iztaccíhuatl, Matlalcuéyetl (Malinche), y Citlaltépetl (Pico de Orizaba).

La provincia Sierra Madre Oriental está constituida por rocas sedimentarias de origen marino, calizas y lutitas de la era Mesozoica, principalmente. Los estratos de estas rocas forman pliegues que dan origen a crestas con alturas sobre el nivel del mar de entre 2,000 y 3,000 m. Abarca parte de los estados de San Luis Potosí, Querétaro, Hidalgo, Tamaulipas, Veracruz, Puebla, Nuevo León, Coahuila y Chihuahua.

La provincia Llanura Costera del Golfo Norte se ensancha hacia el norte de México a lo largo del río Bravo y comparte territorio entre México y Estados Unidos. Presenta las características de una costa emergida y se interrumpe por sierras aisladas, lomeríos con extensas llanuras y llanuras costeras.

La cuenca o Región Hidrológica 26 nace en el Eje Neovolcánico y su corriente principal atraviesa la Sierra Madre Oriental, en la zona de altitud media que pertenece al Carso Huasteco, y desemboca en la Llanura Costera del Golfo, con el nombre de río Pánuco. La región del Valle del Mezquital pertenece al Eje Neovolcánico, dentro de la subprovincia denominada Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo (Figura 11).

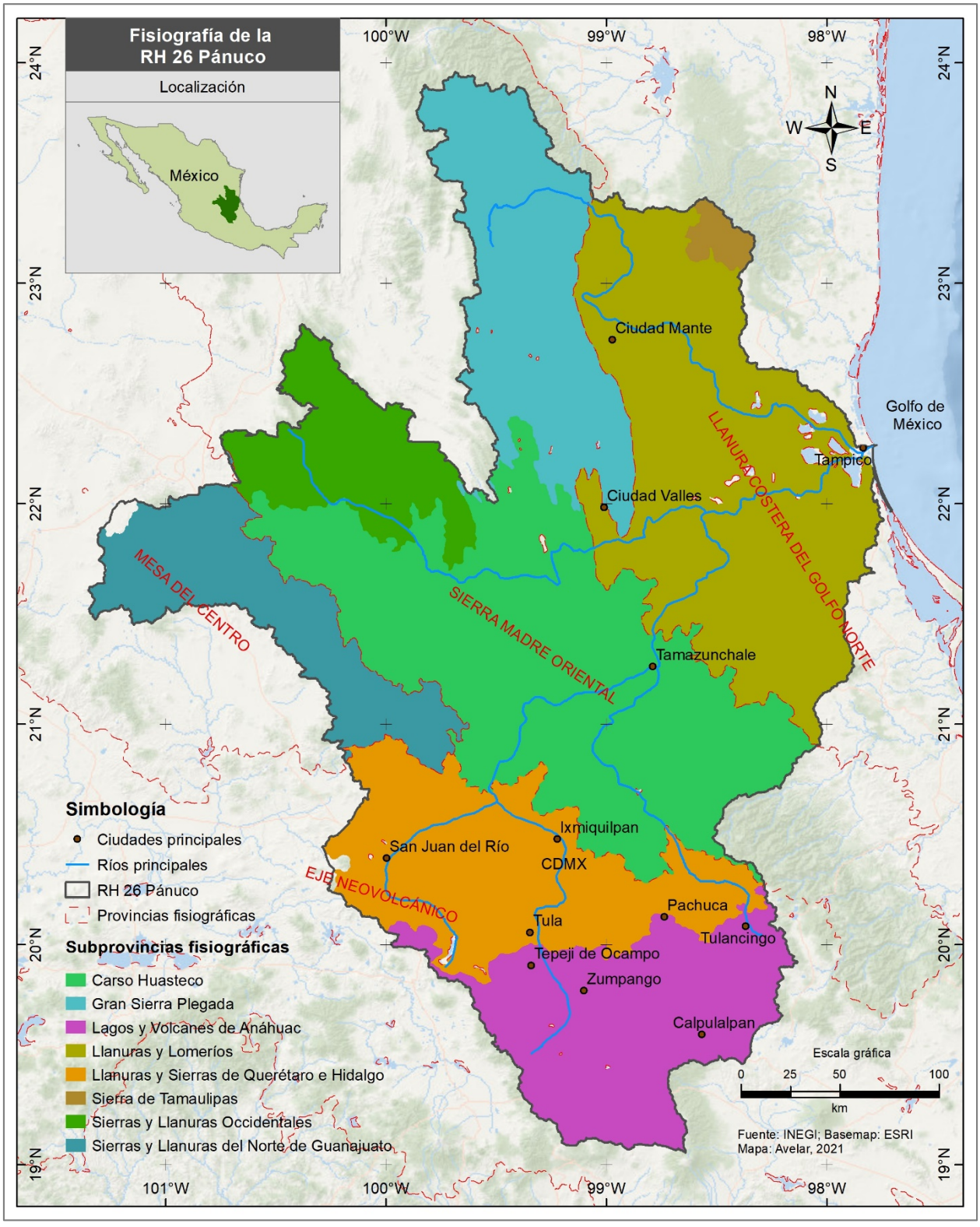


Figura 11. Mapa de la fisiografía de la región hidrológica 26 Pánuco.

3.1.2 Geología

Los elementos geológicos tienen correspondencia con la fisiografía de la región, y la región hidrológica 26 abarca fracciones de cuadro provincias fisiográficas (Figura 12).

La Sierra Madre Oriental emerge desde el Golfo de México y va hacia el norte y noreste con elevaciones de hasta 2 500 msnm. Esta sierra, constituida principalmente por rocas sedimentarias mesozoicas depositadas sobre un basamento paleozoico y precámbrico, surge como producto del levantamiento y deformación de rocas, principalmente mesozoicas (Zenteno, 1985). Debido a que representa un cinturón de rocas plegadas y falladas muy importante, se le podría considerar una cordillera. Los tipos de sustratos geológicos predominantes son del tipo sedimentario como las calizas y lutitas. La intensa precipitación sobre el corazón de la Sierra Madre Oriental ha propiciado la disolución de las rocas calizas dando como resultado manifestaciones cársicas (INEGI, 1981).

La Llanura Costera del Golfo Norte presenta las características de una costa emergida que se ve interrumpida por algunas sierras aisladas. Las planicies costeras del golfo se encuentran cubiertas por una cuña de rocas sedimentarias consolidadas y no consolidadas del Cenozoico. Estos sedimentos descansan sobre las rocas del Mesozoico y tienen un espesor variado, desde pocos metros hasta más de 6 000 m en la zona costera. Las rocas cenozoicas consisten en su mayoría en arena, limo y arcilla, derivados de la erosión de las zonas continentales altas. En estos sedimentos se se encuentran sustratos geológicos de lutitas y areniscas predominantemente.

El Eje Neovolcánico Transmexicano constituye una franja volcánica del Cenozoico superior que cruza transversalmente la república mexicana. Está formado por una gran variedad de rocas volcánicas que fueron emitidas a través de un importante número de aparatos volcánicos, algunos de los cuales constituyen las principales alturas del país.

La composición petrográfica de las rocas que conforman el Eje Neovolcánico es muy variable, pero predominan las rocas volcánicas cenozoicas que datan del Terciario y Cuaternario. Son abundantes los derrames y productos piroclásticos de composición andesítica (Zenteno, 1985).

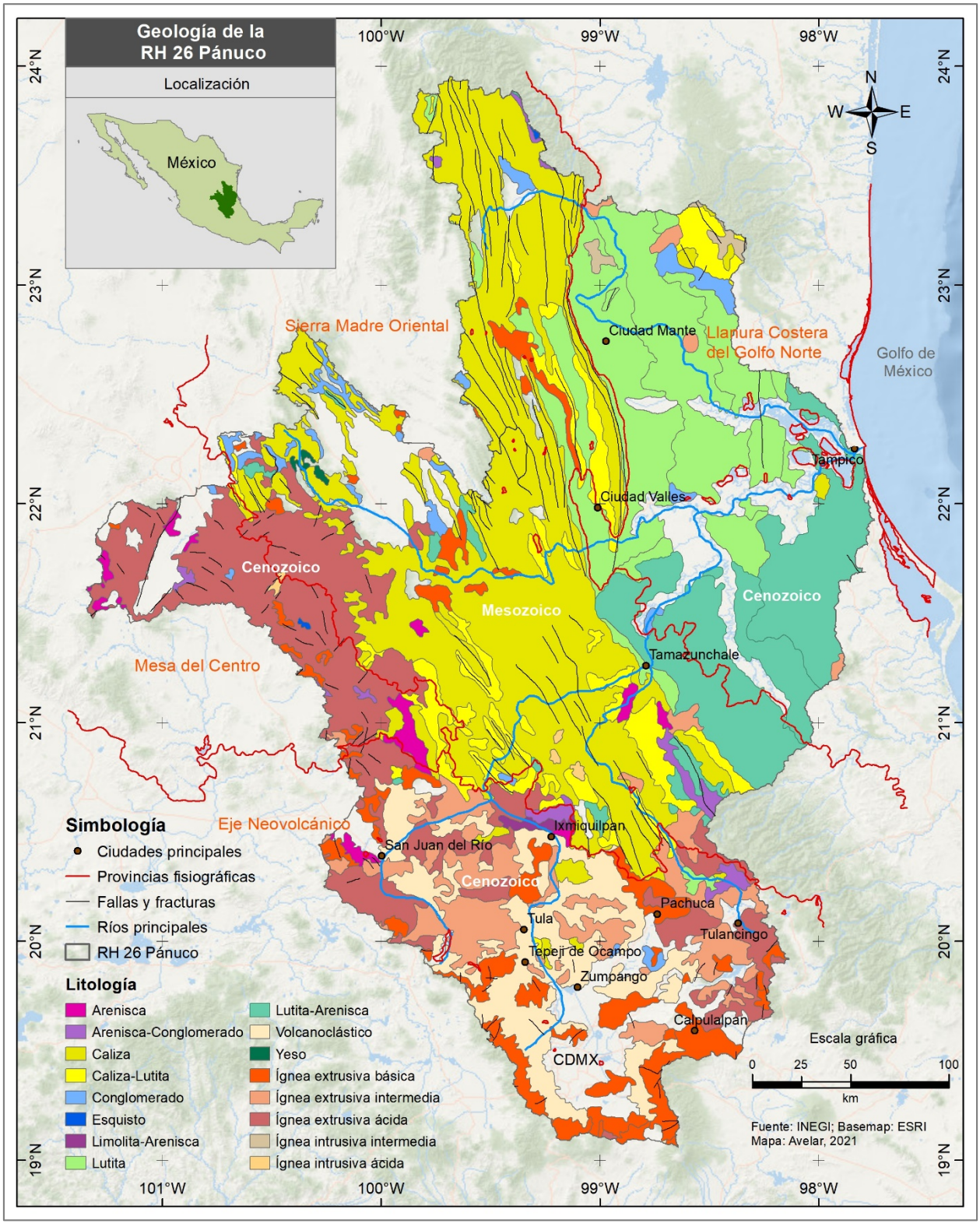


Figura 12. Mapa de la geología de la región hidrológica 26 Pánuco.

3.1.3 Suelos

Por la interacción de los factores de formación del suelo (clima, biota, relieve, material parental y tiempo) y la existencia de múltiples procesos pedogenéticos, existe una amplia variabilidad espacial de suelos y sus propiedades físicas, químicas y biológicas. De acuerdo con el conjunto de datos vectoriales edafológicos escala 1: 250 000, serie II del INEGI, en la RH 26 existen 21 grupos principales de suelos. Los que predominan (por la superficie que abarcan) en esta región, de acuerdo con su posición geográfica son tres: Vertisol en la parte baja de la cuenca, Leptosol en la zona media (principalmente en la Sierra Madre Oriental) y Phaeozem en la parte alta de la cuenca (Figura 13).

Los suelos Vertisol y Phaeozem son medianamente profundos y ricos en materia orgánica. Alrededor del 18% de los suelos de México pertenecen a estos grupos. Los Vertisoles tienen alto contenido de arcilla, lo que le da una textura fina, caracterizada por un deficiente drenaje interno y aireación. Los Feozems tienen alto contenido de materia orgánica, textura de media a fina, drenaje interno moderado y buena aireación. En la zona central del país, los suelos Phaeozem se encuentran en planicies lacustres y fluvioaluviales o sobre depósitos volcanoclásticos y aluviocoluviales en zonas templadas y húmedas. Las características de estos suelos hacen que sean empleados para la agricultura en diferentes formas de manejo (Salazar-Ledesma *et al*., 2018).

Los Leptosoles son de escasa profundidad, en muchos casos con menos de 10 cm, los que son llamados leptosoles líticos. Un subgrupo, los leptosoles rendzicos se desarrollan sobre rocas calizas y son muy ricos en materia orgánica. En los casos cuando la profundidad es suficiente, los leptosoles pueden ser muy aptos para la producción agrícola, pero en otros los vuelve áridos y el contenido elevado de calcio puede inmovilizar los nutrientes minerales para las plantas (SEMARNAT, 2002).

En la región del Valle del Mezquital, Hidalgo, los suelos predominantes son Vertisol, Phaeozem y Leptosol, sin embargo, predominan los dos primeros, que tienen mayor aptitud para la agricultura.

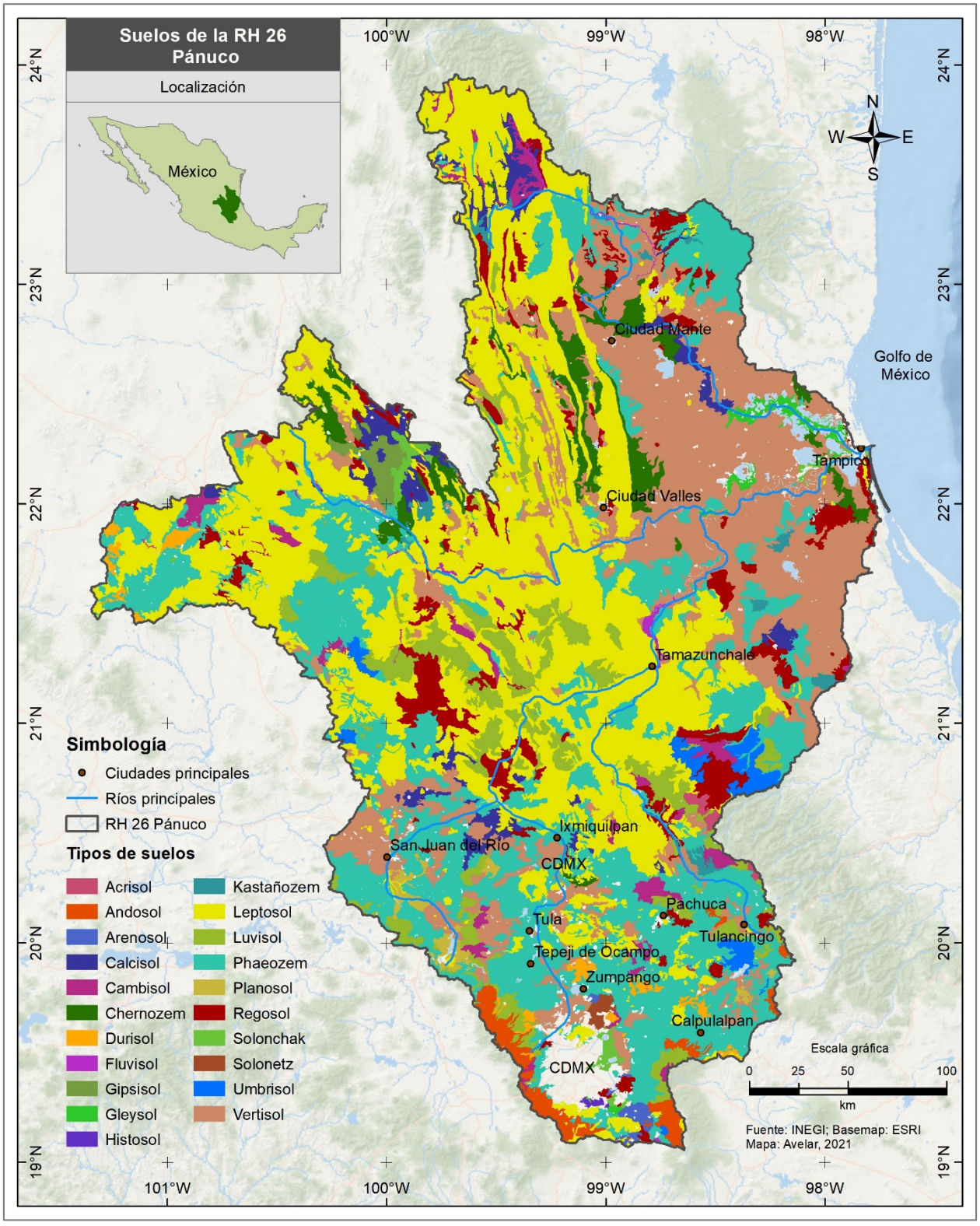


Figura 13. Mapa de los tipos de suelos en la región hidrológica 26 Pánuco.

3.1.4 Clima

En la región hidrológica 26 Pánuco existe una gran variedad de climas, sin embargo, tres de ellos son predominantes: templado subúmedo en la zona del Valle de México, semiárido templado en el Valle del Mezquital y cálido subúmedo en la llanura costera del Golfo de México (Figura 14).

El clima templado subúmedo abarca poco más del 20% del territorio mexicano; el estado de México casi en su totalidad pertenece a este tipo de clima, cuyas temperaturas medias anuales son menores a 18°C y con precipitación media anual menor a 1 000 mm.

En el clima del Valle de México tienen influencia las grandes corrientes atmosféricas que invaden alternadamente el centro de México: los alisios húmedos (de mayo a octubre) y los vientos secos y frescos del oeste provenientes de Norteamérica en el resto del año. El clima es templado con lluvias en verano, excepto en dos pequeñas regiones de clima seco estepario, una en la parte central, que coincide con el vaso del antiguo lago de Texcoco, y la otra en la porción noreste, en los llanos de Apan, estado de Hidalgo.

El clima semiárido es característico de algunas regiones de Tamaulipas, Hidalgo, Puebla y Oaxaca. La denominada zona semiárida hidalguense debe su aridez a su posición de sotavento de la Sierra Madre Oriental. El Valle del Mezquital que abarca los valles de Actopan, Ixmiquilpan y Zimapán es característico de la zona semiárida hidalguense.

Los climas cálidos se dividen en húmedos y subhúmedos. En la primera categoría la precipitación es de 2 000 a 4 000 mm anuales y en la segunda va de 1 000 a 2 000 mm anuales. La temperatura oscila entre 22° C y 26° C, con regiones en donde se superan los 26° C. Estos climas se extienden a lo largo de las vertientes del Pacífico y el Golfo de México. En la región hidrológica 26 el clima cálido subhúmedo predomina en la llanura costera del Golfo.

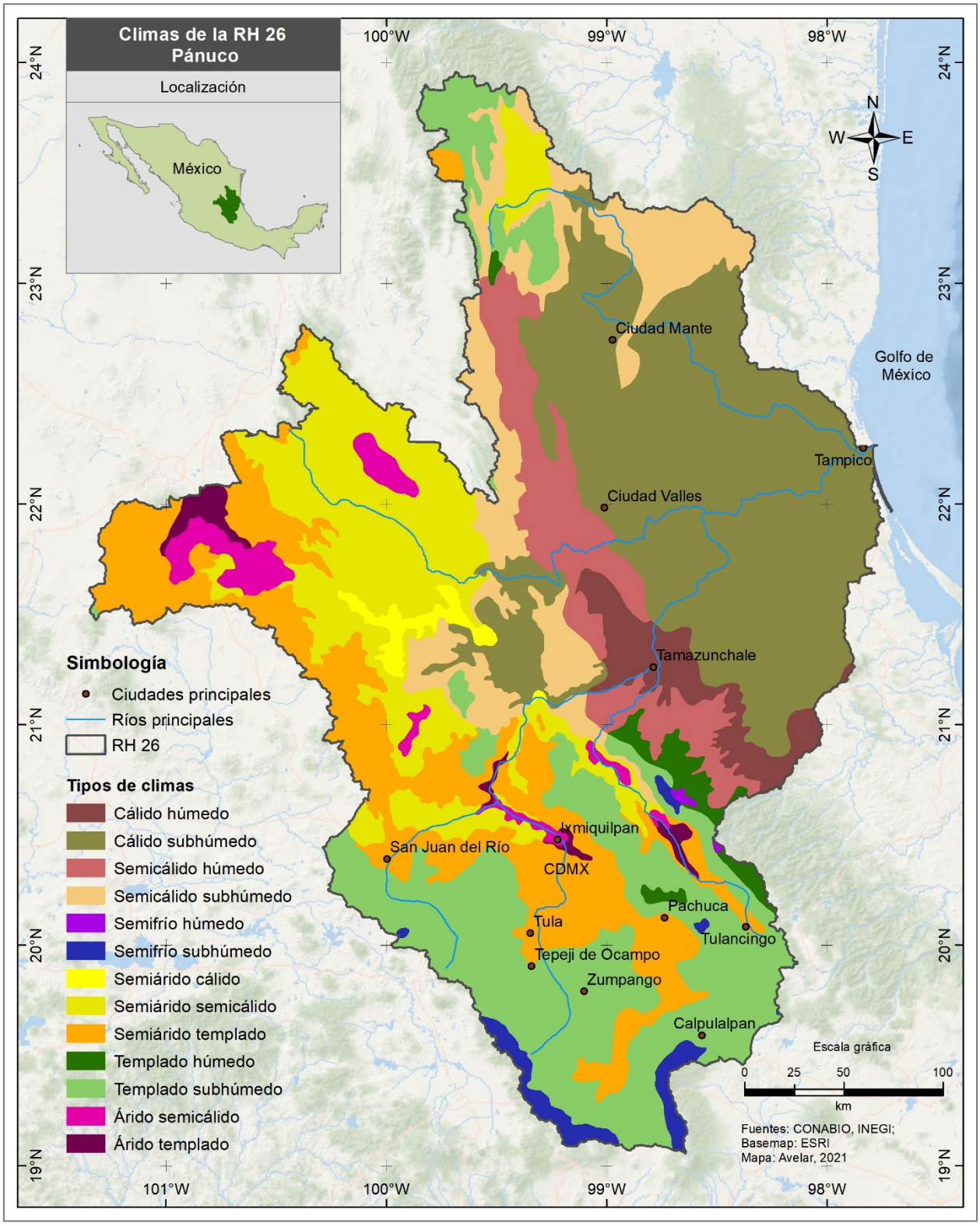


Figura 14. Mapa de los tipos de climas en la región hidrológica 26 Pánuco.

3.1.5 Uso del suelo y vegetación

Se pueden distinguir claramente las diferencias en los usos de suelos preponderantes de la zona alta, media y baja de la Región Hidrológica 26 (Figura 15).

En la parte más alta o región sur, se encuentra la zona de uso urbano denominada Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). De acuerdo con Espejel (2019), "la demarcación y división administrativa llamada −desde el 22 de diciembre de 2005− ZMVM abarca 59 municipios del Estado de México (11,168,301 habitantes), 16 delegaciones del Distrito Federal (8,851,80 habitantes) y el municipio de Tizayuca del Estado de Hidalgo (97,461 habitantes), la región comprende 20,116, 842 pobladores y una superficie de 7,854 km²". Como es de esperarse, la población y la superficie conurbada han aumentado hasta la fecha actual.

Continuando hacia el norte, se encuentra una zona agrícola muy importante que incluye 12 distritos de riego (DR), siendo los más importantes Tula y Alfajayucan, que abarcan juntos alrededor de 90 000 ha. De acuerdo con la CONAGUA (2017), los cultivos más importantes por superficie en el DR 003 Tula son alfalfa, maíz, avena forrajera, frijol, cebada forrajera y hortalizas. En el DR 100 Alfajayucan los cultivos más importantes por superficie son alfalfa, maíz, avena forrajera, chile verde, calabacita y tomate de cáscara.

En la parte media de la cuenca, especialmente en lo que corresponde a la Sierra Madre Oriental, se pueden encontrar bosques mesófilos de montaña, bosques de pino y encino, así como abundante vegetación secundaria arbórea y arbustiva.

En la parte baja de la cuenca, especialmente en la Llanura Costera del Golfo Norte, se pueden encontrar grandes extensiones de pastizal cultivado y en menor extensión agricultura de temporal y de riego. En la parte baja también se encuentran seis distritos de riego, pero el más importante es el 092 Río Pánuco. El DR 092 se divide en 092A Río Pánuco-Unidad Las Ánimas, 092B Río Pánuco-Unidad Chicayán y 092C Río Pánuco-Unidad Pujal Coy. En esta zona agrícola de la parte baja de la cuenca se cultiva sorgo, maíz, caña de azúcar, soya y pasto estrella, principalmente (CONAGUA, 2017).

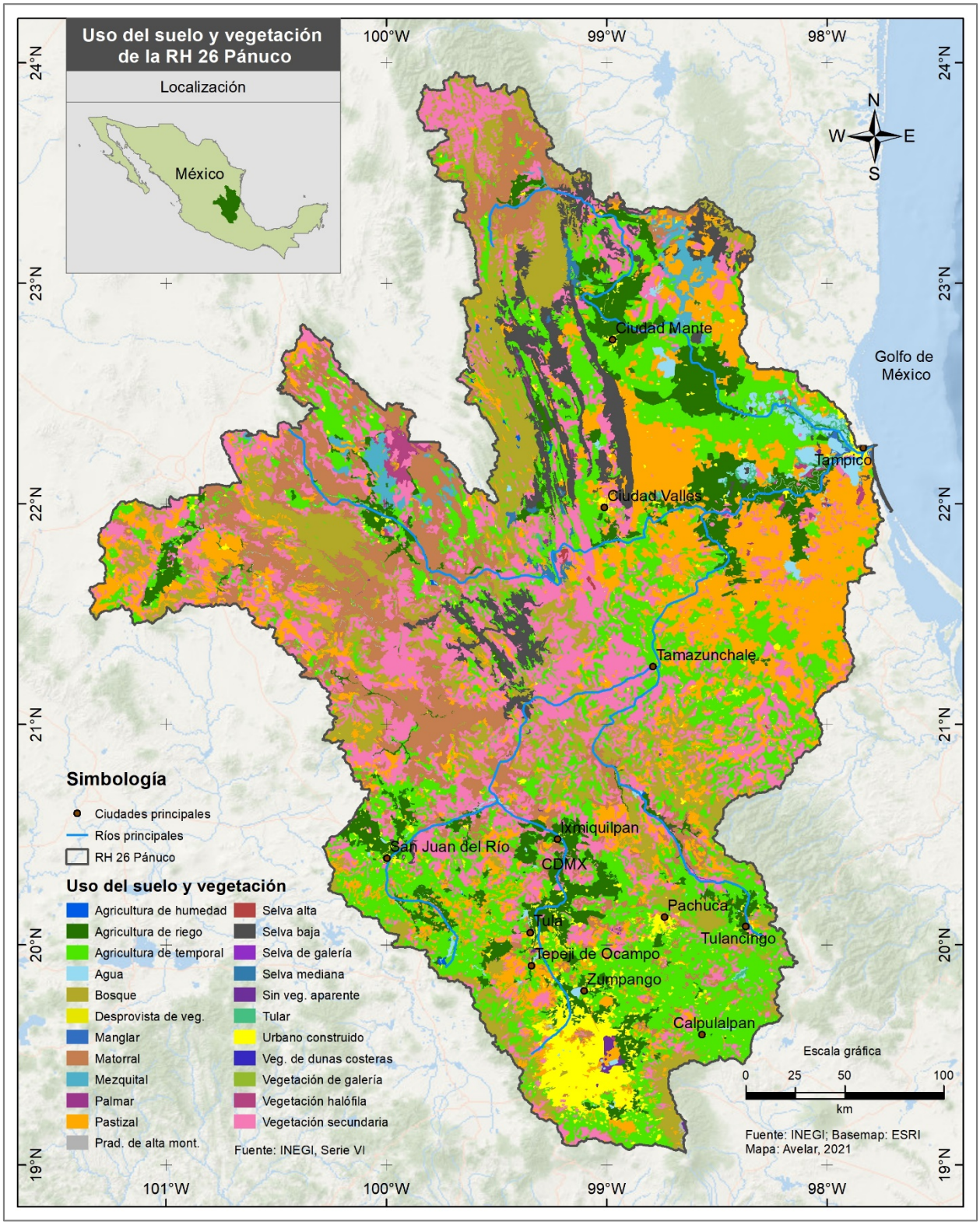


Figura 15. Mapa del uso del suelo y de la vegetación en la región hidrológica 26 Pánuco.

3.1.6 Hidrología

El río Pánuco nace con el nombre de río San Jerónimo en el cerro de La Bufa, localizado en el municipio de Jiquipilco, al norte del estado de México. Las aguas del río San Jerónimo son controladas por las presas Taxhimay y Requena (en el municipio de Villa del Carbón) donde cambia su nombre a río Tula. La corriente se dirige hacia el norte y atraviesa el municipio de Tula donde se le unen afluentes por el lado poniente hasta llegar a la presa Endhó. El río Tula recibe las aguas residuales del Valle de México mediante tres conductos: el Emisor Poniente que desemboca en el Tajo de Nochistongo; el Gran Canal del Desagüe que descarga a través de los túneles de Tequisquiac al río Salado (afluente del río Tula); y el Emisor Central, que descarga al río El Salto (afluente del río Tula). Estas tres salidas constituyen el sistema de drenaje principal de la Ciudad de México.

La presa Endhó, inaugurada en el año 1957, al principio almacenaba el agua del río Tula. Después de la construcción del Emisor Central en 1975, la presa comenzó a recibir las aguas negras de la Ciudad de México y del corredor industrial Cuautitlán-Tepeji-San Juan del Río, que a su vez fueron dirigidas a los distritos de riego 003 Tula, 100 Alfajayucan y 112 Ajacuba (García-Salazar, 2019).

El río Tula pasa por la ciudad de Ixmiquilpan, Hidalgo, y llega a la presa Zimapán, donde se une con el río San Juan. A partir de este punto, la corriente principal adquiere el nombre de río Moctezuma, y en su recorrido hacia el norte se le une el río Extoraz. El río Moctezuma se introduce en la Sierra Madre Oriental, donde la topografía es cada vez más abrupta a medida que la la corriente desciende hacia el bajo Pánuco. Cerca de Tamazunchale se le une el río Amajac por la margen derecha. En la zona costera, por la margen derecha se le une el río Tempoal y a unos 60 km adelante el río Tampaón por la margen izquierda.

Después de la unión de los ríos Tempoal y Tampaón, la corriente adquiere el nombre de río Pánuco y sigue su trayectoria hacia el Golfo de México, donde se pueden encontrar pequeñas lagunas en los márgenes. Unos 16 km antes de su desembocadura en la Barra de Tampico, el río Pánuco recibe por su margen izquierdo la aportación del río Tamesí (Figura 16).

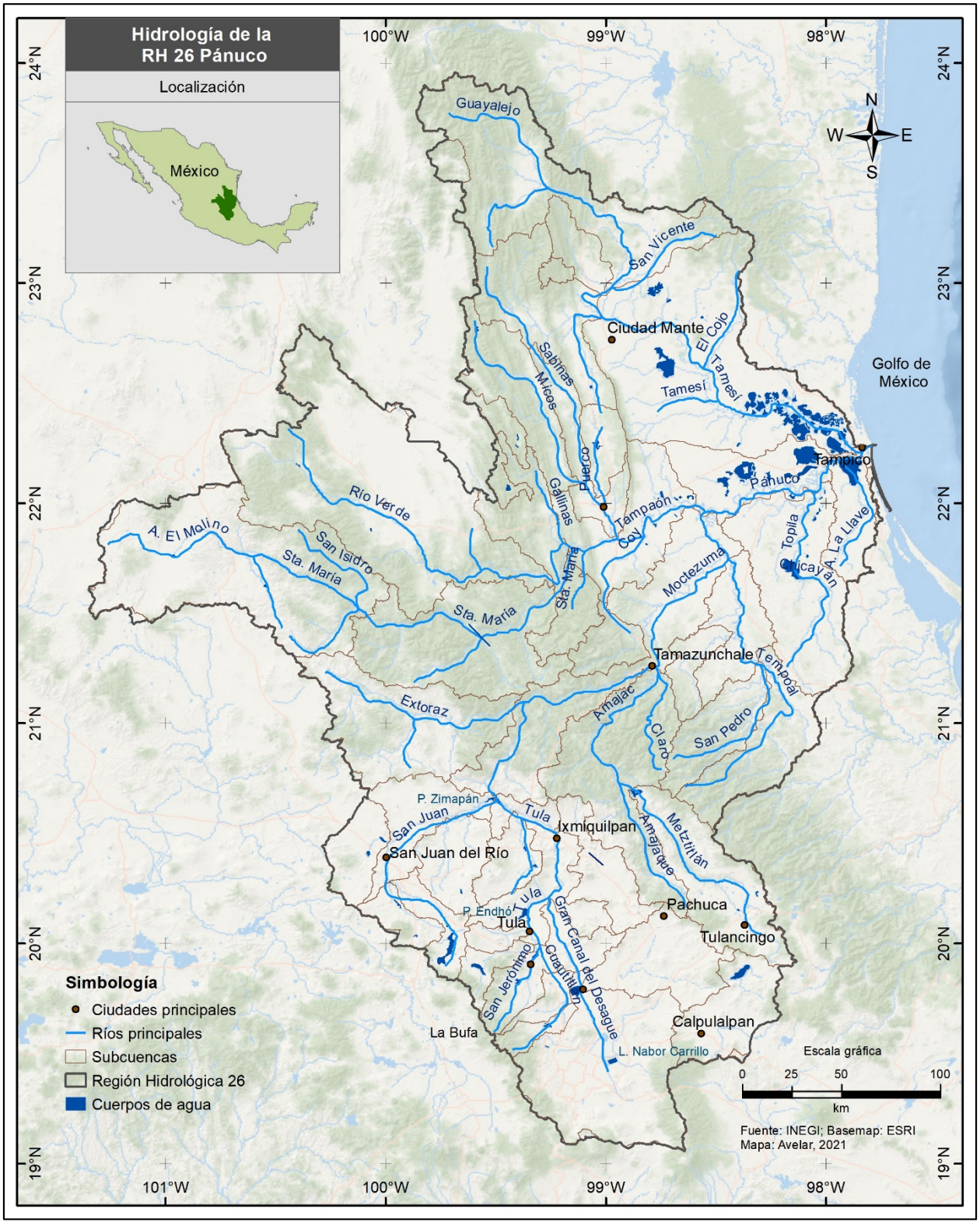


Figura 16. Mapa de la hidrología de la región hidrológica 26 Pánuco.

3.2 Toma de muestras

Para realizar el trabajo de investigación en campo, se realizaron dos expediciones a través de la cuenca del río Pánuco, con el fin de realizar la observación de cada sitio y la toma de muestras de agua para su análisis. La primera expedición se realizó en el periodo de primavera del año 2018 y la segunda en el verano de 2019, recorriendo un total de 1,923 y 2,229 km, respectivamente. Se muestrearon 84 sitios en el primer recorrido (Figura 17) y 98 en el segundo (Figura 18), siguiendo una logística similar en ambos recorridos.

Los dos recorridos de muestreo y observación se iniciaron en la cuenca del Valle de México, entre el Lago de Zumpango y el Lago Nabor Carrillo. Se continuó con el recorrido en dirección a la presa Endhó, y siguiendo la dirección del río Tula se abarcó gran parte de los distritos de riego 003 Tula y 100 Alfajayucan, en el Valle del Mezquital, hasta llegar a la presa Zimapán. Se continuó recorriendo y muestreando el río Moctezuma por la Sierra Madre Oriental, hasta llegar a la ciudad de Tamazunchale, San Luis Potosí; en los alrededores se tomaron muestras del río Claro y el río Amajac. Por la zona costera del Golfo de México se llegó hasta la incorporación del río Tempoal con el río Moctezuma. En el periodo de verano de 2019 el recorrido incluyó el río Tampaón y el río Coy en dirección a Ciudad Valles, San Luis Potosí; además de un recorrido por el río Pánuco, hasta la ciudad de Pánuco, Veracruz.

Con el fin de contar con un estudio más diverso de los diferentes cuerpos de agua, se tomaron muestras de ríos, canales de riego, drenes, lagos, presas y manantiales en diferentes sitios geográficos de los estados de Hidalgo, México, San Luis Potosí, Veracruz y Querétaro; aunque por lo menos el 70% de las muestras se concentraron en el estado de Hidalgo. El procedimiento de muestreo estuvo basado en las normas oficiales mexicanas NMX-AA-3-1980 (SCFI, 1980), que establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, y la NMX-AA-014-1980 (SCFI, 1980), que establece los lineamientos generales y recomendaciones para el muestreo en cuerpos receptores de aguas superficiales, excluyendo aguas estuarinas y aguas marinas.

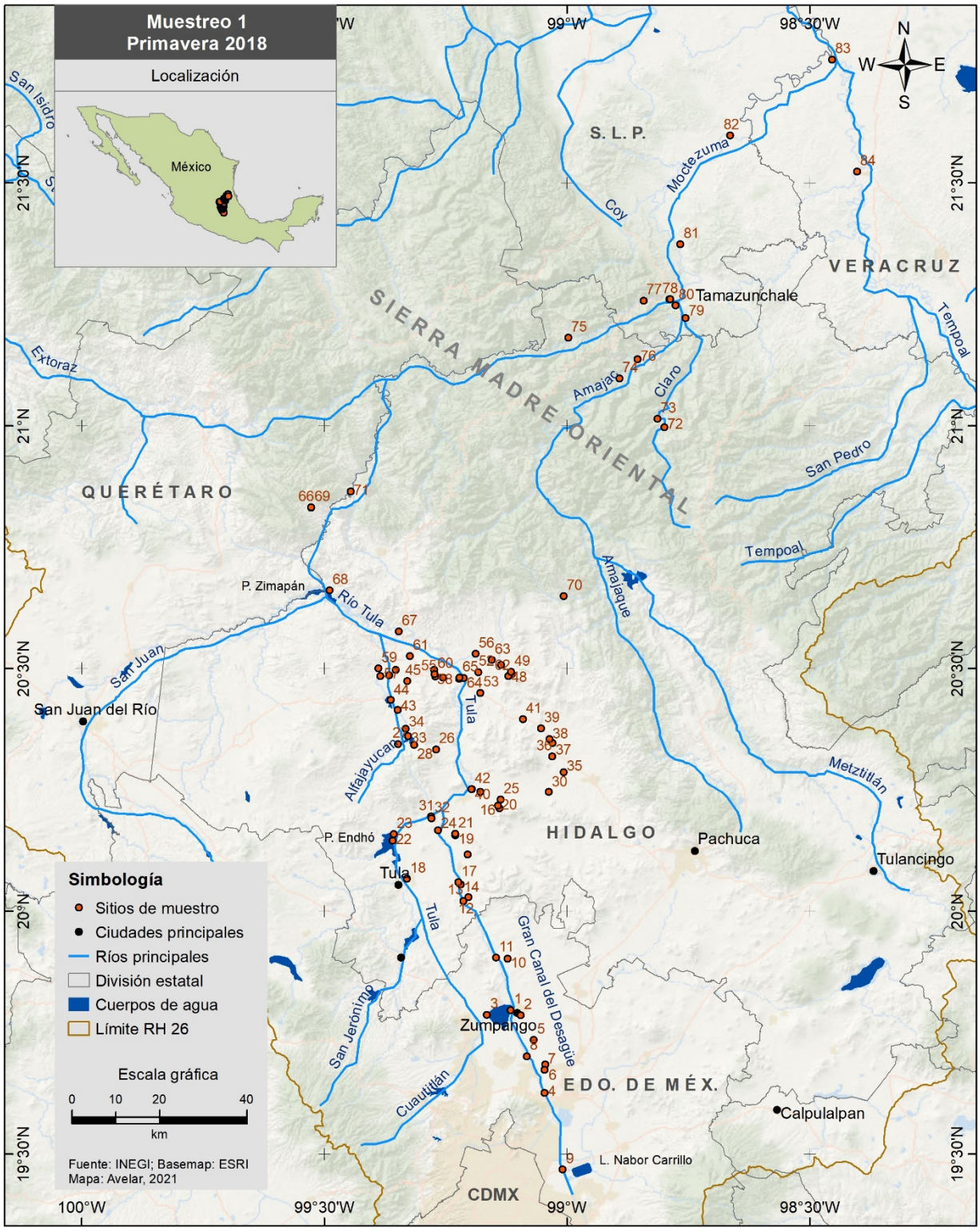


Figura 17. Mapa de los sitios de muestreo en la primavera de 2018.

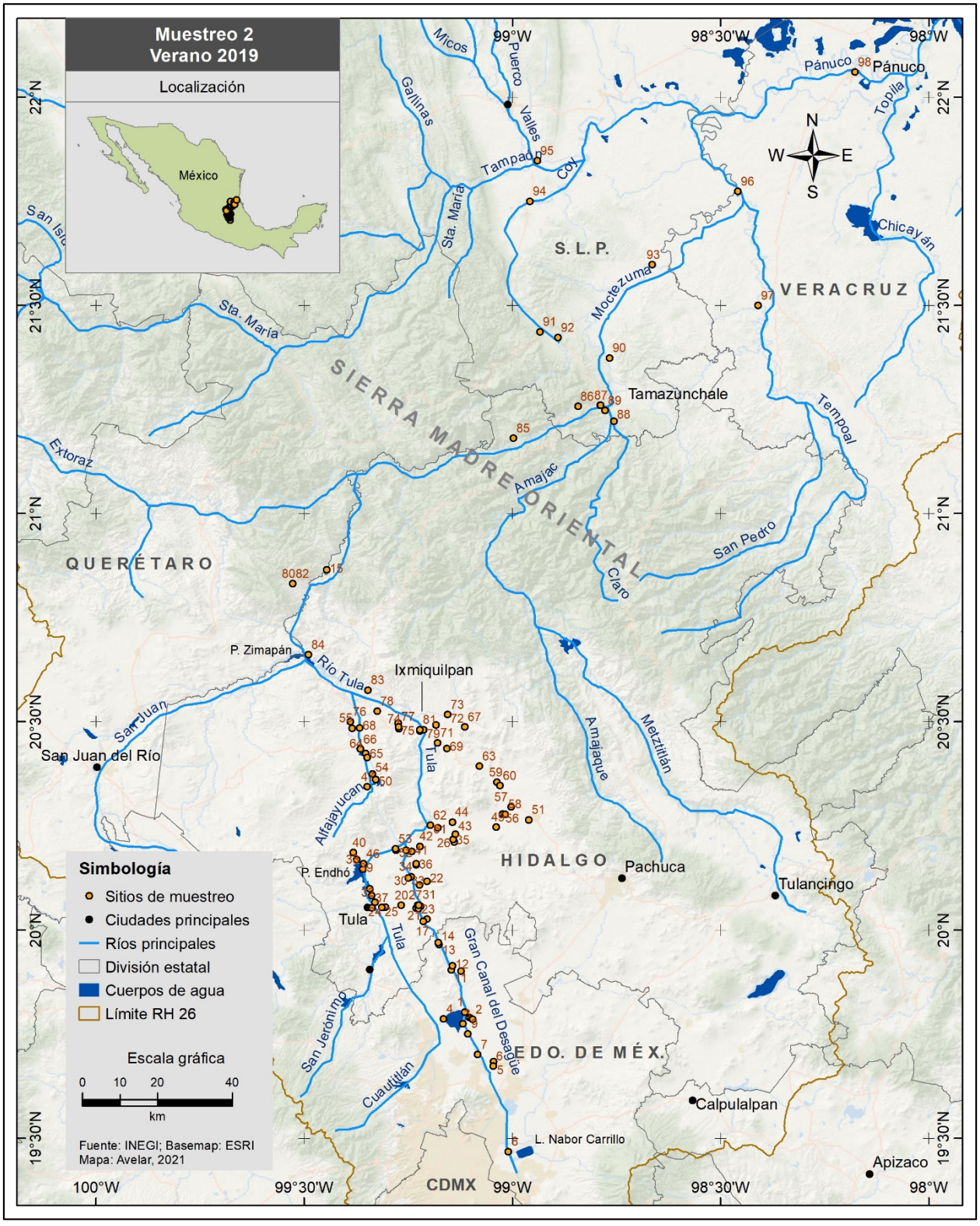


Figura 18. Mapa de los sitios de muestreo en el verano de 2019.

3.3 Análisis en laboratorio

El análisis de las muestras en laboratorio estuvo orientado a la determinación de la calidad física y química del agua, y con fines de riego agrícola. Se realizó la determinación de los siguientes iones: Ca^{2+} (calcio), Mg^{2+} (magnesio), Na^{+} (sodio), K^{+} (potasio), CO_3^{2-}(carbonatos), HCO_3^{-} (bicarbonatos), Cl^{-} (cloruros), SO_4^{2-} (sulfatos), N-NO_3^{-} (nitrógeno de los nitratos), P-PO_4^{3-} (fósforo de los fosfatos), B (boro) y SiO_2 (silicio). También se midió la conductividad eléctrica (CE), y se determinaron los sólidos totales (ST) y sólidos disueltos totales (SDT) (Cuadro 4). Los análisis realizados son útiles para hacer recomendaciones de uso industrial, doméstico, pecuario y agrícola, sin embargo, en el presente estudio se dio énfasis al uso agrícola.

Cuadro 4. Métodos utilizados en las determinaciones de laboratorio.

Determinación	**Método**
pH	Potenciómetro (APHA, 1998. 4500-H^{+} B)
Conductividad eléctrica	Conductímetro (APHA, 1998. 2510 B)
Sólidos disueltos	Gravimetría: residuo seco evaporado (RSE) y residuo seco calcinado (RSC) (APHA, 1998. 2540 D y E)
Calcio + magnesio	Titulación con EDTA; indicador: eriocromo negro T (APHA, 1998. 3500 Ca B)
Calcio	Titulación con EDTA; indicador: murexida (APHA, 1998. 3500 Ca B)
Sodio y potasio	Flamómetro 648 IL λ = 589 nm con solución estándar de 140 $mmol_c\ L^{-1}$ para sodio 5 $mmol_c\ L^{-1}$ para potasio (APHA, 1998. 3500-Na y K, B)
Carbonatos	Titulación con H_2SO_4; indicador: fenolftaleina (APHA, 1998. 2320 B)
Bicarbonatos	Titulación con H_2SO_4; indicador: anaranjado de metilo (APHA, 1998. 2320 B)
Cloruros	Titulación con nitrato de plata; indicador: cromato de potasio al 5% (APHA, 1998. 4500-Cl B)
Sulfatos	Espectrofotómetro Perkin Elmer, λ=420 nm (APHA, 1998. 4500-SO_4 E)
Boro	Espectrofotómetro Perkin Elmer, λ=690 nm. Azomethine-H (Rodier, 1978)
Silicio	Espectrofotómetro Perkin Elmer, λ=650 nm (APHA, 1989. 4500-SiO_2 E)
Nitratos	Nitratación, ácido salicílico, espectrofotometría. Espectrofotómetro Perkin Elmer, λ=410 nm (Robarge *et al*., 1983)
Ortofosfatos	Espectrofotómetro Perkin Elmer, λ=690 nm (Rodier, 1978)

3.4 Análisis de los datos

Se realizaron 16 determinaciones para cada muestra de agua con una repetición, por lo que las determinaciones totales realizadas en laboratorio fueron de 5,824, además de la temperatura del agua medida en el momento del muestreo. Estos datos fueron verificados y analizados antes de utilizarlos en la evaluación de las características fisicoquímicas de las muestras de agua.

3.4.1 Comprobación de la exactitud de los datos

Se utilizaron cinco métodos para verificar la exactitud de los datos analíticos que utilizan sumas de cationes, sumas de aniones, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos, basándose en el manual “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, publicado por American Public Health Association (APHA, 1998). Los procedimientos que se mencionan para validar los análisis químicos son aplicables de forma específica a las muestras de agua para las que se han realizado análisis de pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), y los principales aniones y cationes que son indicadores de la calidad general del agua.

3.4.1.1 Equilibrio entre aniones y cationes

La suma de aniones y la suma de cationes cuando se expresan en miliequivalentes por litro ($mmol_c\ L^{-1}$) deben estar equilibradas, ya que las aguas naturales son eléctricamente neutras ($\Sigma_{n^+} = \Sigma_{n^-}$). Para la validación se calcula la diferencia porcentual mediante la ecuación 25 y se aceptan o rechazan los resultados de acuerdo con el Cuadro 5.

$$\%\ de\ diferencia = \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones} \times 100 \qquad (25)$$

Cuadro 5. Criterios de aceptación de la diferencia entre aniones y cationes en el agua

Σ de aniones ($mmol_c\ L^{-1}$)	Diferencia aceptable
0.0 – 3.0	±0.2 $mmol_c\ L^{-1}$
3.0 – 10.0	2%
10.0 – 800.0	2-5%

3.4.1.2 Sólidos totales disueltos (STD) medidos y calculados

"Sólidos totales disueltos medidos" se denomina al valor que se obtiene en laboratorio mediante la determinación del residuo seco evaporado (RSE) y "sólidos totales disueltos calculados" se le llama a la suma de iones que se determinan de manera individual por métodos analíticos, todos los valores expresados en mg L^{-1}. La concentración de sólidos disueltos totales **medidos** debe ser mayor que los **calculados** porque un componente significativo podría no estar incluido en la determinación de "sólidos totales disueltos calculados". Si el valor medido es menor que el calculado, la mayor suma de iones y el valor medido son valores inciertos; y la muestra debe volverse a analizar. Si la concentración de sólidos medida es más de un 20% mayor que la calculada, la suma baja de iones es incierta y los componentes seleccionados deben volver a analizarse. La relación aceptable es la siguiente:

$$1.0 < \frac{SDT\ medidos}{SDT\ calculados} < 1.2 \qquad (26)$$

3.4.1.3 Conductividad eléctrica (CE) medida y calculada

La CE (μS cm^{-1}) medida con el conductímetro debe estar relacionada con la CE calculada a partir de la concentración de cada uno de los iones medidos, esta relación es aceptable cuando los valores se encuentran entre 0.9 y 1.1, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$0.9 < \frac{CE\ calculada}{CE\ medida} < 1.1 \qquad (27)$$

La CE calculada se obtiene a partir de factores de conductividad comúnmente encontrados en agua (Cuadro 6).

Cuadro 6. Factores de conductividad eléctrica para los iones habituales en el agua.

	Conductividad eléctrica a 25°C (µmhos cm^{-1})	
Ion	Para $mmol_c\ L^{-1}$	Para $mg\ L^{-1}$
Bicarbonato	43.6	0.715
Calcio	52.0	2.60
Carbonato	84.6	2.82
Cloruro	75.9	2.14
Magnesio	46.6	3.82
Nitrato	71.0	1.15
Potasio	72.0	1.84
Sodio	48.9	2.13
Sulfato	73.9	1.54

La CE puede expresarse mediante las siguientes unidades: dS m^{-1} = mS cm^{-1}; mS m^{-1} = mmho cm^{-1}; mmho cm^{-1} × 1000 = µmho cm^{-1}

3.4.1.4 Conductividad eléctrica (CE) medida y suma de iones

Las sumas de aniones y cationes deben ser 1/100 del valor medido de CE. Si alguna de las dos sumas no cumple con este criterio, el resultado no es aceptble debe analizarse de nuevo la muestra. Los criterios aceptables son los siguientes:

$$100 \times (\Sigma aniones\ o\ \Sigma cationes, en\ mmol_c\ L^{-1}) = (0.9 - 1.1) \times CE \qquad (28)$$

3.4.1.5 Sólidos totales disueltos calculados (suma de iones) y CE

Si la relación entre la suma de iones y la CE cae por debajo de 0.55, la suma de iones por su valor bajo es sospechosa; y es necesario volver a realizar el análisis. Si la relación es superior a 0.7, la suma de iones por su valor alto es sospechosa; y se debe analizar de nuevo la muestra. Si al analizar de nuevo no hay cambios en la suma de iones con valor bajo, un constituyente no medido, como el amoníaco o el nitrito, puede estar

presente en una concentración significativa. Si hay iones de calcio y sulfato deficientemente disociados, el valor de STD puede ser tan alto como 0.8 veces la CE. El criterio aceptable es el siguiente:

$$\frac{STD\ calculados\ (mg\ L^{-1})}{CE\ (\mu S\ cm^{-1})} = 0.55\text{-}0.70 \qquad (29)$$

3.4.2 Asociación estadística de variables

En la mayoría de las investigaciones en las que se realizan mediciones, observaciones o experimentos de donde se obtienen datos de diferentes variables, es indispensable determinar algún tipo de relación de dependencia entre las variables que permiten hacer inferencias o predicciones de eventos posteriores, o determinar los factores que afectan a la presencia o ausencia de un evento determinado, de acuerdo con el comportamiento observado (Cardona *et al*., 2013).

Los análisis de regresión permiten establecer la relación funcional o ecuación matemática que relaciona las variables, así como la fuerza de esa relación. De hecho, la palabra regresión originalmente se designó como el proceso general de predecir una variable a partir de otra. Cuando la variable dependiente es una variable continua, el modelo de regresión más frecuentemente utilizado es la regresión lineal. Se conoce como regresión simple el cálculo de la ecuación correspondiente a la línea que mejor describe la relación entre la respuesta y la variable que la explica. Dicha ecuación representa la línea que mejor se ajusta a los puntos en un gráfico de dispersión (Carrasquilla-Batista *et al*., 2016). Los modelos de regresión tienen las ventajas de ser fáciles de aplicar e interpretar.

El análisis de regresión en este trabajo se realizó para comparar las siguientes variables: conductividad eléctrica con la suma de cationes, conductividad eléctrica con la suma de aniones, conductividad eléctrica con la presión osmótica, conductividad eléctrica con la suma de iones y conductividad eléctrica con cualquiera de los iones determinados. Estas correlaciones se utilizaron para determinar la validez de los datos obtenidos en

laboratorio, y para predecir el comportamiento de los iones a medida que varía la conductividad eléctrica.

Para la presente investigación se utilizó un modelo lineal sin ordenada al origen mediante la técnica de análisis numérico de los mínimos cuadrados.

$$Y=af(X) \tag{30}$$

Donde Y es la concentración de la solución en $mmol_c\ L^{-1}$, $mg\ L^{-1}$ o $mmol\ L^{-1}$. En la presión osmótica se utilizan atm y en la fuerza iónica $M\ L^{-1}$; a es la pendiente de la recta que indica en qué magnitud cambia Y a medida que cambia X; y X es la conductividad eléctrica (CE) de la solución en $\mu S\ cm^{-1}$.

3.5 Evaluación física y química de la calidad del agua

La calidad del agua está determinada por sus características químicas, físicas y biológicas, pero cuando el uso previsto es con fines de riego, se hace hincapié en las características químicas y físicas. Sin embargo, la evaluación que se hace con fines de riego puede ser útil en otros campos como el industrial.

Se han generado muchas pautas para evaluar el agua de riego, pero ninguna ha resultado completamente satisfactoria por las condiciones tan variables de las parcelas. Una de esas pautas fue proporcionada por la FAO y descrita por Ayers y Westcot (1985) (Cuadro 7), está basada en modelos anteriores de otros autores, pero con modificaciones para que los procedimientos de evaluación y la solución de los problemas sean más fáciles de aplicar.

Para evaluar la calidad del agua con fines de riego se utilizan tres problemas generales asociados con el suelo y los cultivos: la salinidad que afecta la disponibilidad de agua para las plantas, la sodicidad que reduce la infiltración del agua en el suelo, y la toxicidad de ciertos iones que afecta el crecimiento y la producción de los cultivos. Sin embargo, los problemas de calidad del agua a menudo son complejos y una combinación de problemas puede afectar la producción agrícola con mayor severidad que un solo problema aislado.

Para evaluar la calidad del agua en la presente investigación se tomó en cuenta el esquema de los parámetros de calidad proporcionado por la FAO y se agregaron otros como la fuerza iónica, la presión osmótica, índice de permeabilidad, dureza, alcalinidad, clasificación hidroquímica, formación hipotética de sales, salinidad efectiva, salinidad potencial, y otras en las que está involucrada la conductividad eléctrica y la concentración de sodio.

Cuadro 7. Lineamientos para evaluar la calidad del agua para riego.

Problema potencial		Unidades	Grado de restricción de uso		
			Ninguno	Ligero a moderado	Severo
Salinidad (afecta la disponibilidad del agua para el cultivo					
CE		dS m^{-1}	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
SDT		mg L^{-1}	< 450	450 – 2,000	> 2,000
Infiltración (afecta la tasa de infiltración del agua en el suelo, se evalúa usando la RAS y la CE)					
RAS (0 – 3)	CE →		> 0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
RAS (3 – 6)	CE →		> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
RAS (6 – 12)	CE →		> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
RAS (12 – 20)	CE →		> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
RAS (20 – 40)	CE →		> 5.0	5.9 – 2.9	< 2.9
Toxicidad iónica específica (afecta a cultivos sensibles					
Sodio (Na)					
Riego superficial		RAS	< 3.0	3.0 – 9.0	> 9.0
Riego por aspersión		$mmol_c$ L^{-1}	< 3.0	> 3.0	
Cloro (Cl)					
Riego superficial		$mmol_c$ L^{-1}	< 4.0	4.0 – 10.0	> 10.0
Riego por aspersión		$mmol_c$ L^{-1}	< 3.0	> 3.0	
Boro (B)		mg L^{-1}	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
Otros efectos que dañan a cultivos específicos					
Nitrógeno ($N\text{-}NO_3$)		mg L^{-1}	< 5.0	5.0 – 30	> 30.0
Bicarbonato (HCO_3), en riego por aspersión		$mmol_c$ L^{-1}	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5
pH		Rango adecuado para la fertilidad del suelo: 6.5 – 8-4			

Fuentes: Ayers y Westcot (1985)

3.6 Cálculo de las sales hipotéticas

Las sales hipotéticas de una muestra de agua se obtienen tomando en cuenta la solubilidad y las cantidades (en $mmol_c\ L^{-1}$) de los iones que las conforman en el siguiente orden: bicarbonato de sodio, cloruro de sodio, bicarbonato de sodio, bicarbonato de potasio, bicarbonato de calcio, bicarbonato de magnesio y sulfato de magnesio; cuyas fórmulas químicas correspondientes son: Na_2CO_3, NaCl, $NaHCO_3$, $KHCO_3$, $Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$ y $MgSO_4$. En la Figura 19 se muestra un ejemplo de cálculo de sales hipotéticas, cuyo procedimiento se describe a continuación:

- Se anota la concentración de los iones: Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, CO_3^{2-}, HCO_3^{-}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, en $mmol_c\ L^{-1}$.
- Se comienza con la formación de sales de sodio, combinando el catión Na^{+} con el anión CO_3^{2-} para formar Na_2CO_3. La cantidad de sal que se forma (en $mmol_c\ L^{-1}$) depende de la concentración más baja del anión o del catión que la componen. En el ejemplo, la cantidad de Na_2CO_3 formada es de 0.86 $mmol_c\ L^{-1}$.
- El excedente del anión o del catión que tiene la mayor concentración se utiliza para formar la siguiente sal. En el ejemplo de la Figura 19, después de formar Na_2CO_3 se obtuvo un remanente de Na^{+} de 10.70 $mmol_c\ L^{-1}$, el cual se utilizó para la formación de la siguiente sal, que es NaCl. En ausencia de CO_3^{2-} no se forma Na_2CO_3 y se continúa con NaCl.
- Después de las sales de sodio se obtienen los bicarbonatos y finalmente el $MgSO_4$. El remanente final de Mg^{2+} equivale a la diferencia entre la suma de cationes y la suma de aniones en $mmol_c\ L^{-1}$, como consecuencia de los errores en las determinaciones analíticas.

Concentración de iones ($mmol_c\ L^{-1}$)	Combinación de aniones con cationes	Sales hipotéticas ($mmol_c\ L^{-1}$)	Excedente
Ca^{2+} = 1.05	Na^+ = 11.56 + CO_3^{2-} = 0.86 →	Na_2CO_3 = 0.86	Na^+ = 10.70
Mg^{2+} = 3.25	Na^+ = 10.70 + Cl^- = 5.03 →	NaCl = 5.03	Na^+ = 5.67
Na^+ = 11.56	Na^+ = 5.67 + HCO_3^- = 8.85 →	$NaHCO_3$ = 5.67	HCO_3^- = 3.18
K^+ = 0.86	K^+ = 0.86 + HCO_3^- = 3.18 →	$KHCO_3$ = 0.86	HCO_3^- = 2.32
CO_3^{2-} = 0.86	Ca^{2+} = 1.05 + HCO_3^- = 2.32 →	$Ca(HCO_3)_2$ = 1.05	HCO_3^- = 1.27
HCO_3^- = 8.85	Mg^{2+} = 3.25 + HCO_3^- = 1.27 →	$Mg(HCO_3)_2$ = 1.27	Mg^{2+} = 1.98
Cl^- = 5.03	Mg^{2+} = 1.98 + SO_4^{2-} = 1.52 →	$MgSO_4$ = 1.52	Mg^{2+} = 0.46
SO_4^{2-} = 1.52			

Figura 19. Ejemplo de cálculo de las sales hipotéticas en una muestra de agua extraída de la Presa Zimapán, Hidalgo.

3.7 Clasificación hidrogeoquímica de las aguas

La hidrogeoquímica combina la química y la geología para entender los principios fisicoquímicos de la disolución de minerales de las rocas, que le confieren características específicas al agua cuando entra en contacto con ellas. Determinar las características hidrogeoquímicas permite comprender los procesos naturales y actividades antrópicas que influyen en el agua, como la influencia de la contaminación por aguas residuales.

Una herramienta para la interpretación hidrogeoquímica del agua son los diagramas hidroquímicos que utilizan los datos de la composición iónica de las aguas para analizar el comportamiento y evolución del agua en un territorio determinado y a través del

tiempo. Estos diagramas aportan información sobre el origen, la calidad y los procesos fisicoquímicos que afectan al agua.

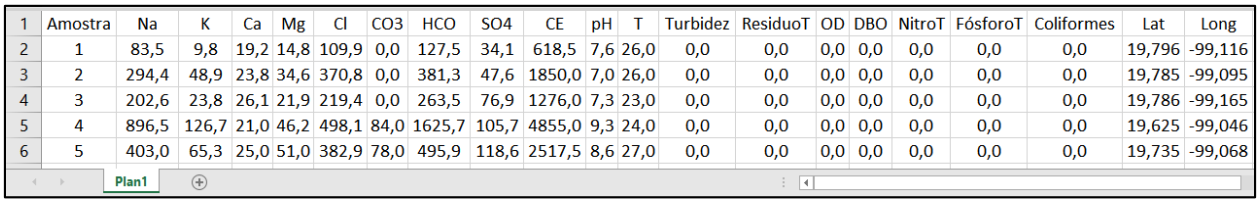
El diagrama de Piper-Hill-Langelier consta de dos triángulos equiláteros donde se localiza la composición de aniones en un triángulo y cationes en el otro. En el rombo central se integran ambas composiciones. Cada lado de los triángulos lleva una escala porcentual de $mmol_c\ L^{-1}$ de un ion específico. Las proporciones relativas de aniones y cationes determinan la posición en los triángulos y al proyectar ambos puntos, se establece su ubicación en el rombo central.

Para realizar los diagramas hidroquímicos se utilizó el software de uso libre Qualigraf, versión 1.1, desarrollado por el Departamento de Recursos Hídricos de la Fundación Cearense de Meteorología y Recursos Hídricos, ubicado en Ceará, Brasil (Figura 20).

Figura 20. Pantalla principal del software Qualigraf, para análisis de los parámetros más comunes de calidad del agua.

Para realizar el análisis de calidad del agua de varias muestras en Qualigraf, es importante crear un archivo en una hoja de cálculo, que cumpla las siguientes características:

- El encabezado de las columnas debe seguir el mismo orden y debe ser escrito con las mismas palabras que se indican en la Figura 21.
- Utilizar coma en lugar de punto como separador decimal, y no usar separadores de miles.
- En las versiones en español de Microsoft Excel, una hoja nueva es nombrada automáticamente como “Hoja1”. Esta debe ser cambiada por “Plan1”.



1	Amostra	Na	K	Ca	Mg	Cl	CO3	HCO	SO4	CE	pH	T	Turbidez	ResiduoT	OD	DBO	NitroT	FósforoT	Coliformes	Lat	Long
2	1	83,5	9,8	19,2	14,8	109,9	0,0	127,5	34,1	618,5	7,6	26,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,796	-99,116
3	2	294,4	48,9	23,8	34,6	370,8	0,0	381,3	47,6	1850,0	7,0	26,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,785	-99,095
4	3	202,6	23,8	26,1	21,9	219,4	0,0	263,5	76,9	1276,0	7,3	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,786	-99,165
5	4	896,5	126,7	21,0	46,2	498,1	84,0	1625,7	105,7	4855,0	9,3	24,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,625	-99,046
6	5	403,0	65,3	25,0	51,0	382,9	78,0	495,9	118,6	2517,5	8,6	27,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,735	-99,068

Plan1

Figura 21. Forma correcta de crear una hoja de cálculo en Excel para su utilización en Qualigraf, cuando se utilizan varias muestras.

Después de importar el archivo de Excel adecuadamente, el software permite obtener balances iónicos, clasificación del agua por sólidos totales, índices de calidad del agua (IQA), clasificación del agua para riego, diagramas de Piper, diagramas de Durov, diagramas de Stiff, diagramas radiales, diagramas de Schoeller – Berkaloff, análisis de correlación entre elementos y estadísticas básicas.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Sitios de muestreo

La observación y el muestreo representó una de las etapas fundamentales de la investigación. Se abarcaron 36 municipios de los estados de México, Hidalgo, San Luis Potosí, Querétaro y Veracruz, con una mayor densidad de muestras en el estado de Hidalgo. Se muestrearon canales de riego, presas, lagunas, manantiales, ríos principales y afluentes.

En el Cuadro 8 se describe la ubicación de los sitios de muestreo de la primera expedición en primavera de 2018 y en el Cuadro 9 los sitios de muestreo de la segunda expedición. Se presenta la ubicación política y geográfica de cada sitio, y además la temperatura medida en el momento de realizar el muestreo de agua.

Los sitios de muestreo están ordenados del punto de mayor altura al de menor altura sobre el nivel del mar, desde la cuenca del Valle de México hasta cerca de la desembocadura del río Pánuco en el Golfo de México.

Cuadro 8. Sitios de muestreo en la primavera de 2018.

No.	Descripcion	Latitud	Longitud	Altitud	T (°C)
1	Laguna de Zumpango (Zumpango, Méx.)	19.79587	-99.11610	2252	26
2	Canal trapezoidal, laminadora (Zumpango, Méx.)	19.78512	-99.09509	2248	26
3	Emisor norte lumbrera 16 (Teoloyucan, Méx.)	19.78642	-99.16519	2246	23
4	Gran canal oriente, Pemex Tecamac (Ecatepec, Méx)	19.62520	-99.04617	2242	24
5	Canal revestido, Santa Ana (Nextlalpan, Méx.)	19.73454	-99.06821	2242	27
6	Canal revestido, Santa María Tonanitla (Tonanitla, Méx)	19.68435	-99.04465	2240	27
7	Canal revestido, Chiconautla (Tecamac, Méx)	19.67286	-99.04598	2239	25
8	Gran Canal Oriente lumbrera 2, Santa Inés (Nextlalpan, Méx.)	19.70100	-99.08298	2237	24
9	Gran Canal Oriente, autopista México-Texcoco (Texcoco, Méx.)	19.46778	-99.00930	2236	24
10	El Tajo, estación de bombeo (Tequisquiac, Méx.)	19.90205	-99.12266	2226	22
11	Túnel en Gran Canal (Tequisquiac, Méx.)	19.90398	-99.14614	2204	23
12	Canal revestido Texas (Atotonilco, Hgo.)	20.02854	-99.20341	2148	24

Cuadro 8. Continuación

No.	Descripcion	Latitud	Longitud	Altitud	T (°C)
13	Río Tula (Atotonilco, Hgo.)	20.02095	-99.21316	2109	24
14	Canal grande de tierra (Atitalaquia, Hgo.)	20.05499	-99.21918	2096	24
15	Canal de tierra, Teltipan (Tlaxcoapan, Hgo.)	20.11672	-99.20445	2093	23
16	Canal revestido, colonia Morelos 3 (Mixquiahuala, Hgo.)	20.21121	-99.13937	2087	23
17	Río Atitalaquia (Atitalaquia, Hgo.)	20.05957	-99.22396	2083	24
18	Puente, salida Tula - Pachuca (Tula de Allende, Hgo.)	20.06631	-99.32963	2057	20
19	Canal Requena, El Tinaco (Tlahuelilpan, Hgo.)	20.15584	-99.23045	2048	23
20	Canal de tierra, colonia Morelos 2 (Mixquiahuala, Hgo.)	20.21724	-99.14183	2043	23
21	Canal trapezoidal revestido, El Tinaco (Tezontepec, Hgo.)	20.15893	-99.23024	2040	23
22	Presa Endhó (Tepetitlán, Hgo.)	20.14516	-99.35886	2020	21
23	Sifón de presa Endhó (Tepetitlán, Hgo.)	20.15833	-99.35699	2012	21
24	Cauce sobre basaltos (Tezontepec, Hgo.)	20.16670	-99.26568	2009	23
25	Canal revestido, colonia Morelos 1 (Mixquiahuala, Hgo.)	20.22968	-99.13642	2002	22
26	Canal revestido Chilcuautla, antes del túnel (Chilcuautla, Hgo.)	20.33286	-99.26975	2000	23
27	Presa Dolores (Alfajayucan, Hgo.)	20.34400	-99.34814	1998	24
28	Salida del sifón Presa Javier Rojo Gómez (Alfajayucan, Hgo.)	20.34203	-99.31506	1993	24
29	Canal grande revestido (Progreso de Obregón, Hgo.)	20.24525	-99.17870	1987	23
30	Canal revestido, El Pacheco (Francisco I. Madero, Hgo.)	20.24566	-99.03745	1975	22
31	Río Tula (Tezontepec, Hgo.)	20.19477	-99.27986	1959	22
32	Manantial de agua fría, descarga al río Tula (Tezontepec, Hgo.)	20.19102	-99.27901	1956	21
33	Canal revestido, salida de presa Rojo Gómez (Alfajayucan, Hgo.)	20.36061	-99.32729	1956	24
34	Canal revestido, Xamagé (Alfajayucan, Hgo.)	20.37542	-99.33239	1945	28
35	Pozo, El Bondhó (San Salvador, Hgo.)	20.28587	-99.00684	1941	22
36	Canal de drenaje El Salvador (San Salvador, Hgo.)	20.31852	-99.03019	1934	21
37	Canal de tierra Caxuxi, Actopan-Ixmiquilpan (San Salvador, Hgo.)	20.34622	-99.02973	1926	20
38	Bombeo subterráneo San Salvador (Santiago de Anaya, Hgo.)	20.35438	-99.03626	1922	21
39	Canal de tierra (Santiago Anaya, Hgo.)	20.37617	-99.05382	1914	22
40	Manantial, balneario El Río (Progreso de Obregón, Hgo.)	20.25128	-99.19598	1913	22
41	Canal revestido, Yolotepec (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.39511	-99.09047	1911	22
42	Río Tula junto al balneario El Río (Progreso de Obregón, Hgo.)	20.25119	-99.19655	1905	24

Cuadro 8. Continuación

No.	Descripcion	Latitud	Longitud	Altitud	T (°C)
43	Río Alfajayucan (Alfajayucan, Hgo.)	20.41394	-99.34866	1868	23
44	Vaso regulador Vicente Aguirre (Alfajayucan, Hgo.)	20.43461	-99.36296	1852	25
45	Canal trapezoidal, Santa María Xigui (Alfajayucan, Hgo.)	20.47340	-99.32906	1840	25
46	Presa Debodhé en el vertedor (Cardonal, Hgo.)	20.48771	-99.11348	1834	25
47	Canal a 3 km de la presa Madhó Corrales (Alfajayucan, Hgo.)	20.49639	-99.35313	1830	26
48	Vaso regulador Debodhé (Cardonal, Hgo.)	20.48407	-99.12064	1811	29
49	Canal revestido, salida presa Debodhé (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.49251	-99.11490	1792	26
50	Laguna Yonthé, presa Madhó Corrales (Alfajayucan, Hgo.)	20.48533	-99.36633	1784	27
51	Escuela secundaria, Debodhé (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.50661	-99.13596	1784	24
52	Canal de tierra El Nith, Capula (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.49215	-99.18259	1752	24
53	Canal junto a escuela Alfaro Siqueiros (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.44953	-99.17867	1749	22
54	Canal revestido, Ixmiquilpan - Tasquillo (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.48093	-99.25532	1739	22
55	Canal revestido, Ignacio López Rayón (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.48310	-99.27151	1737	22
56	Canal revestido, Los Pinos (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.52972	-99.18839	1736	26
57	Cauce basáltico, Xigatzá (Alfajayucan, Hgo.)	20.48436	-99.38416	1735	24
58	Canal trapezoidal revestido, El Dextho (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.49684	-99.27363	1734	22
59	Presa Madhó Corrales (Alfajayucan, Hgo.)	20.49974	-99.38888	1731	25
60	Dren profundo, Ignacio López Rayón (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.48780	-99.27277	1729	22
61	Canal revestido, Taxquillo - Ixmiquilpan (Tasquillo, Hgo.)	20.52497	-99.32384	1715	25
62	Canal, San Pedro Capula (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.51688	-99.15494	1711	24
63	Río, San Pedro Capula (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.51707	-99.15483	1709	23
64	Arroyo en la ciudad de Ixmiquilpan (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.48029	-99.21292	1696	24
65	Río Tula (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.48071	-99.22119	1690	22
66	Maconi, pozo (Cadereyta, Qro.)	20.83120	-99.52744	1654	22
67	Puente Taxquillo río Tula (Zimapán, Hgo.)	20.57597	-99.34631	1593	23
68	Presa Zimapán (Zimapán, Hgo.)	20.66073	-99.48907	1549	27
69	Maconi 1, cauce (Cadereyta, Qro.)	20.83140	-99.52673	1423	22
70	Manantial La Gloria (Cardonal, Hgo.)	20.64869	-99.00663	1386	37
71	Río Moctezuma, La Mora (Zimapán, Hgo.)	20.86450	-99.44551	931	20
72	Río Claro, Tamala (Tepehuacán, Hgo.)	20.99631	-98.79915	333	30

Cuadro 8. Continuación

No.	Descripcion	Latitud	Longitud	Altitud	T (°C)
73	Afluente río Claro, Sn Simón, cauce en calizas (Tepehuacán, Hgo.)	21.01373	-98.81326	314	26
74	Río Amajac, Huatepango (Chapulhuacán, Hgo.)	21.09702	-98.89191	261	30
75	Río Moctezuma, Pisaflores (Pisaflores, Hgo.)	21.18083	-98.99720	239	26
76	Río Amajac, Cahuazas (Chapulhuacán, Hgo.)	21.13676	-98.85497	212	32
77	Río Moctezuma, Vega Larga (Tamazunchale, S.L.P.)	21.25729	-98.84176	143	27
78	Río Moctezuma, puente de fierro (Tamazunchale, S.L.P.)	21.26001	-98.78760	132	28
79	Río Claro, Tamazunchale (Tamazunchale, S.L.P.)	21.22147	-98.75559	127	30
80	Río Amajac, Tamazunchale (Tamazunchale, S.L.P.)	21.24723	-98.77662	127	31
81	Río Moctezuma, Tampacán (Tampacán, S.L.P.)	21.37324	-98.76635	90	28
82	Río Moctezuma, Tanquián (Tanquián, S.L.P.)	21.59743	-98.66415	52	31
83	Río Tempoal, El Higo (El Higo, Veracruz)	21.75389	-98.45405	32	32
84	Río Tempoal, Tempoal (Tempoal, Ver.)	21.52303	-98.40220	11	33

Cuadro 9. Sitios de muestreo en el verano de 2019.

No.	Descripción	Latitud	Longitud	Altitud	T (°C)
1	Laguna de Zumpango (Zumpango, Méx.)	19.80270	-99.11361	2250	24
2	Canal trapezoidal, laminadora (Zumpango, Méx.)	19.78496	-99.09538	2248	21
3	San Pedro La Laguna, Gran Canal Oriente (Zumpango, Méx.)	19.77471	-99.11817	2247	22
4	Emisor Norte lumbrera 16 (Teoloyucan, Méx.)	19.78641	-99.16516	2246	22
5	Canal revestido, Santa María Tonanitla (Tecámac, Méx.)	19.68426	-99.04465	2240	22
6	Canal revestido, Chiconautla (Tecámac, Méx.)	19.67284	-99.04593	2239	22
7	Gran Canal Oriente lumbrera 2, Santa Inés (Nextlalpan, Méx.)	19.70098	-99.08287	2237	22
8	Gran Canal Oriente, autopista México-Texcoco (Texcoco, Méx.)	19.46776	-99.00937	2236	24
9	Canal de aguas negras lumbrera 13 (Nextlalpan, Méx.)	19.75050	-99.10668	2234	24
10	El Tajo, Tequisquiac (Tequisquiac, Méx.)	19.90155	-99.12257	2225	22
11	Túnel en Gran Canal (Tequisquiac, Méx.)	19.90393	-99.14608	2204	23
12	Canal de tierra (Tequisquiac, Méx.)	19.91351	-99.14371	2204	22
13	Río Tula - Apaxco (Apaxco, Méx.)	19.96489	-99.17542	2178	22
14	Canal junto a cementera (Apaxco, Méx.)	19.96969	-99.17784	2178	22

Cuadro 9. Continuación

No.	Descripción	Latitud	Longitud	Altitud	T (°C)
15	Canal revestido (Atotonilco, Hgo.)	20.02615	-99.20477	2151	22
16	Río Tula (Atotonilco, Hgo.)	20.02092	-99.21311	2119	22
17	Canal revestido, refinería (Atitalaquia, Hgo.)	20.05167	-99.23035	2117	23
18	Canal grande de tierra (Atitalaquia, Hgo.)	20.05660	-99.21947	2108	23
19	Canal grande revestido, refinería (Tula, Hgo.)	20.05892	-99.26682	2103	23
20	Puente La Quina (Atitalaquia, Hgo.)	20.05898	-99.22710	2102	23
21	Canal de tierra, Teteltipan (Tlaxcoapan, Hgo.)	20.11665	-99.20451	2100	22
22	La Cascada (Atitalaquia, Hgo.)	20.05092	-99.22522	2098	23
23	Canal revestido, refinería (Tula, Hgo.)	20.05507	-99.30454	2094	22
24	Canal de tierra, refinería (Tula, Hgo.)	20.05356	-99.31295	2087	22
25	Canal revestido, colonia Morelos 3 (Mixquiahuala, Hgo.)	20.21124	-99.13934	2084	22
26	Río Salado (Atitalaquia, Hgo.)	20.05953	-99.22394	2080	22
27	Canal de tierra Julián Villagrán (Tula, Hgo.)	20.09839	-99.34192	2073	24
28	Canal revestido junto a Instituto Canadá (Tula, Hgo.)	20.08306	-99.33704	2072	23
29	Canal de tierra, Tula-Tlahuelilpan 2 (Tlahuelilpan, Hgo.)	20.12763	-99.24226	2065	26
30	Canal de tierra (Tlaxcoapan, Hgo.)	20.10794	-99.22219	2061	20
31	Puente, salida Tula - Pachuca (Tula, Hgo.)	20.06641	-99.32977	2060	23
32	Canal de tierra, Tula-Tlahuelilpan 1 (Tlahuelilpan, Hgo.)	20.12466	-99.24926	2060	26
33	Canal Requena (Tezontepec, Hgo.)	20.15583	-99.23048	2048	22
34	Canal revestido, colonia Morelos 2 (Mixquiahuala, Hgo.)	20.21727	-99.14181	2045	22
35	Canal revestido, El Tinaco (Tezontepec, Hgo.)	20.15895	-99.23018	2045	22
36	Río Tula en la ciudad de Tula (Tula, Hgo.)	20.05303	-99.33625	2042	22
37	Presa Endhó (Tepetitlán, Hgo.)	20.14511	-99.35865	2034	26
38	Canal revestido, La Loma (Tepetitlán, Hgo.)	20.16884	-99.37352	2029	23
39	Arroyo Tepetitlán (Tepetitlán, Hgo.)	20.18565	-99.38131	2025	24
40	Canal de tierra, Mangas (Tezontepec, Hgo.)	20.18900	-99.24160	2022	22
41	Canal revestido Tecnológico de Tlahuelilpan (Mixquiahuala, Hgo.)	20.20050	-99.22154	2008	23
42	Canal revestido, colonia Morelos 1 (Francisco I. Madero, Hgo.)	20.22971	-99.13641	2002	22
43	Canal trapezoidal revestido, El Pacheco (Mixquiahuala, Hgo.)	20.25897	-99.14390	1998	22
44	Canal de basalto, Mangas (Tezontepec, Hgo.)	20.19090	-99.25439	1992	22

Cuadro 9. Continuación

No.	Descripción	Latitud	Longitud	Altitud	T (°C)
45	Sifón presa Endhó (Tepetitlán, Hgo.)	20.15882	-99.35687	1990	22
46	Presa Dolores (Alfajayucan, Hgo.)	20.34385	-99.34805	1989	21
47	Canal trapezoidal revestido (Progreso de Obregón, Hgo.)	20.24538	-99.17871	1987	22
48	Canal revestido, El Pacheco (Actopan, Hgo.)	20.24651	-99.03802	1983	20
49	Canal rectangular cerca de la presa Rojo Gómez (Alfajayucan, Hgo.)	20.36064	-99.32730	1979	24
50	Canal de tierra Actopan (Actopan, Hgo.)	20.26424	-98.95986	1974	20
51	Manantial de aguas frías que descarga al río Tula (Tezontepec, Hgo.)	20.19101	-99.27898	1972	22
52	Río Tula (Tezontepec, Hgo.)	20.19476	-99.27979	1963	22
53	Canal revestido, hacia Xamagé (Alfajayucan, Hgo.)	20.37474	-99.33595	1958	24
54	Cauce basáltico, Xigatzá (Alfajayucan, Hgo.)	20.48421	-99.38419	1950	22
55	Canal revestido, salida de San Salvador (San Salvador, Hgo.)	20.27794	-99.02340	1949	24
56	Canal de tierra Caxuxi (San Salvador, Hgo.)	20.29540	-99.00259	1941	19
57	Pozo a subpresión (San Salvador, Hgo.)	20.27771	-99.01676	1933	22
58	Bombeo agua subterránea, San Salvador (Santiago de Anaya, Hgo.)	20.35438	-99.03626	1922	22
59	Canal de tierra, Lagunilla, Actopan-Ixmiquilpan (San Salvador, Hgo.)	20.34636	-99.02962	1921	22
60	Manantial en balneario El Río (Progreso de Obregón, Hgo.)	20.25116	-99.19606	1914	22
61	Río Tula junto al balneario El Río (Progreso de Obregón, Hgo.)	20.25124	-99.19652	1908	21
62	Canal revestido Yolotepec (Santiago de Aanaya, Hgo.)	20.39313	-99.07865	1907	22
63	Canal distribuidor (Alfajayucan, Hgo.)	20.42380	-99.35164	1891	27
64	Río Alfajayucan (Alfajayucan, Hgo.)	20.41389	-99.34866	1873	23
65	Vaso regulador Vicente Aguirre (Alfajayucan, Hgo.)	20.43469	-99.36427	1857	23
66	Vertedor Presa Debodhé (Cardonal, Hgo.)	20.48775	-99.11369	1834	25
67	Laguna Yonthé, a 4 km de Madhó Corrales (Alfajayucan, Hgo.)	20.48516	-99.36641	1790	24
68	Canal revestido pasando Taxadhó, El Mexe (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.43552	-99.15668	1786	22
69	Canal de tierra el Nith, Capula (Ixmiquilpan,Hgo.)	20.49222	-99.18257	1752	24
70	Canal de tierra, escuela Alfaro Siqueiros (Ixmiquilpan. Hgo.)	20.44944	-99.17898	1745	23
71	Canal San Pedro Capula (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.51683	-99.15493	1742	24
72	Río San Pedro Capula (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.51708	-99.15488	1739	22
73	Canal revestido, Ignacio López Rayón (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.48309	-99.27154	1737	23
74	Canal trapezoidal revestido, El Dextho (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.49682	-99.27361	1734	24

Cuadro 9. Continuación

No.	Descripción	Latitud	Longitud	Altitud	T (°C)
75	Presa Madhó Corrales (Alfajayucan, Hgo.)	20.49989	-99.38899	1731	22
76	Dren profundo, Ignacio López Rayón (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.48783	-99.27283	1729	23
77	Canal revestido, Tasquillo - Ixmiquilpan (Tasquillo, Hgo.)	20.52498	-99.32387	1715	22
78	Arroyo en la ciudad de Ixmiquilpan (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.48027	-99.21288	1700	23
79	Maconi II, pozo (Cadereyta, Qro.)	20.83125	-99.52726	1659	23
80	Río Tula, Ixmiquilpan (Ixmiquilpan, Hgo.)	20.48070	-99.22117	1653	23
81	Maconi I, cauce (Cadereyta, Qro.)	20.83141	-99.52675	1647	22
82	Puente Tasquillo 1860-1913 (Zimapán, Hgo.)	20.57595	-99.34626	1579	24
83	Presa Zimapán (Zimapán, Hgo.)	20.66079	-99.48902	1550	26
84	Río Moctezuma, La Mora (Zimapán, Hgo.)	20.86450	-99.44546	931	22
85	Río Moctezuma, Pisaflores (Pisaflores, Hgo.)	21.18088	-98.99736	242	29
86	Río Moctezuma, Vega Larga (Tamazunchale, S.L.P.)	21.25727	-98.84180	146	29
87	Río Moctezuma, puente en Tamazunchale, (Tamazunchale, S.L.P.)	21.26003	-98.78750	132	29
88	Río Claro, Tamazunchale (Tamazunchale, S.L.P.)	21.22147	-98.75559	127	33
89	Río Amajac, Tamazunchale (Tamazunchale, S.L.P.)	21.24714	-98.77665	126	33
90	Río Moctezuma, Tampacán (Tampacán, S.L.P.)	21.37324	-98.76614	103	29
91	Puente sobre el río Huichihuayán (Axtla de Terrazas, S.L.P.)	21.43616	-98.93354	88	29
92	Puente Comoca, río Huichihuayán (Axtla de Terrazas, S.L.P.)	21.42219	-98.88979	74	30
93	Río Moctezuma, Tanquián (Tanquián, S.L.P.)	21.59749	-98.66396	52	32
94	Puente sobre el río Coy (Tanlajás, S.L.P.)	21.74966	-98.95722	41	23
95	Río Tampaón, Álvaro Obregón (Ciudad Valles, S.L.P.)	21.84688	-98.93949	38	31
96	Río Moctezuma, El Higo (El Higo, Ver.)	21.77328	-98.45854	34	32
97	Río Tempoal (Tempoal, Ver.)	21.49978	-98.40977	27	34
98	Río Pánuco en la ciudad de Pánuco (Pánuco, Ver.)	22.05977	-98.17704	17	34

El punto de muestreo –de primavera 2018– con mayor altitud fue en la Laguna de Zumpango y el más bajo en el río Tempoal, en el municipio de Tempoal, Veracruz; la diferencia de altura entre ambos puntos es de 2,241 m. El punto de muestreo –de verano de 2019– con mayor altitud fue también en la Laguna de Zumpango y el más bajo en el río Pánuco, en la ciudad de Pánuco, Veracruz; la diferencia de altura entre ambos puntos es de 2,233 m (Figura 22).

Los vasos de almacenamiento se encuentran en las siguientes alturas sobre el nivel del mar: Laguna de Zumpango (2,252 m), Presa Endhó (2,020 m), Presa Dolores (1,998), Presa Javier Rojo Gómez (1,993 m), Presa Debodhé (1,834 m), Presa Madhó Corrales (1,731 m) y Presa Zimapán (1,549 m).

El gradiente altitudinal permite que las aguas residuales que se utilizan para riego en el Valle del Mezquital, se conduzcan por gravedad a través de la superficie agrícola de los valles intermontanos.

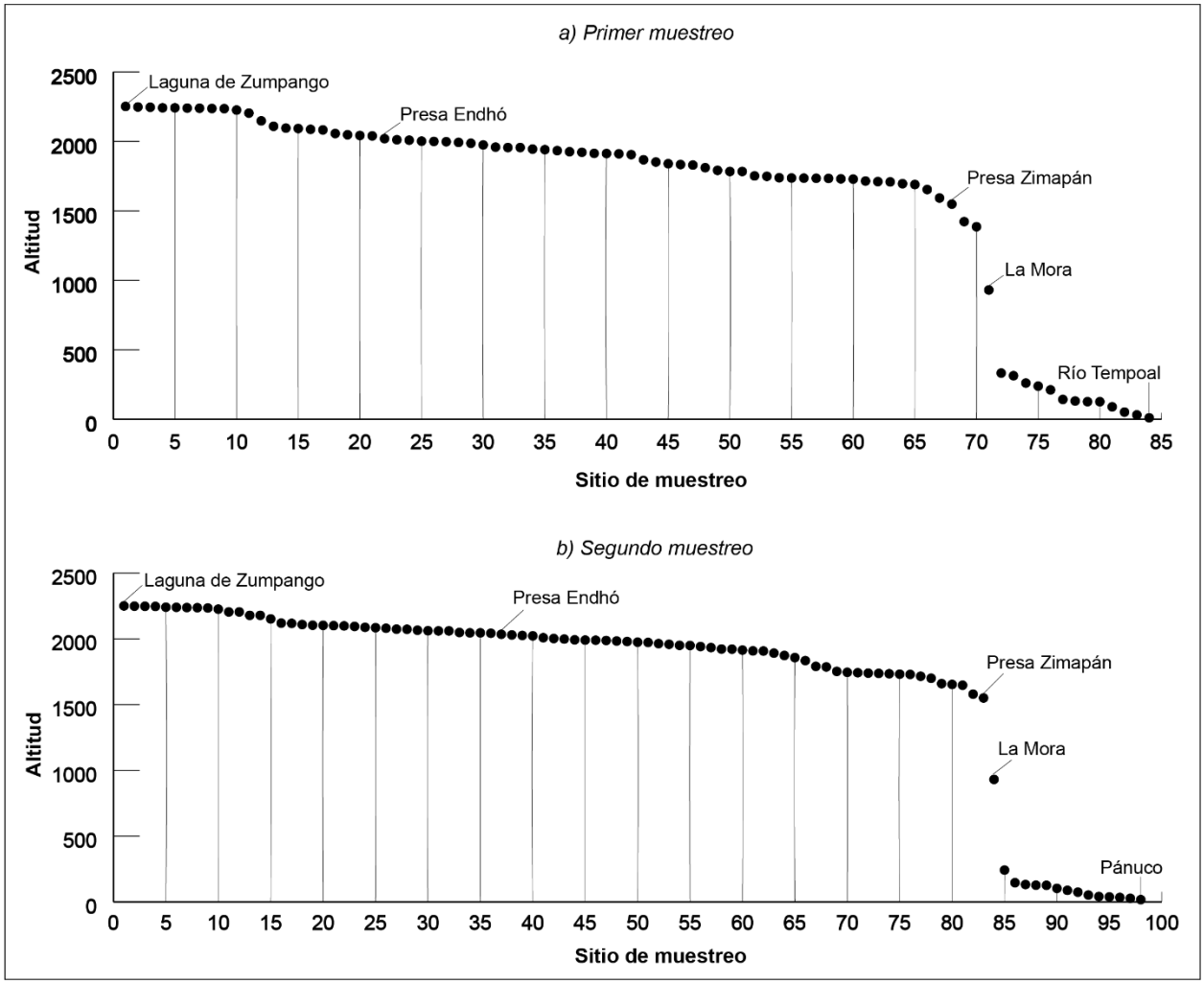


Figura 22. Altitudes de los sitios de muestreo, a) en la primavera de 2018 y b) en el verano de 2019.

4.2 Composición iónica del agua

Los datos obtenidos de las determinaciones analíticas en laboratorio fueron analizados para determinar su exactitud analítica y posteriormente para realizar la conversión a las unidades $mmol_c\ L^{-1}$, $mmol\ L^{-1}$ y $mg\ L^{-1}$. Esto permitió realizar la evaluación fisicoquímica de cada muestra de agua con los procedimientos que se detallarán más adelante. Como resultado de la organización de los datos, se obtuvo la información del Cuadro 10 para el primer muestreo y el Cuadro 11 para el segundo, en donde se especifica la composición iónica de cada muestra en las siguientes unidades: $mmol_c\ L^{-1}$, $mg\ L^{-1}$ y $mmol\ L^{-1}$ ($mmol_c\ L^{-1}$ equivale a $meq\ L^{-1}$). Por cuestiones de espacio, para cada sitio de muestreo, y para cada ion, se presentan las concentraciones respectivas en las tres unidades mencionadas, en orden descendente. Las siglas "RSE" se refiere a la obtención de los sólidos totales disueltos por el método del "residuo seco evaporado".

La exactitud de los datos que se presentan fue comprobada por los procedimientos señalados en la metodología. Uno de ellos, que puede comprobarse directamente, es la diferencia porcentual menor al 2% entre la suma de cationes y la suma de aniones.

Cuadro 10. Composición iónica de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco, en la primavera de 2018.

No.	pH	CE ($\mu S\ cm^{-1}$)	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ	Σ iones	SDT ($mg\ L^{-1}$)
			En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son $mmol_c\ L^{-1}$, $mg\ L^{-1}$ y $mmoles\ L^{-1}$											
1	7.59	619	0.96	1.22	3.63	0.25	6.06	0.00	2.09	3.10	0.71	**5.90**	**11.96**	512
			19.24	14.82	83.49	9.77	127.33	0.00	127.49	109.90	34.10	**271.49**	**398.81**	
			0.48	0.61	3.63	0.25	4.97	0.00	2.09	3.10	0.36	**5.55**	**10.52**	
2	7.02	1,850	1.19	2.85	12.80	1.25	18.09	0.00	6.25	10.46	0.99	**17.70**	**35.79**	1,184
			23.85	34.63	294.40	48.87	401.75	0.00	381.25	370.81	47.55	**799.61**	**1,201.36**	
			0.60	1.43	12.80	1.25	16.07	0.00	6.25	10.46	0.50	**17.21**	**33.28**	
3	7.29	1,276	1.30	1.80	8.81	0.61	12.52	0.00	4.32	6.19	1.60	**12.11**	**24.63**	832
			26.05	21.87	202.63	23.85	274.40	0.00	263.52	219.44	76.85	**559.81**	**834.21**	
			0.65	0.90	8.81	0.61	10.97	0.00	4.32	6.19	0.80	**11.31**	**22.28**	
4	9.28	4,855	1.05	3.80	38.98	3.24	47.07	2.80	26.65	14.05	2.20	**45.70**	**92.77**	3,034
			21.04	46.17	896.54	126.68	1,090.43	84.00	1,625.65	498.07	105.67	**2,313.39**	**3,403.82**	
			0.53	1.90	38.98	3.24	44.65	1.40	26.65	14.05	1.10	**43.20**	**87.85**	
5	8.56	2,518	1.25	4.20	17.52	1.67	24.64	2.60	8.13	10.80	2.47	**24.00**	**48.64**	1,558
			25.05	51.03	402.96	65.29	544.33	78.00	495.93	382.86	118.64	**1,075.43**	**1,619.76**	
			0.63	2.10	17.52	1.67	21.92	1.30	8.13	10.80	1.24	**21.47**	**43.38**	

Cuadro 10. Continuación

No.	pH	CE ($\mu S\ cm^{-1}$)	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ	Σ iones	SDT ($mg\ L^{-1}$)
			En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son $mmol_c\ L^{-1}$, $mg\ L^{-1}$ y $mmoles\ L^{-1}$											
6	9.00	6,200	1.24	4.62	51.34	3.44	60.64	2.74	34.54	17.46	3.42	**58.16**	**118.80**	3,926
			24.85	56.13	1,180.82	134.50	1,396.30	82.20	2,106.94	618.96	164.27	**2,972.37**	**4,368.67**	
			0.62	2.31	51.34	3.44	57.71	1.37	34.54	17.46	1.71	**55.08**	**112.79**	
7	8.96	5,000	1.02	3.85	40.43	3.44	48.74	2.30	28.78	14.02	2.17	**47.27**	**96.01**	3,188
			20.44	46.78	929.89	134.50	1,131.61	69.00	1,755.58	497.01	104.23	**2,425.82**	**3,557.42**	
			0.51	1.93	40.43	3.44	46.31	1.15	28.78	14.02	1.09	**45.04**	**91.34**	
8	8.86	5,280	1.24	4.82	41.48	3.59	51.13	2.72	31.96	12.24	2.60	**49.52**	**100.65**	3,406
			24.85	58.56	954.04	140.36	1,177.81	81.60	1,949.56	433.91	124.88	**2,589.95**	**3,767.77**	
			0.62	2.41	41.48	3.59	48.10	1.36	31.96	12.24	1.30	**46.86**	**94.96**	
9	7.22	1,336	1.10	1.95	9.11	0.94	13.10	0.00	4.80	6.43	1.52	**12.75**	**25.85**	856
			22.04	23.69	209.53	36.75	292.02	0.00	292.80	227.94	73.01	**593.75**	**885.77**	
			0.55	0.98	9.11	0.94	11.58	0.00	4.80	6.43	0.76	**11.99**	**23.57**	
10	8.16	2,761	1.27	5.02	18.76	1.94	26.99	0.00	9.89	13.26	3.13	**26.28**	**53.27**	1,806
			25.45	60.99	431.48	75.85	593.77	0.00	603.29	470.07	150.34	**1,223.70**	**1,817.47**	
			0.64	2.51	18.76	1.94	23.85	0.00	9.89	13.26	1.57	**24.72**	**48.56**	
11	9.06	2,570	0.86	3.95	20.66	1.42	26.89	2.75	14.80	7.45	1.17	**26.17**	**53.06**	1,872
			17.23	47.99	475.18	55.52	595.93	82.50	902.80	264.10	56.20	**1,305.60**	**1,901.53**	
			0.43	1.98	20.66	1.42	24.49	1.38	14.80	7.45	0.59	**24.21**	**48.70**	
12	8.54	4,280	0.98	3.90	34.06	2.91	41.85	2.20	26.27	9.91	2.11	**40.49**	**82.34**	2,428
			19.64	47.39	783.38	113.78	964.18	66.00	1,602.47	351.31	101.35	**2,121.13**	**3,085.31**	
			0.49	1.95	34.06	2.91	39.41	1.10	26.27	9.91	1.06	**38.34**	**77.75**	
13	8.43	4,025	0.92	4.51	32.24	1.74	39.41	2.07	24.76	9.32	1.98	**38.13**	**77.54**	2,284
			18.44	54.80	741.52	68.03	882.78	62.10	1,510.36	330.39	95.10	**1,997.96**	**2,880.74**	
			0.46	2.26	32.24	1.74	36.70	1.04	24.76	9.32	0.99	**36.11**	**72.80**	
14	7.28	1,319	1.03	2.24	9.12	0.52	12.91	0.00	6.88	4.26	1.42	**12.56**	**25.47**	760
			20.64	27.22	209.76	20.33	277.95	0.00	419.68	151.02	68.21	**638.90**	**916.85**	
			0.52	1.12	9.12	0.52	11.28	0.00	6.88	4.26	0.71	**11.85**	**23.13**	
15	7.22	1,358	1.25	2.11	9.29	0.65	13.30	0.00	6.82	5.16	0.96	**12.94**	**26.24**	746
			25.05	25.64	213.67	25.41	289.77	0.00	416.02	182.92	46.11	**645.05**	**934.82**	
			0.63	1.06	9.29	0.65	11.62	0.00	6.82	5.16	0.48	**12.46**	**24.08**	
16	6.78	1,240	0.98	1.95	8.47	0.60	12.00	0.00	3.74	6.29	1.66	**11.69**	**23.69**	806
			19.64	23.69	194.81	23.46	261.60	0.00	228.14	222.98	79.73	**530.85**	**792.45**	
			0.49	0.98	8.47	0.60	10.54	0.00	3.74	6.29	0.83	**10.86**	**21.40**	
17	7.50	2,356	1.70	5.75	16.03	1.80	25.28	0.00	13.92	6.29	2.27	**22.48**	**47.76**	1,246
			34.07	69.86	368.69	70.38	543.00	0.00	849.12	222.98	109.03	**1,181.13**	**1,724.13**	
			0.85	2.88	16.03	1.80	21.56	0.00	13.92	6.29	1.14	**21.35**	**42.90**	
18	7.14	1,926	2.25	4.80	11.06	0.76	18.87	0.00	9.71	5.92	2.72	**18.35**	**37.22**	1,264
			45.09	58.32	254.38	29.71	387.50	0.00	592.31	209.86	130.65	**932.82**	**1,320.32**	
			1.13	2.40	11.06	0.76	15.35	0.00	9.71	5.92	1.36	**16.99**	**32.34**	

Cuadro 10. Continuación

No.	pH	CE (µS cm^{-1})	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ	Σ iones	SDT (mg L^{-1})
			En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son mmol$_c$ L^{-1}, mg L^{-1} y mmoles L^{-1}											
19	7.05	1,576	1.46	2.45	10.79	0.75	15.45	0.00	7.82	6.01	1.12	**14.95**	**30.40**	978
			29.26	29.77	248.17	29.32	336.52	0.00	477.02	213.05	53.80	**743.87**	**1,080.39**	
			0.73	1.23	10.79	0.75	13.50	0.00	7.82	6.01	0.56	**14.39**	**27.89**	
20	7.86	1,802	1.15	2.96	12.62	0.87	17.60	0.00	5.56	9.67	1.80	**17.03**	**34.63**	1,140
			23.04	35.96	290.26	34.02	383.28	0.00	339.16	342.80	86.46	**768.42**	**1,151.70**	
			0.58	1.48	12.62	0.87	15.55	0.00	5.56	9.67	0.90	**16.13**	**31.68**	
21	7.11	1,586	1.20	2.70	10.90	0.75	15.55	0.00	8.05	5.13	1.95	**15.13**	**30.68**	946
			24.05	32.81	250.70	29.32	336.88	0.00	491.05	181.86	93.66	**766.57**	**1,103.45**	
			0.60	1.35	10.90	0.75	13.60	0.00	8.05	5.13	0.98	**14.16**	**27.76**	
22	7.09	1,492	1.08	1.90	10.67	0.78	14.43	0.00	8.65	4.56	0.82	**14.03**	**28.46**	838
			21.64	23.09	245.41	30.50	320.63	0.00	527.65	161.65	39.39	**728.69**	**1,049.32**	
			0.54	0.95	10.67	0.78	12.94	0.00	8.65	4.56	0.41	**13.62**	**26.56**	
23	7.16	1,476	1.07	1.88	10.76	0.76	14.47	0.00	8.76	4.51	0.81	**14.08**	**28.55**	814
			21.44	22.84	247.48	29.71	321.48	0.00	534.36	159.88	38.91	**733.15**	**1,054.62**	
			0.54	0.94	10.76	0.76	13.00	0.00	8.76	4.51	0.41	**13.68**	**26.67**	
24	6.95	1,670	1.15	2.77	11.61	0.80	16.33	0.00	8.81	5.71	1.28	**15.80**	**32.13**	1,014
			23.04	33.66	267.03	31.28	355.01	0.00	537.41	202.42	61.48	**801.31**	**1,156.32**	
			0.58	1.39	11.61	0.80	14.37	0.00	8.81	5.71	0.64	**15.16**	**29.53**	
25	7.00	1,781	1.15	2.88	12.54	0.84	17.41	0.00	5.40	9.45	1.99	**16.84**	**34.25**	1,200
			23.04	34.99	288.42	32.84	379.30	0.00	329.40	335.00	95.58	**759.99**	**1,139.29**	
			0.58	1.44	12.54	0.84	15.40	0.00	5.40	9.45	1.00	**15.85**	**31.24**	
26	7.05	1,461	1.06	1.86	10.61	0.75	14.28	0.00	8.64	4.47	0.80	**13.91**	**28.19**	806
			21.24	22.60	244.03	29.32	317.19	0.00	527.04	158.46	38.43	**723.93**	**1,041.12**	
			0.53	0.93	10.61	0.75	12.82	0.00	8.64	4.47	0.40	**13.51**	**26.33**	
27	7.00	379	0.28	0.50	2.76	0.18	3.72	0.00	2.28	1.15	0.20	**3.63**	**7.35**	258
			5.61	6.08	63.48	7.04	82.20	0.00	139.08	40.77	9.61	**189.45**	**271.66**	
			0.14	0.25	2.76	0.18	3.33	0.00	2.28	1.15	0.10	**3.53**	**6.86**	
28	7.07	1,459	1.03	1.88	10.64	0.73	14.28	0.00	8.66	4.45	0.79	**13.90**	**28.18**	810
			20.64	22.84	244.72	28.54	316.74	0.00	528.26	157.75	37.95	**723.96**	**1,040.70**	
			0.52	0.94	10.64	0.73	12.83	0.00	8.66	4.45	0.40	**13.51**	**26.33**	
29	6.77	1,502	1.18	2.82	10.11	0.56	14.67	0.00	4.49	7.96	1.86	**14.31**	**28.98**	970
			23.65	34.26	232.53	21.90	312.33	0.00	273.89	282.18	89.34	**645.41**	**957.75**	
			0.59	1.41	10.11	0.56	12.67	0.00	4.49	7.96	0.93	**13.38**	**26.05**	
30	7.87	1,809	1.50	2.60	12.67	0.93	17.70	0.00	7.05	9.03	1.16	**17.24**	**34.94**	1,228
			30.06	31.59	291.41	36.36	389.42	0.00	430.05	320.11	55.72	**805.88**	**1,195.30**	
			0.75	1.30	12.67	0.93	15.65	0.00	7.05	9.03	0.58	**16.66**	**32.31**	
31	7.60	1,615	1.08	2.72	11.26	0.78	15.84	0.00	8.63	5.54	1.24	**15.41**	**31.25**	722
			21.64	33.05	258.98	30.50	344.17	0.00	526.43	196.39	59.56	**782.38**	**1,126.55**	
			0.54	1.36	11.26	0.78	13.94	0.00	8.63	5.54	0.62	**14.79**	**28.73**	

Cuadro 10. Continuación

No.	pH	CE (µS cm^{-1})	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ	Σ iones	SDT (mg L^{-1})
			En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son mmol$_c$ L^{-1}, mg L^{-1} y mmoles L^{-1}											
32	7.79	1,884	1.25	3.26	12.95	0.92	18.38	0.00	10.02	6.43	1.44	**17.89**	**36.27**	1,030
			25.05	39.61	297.85	35.97	398.48	0.00	611.22	227.94	69.17	**908.33**	**1,306.81**	
			0.63	1.63	12.95	0.92	16.13	0.00	10.02	6.43	0.72	**17.17**	**33.30**	
33	7.16	1,453	1.02	1.86	10.57	0.73	14.18	0.00	8.62	4.41	0.78	**13.81**	**27.99**	812
			20.44	22.60	243.11	28.54	314.69	0.00	525.82	156.33	37.47	**719.62**	**1,034.31**	
			0.51	0.93	10.57	0.73	12.74	0.00	8.62	4.41	0.39	**13.42**	**26.16**	
34	7.72	1,191	0.92	1.42	8.70	0.60	11.64	0.00	7.04	3.62	0.64	**11.30**	**22.94**	686
			18.44	17.25	200.10	23.46	259.25	0.00	429.44	128.33	30.74	**588.51**	**847.76**	
			0.46	0.71	8.70	0.60	10.47	0.00	7.04	3.62	0.32	**10.98**	**21.45**	
35	6.87	2,060	2.02	2.96	14.14	1.02	20.14	0.00	12.46	6.08	1.02	**19.56**	**39.70**	992
			40.48	35.96	325.22	39.88	441.54	0.00	760.06	215.54	48.99	**1,024.59**	**1,466.13**	
			1.01	1.48	14.14	1.02	17.65	0.00	12.46	6.08	0.51	**19.05**	**36.70**	
36	7.37	2,157	1.86	2.76	15.42	1.08	21.12	0.00	12.94	6.52	1.10	**20.56**	**41.68**	1,180
			37.27	33.53	354.66	42.23	467.69	0.00	789.34	231.13	52.84	**1,073.31**	**1,541.00**	
			0.93	1.38	15.42	1.08	18.81	0.00	12.94	6.52	0.55	**20.01**	**38.82**	
37	7.71	2,234	1.82	2.82	16.03	1.14	21.81	0.00	13.26	6.85	1.14	**21.25**	**43.06**	1,420
			36.47	34.26	368.69	44.57	484.00	0.00	808.86	242.83	54.76	**1,106.45**	**1,590.45**	
			0.91	1.41	16.03	1.14	19.49	0.00	13.26	6.85	0.57	**20.68**	**40.17**	
38	7.38	2,141	2.32	3.18	14.16	1.06	20.72	0.00	12.66	6.42	1.12	**20.20**	**40.92**	1,202
			46.49	38.64	325.68	41.44	452.25	0.00	772.26	227.59	53.80	**1,053.65**	**1,505.90**	
			1.16	1.59	14.16	1.06	17.97	0.00	12.66	6.42	0.56	**19.64**	**37.61**	
39	7.42	2,146	1.75	2.76	15.44	1.08	21.03	0.00	12.77	6.58	1.12	**20.47**	**41.50**	1,202
			35.07	33.53	355.12	42.23	465.95	0.00	778.97	233.26	53.80	**1,066.03**	**1,531.98**	
			0.88	1.38	15.44	1.08	18.78	0.00	12.77	6.58	0.56	**19.91**	**38.69**	
40	7.89	1,966	1.05	3.13	13.34	1.74	19.26	0.00	10.99	5.05	2.59	**18.63**	**37.89**	1,224
			21.04	38.03	306.82	68.03	433.92	0.00	670.39	179.02	124.40	**973.82**	**1,407.74**	
			0.53	1.57	13.34	1.74	17.17	0.00	10.99	5.05	1.30	**17.34**	**34.51**	
41	7.41	2,146	1.73	2.78	15.58	1.04	21.13	0.00	12.75	6.56	1.14	**20.45**	**41.58**	1,170
			34.67	33.78	358.34	40.66	467.45	0.00	777.75	232.55	54.76	**1,065.06**	**1,532.51**	
			0.87	1.39	15.58	1.04	18.88	0.00	12.75	6.56	0.57	**19.88**	**38.76**	
42	7.53	1,808	1.10	2.82	13.09	0.69	17.70	0.00	9.50	6.45	1.20	**17.15**	**34.85**	1,150
			22.04	34.26	301.07	26.98	384.35	0.00	579.50	228.65	57.64	**865.79**	**1,250.15**	
			0.55	1.41	13.09	0.69	15.74	0.00	9.50	6.45	0.60	**16.55**	**32.29**	
43	7.86	1,554	1.08	1.98	11.32	0.78	15.16	0.00	9.28	4.69	0.83	**14.80**	**29.96**	926
			21.64	24.06	260.36	30.50	336.56	0.00	566.08	166.26	39.87	**772.21**	**1,108.76**	
			0.54	0.99	11.32	0.78	13.63	0.00	9.28	4.69	0.42	**14.39**	**28.02**	
44	8.55	1,180	0.72	2.04	8.16	0.62	11.54	0.50	6.12	3.50	1.10	**11.22**	**22.76**	770
			14.43	24.79	187.68	24.24	251.14	15.00	373.32	124.08	52.84	**565.23**	**816.37**	
			0.36	1.02	8.16	0.62	10.16	0.25	6.12	3.50	0.55	**10.42**	**20.58**	

Cuadro 10. Continuación

No.	pH	CE (µS cm^{-1})	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ	Σ iones	SDT (mg L^{-1})
			En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son mmol$_c$ L^{-1}, mg L^{-1} y mmoles L^{-1}											
45	7.53	1,219	0.84	1.55	8.92	0.62	11.93	0.00	7.28	3.69	0.65	**11.62**	**23.55**	714
			16.83	18.83	205.16	24.24	265.07	0.00	444.08	130.81	31.22	**606.11**	**871.18**	
			0.42	0.78	8.92	0.62	10.74	0.00	7.28	3.69	0.33	**11.30**	**22.03**	
46	7.98	2,264	1.72	2.84	16.35	1.15	22.06	0.00	13.15	7.16	1.19	**21.50**	**43.56**	1,248
			34.47	34.51	376.05	44.96	489.99	0.00	802.15	253.82	57.16	**1,113.13**	**1,603.12**	
			0.86	1.42	16.35	1.15	19.78	0.00	13.15	7.16	0.60	**20.91**	**40.69**	
47	8.00	982	0.62	1.72	6.72	0.52	9.58	0.00	5.50	2.92	0.90	**9.32**	**18.90**	618
			12.42	20.90	154.56	20.33	208.21	0.00	335.50	103.51	43.23	**482.24**	**690.46**	
			0.31	0.86	6.72	0.52	8.41	0.00	5.50	2.92	0.45	**8.87**	**17.28**	
48	7.55	2,189	1.65	2.73	15.92	1.12	21.42	0.00	12.84	6.86	1.14	**20.84**	**42.26**	1,232
			33.06	33.17	366.16	43.79	476.18	0.00	783.24	243.19	54.76	**1,081.18**	**1,557.37**	
			0.83	1.37	15.92	1.12	19.23	0.00	12.84	6.86	0.57	**20.27**	**39.50**	
49	8.15	1,749	1.38	2.20	12.63	0.90	17.11	0.62	9.73	5.39	0.91	**16.65**	**33.76**	990
			27.65	26.73	290.49	35.19	380.06	18.60	593.53	191.08	43.71	**846.92**	**1,226.98**	
			0.69	1.10	12.63	0.90	15.32	0.31	9.73	5.39	0.46	**15.89**	**31.21**	
50	8.20	1,081	0.68	1.89	7.42	0.57	10.56	0.40	5.64	3.21	1.02	**10.27**	**20.83**	684
			13.63	22.96	170.66	22.29	229.54	12.00	344.04	113.79	48.99	**518.83**	**748.36**	
			0.34	0.95	7.42	0.57	9.28	0.20	5.64	3.21	0.51	**9.56**	**18.84**	
51	7.98	1,772	1.32	2.20	12.88	0.90	17.30	0.00	10.44	5.49	0.92	**16.85**	**34.15**	1,028
			26.45	26.73	296.24	35.19	384.61	0.00	636.84	194.62	44.19	**875.65**	**1,260.26**	
			0.66	1.10	12.88	0.90	15.54	0.00	10.44	5.49	0.46	**16.39**	**31.93**	
52	8.04	1,726	1.40	2.16	12.46	0.88	16.90	0.00	10.18	5.38	0.90	**16.46**	**33.36**	988
			28.05	26.24	286.58	34.41	375.29	0.00	620.98	190.72	43.23	**854.93**	**1,230.22**	
			0.70	1.08	12.46	0.88	15.12	0.00	10.18	5.38	0.45	**16.01**	**31.13**	
53	7.97	1,730	1.42	2.12	12.49	0.89	16.92	0.00	10.25	5.34	0.89	**16.48**	**33.40**	1,032
			28.46	25.76	287.27	34.80	376.28	0.00	625.25	189.30	42.75	**857.30**	**1,233.58**	
			0.71	1.06	12.49	0.89	15.15	0.00	10.25	5.34	0.45	**16.04**	**31.19**	
54	7.98	1,732	1.20	2.13	12.54	0.88	16.75	0.00	9.70	5.71	0.91	**16.32**	**33.07**	1,036
			24.05	25.88	288.42	34.41	372.75	0.00	591.70	202.42	43.71	**837.83**	**1,210.58**	
			0.60	1.07	12.54	0.88	15.09	0.00	9.70	5.71	0.46	**15.87**	**30.95**	
55	8.02	1,732	1.22	2.16	12.68	0.86	16.92	0.00	9.79	5.75	0.92	**16.46**	**33.38**	1,004
			24.45	26.24	291.64	33.62	375.96	0.00	597.19	203.84	44.19	**845.22**	**1,221.17**	
			0.61	1.08	12.68	0.86	15.23	0.00	9.79	5.75	0.46	**16.00**	**31.23**	
56	8.30	1,731	1.19	2.19	12.66	0.88	16.92	0.24	10.02	5.28	0.92	**16.46**	**33.38**	1,006
			23.85	26.61	291.18	34.41	376.04	7.20	611.22	187.18	44.19	**849.79**	**1,225.83**	
			0.60	1.10	12.66	0.88	15.23	0.12	10.02	5.28	0.46	**15.88**	**31.11**	
57	7.55	924	0.70	1.60	6.22	0.49	9.01	0.00	2.76	5.11	0.88	**8.75**	**17.76**	622
			14.03	19.44	143.06	19.16	195.69	0.00	168.36	181.15	42.27	**391.78**	**587.46**	
			0.35	0.80	6.22	0.49	7.86	0.00	2.76	5.11	0.44	**8.31**	**16.17**	

Cuadro 10. Continuación

No.	pH	CE (µS cm^{-1})	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ	Σ iones	SDT (mg L^{-1})
			En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son mmol$_c$ L^{-1}, mg L^{-1} y mmoles L^{-1}											
58	8.00	1,725	1.18	2.14	12.55	0.88	16.75	0.00	9.71	5.70	0.92	**16.33**	**33.08**	984
			23.65	26.00	288.65	34.41	372.70	0.00	592.31	202.07	44.19	**838.56**	**1,211.27**	
			0.59	1.07	12.55	0.88	15.09	0.00	9.71	5.70	0.46	**15.87**	**30.96**	
59	7.57	1,046	0.82	1.80	7.09	0.56	10.27	0.00	3.20	5.81	0.98	**9.99**	**20.26**	636
			16.43	21.87	163.07	21.90	223.27	0.00	195.20	205.96	47.07	**448.24**	**671.50**	
			0.41	0.90	7.09	0.56	8.96	0.00	3.20	5.81	0.49	**9.50**	**18.46**	
60	8.04	1,735	1.22	2.20	12.73	0.87	17.02	0.00	9.92	5.74	0.92	**16.58**	**33.60**	1,014
			24.45	26.73	292.79	34.02	377.98	0.00	605.12	203.48	44.19	**852.79**	**1,230.78**	
			0.61	1.10	12.73	0.87	15.31	0.00	9.92	5.74	0.46	**16.12**	**31.43**	
61	8.14	1,670	1.12	2.80	11.57	0.84	16.33	0.00	9.47	4.89	1.52	**15.88**	**32.21**	1,006
			22.44	34.02	266.11	32.84	355.42	0.00	577.67	173.35	73.01	**824.03**	**1,179.45**	
			0.56	1.40	11.57	0.84	14.37	0.00	9.47	4.89	0.76	**15.12**	**29.49**	
62	8.11	1,741	1.18	2.14	12.82	0.88	17.02	0.00	9.97	5.69	0.92	**16.58**	**33.60**	1,004
			23.65	26.00	294.86	34.41	378.91	0.00	608.17	201.71	44.19	**854.07**	**1,232.98**	
			0.59	1.07	12.82	0.88	15.36	0.00	9.97	5.69	0.46	**16.12**	**31.48**	
63	7.69	2,308	1.86	2.90	16.66	1.17	22.59	0.00	13.50	7.32	1.21	**22.03**	**44.62**	1,208
			37.27	35.24	383.18	45.75	501.43	0.00	823.50	259.49	58.12	**1,141.11**	**1,642.55**	
			0.93	1.45	16.66	1.17	20.21	0.00	13.50	7.32	0.61	**21.43**	**41.64**	
64	7.57	2,471	1.72	3.04	18.13	1.26	24.15	0.00	14.06	8.16	1.30	**23.52**	**47.67**	1,436
			34.47	36.94	416.99	49.26	537.66	0.00	857.66	289.27	62.44	**1,209.37**	**1,747.03**	
			0.86	1.52	18.13	1.26	21.77	0.00	14.06	8.16	0.65	**22.87**	**44.64**	
65	8.04	1,730	1.40	2.22	12.40	0.90	16.92	0.00	10.16	5.32	0.92	**16.40**	**33.32**	1,000
			28.05	26.97	285.20	35.19	375.42	0.00	619.76	188.59	44.19	**852.54**	**1,227.96**	
			0.70	1.11	12.40	0.90	15.11	0.00	10.16	5.32	0.46	**15.94**	**31.05**	
66	7.19	512	1.08	2.64	1.08	0.19	4.99	0.00	3.70	0.64	0.52	**4.86**	**9.85**	292
			21.64	32.08	24.84	7.43	85.99	0.00	225.70	22.69	24.98	**273.36**	**359.35**	
			0.54	1.32	1.08	0.19	3.13	0.00	3.70	0.64	0.26	**4.60**	**7.73**	
67	8.02	1,685	1.10	2.90	11.61	0.82	16.43	0.00	8.98	5.72	1.28	**15.98**	**32.41**	1,058
			22.04	35.24	267.03	32.06	356.37	0.00	547.78	202.77	61.48	**812.04**	**1,168.40**	
			0.55	1.45	11.61	0.82	14.43	0.00	8.98	5.72	0.64	**15.34**	**29.77**	
68	8.35	1,707	1.05	3.25	11.56	0.86	16.72	0.86	8.85	5.03	1.52	**16.26**	**32.98**	966
			21.04	39.49	265.88	33.62	360.03	25.80	539.85	178.31	73.01	**816.97**	**1,177.01**	
			0.53	1.63	11.56	0.86	14.57	0.43	8.85	5.03	0.76	**15.07**	**29.64**	
69	7.34	557	1.20	2.88	1.20	0.20	5.48	0.00	4.05	0.70	0.60	**5.35**	**10.83**	246
			24.05	34.99	27.60	7.82	94.46	0.00	247.05	24.82	28.82	**300.68**	**395.14**	
			0.60	1.44	1.20	0.20	3.44	0.00	4.05	0.70	0.30	**5.05**	**8.49**	
70	7.61	1,216	0.84	1.54	8.93	0.62	11.93	0.00	6.92	4.05	0.65	**11.62**	**23.55**	612
			16.83	18.71	205.39	24.24	265.17	0.00	422.12	143.57	31.22	**596.91**	**862.09**	
			0.42	0.77	8.93	0.62	10.74	0.00	6.92	4.05	0.33	**11.30**	**22.04**	

Cuadro 10. Continuación

No.	pH	CE (µS cm^{-1})	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ	Σ iones	SDT (mg L^{-1})
			En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son mmol$_c$ L^{-1}, mg L^{-1} y mmoles L^{-1}											
71	8.16	1,599	0.98	3.16	10.67	0.84	15.65	0.00	9.12	4.59	1.48	**15.19**	**30.84**	984
			19.64	38.39	245.41	32.84	336.28	0.00	556.32	162.72	71.09	**790.12**	**1,126.41**	
			0.49	1.58	10.67	0.84	13.58	0.00	9.12	4.59	0.74	**14.45**	**28.03**	
72	7.47	313	1.50	0.78	0.63	0.12	3.03	0.00	2.28	0.37	0.30	**2.95**	**5.98**	204
			30.06	9.48	14.49	4.69	58.72	0.00	139.08	13.12	14.41	**166.61**	**225.32**	
			0.75	0.39	0.63	0.12	1.89	0.00	2.28	0.37	0.15	**2.80**	**4.69**	
73	7.24	364	1.74	0.90	0.74	0.14	3.52	0.00	2.63	0.43	0.35	**3.41**	**6.93**	228
			34.87	10.94	17.02	5.47	68.30	0.00	160.43	15.24	16.81	**192.48**	**260.78**	
			0.87	0.45	0.74	0.14	2.20	0.00	2.63	0.43	0.18	**3.24**	**5.44**	
74	7.86	608	2.96	1.54	1.24	0.23	5.97	0.00	4.48	0.73	0.60	**5.81**	**11.78**	425
			59.32	18.71	28.52	8.99	115.54	0.00	273.28	25.88	28.82	**327.98**	**443.52**	
			1.48	0.77	1.24	0.23	3.72	0.00	4.48	0.73	0.30	**5.51**	**9.23**	
75	8.27	1,490	0.91	2.94	9.94	0.78	14.57	0.00	8.53	4.27	1.38	**14.18**	**28.75**	920
			18.24	35.72	228.62	30.50	313.07	0.00	520.33	151.37	66.28	**737.99**	**1,051.06**	
			0.46	1.47	9.94	0.78	12.65	0.00	8.53	4.27	0.69	**13.49**	**26.14**	
76	8.02	559	1.42	2.72	1.13	0.21	5.48	0.00	4.09	0.67	0.55	**5.31**	**10.79**	392
			28.46	33.05	25.99	8.21	95.70	0.00	249.49	23.75	26.42	**299.66**	**395.36**	
			0.71	1.36	1.13	0.21	3.41	0.00	4.09	0.67	0.28	**5.04**	**8.45**	
77	8.29	1,470	0.88	2.88	9.86	0.76	14.38	0.00	8.51	4.14	1.35	**14.00**	**28.38**	892
			17.63	34.99	226.78	29.71	309.12	0.00	519.11	146.76	64.84	**730.72**	**1,039.84**	
			0.44	1.44	9.86	0.76	12.50	0.00	8.51	4.14	0.68	**13.33**	**25.83**	
78	8.13	1,455	0.86	2.87	9.69	0.76	14.18	0.00	8.30	4.14	1.36	**13.80**	**27.98**	908
			17.23	34.87	222.87	29.71	304.69	0.00	506.30	146.76	65.32	**718.39**	**1,023.08**	
			0.43	1.44	9.69	0.76	12.32	0.00	8.30	4.14	0.68	**13.12**	**25.44**	
79	7.53	352	0.75	1.82	0.72	0.13	3.42	0.00	2.55	0.42	0.36	**3.33**	**6.75**	172
			15.03	22.11	16.56	5.08	58.79	0.00	155.55	14.89	17.29	**187.73**	**246.52**	
			0.38	0.91	0.72	0.13	2.14	0.00	2.55	0.42	0.18	**3.15**	**5.29**	
80	7.65	469	2.35	1.14	0.94	0.17	4.60	0.00	3.41	0.56	0.48	**4.45**	**9.05**	310
			47.09	13.85	21.62	6.65	89.21	0.00	208.01	19.85	23.06	**250.92**	**340.13**	
			1.18	0.57	0.94	0.17	2.86	0.00	3.41	0.56	0.24	**4.21**	**7.07**	
81	8.18	1,239	0.79	2.24	8.45	0.65	12.13	0.00	7.00	3.60	1.20	**11.80**	**23.93**	772
			15.83	27.22	194.35	25.41	262.81	0.00	427.00	127.62	57.64	**612.26**	**875.07**	
			0.40	1.12	8.45	0.65	10.62	0.00	7.00	3.60	0.60	**11.20**	**21.82**	
82	8.28	1,136	0.72	1.98	7.90	0.55	11.15	0.30	6.18	3.32	1.05	**10.85**	**22.00**	722
			14.43	24.06	181.70	21.50	241.69	9.00	376.98	117.69	50.43	**554.11**	**795.80**	
			0.36	0.99	7.90	0.55	9.80	0.15	6.18	3.32	0.53	**10.18**	**19.98**	
83	7.69	300	0.74	1.47	0.60	0.12	2.93	0.00	2.20	0.35	0.30	**2.85**	**5.78**	198
			14.83	17.86	13.80	4.69	51.18	0.00	134.20	12.41	14.41	**161.02**	**212.20**	
			0.37	0.74	0.60	0.12	1.83	0.00	2.20	0.35	0.15	**2.70**	**4.53**	

Cuadro 10. Continuación

No.	pH	CE (µS cm^{-1})	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ	Σ iones	SDT (mg L^{-1})
			En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son mmol$_c$ L^{-1}, mg L^{-1} y mmoles L^{-1}											
84	7.65	334	1.60	0.83	0.67	0.13	3.23	0.00	2.42	0.39	0.32	**3.13**	**6.36**	236
			32.06	10.08	15.41	5.08	62.64	0.00	147.62	13.83	15.37	**176.82**	**239.46**	
			0.80	0.42	0.67	0.13	2.02	0.00	2.42	0.39	0.16	**2.97**	**4.99**	

Cuadro 11. Composición iónica de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco, en el verano de 2019.

No.	pH	CE	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ cationes	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ aniones	Σ iones	SDT
		(µS/cm)	En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son mmol$_c$ L^{-1}, mg L^{-1} y mmoles L^{-1}											mg L^{-1}
1	7.85	566	1.10	1.55	2.44	0.44	**5.53**	0.00	3.16	1.70	0.53	**5.39**	**10.92**	432
			22.04	18.84	56.10	17.20	**114.18**	0.00	192.81	60.27	25.46	**278.54**	**392.72**	
			0.55	0.78	2.44	0.44	**4.21**	0.00	3.16	1.70	0.27	**5.13**	**9.33**	
2	6.99	1,622	2.10	3.60	9.32	0.84	**15.86**	0.00	8.34	4.90	2.09	**15.33**	**31.19**	1,244
			42.08	43.75	214.26	32.84	**332.94**	0.00	508.88	173.72	100.39	**782.99**	**1,115.92**	
			1.05	1.80	9.32	0.84	**13.01**	0.00	8.34	4.90	1.05	**14.29**	**27.30**	
3	6.97	1,814	2.55	3.05	11.29	0.85	**17.74**	0.00	9.24	6.85	1.08	**17.17**	**34.91**	1,216
			51.10	37.07	259.55	33.23	**380.95**	0.00	563.80	242.85	51.87	**858.52**	**1,239.48**	
			1.28	1.53	11.29	0.85	**14.94**	0.00	9.24	6.85	0.54	**16.63**	**31.57**	
4	6.77	1,050	1.55	1.85	6.12	0.65	**10.17**	0.00	5.75	3.55	0.53	**9.83**	**20.00**	756
			31.06	22.48	140.70	25.41	**219.65**	0.00	350.85	125.86	25.46	**502.16**	**721.82**	
			0.78	0.93	6.12	0.65	**8.47**	0.00	5.75	3.55	0.27	**9.57**	**18.04**	
5	6.93	1,571	1.75	2.45	10.34	0.82	**15.36**	0.00	8.87	4.65	1.42	**14.94**	**30.30**	904
			35.07	29.77	237.71	32.06	**334.62**	0.00	541.22	164.86	68.20	**774.28**	**1,108.90**	
			0.88	1.23	10.34	0.82	**13.26**	0.00	8.87	4.65	0.71	**14.23**	**27.49**	
6	7.01	1,621	2.05	2.70	10.29	0.66	**15.70**	0.00	8.56	4.64	1.92	**15.12**	**30.82**	936
			41.08	32.81	236.56	25.80	**336.26**	0.00	522.30	164.50	92.22	**779.03**	**1,115.29**	
			1.03	1.35	10.29	0.66	**13.33**	0.00	8.56	4.64	0.96	**14.16**	**27.49**	
7	7.21	1,584	1.90	2.60	10.06	0.78	**15.34**	0.00	8.38	5.30	1.25	**14.93**	**30.27**	954
			38.07	31.60	231.28	30.50	**331.44**	0.00	511.32	187.90	60.04	**759.26**	**1,090.71**	
			0.95	1.30	10.06	0.78	**13.09**	0.00	8.38	5.30	0.63	**14.31**	**27.40**	
8	7.11	1,308	1.20	1.80	9.18	0.79	**12.97**	0.00	7.96	3.80	0.78	**12.54**	**25.51**	776
			24.05	21.87	211.05	30.89	**287.86**	0.00	485.69	134.72	37.46	**657.88**	**945.73**	
			0.60	0.90	9.18	0.79	**11.47**	0.00	7.96	3.80	0.39	**12.15**	**23.62**	
9	6.94	3,430	2.30	3.85	25.79	1.28	**33.22**	0.00	18.61	11.48	2.04	**32.13**	**65.35**	2,586
			46.09	46.79	592.91	50.05	**735.83**	0.00	1,135.52	407.00	97.98	**1,640.51**	**2,376.34**	
			1.15	1.93	25.79	1.28	**30.15**	0.00	18.61	11.48	1.02	**31.11**	**61.26**	

Cuadro 11. Continuación

No.	pH	CE	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ cationes	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ aniones	Σ iones	SDT
		(µS/cm)	En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son $mmol_c\ L^{-1}$, mg L^{-1} y mmoles L^{-1}											mg L^{-1}
10	6.85	1,550	1.36	3.19	9.76	0.70	**15.01**	0.00	8.24	5.05	1.30	**14.59**	**29.60**	888
			27.25	38.77	224.38	27.37	**317.77**	0.00	502.78	179.04	62.44	**744.26**	**1,062.03**	
			0.68	1.60	9.76	0.70	**12.74**	0.00	8.24	5.05	0.65	**13.94**	**26.68**	
11	7.32	1,893	2.15	3.50	11.71	0.97	**18.33**	0.00	9.64	6.85	1.24	**17.73**	**36.06**	1,270
			43.08	42.53	269.21	37.93	**392.75**	0.00	588.20	242.85	59.56	**890.61**	**1,283.37**	
			1.08	1.75	11.71	0.97	**15.51**	0.00	9.64	6.85	0.62	**17.11**	**32.62**	
12	7.07	2,021	2.30	3.60	13.07	0.79	**19.76**	0.00	10.88	6.60	1.68	**19.16**	**38.92**	1,210
			46.09	43.75	300.48	30.89	**421.20**	0.00	663.86	233.99	80.69	**978.55**	**1,399.75**	
			1.15	1.80	13.07	0.79	**16.81**	0.00	10.88	6.60	0.84	**18.32**	**35.13**	
13	7.25	2,014	2.15	3.85	12.90	0.80	**19.70**	0.00	10.57	6.95	1.52	**19.04**	**38.74**	1,198
			43.08	46.79	296.57	31.28	**417.72**	0.00	644.95	246.40	73.01	**964.35**	**1,382.07**	
			1.08	1.93	12.90	0.80	**16.70**	0.00	10.57	6.95	0.76	**18.28**	**34.98**	
14	7.39	1,949	2.10	3.70	12.55	0.71	**19.06**	0.00	10.82	6.35	1.25	**18.42**	**37.48**	1,154
			42.08	44.96	288.52	27.76	**403.33**	0.00	660.20	225.13	60.04	**945.37**	**1,348.70**	
			1.05	1.85	12.55	0.71	**16.16**	0.00	10.82	6.35	0.63	**17.80**	**33.96**	
15	7.00	1,249	1.12	2.58	7.93	0.58	**12.21**	0.00	6.81	4.07	0.94	**11.82**	**24.03**	720
			22.44	31.35	182.31	22.68	**258.78**	0.00	415.52	144.29	45.15	**604.97**	**863.75**	
			0.56	1.29	7.93	0.58	**10.36**	0.00	6.81	4.07	0.47	**11.35**	**21.71**	
16	6.93	1,405	1.23	2.84	8.89	0.78	**13.74**	0.00	7.57	4.62	1.20	**13.39**	**27.13**	798
			24.65	34.51	204.38	30.50	**294.04**	0.00	461.90	163.79	57.64	**683.33**	**977.36**	
			0.62	1.42	8.89	0.78	**11.71**	0.00	7.57	4.62	0.60	**12.79**	**24.50**	
17	6.87	1,138	1.04	1.94	7.56	0.59	**11.13**	0.00	5.87	3.98	0.98	**10.83**	**21.96**	668
			20.84	23.58	173.80	23.07	**241.29**	0.00	358.17	141.10	47.07	**546.34**	**787.63**	
			0.52	0.97	7.56	0.59	**9.64**	0.00	5.87	3.98	0.49	**10.34**	**19.98**	
18	6.93	1,197	1.06	1.91	8.07	0.67	**11.71**	0.00	6.55	3.76	1.02	**11.33**	**23.04**	820
			21.24	23.21	185.53	26.20	**256.18**	0.00	399.66	133.30	48.99	**581.96**	**838.13**	
			0.53	0.96	8.07	0.67	**10.23**	0.00	6.55	3.76	0.51	**10.82**	**21.05**	
19	7.01	1,164	1.08	2.39	7.19	0.61	**11.27**	0.00	6.41	3.58	0.98	**10.97**	**22.24**	776
			21.64	29.04	165.30	23.85	**239.83**	0.00	391.12	126.92	47.07	**565.11**	**804.94**	
			0.54	1.20	7.19	0.61	**9.54**	0.00	6.41	3.58	0.49	**10.48**	**20.02**	
20	7.09	1,372	1.24	2.84	8.71	0.63	**13.42**	0.00	7.30	4.50	1.17	**12.97**	**26.39**	924
			24.85	34.51	200.24	24.63	**284.23**	0.00	445.42	159.54	56.20	**661.16**	**945.39**	
			0.62	1.42	8.71	0.63	**11.38**	0.00	7.30	4.50	0.59	**12.39**	**23.77**	
21	7.04	1,205	1.06	2.48	7.47	0.66	**11.67**	0.00	6.27	4.22	0.83	**11.32**	**22.99**	704
			21.24	30.14	171.73	25.80	**248.92**	0.00	382.58	149.61	39.87	**572.05**	**820.97**	
			0.53	1.24	7.47	0.66	**9.90**	0.00	6.27	4.22	0.42	**10.91**	**20.81**	
22	7.02	1,400	1.68	2.64	8.62	0.75	**13.69**	0.00	7.17	4.67	1.50	**13.34**	**27.03**	816
			33.67	32.08	198.17	29.32	**293.24**	0.00	437.49	165.57	72.05	**675.10**	**968.35**	
			0.84	1.32	8.62	0.75	**11.53**	0.00	7.17	4.67	0.75	**12.59**	**24.12**	

Cuadro 11. Continuación

No.	pH	CE	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ cationes	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ aniones	Σ iones	SDT
		(µS/cm)	En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son $mmol_c\ L^{-1}$, $mg\ L^{-1}$ y $mmoles\ L^{-1}$											$mg\ L^{-1}$
23	6.99	1,174	1.02	2.45	7.29	0.61	**11.37**	0.00	6.01	3.77	1.30	**11.08**	**22.45**	666
			20.44	29.77	167.60	23.85	**241.66**	0.00	366.71	133.66	62.44	**562.81**	**804.47**	
			0.51	1.23	7.29	0.61	**9.64**	0.00	6.01	3.77	0.65	**10.43**	**20.07**	
24	6.94	1,166	1.63	2.95	6.27	0.55	**11.40**	0.00	5.42	4.38	0.80	**10.60**	**22.00**	668
			32.66	35.85	144.15	21.50	**234.16**	0.00	330.71	155.28	38.43	**524.42**	**758.58**	
			0.82	1.48	6.27	0.55	**9.11**	0.00	5.42	4.38	0.40	**10.20**	**19.31**	
25	6.88	555	0.35	1.85	2.72	0.51	**5.43**	0.00	3.25	1.68	0.34	**5.27**	**10.70**	354
			7.01	22.48	62.53	19.94	**111.97**	0.00	198.30	59.56	16.33	**274.20**	**386.16**	
			0.18	0.93	2.72	0.51	**4.33**	0.00	3.25	1.68	0.17	**5.10**	**9.43**	
26	7.00	1,307	1.15	2.69	8.32	0.62	**12.78**	0.00	7.09	4.26	1.10	**12.45**	**25.23**	768
			23.04	32.69	191.27	24.24	**271.25**	0.00	432.61	151.03	52.83	**636.47**	**907.72**	
			0.58	1.35	8.32	0.62	**10.86**	0.00	7.09	4.26	0.55	**11.90**	**22.76**	
27	7.01	1,230	1.70	2.86	6.83	0.64	**12.03**	0.00	5.97	4.65	1.10	**11.72**	**23.75**	718
			34.07	34.76	157.02	25.02	**250.87**	0.00	364.27	164.86	52.83	**581.96**	**832.83**	
			0.85	1.43	6.83	0.64	**9.75**	0.00	5.97	4.65	0.55	**11.17**	**20.92**	
28	6.95	1,250	1.76	3.17	6.65	0.64	**12.22**	0.00	6.06	4.72	1.04	**11.82**	**24.04**	728
			35.27	38.52	152.88	25.02	**251.70**	0.00	369.76	167.34	49.95	**587.05**	**838.75**	
			0.88	1.59	6.65	0.64	**9.76**	0.00	6.06	4.72	0.52	**11.30**	**21.06**	
29	6.96	1,359	1.24	2.80	8.61	0.64	**13.29**	0.00	7.24	4.44	1.15	**12.83**	**26.12**	774
			24.85	34.03	197.94	25.02	**281.84**	0.00	441.76	157.41	55.24	**654.41**	**936.25**	
			0.62	1.40	8.61	0.64	**11.27**	0.00	7.24	4.44	0.58	**12.26**	**23.53**	
30	7.32	2,199	1.91	4.50	14.16	0.73	**21.30**	0.00	11.32	7.06	2.34	**20.72**	**42.02**	1,434
			38.27	54.69	325.54	28.54	**447.04**	0.00	690.71	250.30	112.39	**1,053.40**	**1,500.44**	
			0.96	2.25	14.16	0.73	**18.10**	0.00	11.32	7.06	1.17	**19.55**	**37.65**	
31	7.03	2,888	4.15	6.50	16.02	1.30	**27.97**	0.00	15.56	9.44	2.05	**27.05**	**55.02**	2,342
			83.16	78.99	368.30	50.83	**581.28**	0.00	949.42	334.68	98.46	**1,382.56**	**1,963.84**	
			2.08	3.25	16.02	1.30	**22.65**	0.00	15.56	9.44	1.03	**26.03**	**48.67**	
32	7.03	1,144	1.02	2.36	8.03	0.46	**11.87**	0.00	6.53	3.71	1.32	**11.56**	**23.43**	738
			20.44	28.68	184.61	17.99	**251.71**	0.00	398.44	131.53	63.40	**593.37**	**845.08**	
			0.51	1.18	8.03	0.46	**10.18**	0.00	6.53	3.71	0.66	**10.90**	**21.08**	
33	6.97	1,404	1.52	2.66	8.82	0.73	**13.73**	0.00	7.86	4.57	0.92	**13.35**	**27.08**	802
			30.46	32.33	202.77	28.54	**294.10**	0.00	479.59	162.02	44.19	**685.80**	**979.90**	
			0.76	1.33	8.82	0.73	**11.64**	0.00	7.86	4.57	0.46	**12.89**	**24.53**	
34	7.25	1,704	1.83	3.22	10.83	0.62	**16.50**	0.00	9.34	5.52	1.09	**15.95**	**32.45**	1,134
			36.67	39.13	248.98	24.24	**349.02**	0.00	569.90	195.70	52.35	**817.95**	**1,166.97**	
			0.92	1.61	10.83	0.62	**13.98**	0.00	9.34	5.52	0.55	**15.41**	**29.38**	

Cuadro 11. Continuación

No.	pH	CE	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ cationes	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ aniones	Σ iones	SDT
		(µS/cm)	En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son $mmol_c\ L^{-1}$, $mg\ L^{-1}$ y $mmoles\ L^{-1}$											$mg\ L^{-1}$
35	6.98	1,397	1.48	2.66	8.80	0.59	**13.53**	0.00	7.30	4.80	1.08	**13.18**	**26.71**	792
			29.66	32.33	202.31	23.07	**287.36**	0.00	445.42	170.17	51.87	**667.47**	**954.83**	
			0.74	1.33	8.80	0.59	**11.46**	0.00	7.30	4.80	0.54	**12.64**	**24.10**	
36	6.96	1,100	1.24	1.94	6.95	0.63	**10.76**	0.00	5.89	3.56	0.95	**10.40**	**21.16**	656
			24.85	23.58	159.78	24.63	**232.84**	0.00	359.39	126.21	45.63	**531.23**	**764.07**	
			0.62	0.97	6.95	0.63	**9.17**	0.00	5.89	3.56	0.48	**9.93**	**19.10**	
37	7.08	1,260	1.80	3.10	6.80	0.62	**12.32**	0.00	6.44	4.73	0.75	**11.92**	**24.24**	776
			36.07	37.67	156.33	24.24	**254.31**	0.00	392.95	167.69	36.02	**596.66**	**850.98**	
			0.90	1.55	6.80	0.62	**9.87**	0.00	6.44	4.73	0.38	**11.55**	**21.42**	
38	7.08	1,425	1.23	2.96	9.11	0.70	**14.00**	0.00	7.59	4.15	1.72	**13.46**	**27.46**	872
			24.65	35.97	209.44	27.37	**297.42**	0.00	463.12	147.13	82.61	**692.86**	**990.29**	
			0.62	1.48	9.11	0.70	**11.91**	0.00	7.59	4.15	0.86	**12.60**	**24.51**	
39	7.75	320	0.67	0.95	1.24	0.27	**3.13**	0.00	1.69	1.04	0.32	**3.05**	**6.18**	256
			13.43	11.54	28.51	10.56	**64.03**	0.00	103.12	36.87	15.37	**155.36**	**219.39**	
			0.34	0.48	1.24	0.27	**2.32**	0.00	1.69	1.04	0.16	**2.89**	**5.21**	
40	7.12	1,332	1.18	2.12	9.07	0.66	**13.03**	0.00	7.31	4.18	1.12	**12.61**	**25.64**	878
			23.65	25.76	208.52	25.80	**283.73**	0.00	446.03	148.19	53.80	**648.02**	**931.75**	
			0.59	1.06	9.07	0.66	**11.38**	0.00	7.31	4.18	0.56	**12.05**	**23.43**	
41	7.29	1,313	1.49	2.34	8.36	0.65	**12.84**	0.00	6.88	4.29	1.24	**12.41**	**25.25**	848
			29.86	28.44	192.19	25.41	**275.90**	0.00	419.80	152.09	59.56	**631.45**	**907.35**	
			0.75	1.17	8.36	0.65	**10.93**	0.00	6.88	4.29	0.62	**11.79**	**22.72**	
42	7.12	1,796	1.57	3.70	11.63	0.66	**17.56**	0.00	9.08	5.80	2.07	**16.95**	**34.51**	1,452
			31.46	44.96	267.37	25.80	**369.60**	0.00	554.03	205.63	99.42	**859.09**	**1,228.69**	
			0.79	1.85	11.63	0.66	**14.93**	0.00	9.08	5.80	1.04	**15.92**	**30.84**	
43	6.96	1,161	1.02	2.40	7.28	0.65	**11.35**	0.00	5.66	3.85	1.42	**10.93**	**22.28**	838
			20.44	29.17	167.37	25.41	**242.39**	0.00	345.36	136.49	68.20	**550.05**	**792.44**	
			0.51	1.20	7.28	0.65	**9.64**	0.00	5.66	3.85	0.71	**10.22**	**19.86**	
44	7.18	1,407	1.73	2.65	8.62	0.76	**13.76**	0.00	7.16	4.72	1.51	**13.39**	**27.15**	862
			34.67	32.20	198.17	29.71	**294.76**	0.00	436.88	167.34	72.53	**676.75**	**971.50**	
			0.87	1.33	8.62	0.76	**11.57**	0.00	7.16	4.72	0.76	**12.64**	**24.21**	
45	6.96	1,192	1.52	3.02	6.54	0.58	**11.66**	0.00	6.43	3.43	1.42	**11.28**	**22.94**	760
			30.46	36.70	150.35	22.68	**240.19**	0.00	392.34	121.60	68.20	**582.15**	**822.34**	
			0.76	1.51	6.54	0.58	**9.39**	0.00	6.43	3.43	0.71	**10.57**	**19.96**	
46	6.59	271	0.58	0.80	1.02	0.25	**2.65**	0.00	1.44	0.88	0.27	**2.59**	**5.24**	264
			11.62	9.72	23.45	9.77	**54.57**	0.00	87.86	31.20	12.97	**132.03**	**186.60**	
			0.29	0.40	1.02	0.25	**1.96**	0.00	1.44	0.88	0.14	**2.46**	**4.42**	
47	7.19	1,222	1.34	2.33	7.49	0.67	**11.83**	0.00	6.66	4.02	0.79	**11.47**	**23.30**	766
			26.85	28.32	172.19	26.20	**253.56**	0.00	406.37	142.52	37.94	**586.84**	**840.39**	
			0.67	1.17	7.49	0.67	**10.00**	0.00	6.66	4.02	0.40	**11.08**	**21.07**	

Cuadro 11. Continuación

No.	pH	CE	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ cationes	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ aniones	Σ iones	SDT
		(µS/cm)	En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son $mmol_c\ L^{-1}$, $mg\ L^{-1}$ y $mmoles\ L^{-1}$											$mg\ L^{-1}$
48	7.06	1,651	1.76	3.15	10.63	0.61	**16.15**	0.00	8.16	5.50	1.98	**15.64**	**31.79**	1,030
			35.27	38.28	244.38	23.85	**341.78**	0.00	497.90	194.99	95.10	**787.99**	**1,129.77**	
			0.88	1.58	10.63	0.61	**13.70**	0.00	8.16	5.50	0.99	**14.65**	**28.35**	
49	6.97	1,227	1.08	2.87	7.50	0.55	**12.00**	0.00	6.94	3.57	1.10	**11.61**	**23.61**	744
			21.64	34.88	172.42	21.50	**250.45**	0.00	423.46	126.57	52.83	**602.86**	**853.31**	
			0.54	1.44	7.50	0.55	**10.03**	0.00	6.94	3.57	0.55	**11.06**	**21.09**	
50	7.09	2,277	2.44	4.29	14.50	0.82	**22.05**	0.00	11.23	7.50	2.58	**21.31**	**43.36**	1,490
			48.90	52.13	333.35	32.06	**466.44**	0.00	685.22	265.90	123.92	**1,075.04**	**1,541.48**	
			1.22	2.15	14.50	0.82	**18.69**	0.00	11.23	7.50	1.29	**20.02**	**38.71**	
51	7.65	1,856	1.64	3.84	11.66	0.83	**17.97**	0.00	9.82	6.08	1.58	**17.48**	**35.45**	1,126
			32.86	46.67	268.06	32.45	**380.04**	0.00	599.19	215.55	75.89	**890.63**	**1,270.67**	
			0.82	1.92	11.66	0.83	**15.23**	0.00	9.82	6.08	0.79	**16.69**	**31.92**	
52	7.57	1,481	1.29	3.03	9.31	0.71	**14.34**	0.00	7.40	4.85	1.72	**13.97**	**28.31**	994
			25.85	36.82	214.03	27.76	**304.47**	0.00	451.52	171.95	82.61	**706.09**	**1,010.55**	
			0.65	1.52	9.31	0.71	**12.18**	0.00	7.40	4.85	0.86	**13.11**	**25.29**	
53	7.21	1,169	1.65	2.97	6.25	0.56	**11.43**	0.00	5.82	4.42	0.81	**11.05**	**22.48**	730
			33.06	36.09	143.69	21.90	**234.74**	0.00	355.12	156.70	38.91	**550.73**	**785.46**	
			0.83	1.49	6.25	0.56	**9.12**	0.00	5.82	4.42	0.41	**10.65**	**19.77**	
54	7.61	901	1.62	2.51	4.18	0.50	**8.81**	0.00	4.60	3.24	0.71	**8.55**	**17.36**	786
			32.46	30.50	96.10	19.55	**178.61**	0.00	280.68	114.87	34.10	**429.65**	**608.26**	
			0.81	1.26	4.18	0.50	**6.75**	0.00	4.60	3.24	0.36	**8.20**	**14.94**	
55	8.61	1,224	2.20	3.39	5.74	0.64	**11.97**	0.68	5.64	4.37	0.95	**11.64**	**23.61**	886
			44.09	41.20	131.96	25.02	**242.27**	20.40	344.13	154.93	45.63	**565.09**	**807.36**	
			1.10	1.70	5.74	0.64	**9.18**	0.34	5.64	4.37	0.48	**10.83**	**20.00**	
56	7.82	2,216	3.12	5.60	11.87	1.08	**21.67**	0.00	11.10	8.33	1.52	**20.95**	**42.62**	1,368
			62.52	68.05	272.89	42.23	**445.69**	0.00	677.29	295.32	73.01	**1,045.62**	**1,491.31**	
			1.56	2.80	11.87	1.08	**17.31**	0.00	11.10	8.33	0.76	**20.19**	**37.50**	
57	7.19	1,945	3.21	4.53	10.08	1.02	**18.84**	0.00	9.89	6.96	1.48	**18.33**	**37.17**	1,082
			64.33	55.05	231.74	39.88	**390.99**	0.00	603.46	246.75	71.09	**921.30**	**1,312.29**	
			1.61	2.27	10.08	1.02	**14.97**	0.00	9.89	6.96	0.74	**17.59**	**32.56**	
58	8.07	2,016	2.88	4.68	11.41	0.74	**19.71**	0.00	10.38	7.20	1.58	**19.16**	**38.87**	1,258
			57.71	56.87	262.31	28.93	**405.83**	0.00	633.35	255.26	75.89	**964.51**	**1,370.34**	
			1.44	2.34	11.41	0.74	**15.93**	0.00	10.38	7.20	0.79	**18.37**	**34.30**	
59	8.15	2,232	3.15	5.62	12.24	0.82	**21.83**	0.00	11.07	8.42	1.63	**21.12**	**42.95**	1,442
			63.12	68.30	281.39	32.06	**444.88**	0.00	675.46	298.51	78.29	**1,052.26**	**1,497.14**	
			1.58	2.81	12.24	0.82	**17.45**	0.00	11.07	8.42	0.82	**20.31**	**37.75**	
60	8.00	1,877	1.65	3.88	11.89	0.76	**18.18**	0.70	8.62	6.09	2.17	**17.58**	**35.76**	1,228
			33.06	47.15	273.35	29.71	**383.28**	21.00	525.97	215.91	104.23	**867.10**	**1,250.38**	
			0.83	1.94	11.89	0.76	**15.42**	0.35	8.62	6.09	1.09	**16.15**	**31.56**	

Cuadro 11. Continuación

No.	pH	CE	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ cationes	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ aniones	Σ iones	SDT
		(µS/cm)	En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son $mmol_c\ L^{-1}$, $mg\ L^{-1}$ y $mmoles\ L^{-1}$											$mg\ L^{-1}$
61	7.31	1,575	1.82	2.98	9.87	0.73	**15.40**	0.00	8.58	4.80	1.63	**15.01**	**30.41**	988
			36.47	36.21	226.91	28.54	**328.14**	0.00	523.52	170.17	78.29	**771.99**	**1,100.13**	
			0.91	1.49	9.87	0.73	**13.00**	0.00	8.58	4.80	0.82	**14.20**	**27.20**	
62	7.66	1,958	2.77	4.98	10.57	0.83	**19.15**	0.00	8.95	7.40	2.28	**18.63**	**37.78**	1,160
			55.51	60.52	243.00	32.45	**391.48**	0.00	546.10	262.35	109.51	**917.96**	**1,309.45**	
			1.39	2.49	10.57	0.83	**15.28**	0.00	8.95	7.40	1.14	**17.49**	**32.77**	
63	8.90	1,053	1.49	2.68	5.61	0.52	**10.30**	0.00	5.21	3.98	0.76	**9.95**	**20.25**	648
			29.86	32.57	128.97	20.33	**211.73**	0.00	317.90	141.10	36.50	**495.50**	**707.23**	
			0.75	1.34	5.61	0.52	**8.22**	0.00	5.21	3.98	0.38	**9.57**	**17.79**	
64	7.22	1,223	1.74	3.12	6.39	0.59	**11.84**	0.00	6.03	4.64	0.85	**11.52**	**23.36**	740
			34.87	37.92	146.90	23.07	**242.76**	0.00	367.93	164.50	40.83	**573.26**	**816.02**	
			0.87	1.56	6.39	0.59	**9.41**	0.00	6.03	4.64	0.43	**11.10**	**20.51**	
65	7.26	2,365	3.32	5.96	12.72	1.13	**23.13**	0.00	11.90	8.86	1.62	**22.38**	**45.51**	1,802
			66.53	72.43	292.43	44.18	**475.57**	0.00	726.10	314.11	77.81	**1,118.02**	**1,593.59**	
			1.66	2.98	12.72	1.13	**18.49**	0.00	11.90	8.86	0.81	**21.57**	**40.06**	
66	8.01	2,125	3.47	4.90	11.48	0.73	**20.58**	0.00	10.66	7.55	1.70	**19.91**	**40.49**	1,252
			69.54	59.55	263.92	28.54	**421.55**	0.00	650.44	267.67	81.65	**999.76**	**1,421.31**	
			1.74	2.45	11.48	0.73	**16.40**	0.00	10.66	7.55	0.85	**19.06**	**35.46**	
67	8.70	1,022	1.83	2.82	4.87	0.47	**9.99**	0.00	5.23	3.64	0.79	**9.66**	**19.65**	706
			36.67	34.27	111.96	18.38	**201.28**	0.00	319.12	129.05	37.94	**486.11**	**687.39**	
			0.92	1.41	4.87	0.47	**7.67**	0.00	5.23	3.64	0.40	**9.27**	**16.93**	
68	8.37	1,616	2.90	4.48	7.86	0.76	**16.00**	0.70	7.54	5.78	1.26	**15.28**	**31.28**	1,032
			58.11	54.44	180.70	29.71	**322.97**	21.00	460.07	204.92	60.52	**746.50**	**1,069.48**	
			1.45	2.24	7.86	0.76	**12.31**	0.35	7.54	5.78	0.63	**14.30**	**26.61**	
69	7.31	1,493	2.69	4.19	6.97	0.75	**14.60**	0.00	7.56	5.38	1.18	**14.12**	**28.72**	940
			53.90	50.92	160.24	29.32	**294.39**	0.00	461.29	190.74	56.68	**708.70**	**1,003.09**	
			1.35	2.10	6.97	0.75	**11.16**	0.00	7.56	5.38	0.59	**13.53**	**24.69**	
70	8.02	1,676	2.35	4.23	8.90	0.75	**16.23**	0.00	7.49	6.29	1.92	**15.70**	**31.93**	1,088
			47.09	51.41	204.61	29.32	**332.43**	0.00	457.02	223.00	92.22	**772.24**	**1,104.66**	
			1.18	2.12	8.90	0.75	**12.94**	0.00	7.49	6.29	0.96	**14.74**	**27.68**	
71	7.33	1,507	2.46	3.46	7.99	0.68	**14.59**	0.00	7.66	5.33	1.12	**14.11**	**28.70**	940
			49.30	42.05	183.69	26.59	**301.62**	0.00	467.39	188.96	53.80	**710.15**	**1,011.77**	
			1.23	1.73	7.99	0.68	**11.63**	0.00	7.66	5.33	0.56	**13.55**	**25.18**	
72	7.90	2,190	3.57	5.05	12.05	0.75	**21.42**	0.00	11.34	7.78	1.75	**20.87**	**42.29**	1,306
			71.54	61.37	277.03	29.32	**439.26**	0.00	691.93	275.82	84.05	**1,051.81**	**1,491.07**	
			1.79	2.53	12.05	0.75	**17.11**	0.00	11.34	7.78	0.88	**20.00**	**37.11**	
73	8.11	1,689	2.78	3.93	8.99	0.82	**16.52**	0.00	8.62	6.04	1.30	**15.96**	**32.48**	1,312
			55.71	47.76	206.68	32.06	**342.21**	0.00	525.97	214.14	62.44	**802.54**	**1,144.75**	
			1.39	1.97	8.99	0.82	**13.17**	0.00	8.62	6.04	0.65	**15.31**	**28.48**	

Cuadro 11. Continuación

No.	pH	CE	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ cationes	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ aniones	Σ iones	SDT
		(µS/cm)	En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son $mmol_c\ L^{-1}$, $mg\ L^{-1}$ y $mmoles\ L^{-1}$											$mg\ L^{-1}$
74	8.45	1,624	2.53	4.54	7.99	0.82	**15.88**	0.00	8.03	6.12	1.30	**15.45**	**31.33**	1,060
			50.70	55.17	183.69	32.06	**321.62**	0.00	489.97	216.97	62.44	**769.38**	**1,091.00**	
			1.27	2.27	7.99	0.82	**12.35**	0.00	8.03	6.12	0.65	**14.80**	**27.15**	
75	7.64	1,042	1.72	2.44	5.45	0.58	**10.19**	0.00	5.30	3.74	0.81	**9.85**	**20.04**	680
			34.47	29.65	125.29	22.68	**212.09**	0.00	323.39	132.59	38.91	**494.89**	**706.98**	
			0.86	1.22	5.45	0.58	**8.11**	0.00	5.30	3.74	0.41	**9.45**	**17.56**	
76	8.28	1,660	2.98	4.62	7.70	0.78	**16.08**	0.00	8.29	5.95	1.30	**15.54**	**31.62**	1,068
			59.72	56.14	177.02	30.50	**323.38**	0.00	505.83	210.95	62.44	**779.22**	**1,102.59**	
			1.49	2.31	7.70	0.78	**12.28**	0.00	8.29	5.95	0.65	**14.89**	**27.17**	
77	8.23	1,667	2.99	4.61	7.74	0.80	**16.14**	0.00	8.45	5.95	1.30	**15.70**	**31.84**	1,242
			59.92	56.02	177.94	31.28	**325.16**	0.00	515.59	210.95	62.44	**788.98**	**1,114.14**	
			1.50	2.31	7.74	0.80	**12.34**	0.00	8.45	5.95	0.65	**15.05**	**27.39**	
78	8.03	2,293	3.24	5.79	12.49	0.90	**22.42**	0.00	11.31	8.68	1.68	**21.67**	**44.09**	1,636
			64.93	70.36	287.14	35.19	**457.62**	0.00	690.10	307.73	80.69	**1,078.53**	**1,536.15**	
			1.62	2.90	12.49	0.90	**17.91**	0.00	11.31	8.68	0.84	**20.83**	**38.74**	
79	7.41	500	1.07	1.48	1.88	0.46	**4.89**	0.00	2.61	1.62	0.50	**4.73**	**9.62**	316
			21.44	17.99	43.22	17.99	**100.63**	0.00	159.25	57.43	24.02	**240.70**	**341.34**	
			0.54	0.74	1.88	0.46	**3.62**	0.00	2.61	1.62	0.25	**4.48**	**8.10**	
80	8.26	1,651	2.73	3.85	8.81	0.76	**16.15**	0.00	8.53	5.92	1.26	**15.71**	**31.86**	1,078
			54.71	46.79	202.54	29.71	**333.75**	0.00	520.47	209.88	60.52	**790.87**	**1,124.62**	
			1.37	1.93	8.81	0.76	**12.86**	0.00	8.53	5.92	0.63	**15.08**	**27.94**	
81	7.35	514	1.10	1.52	1.93	0.48	**5.03**	0.00	2.71	1.67	0.52	**4.90**	**9.93**	272
			22.04	18.47	44.37	18.77	**103.65**	0.00	165.36	59.21	24.98	**249.54**	**353.19**	
			0.55	0.76	1.93	0.48	**3.72**	0.00	2.71	1.67	0.26	**4.64**	**8.36**	
82	8.23	1,751	2.52	4.41	9.35	0.84	**17.12**	0.00	8.73	6.58	1.25	**16.56**	**33.68**	1,116
			50.50	53.59	214.95	32.84	**351.89**	0.00	532.68	233.28	60.04	**826.00**	**1,177.88**	
			1.26	2.21	9.35	0.84	**13.66**	0.00	8.73	6.58	0.63	**15.94**	**29.59**	
83	8.57	1,679	2.41	3.92	9.21	0.88	**16.42**	0.86	7.68	6.02	1.30	**15.86**	**32.28**	1,468
			48.29	47.64	211.74	34.41	**342.07**	25.80	468.61	213.43	62.44	**770.28**	**1,112.35**	
			1.21	1.96	9.21	0.88	**13.26**	0.43	7.68	6.02	0.65	**14.78**	**28.04**	
84	7.92	1,648	2.36	3.84	9.06	0.86	**16.12**	0.00	8.41	5.90	1.28	**15.59**	**31.71**	1,018
			47.29	46.67	208.29	33.62	**335.87**	0.00	513.15	209.17	61.48	**783.80**	**1,119.67**	
			1.18	1.92	9.06	0.86	**13.02**	0.00	8.41	5.90	0.64	**14.95**	**27.97**	
85	8.25	1,529	2.54	3.58	7.98	0.71	**14.81**	0.00	7.75	5.52	1.16	**14.43**	**29.24**	992
			50.90	43.51	183.46	27.76	**305.62**	0.00	472.88	195.70	55.72	**724.30**	**1,029.92**	
			1.27	1.79	7.98	0.71	**11.75**	0.00	7.75	5.52	0.58	**13.85**	**25.60**	
86	8.49	1,510	2.48	3.50	8.10	0.69	**14.77**	0.00	7.74	5.39	1.14	**14.27**	**29.04**	988
			49.70	42.53	186.22	26.98	**305.43**	0.00	472.27	191.09	54.76	**718.12**	**1,023.54**	
			1.24	1.75	8.10	0.69	**11.78**	0.00	7.74	5.39	0.57	**13.70**	**25.48**	

Cuadro 11. Continuación

No.	pH	CE	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Σ cationes	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Σ aniones	Σ iones	SDT
		(µS/cm)	En orden descendente para cada sitio de muestreo las unidades son $mmol_c\ L^{-1}$, $mg\ L^{-1}$ y $mmoles\ L^{-1}$											mg L^{-1}
87	8.60	1,527	2.48	3.49	8.27	0.69	**14.93**	0.00	7.92	5.38	1.13	**14.43**	**29.36**	974
			49.70	42.41	190.13	26.98	**309.21**	0.00	483.25	190.74	54.28	**728.27**	**1,037.48**	
			1.24	1.75	8.27	0.69	**11.95**	0.00	7.92	5.38	0.57	**13.87**	**25.81**	
88	7.64	316	0.66	0.94	1.23	0.27	**3.10**	0.00	1.67	1.03	0.32	**3.02**	**6.12**	220
			13.23	11.42	28.28	10.56	**63.48**	0.00	101.90	36.52	15.37	**153.78**	**217.27**	
			0.33	0.47	1.23	0.27	**2.30**	0.00	1.67	1.03	0.16	**2.86**	**5.16**	
89	7.16	534	1.03	1.46	2.32	0.41	**5.22**	0.00	2.95	1.60	0.50	**5.05**	**10.27**	378
			20.64	17.74	53.34	16.03	**107.75**	0.00	180.00	56.72	24.02	**260.74**	**368.49**	
			0.52	0.73	2.32	0.41	**3.98**	0.00	2.95	1.60	0.25	**4.80**	**8.78**	
90	8.32	1,325	2.18	3.08	6.96	0.61	**12.83**	0.00	6.72	4.74	1.02	**12.48**	**25.31**	866
			43.69	37.43	160.01	23.85	**264.97**	0.00	410.03	168.05	48.99	**627.07**	**892.05**	
			1.09	1.54	6.96	0.61	**10.20**	0.00	6.72	4.74	0.51	**11.97**	**22.17**	
91	7.37	294	0.62	0.88	1.18	0.20	**2.88**	0.00	1.56	0.96	0.29	**2.81**	**5.69**	144
			12.42	10.69	27.13	7.82	**58.07**	0.00	95.19	34.03	13.93	**143.15**	**201.22**	
			0.31	0.44	1.18	0.20	**2.13**	0.00	1.56	0.96	0.15	**2.67**	**4.80**	
92	7.69	277	0.48	0.68	0.90	0.16	**2.22**	0.00	1.20	0.74	0.22	**2.16**	**4.38**	146
			9.62	8.26	20.69	6.26	**44.83**	0.00	73.22	26.24	10.57	**110.02**	**154.85**	
			0.24	0.34	0.90	0.16	**1.64**	0.00	1.20	0.74	0.11	**2.05**	**3.69**	
93	8.38	1,210	1.98	2.80	6.47	0.58	**11.83**	0.00	6.18	4.32	0.94	**11.44**	**23.27**	820
			39.68	34.03	148.74	22.68	**245.13**	0.00	377.08	153.16	45.15	**575.39**	**820.52**	
			0.99	1.40	6.47	0.58	**9.44**	0.00	6.18	4.32	0.47	**10.97**	**20.41**	
94	7.05	1,448	2.55	3.62	6.97	1.02	**14.16**	0.00	8.49	3.97	1.24	**13.70**	**27.86**	1,160
			51.10	43.99	160.24	39.88	**295.21**	0.00	518.03	140.75	59.56	**718.34**	**1,013.55**	
			1.28	1.81	6.97	1.02	**11.08**	0.00	8.49	3.97	0.62	**13.08**	**24.16**	
95	7.47	1,106	2.30	3.28	4.94	0.30	**10.82**	0.00	5.84	3.59	1.10	**10.53**	**21.35**	856
			46.09	39.86	113.57	11.73	**211.25**	0.00	356.34	127.28	52.83	**536.45**	**747.70**	
			1.15	1.64	4.94	0.30	**8.03**	0.00	5.84	3.59	0.55	**9.98**	**18.01**	
96	8.42	1,196	1.96	2.77	6.27	0.58	**11.58**	0.00	5.99	4.28	0.93	**11.20**	**22.78**	742
			39.28	33.66	144.15	22.68	**239.76**	0.00	365.49	151.74	44.67	**561.90**	**801.66**	
			0.98	1.39	6.27	0.58	**9.22**	0.00	5.99	4.28	0.47	**10.74**	**19.95**	
97	7.79	224	0.47	0.67	0.91	0.14	**2.19**	0.00	1.18	0.73	0.22	**2.13**	**4.32**	150
			9.42	8.14	20.92	5.47	**43.95**	0.00	72.00	25.88	10.57	**108.45**	**152.40**	
			0.24	0.34	0.91	0.14	**1.62**	0.00	1.18	0.73	0.11	**2.02**	**3.64**	
98	7.90	1,030	1.70	2.40	5.39	0.48	**9.97**	0.00	5.21	3.69	0.80	**9.70**	**19.67**	696
			34.07	29.17	123.91	18.77	**205.91**	0.00	317.90	130.82	38.43	**487.14**	**693.06**	
			0.85	1.20	5.39	0.48	**7.92**	0.00	5.21	3.69	0.40	**9.30**	**17.22**	

En la Figura 23 se observa la concentración de cationes y aniones en el muestreo realizados en el alto y bajo Pánuco en primavera de 2018 y en la Figura 24 del muestreo realizado en verano de 2019. En los números positivos del eje Y se graficaron las concentraciones de los cationes y en los negativos las concentraciones de los aniones. El eje X representa el número asignado al sitio de muestreo. Las concentraciones de cationes fueron graficadas con valores acumulativos en el siguiente orden: calcio, magnesio, sodio y potasio. Las concentraciones de aniones fueron graficadas con valores acumulativos en el siguiente orden: carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos. Al graficar de esta manera, se pueden identificar los iones predominantes por la distancia entre líneas.

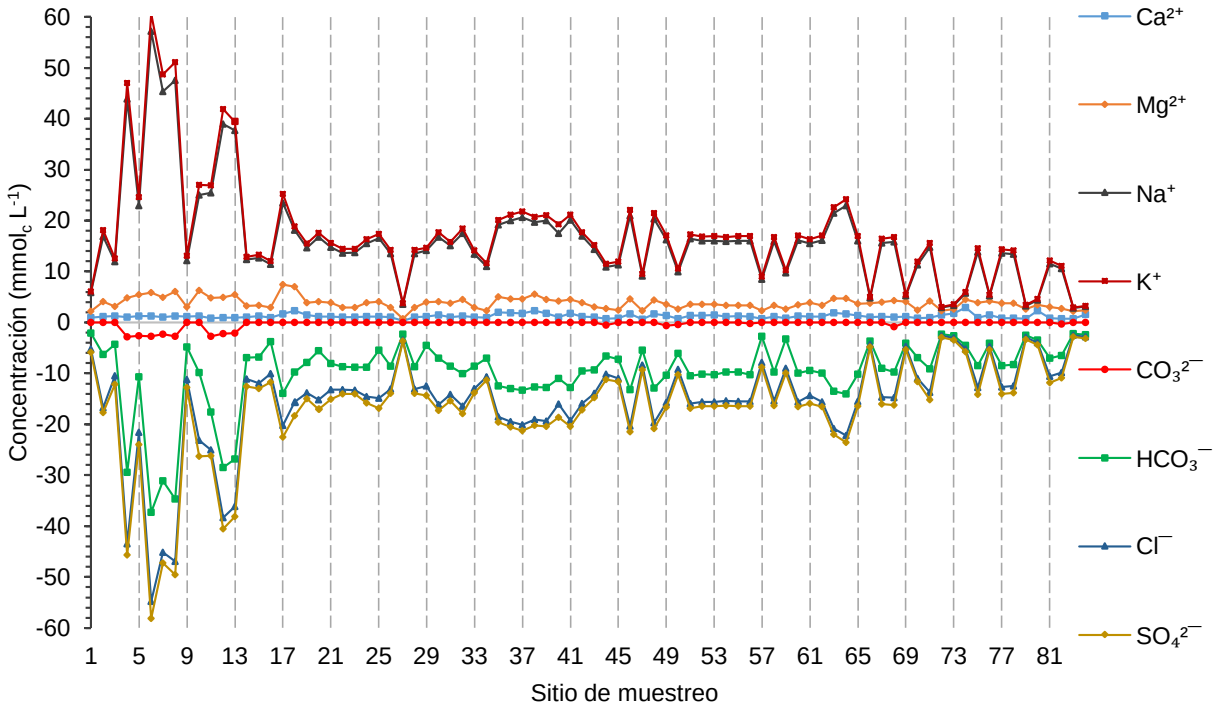


Figura 23. Composición iónica de las aguas del alto y bajo Pánuco, primavera de 2018.

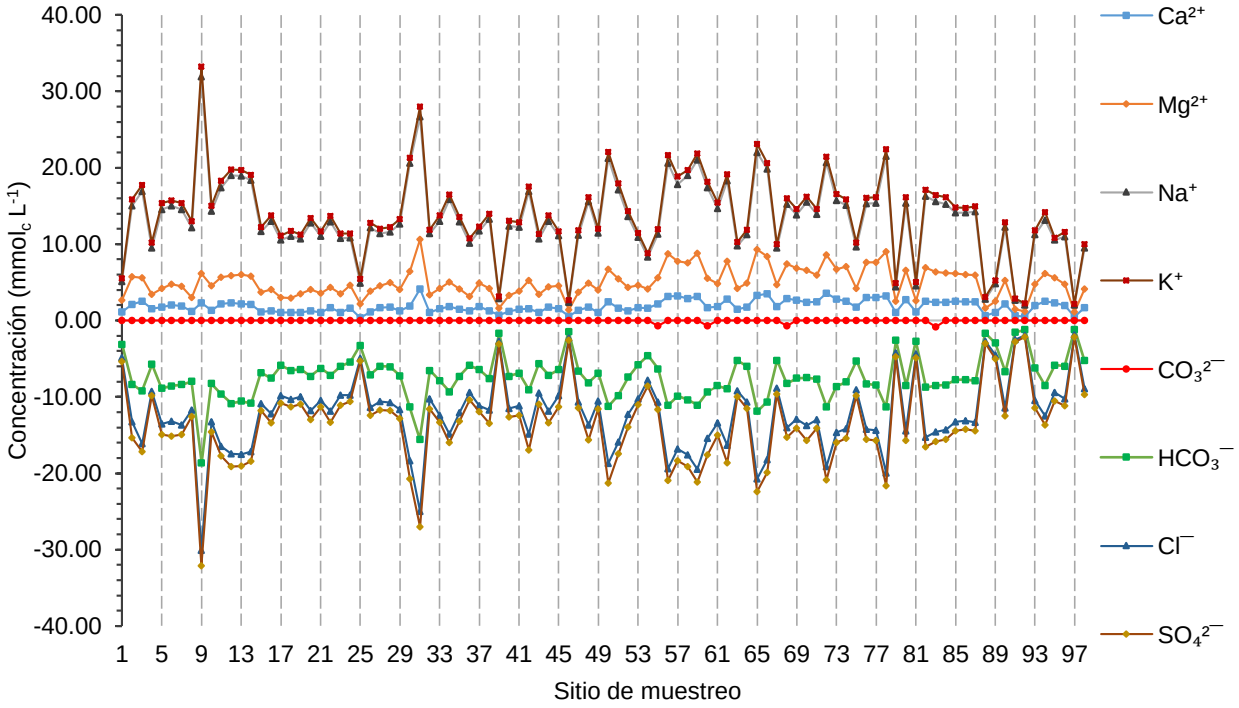


Figura 24. Composición iónica de las aguas del alto y bajo Pánuco, verano de 2019.

En el muestreo de primavera del año 2018 resaltan los siguientes sitios de muestreo con una mayor concentración iónica: 4, 6, 7, 8, 12 y 13, que están localizados en el trayecto del Gran Canal Oriente o Gran Canal de Desagüe. Las muestras con menor concentración iónica fueron las siguientes: 83 (río Tempoal en el municipio de El Higo, Ver.) 72 (río claro en Tamala, Tepehuacán, Hgo.) y 84 (río Tempoal en el municipio de Tempoal, Ver.).

En el muestreo de verano del año 2019 resaltan los sitios de muestreo 9 y 31 por tener una mayor concentración iónica. Estos puntos están localizados en la lumbrera 13 del Gran Canal de Desagüe y en la salida de la Ciudad de Tula hacia Pachuca, respectivamente. Los sitios con menor concentración iónica fueron los siguientes: 92 (puente Comoca, sobre el río Huichihuayán, en el municipio de Axtla de Terrazas, S.L.P.), 97 (puente sobre el río Tempoal, en el municipio de Tempoal, Ver.) y 46 (Presa Dolores, en el municipio de Alfajayucan, Hgo.). Destaca la presa Dolores por su baja concentración iónica, debido a que almacena aguas de los escurrimientos superficiales provenientes de la lluvia.

Después de la presa Zimapán, que en el primer muestreo corresponde a la muestra número 68 y en el segundo corresponde a la muestra número 83, las aguas se diluyen y presentan por lo general, una menor concentración iónica a medida que la corriente principal de la cuenca del río Pánuco se acerca a su desembocadura en el Golfo de México.

4.3 Análisis de frecuencias de la CE y los SDT

La conductividad eléctrica (CE) y los sólidos disueltos totales (SDT) están estrechamente relacionados con la concentración de los iones que forman las sales solubles. Por ello, es importante analizar la frecuencia de valores de estos parámetros.

La concentración de sales solubles en el agua se puede estimar con la medición de la CE. Desde 1883, Svante Arrhenius planteó que las sales disueltas en el agua, se disocian en iones capaces de transferir carga eléctrica. Actualmente se usa la CE como un método rápido para conocer la cantidad de sales solubles en el agua o en el suelo, con fines de diagnóstico y clasificación.

Los SDT determinados por el método de residuo seco evaporado (RSE) incluyen las sales, los minerales, los metales, y cualquier otro compuesto orgánico o inorgánico que se encuentra disuelto en el agua. Determinar este valor en las aguas de riego permite estimar la cantidad de sales agregadas por lámina de riego o volumen de agua aplicada.

El análisis de frecuencias de la CE y los SDT se realizó de acuerdo con los criterios de clasificación de agua de Ayers y Westcot (1985). Los resultados tanto en el primer muestreo como en el segundo, indican que el mayor porcentaje de muestras (más del 78%) tienen ligera a moderada restricción para el riego. Esto aplica para los criterios de CE y para los criterios de SDT (Cuadro 12).

Cuadro 12. Distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales en el muestreo de aguas superficiales del alto y bajo Pánuco.

Parámetro	Valores	Restricción para el riego	Primer muestreo		Segundo muestreo	
			Frecuencia	%	Frecuencia	%
CE ($dS\ m^{-1}$)	< 0.7	Ninguna	12	14.3	11	11.2
	0.7 – 3.0	Ligera a moderada	66	78.6	86	87.8
	> 3.0	Severa	6	7.1	1	1.0
SDT ($mg\ L^{-1}$)	< 450	Ninguna	11	13.1	11	11.2
	450 – 2000	Ligera a moderada	67	79.8	85	86.7
	> 2000	Severa	6	7.1	2	2.0

La distribución de frecuencias de los datos de CE y SDT son muy similares en el porcentaje y número de muestras para cada rango de valores. Esto indica la alta correlación entre estos dos parámetros, que también se utiliza para verificar la exactitud de los datos.

Las aguas de baja concentración que no presentan ninguna restricción para el riego en ninguno de los parámetros provienen de cuerpos de agua o corrientes superficiales sin aportaciones importantes de aguas residuales. Por ejemplo, las aguas del río Huichihuayán, el río Tempoal, el río Claro y la presa Dolores.

Las aguas que presentan severa restricción para el riego con respecto a la CE del primer muestreo son de las muestras tomadas directamente del Gran Canal de Desagüe y otras dentro de los canales de riego del Valle del Mezquital. En el segundo muestreo, realizado durante el verano del año 2019, se obtuvo un menor número de muestras con restricción severa para el riego. Estos datos indican claramente la dilución de las aguas durante el verano, debido a las lluvias.

4.4 Indicadores de salinidad del agua

4.4.1 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica se puede determinar en forma rápida y precisa para determinar la concentración de sales solubles en las aguas de riego. La desventaja de

este método es que, a medida que se incrementa la presencia de sales poco solubles, la medición de la conductividad es poco fiable para conocer la cantidad de sales presentes en el agua. Todas las mediciones están referidas a una temperatura de 25°C, debido a que la temperatura afecta la solubilidad de las sales.

Richards *et al*. (1974), propuso para el laboratorio de salinidad de Riverside (E.U.), clasificar el peligro de salinización de los suelos, relacionando la conductividad eléctrica con el cálculo de la relación de adsorción de sodio (RAS), que indica el peligro de sodicidad. De acuerdo con esta clasificación, en la red hidrográfica del alto y bajo Pánuco prácticamente no se encontraron muestras con riesgo bajo de salinidad, con excepción del segundo muestreo, donde la muestra número 98, tomada del río Tempoal presentó un valor de 224 $\mu S\ cm^{-1}$. En el primer muestreo, el 70% de las muestras tienen riesgo alto de salinidad, y en el segundo muestreo, el 84% entraron en esta clasificación (Cuadro 13). Esto se debe a que el mayor número de muestras se tomó de la red hidrográfica del Valle del Mezquital, donde se riega con aguas residuales provenientes de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Cuadro 13. Clasificación de las aguas del alto y bajo Pánuco, de acuerdo con el riesgo de salinidad.

Valores de CE ($\mu S\ cm^{-1}$)	Riesgo de salinidad	Clasificación	No. de muestras	
			Primer muestreo	Segundo muestreo
< 250	Bajo	C1	0	1
250 - 750	Medio	C2	12	10
750 – 2,250	Alto	C3	59	82
> 2,250	Muy alto	C4	13	5

Existen algunas fórmulas empíricas que, dentro de ciertos rangos de concentración, correlacionan la conductividad eléctrica con contenido de sales, expresado en $mg\ L^{-1}$ o en $mmol_c\ L^{-1}$. Por ejemplo, se puede obtener un valor aproximado de la concentración de sales, multiplicando la CE (expresada en $\mu S\ cm^{-1}$) por un factor de 0.640. Este factor solo aplica para salinidades bajas, para aguas hipersalinas se debe usar un factor de 0.800. Esto factores son denominados coeficientes de proporcionalidad, y varían de acuerdo con la naturaleza y origen de las aguas. Para el caso de la red hidrográfica del

alto y bajo Pánuco, se obtuvieron los respectivos coeficientes de proporcionalidad, que están expresados en la Figura 25. En el primer muestreo, el factor de correlación entre la CE y los SDT fue de 0.6052; en el segundo muestreo este factor fue de 0.6569 (Figura 25). Con estos coeficientes, para las aguas del mismo origen y naturaleza, es posible estimar la cantidad de sales a partir de la conductividad eléctrica, con las siguientes ecuaciones:

Para el muestreo 1: Cantidad de sales (mg L^{-1}) = 0.6052 * CE (µS cm^{-1})

Para el muestreo 2: Cantidad de sales (mg L^{-1}) = 0.6569 * CE (µS cm^{-1})

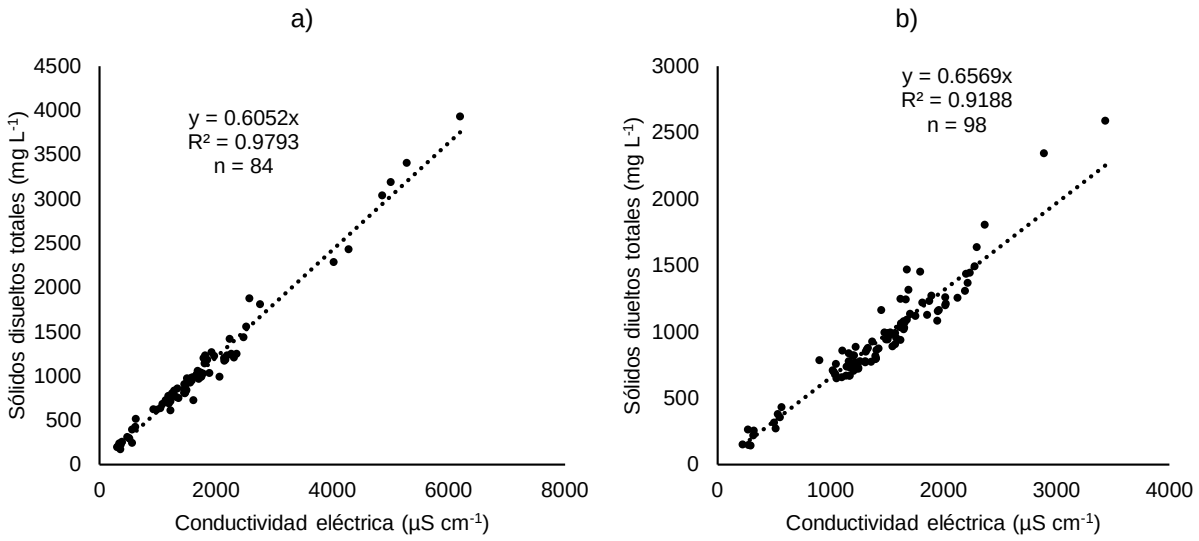


Figura 25. Relación entre la conductividad eléctrica y la concentración de sólidos disueltos totales, en la red hidrográfica del alto y bajo Pánuco, a) muestreo 1 y b) muestreo 2.

4.4.2 Salinidad efectiva

El índice de salinidad efectiva expresa el peligro que representan las sales solubles del agua de riego cuando pasan a formar parte de la solución del suelo. Este índice toma en cuenta la precipitación de las sales menos solubles (carbonato de calcio, carbonato de magnesio y sulfato de calcio) a medida que aumenta la concentración de la solución del suelo por la evapotranspiración. Esto provoca que se queden en la solución del suelo las sales más solubles, que son más nocivas para los cultivos.

En las muestras tomadas de la región del alto y bajo Pánuco se evaluó el índice de salinidad efectiva de acuerdo con la clasificación de Doneen (1975). Los resultados muestran una clara diferencia entre el primero y el segundo muestreo (Cuadro 14). En el primer muestreo hay una mayor cantidad de muestras de agua de clase “no recomendable”. En el segundo muestreo solamente tres sitios presentan esta característica, y están localizadas en la lumbrera 13 del Gran Canal Oriente, en la salida de Tula hacia Pachuca y en un canal de tierra localizado en Actopan, Hidalgo. Estos canales tienen alta concentración de sales originadas por aguas residuales industriales.

Cuadro 14. Número de muestras por clase de salinidad efectiva en el alto y bajo Pánuco.

Valores de SE ($mmol_c\ L^{-1}$)	Clase	No. de muestras	
		Primavera 2018	Verano 2019
< 3	Buena	11	10
3 - 15	Condicionada	52	85
> 15	No recomendable	21	3

De acuerdo con el índice de clasificación de salinidad efectiva, la mayor cantidad de muestras están condicionadas para el riego o no son recomendables. Esto se debe a la composición de las aguas donde predomina el cloruro de sodio, bicarbonato de sodio, bicarbonato de potasio, bicarbonato de calcio, bicarbonato de magnesio y sulfato de magnesio. Estas sales se vuelven peligrosas cuando aumenta su concentración debido a la evapotranspiración. Cuando esto sucede, algunas de ellas (como el $CaCO_3$ y $MgCO_3$ que son de baja solubilidad) alcanzan el límite de solubilidad y precipitan. Esto provoca que algunos cationes que la forman ya no estén disponibles y se alteren las condiciones iniciales.

En el caso de las aguas donde los bicarbonatos se encuentran en mayor cantidad que el calcio y el magnesio (como sucede en general en las aguas que riegan el Valle del Mezquital), se produce un aumento de la proporción del sodio en el agua del suelo. En este tipo de aguas también están presentes las sales $MgSO_4$ y NaCl, que, por su alta solubilidad, dan lugar a soluciones del suelo muy salinas que resultan tóxicas para los cultivos.

4.4.3 Salinidad potencial

Este índice de salinidad potencial es diferente a la salinidad efectiva por la siguiente razón: mientras que la salinidad efectiva considera que se precipitarán todos los carbonatos, bicarbonatos y sulfatos (algo que no siempre ocurre); la salinidad potencial considera que se precipitarán los carbonatos y bicarbonatos, y sólo parte de los sulfatos (especialmente el sulfato de calcio). Por lo tanto, permanecen solubles las sales sulfato de sodio, sulfato de potasio y sulfato de magnesio. El Cuadro 15 indica que en ambos muestreos se tienen altos niveles de salinidad potencial que condicionan el riego.

Cuadro 15. Número de muestras por clase de salinidad potencial en las aguas del alto y bajo Pánuco.

Valores de SP ($mmol_c\ L^{-1}$)	Clase	No. de muestras	
		Primavera 2018	Verano 2019
< 3	Buena	11	11
3 - 15	Condicionada	70	87
> 15	No recomendable	3	0

4.4.4 Comparación del índice de SE con el índice de SP

En las definiciones de salinidad efectiva y salinidad potencial se explicó el significado de estos índices y su aplicación. Sin embargo, es importante hacer una comparación entre ambos índices, con base en los resultados obtenidos de todos los puntos de muestreo. Como se puede observar en el Cuadro 16, existe coincidencia alta en la clasificación de las aguas en uno y en otro índice, aunque los valores sean distintos. En el análisis de las aguas del alto y bajo Pánuco, se observa que casi el mismo número de muestras fueron clasificadas como de clase “buena” en ambos índices. Existieron diferencias entre las otras clases porque el 85% de las muestras del primer muestreo y el 100% del segundo muestreo pasaron de ser clasificadas como “no recomendable” con el índice de SE, a “condicionada” con el índice de SP. Esto se debe a que la salinidad efectiva no considera los carbonatos que precipitan con el calcio proveniente del complejo de intercambio, por lo tanto, sus valores son más elevados si se comparan con los índices de salinidad potencial.

Cuadro 16. Clasificación de las aguas del alto y bajo Pánuco de acuerdo con los índices de salinidad efectiva (SE) y salinidad potencial (SP). Buena (B); Condicionada (C); No recomendable (NR).

Primer muestreo					Segundo muestreo				
Muestra	**SE**	**Clase**	**SP**	**Clase**	**Muestra**	**SE**	**Clase**	**SP**	**Clase**
1	4.0	C	3.5	C	1	1.1	B	2.0	B
2	14.1	C	11.0	C	2	1.1	C	5.9	C
3	9.4	C	7.0	C	3	1.3	C	7.4	C
4	42.2	NR	15.2	NR	4	1.4	C	3.8	C
5	19.2	NR	12.0	C	5	1.5	C	5.4	C
6	54.8	NR	19.2	NR	6	1.5	C	5.6	C
7	43.9	NR	15.1	NR	7	2.3	C	5.9	C
8	45.1	NR	13.5	C	8	2.4	C	4.2	C
9	10.1	C	7.2	C	9	2.7	NR	12.5	C
10	20.7	NR	14.8	C	10	2.9	C	5.7	C
11	22.1	NR	8.0	C	11	3.2	C	7.5	C
12	37.0	NR	11.0	C	12	4.7	C	7.4	C
13	34.0	NR	10.3	C	13	5.2	C	7.7	C
14	9.6	C	5.0	C	14	5.3	C	7.0	C
15	9.9	C	5.6	C	15	5.9	C	4.5	C
16	9.1	C	7.1	C	16	6.0	C	5.2	C
17	17.8	NR	7.4	C	17	6.1	C	4.5	C
18	11.8	C	7.3	C	18	6.4	C	4.3	C
19	11.5	C	6.6	C	19	6.8	C	4.1	C
20	13.5	C	10.6	C	20	6.8	C	5.1	C
21	11.7	C	6.1	C	21	6.8	C	4.6	C
22	11.5	C	5.0	C	22	6.9	C	5.4	C
23	11.5	C	4.9	C	23	7.0	C	4.4	C
24	12.4	C	6.4	C	24	7.1	C	4.8	C
25	13.4	C	10.4	C	25	7.1	B	1.9	B
26	11.4	C	4.9	C	26	7.3	C	4.8	C
27	2.9	B	1.3	B	27	7.4	C	5.2	C
28	11.4	C	4.8	C	28	7.5	C	5.2	C
29	10.7	C	8.9	C	29	7.6	C	5.0	C

Cuadro 16. Continuación

Primer muestreo					Segundo muestreo				
Muestra	**SE**	**Clase**	**SP**	**Clase**	**Muestra**	**SE**	**Clase**	**SP**	**Clase**
30	13.6	C	9.6	C	30	7.6	C	8.2	C
31	12.0	C	6.2	C	31	7.7	NR	10.5	C
32	13.9	C	7.2	C	32	7.8	C	4.4	C
33	11.3	C	4.8	C	33	7.9	C	5.0	C
34	9.3	C	3.9	C	34	7.9	C	6.1	C
35	15.2	NR	6.6	C	35	8.0	C	5.3	C
36	16.5	NR	7.1	C	36	8.1	C	4.0	C
37	17.2	NR	7.4	C	37	8.1	C	5.1	C
38	15.2	NR	7.0	C	38	8.2	C	5.0	C
39	16.5	NR	7.1	C	39	8.2	B	1.2	B
40	15.1	NR	6.3	C	40	8.5	C	4.7	C
41	16.6	NR	7.1	C	41	8.5	C	4.9	C
42	13.8	C	7.1	C	42	8.5	C	6.8	C
43	12.1	C	5.1	C	43	8.5	C	4.6	C
44	8.8	C	4.1	C	44	8.6	C	5.5	C
45	9.5	C	4.0	C	45	8.7	C	4.1	C
46	17.5	NR	7.8	C	46	8.7	B	1.0	B
47	7.2	C	3.4	C	47	8.7	C	4.4	C
48	17.0	NR	7.4	C	48	8.8	C	6.5	C
49	13.5	C	5.8	C	49	8.8	C	4.1	C
50	8.0	C	3.7	C	50	8.9	NR	8.8	C
51	13.8	C	6.0	C	51	9.0	C	6.9	C
52	13.3	C	5.8	C	52	9.0	C	5.7	C
53	13.4	C	5.8	C	53	9.3	C	4.8	C
54	13.4	C	6.2	C	54	9.3	B	3.6	C
55	13.5	C	6.2	C	55	9.4	C	4.8	C
56	13.5	C	5.7	C	56	9.4	C	9.1	C
57	6.7	C	5.6	C	57	9.4	C	7.7	C
58	13.4	C	6.2	C	58	9.6	C	8.0	C
59	7.7	C	6.3	C	59	9.6	C	9.2	C
60	13.6	C	6.2	C	60	9.7	C	7.2	C
61	12.4	C	5.7	C	61	9.7	C	5.6	C
62	13.7	C	6.2	C	62	9.7	C	8.5	C
63	17.8	NR	7.9	C	63	9.8	C	4.4	C
64	19.4	NR	8.8	C	64	9.8	C	5.1	C

Cuadro 16. Continuación

Primer muestreo					Segundo muestreo				
Muestra	**SE**	**Clase**	**SP**	**Clase**	**Muestra**	**SE**	**Clase**	**SP**	**Clase**
65	13.3	C	5.8	C	65	9.9	C	9.7	C
66	1.3	B	0.9	B	66	10.0	C	8.4	C
67	12.4	C	6.4	C	67	10.0	C	4.0	C
68	12.4	C	5.8	C	68	10.1	C	6.4	C
69	1.4	B	1.0	B	69	10.2	C	6.0	C
70	9.6	C	4.4	C	70	10.2	C	7.3	C
71	11.5	C	5.3	C	71	10.5	C	5.9	C
72	0.8	B	0.5	B	72	10.6	C	8.7	C
73	0.9	B	0.6	B	73	10.8	C	6.7	C
74	1.5	B	1.0	B	74	11.0	C	6.8	C
75	10.7	C	5.0	C	75	11.1	C	4.1	C
76	1.4	B	0.9	B	76	11.2	C	6.6	C
77	10.6	C	4.8	C	77	11.2	C	6.6	C
78	10.5	C	4.8	C	78	11.4	C	9.5	C
79	0.9	B	0.6	B	79	11.5	B	1.9	B
80	1.2	B	0.8	B	80	12.1	C	6.6	C
81	9.1	C	4.2	C	81	12.2	B	1.9	B
82	8.5	C	3.8	C	82	12.2	C	7.2	C
83	0.7	B	0.5	B	83	12.3	C	6.7	C
84	0.8	B	0.6	B	84	12.5	C	6.5	C
					85	12.7	C	6.1	C
					86	12.7	C	6.0	C
					87	12.8	C	5.9	C
					88	13.0	B	1.2	B
					89	13.1	B	1.9	B
					90	13.3	C	5.3	C
					91	13.4	B	1.1	B
					92	13.7	B	0.9	B
					93	13.9	C	4.8	C
					94	13.9	C	4.6	C
					95	14.9	C	4.1	C
					96	15.3	C	4.7	C
					97	17.3	B	0.8	B
					98	27.1	C	4.1	C

Se recomienda que, para aplicar los criterios de salinidad potencial, se debe predecir el peligro de salinidad en el agua de riego, específicamente para un tipo de suelo y cultivo en particular. Esto se debe a que, la mayor utilidad de este índice radica en determinar la cantidad de cloruros y sulfatos que pueden afectar los cultivos según la permeabilidad del suelo.

4.4.5 Presión osmótica

Existe una relación directamente proporcional entre la concentración de sales en el agua de riego y la presión osmótica. Por lo tanto, cuando la presión osmótica es mayor, la planta necesita un mayor esfuerzo para obtener el agua de la solución del suelo porque el agua se encuentra menos disponible. Esto representa estrés para las plantas que limita el crecimiento y la producción agrícola (Parihar *et al*., 2015).

Lo anterior explica la alta correlación que existe entre la conductividad eléctrica y la presión osmótica calculada con la ecuación $PO = MRT$. En la Figura 26 se observa esta alta correlación obtenida a partir de los datos analíticos del muestreo de aguas del alto y bajo Pánuco.

Para calcular la presión osmótica a partir de esta ecuación, se utilizó el valor de la sumatoria de los iones determinados en laboratorio, en unidades de molaridad (moles L^{-1}). La R es la constante general de los gases (0.082057 L atm/K mol) y T es la temperatura absoluta en °K (°K = 273.15 + 25°C). La temperatura de 25°C se tomó como un promedio de la temperatura del agua en las muestras.

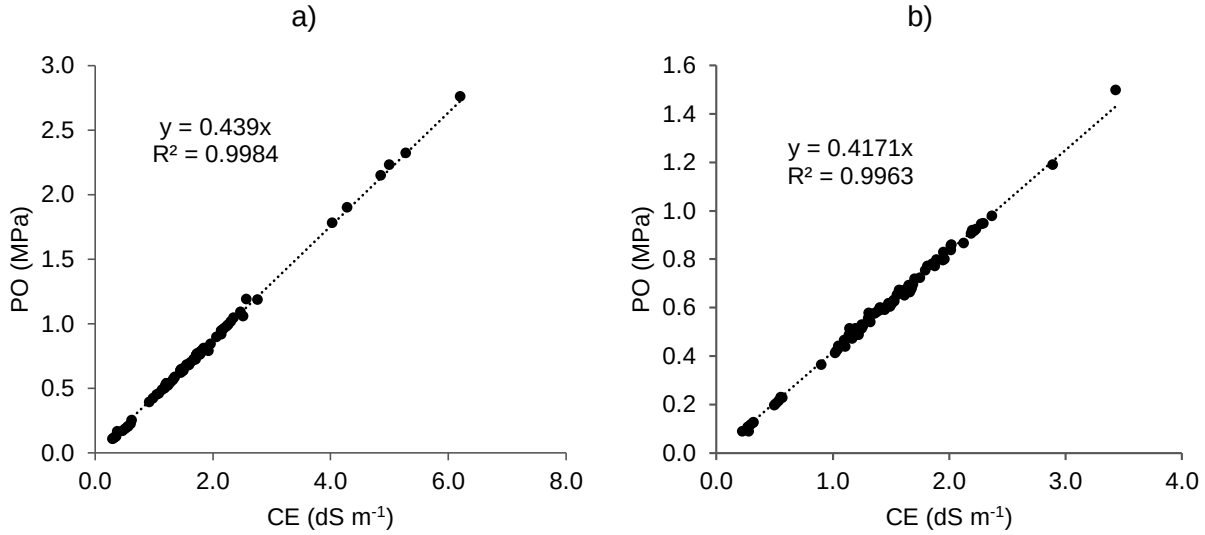


Figura 26. Relación entre la conductividad eléctrica y la presión osmótica teórica, de las muestras tomadas en la red hidrográfica del alto y bajo Pánuco; a) primer muestreo y b) segundo muestreo.

La presión osmótica también puede calcularse a partir de relaciones de la CE con el valor de SDT, y de la CE con la PO. De acuerdo con la Ecuación (8), SDT = 640 × CE. Sin embargo, utilizando los valores propios de este trabajo de investigación, se obtuvo un coeficiente distinto de 640. Al correlacionar la CE con los SDT, de acuerdo con la Figura 25, la pendiente de la recta es de 0.6052 en el primer muestreo y 0.6569 en el segundo muestreo. Para obtener estos coeficientes, la CE está en $\mu S\ cm^{-1}$ y los SDT en $mg\ L^{-1}$.

La Ecuación (7) PO = 0.36 × CE fue obtenida a partir de estudios de salinidad realizados en el Valle Imperial en Estados Unidos; sin embargo, la PO puede calcularse utilizando un coeficiente de 0.0004, cuando la CE se expresa en $\mu S\ cm^{-1}$ (López, 2015; Camacho, 2019). Este coeficiente es la relación absoluta que existe entre la CE y la presión osmótica, y está en función del número de moles. Las variaciones de esta relación siempre están alrededor del coeficiente 0.0004. A la PO obtenida de esta manera se le llamará en este trabajo *presión osmótica experimental*.

Por lo tanto, para el primer muestreo se tiene que: (PO / 0.0004) = (SDT / 0.6052).

Despejando PO se tiene:

$$PO = \frac{0.0004 \times SDT}{0.6052} = 0.0006609 \times SDT \quad (31)$$

Para el segundo muestreo se tiene que (PO / 0.0004) = (SDT / 0.6569). Despejando PO se tiene:

$$PO = \frac{0.0004 \times SDT}{0.6569} = 0.0006089 \times SDT \quad (32)$$

Donde, PO es la presión osótica en MPa o atm y SDT son los sólidos disueltos totales expresados en mg L^{-1}.

La coincidencia entre la PO *teórica* y la *experimental,* se muestra en la Figura 27, donde se observa una coincidencia cercana a la unidad en ambos muestreos.

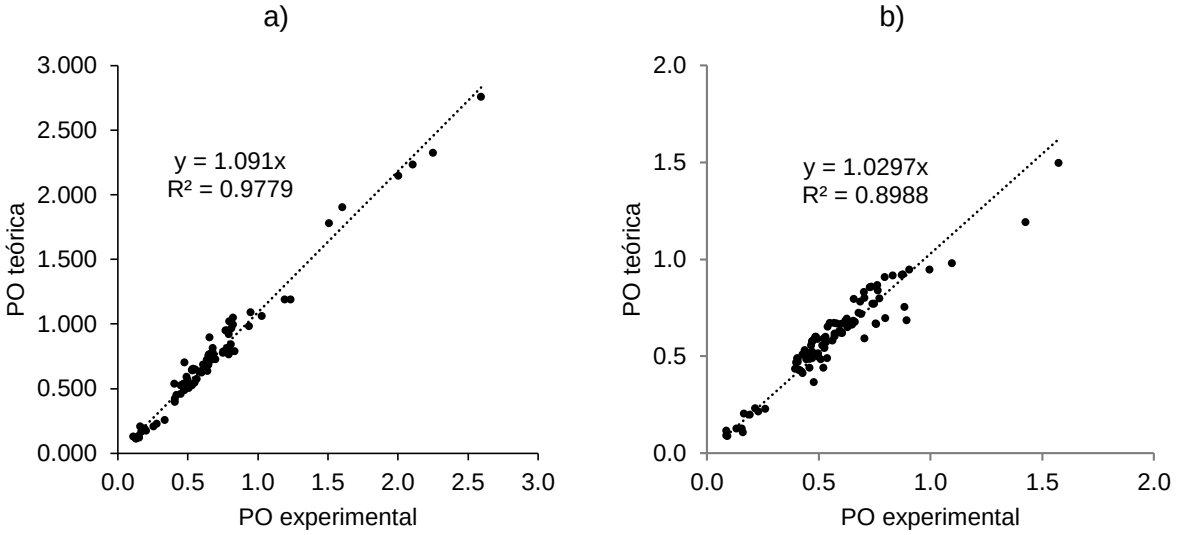


Figura 27. Coincidencia entre la presión osmótica teórica y la presión osmótica experimental, de las muestras tomadas en el alto y bajo Pánuco; a) primer muestreo, b) segundo muestreo.

4.5 Indicadores de sodicidad

4.5.1 Relación de adsorción de sodio y porcentaje de sodio intercambiable

Las aguas de baja concentración, al ser aplicadas al suelo mediante el riego, presentan problemas de infiltración (Ayers y Westcot, 1985). Mediante la evapotranspiración, las sales menos solubles precipitan al concentrarse, quedando en predominio una fracción de las más solubles. Ésta es la causa que da lugar al predominio de los iones más solubles, como el sodio, en la primera capa del suelo (Velázquez-Machuca *et al*., 2002). En general, la infiltración aumenta con la salinidad y disminuye con una reducción en la salinidad o un incremento en el contenido de sodio en relación con el calcio y magnesio, es decir, la relación de adsorción de sodio (RAS) (Pupisky y Shainberg, 1979; Oster, 1994).

Para medir el impacto del sodio en el suelo se utilizan dos conceptos muy relacionados: la relación de adsorción de sodio (RAS) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI). La RAS está referida a la concentración de sodio en la solución del suelo y el PSI a la concentración de sodio (%) en el complejo de intercambio (Chartres, 1993).

El complejo de intercambio en el suelo, que son los constituyentes superficiales activos con propiedades de intercambio de cationes, están constituidos principalmente por minerales arcillosos y materia orgánica. Los cationes que se desplazan del complejo de intercambio son llamados “cationes intercambiables”. Y a la cantidad total de cationes intercambiables que un suele puede retener se le llama “capacidad de intercambio catiónico. Cuando se habla del porcentaje de sodio intercambiable (PSI), se hace referencia a la cantidad de cationes de sodio intercambiables que están retenidos en el complejo de intercambio.

El PSI se puede estimar a partir de la RAS cuando el agua está en equilibrio con el suelo, y en condiciones de saturación (Frenkel *et al*., 1978). Para ello, se requiere contar con valores de la constante de selectividad iónica de Gapon. Esta constante se puede encontrar en diversas fuentes bibliográficas para distintos tipos de suelo. Para obtener la relación funcional entre RAS y PSI de las muestras de agua, en este caso se utilizaron tres valores: 0.007244, 0.011861 y 0.016899, que corresponden a suelos migajón-

arcillo-arenoso, arcillo-limoso y arcilloso (Velázquez-Machuca, 2001). Utilizando estas tres constantes se determinaron las relaciones para predecir PSI a partir de la RAS_{or} (Figura 28), RAS_{aj} (Figura 29) y RAS_{corr} (Figura 30) de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco.

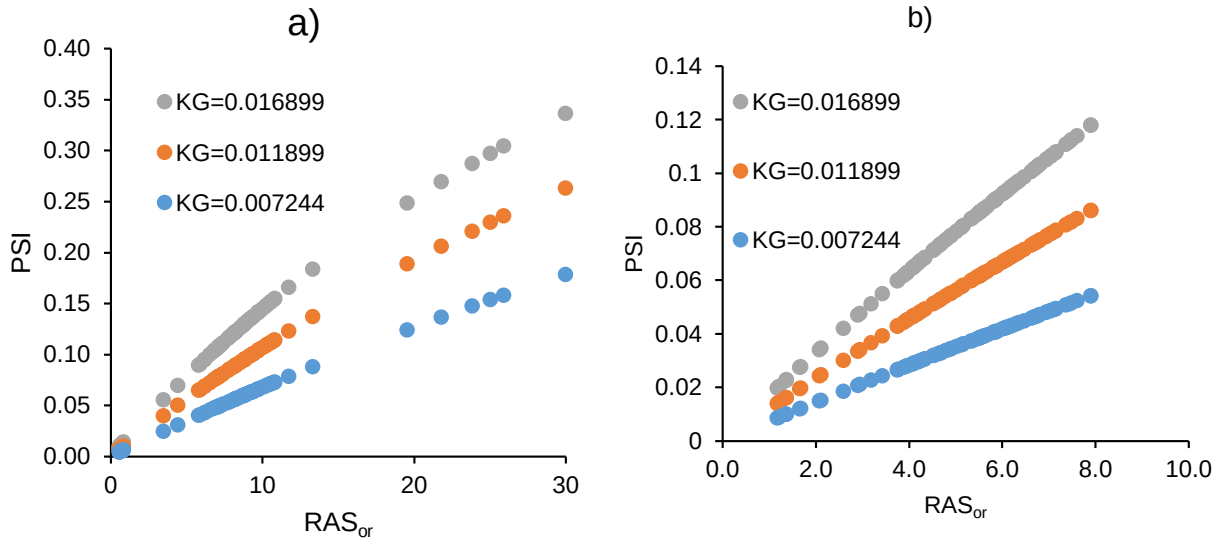


Figura 28. Relación entre el PSI y la RAS_{or} de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco, a) primer muestreo y b) segundo muestreo.

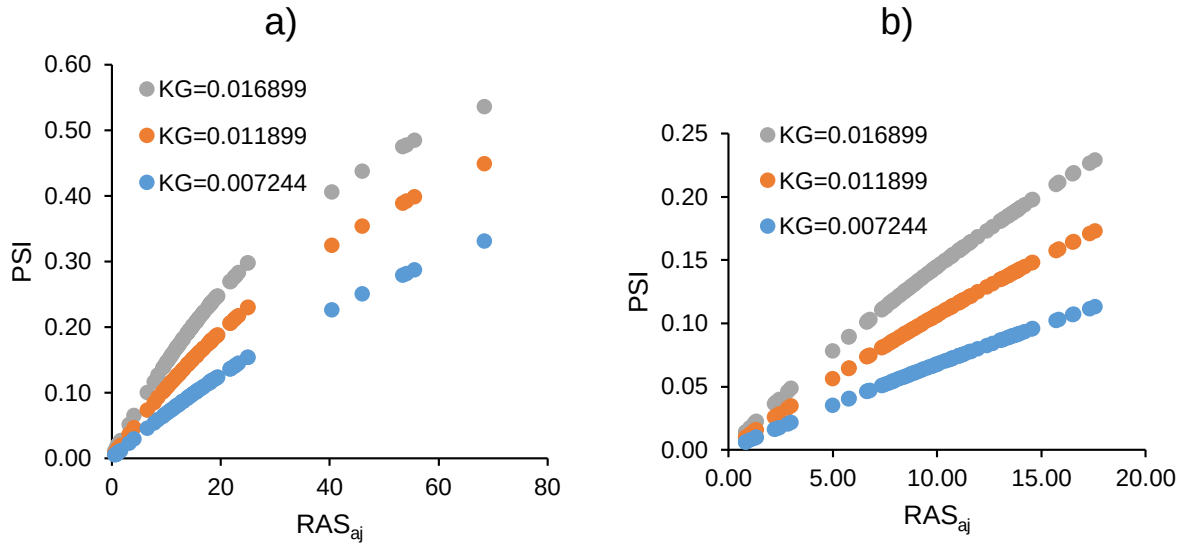


Figura 29. Relación entre el PSI y la RAS_{aj} de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco, a) primer muestreo y b) segundo muestreo.

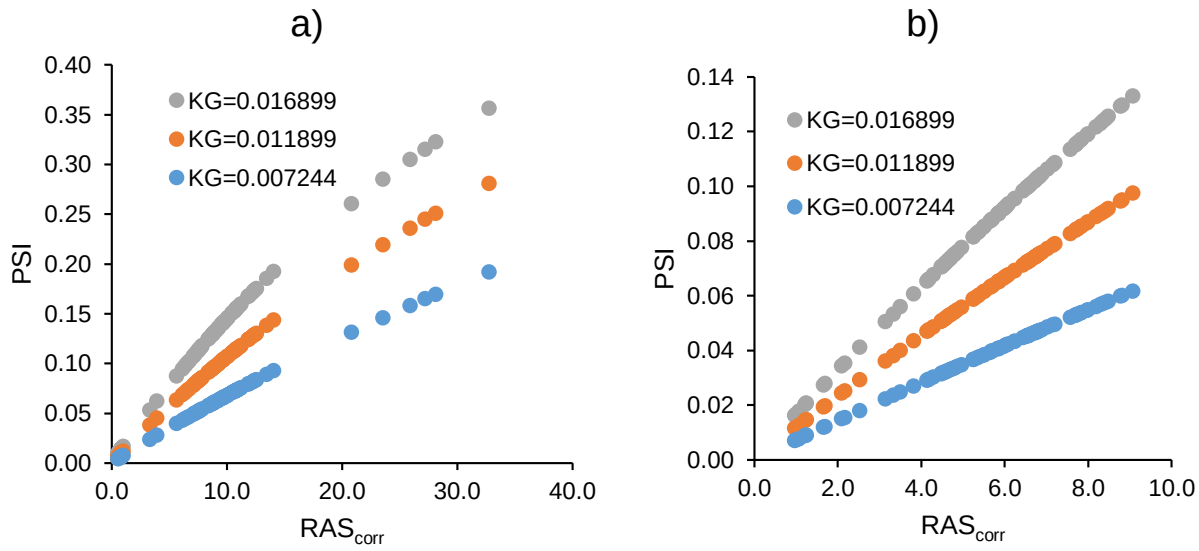


Figura 30. Relación entre el PSI y la RAS$_{corr}$ de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco, a) primer muestreo y b) segundo muestreo.

Aunque el Laboratorio de Salinidad los Estados Unidos sugirió un porcentaje de sodio intercambiable (PSI) mayor de 15 para que un suelo sea considerado sódico, este valor ha sido considerado demasiado alto en otras regiones del mundo, como en Australia, donde un PSI de 5 es apropiado para separar los suelos normales de los sódicos (Shainberg y Letey, 1984). Por lo tanto, un suelo debe considerarse sódico cuando su comportamiento físico se vea afectado notablemente por la presencia de sodio intercambiable, independientemente de la cantidad presente.

4.5.1.1 Clasificación de las aguas utilizando la RAS y la CE

La salinidad del agua y el contenido de sodio en relación con el contenido de calcio y magnesio (relación de adsorción de sodio), son los dos factores que más influyen en la tasa de infiltración del agua en el suelo (Aboukarima *et al*., 2018). Por lo tanto, ambos factores deben considerarse importantes para determinar el riesgo de sodicidad del suelo por el uso de un tipo de agua para riego. Richards *et al*. (1974) propuso clasificar el agua de riego utilizando ambos factores, dividiendo a las aguas en cuatro clases de acuerdo con la conductividad eléctrica en µS cm^{-1}: 0 – 250, 250 – 750, 750 – 2250 y > 2250. Se puede observar en la gráfica (Figura 31) que, de acuerdo con la relación de

adsorción de sodio en $mmol_c\ L^{-1}$, en el extremo izquierdo los límites de la clasificación son 10, 18, 26 y > 26. Sin embargo, a medida que aumenta la conductividad eléctrica, disminuyen los valores de RAS que se requieren para cambiar al siguiente nivel de riesgo de sodicidad. Es decir, el riesgo de sodicidad depende del valor de la RAS y de la CE. En el Cuadro 17 se presenta el significado de la nomenclatura para la clasificación de las aguas de acuerdo con la RAS y la CE.

Cuadro 17. Nomenclatura utilizada para clasificar el riesgo de salinidad y sodicidad.

Riesgo de salinidad		Riesgo de sodicidad	
Clave	Interpretación	Clave	Interpretación
C1	Baja salinidad	S1	Baja en sodio
C2	Salinidad media	S2	Media en sodio
C3	Altamente salina	S3	Alta en sodio
C4	Muy altamente salina	S4	Muy alta en sodio

Después de graficar los valores obtenidos de CE y RAS de las muestras del alto y bajo Pánuco, se obtuvieron los resultados de las Figuras 29 y 30.

Para clasificar el agua con base en los criterios de Richards *et al*. (1974), se utilizaron tres ecuaciones distintas: RAS_{or} RAS_{aj} Y RAS_{corr} (ecuaciones 14, 15 y 17). La primera es la ecuación original, la segunda es la ajustada por Bower *et al*. (1965) y la tercera es la corregida por Suarez (1981).

En las Figuras 31 a 38 puede observarse la distribución de las muestras de agua en las 16 categorías.

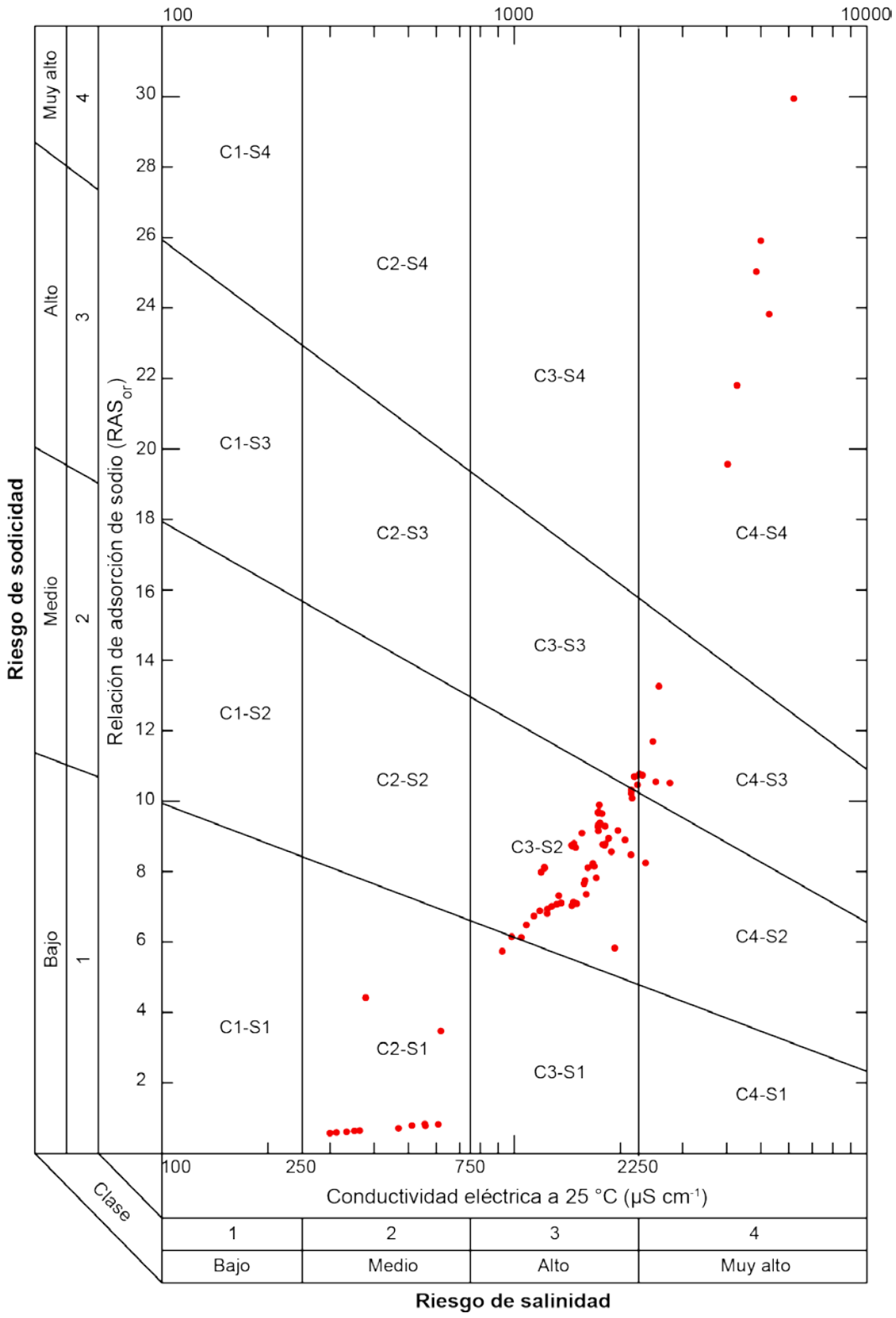


Figura 31. Clasificación de las aguas muestreadas en primavera de 2018, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{or}).

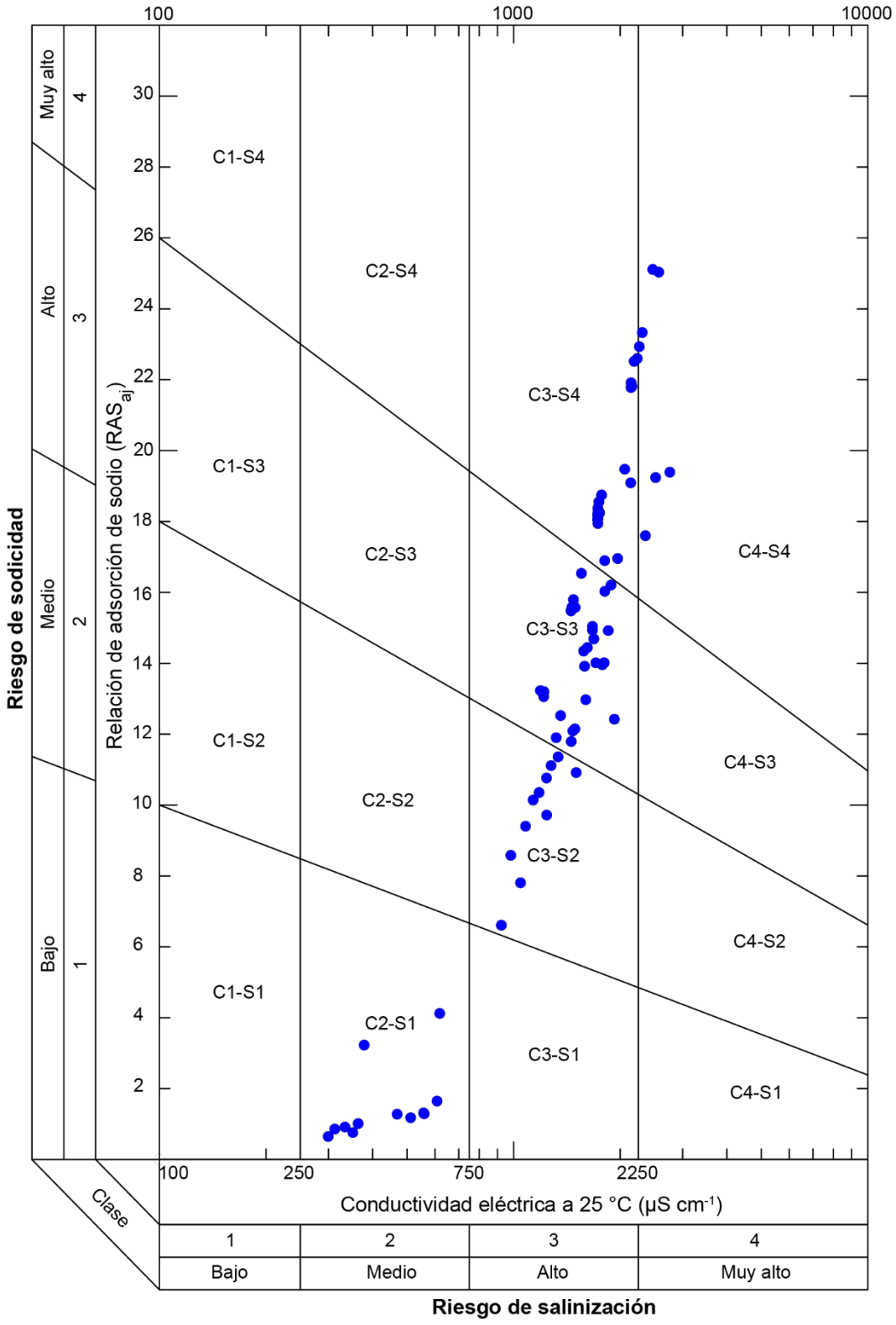


Figura 32. Clasificación de las aguas muestreadas en la primavera de 2018, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{aj}).

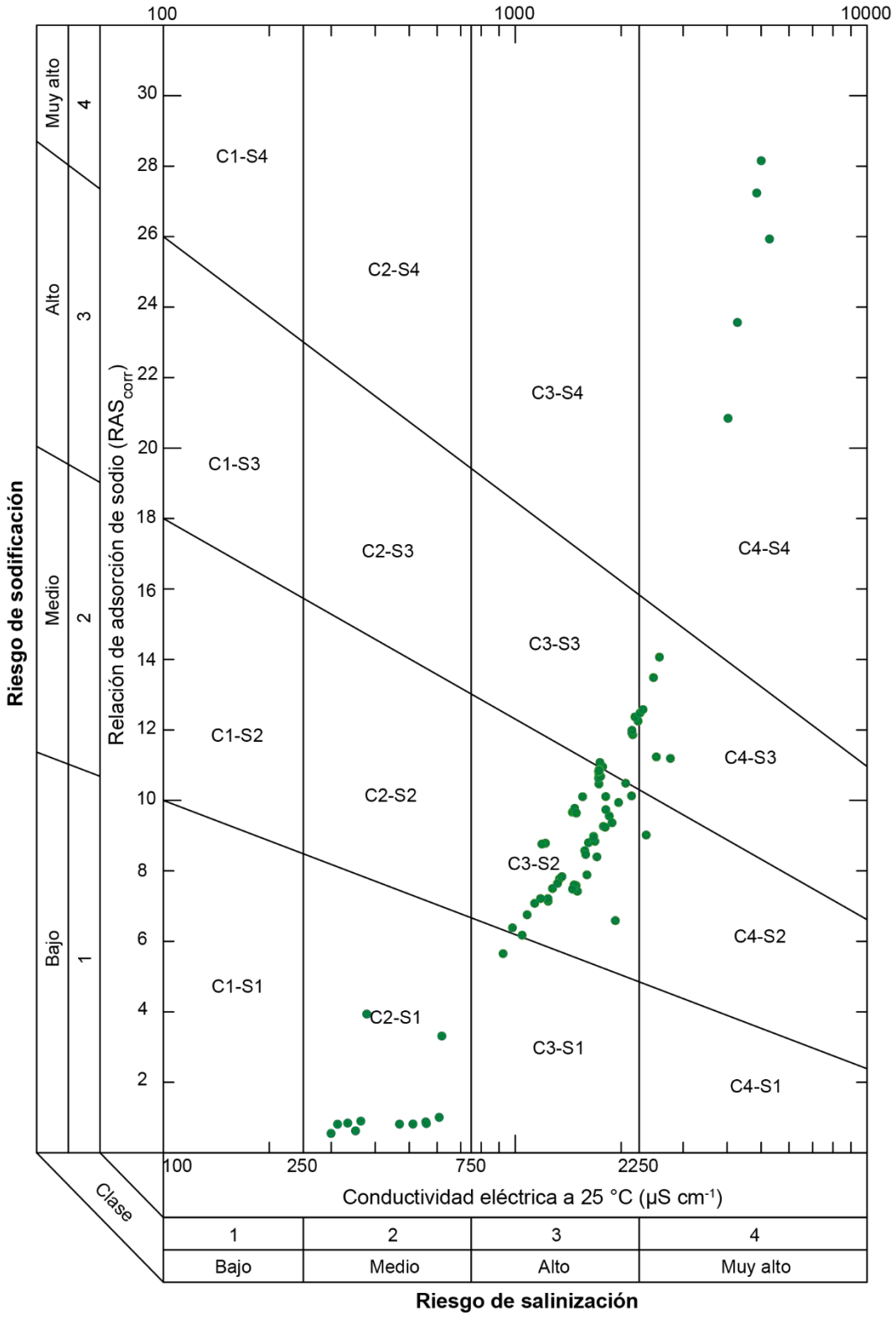


Figura 33. Clasificación de las aguas muestreadas en primavera de 2018, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{corr}).

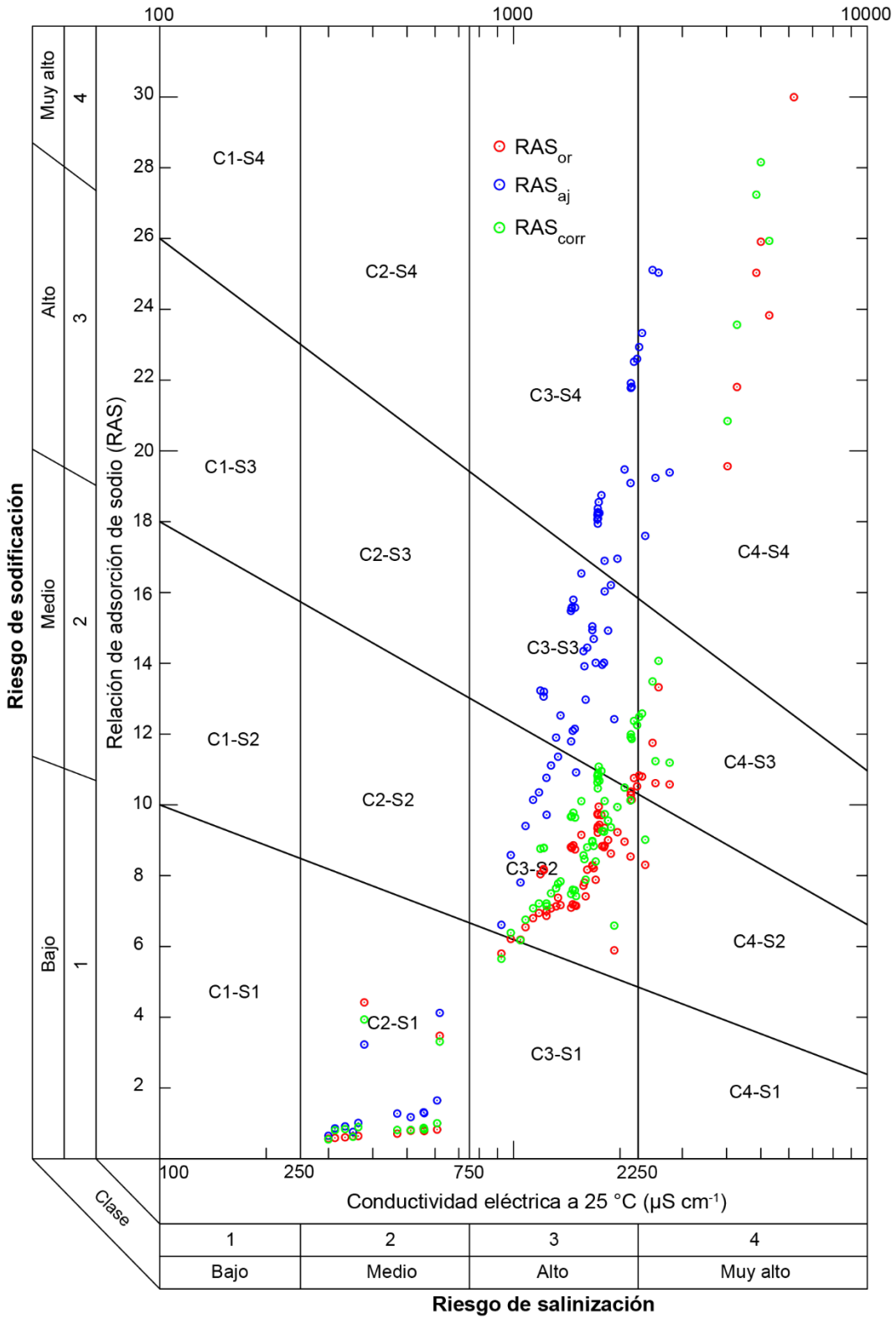


Figura 34. Clasificación de las aguas muestreadas en primavera de 2018, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{or}, RAS_{aj} y RAS_{corr}).

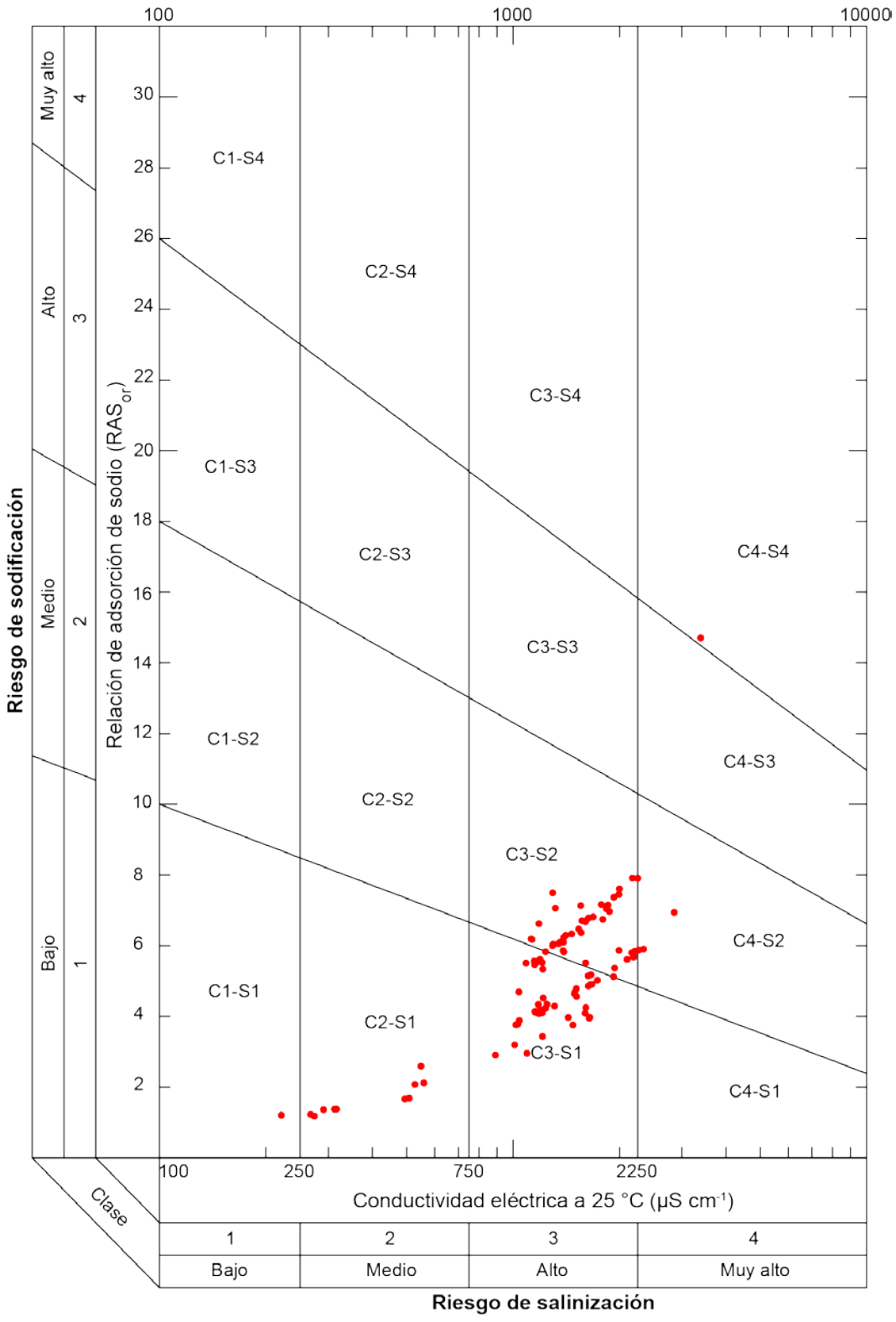


Figura 35. Clasificación de las aguas muestreadas en verano de 2019, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{or}).

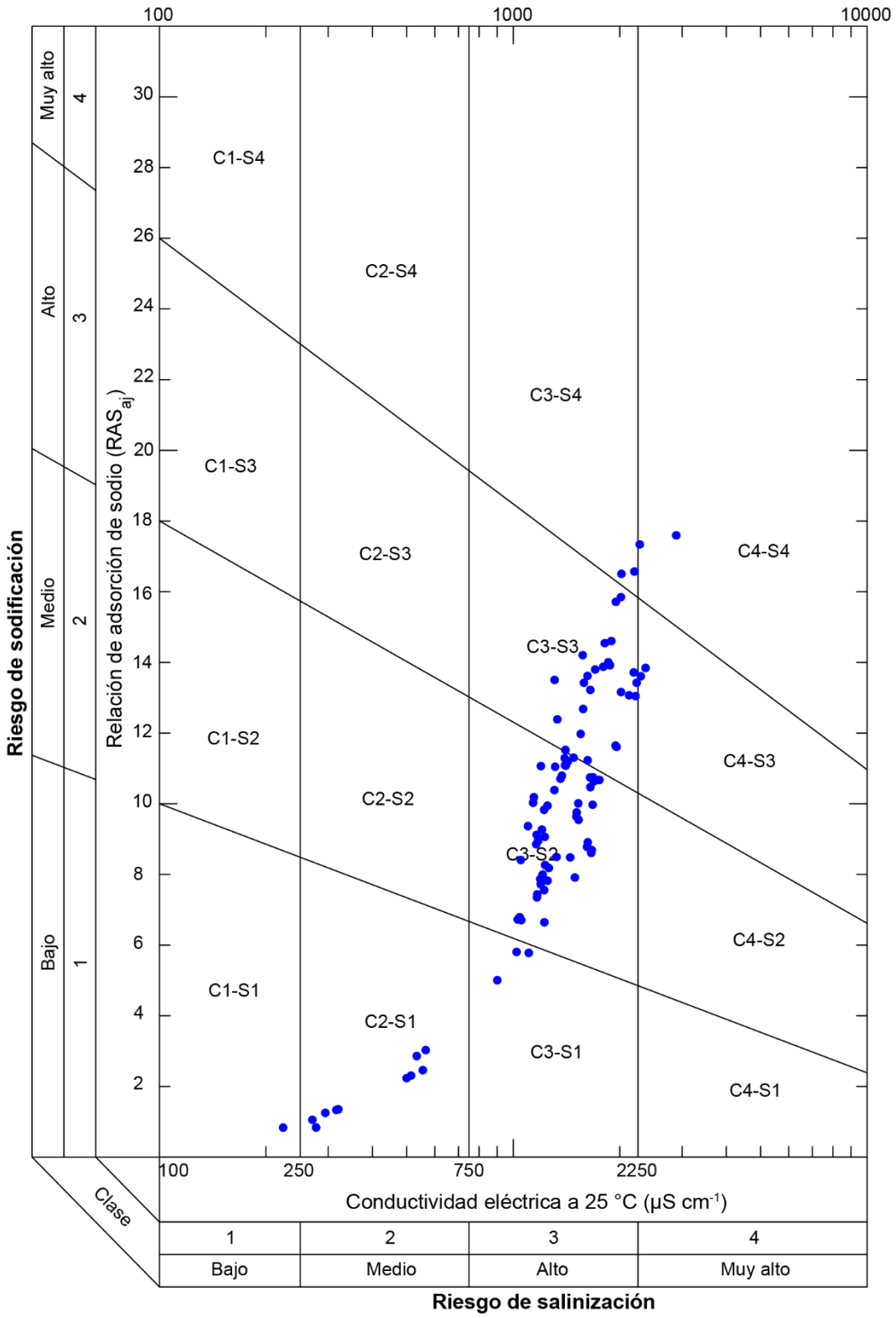


Figura 36. Clasificación de las aguas muestreadas en verano de 2019, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{aj}).

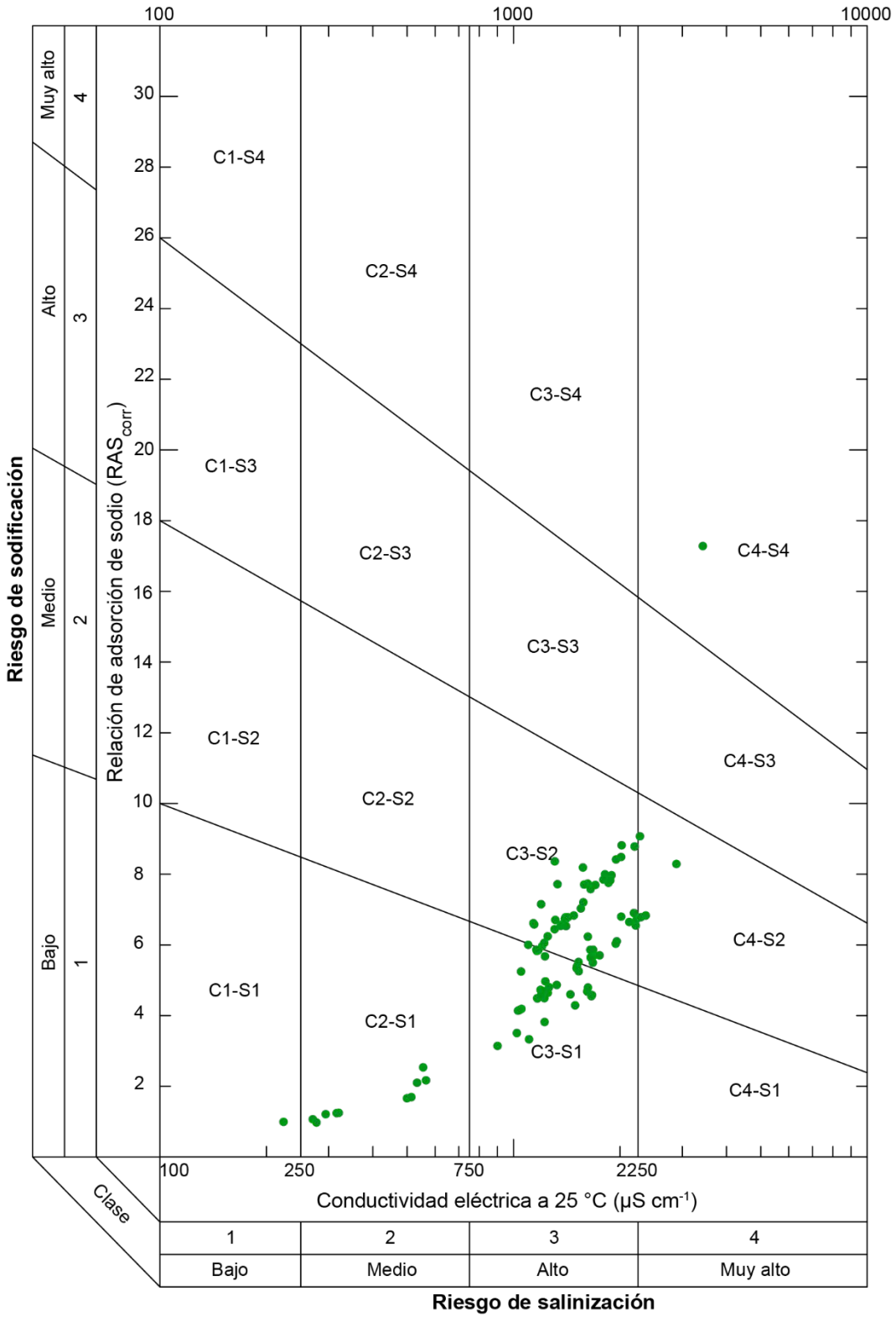


Figura 37. Clasificación de las aguas muestreadas en verano de 2019, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{corr}).

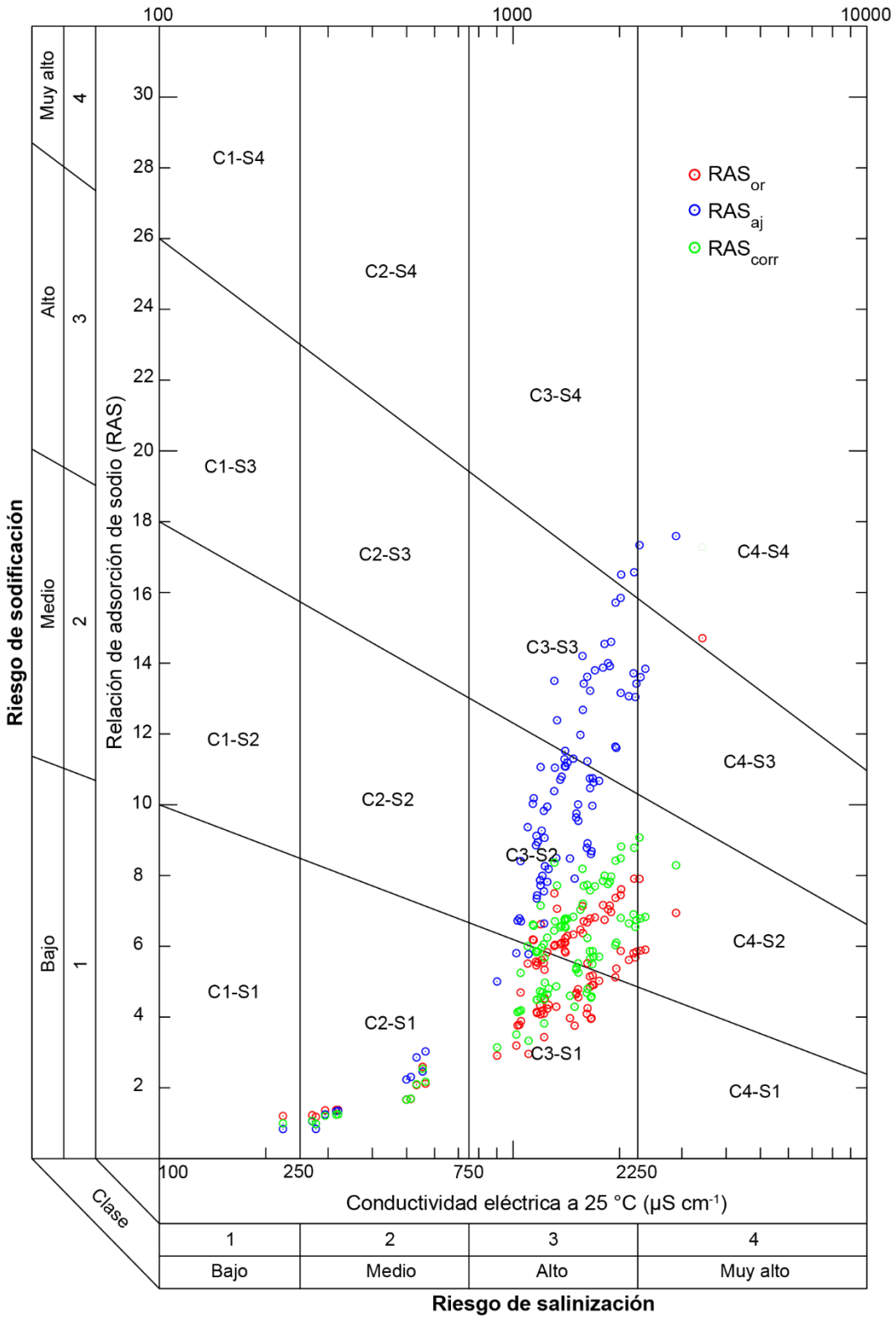


Figura 38. Clasificación de las aguas muestreadas en verano de 2019, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio (RAS_{or}, RAS_{aj} y RAS_{corr}).

En el muestreo realizado durante el periodo de estiaje (primavera de 2018) el mayor número de muestras se ubica en las clasificaciones C2S1, C3S2, C3S3, C3S4, C4S3 y C4S4, con una mayor predominancia de la clasificación C3S2, que se refiere a aguas “altamente salinas” y “medias en sodio”.

En el muestreo realizado en época de lluvias (verano de 2019) se observa el efecto de la dilución por el agua de lluvia. El mayor número de muestras se encuentran en la clasificación C2S1, C3S1, C3S2, C3S3, con una mayor predominancia de la clasificación C3S2 que se refiere a aguas “altamente salinas” y “medias en sodio”. La diferencia con el primer muestreo está una cantidad importante de muestras en la clasificación C3S1 y solamente tres muestras en la clasificación C4S4.

Las gráficas presentadas de acuerdo con la clasificación de Richards *et al*. (1974) muestran la tendencia general de riesgo de salinidad y sodicidad en las aguas de la red hidrológica del alto y bajo Pánuco. Sin embargo, para una descripción individual de cada muestra, se realizó el Cuadro 18 y el Cuadro 19, donde se hace una clasificación individual basándose en la conductividad eléctrica y las tres formulaciones de la RAS. De esta manera, se puede conocer el tipo de aguas de los sitios de muestreo, de acuerdo con el riesgo de salinidad y sodicidad.

En el primer muestreo se observa que las muestras clasificadas como de “alta salinidad” y “alta sodicidad” (C4S4) se encuentran en la región donde se inicia la descarga de aguas residuales provenientes de la zona metropolitana. Las muestras clasificadas como C4S4, de acuerdo con la ecuación original de la RAS, en el primer muestreo son: 4 (Gran Canal Oriente en Tecamac), 6 (canal revestido en Santa María Tonanitla), 7 (canal revestido en Chiconautla), 8 (lumbrera 2 del Gran Canal Oriente en Santa Inés), 12 (canal revestido Texas en Atitalaquia) y 13 (río Tula en Atotonilco).

En el segundo muestreo, de las tres muestras clasificadas como de “alta salinidad” y “alta sodicidad” (C4S4) dos de ellas surgen como resultado de utilizar la RAS_{aj}: 9 (lumbrera 13 del Gran Canal Oriente) y 31 (salida de Tula a Pachuca). Esta última por el aporte de aguas residuales de la ciudad de Tula. La muestra 9 también se repite como C4S4 cuando se utiliza la ecuación original de la RAS.

Cuadro 18. Valores de la relación de adsorción de sodio en tres formulaciones, y clasificación de cada muestra de agua con base en la RAS y la CE, del muestreo 1.

No. de muestra	**CE**	Valores de RAS ($mmol_c\ L^{-1}$) y clasificación					
	$\mu S\ cm^{-1}$	**RAS_{or}**	Clase	**RAS_{aj}**	Clase	**RAS_{corr}**	Clase
1	619	3.48	C2S1	4.12	C2S1	3.31	C2S1
2	1850	9.01	C3S2	14.92	C3S3	9.56	C3S2
3	1276	7.08	C3S2	11.11	C3S2	7.50	C3S2
4	4855	25.03	C4S4	53.49	C4S4	27.24	C4S4
5	2518	10.61	C4S3	19.24	C4S4	11.23	C4S3
6	6200	29.99	C4S4	68.42	C4S4	32.77	C4S4
7	5000	25.91	C4S4	55.67	C4S4	28.15	C4S4
8	5280	23.83	C4S4	54.12	C4S4	25.93	C4S4
9	1336	7.38	C3S2	11.36	C3S2	7.77	C3S2
10	2761	10.58	C4S3	19.39	C4S4	11.19	C4S3
11	2570	13.32	C4S3	25.03	C4S4	14.07	C4S3
12	4280	21.80	C4S4	46.06	C4S4	23.56	C4S4
13	4025	19.57	C4S4	40.43	C4S4	20.84	C4S4
14	1319	7.13	C3S2	11.90	C3S3	7.65	C3S2
15	1358	7.17	C3S2	12.53	C3S3	7.84	C3S2
16	1240	7.00	C3S2	9.72	C3S2	7.14	C3S2
17	2356	8.31	C4S2	17.60	C4S4	9.02	C4S2
18	1926	5.89	C3S2	12.42	C3S3	6.59	C3S2
19	1576	7.72	C3S2	14.34	C3S3	8.57	C3S2
20	1802	8.80	C3S2	14.02	C3S3	9.24	C3S2
21	1586	7.81	C3S2	13.92	C3S3	8.47	C3S2
22	1492	8.74	C3S2	15.57	C3S3	9.64	C3S2
23	1476	8.86	C3S2	15.80	C3S3	9.78	C3S2
24	1670	8.29	C3S2	14.94	C3S3	8.98	C3S2
25	1781	8.83	C3S2	13.96	C3S3	9.26	C3S2
26	1461	8.78	C3S2	15.58	C3S3	9.68	C3S2
27	379	4.42	C2S1	3.23	C2S1	3.94	C2S1
28	1459	8.82	C3S2	15.55	C3S3	9.69	C3S2

Cuadro 18. Continuación

No. de muestra	**CE**	Valores de RAS ($mmol_c\ L^{-1}$) y clasificación					
	$\mu S\ cm^{-1}$	**RAS_{or}**	Clase	**RAS_{aj}**	Clase	**RAS_{corr}**	Clase
29	1502	7.15	C3S2	10.92	C3S2	7.42	C3S2
30	1809	8.85	C3S2	16.03	C3S3	9.74	C3S2
31	1615	8.17	C3S2	14.44	C3S3	8.80	C3S2
32	1884	8.62	C3S2	16.21	C3S3	9.37	C3S2
33	1453	8.81	C3S2	15.48	C3S3	9.67	C3S2
34	1191	8.04	C3S2	13.23	C3S3	8.76	C3S2
35	2060	8.96	C3S2	19.48	C3S4	10.49	C3S2
36	2157	10.15	C3S2	21.81	C3S4	11.86	C3S3
37	2234	10.52	C3S3	22.60	C3S4	12.25	C3S3
38	2141	8.54	C3S2	19.09	C3S4	10.13	C3S2
39	2146	10.28	C3S2	21.78	C3S4	11.91	C3S3
40	1966	9.23	C3S2	16.95	C3S4	9.94	C3S2
41	2146	10.38	C3S2	21.91	C3S4	11.99	C3S3
42	1808	9.35	C3S2	16.90	C3S4	10.11	C3S2
43	1554	9.15	C3S2	16.54	C3S3	10.11	C3S2
44	1180	6.95	C3S2	10.35	C3S2	7.22	C3S2
45	1219	8.16	C3S2	13.20	C3S3	8.79	C3S2
46	2264	10.83	C4S3	22.93	C4S4	12.48	C4S3
47	982	6.21	C3S1	8.58	C3S2	6.39	C3S2
48	2189	10.76	C3S3	22.52	C3S4	12.37	C3S3
49	1749	9.44	C3S2	18.24	C3S4	10.68	C3S2
50	1081	6.55	C3S2	9.40	C3S2	6.76	C3S2
51	1772	9.71	C3S2	18.75	C3S4	10.96	C3S3
52	1726	9.34	C3S2	18.19	C3S4	10.63	C3S2
53	1730	9.39	C3S2	18.37	C3S4	10.73	C3S2
54	1732	9.72	C3S2	18.09	C3S4	10.83	C3S2
55	1732	9.75	C3S2	18.25	C3S4	10.88	C3S2
56	1731	9.74	C3S2	18.26	C3S4	10.84	C3S2
57	924	5.80	C3S1	6.61	C3S2	5.65	C3S1

Cuadro 18. Continuación

No. de muestra	**CE**	Valores de RAS ($mmol_c\ L^{-1}$) y clasificación					
	µS cm^{-1}	**RAS_{or}**	Clase	**RAS_{aj}**	Clase	**RAS_{corr}**	Clase
58	1725	9.74	C3S2	18.06	C3S4	10.83	C3S2
59	1046	6.19	C3S2	7.81	C3S2	6.18	C3S2
60	1735	9.73	C3S2	18.27	C3S4	10.85	C3S2
61	1670	8.26	C3S2	15.04	C3S3	8.96	C3S2
62	1741	9.95	C3S2	18.55	C3S4	11.08	C3S3
63	2308	10.80	C4S3	23.33	C4S4	12.58	C4S3
64	2471	11.75	C4S3	25.11	C4S4	13.49	C4S3
65	1730	9.22	C3S2	17.94	C3S4	10.47	C3S2
66	512	0.79	C2S1	1.18	C2S1	0.82	C2S1
67	1685	8.21	C3S2	14.69	C3S3	8.84	C3S2
68	1707	7.88	C3S2	14.01	C3S3	8.40	C3S2
69	557	0.84	C2S1	1.32	C2S1	0.88	C2S1
70	1216	8.19	C3S2	13.06	C3S3	8.78	C3S2
71	1599	7.42	C3S2	12.97	C3S3	7.89	C3S2
72	313	0.59	C2S1	0.86	C2S1	0.81	C2S1
73	364	0.64	C2S1	1.01	C2S1	0.90	C2S1
74	608	0.83	C2S1	1.65	C2S1	1.01	C2S1
75	1490	7.16	C3S2	12.15	C3S3	7.58	C3S2
76	559	0.79	C2S1	1.29	C2S1	0.83	C2S1
77	1470	7.19	C3S2	12.09	C3S3	7.60	C3S2
78	1455	7.10	C3S2	11.79	C3S3	7.48	C3S2
79	352	0.64	C2S1	0.76	C2S1	0.62	C2S1
80	469	0.71	C2S1	1.28	C2S1	0.81	C2S1
81	1239	6.87	C3S2	10.76	C3S2	7.21	C3S2
82	1136	6.80	C3S2	10.14	C3S2	7.08	C3S2
83	300	0.57	C2S1	0.65	C2S1	0.55	C2S1
84	334	0.61	C2S1	0.92	C2S1	0.84	C2S1

Cuadro 19. Valores de la relación de adsorción de sodio en tres formulaciones, y clasificación de cada muestra de agua con base en la RAS y la CE, del muestreo 2.

No. de muestra	**CE**	Valores de RAS ($mmol_c\ L^{-1}$) y clasificación					
	$\mu S\ cm^{-1}$	**RAS_{or}**	Clase	**RAS_{aj}**	Clase	**RAS_{corr}**	Clase
1	565.50	2.12	C2S1	3.03	C2S1	2.17	C2S1
2	1622.00	5.52	C3S2	11.23	C3S3	6.23	C3S2
3	1813.50	6.75	C3S2	14.54	C3S3	8.00	C3S2
4	1050.00	4.69	C3S1	8.41	C3S2	5.25	C3S1
5	1571.00	7.14	C3S2	14.20	C3S3	8.19	C3S2
6	1620.50	6.68	C3S2	13.62	C3S3	7.73	C3S2
7	1583.50	6.71	C3S2	13.42	C3S3	7.71	C3S2
8	1308.00	7.50	C3S2	13.50	C3S3	8.36	C3S2
9	3429.50	14.71	C4S4	34.49	C4S4	17.28	C4S4
10	1550.00	6.47	C3S2	11.97	C3S3	7.03	C3S2
11	1892.50	6.97	C3S2	14.60	C3S3	7.97	C3S2
12	2021.00	7.61	C3S2	16.50	C3S4	8.82	C3S2
13	2014.00	7.45	C3S2	15.85	C3S3	8.49	C3S2
14	1948.50	7.37	C3S2	15.71	C3S3	8.42	C3S2
15	1249.00	5.83	C3S2	9.94	C3S2	6.24	C3S2
16	1405.00	6.23	C3S2	11.09	C3S2	6.73	C3S2
17	1137.50	6.19	C3S2	10.03	C3S2	6.61	C3S2
18	1196.50	6.62	C3S2	11.06	C3S2	7.15	C3S2
19	1164.00	5.46	C3S1	9.12	C3S2	5.83	C3S1
20	1372.00	6.10	C3S2	10.79	C3S2	6.58	C3S2
21	1204.50	5.61	C3S1	9.27	C3S2	5.97	C3S2
22	1400.00	5.87	C3S2	11.09	C3S2	6.56	C3S2
23	1174.00	5.53	C3S1	8.94	C3S2	5.85	C3S1
24	1166.00	4.14	C3S1	7.35	C3S2	4.49	C3S1
25	555.00	2.59	C2S1	2.46	C2S1	2.54	C2S1
26	1306.50	6.00	C3S2	10.38	C3S2	6.44	C3S2
27	1230.00	4.52	C3S1	8.26	C3S2	4.97	C3S1
28	1249.50	4.24	C3S1	7.82	C3S2	4.64	C3S1

Cuadro 19. Continuación

No. de muestra	**CE**	Valores de RAS ($mmol_c\ L^{-1}$) y clasificación					
	$\mu S\ cm^{-1}$	**RAS_{or}**	Clase	**RAS_{aj}**	Clase	**RAS_{corr}**	Clase
29	1359.00	6.06	C3S2	10.71	C3S2	6.54	C3S2
30	2199.00	7.91	C3S2	16.57	C3S4	8.78	C3S2
31	2887.50	6.94	C4S2	17.59	C4S4	8.29	C4S2
32	1143.50	6.18	C3S2	10.18	C3S2	6.58	C3S2
33	1403.50	6.10	C3S2	11.52	C3S3	6.78	C3S2
34	1703.50	6.82	C3S2	13.80	C3S3	7.70	C3S2
35	1397.00	6.12	C3S2	11.29	C3S2	6.75	C3S2
36	1100.00	5.51	C3S1	9.37	C3S2	6.00	C3S1
37	1260.00	4.34	C3S1	8.18	C3S2	4.80	C3S1
38	1424.50	6.29	C3S2	11.19	C3S2	6.78	C3S2
39	320.30	1.38	C2S1	1.35	C2S1	1.25	C2S1
40	1331.50	7.06	C3S2	12.39	C3S3	7.72	C3S2
41	1312.50	6.04	C3S2	11.05	C3S2	6.71	C3S2
42	1795.50	7.16	C3S2	13.88	C3S3	7.85	C3S2
43	1160.50	5.57	C3S1	8.85	C3S2	5.87	C3S1
44	1407.00	5.82	C3S2	11.08	C3S2	6.53	C3S2
45	1192.00	4.34	C3S1	7.87	C3S2	4.73	C3S1
46	270.50	1.23	C2S1	1.06	C2S1	1.07	C2S1
47	1221.50	5.53	C3S1	9.83	C3S2	6.06	C3S2
48	1651.00	6.78	C3S2	13.22	C3S3	7.58	C3S2
49	1227.00	5.34	C3S1	9.06	C3S2	5.68	C3S1
50	2277.00	7.90	C4S2	17.34	C4S4	9.07	C4S2
51	1855.50	7.04	C3S2	14.00	C3S3	7.76	C3S2
52	1480.50	6.33	C3S2	11.30	C3S2	6.83	C3S2
53	1168.50	4.11	C3S1	7.44	C3S2	4.49	C3S1
54	901.00	2.91	C3S1	5.00	C3S1	3.14	C3S1
55	1224.00	3.43	C3S1	6.64	C3S2	3.82	C3S1
56	2215.50	5.68	C3S2	13.04	C3S3	6.55	C3S2
57	1945.00	5.12	C3S2	11.64	C3S3	6.03	C3S2

Cuadro 19. Continuación

No. de muestra	**CE**	Valores de RAS ($mmol_c\ L^{-1}$) y clasificación					
	$\mu S\ cm^{-1}$	**RAS_{or}**	Clase	**RAS_{aj}**	Clase	**RAS_{corr}**	Clase
58	2015.50	5.87	C3S2	13.16	C3S3	6.80	C3S2
59	2231.50	5.85	C3S2	13.42	C3S3	6.74	C3S2
60	1876.50	7.15	C3S2	13.92	C3S3	7.82	C3S2
61	1575.00	6.37	C3S2	12.68	C3S3	7.21	C3S2
62	1958.00	5.37	C3S2	11.61	C3S3	6.10	C3S2
63	1053.00	3.89	C3S1	6.71	C3S2	4.19	C3S1
64	1222.50	4.10	C3S1	7.55	C3S2	4.49	C3S1
65	2365.00	5.91	C4S2	13.84	C4S3	6.83	C4S2
66	2124.50	5.61	C3S2	13.07	C3S3	6.65	C3S2
67	1021.50	3.19	C3S1	5.81	C3S1	3.51	C3S1
68	1616.00	4.09	C3S1	8.78	C3S2	4.68	C3S1
69	1493.00	3.76	C3S1	7.91	C3S2	4.29	C3S1
70	1675.50	4.91	C3S1	9.97	C3S2	5.50	C3S2
71	1507.00	4.64	C3S1	9.64	C3S2	5.34	C3S1
72	2189.50	5.80	C3S2	13.72	C3S3	6.90	C3S2
73	1689.00	4.91	C3S1	10.63	C3S2	5.71	C3S2
74	1623.50	4.25	C3S1	8.91	C3S2	4.80	C3S1
75	1042.00	3.78	C3S1	6.79	C3S2	4.16	C3S1
76	1660.00	3.95	C3S1	8.61	C3S2	4.55	C3S1
77	1666.50	3.97	C3S1	8.69	C3S2	4.58	C3S1
78	2292.50	5.88	C4S2	13.61	C4S3	6.79	C4S2
79	499.50	1.66	C2S1	2.23	C2S1	1.66	C2S1
80	1650.50	4.86	C3S1	10.47	C3S2	5.64	C3S2
81	514.00	1.69	C2S1	2.31	C2S1	1.69	C2S1
82	1751.00	5.02	C3S1	10.67	C3S2	5.70	C3S2
83	1678.50	5.18	C3S1	10.75	C3S2	5.86	C3S2
84	1648.00	5.15	C3S1	10.74	C3S2	5.86	C3S2
85	1529.00	4.56	C3S1	9.54	C3S2	5.26	C3S1
86	1510.00	4.68	C3S1	9.75	C3S2	5.39	C3S1

Cuadro 19. Continuación

No. de muestra	**CE**	Valores de RAS ($mmol_c\ L^{-1}$) y clasificación					
	$\mu S\ cm^{-1}$	**RAS_{or}**	Clase	**RAS_{aj}**	Clase	**RAS_{corr}**	Clase
87	1526.50	4.79	C3S1	10.01	C3S2	5.52	C3S2
88	316.05	1.38	C2S1	1.33	C2S1	1.24	C2S1
89	533.50	2.08	C2S1	2.86	C2S1	2.10	C2S1
90	1324.50	4.29	C3S1	8.49	C3S2	4.87	C3S1
91	294.25	1.36	C2S1	1.25	C2S1	1.21	C2S1
92	277.10	1.18	C2S1	0.84	C2S1	0.98	C2S1
93	1210.00	4.19	C3S1	7.99	C3S2	4.70	C3S1
94	1448.00	3.97	C3S1	8.48	C3S2	4.60	C3S1
95	1106.00	2.96	C3S1	5.78	C3S1	3.33	C3S1
96	1195.50	4.08	C3S1	7.72	C3S2	4.56	C3S1
97	223.60	1.21	C1S1	0.84	C1S1	1.00	C1S1
98	1029.50	3.76	C3S1	6.72	C3S2	4.14	C3S1

El Cuadro 20 da una idea de la distribución del número de muestras de acuerdo con la clasificación de Richards *et al*. (1974). En las clasificaciones C1S2, C1S3, C1S4, C2S2, C2S3, C2S4 y C4S1 no se encontró ninguna muestra utilizando las tres ecuaciones de la RAS. Estas clasificaciones conducen a demostrar que en los muestreos realizados en el alto y bajo Pánuco prácticamente no se encontraron aguas de baja salinidad, con excepción de una muestra del verano de 2019 tomada del río Tempoal en el estado de Veracruz, que resultó de clasificación C1S1 utilizando las tres formulaciones de la RAS.

De la clasificación “aguas de baja sodicidad” se encontraron 12 muestras en el primer muestreo y 10 muestras en el segundo. El mismo número de muestras aplicó en las tres formulaciones de la RAS. Sin embargo, el mayor número de muestras en cuanto a sodicidad se refiere cae en la categoría de “sodicidad media”.

Aguas con “muy alta salinidad” y “sodicidad media” de acuerdo con la RASor se encontraron una en el primer muestreo y 4 en el segundo. Aguas con “muy alta salinidad” y “sodicidad alta” de acuerdo con la RASor se encontraron 6 en el primer muestreo y ninguna en el segundo. Aguas con “muy alta salinidad” y “sodicidad muy

alta” de acuerdo con la RASor se encontraron 6 en el primer muestreo y una en el segundo. Cuando se utilizó la RASaj se encontraron 13 muestras con “muy alta salinidad” y “sodicidad muy alta” en el primer muestreo y 3 en el segundo.

Cuadro 20. Número de muestras por clase de agua, con base en la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio, utilizando las tres formulaciones de la RAS. Muestreo 1 en primavera de 2018 y muestreo 2 en verano de 2019.

Clase	RAS_{or}		RAS_{aj}		RAS_{corr}	
	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 1	Muestreo 2
C1S1	-	1	-	1	-	1
C1S2	-	-	-	-	-	-
C1S3	-	-	-	-	-	-
C1S4	-	-	-	-	-	-
C2S1	12	10	12	10	12	10
C2S2	-	-	-	-	-	-
C2S3	-	-	-	-	-	-
C2S4	-	-	-	-	-	-
C3S1	2	41	-	3	1	32
C3S2	55	41	11	52	51	50
C3S3	2	-	28	25	7	-
C3S4	-	-	20	2	-	-
C4S1	-	-	-	-	-	-
C4S2	1	4	-	-	1	4
C4S3	6	-	-	2	6	-
C4S4	6	1	13	3	6	1
Total	**84**	**98**	**84**	**98**	**84**	**98**

4.5.2 Riesgo de disminución de la capacidad de infiltración del suelo

El riego con aguas de baja concentración provoca disminución en las tasas de infiltración del agua en el suelo. En el proceso de evapotranspiración, las sales menos solubles precipitan, y quedan disponibles las más solubles (Can *et al*., 2008). En estas condiciones, el ion sodio predomina en la primera capa del suelo, y provoca la formación de costras que reducen la infiltración. La infiltración disminuye cuando la concentración de sodio en relación con la de calcio y magnesio aumenta. La infiltración aumenta cuando la salinidad aumenta y viceversa.

Cuando se tienen aguas con alta concentración de sodio y bicarbonatos, se debe evitar el riego por aspersión. Esto se debe a que, durante el riego por aspersión (de igual manera que con la lluvia), la energía cinética de las gotas de agua rompe los agregados del suelo. En el riego por goteo la dispersión de agregados es menor, y por consecuencia, la formación de costras en el suelo también lo es.

Las tasas de infiltración tienen una alta correlación entre la relación de adsorción de sodio y la salinidad del agua de riego. Por lo tanto, la infiltración puede predecirse a partir de estos dos parámetros (Oster y Schroer, 1979). En las Figuras 39 a 42 se muestra la clasificación de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco. Se toman en cuenta las tres formulaciones de la RAS para evaluar las diferencias entre cada una de ellas en esta clasificación.

En la Figura 39 se observa que, utilizando la RAS_{or}, alrededor del 70% de las muestras indican que se podría presentar ligera a moderada reducción en la tasa de infiltración, y el 30% restante no presentaría ningún riesgo. Estas que no presentan riesgos corresponden a los sitios de muestreo localizados después de la presa Zimapán, en la parte más baja de la cuenca.

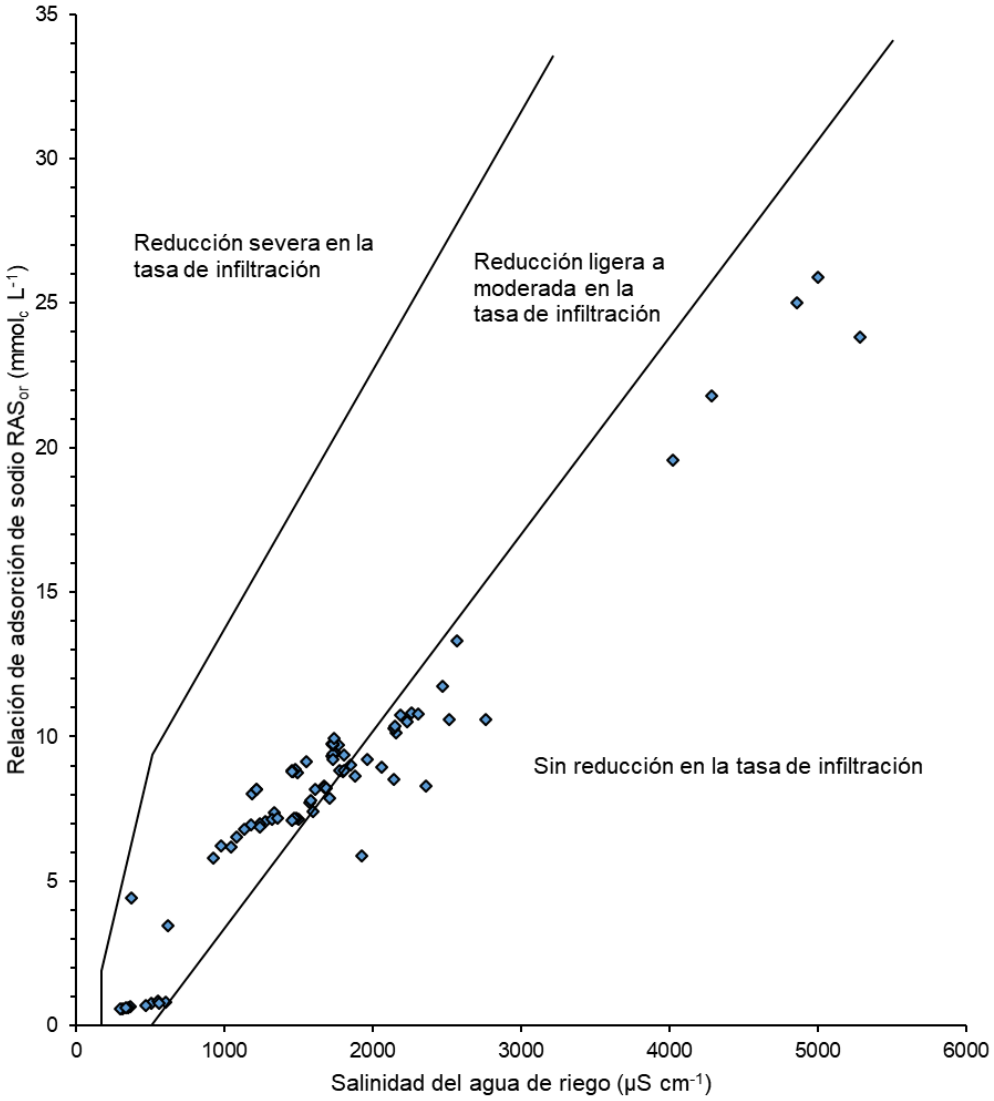


Figura 39. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio original (RAS_{or}) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en la primavera de 2018.

En la Figura 40 se observa que, al utilizar la ecuación de RAS ajustada por Bower, todas las aguas muestreadas podrían presentar reducción ligera a moderada de la tasa de infiltración.

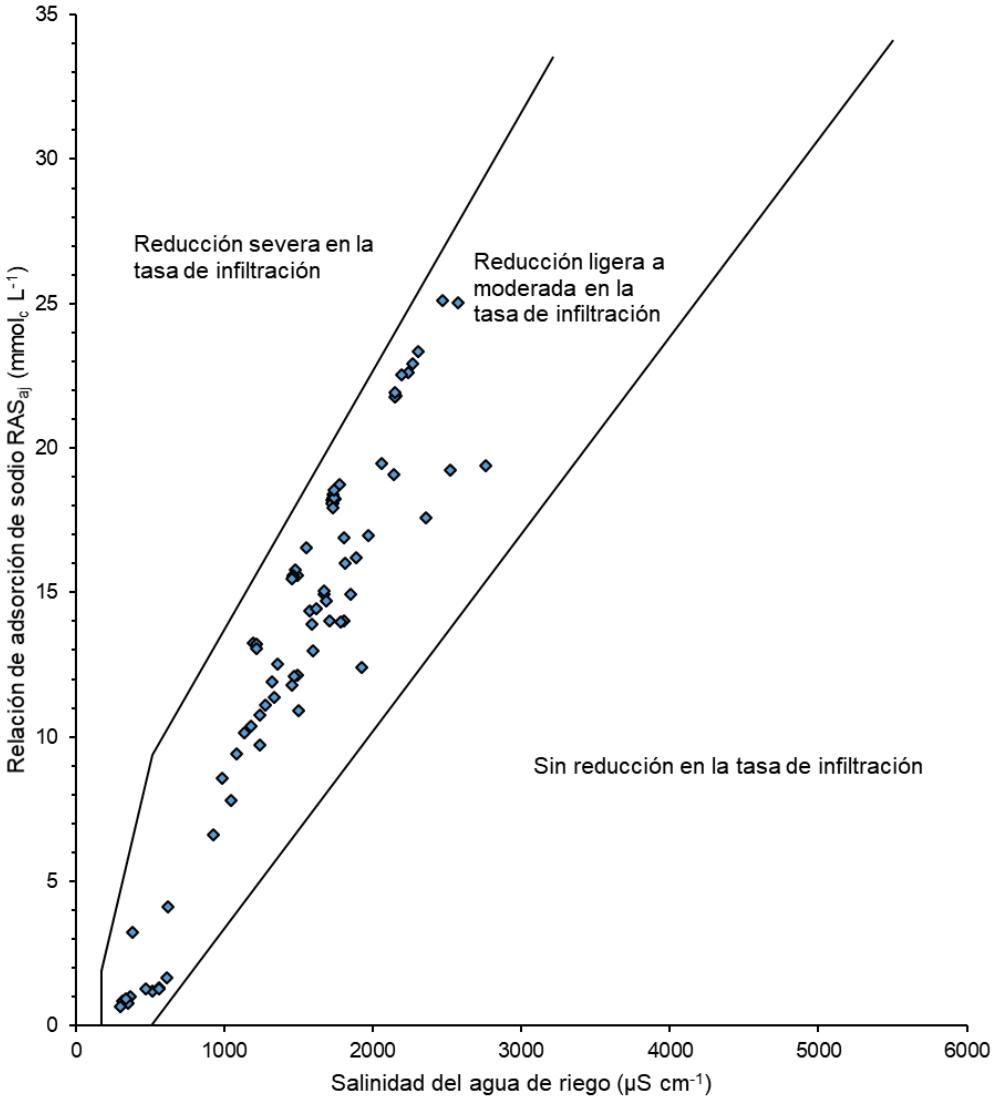


Figura 40. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio ajustada (RAS_{aj}) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en la primavera de 2018.

En la Figura 41, se utilizó la ecuación de relación de adsorción de sodio corregida por Suarez (RAS_{corr}) para predecir la infiltración y se observa que la clasificación es similar a los resultados obtenidos con la ecuación original, pero difiere en que un menor porcentaje (13%) de muestras corresponde a las aguas que no tendrían ningún riesgo en la reducción de la tasa de infiltración.

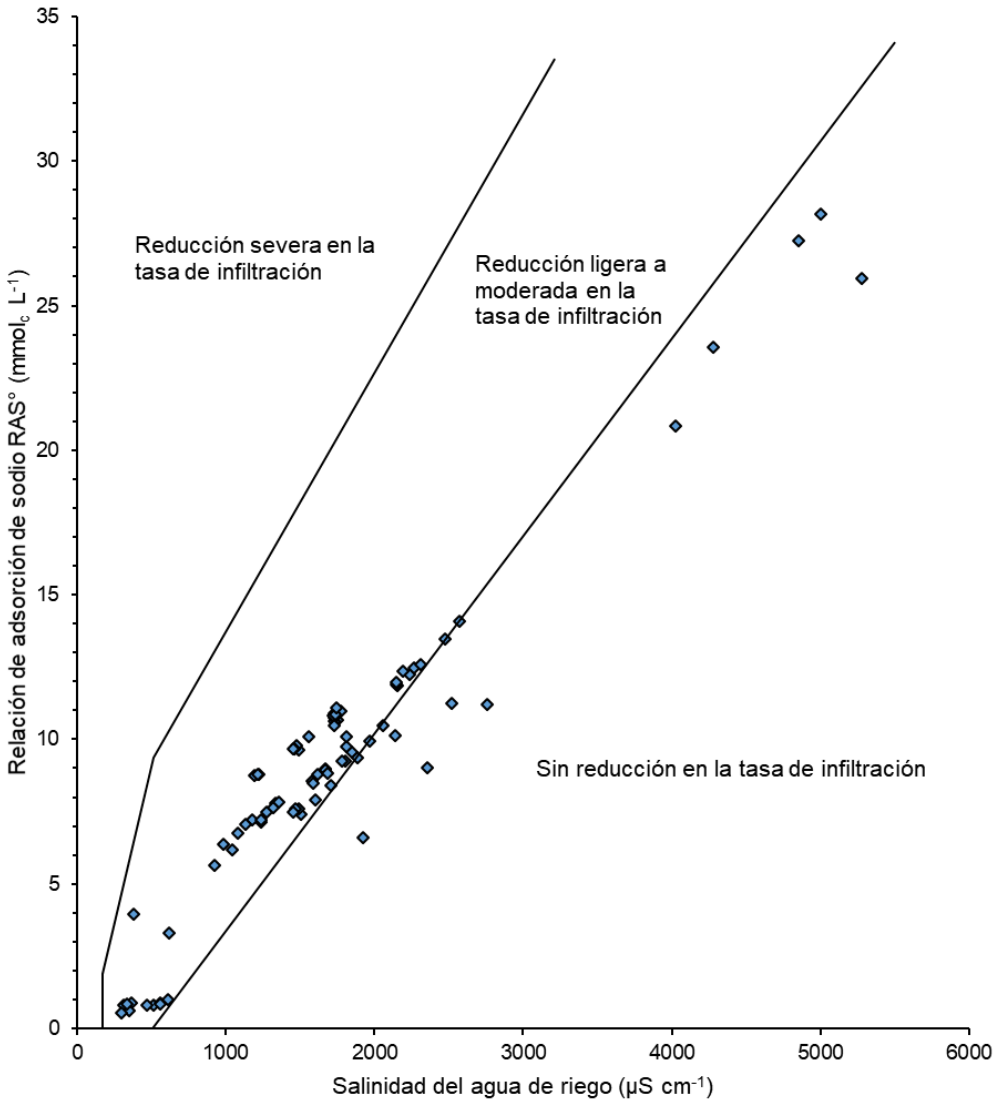


Figura 41. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio corregida (RAS_{corr}) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en primavera de 2018.

La Figura 42 muestra la predicción de la reducción de la infiltración del agua en el suelo utilizando la ecuación original de la RAS, pero en el segundo muestreo que se realizó en época de lluvias. Aquí también el efecto de la dilución es evidente, porque al presentarse valores más bajos de salinidad y RAS, más del 70% de las muestras indican que no existen riesgos para la reducción en las tasas de infiltración. El resto de las muestras sí presentan riesgos a moderados.

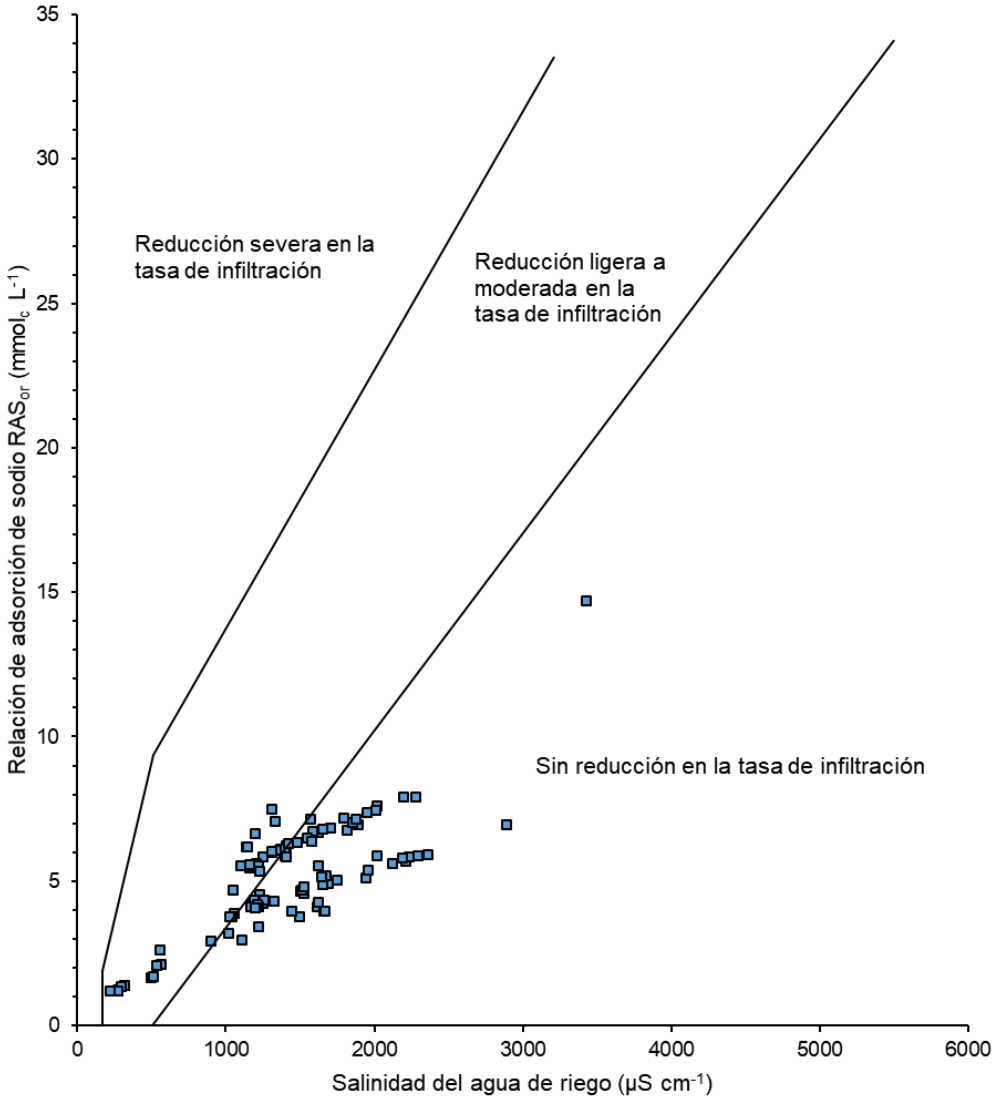


Figura 42. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio original (RAS_{or}) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en el verano de 2019.

En la Figura 43 se utilizó la ecuación ajustada por Bower *et al*. (1968) y se puede observar que todas las muestras presentan riesgos ligeros a moderados en la reducción de la tasa de infiltración. Sin embargo, se observa una diferencia fundamental con la misma gráfica del periodo de estiaje. En el periodo de lluvias los puntos se acercan más hacia la clasificación “sin reducción en la tasa de infiltración” y en el periodo de lluvias hacia la clasificación “reducción severa en la tasa de infiltración”.

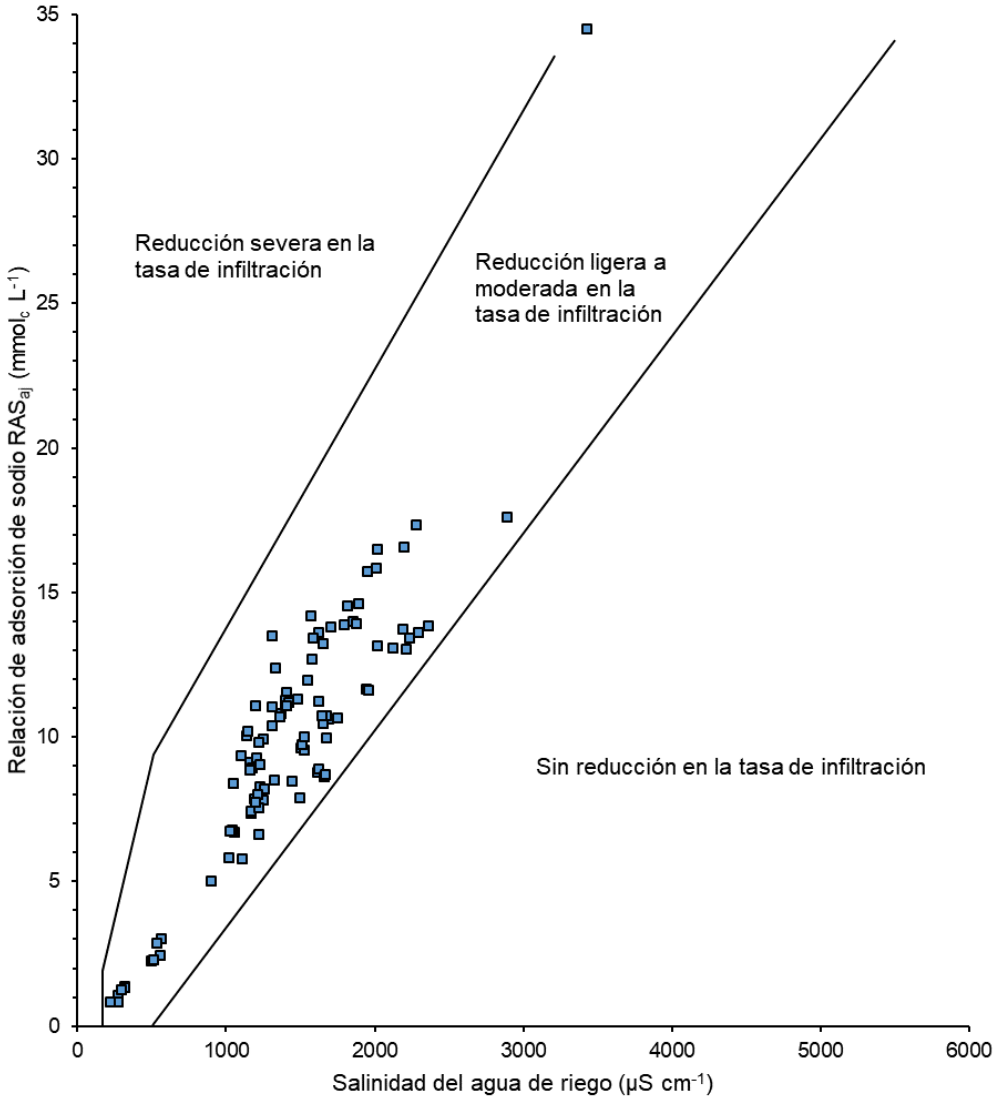


Figura 43. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio ajustada (RAS_{aj}) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en el verano de 2019.

En la Figura 44 se utilizó la ecuación corregida por Suarez (1981) (RAS_{corr}) y se observa que alrededor del 60% de las aguas muestreadas no presentarían reducción en las tasas de infiltración. Las restantes presentarían riesgos ligeros a moderados en la reducción de las tasas de infiltración.

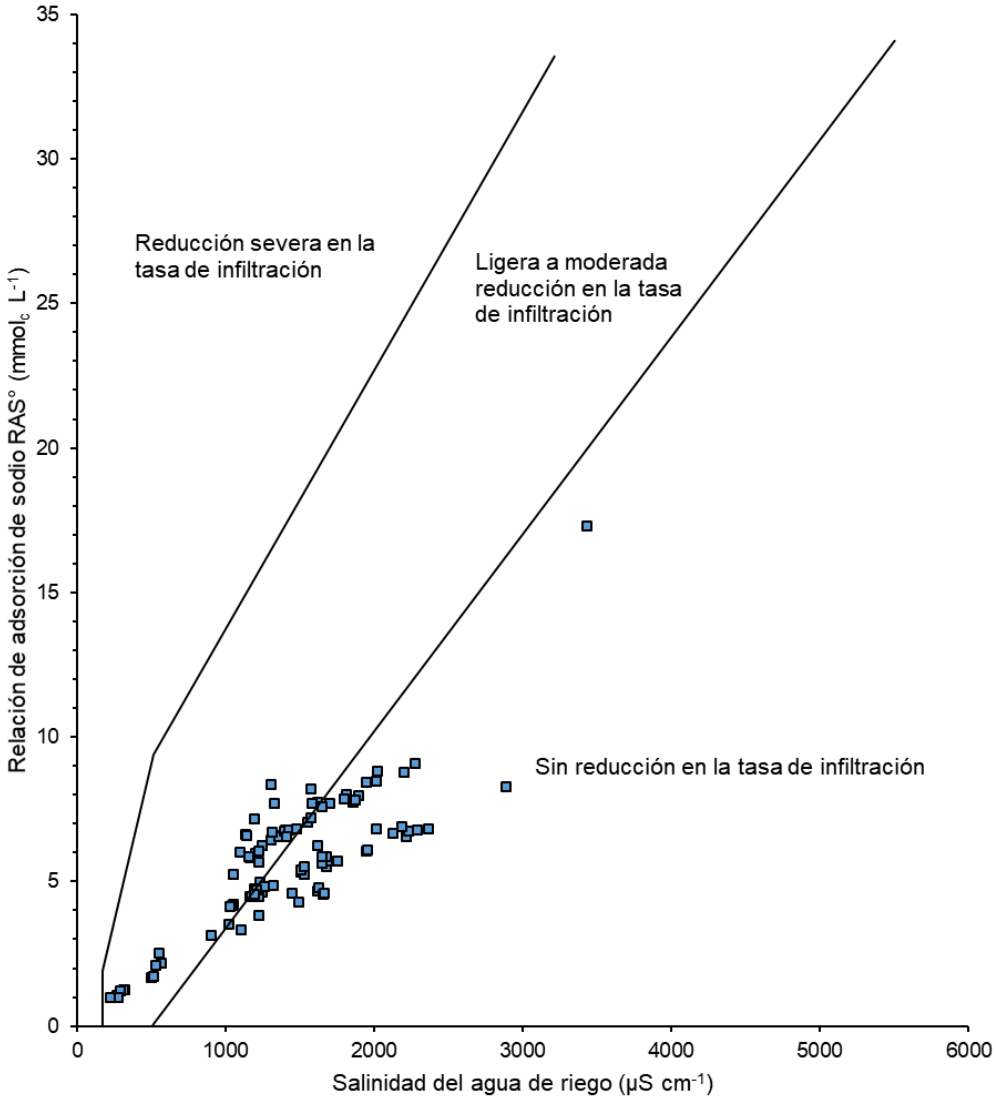


Figura 44. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio corregida (RAS_{corr}) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en el verano de 2019.

4.5.3 Relación catiónica de la estabilidad estructural de los suelos (CROSS)

Aunque no se ha generalizado su aplicación, la CROSS es el único parámetro que toma en cuenta los efectos de los cuatro cationes principales en las propiedades físicas de los suelos. La investigación de este parámetro de calidad del agua de riego dio inicio con los trabajos conceptuales de Rengasamy y Sumner, quienes tomaron en cuenta investigaciones publicadas de al menos 60 años que documentan los impactos

negativos del K y el Mg en las propiedades físicas de suelos y arcillas (Oster *et al*., 2016). Posteriormente Rengasamy y Marchuk (2011) propusieron la primera ecuación, como una generalización de la RAS (ecuación 20). Sin embargo, en el presente trabajo se utilizó la ecuación optimizada por Oster *et al*. (2016):

$$CROSS_{opt} = \frac{(Na + 0.335(\pm 0.038)K)}{[(Ca + 0.0758(\pm 0.012)Mg)/2]^{0.5}}$$

La concentración de los cationes Na^+, K^+, Ca^{2+} y Mg^{2+} se expresan en $mmol_c\ L^{-1}$.

La CROSS se basa en la premisa de que los efectos del K y Mg sobre la permeabilidad de los suelos, a niveles umbral de conductividad eléctrica, son causados por la dispersión de los agregados del suelo y el consiguiente bloqueo de los poros del suelo. Estas relaciones también son válidas para los efectos de Na y Ca.

La incorporación de K y Mg no plantea nuevos efectos perjudiciales en el suelo que sea necesario considerar. Es por eso que Oster *et al*., (2016) sugieren que se utilice la CROSS como herramienta de diagnóstico similar al uso de la RAS. Además, los mismos procedimientos para ajustar la concentración de Ca por los efectos del bicarbonato sobre la precipitación de calcita (Ca_{aj}) que conducen a RAS_{corr} se pueden usar para calcular un valor ajustado de la CROSS, como se observa en el Cuadro 21 y en el Cuadro 22.

Cuadro 21. Obtención de la CROSS optimizada para las muestras obtenidas del alto y bajo Pánuco, en la primavera de 2018.

							RAS	$CROSS_{opt}$	RAS	$CROSS_{opt}$
No.	Ca	Ca_{aj}	Mg	Na	K	CE (dS m^{-1})	Usando Ca		Usando Ca_{aj}	
	. . . . . $mmol_c\ L^{-1}$						. . . . . $mmol_c\ L^{-1}$			
1	0.96	1.18	1.22	3.63	0.25	0.62	3.48	4.73	3.31	4.73
2	1.19	0.74	2.85	12.80	1.25	1.85	9.01	21.07	9.56	21.07
3	1.30	0.96	1.80	8.81	0.61	1.28	7.08	12.72	7.50	12.72
4	1.05	0.30	3.80	38.98	3.24	4.86	25.03	100.84	27.24	100.83
5	1.25	0.66	4.20	17.52	1.67	2.52	10.61	30.36	11.23	30.36
6	1.24	0.29	4.62	51.34	3.44	6.20	29.99	134.34	32.77	134.31
7	1.02	0.27	3.85	40.43	3.44	5.00	25.91	108.62	28.15	108.60
8	1.24	0.30	4.82	41.48	3.59	5.28	23.83	107.01	25.93	106.99

Cuadro 21. Continuación

No.	Ca	Ca_{aj}	Mg	Na	K	CE (dS m^{-1})	RAS	$CROSS_{opt}$	RAS	$CROSS_{opt}$
							Usando Ca		Usando Ca_{aj}	
	. . . . . mmol$_c$ L^{-1}.						. . . . . mmol$_c$ L^{-1}			
9	1.10	0.80	1.95	9.11	0.94	1.34	7.38	14.44	7.77	14.44
10	1.27	0.60	5.02	18.76	1.94	2.76	10.58	34.17	11.19	34.17
11	0.86	0.36	3.95	20.66	1.42	2.57	13.32	48.24	14.07	48.23
12	0.98	0.28	3.90	34.06	2.91	4.28	21.80	90.80	23.56	90.78
13	0.92	0.27	4.51	32.24	1.74	4.03	19.57	86.41	20.84	86.39
14	1.03	0.61	2.24	9.12	0.52	1.32	7.13	16.56	7.65	16.56
15	1.25	0.70	2.11	9.29	0.65	1.36	7.17	15.70	7.84	15.69
16	0.98	0.86	1.95	8.47	0.60	1.24	7.00	12.88	7.14	12.88
17	1.70	0.57	5.75	16.03	1.80	2.36	8.31	29.92	9.02	29.92
18	2.25	0.84	4.80	11.06	0.76	1.93	5.89	17.07	6.59	17.07
19	1.46	0.72	2.45	10.79	0.75	1.58	7.72	18.01	8.57	18.01
20	1.15	0.77	2.96	12.62	0.87	1.80	8.80	20.31	9.24	20.31
21	1.20	0.62	2.70	10.90	0.75	1.59	7.81	19.62	8.47	19.62
22	1.08	0.55	1.90	10.67	0.78	1.49	8.74	20.34	9.64	20.34
23	1.07	0.54	1.88	10.76	0.76	1.48	8.86	20.65	9.78	20.65
24	1.15	0.57	2.77	11.61	0.80	1.67	8.29	21.71	8.98	21.70
25	1.15	0.79	2.88	12.54	0.84	1.78	8.83	19.99	9.26	19.99
26	1.06	0.54	1.86	10.61	0.75	1.46	8.78	20.33	9.68	20.33
27	0.28	0.48	0.50	2.76	0.18	0.38	4.42	5.62	3.94	5.62
28	1.03	0.53	1.88	10.64	0.73	1.46	8.82	20.58	9.69	20.58
29	1.18	0.89	2.82	10.11	0.56	1.50	7.15	15.14	7.42	15.14
30	1.50	0.79	2.60	12.67	0.93	1.81	8.85	20.20	9.74	20.20
31	1.08	0.55	2.72	11.26	0.78	1.62	8.17	21.37	8.80	21.37
32	1.25	0.56	3.26	12.95	0.92	1.88	8.62	24.38	9.37	24.37
33	1.02	0.53	1.86	10.57	0.73	1.45	8.81	20.48	9.67	20.48
34	0.92	0.55	1.42	8.70	0.60	1.19	8.04	16.56	8.76	16.55
35	2.02	0.68	2.96	14.14	1.02	2.06	8.96	24.30	10.49	24.30
36	1.86	0.62	2.76	15.42	1.08	2.16	10.15	27.69	11.86	27.68
37	1.82	0.60	2.82	16.03	1.14	2.23	10.52	29.15	12.25	29.15
38	2.32	0.73	3.18	14.16	1.06	2.14	8.54	23.42	10.13	23.42
39	1.75	0.60	2.76	15.44	1.08	2.15	10.28	28.16	11.91	28.15
40	1.05	0.47	3.13	13.34	1.74	1.97	9.23	27.44	9.94	27.44
41	1.73	0.60	2.78	15.58	1.04	2.15	10.38	28.48	11.99	28.48

Cuadro 21. Continuación

No.	Ca	Ca_{aj}	Mg	Na	K	CE ($dS\ m^{-1}$)	RAS	$CROSS_{opt}$	RAS	$CROSS_{opt}$
							Usando Ca		Usando Ca_{aj}	
42	1.10	0.53	2.82	13.09	0.69	1.81	9.35	25.31	10.11	25.31
43	1.08	0.53	1.98	11.32	0.78	1.55	9.15	21.99	10.11	21.99
44	0.72	0.52	2.04	8.16	0.62	1.18	6.95	16.02	7.22	16.02
45	0.84	0.51	1.55	8.92	0.62	1.22	8.16	17.63	8.79	17.63
46	1.72	0.59	2.84	16.35	1.15	2.26	10.83	30.04	12.48	30.04
47	0.62	0.50	1.72	6.72	0.52	0.98	6.21	13.50	6.39	13.50
48	1.65	0.58	2.73	15.92	1.12	2.19	10.76	29.47	12.37	29.47
49	1.38	0.60	2.20	12.63	0.90	1.75	9.44	23.12	10.68	23.12
50	0.68	0.52	1.89	7.42	0.57	1.08	6.55	14.51	6.76	14.51
51	1.32	0.56	2.20	12.88	0.90	1.77	9.71	24.24	10.96	24.24
52	1.40	0.59	2.16	12.46	0.88	1.73	9.34	22.99	10.63	22.98
53	1.42	0.59	2.12	12.49	0.89	1.73	9.39	23.00	10.73	23.00
54	1.20	0.55	2.13	12.54	0.88	1.73	9.72	23.82	10.83	23.82
55	1.22	0.56	2.16	12.68	0.86	1.73	9.75	24.03	10.88	24.03
56	1.19	0.54	2.19	12.66	0.88	1.73	9.74	24.36	10.84	24.36
57	0.70	0.82	1.60	6.22	0.49	0.92	5.80	9.70	5.65	9.70
58	1.18	0.55	2.14	12.55	0.88	1.73	9.74	23.97	10.83	23.97
59	0.82	0.84	1.80	7.09	0.56	1.05	6.19	10.97	6.18	10.97
60	1.22	0.55	2.20	12.73	0.87	1.74	9.73	24.22	10.85	24.22
61	1.12	0.54	2.80	11.57	0.84	1.67	8.26	22.28	8.96	22.28
62	1.18	0.54	2.14	12.82	0.88	1.74	9.95	24.69	11.08	24.69
63	1.86	0.61	2.90	16.66	1.17	2.31	10.80	30.19	12.58	30.18
64	1.72	0.57	3.04	18.13	1.26	2.47	11.75	33.78	13.49	33.78
65	1.40	0.59	2.22	12.40	0.90	1.73	9.22	22.86	10.47	22.86
66	1.08	0.86	2.64	1.08	0.19	0.51	0.79	1.65	0.82	1.65
67	1.10	0.55	2.90	11.61	0.82	1.68	8.21	22.10	8.84	22.10
68	1.05	0.54	3.25	11.56	0.86	1.71	7.88	22.23	8.40	22.23
69	1.20	0.88	2.88	1.20	0.20	0.56	0.84	1.81	0.88	1.81
70	0.84	0.53	1.54	8.93	0.62	1.22	8.19	17.37	8.78	17.37
71	0.98	0.50	3.16	10.67	0.84	1.60	7.42	21.30	7.89	21.30
72	1.50	0.43	0.78	0.63	0.12	0.31	0.59	1.36	0.81	1.36
73	1.74	0.46	0.90	0.74	0.14	0.36	0.64	1.55	0.90	1.55
74	2.96	1.50	1.54	1.24	0.23	0.61	0.83	1.43	1.01	1.43
75	0.91	0.50	2.94	9.94	0.78	1.49	7.16	19.94	7.58	19.94

Cuadro 21. Continuación

No.	Ca	Ca_{aj}	Mg	Na	K	CE (dS m^{-1})	RAS	$CROSS_{opt}$	RAS	$CROSS_{opt}$
							Usando Ca		Usando Ca_{aj}	
76	1.42	0.98	2.72	1.13	0.21	0.56	0.79	1.62	0.83	1.62
77	0.88	0.48	2.88	9.86	0.76	1.47	7.19	20.03	7.60	20.02
78	0.86	0.48	2.87	9.69	0.76	1.45	7.10	19.66	7.48	19.66
79	0.75	0.85	1.82	0.72	0.13	0.35	0.64	1.10	0.62	1.10
80	2.35	1.53	1.14	0.94	0.17	0.47	0.71	1.08	0.81	1.08
81	0.79	0.50	2.24	8.45	0.65	1.24	6.87	16.82	7.21	16.82
82	0.72	0.51	1.98	7.90	0.55	1.14	6.80	15.62	7.08	15.62
83	0.74	0.92	1.47	0.60	0.12	0.30	0.57	0.89	0.55	0.89
84	1.60	0.43	0.83	0.67	0.13	0.33	0.61	1.44	0.84	1.44

Cuadro 22. Obtención de la CROSS optimizada para las muestras obtenidas del alto y bajo Pánuco, en el verano de 2019.

No.	Ca	Ca_{aj}	Mg	Na	K	CE (dS m^{-1})	RAS	$CROSS_{opt}$	RAS	$CROSS_{opt}$
							Usando Ca		Usando Ca_{aj}	
	. . . . . $mmol_c\ L^{-1}$							. . . . . $mmol_c\ L^{-1}$		
1	1.10	0.98	1.55	2.44	0.44	0.57	2.12	3.30	2.17	3.49
2	2.10	0.87	3.60	9.32	0.84	1.62	5.52	9.10	6.23	14.12
3	2.55	0.94	3.05	11.29	0.85	1.81	6.75	10.00	8.00	16.48
4	1.55	0.87	1.85	6.12	0.65	1.05	4.69	6.96	5.25	9.28
5	1.75	0.74	2.45	10.34	0.82	1.57	7.14	11.06	8.19	17.02
6	2.05	0.84	2.70	10.29	0.66	1.62	6.68	10.17	7.73	15.86
7	1.90	0.81	2.60	10.06	0.78	1.58	6.71	10.33	7.71	15.83
8	1.20	0.61	1.80	9.18	0.79	1.31	7.50	11.86	8.36	16.63
9	2.30	0.60	3.85	25.79	1.28	3.43	14.71	24.05	17.28	46.82
10	1.36	0.66	3.19	9.76	0.70	1.55	6.47	11.83	7.03	16.94
11	2.15	0.82	3.50	11.71	0.97	1.89	6.97	11.30	7.97	18.32
12	2.30	0.79	3.60	13.07	0.79	2.02	7.61	12.19	8.82	20.73
13	2.15	0.77	3.85	12.90	0.80	2.01	7.45	12.44	8.49	20.75
14	2.10	0.75	3.70	12.55	0.71	1.95	7.37	12.25	8.42	20.51
15	1.12	0.65	2.58	7.93	0.58	1.25	5.83	10.60	6.24	13.93
16	1.23	0.65	2.84	8.89	0.78	1.41	6.23	11.34	6.73	15.59
17	1.04	0.67	1.94	7.56	0.59	1.14	6.19	10.49	6.61	13.04
18	1.06	0.64	1.91	8.07	0.67	1.20	6.62	11.09	7.15	14.30

Cuadro 22. Continuación

No.	Ca	Ca_{aj}	Mg	Na	K	CE (dS m^{-1})	RAS	$CROSS_{opt}$	RAS	$CROSS_{opt}$
							Usando Ca		Usando Ca_{aj}	
	. . . . . mmol$_c$ L^{-1}							. . . . . mmol$_c$ L^{-1}		
19	1.08	0.65	2.39	7.19	0.61	1.16	5.46	9.79	5.83	12.58
20	1.24	0.67	2.84	8.71	0.63	1.37	6.10	11.06	6.58	15.07
21	1.06	0.66	2.48	7.47	0.66	1.20	5.61	10.26	5.97	13.03
22	1.68	0.82	2.64	8.62	0.75	1.40	5.87	9.41	6.56	13.49
23	1.02	0.66	2.45	7.29	0.61	1.17	5.53	10.21	5.85	12.72
24	1.63	0.95	2.95	6.27	0.55	1.17	4.14	6.95	4.49	9.10
25	0.35	0.45	1.85	2.72	0.51	0.56	2.59	6.50	2.54	5.74
26	1.15	0.64	2.69	8.32	0.62	1.31	6.00	10.97	6.44	14.66
27	1.70	0.92	2.86	6.83	0.64	1.23	4.52	7.41	4.97	10.09
28	1.76	0.93	3.17	6.65	0.64	1.25	4.24	7.09	4.64	9.74
29	1.24	0.67	2.80	8.61	0.64	1.36	6.06	10.93	6.54	14.86
30	1.91	0.70	4.50	14.16	0.73	2.20	7.91	14.48	8.78	23.92
31	4.15	0.97	6.50	16.02	1.30	2.89	6.94	11.12	8.29	22.96
32	1.02	0.62	2.36	8.03	0.46	1.14	6.18	11.24	6.58	14.43
33	1.52	0.72	2.66	8.82	0.73	1.40	6.10	10.12	6.78	14.68
34	1.83	0.74	3.22	10.83	0.62	1.70	6.82	11.32	7.70	17.78
35	1.48	0.74	2.66	8.80	0.59	1.40	6.12	10.23	6.75	14.45
36	1.24	0.74	1.94	6.95	0.63	1.10	5.51	8.83	6.00	11.42
37	1.80	0.91	3.10	6.80	0.62	1.26	4.34	7.17	4.80	10.09
38	1.23	0.65	2.96	9.11	0.70	1.42	6.29	11.62	6.78	15.98
39	0.67	1.02	0.95	1.24	0.27	0.32	1.38	2.15	1.25	1.74
40	1.18	0.64	2.12	9.07	0.66	1.33	7.06	11.81	7.72	16.00
41	1.49	0.77	2.34	8.36	0.65	1.31	6.04	9.69	6.71	13.49
42	1.57	0.69	3.70	11.63	0.66	1.80	7.16	13.12	7.85	19.72
43	1.02	0.68	2.40	7.28	0.65	1.16	5.57	10.19	5.87	12.48
44	1.73	0.83	2.65	8.62	0.76	1.41	5.82	9.27	6.53	13.35
45	1.52	0.81	3.02	6.54	0.58	1.19	4.34	7.50	4.73	10.30
46	0.58	1.02	0.80	1.02	0.25	0.27	1.23	1.90	1.07	1.43
47	1.34	0.73	2.33	7.49	0.67	1.22	5.53	9.15	6.06	12.43
48	1.76	0.78	3.15	10.63	0.61	1.65	6.78	11.33	7.58	16.95
49	1.08	0.62	2.87	7.50	0.55	1.23	5.34	10.20	5.68	13.45
50	2.44	0.82	4.29	14.50	0.82	2.28	7.90	13.13	9.07	22.62
51	1.64	0.68	3.84	11.66	0.83	1.86	7.04	12.87	7.76	19.96

Cuadro 22. Continuación

No.	Ca	Ca_{aj}	Mg	Na	K	CE (dS m^{-1})	RAS	$CROSS_{opt}$	RAS	$CROSS_{opt}$
							Usando Ca		Usando Ca_{aj}	
52	1.29	0.68	3.03	9.31	0.71	1.48	6.33	11.59	6.83	15.91
53	1.65	0.91	2.97	6.25	0.56	1.17	4.11	6.88	4.49	9.27
54	1.62	1.03	2.51	4.18	0.50	0.90	2.91	4.65	3.14	5.84
55	2.20	1.13	3.39	5.74	0.64	1.22	3.43	5.48	3.82	7.65
56	3.12	0.97	5.60	11.87	1.08	2.22	5.68	9.51	6.55	17.02
57	3.21	1.05	4.53	10.08	1.02	1.95	5.12	7.96	6.03	13.90
58	2.88	0.95	4.68	11.41	0.74	2.02	5.87	9.51	6.80	16.51
59	3.15	0.98	5.62	12.24	0.82	2.23	5.85	9.75	6.74	17.46
60	1.65	0.74	3.88	11.89	0.76	1.88	7.15	13.09	7.82	19.54
61	1.82	0.77	2.98	9.87	0.73	1.58	6.37	10.35	7.21	15.87
62	2.77	1.02	4.98	10.57	0.83	1.96	5.37	8.98	6.10	14.77
63	1.49	0.90	2.68	5.61	0.52	1.05	3.89	6.50	4.19	8.34
64	1.74	0.92	3.12	6.39	0.59	1.22	4.10	6.85	4.49	9.39
65	3.32	0.97	5.96	12.72	1.13	2.37	5.91	9.88	6.83	18.21
66	3.47	1.06	4.90	11.48	0.73	2.12	5.61	8.72	6.65	15.73
67	1.83	1.04	2.82	4.87	0.47	1.02	3.19	5.09	3.51	6.77
68	2.90	1.15	4.48	7.86	0.76	1.62	4.09	6.53	4.68	10.35
69	2.69	1.09	4.19	6.97	0.75	1.49	3.76	6.01	4.29	9.44
70	2.35	1.01	4.23	8.90	0.75	1.68	4.91	8.21	5.50	12.49
71	2.46	1.02	3.46	7.99	0.68	1.51	4.64	7.21	5.34	11.20
72	3.57	1.05	5.05	12.05	0.75	2.19	5.80	9.02	6.90	16.64
73	2.78	1.03	3.93	8.99	0.82	1.69	4.91	7.63	5.71	12.51
74	2.53	1.01	4.54	7.99	0.82	1.62	4.25	7.11	4.80	11.22
75	1.72	0.99	2.44	5.45	0.58	1.04	3.78	5.88	4.16	7.76
76	2.98	1.11	4.62	7.70	0.78	1.66	3.95	6.31	4.55	10.34
77	2.99	1.10	4.61	7.74	0.80	1.67	3.97	6.33	4.58	10.45
78	3.24	0.99	5.79	12.49	0.90	2.29	5.88	9.81	6.79	17.75
79	1.07	1.08	1.48	1.88	0.46	0.50	1.66	2.58	1.66	2.57
80	2.73	1.02	3.85	8.81	0.76	1.65	4.86	7.54	5.64	12.30
81	1.10	1.07	1.52	1.93	0.48	0.51	1.69	2.61	1.69	2.64
82	2.52	0.96	4.41	9.35	0.84	1.75	5.02	8.33	5.70	13.47
83	2.41	1.01	3.92	9.21	0.88	1.68	5.18	8.39	5.86	12.93
84	2.36	0.94	3.84	9.06	0.86	1.65	5.15	8.34	5.86	13.22
85	2.54	1.03	3.58	7.98	0.71	1.53	4.56	7.08	5.26	11.11

Cuadro 22. Continuación

No.	Ca	Ca_{aj}	Mg	Na	K	CE (dS m^{-1})	RAS	$CROSS_{opt}$	RAS	$CROSS_{opt}$
							Usando Ca		Usando Ca_{aj}	
86	2.48	1.02	3.50	8.10	0.69	1.51	4.68	7.28	5.39	11.36
87	2.48	1.00	3.49	8.27	0.69	1.53	4.79	7.43	5.52	11.67
88	0.66	1.02	0.94	1.23	0.27	0.32	1.38	2.15	1.24	1.73
89	1.03	0.98	1.46	2.32	0.41	0.53	2.08	3.24	2.10	3.33
90	2.18	1.01	3.08	6.96	0.61	1.32	4.29	6.67	4.87	9.79
91	0.62	1.02	0.88	1.18	0.20	0.29	1.36	2.12	1.21	1.66
92	0.48	1.02	0.68	0.90	0.16	0.28	1.18	1.84	0.98	1.27
93	1.98	0.99	2.80	6.47	0.58	1.21	4.19	6.51	4.70	9.18
94	2.55	0.97	3.62	6.97	1.02	1.45	3.97	6.18	4.60	10.01
95	2.30	1.12	3.28	4.94	0.30	1.11	2.96	4.61	3.33	6.59
96	1.96	1.00	2.77	6.27	0.58	1.20	4.08	6.34	4.56	8.85
97	0.47	1.00	0.67	0.91	0.14	0.22	1.21	1.88	1.00	1.29
98	1.70	0.99	2.40	5.39	0.48	1.03	3.76	5.85	4.14	7.66

Al comparar con las tres formulaciones de RAS, con el $CROSS_{opt}$ se obtienen valores más altos incluso que la RAS obtenida con la ecuación ajustada por Bower. Esto se debe a que la presencia de concentraciones elevadas de NaCl y $NaHCO_3$ llevan a la precipitación del calcio, y al reducirse su disponibilidad, se eleva la proporción del sodio, que provoca una mayor dispersión del suelo.

Tomando en cuenta la propuesta de Oster *et al*. (2016), de sustituir la CROSS por la RAS en los criterios de calidad del agua de riego, se realizó la clasificación del riesgo de disminución de la capacidad de infiltración, pero utilizando los valores obtenidos de la $CROSS_{opt}$ en lugar de la RAS.

En el muestreo de primavera de 2018, el 68% de las aguas muestreadas tienen riesgo de reducción severa de la tasa de infiltración, el 32% presenta riesgo de reducción ligera a moderada y ninguna muestra clasifica como “sin reducción” en la tasa de infiltración (Figura 45). Estos resultados obtenidos con la CROSS difieren mucho de los obtenidos con las tres formulaciones de la RAS, donde en ningún caso hubo muestras que resultaran con reducción severa de la tasa de infiltración.

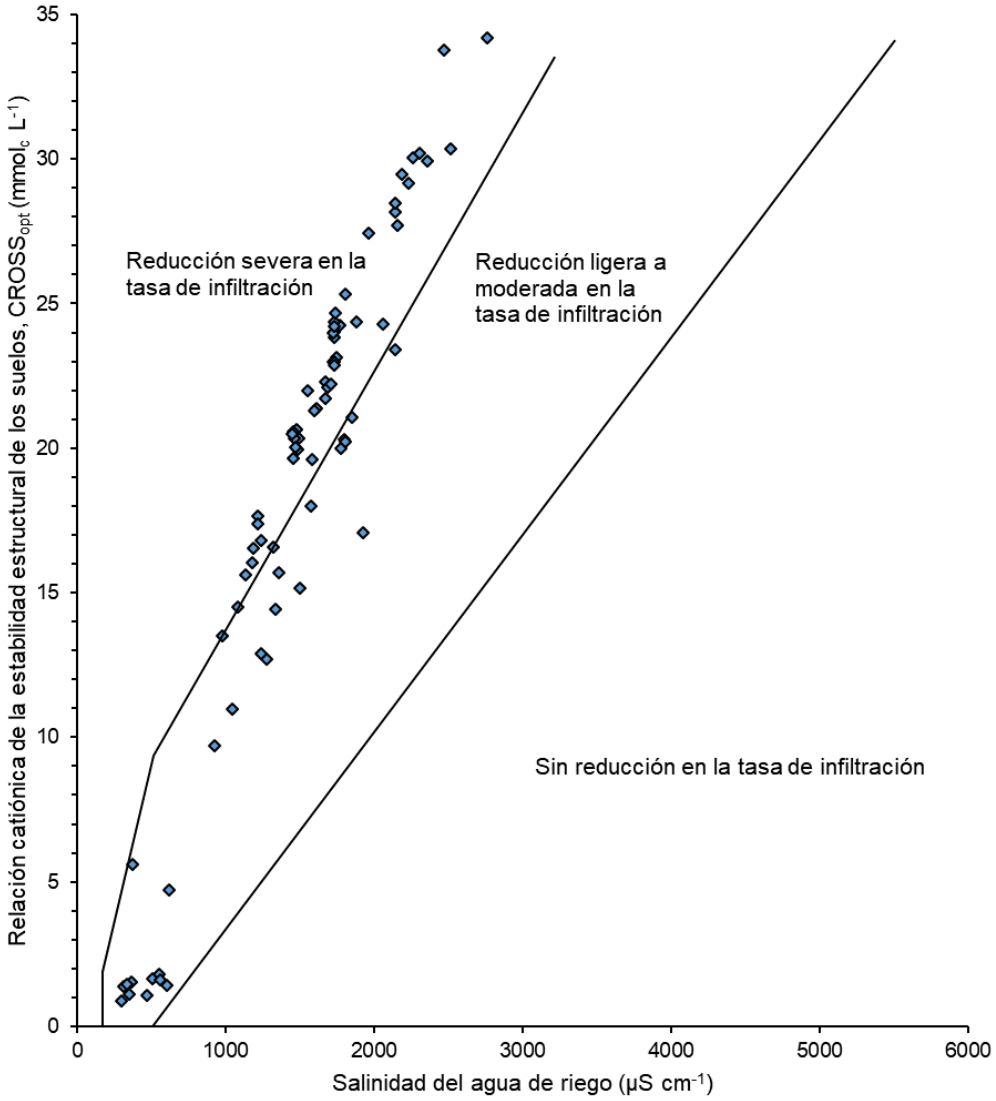


Figura 45. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación catiónica de la estabilidad estructural (CROSS$_{opt}$) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en la primavera de 2018.

En el segundo muestreo realizado en el periodo de lluvias, el 80% de las muestras presentan reducción ligera a moderada de la tasa de infiltración, y solamente el 20% no presenta ningún riesgo (Figura 46).

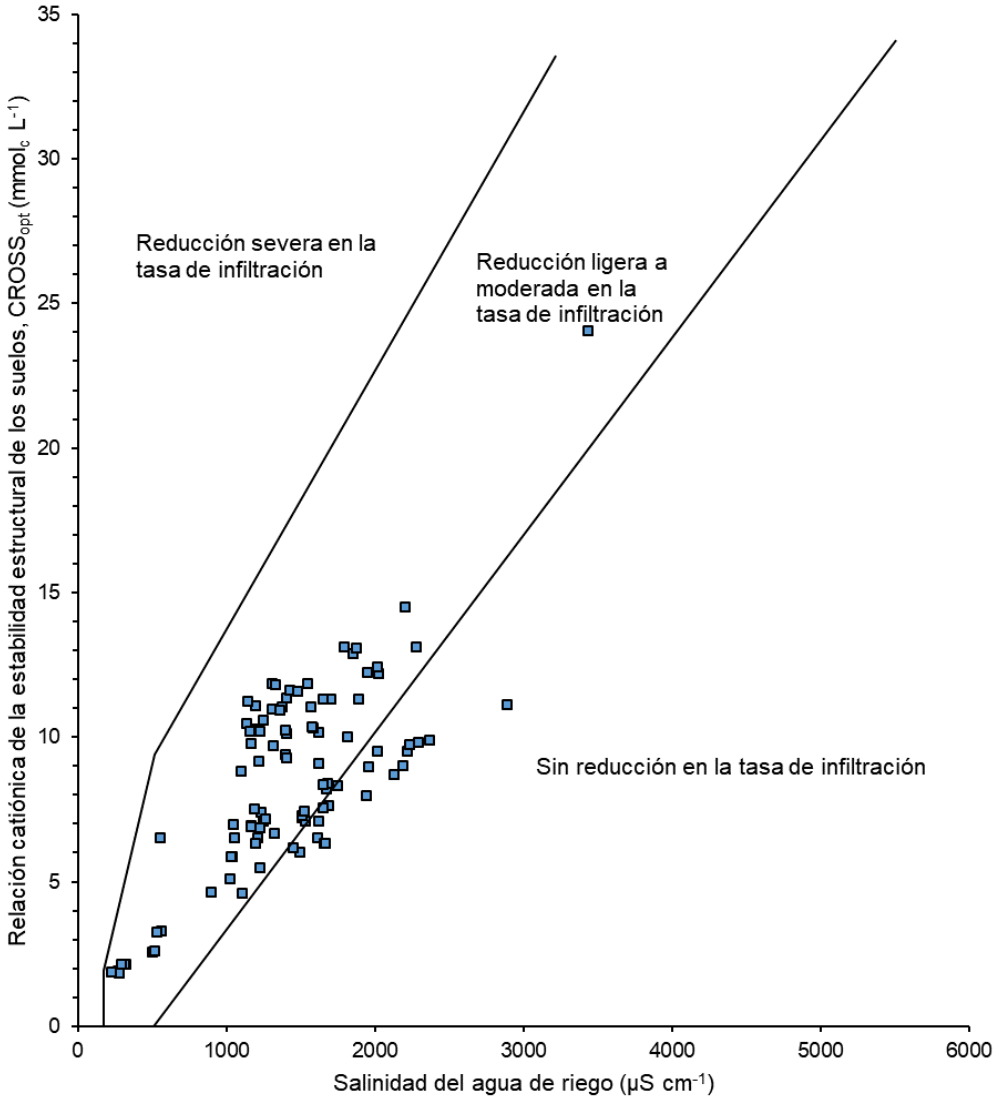


Figura 46. Tasa relativa de infiltración del agua afectada por la salinidad y la relación catiónica de la estabilidad estructural (CROSS$_{opt}$) en las aguas muestreadas del alto y bajo Pánuco, en el verano de 2019.

También se realizó la clasificación de Richards *et al*. (1974) utilizando los datos de CROSS$_{opt}$ en lugar de la RAS para comparar los resultados. Los resultados muestran variaciones en la clasificación. Debido a que se incrementa el valor cuando se toma en cuenta el K y el Mg, la mayor cantidad de muestras caen en la clasificación C3-S4 en el primer muestreo. En el muestreo 2, la clasificación utilizando CROSS$_{opt}$ es muy parecida a los resultados que se obtienen cuando se utiliza RAS ajustado por Bower *et al*. (1968) (Figura 47 y Figura 48).

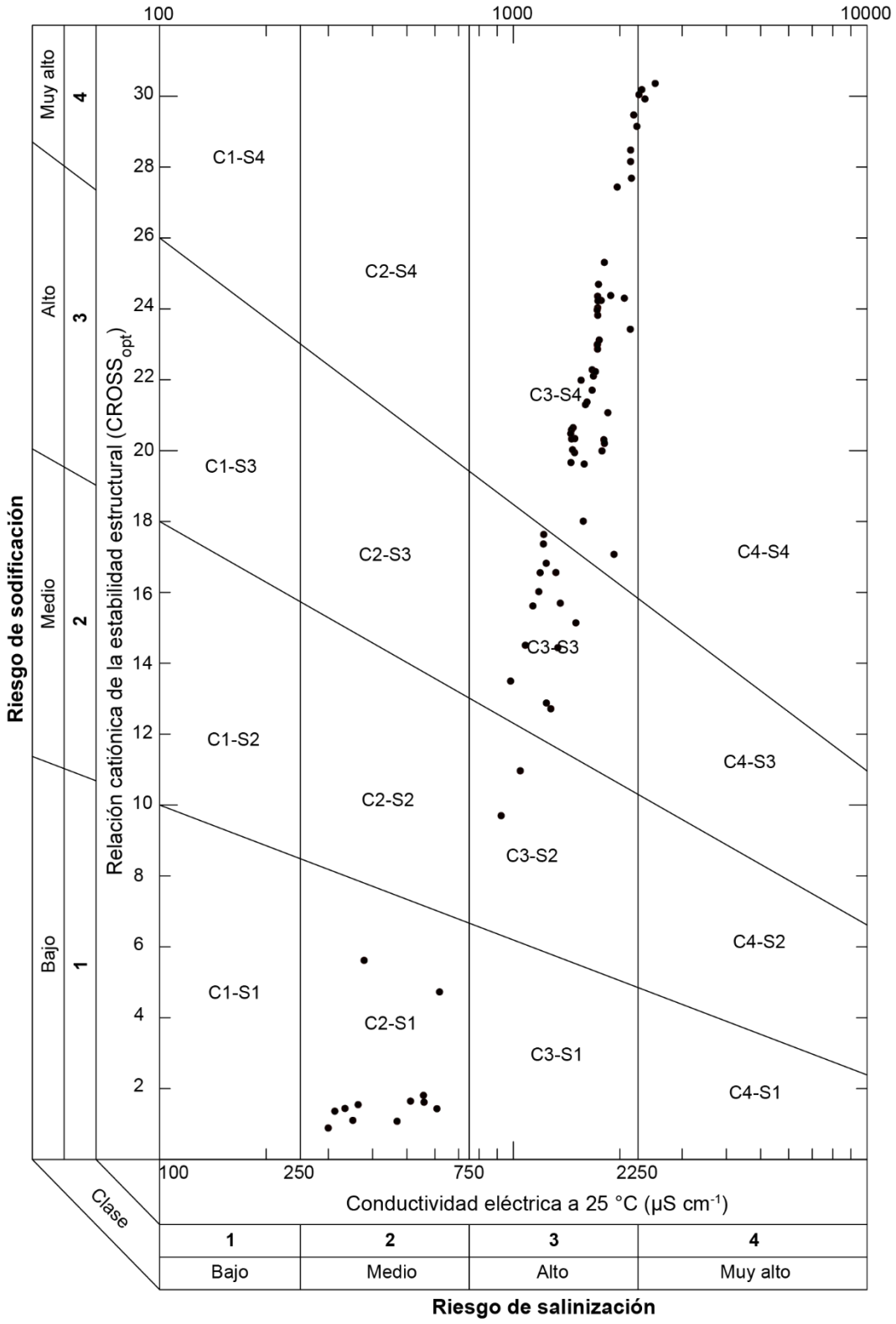


Figura 47. Clasificación de las aguas muestreadas en la primavera de 2018 con base en la conductividad eléctrica y la relación catiónica de la estabilidad estructural (CROSS$_{opt}$).

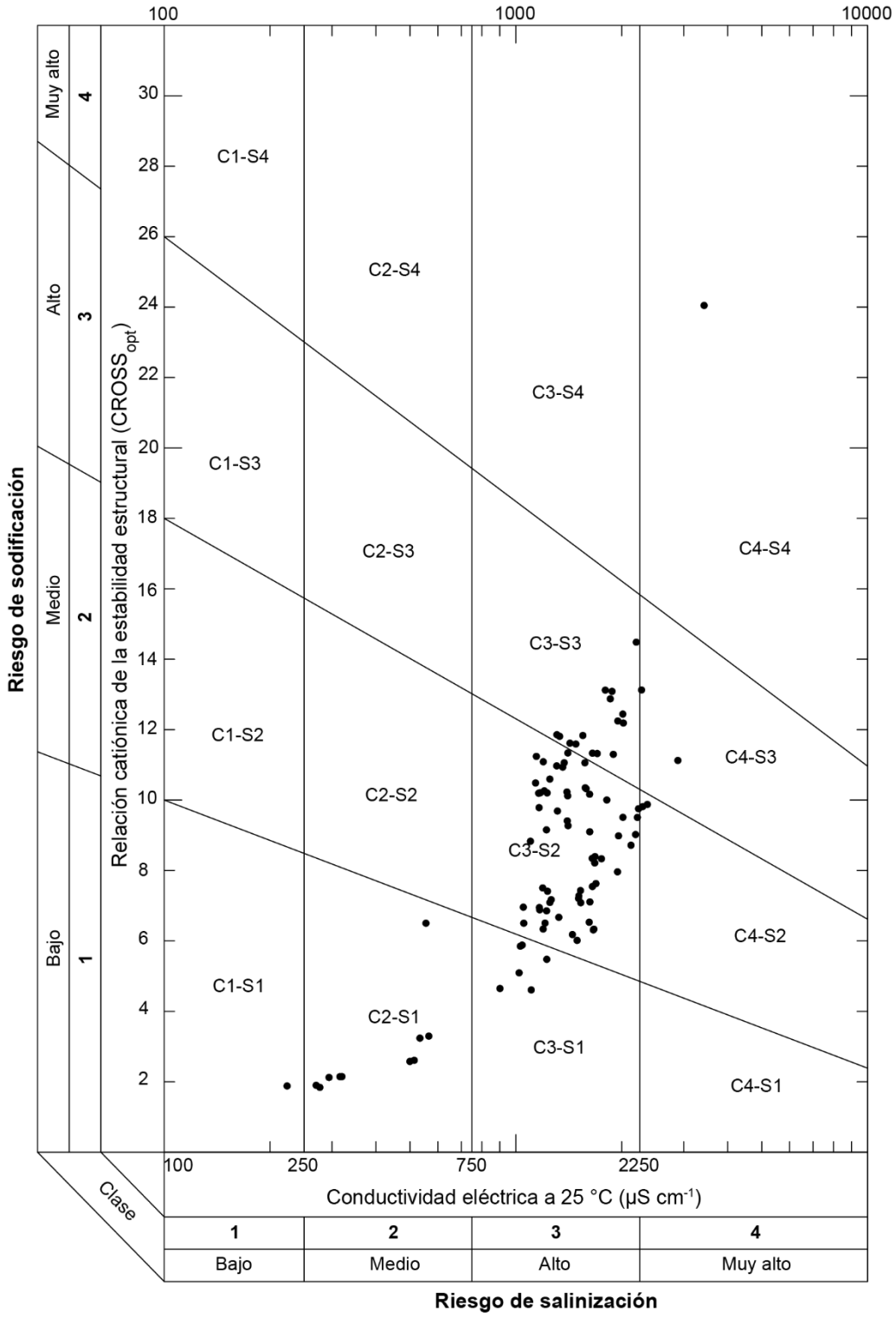


Figura 48. Clasificación de las aguas muestreadas en el verano de 2019 con base en la conductividad eléctrica y la relación catiónica de la estabilidad estructural (CROSS$_{opt}$).

4.5.4 Carbonato de sodio residual (CSR)

El índice carbonato de sodio residual se utiliza como indicador del peligro de sodificación, después que han precipitado los carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. El peligro de sodificación entendido como la concentración de Na suficiente para desplazar al Ca y al Mg del complejo de intercambio. También se define como la capacidad del agua para alcalinizar el medio que riega. Cuando hay alta concentración de carbonatos y bicarbonatos, el calcio y el magnesio precipitan en forma de carbonatos de calcio y magnesio. Para mejorar los suelos que tienen problemas por índice alto de CSR, se pueden utilizar ácidos como el H_2SO_4 para reducir los carbonatos y bicarbonatos. La aplicación de ácidos provoca que se separen los iones bicarbonato y se libere CO_2. También se puede aplicar yeso y enmiendas con sulfato de calcio (Choudhary *et al*., 2011).

Las aguas de riego con un índice de CSR menor a 1.25 se consideran buenas o recomendables, entre 1.25 y 2.5 se consideran condicionadas para el riego y con valores mayores a 2.5 se consideran no recomendables.

De acuerdo con el índice de CSR, en el primer muestreo realizado en el alto y bajo Pánuco, el 19% de las aguas son buenas para el riego, el 6% son condicionadas y el 75% no son recomendables (Figura 49). Las muestras con los valores más altos, superiores a 10.0 $mmol_c\ L^{-1}$, se tomaron en los siguientes sitios: 11 (túnel en Gran Canal, Tequisquiac), 12 (canal revestido Texas en Atotonilco, Hgo.), 13 (río Tula en Atotonilco), 4 (Gran Canal Oriente en Tecámac), 6 (canal revestido en Santa María Tonanitla), 7 (canal revestido en Chiconautla) y 8 (lumbrera 2 en Gran Canal Oriente). Estas muestras tienen una alta carga de aguas residuales provenientes de la zona metropolitana del Valle de México. Sin embargo, a pesar de los valores altos de CSR, las aguas se utilizan para riego en esta zona del Distrito de Riego 088 Chiconautla.

De las aguas clasificadas como “buenas” se pueden destacar dos, por su ubicación dentro del Valle del Mezquital: 16 (canal revestido en la colonia Morelos de Mixquiahuala, Hgo.) y 29 (canal revestido en Progreso de Obregón, Hgo.). Su bajo nivel de CSR, se debe al aporte del agua de lluvia a estos canales.

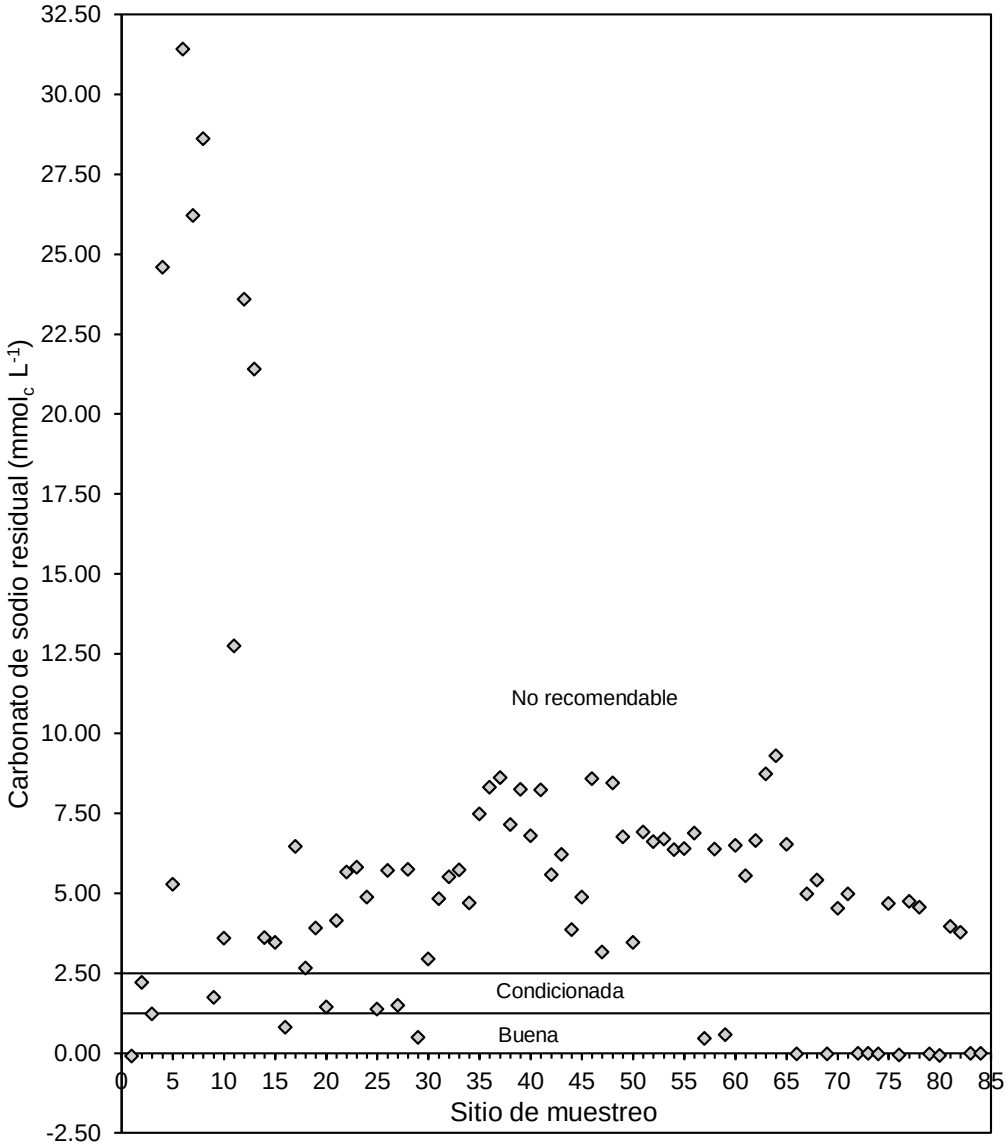


Figura 49. Clasificación de las aguas muestreadas de acuerdo con el índice de carbonato de sodio residual, muestreo en la primavera de 2018.

En el periodo de verano de 2019, el 30% de las muestras resultaron buenas para el riego, el 23% están condicionadas, y el 47% no son recomendables para el riego. En la Figura 50 se observa la tendencia de valores más altos en la zona del Valle del Mezquital y valores más bajos en la región del bajo Pánuco.

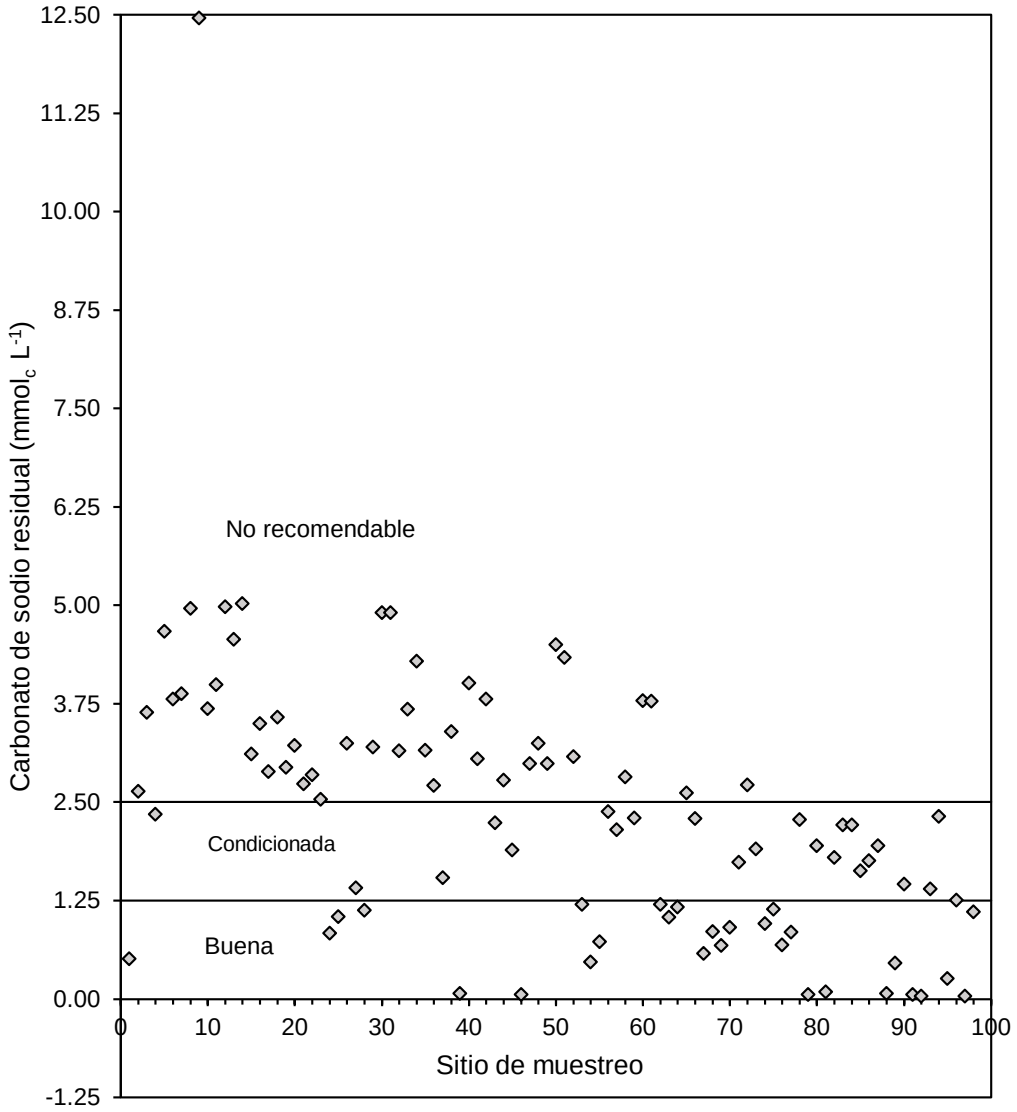


Figura 50. Clasificación de las aguas muestreadas de acuerdo con el índice de carbonato de sodio residual, muestreo en el verano de 2019.

4.6 Formación hipotética de sales

Las sales minerales solubles en agua o sales disueltas se encuentran disociadas en sus aniones CO_3^{2-}, HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-, PO_4^{3-}, entre otros, y cationes Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cu^+, Zn^+, Mn^{2+}, entre otros. La precipitación de una sal se produce cuando la concentración de los iones en solución que constituyen la sal es tal que el producto de solubilidad es igual o superior a la constante de equilibrio. Cuando ambas funciones son

iguales, la condición es de equilibrio y la solución se denomina saturada, mientras que cuando el producto de solubilidad es mayor que la constante de equilibrio, la condición es de desequilibrio y la solución se denomina sobresaturada.

El grado de sobresaturación a partir del que precipitan las sales depende del tipo de sal y de las condiciones ambientales, aunque suele ser relativamente pequeño de forma que el producto de solubilidad y la constante de equilibrio sean muy similares. Obviamente, cuanto mayor sea la sobresaturación, mayor será la cantidad de sal precipitada.

Si se conoce el tipo y concentración de iones presentes en una solución, se puede calcular la cantidad de sales que pueden formarse de acuerdo con su solubilidad. A estas sales que se pueden formar se le llama “sales hipotéticas”. Es importante conocer la cantidad y tipo de sales hipotéticas en el agua de riego porque tienen efectos distintos en las propiedades del suelo.

De acuerdo con la Figura 51 y la Figura 52, el orden de concentración de las sales está determinado por el área entre líneas. Cada sitio de muestreo tiene un orden similar de predominancia, pero en diferente concentración.

El NaCl se encuentra en mayor cantidad, seguido del $NaHCO_3$ y el $Ca(HCO_3)_2$. Esta tendencia es la misma en ambos muestreos. La alta concentración de estas sales dominantes demuestra que las sales bicarbonatadas y sódicas representan alto riesgo de salinización y sodificación en esta red hidrográfica, por la presencia elevada de aguas residuales de origen industrial y urbano.

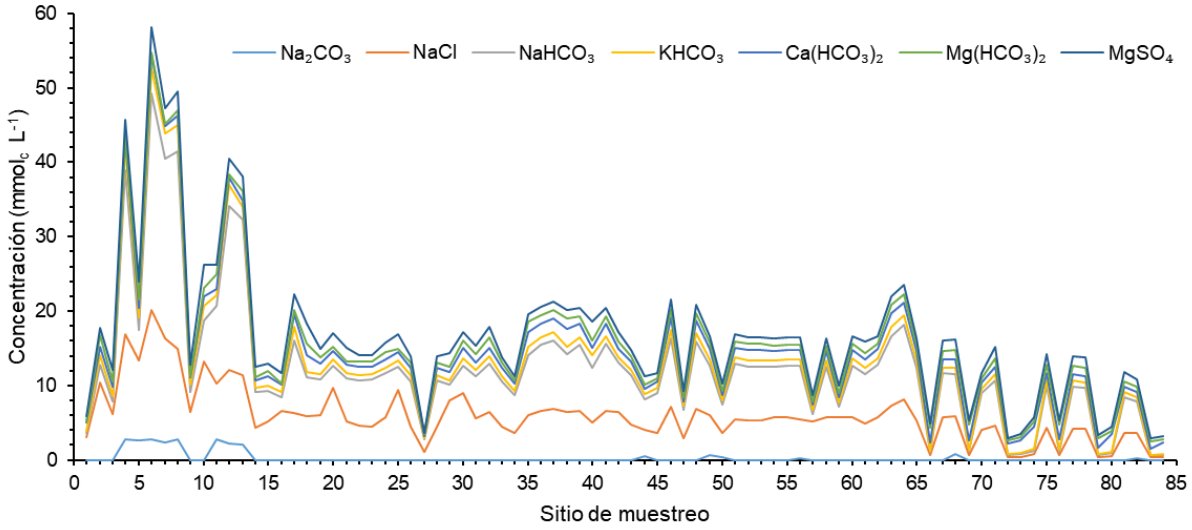


Figura 51. Concentración de las sales hipotéticas de las aguas muestreadas en la primavera de 2018.

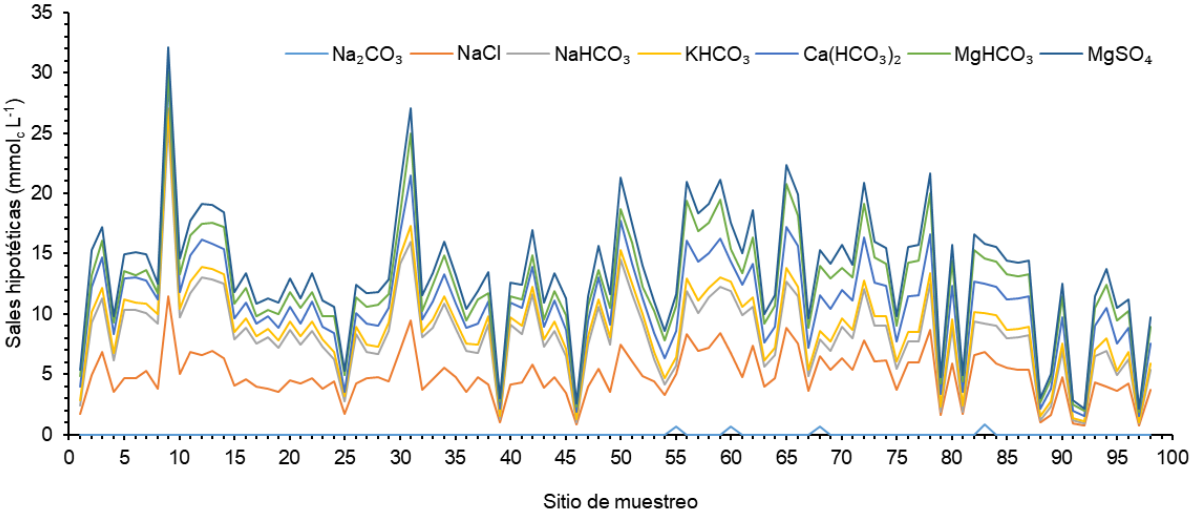


Figura 52. Concentración de las sales hipotéticas de las aguas muestreadas en el verano de 2019.

4.7 Clasificación hidrogeoquímica de las aguas del alto y bajo Pánuco

Para el estudio y la interpretación de los datos derivados de los análisis fisicoquímicos del agua, se utilizan una serie de diagramas como el de Piper y Durov.

El diagrama de Piper permite conocer la predominancia de aniones y cationes en la composición del agua, así como las variaciones provocadas por la presencia de mezclas, precipitaciones, disoluciones, procesos de intercambio iónico, que permiten visualizar la evolución hidrogeoquímica del agua.

En el muestreo de la primavera de 2018, los triángulos de aniones y cationes indican la predominancia de aguas sódicas, bicarbonatadas y cloruradas (Figura 53). El rombo central muestra dos grupos de aguas, las bicarbonatadas sódicas y cloruradas sódicas.

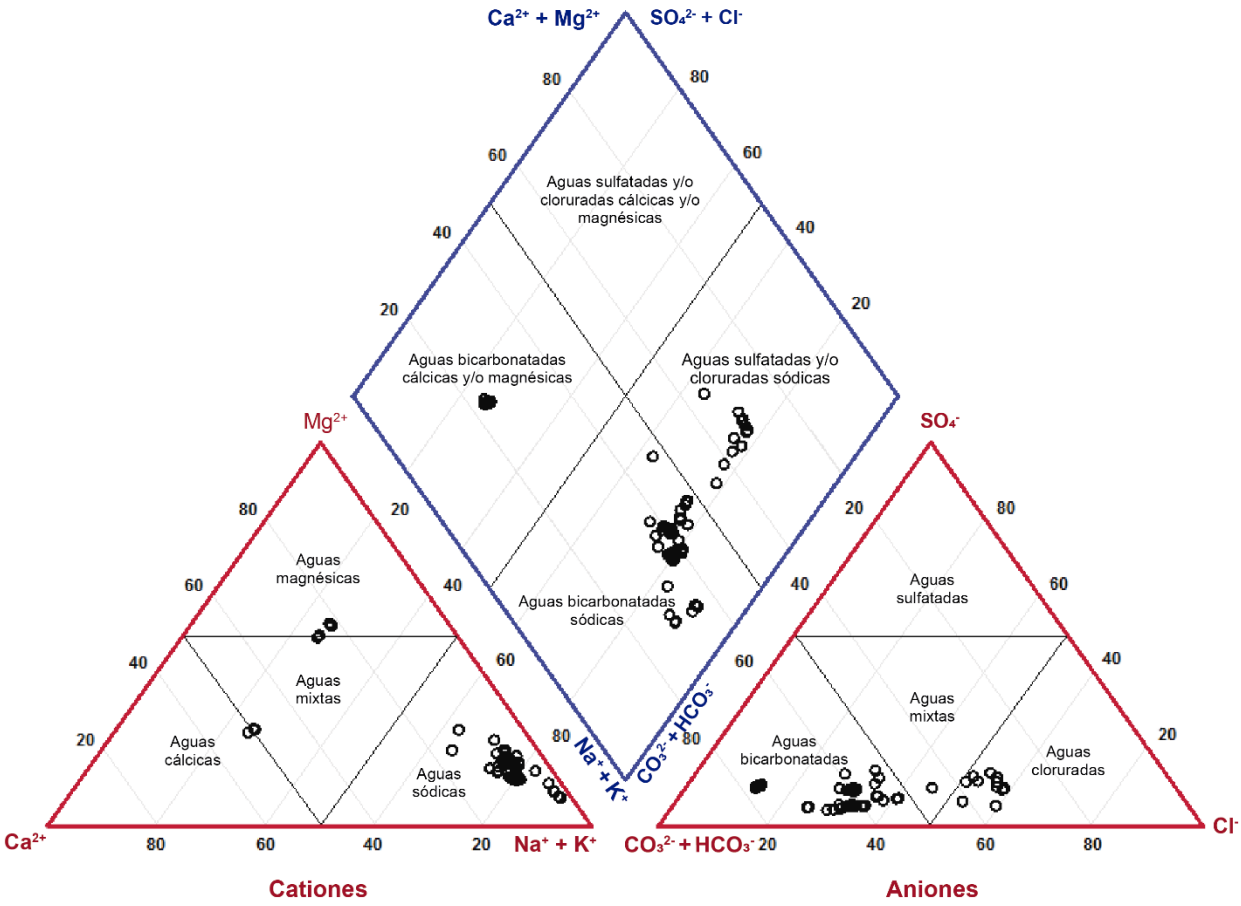


Figura 53. Diagrama hidroquímico de Piper de las aguas muestreadas en la primavera de 2018.

En la Figura 54 se muestra el diagrama hidroquímico de Piper de las muestras tomadas en el verano de 2019.

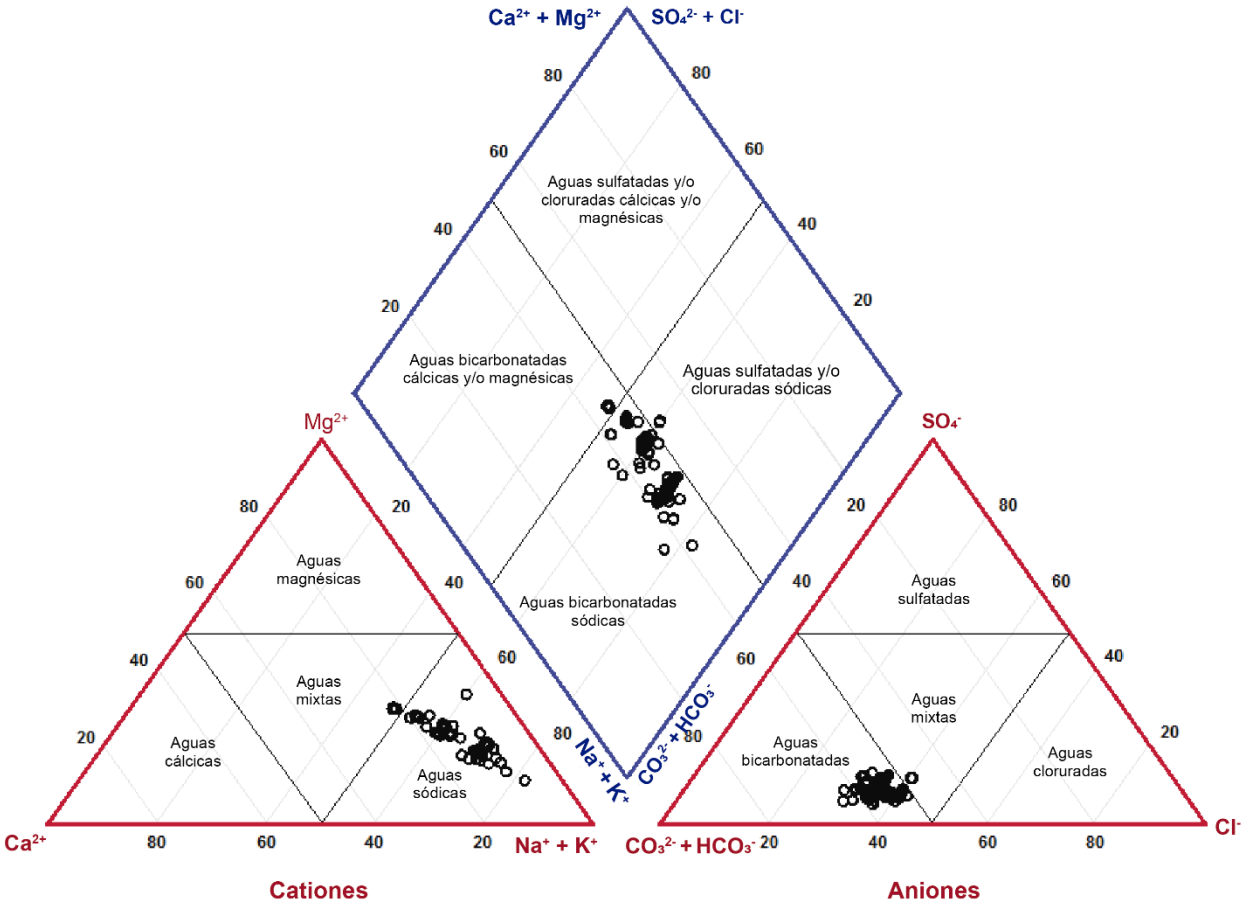


Figura 54. Diagrama hidroquímico de Piper de las aguas muestreadas en el verano de 2019.

En el primer muestreo se obtuvieron 12 muestras (14% del total) sódico cloruradas, 61 muestras sódicas bicarbonatadas (73% del total), 1 muestra sódica mixta, 1 muestra cálcica bicarbonatada, 4 muestras magnésicas bicarbonatadas y 5 muestras bicarbonatadas mixtas (Cuadro 23). La muestra cálcica bicarbonatada fue tomada en el río Amajac, en Tamazunchale, S.L.P. Esto es congruente con la geología de la zona, ya que el río Amajac proviene de rocas calizas y es un afluente del río Moctezuma. Dos de las muestras magnésicas bicarbonatadas fueron tomadas en Maconi, Cadereyta, Qro, y las otras dos en el río Claro, Tamazunchale, y en el río Tempoal, El Higo, Ver. La mayor parte de las muestras que son sódicas bicarbonatadas se tomaron en el Valle del Mezquital donde se riega con el agua residual que contiene alto contenido de sodio y bicarbonatos.

Cuadro 23. Clasificación hidroquímica de las muestras tomadas en la primavera de 2018.

No. de muestra	Na + K	Ca	Mg	Cl	$CO_3 + HCO_3$	SO_4	Clasificación
	. . . . . mg L^{-1}						
1	93	19	15	110	127	34	Sódica Clorurada
2	343	24	35	371	381	48	Sódica Clorurada
3	226	26	22	219	264	77	Sódica Clorurada
4	1023	21	46	498	1710	106	Sódica Bicarbonatada
5	468	25	51	383	574	119	Sódica Mixta
6	1315	25	56	619	2189	164	Sódica Bicarbonatada
7	1064	20	47	497	1825	104	Sódica Bicarbonatada
8	1094	25	59	434	2031	125	Sódica Bicarbonatada
9	246	22	24	228	293	73	Sódica Clorurada
10	507	25	61	470	603	150	Sódica Clorurada
11	531	17	48	264	985	56	Sódica Bicarbonatada
12	897	20	47	351	1668	101	Sódica Bicarbonatada
13	810	18	55	330	1572	95	Sódica Bicarbonatada
14	230	21	27	151	420	68	Sódica Bicarbonatada
15	239	25	26	183	416	46	Sódica Bicarbonatada
16	218	20	24	223	228	80	Sódica Clorurada
17	439	34	70	223	849	109	Sódica Bicarbonatada
18	284	45	58	210	592	131	Sódica Bicarbonatada
19	277	29	30	213	477	54	Sódica Bicarbonatada
20	324	23	36	343	339	86	Sódica Clorurada
21	280	24	33	182	491	94	Sódica Bicarbonatada
22	276	22	23	162	528	39	Sódica Bicarbonatada
23	277	21	23	160	534	39	Sódica Bicarbonatada
24	298	23	34	202	537	61	Sódica Bicarbonatada
25	321	23	35	335	329	96	Sódica Clorurada
26	273	21	23	158	527	38	Sódica Bicarbonatada
27	71	6	6	41	139	10	Sódica Bicarbonatada
28	273	21	23	158	528	38	Sódica Bicarbonatada
29	254	24	34	282	274	89	Sódica Clorurada
30	328	30	32	320	430	56	Sódica Clorurada
31	289	22	33	196	526	60	Sódica Bicarbonatada
32	334	25	40	228	611	69	Sódica Bicarbonatada
33	272	20	23	156	526	37	Sódica Bicarbonatada

Cuadro 23. Continuación

No. de muestra	Na + K	Ca	Mg	Cl	$CO_3 + HCO_3$	SO_4	Clasificación
	. . . . . mg L^{-1}						
34	224	18	17	128	429	31	Sódica Bicarbonatada
35	365	40	36	216	760	49	Sódica Bicarbonatada
36	397	37	34	231	789	53	Sódica Bicarbonatada
37	413	36	34	243	809	55	Sódica Bicarbonatada
38	367	46	39	228	772	54	Sódica Bicarbonatada
39	397	35	34	233	779	54	Sódica Bicarbonatada
40	375	21	38	179	670	124	Sódica Bicarbonatada
41	399	35	34	233	778	55	Sódica Bicarbonatada
42	328	22	34	229	580	58	Sódica Bicarbonatada
43	291	22	24	166	566	40	Sódica Bicarbonatada
44	212	14	25	124	388	53	Sódica Bicarbonatada
45	229	17	19	131	444	31	Sódica Bicarbonatada
46	421	34	35	254	802	57	Sódica Bicarbonatada
47	175	12	21	104	336	43	Sódica Bicarbonatada
48	410	33	33	243	783	55	Sódica Bicarbonatada
49	326	28	27	191	612	44	Sódica Bicarbonatada
50	193	14	23	114	356	49	Sódica Bicarbonatada
51	331	26	27	195	637	44	Sódica Bicarbonatada
52	321	28	26	191	621	43	Sódica Bicarbonatada
53	322	28	26	189	625	43	Sódica Bicarbonatada
54	323	24	26	202	592	44	Sódica Bicarbonatada
55	325	24	26	204	597	44	Sódica Bicarbonatada
56	326	24	27	187	618	44	Sódica Bicarbonatada
57	162	14	19	181	168	42	Sódica Clorurada
58	323	24	26	202	592	44	Sódica Bicarbonatada
59	185	16	22	206	195	47	Sódica Clorurada
60	327	24	27	203	605	44	Sódica Bicarbonatada
61	299	22	34	173	578	73	Sódica Bicarbonatada
62	329	24	26	202	608	44	Sódica Bicarbonatada
63	429	37	35	259	824	58	Sódica Bicarbonatada
64	466	34	37	289	858	62	Sódica Bicarbonatada
65	320	28	27	189	620	44	Sódica Bicarbonatada
66	32	22	32	23	226	25	Magnésica Bicarbonatada
67	299	22	35	203	548	61	Sódica Bicarbonatada

Cuadro 23. Continuación

No. de muestra	Na + K	Ca	Mg	Cl	$CO_3 + HCO_3$	SO_4	Clasificación
	. . . . . mg L^{-1}						
68	300	21	39	178	566	73	Sódica Bicarbonatada
69	35	24	35	25	247	29	Magnésica Bicarbonatada
70	230	17	19	144	422	31	Sódica Bicarbonatada
71	278	20	38	163	556	71	Sódica Bicarbonatada
72	19	30	9	13	139	14	Mixta Bicarbonatada
73	22	35	11	15	160	17	Mixta Bicarbonatada
74	38	59	19	26	273	29	Mixta Bicarbonatada
75	259	18	36	151	520	66	Sódica Bicarbonatada
76	34	28	33	24	249	26	Mixta Bicarbonatada
77	256	18	35	147	519	65	Sódica Bicarbonatada
78	253	17	35	147	506	65	Sódica Bicarbonatada
79	22	15	22	15	156	17	Magnésica Bicarbonatada
80	28	47	14	20	208	23	Cálcica Bicarbonatada
81	220	16	27	128	427	58	Sódica Bicarbonatada
82	203	14	24	118	386	50	Sódica Bicarbonatada
83	18	15	18	12	134	14	Magnésica Bicarbonatada
84	20	32	10	14	148	15	Mixta Bicarbonatada

En el segundo muestreo se obtuvieron 87 muestras (89%) clasificadas como sódicas bicarbonatadas, 2 muestras clasificadas como sódicas mixtas y 9 muestras bicarbonatadas mixtas (Cuadro 24).

Cuadro 24. Clasificación hidroquímica de las muestras tomadas en la primavera de 2018.

No. de muestra	Na + K	Ca	Mg	Cl	$CO_3 + HCO_3$	SO_4	Clasificación
	. . . . . mg L^{-1}						
1	73	22	19	60	193	25	Sódica Bicarbonatada
2	247	42	44	174	509	100	Sódica Bicarbonatada
3	293	51	37	243	564	52	Sódica Bicarbonatada
4	166	31	22	126	351	25	Sódica Bicarbonatada
5	270	35	30	165	541	68	Sódica Bicarbonatada
6	262	41	33	165	522	92	Sódica Bicarbonatada
7	262	38	32	188	511	60	Sódica Bicarbonatada
8	242	24	22	135	486	37	Sódica Bicarbonatada

Cuadro 24. Continuación

No. de muestra	Na + K	Ca	Mg	Cl	$CO_3 + HCO_3$	SO_4	Clasificación
	. . . . . mg L^{-1}						
9	643	46	47	407	1,136	98	Sódica Bicarbonatada
10	252	27	39	179	503	62	Sódica Bicarbonatada
11	307	43	43	243	588	60	Sódica Bicarbonatada
12	331	46	44	234	664	81	Sódica Bicarbonatada
13	328	43	47	246	645	73	Sódica Bicarbonatada
14	316	42	45	225	660	60	Sódica Bicarbonatada
15	205	22	31	144	416	45	Sódica Bicarbonatada
16	235	25	35	164	462	58	Sódica Bicarbonatada
17	197	21	24	141	358	47	Sódica Bicarbonatada
18	212	21	23	133	400	49	Sódica Bicarbonatada
19	189	22	29	127	391	47	Sódica Bicarbonatada
20	225	25	35	160	445	56	Sódica Bicarbonatada
21	198	21	30	150	383	40	Sódica Bicarbonatada
22	228	34	32	166	437	72	Sódica Bicarbonatada
23	191	20	30	134	367	62	Sódica Bicarbonatada
24	166	33	36	155	331	38	Sódica Bicarbonatada
25	82	7	22	60	198	16	Sódica Bicarbonatada
26	216	23	33	151	433	53	Sódica Bicarbonatada
27	182	34	35	165	364	53	Sódica Bicarbonatada
28	178	35	39	167	370	50	Sódica Bicarbonatada
29	223	25	34	157	442	55	Sódica Bicarbonatada
30	354	38	55	250	691	112	Sódica Bicarbonatada
31	419	83	79	335	949	98	Sódica Bicarbonatada
32	203	20	29	132	398	63	Sódica Bicarbonatada
33	231	30	32	162	480	44	Sódica Bicarbonatada
34	273	37	39	196	570	52	Sódica Bicarbonatada
35	225	30	32	170	445	52	Sódica Bicarbonatada
36	184	25	24	126	359	46	Sódica Bicarbonatada
37	181	36	38	168	393	36	Sódica Bicarbonatada
38	237	25	36	147	463	83	Sódica Bicarbonatada
39	39	13	12	37	103	15	Mixta Bicarbonatada
40	234	24	26	148	446	54	Sódica Bicarbonatada
41	218	30	28	152	420	60	Sódica Bicarbonatada
42	293	31	45	206	554	99	Sódica Bicarbonatada
43	193	20	29	136	345	68	Sódica Bicarbonatada

Cuadro 24. Continuación

No. de muestra	Na + K	Ca	Mg	Cl	$CO_3 + HCO_3$	SO_4	Clasificación
	. . . . . mg L^{-1}						
44	228	35	32	167	437	73	Sódica Bicarbonatada
45	173	30	37	122	392	68	Sódica Bicarbonatada
46	33	12	10	31	88	13	Mixta Bicarbonatada
47	198	27	28	143	406	38	Sódica Bicarbonatada
48	268	35	38	195	498	95	Sódica Bicarbonatada
49	194	22	35	127	423	53	Sódica Bicarbonatada
50	365	49	52	266	685	124	Sódica Bicarbonatada
51	301	33	47	216	599	76	Sódica Bicarbonatada
52	242	26	37	172	452	83	Sódica Bicarbonatada
53	166	33	36	157	355	39	Sódica Bicarbonatada
54	116	32	31	115	281	34	Sódica Bicarbonatada
55	157	44	41	155	365	46	Sódica Bicarbonatada
56	315	63	68	295	677	73	Sódica Bicarbonatada
57	272	64	55	247	603	71	Sódica Bicarbonatada
58	291	58	57	255	633	76	Sódica Bicarbonatada
59	313	63	68	299	675	78	Sódica Bicarbonatada
60	303	33	47	216	547	104	Sódica Bicarbonatada
61	255	36	36	170	524	78	Sódica Bicarbonatada
62	275	56	61	262	546	110	Sódica Mixta
63	149	30	33	141	318	37	Sódica Bicarbonatada
64	170	35	38	165	368	41	Sódica Bicarbonatada
65	337	67	72	314	726	78	Sódica Bicarbonatada
66	292	70	60	268	650	82	Sódica Bicarbonatada
67	130	37	34	129	319	38	Sódica Bicarbonatada
68	210	58	54	205	481	61	Sódica Bicarbonatada
69	190	54	51	191	461	57	Sódica Bicarbonatada
70	234	47	51	223	457	92	Sódica Mixta
71	210	49	42	189	467	54	Sódica Bicarbonatada
72	306	72	61	276	692	84	Sódica Bicarbonatada
73	239	56	48	214	526	62	Sódica Bicarbonatada
74	216	51	55	217	490	62	Sódica Bicarbonatada
75	148	34	30	133	323	39	Sódica Bicarbonatada
76	208	60	56	211	506	62	Sódica Bicarbonatada
77	209	60	56	211	516	62	Sódica Bicarbonatada
78	322	65	70	308	690	81	Sódica Bicarbonatada

Cuadro 24. Continuación

No. de muestra	Na + K	Ca	Mg	Cl	$CO_3 + HCO_3$	SO_4	Clasificación
	. . . . . mg L^{-1}						
79	61	21	18	57	159	24	Mixta Bicarbonatada
80	232	55	47	210	520	61	Sódica Bicarbonatada
81	63	22	18	59	165	25	Mixta Bicarbonatada
82	248	51	54	233	533	60	Sódica Bicarbonatada
83	246	48	48	213	494	62	Sódica Bicarbonatada
84	242	47	47	209	513	61	Sódica Bicarbonatada
85	211	51	44	196	473	56	Sódica Bicarbonatada
86	213	50	43	191	472	55	Sódica Bicarbonatada
87	217	50	42	191	483	54	Sódica Bicarbonatada
88	39	13	11	37	102	15	Mixta Bicarbonatada
89	69	21	18	57	180	24	Sódica Bicarbonatada
90	184	44	37	168	410	49	Sódica Bicarbonatada
91	35	12	11	34	95	14	Mixta Bicarbonatada
92	27	10	8	26	73	11	Mixta Bicarbonatada
93	171	40	34	153	377	45	Sódica Bicarbonatada
94	200	51	44	141	518	60	Sódica Bicarbonatada
95	125	46	40	127	356	53	Mixta Bicarbonatada
96	167	39	34	152	365	45	Sódica Bicarbonatada
97	26	9	8	26	72	11	Mixta Bicarbonatada
98	143	34	29	131	318	38	Sódica Bicarbonatada

El diagrama de Durov es una variación del diagrama de Piper, pero tiene la ventaja de que asocia la proyección de la concentración de los iones con la cantidad de sólidos totales. También muestra el pH en la misma gráfica. Estas características adicionales permiten un mejor análisis de la calidad del agua de las muestras.

En el muestreo realizado durante la primavera de 2018 se observa que la mayor parte de las muestras se concentran alrededor de 1,000 mg L^{-1} de sólidos totales disueltos, y el pH entre 7.0 y 8.5. También muestra la predominancia de muestras sódicas, bicarbonatadas y cloruradas (Figura 55).

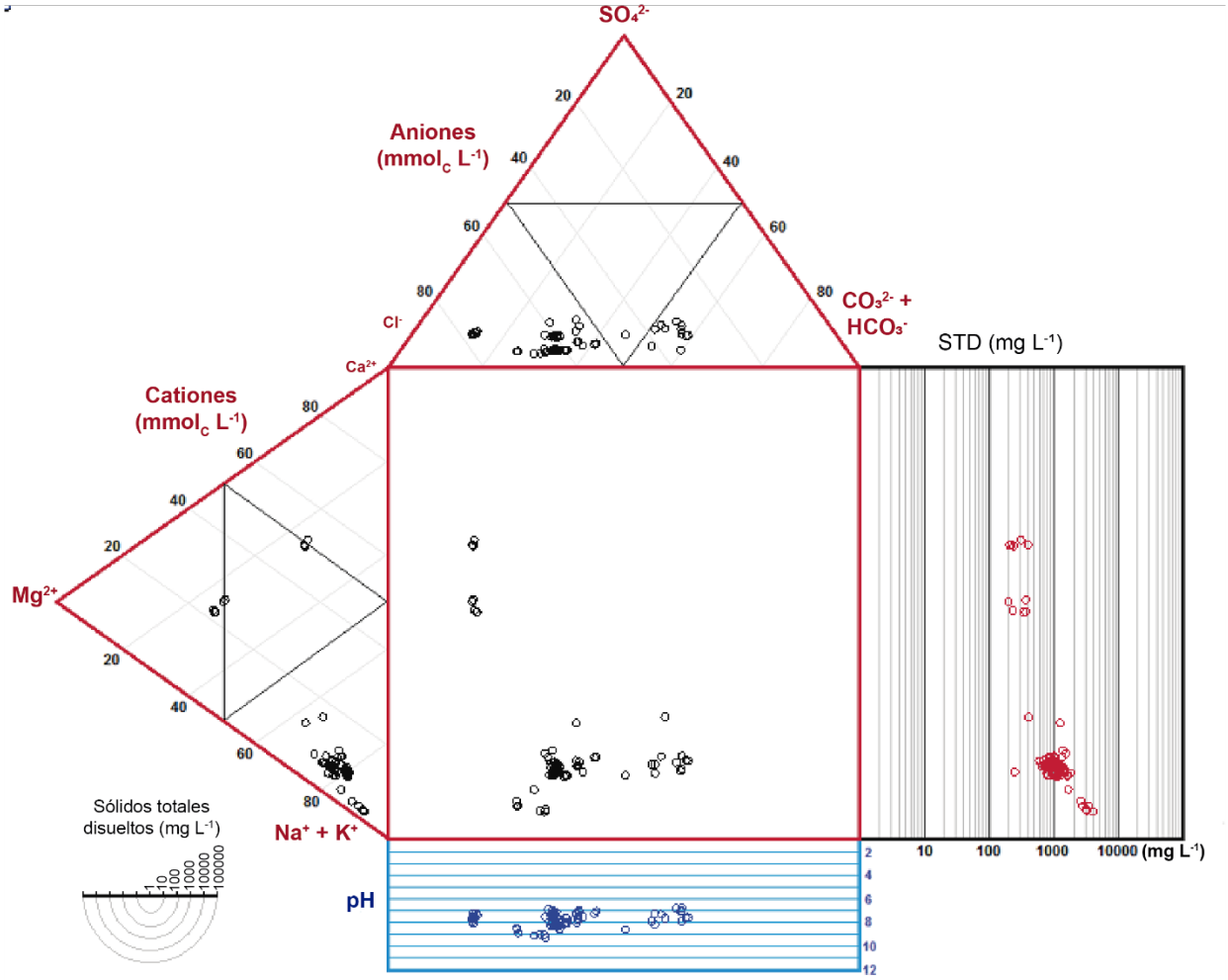


Figura 55. Diagrama hidroquímico de Durov de las aguas muestreadas en la primavera de 2019.

En el muestreo realizado durante el verano de 2019 se observa que la mayor parte de las muestras se concentran en valores de sólidos totales disueltos alrededor de 1,000 mg L^{-1}, y el pH entre 6.5 y 9.0. También muestra la predominancia de muestras sódicas y cloruradas (Figura 56).

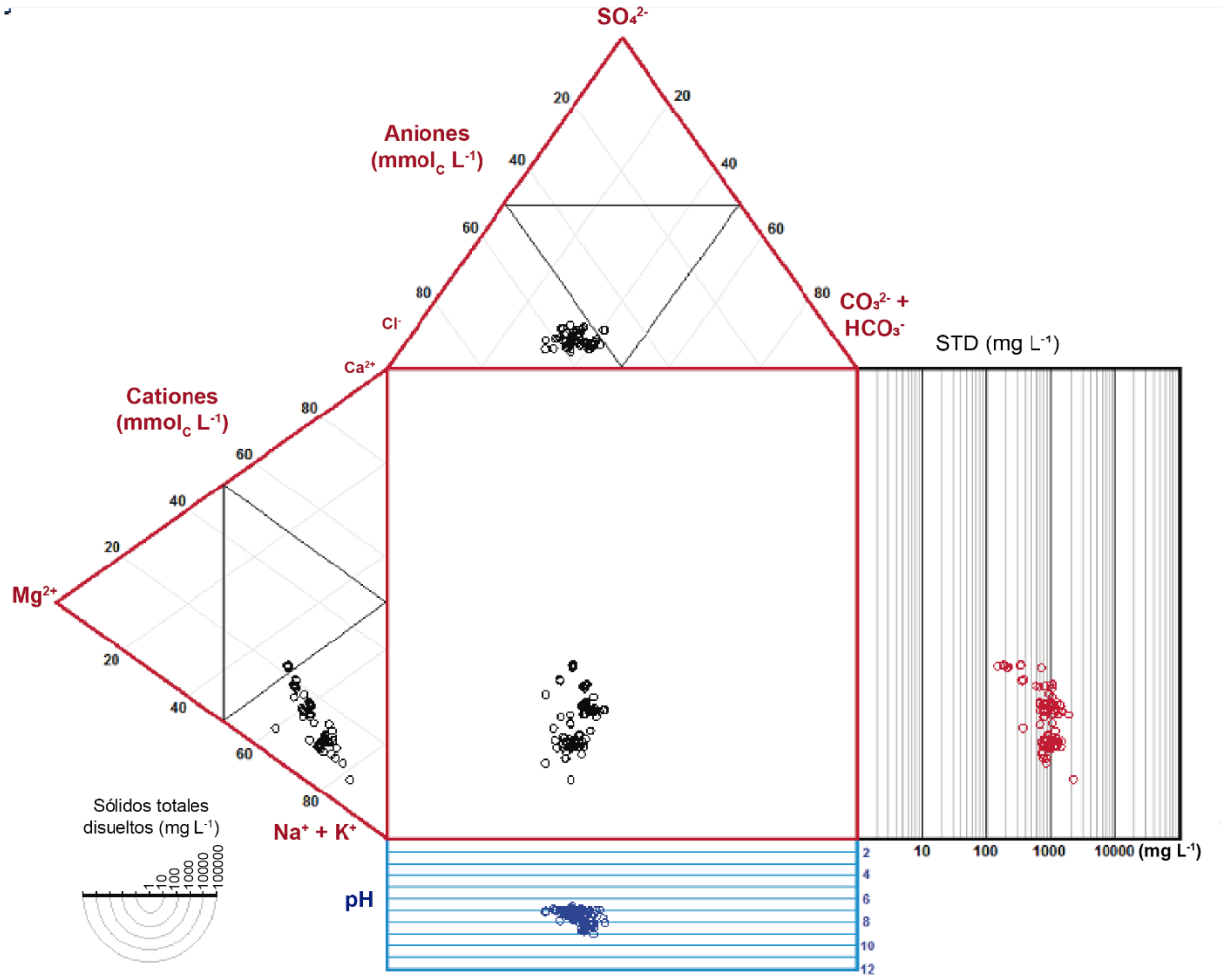


Figura 56. Diagrama hidroquímico de Durov de las aguas muestreadas en el verano de 2019.

4.8 Fuerza iónica de iones y de sales

Debido a que el cálculo de la fuerza iónica requiere conocer la concentración de todos los cationes y aniones presentes en la solución, resulta importante relacionarlo con un parámetro único de medición. Con base en los trabajos de Ponnamperuma *et al*. (1966), Griffin y Jurinak (1973) reportaron una relación lineal entre la fuerza iónica y la conductividad eléctrica, que emplearon para predecir la fuerza iónica de muestras de ríos y extractos de suelos sometidos a diferentes tratamientos como el contenido de humedad y la concentración de las soluciones.

En esta investigación realizada en el alto y bajo y Pánuco se determinó la concentración de aniones y cationes de cada muestra, por lo que es importante conocer la relación

entre la fuerza iónica y la conductividad eléctrica para predecir la fuerza iónica a partir de la conductividad eléctrica de otras muestras tomadas en la misma zona de estudio.

En la relación funcional μ = ***a f***(CE), donde μ es la fuerza iónica y CE la conductividad eléctrica en dS cm^{-1}, el valor de la pendiente ***a*** es de 0.0110 en el primer muestreo y 0.0117 en el segundo (Figura 57 y Figura 58). Esto significa que multiplicando la CE por estos factores es posible obtener la fuerza iónica. Debe tomarse en cuenta que el primer factor se obtuvo de las muestras tomadas en el estiaje y el segundo factor de las muestras tomadas en el periodo de lluvias. Los valores obtenidos son congruentes con los obtenidos por otros autores como Griffin y Jurinak (1973): ***a*** = 0.0127; Pasricha (1987): ***a*** = 0.0116 y Ponnamperuma et al., (1966): ***a*** = 0.0160.

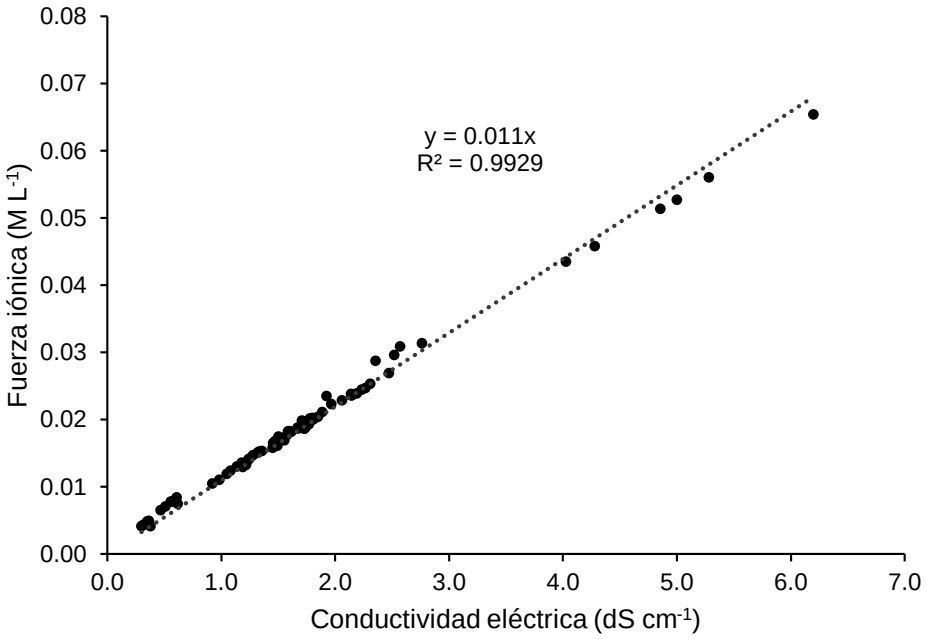


Figura 57. Relación entre la fuerza iónica experimental y la conductividad eléctrica en el muestreo realizado en la primavera de 2018.

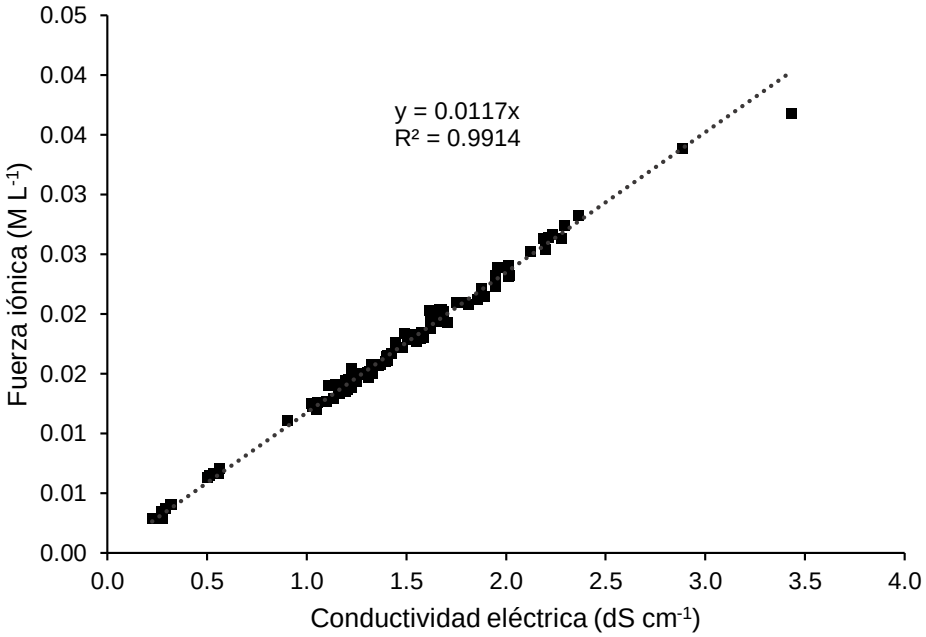


Figura 58. Relación entre la fuerza iónica experimental y la conductividad eléctrica en el muestreo realizado en el verano de 2019.

Para calcular la fuerza iónica, Bower *et al*. (1965) propusieron utilizar la concentración de cationes de la siguiente manera: $1000(\mu) = 1.3477C + 0.5355$, donde C es la concentración de cationes del agua en $mmmol_c\ L^{-1}$ y μ es la fuerza iónica en $M\ L^{-1}$.

Para comparar este método con el método experimental (que utiliza la concentración de cada ion), se calculó la μ utilizando la ecuación de Bower. De la relación funcional entre la μ y la CE se obtuvo un valor de la pendiente ***a*** = 0.0134 en el primer muestreo (Figura 59) y **a** = 0.0135 en el segundo (Figura 60).

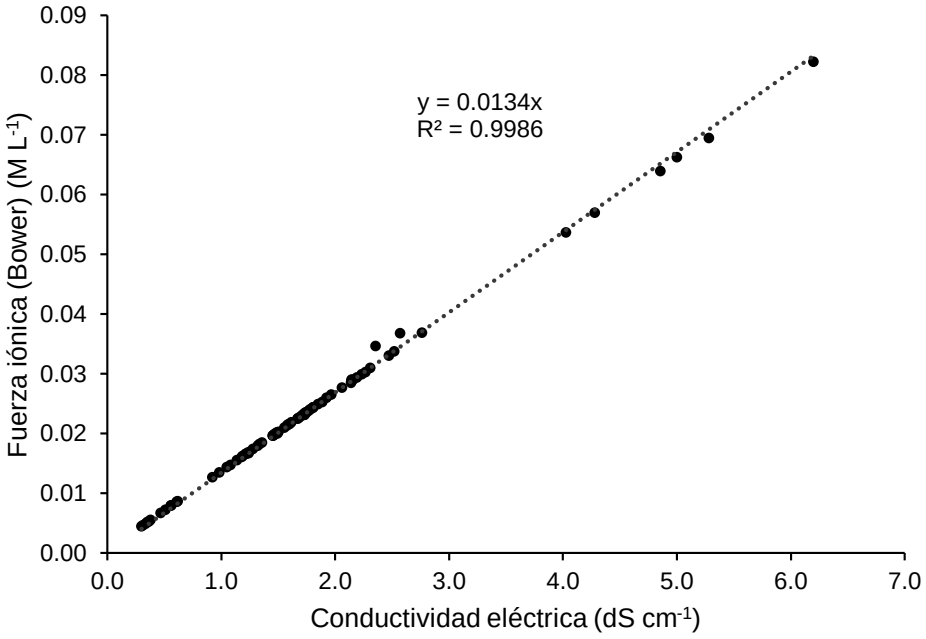


Figura 59. Relación entre la fuerza iónica (de acuerdo con Bower et al., 1965) y la conductividad eléctrica en el muestreo realizado en la primavera de 2018.

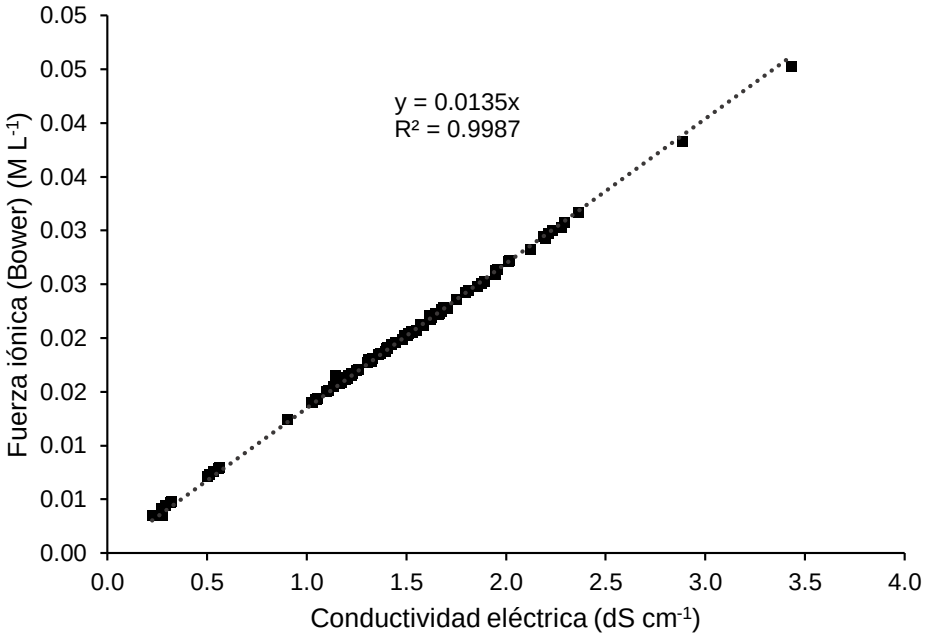


Figura 60. Relación entre la fuerza iónica (de acuerdo con Bower et al., 1965) y la conductividad eléctrica en el muestreo realizado en el verano de 2019.

Diversos autores han encontrado relaciones similares entre la μ y la CE. Con el fin de compararlas con las relaciones funcionales obtenidas en esta investigación, se calculó la fuerza iónica de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco a partir de esas ecuaciones encontradas en otras investigaciones.

La diversidad de ecuaciones es consecuencia de los diferentes tipos de aguas analizadas en los experimentos. Los trabajos de los siguientes autores lo ejemplifican:

- Ponnamperuma *et al*. (1966) trabajaron con extractos de suelos inundados cultivados con arroz y aguas de riego.
- Griffin y Jurinak (1973) utilizaron extractos de suelos y datos químicos analíticos de aguas de ríos de Utah, Estados Unidos.
- Gillman y Bell (1978) analizaron extractos de suelos del noreste de Australia
- Pérez (2018) analizó las aguas del sistema hidrológico Lerma-Chapala-Santiago en México
- Camacho *et al*. (2020) analizaron diversos sitios de muestreo en el estado de Oaxaca, México.

Los estadísticos descriptivos del cálculo de la fuerza iónica con las diferentes ecuaciones muestran una alta cercanía entre los valores calculados (Cuadro 25). La ecuación (I) es la obtenida por Pérez (2018) en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago y la ecuación (J) es la obtenida por el mismo autor en el Valle del Mezquital, Hidalgo. La ecuación (K) es la obtenida por Mendoza (2009) en el muestreo de verano del año 2005 y la ecuación (J) fue obtenida por la misma autora en la primavera del año 2006. La ecuación (N) fue obtenida en la presente investigación a partir de los datos analíticos del muestreo en la primavera de 2018 y la ecuación (O) en el verano de 2019.

Cuadro 25. Estadísticos descriptivos de la fuerza iónica calculada a partir de las ecuaciones de diferentes autores.

Autor	Ecuación	Min.	Máx.	Media	Mediana	Moda	Desv. Est.
(A) Bower *et al*. (1965)	1000μ = 1.3477+0.5355	0.0045	0.0823	0.0236	0.0225	0.0233	0.0141
(B) Ponnamperuma *et al*. (1966)	μ=0.016 CE	0.0048	0.0992	0.0280	0.0267	0.0267	0.0172
(C) Griffin y Jurinak (1973)	μ=0.013 CE	0.0039	0.0806	0.0227	0.0217	0.0217	0.0139
(D) Gillman y Bell (1978)	μ=0.012 CE−0.0004	0.0032	0.0740	0.0206	0.0196	0.0196	0.0129
(E) Leffelaar *et al*. (1983)	μ=0.0114 CE	0.0034	0.0707	0.0199	0.0190	0.0190	0.0122
(F) Pasricha (1987)	μ=0.0116 CE	0.0035	0.0719	0.0203	0.0194	0.0194	0.0124
(G) Alva *et al*. (1991)	μ=0.015 CE−0.0006	0.0039	0.0924	0.0256	0.0244	0.0244	0.0161
(H) López *et al*. (2016)	μ=0.0116 CE	0.0035	0.0719	0.0203	0.0194	0.0194	0.0124
(I) Pérez (2018)[1]	μ=0.01179 CE−0.00017	0.0034	0.0729	0.0204	0.0195	0.0195	0.0126
(J) Pérez (2018)[2]	μ=0.01159 CE−0.00036	0.0031	0.0715	0.0199	0.0190	0.0190	0.0124
(K) Mendoza (2009)[1]	μ=0.0118 CE	0.0035	0.0732	0.0206	0.0197	0.0197	0.0127
(L) Mendoza (2009)[2]	μ=0.0119 CE	0.0036	0.0738	0.0208	0.0199	0.0199	0.0128
(M) Camacho *et al*. (2020)	μ=0.0117 CE	0.0035	0.0725	0.0205	0.0195	0.0195	0.0126
(N) Alto y bajo Pánuco[1]	**μ=0.0110 CE**	**0.0033**	**0.0682**	**0.0192**	**0.0184**	**0.0184**	**0.0118**
(O) Alto y bajo Pánuco[2]	**μ=0.0117 CE**	**0.0035**	**0.0725**	**0.0205**	**0.0195**	**0.0195**	**0.0126**

Se realizó una comparación entre la media de los valores de fuerza iónica obtenidas con todas las ecuaciones aplicadas y se encontró que sólo existen dos ecuaciones que difieren de manera importante de las demás: las obtenidas por Ponnamperuma *et al*. (1966) y Alva *et al*. (1991). Con el resto de las ecuaciones la variación fue menor.

Debido a la época del muestreo, la ecuación (N) que proviene del muestreo en la primavera de 2018 en el alto y bajo Pánuco tiene menor similitud con el resto de las

ecuaciones que la ecuación (O), que proviene del muestreo realizado en el verano de 2019. Los valores de la ecuación (O) tienen mayor cercanía con los resultados obtenidos por Pérez (2018) en el Valle del Mezquital y por Mendoza (2009) en la misma área de estudio (Figura 61).

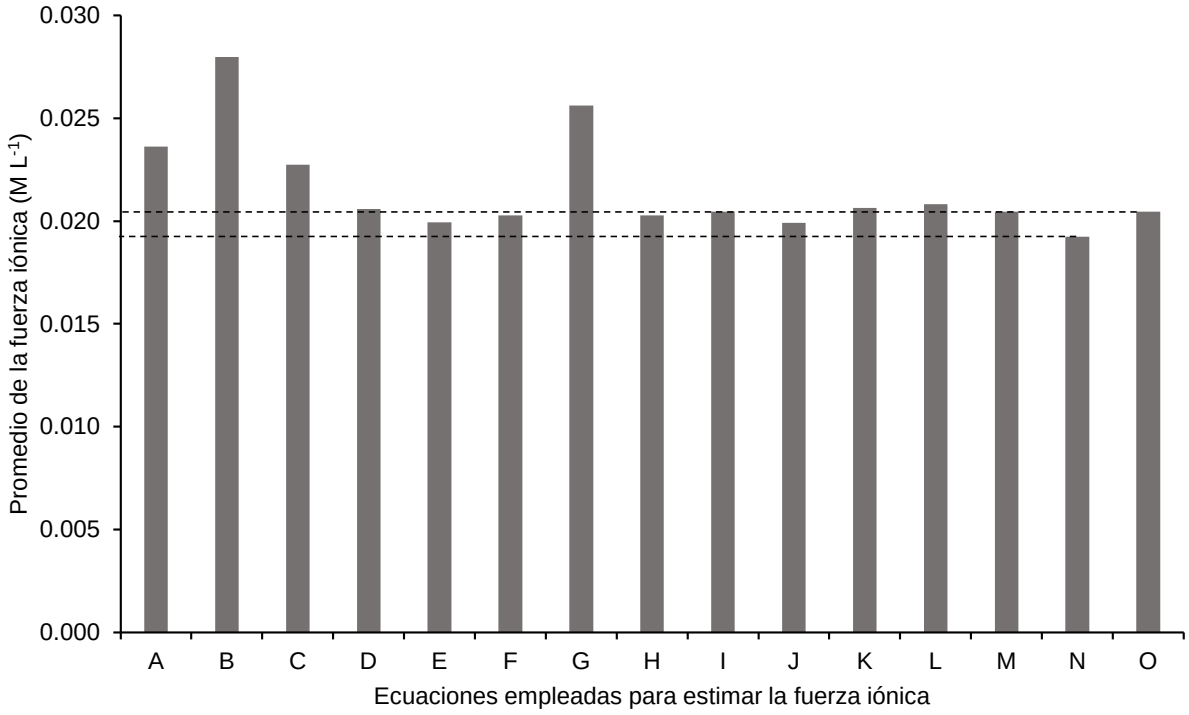


Figura 61. Comparación del promedio de las fuerzas iónicas obtenidas con ecuaciones de diferentes autores.

La Figura 62 muestra la diferencia entre la relación funcional de la fuerza iónica con la conductividad eléctrica de acuerdo con las ecuaciones aplicadas de diferentes autores. Las ecuaciones N y O se refieren a las obtenidas con los datos del primero y segundo muestreo de esta investigación. En varias ecuaciones no es posible notar la diferencia con las demás debido a la semejanza entre las pendientes de las relaciones funcionales. Para hacer una distinción de las ecuaciones obtenidas en esta ecuación, se colocó una línea negra que representa la ecuación del muestreo de primavera de 2018 y una línea roja que representa la ecuación del muestreo de verano de 2019.

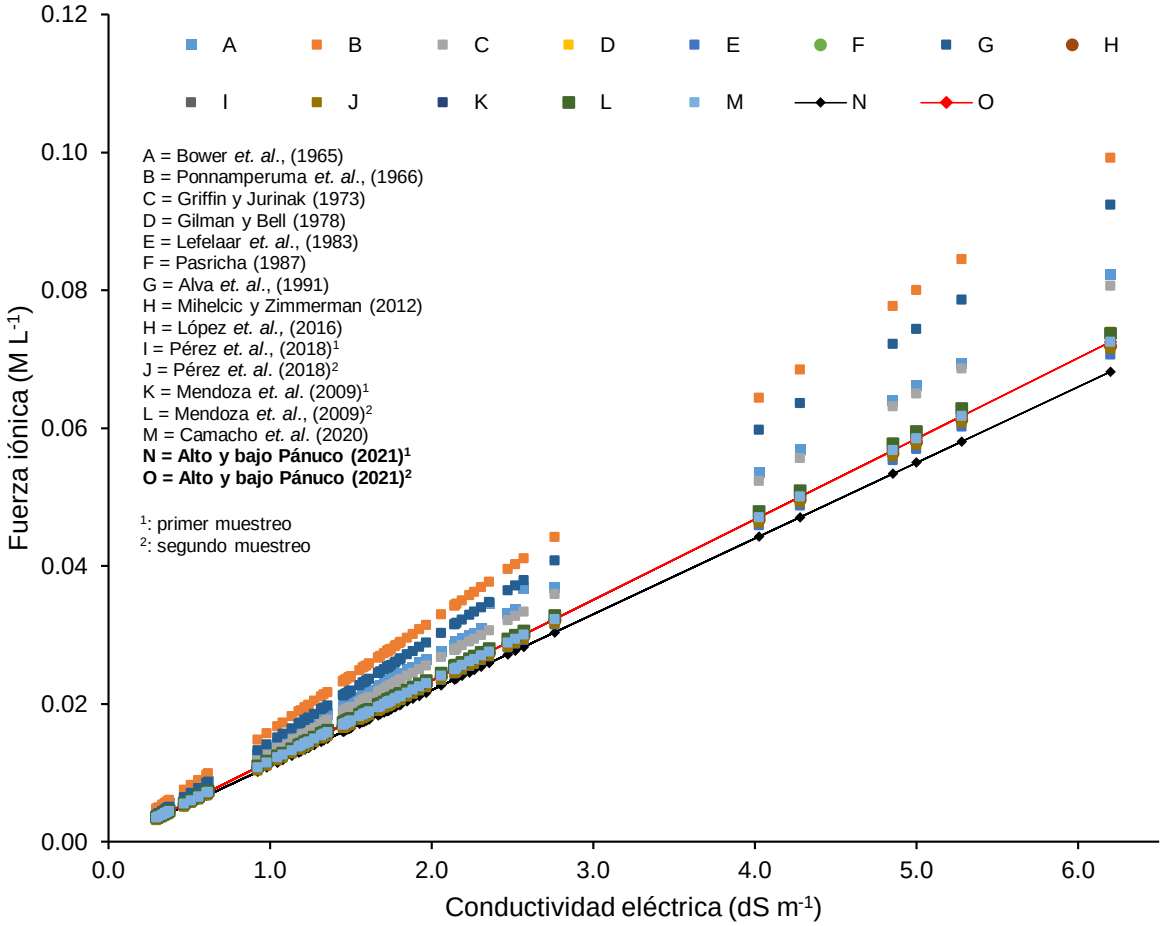


Figura 62. Relación entre la conductividad eléctrica y la fuerza iónica calculada con ecuaciones obtenidas por diferentes autores.

4.9 Toxicidad por iones específicos

Existen cultivos que son sensibles a ciertos iones de manera específica, que les provocan toxicidad. Se separa el efecto de los iones específicos de la salinidad, debido a que el problema de la toxicidad ocurre cuando las plantas absorben estos iones y los acumulan en sus tejidos. Cuando el nivel de acumulación supera ciertos límites, se provocan daños en el desarrollo de las plantas. Los iones en el agua de riego que provocan toxicidad en las plantas comúnmente son cloruro, boro y sodio.

4.9.1 Cloruro

La toxidad más común por iones específicos en las plantas es la que se origina por los cloruros en el agua de riego. En suelos salinos donde el ion cloruro predomina en la solución del suelo, el crecimiento de las plantas que toleran cierto nivel de salinidad se ve afectado por la toxicidad del cloro (Geilfus, 2018).

El ion cloruro es beneficioso para las plantas porque participa en funciones esenciales (como el proceso de fotosíntesis), pero llega a ser tóxico en cantidades elevadas. Este ion de alta movilidad en el suelo es absorbido por las raíces de las plantas, es transportado a través de la planta, y se acumula en los márgenes de las hojas por efecto de la transpiración. Visualmente, se pueden detectar las plantas que han sido afectadas por el exceso de cloro, porque se observan las hojas con quemaduras en los márgenes. Los márgenes de las hojas comienzan a decolorarse, hasta convertirse en lesiones necróticas. Las quemaduras comienzan en las puntas de las hojas.

Para clasificar el agua con fines de riego, Ayers y Westcot (1985) consideran lo siguiente: si la concentración de cloruro es menor de 4 $mmol_c\ L^{-1}$, no existe restricción para el riego; si el valor está entre 4 y 10 $mmol_c\ L^{-1}$, la restricción va de ligera a moderada; pero si la concentración supera los 10 $mmol_c\ L^{-1}$, la restricción para el uso es severa, porque el riesgo de toxicidad en las plantas es muy alto. Esta clasificación aplica para el riego superficial. Cuando el riego se realiza por aspersión, el riesgo es mayor debido a que el cloro también puede absorberse por las hojas, por lo que el valor de concentración de cloruros en el agua, sin restricciones, es de 3 $mmol_c\ L^{-1}$.

En la Figura 63 se observa la predominancia de muestras de agua que caen en la categoría de restricción ligera a moderada. Las líneas punteadas indican los límites de clasificación propuestos por Ayers y Westcot (1985). El 22.6% de las 84 muestras de primavera 2018, no presentan ninguna restricción para el uso, el 69% presentan restricción ligera a moderada y el 8.3% presentan restricción severa. Estas muestras con restricción severa están localizadas al inicio de la red hidrográfica, destacando una que supera los 17 $mmol_c\ L^{-1}$, en Santa María Tonanitla. Esta muestra fue tomada en un canal de agua de riego, derivado del Gran Canal Oriente. Despúes de la presa Zimapán,

que es el punto de muestreo 68, la concentración de cloruro es menor, lo que hace que la mayoría de muestras de agua no presente restricción para el riego.

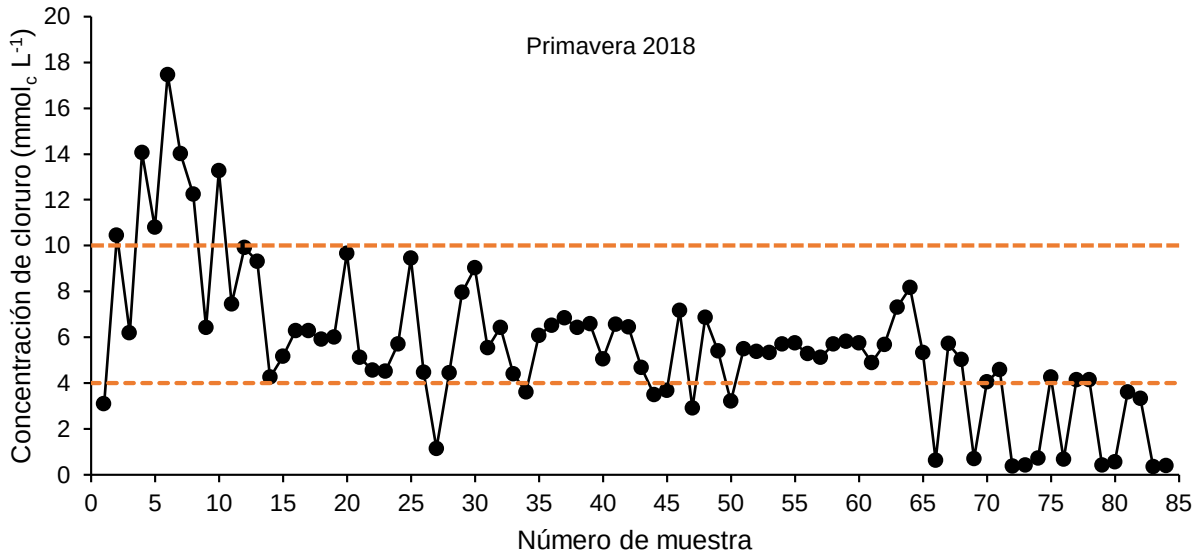


Figura 63. Concentración de cloruro en las aguas del muestreo 1.

En el muestreo de verano 2019 se observa también una predominancia de las muestras que presentan restricción ligera a moderada (Figura 64). El 29.6% no presentan ninguna restricción para el riego; el 69.4% presentan restricción ligera a moderada y el 1% (una sola muestra) presenta restricción severa. La muestra número 9 es la que presenta restricción severa, y fue tomada en la lumbrera 13 del Canal Oriente de aguas negras. Debido a que en esta época del año las muestras están más diluidas, se presentaron valores más bajos de concentración de cloruro. Sin embargo, un porcentaje muy alto tiene algún tipo de restricción para el riego debido a este ion específico.

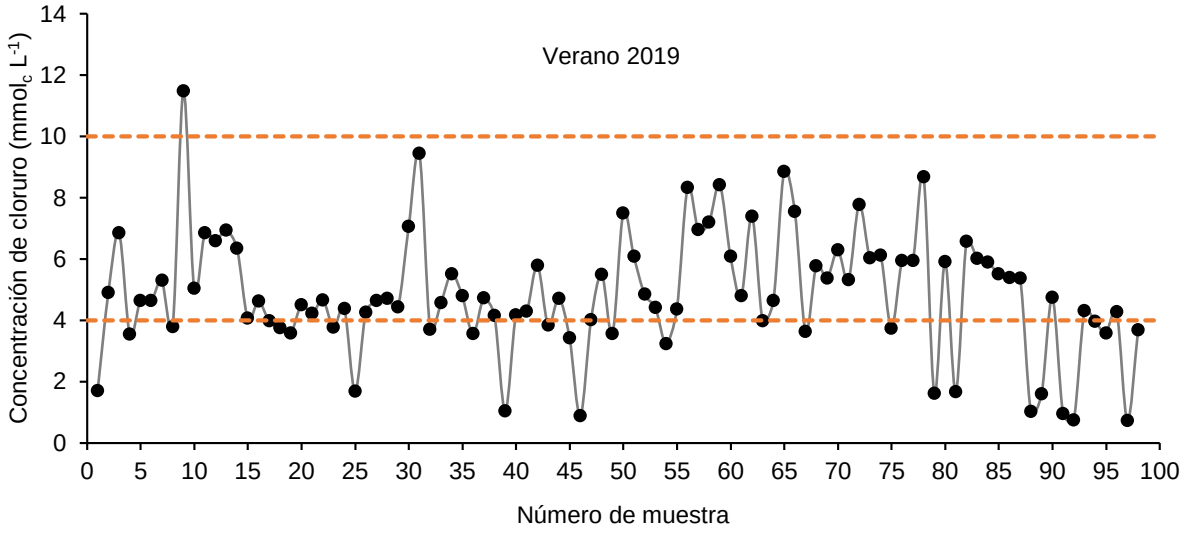


Figura 64. Concentración de cloruro en las aguas del muestreo 2.

En el Cuadro 26 se especifica la clasificación para cada muestra tomada en el primero y el segundo muestreo, tomando en cuenta los rangos establecidos por Ayers y Westcot (1985).

Cuadro 26. Clasificación de las muestras de agua por la concentración de cloruros.

Primer muestreo			Segundo muestreo		
No. de muestra	Cloruro (mmol$_c$ L^{-1})	Restricción para el riego	No. de muestra	Cloruro (mmol$_c$ L^{-1})	Restricción para el riego
1	3.1	Sin restricción	1	1.7	Sin restricción
2	10.46	Severa	2	4.9	Ligera a moderada
3	6.19	Ligera a moderada	3	6.85	Ligera a moderada
4	14.05	Severa	4	3.55	Sin restricción
5	10.8	Severa	5	4.65	Ligera a moderada
6	17.46	Severa	6	4.64	Ligera a moderada
7	14.02	Severa	7	5.3	Ligera a moderada
8	12.24	Severa	8	3.8	Sin restricción
9	6.43	Ligera a moderada	9	11.48	Severa
10	13.26	Severa	10	5.05	Ligera a moderada
11	7.45	Ligera a moderada	11	6.85	Ligera a moderada
12	9.91	Ligera a moderada	12	6.6	Ligera a moderada

Cuadro 26. Continuación

Primer muestreo			Segundo muestreo		
No. de muestra	Cloruro ($mmol_c\ L^{-1}$)	Restricción para el riego	No. de muestra	Cloruro ($mmol_c\ L^{-1}$)	Restricción para el riego
13	9.32	Ligera a moderada	13	6.95	Ligera a moderada
14	4.26	Ligera a moderada	14	6.35	Ligera a moderada
15	5.16	Ligera a moderada	15	4.07	Ligera a moderada
16	6.29	Ligera a moderada	16	4.62	Ligera a moderada
17	6.29	Ligera a moderada	17	3.98	Sin restricción
18	5.92	Ligera a moderada	18	3.76	Sin restricción
19	6.01	Ligera a moderada	19	3.58	Sin restricción
20	9.67	Ligera a moderada	20	4.5	Ligera a moderada
21	5.13	Ligera a moderada	21	4.22	Ligera a moderada
22	4.56	Ligera a moderada	22	4.67	Ligera a moderada
23	4.51	Ligera a moderada	23	3.77	Sin restricción
24	5.71	Ligera a moderada	24	4.38	Ligera a moderada
25	9.45	Ligera a moderada	25	1.68	Sin restricción
26	4.47	Ligera a moderada	26	4.26	Ligera a moderada
27	1.15	Sin restricción	27	4.65	Ligera a moderada
28	4.45	Ligera a moderada	28	4.72	Ligera a moderada
29	7.96	Ligera a moderada	29	4.44	Ligera a moderada
30	9.03	Ligera a moderada	30	7.06	Ligera a moderada
31	5.54	Ligera a moderada	31	9.44	Ligera a moderada
32	6.43	Ligera a moderada	32	3.71	Sin restricción
33	4.41	Ligera a moderada	33	4.57	Ligera a moderada
34	3.62	Sin restricción	34	5.52	Ligera a moderada
35	6.08	Ligera a moderada	35	4.8	Ligera a moderada
36	6.52	Ligera a moderada	36	3.56	Sin restricción
37	6.85	Ligera a moderada	37	4.73	Ligera a moderada
38	6.42	Ligera a moderada	38	4.15	Ligera a moderada
39	6.58	Ligera a moderada	39	1.04	Sin restricción
40	5.05	Ligera a moderada	40	4.18	Ligera a moderada
41	6.56	Ligera a moderada	41	4.29	Ligera a moderada

Cuadro 26. Continuación

Primer muestreo			Segundo muestreo		
No. de muestra	Cloruro ($mmol_c\ L^{-1}$)	Restricción para el riego	No. de muestra	Cloruro ($mmol_c\ L^{-1}$)	Restricción para el riego
42	6.45	Ligera a moderada	42	5.8	Ligera a moderada
43	4.69	Ligera a moderada	43	3.85	Sin restricción
44	3.5	Sin restricción	44	4.72	Ligera a moderada
45	3.69	Sin restricción	45	3.43	Sin restricción
46	7.16	Ligera a moderada	46	0.88	Sin restricción
47	2.92	Sin restricción	47	4.02	Ligera a moderada
48	6.86	Ligera a moderada	48	5.5	Ligera a moderada
49	5.39	Ligera a moderada	49	3.57	Sin restricción
50	3.21	Sin restricción	50	7.5	Ligera a moderada
51	5.49	Ligera a moderada	51	6.08	Ligera a moderada
52	5.38	Ligera a moderada	52	4.85	Ligera a moderada
53	5.34	Ligera a moderada	53	4.42	Ligera a moderada
54	5.71	Ligera a moderada	54	3.24	Sin restricción
55	5.75	Ligera a moderada	55	4.37	Ligera a moderada
56	5.28	Ligera a moderada	56	8.33	Ligera a moderada
57	5.11	Ligera a moderada	57	6.96	Ligera a moderada
58	5.7	Ligera a moderada	58	7.2	Ligera a moderada
59	5.81	Ligera a moderada	59	8.42	Ligera a moderada
60	5.74	Ligera a moderada	60	6.09	Ligera a moderada
61	4.89	Ligera a moderada	61	4.8	Ligera a moderada
62	5.69	Ligera a moderada	62	7.4	Ligera a moderada
63	7.32	Ligera a moderada	63	3.98	Sin restricción
64	8.16	Ligera a moderada	64	4.64	Ligera a moderada
65	5.32	Ligera a moderada	65	8.86	Ligera a moderada
66	0.64	Sin restricción	66	7.55	Ligera a moderada
67	5.72	Ligera a moderada	67	3.64	Sin restricción
68	5.03	Ligera a moderada	68	5.78	Ligera a moderada
69	0.7	Sin restricción	69	5.38	Ligera a moderada
70	4.05	Ligera a moderada	70	6.29	Ligera a moderada

Cuadro 26. Continuación

Primer muestreo			Segundo muestreo		
No. de muestra	Cloruro ($mmol_c\ L^{-1}$)	Restricción para el riego	No. de muestra	Cloruro ($mmol_c\ L^{-1}$)	Restricción para el riego
71	4.59	Ligera a moderada	71	5.33	Ligera a moderada
72	0.37	Sin restricción	72	7.78	Ligera a moderada
73	0.43	Sin restricción	73	6.04	Ligera a moderada
74	0.73	Sin restricción	74	6.12	Ligera a moderada
75	4.27	Ligera a moderada	75	3.74	Sin restricción
76	0.67	Sin restricción	76	5.95	Ligera a moderada
77	4.14	Ligera a moderada	77	5.95	Ligera a moderada
78	4.14	Ligera a moderada	78	8.68	Ligera a moderada
79	0.42	Sin restricción	79	1.62	Sin restricción
80	0.56	Sin restricción	80	5.92	Ligera a moderada
81	3.6	Sin restricción	81	1.67	Sin restricción
82	3.32	Sin restricción	82	6.58	Ligera a moderada
83	0.35	Sin restricción	83	6.02	Ligera a moderada
84	0.39	Sin restricción	84	5.9	Ligera a moderada
			85	5.52	Ligera a moderada
			86	5.39	Ligera a moderada
			87	5.38	Ligera a moderada
			88	1.03	Sin restricción
			89	1.6	Sin restricción
			90	4.74	Ligera a moderada
			91	0.96	Sin restricción
			92	0.74	Sin restricción
			93	4.32	Ligera a moderada
			94	3.97	Sin restricción
			95	3.59	Sin restricción
			96	4.28	Ligera a moderada
			97	0.73	Sin restricción
			98	3.69	Sin restricción

4.9.2 Boro

El boro es un micronutriente considerado esencial para el desarrollo de los cultivos. Las deficiencias de este elemento afectan la anatomía, la bioquímica y la fisiología de las plantas, que resulta en la pérdida de rendimientos y calidad de los cultivos (Ali *et al*., 2015; Bolaños *et al*., 2004).

Como la cantidad requerida de boro es baja, la planta puede sufrir daños cuando se superan los límites tolerables. Como sucede con otros factores o elementos químicos, el grado de tolerancia varía con la especie de planta. Por ejemplo, el limón y la mora son cultivos muy sensibles, toleran concentraciones menores a 0.5 mg L^{-1} de boro en el agua de riego. Por el contrario, el tomate, el perejil y la remolacha son cultivos que toleran de 4 hasta 6 mg L^{-1} (Zaman *et al*., 2018). Otros cultivos que se consideran sensibles al boro son: durazno, naranja, ciruela, higo, uva, nuez y cebolla (Ayers y Westcot, 1985).

La toxicidad por boro se manifiesta primero en el amarillamiento de las hojas más viejas, principalmente en las puntas, a lo que sigue una necrosis que progresa hacia el centro, entre las venas.

La presencia de boro en el agua proviene de manera natural del intemperismo químico de las rocas de origen volcánico que contienen boro. De manera antropogénica, el boro llega a través de las aguas residuales que contienen restos de fertilizantes, detergentes, pinturas, textiles, entre otros residuos (Mancilla-Villa *et al*., 2014).

Existen varias clasificaciones del agua de riego con respecto al boro. Una de las más utilizadas es la que establecieron Ayers y Wetscot (1985), quienes determinaron que, para la mayoría de los cultivos, las aguas con concentraciones menores a 0.7 mg L^{-1} no tienen restricción para el riego, de 0.7 a 3.0 mg L^{-1} tienen restricción ligera a moderada, y mayor a 3.0 mg L^{-1} la restricción es severa.

Doneen (1975) propuso otra clasificación del boro en el agua de riego, en la que estableció lo siguiente: la concentración de boro menor a 0.5 mg L^{-1} es segura y adecuada para la mayoría de las plantas, bajo cualquier condición de suelo o clima; de 0.5 a 2.0 mg L^{-1} se considera posiblemente dañina para ciertos cultivos bajo

determinadas condiciones de suelo o clima; y mayor a 2.0 mg L^{-1} es considerada probablemente perjudicial para la mayoría de los cultivos e insatisfactorio para todos, excepto los más tolerantes.

En la Figura 65 y la Figura 66 se pueden observar las dos clasificaciones descritas para los muestreos de primavera 2018 y verano 2019 en el alto y bajo Pánuco. De acuerdo con la clasificación de Ayers y Westcot (1985), en el primer muestreo, el 27.4% de las muestras resultaron sin restricción para el riego por el contenido de boro, 63.1% resultaron con restricción ligera a moderada y 9.5% resultaron con restricción severa. Las muestras con restricción severa se encuentran al inicio de la red hidrográfica, donde la concentración de aguas residuales es más alta. En el segundo muestreo, el 56% de las muestras resultaron sin restricción para el riego, y el 44% resultaron con restricción ligera a moderada. No se encontraron muestras con restricción severa.

De acuerdo con la clasificación de Doneen (1975), en el primer muestreo, 19% de las muestras son aguas seguras para el riego, 70.2% son posiblemente dañinas y 10.7 son insatisfactorias. En el segundo muestreo, 25% de las muestras son seguras y 75% son posiblemente dañinas. No se encontraron muestras de agua insatisfactorias para el riego, por el contenido de boro.

En ambos muestreos se aprecia con claridad el efecto de la alta concentración de contaminantes del agua residual, que provocan un mayor riesgo de toxicidad en los cultivos. A medida que la cuenca del Pánuco se acerca a su desembocadura, la concentración es menor(Figura 65 y Figura 66).

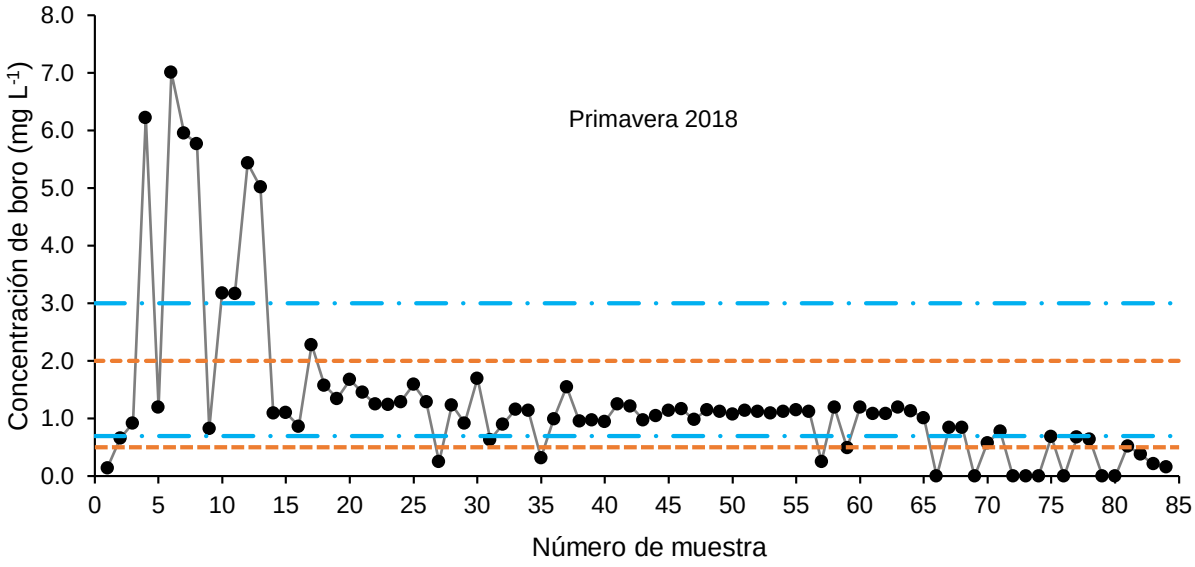


Figura 65. Concentración de boro en las aguas del muestreo 1.

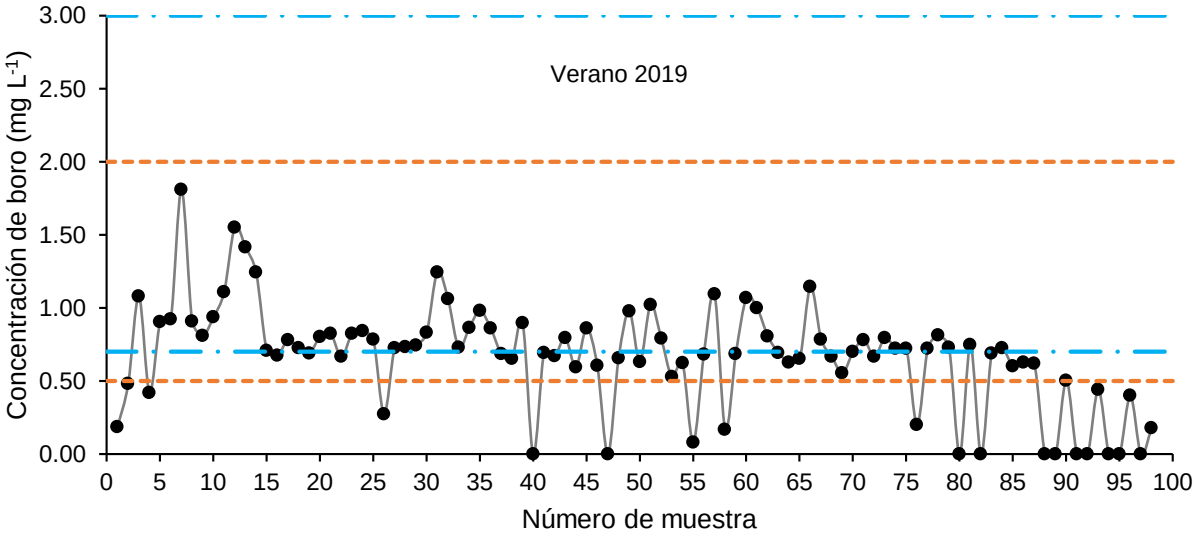


Figura 66. Concentración de boro en las aguas del muestreo 2.

En el Cuadro 27 del primer muestreo y el Cuadro 28 del segundo, se observa la clasificación del agua de riego para cada muestra con respecto a la concentración del boro. Aunque se muestran dos clasificaciones con diferentes rangos, la que mejor se ajusta en la red hidrográfica del alto y bajo Pánuco es la de Doneen (1975), tal como se observa en las figuras anteriores.

Cuadro 27. Clasificación de las aguas con fines de riego, con respecto a la concentración de boro, en el muestreo 1.

No. de muestra	Concentración de boro (mg L^{-1})	Restricción para el riego (Ayers y Westcot, 1985)	Tipo de agua (Doneen, 1975)
1	0.14	Sin restricción	Segura
2	0.66	Sin restricción	Posiblemente dañina
3	0.92	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
4	6.22	Severa	Insatisfactoria
5	1.20	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
6	7.01	Severa	Insatisfactoria
7	5.95	Severa	Insatisfactoria
8	5.77	Severa	Insatisfactoria
9	0.83	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
10	3.17	Severa	Insatisfactoria
11	3.17	Severa	Insatisfactoria
12	5.43	Severa	Insatisfactoria
13	5.02	Severa	Insatisfactoria
14	1.09	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
15	1.10	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
16	0.87	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
17	2.28	Ligera a moderada	Insatisfactoria
18	1.58	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
19	1.35	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
20	1.67	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
21	1.45	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
22	1.25	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
23	1.24	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
24	1.29	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
25	1.59	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
26	1.29	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
27	0.25	Sin restricción	Segura
28	1.23	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
29	0.92	Ligera a moderada	Posiblemente dañina

Cuadro 27. Continuación

No. de muestra	Concentración de boro (mg L^{-1})	Restricción para el riego (Ayers y Westcot, 1985)	Tipo de agua (Doneen, 1975)
30	1.70	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
31	0.63	Sin restricción	Posiblemente dañina
32	0.90	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
33	1.16	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
34	1.14	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
35	0.32	Sin restricción	Segura
36	0.99	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
37	1.55	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
38	0.95	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
39	0.98	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
40	0.95	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
41	1.25	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
42	1.22	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
43	0.98	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
44	1.05	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
45	1.14	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
46	1.17	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
47	0.98	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
48	1.15	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
49	1.12	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
50	1.07	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
51	1.14	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
52	1.12	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
53	1.09	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
54	1.13	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
55	1.15	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
56	1.13	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
57	0.26	Sin restricción	Segura
58	1.20	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
59	0.49	Sin restricción	Segura

Cuadro 27. Continuación

No. de muestra	Concentración de boro (mg L^{-1})	Restricción para el riego (Ayers y Westcot, 1985)	Tipo de agua (Doneen, 1975)
60	1.19	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
61	1.09	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
62	1.09	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
63	1.19	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
64	1.13	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
65	1.01	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
66	0.00	Sin restricción	Segura
67	0.85	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
68	0.85	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
69	0.00	Sin restricción	Segura
70	0.58	Sin restricción	Posiblemente dañina
71	0.78	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
72	0.00	Sin restricción	Segura
73	0.00	Sin restricción	Segura
74	0.00	Sin restricción	Segura
75	0.69	Sin restricción	Posiblemente dañina
76	0.00	Sin restricción	Segura
77	0.67	Sin restricción	Posiblemente dañina
78	0.64	Sin restricción	Posiblemente dañina
79	0.00	Sin restricción	Segura
80	0.00	Sin restricción	Segura
81	0.52	Sin restricción	Posiblemente dañina
82	0.38	Sin restricción	Segura
83	0.21	Sin restricción	Segura
84	0.16	Sin restricción	Segura

Cuadro 28. Clasificación de las aguas con fines de riego, con respecto a la concentración de boro, en el muestreo 2.

No. de muestra	Concentración de boro (mg L^{-1})	Restricción para el riego (Ayers y Westcot, 1985)	Tipo de agua (Doneen, 1975)
1	0.19	Sin restricción	Segura
2	0.48	Sin restricción	Segura
3	1.08	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
4	0.42	Sin restricción	Segura
5	0.91	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
6	0.92	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
7	1.81	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
8	0.91	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
9	0.81	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
10	0.94	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
11	1.11	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
12	1.55	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
13	1.42	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
14	1.25	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
15	0.71	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
16	0.67	Sin restricción	Posiblemente dañina
17	0.78	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
18	0.73	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
19	0.69	Sin restricción	Posiblemente dañina
20	0.80	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
21	0.82	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
22	0.67	Sin restricción	Posiblemente dañina
23	0.82	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
24	0.84	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
25	0.79	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
26	0.27	Sin restricción	Segura
27	0.73	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
28	0.73	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
29	0.74	Ligera a moderada	Posiblemente dañina

Cuadro 28. Continuación

No. de muestra	Concentración de boro (mg L^{-1})	Restricción para el riego (Ayers y Westcot, 1985)	Tipo de agua (Doneen, 1975)
30	0.83	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
31	1.25	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
32	1.06	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
33	0.73	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
34	0.87	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
35	0.98	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
36	0.86	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
37	0.69	Sin restricción	Posiblemente dañina
38	0.65	Sin restricción	Posiblemente dañina
39	0.90	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
40	0.00	Sin restricción	Segura
41	0.69	Sin restricción	Posiblemente dañina
42	0.67	Sin restricción	Posiblemente dañina
43	0.80	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
44	0.60	Sin restricción	Posiblemente dañina
45	0.86	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
46	0.61	Sin restricción	Posiblemente dañina
47	0.00	Sin restricción	Segura
48	0.66	Sin restricción	Posiblemente dañina
49	0.98	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
50	0.63	Sin restricción	Posiblemente dañina
51	1.02	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
52	0.79	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
53	0.53	Sin restricción	Posiblemente dañina
54	0.62	Sin restricción	Posiblemente dañina
55	0.08	Sin restricción	Segura
56	0.68	Sin restricción	Posiblemente dañina
57	1.09	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
58	0.17	Sin restricción	Segura
59	0.69	Sin restricción	Posiblemente dañina

Cuadro 28. Continuación

No. de muestra	Concentración de boro (mg L^{-1})	Restricción para el riego (Ayers y Westcot, 1985)	Tipo de agua (Doneen, 1975)
60	1.07	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
61	1.00	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
62	0.81	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
63	0.69	Sin restricción	Posiblemente dañina
64	0.63	Sin restricción	Posiblemente dañina
65	0.65	Sin restricción	Posiblemente dañina
66	1.15	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
67	0.79	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
68	0.67	Sin restricción	Posiblemente dañina
69	0.55	Sin restricción	Posiblemente dañina
70	0.70	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
71	0.78	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
72	0.67	Sin restricción	Posiblemente dañina
73	0.80	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
74	0.72	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
75	0.72	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
76	0.20	Sin restricción	Segura
77	0.72	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
78	0.81	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
79	0.73	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
80	0.00	Sin restricción	Segura
81	0.75	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
82	0.00	Sin restricción	Segura
83	0.69	Sin restricción	Posiblemente dañina
84	0.73	Ligera a moderada	Posiblemente dañina
85	0.60	Sin restricción	Posiblemente dañina
86	0.63	Sin restricción	Posiblemente dañina
87	0.62	Sin restricción	Posiblemente dañina
88	0.00	Sin restricción	Segura
89	0.00	Sin restricción	Segura

Cuadro 28. Continuación

No. de muestra	Concentración de boro (mg L^{-1})	Restricción para el riego (Ayers y Westcot, 1985)	Tipo de agua (Doneen, 1975)
90	0.51	Sin restricción	Posiblemente dañina
91	0.00	Sin restricción	Segura
92	0.00	Sin restricción	Segura
93	0.44	Sin restricción	Segura
94	0.00	Sin restricción	Segura
95	0.00	Sin restricción	Segura
96	0.40	Sin restricción	Segura
97	0.00	Sin restricción	Segura
98	0.18	Sin restricción	Segura

4.9.3 Sodio

El sodio no es considerado esencial para el crecimiento, desarrollo y reproducción de la mayoría de las plantas. Sin embargo, puede cumplir algunas funciones metabólicas y en cantidades pequeñas contribuye a mejorar el sabor de muchos cultivos. Su presencia en pastos y forrajes podría ser valioso para los herbívoros, que necesitan electrolitos como el sodio para el equilibrio iónico de tejidos y fluidos, y para la señalización eléctrica en las células nerviosas (Maathuis, 2014).

Ya se han descrito los riesgos por la presencia de altos niveles de sodio en la solución del suelo, que por consecuecia afecta al suelo y a los cultivos. Pero un segundo riesgo es la presencia del ion sodio en los tejidos vegetales que afecta negativamente la bioquímica celular. Los síntomas de toxicidad por sodio se manifiestan en quemaduras de las hojas a lo largo de sus bordes. Los cultivos más sensibles son las nueces, el aguacate, el frijol y los cítricos.

Para evaluar el agua de riego con respecto al sodio, Ayers y Westcot (1985) propusieron la siguiente clasificación: aguas con concentraciones menores a 3 $mmol_c$ L^{-1} son consideradas sin restricción para el riego, y aguas con concentraciones mayores a 3

$mmol_c\ L^{-1}$ son consideradas con algún tipo de restricción, cuando el riego se realiza por aspersión.

En el primer muestreo de la cuenca del río Pánuco, el 13% de las muestras no presentan ninguna restricción para el riego y el 87% presentan algún tipo de restricción (Figura 67). En el segundo muestreo el 89% de las muestras presentan algún tipo de restricción para el riego por la cantidad de sodio en el agua y solamente el 11% no presentan ningún tipo de restricción (Figura 68). Las muestras con mayor concentración están al inicio de la red hidrográfica, donde la concentración de contaminantes por las aguas residuales es mayor. La muestra con mayor contenido de sodio en el muestreo 1 está localizada en un canal de riego de Santa María Tonanitla. En el muestreo 2, la muestra con mayor concentración fue tomada en la lumbrera 13 del Canal Oriente de aguas negras. En el Cuadro 29 se describe la clasificación de cada punto de muestreo con respecto a la concentración de sodio en el agua de riego, que puede representar toxicidad para las plantas.

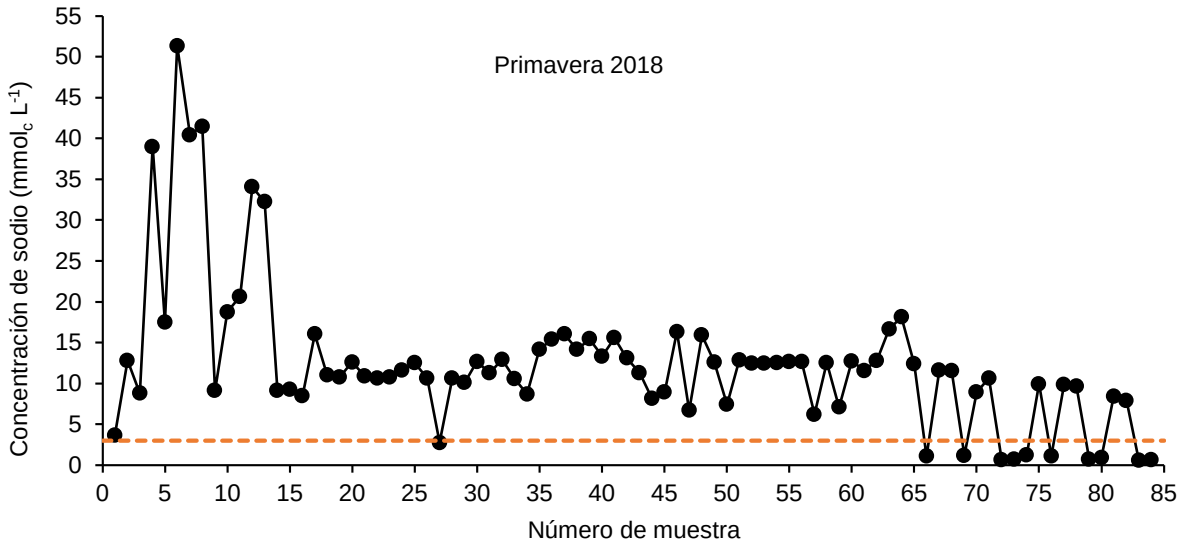


Figura 67. Concentración de sodio en las aguas del muestreo 1.

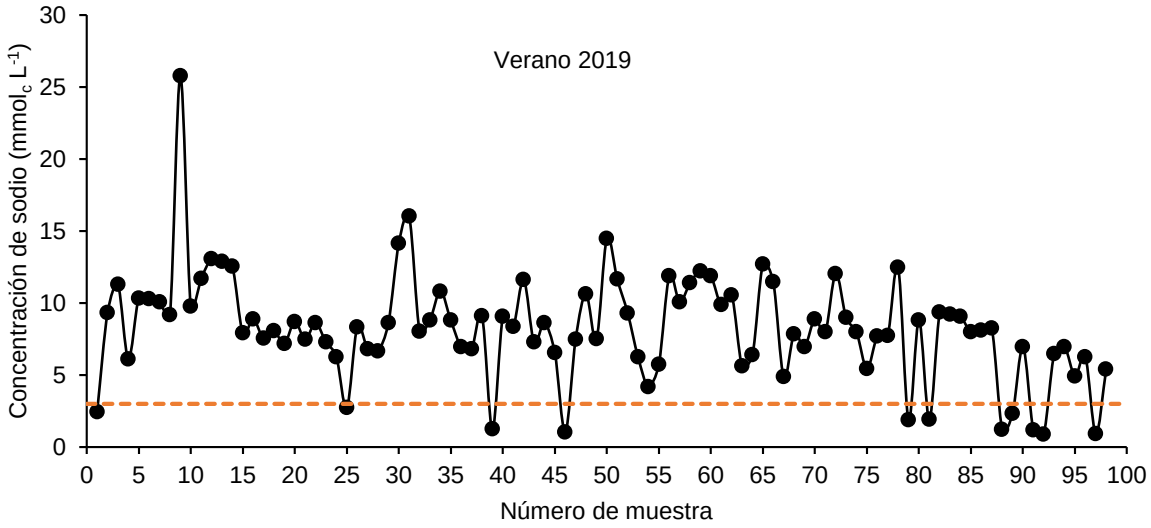


Figura 68. Concentración de sodio en las aguas del muestreo 2.

Ayers y Wescot (1985) mencionan que el sodio puede ser tóxico para las plantas cuando el agua para riego supera una concentración de 3 mmol$_c$ L^{-}, especialmente cuando el riego se aplica por aspersión, debido a que el ion puede ser absorbido por las hojas de las plantas. En el Cuadro 29 se muestra la clasificación de cada una de las muestras del primero y segundo muestreos con base en este criterio de toxicidad por sodio.

Cuadro 29. Clasificación de las aguas muestreadas en el alto y bajo Pánuco, con respecto a la concentración y toxicidad del sodio en el agua de riego.

Primer muestreo			Segundo muestreo		
No. de muestra	Na (mmol$_c$ L^{-1})	Restricción para el riego	No. de muestra	Na (mmol$_c$ L^{-1})	Restricción para el riego
1	3.63	Con algún tipo de restricción	1	2.44	Sin restricción
2	12.80	Con algún tipo de restricción	2	9.32	Con algún tipo de restricción
3	8.81	Con algún tipo de restricción	3	11.29	Con algún tipo de restricción
4	38.98	Con algún tipo de restricción	4	6.12	Con algún tipo de restricción
5	17.52	Con algún tipo de restricción	5	10.34	Con algún tipo de restricción
6	51.34	Con algún tipo de restricción	6	10.29	Con algún tipo de restricción
7	40.43	Con algún tipo de restricción	7	10.06	Con algún tipo de restricción
8	41.48	Con algún tipo de restricción	8	9.18	Con algún tipo de restricción
9	9.11	Con algún tipo de restricción	9	25.79	Con algún tipo de restricción
10	18.76	Con algún tipo de restricción	10	9.76	Con algún tipo de restricción

Cuadro 29. Continuación

Primer muestreo			Segundo muestreo		
No. de muestra	Na ($mmol_c\ L^{-1}$)	Restricción para el riego	No. de muestra	Na ($mmol_c\ L^{-1}$)	Restricción para el riego
11	20.66	Con algún tipo de restricción	11	11.71	Con algún tipo de restricción
12	34.06	Con algún tipo de restricción	12	13.07	Con algún tipo de restricción
13	32.24	Con algún tipo de restricción	13	12.90	Con algún tipo de restricción
14	9.12	Con algún tipo de restricción	14	12.55	Con algún tipo de restricción
15	9.29	Con algún tipo de restricción	15	7.93	Con algún tipo de restricción
16	8.47	Con algún tipo de restricción	16	8.89	Con algún tipo de restricción
17	16.03	Con algún tipo de restricción	17	7.56	Con algún tipo de restricción
18	11.06	Con algún tipo de restricción	18	8.07	Con algún tipo de restricción
19	10.79	Con algún tipo de restricción	19	7.19	Con algún tipo de restricción
20	12.62	Con algún tipo de restricción	20	8.71	Con algún tipo de restricción
21	10.90	Con algún tipo de restricción	21	7.47	Con algún tipo de restricción
22	10.67	Con algún tipo de restricción	22	8.62	Con algún tipo de restricción
23	10.76	Con algún tipo de restricción	23	7.29	Con algún tipo de restricción
24	11.61	Con algún tipo de restricción	24	6.27	Con algún tipo de restricción
25	12.54	Con algún tipo de restricción	25	2.72	Sin restricción
26	10.61	Con algún tipo de restricción	26	8.32	Con algún tipo de restricción
27	2.76	Sin restricción	27	6.83	Con algún tipo de restricción
28	10.64	Con algún tipo de restricción	28	6.65	Con algún tipo de restricción
29	10.11	Con algún tipo de restricción	29	8.61	Con algún tipo de restricción
30	12.67	Con algún tipo de restricción	30	14.16	Con algún tipo de restricción
31	11.26	Con algún tipo de restricción	31	16.02	Con algún tipo de restricción
32	12.95	Con algún tipo de restricción	32	8.03	Con algún tipo de restricción
33	10.57	Con algún tipo de restricción	33	8.82	Con algún tipo de restricción
34	8.70	Con algún tipo de restricción	34	10.83	Con algún tipo de restricción
35	14.14	Con algún tipo de restricción	35	8.80	Con algún tipo de restricción
36	15.42	Con algún tipo de restricción	36	6.95	Con algún tipo de restricción
37	16.03	Con algún tipo de restricción	37	6.80	Con algún tipo de restricción
38	14.16	Con algún tipo de restricción	38	9.11	Con algún tipo de restricción
39	15.44	Con algún tipo de restricción	39	1.24	Sin restricción
40	13.34	Con algún tipo de restricción	40	9.07	Con algún tipo de restricción
41	15.58	Con algún tipo de restricción	41	8.36	Con algún tipo de restricción

Cuadro 29. Continuación

Primer muestreo			Segundo muestreo		
No. de muestra	Na ($mmol_c\ L^{-1}$)	Restricción para el riego	No. de muestra	Na ($mmol_c\ L^{-1}$)	Restricción para el riego
42	13.09	Con algún tipo de restricción	42	11.63	Con algún tipo de restricción
43	11.32	Con algún tipo de restricción	43	7.28	Con algún tipo de restricción
44	8.16	Con algún tipo de restricción	44	8.62	Con algún tipo de restricción
45	8.92	Con algún tipo de restricción	45	6.54	Con algún tipo de restricción
46	16.35	Con algún tipo de restricción	46	1.02	Sin restricción
47	6.72	Con algún tipo de restricción	47	7.49	Con algún tipo de restricción
48	15.92	Con algún tipo de restricción	48	10.63	Con algún tipo de restricción
49	12.63	Con algún tipo de restricción	49	7.50	Con algún tipo de restricción
50	7.42	Con algún tipo de restricción	50	14.50	Con algún tipo de restricción
51	12.88	Con algún tipo de restricción	51	11.66	Con algún tipo de restricción
52	12.46	Con algún tipo de restricción	52	9.31	Con algún tipo de restricción
53	12.49	Con algún tipo de restricción	53	6.25	Con algún tipo de restricción
54	12.54	Con algún tipo de restricción	54	4.18	Con algún tipo de restricción
55	12.68	Con algún tipo de restricción	55	5.74	Con algún tipo de restricción
56	12.66	Con algún tipo de restricción	56	11.87	Con algún tipo de restricción
57	6.22	Con algún tipo de restricción	57	10.08	Con algún tipo de restricción
58	12.55	Con algún tipo de restricción	58	11.41	Con algún tipo de restricción
59	7.09	Con algún tipo de restricción	59	12.24	Con algún tipo de restricción
60	12.73	Con algún tipo de restricción	60	11.89	Con algún tipo de restricción
61	11.57	Con algún tipo de restricción	61	9.87	Con algún tipo de restricción
62	12.82	Con algún tipo de restricción	62	10.57	Con algún tipo de restricción
63	16.66	Con algún tipo de restricción	63	5.61	Con algún tipo de restricción
64	18.13	Con algún tipo de restricción	64	6.39	Con algún tipo de restricción
65	12.40	Con algún tipo de restricción	65	12.72	Con algún tipo de restricción
66	1.08	Sin restricción	66	11.48	Con algún tipo de restricción
67	11.61	Con algún tipo de restricción	67	4.87	Con algún tipo de restricción
68	11.56	Con algún tipo de restricción	68	7.86	Con algún tipo de restricción
69	1.20	Sin restricción	69	6.97	Con algún tipo de restricción
70	8.93	Con algún tipo de restricción	70	8.90	Con algún tipo de restricción
71	10.67	Con algún tipo de restricción	71	7.99	Con algún tipo de restricción
72	0.63	Sin restricción	72	12.05	Con algún tipo de restricción

Cuadro 29. Continuación

Primer muestreo			Segundo muestreo		
No. de muestra	Na ($mmol_c\ L^{-1}$)	Restricción para el riego	No. de muestra	Na ($mmol_c\ L^{-1}$)	Restricción para el riego
73	0.74	Sin restricción	73	8.99	Con algún tipo de restricción
74	1.24	Sin restricción	74	7.99	Con algún tipo de restricción
75	9.94	Con algún tipo de restricción	75	5.45	Con algún tipo de restricción
76	1.13	Sin restricción	76	7.70	Con algún tipo de restricción
77	9.86	Con algún tipo de restricción	77	7.74	Con algún tipo de restricción
78	9.69	Con algún tipo de restricción	78	12.49	Con algún tipo de restricción
79	0.72	Sin restricción	79	1.88	Sin restricción
80	0.94	Sin restricción	80	8.81	Con algún tipo de restricción
81	8.45	Con algún tipo de restricción	81	1.93	Sin restricción
82	7.90	Con algún tipo de restricción	82	9.35	Con algún tipo de restricción
83	0.60	Sin restricción	83	9.21	Con algún tipo de restricción
84	0.67	Sin restricción	84	9.06	Con algún tipo de restricción
			85	7.98	Con algún tipo de restricción
			86	8.10	Con algún tipo de restricción
			87	8.27	Con algún tipo de restricción
			88	1.23	Sin restricción
			89	2.32	Sin restricción
			90	6.96	Con algún tipo de restricción
			91	1.18	Sin restricción
			92	0.90	Sin restricción
			93	6.47	Con algún tipo de restricción
			94	6.97	Con algún tipo de restricción
			95	4.94	Con algún tipo de restricción
			96	6.27	Con algún tipo de restricción
			97	0.91	Sin restricción
			98	5.39	Con algún tipo de restricción

4.10 Fósforo de los fosfatos, nitrógeno de los nitratos y silicio

Otros elementos que contribuyen a evaluar la calidad del agua con fines agronómicos, y que fueron determinados en la presente investigación, son fósforo de los fosfatos ($P\text{-}PO_4$), nitrógeno de los nitratos ($N\text{-}NO_3$) y el silicio en forma de SiO_2.

4.10.1 Fósforo de los fosfatos ($P\text{-}PO_4$)

El fósforo es un macronutriente esencial para las plantas. Ningún otro elemento puede sustituir las funciones que realiza, y se requiere en grandes cantidades en las plantas, comparado con otros elementos. El fósforo estimula el desarrollo de las raíces, participa en los procesos de floración y formación de semillas, es esencial en la formación de ácidos nucleicos y otras funciones.

El problema del exceso de fósforo se presenta por lo general, debido al vertido de aguas residuales en los cuerpos de agua. Los fertilizantes, estiércoles, residuos industriales, domésticos y otros residuos, tienen altas concentraciones de fosfatos que provocan un problema ambiental frecuente: la eutrofización de los cuerpos de agua, o aporte excesivo de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno. Esto produce un crecimiento descontrolado de algas y efectos negativos en los cuerpos de agua como la reducción de los niveles de oxígeno.

La interacción del fósforo con la salinidad es altamente dependiente de la especie y etapa de desarrollo de la planta, concentración y tipo de salinidad, así como de la concentración de P en el sustrato (Grattan y Grieve, 1994; Pal y Singh, 1985).

La concentración de fosfatos en el agua de riego por lo general no excede 2 mg L^{-1}. En las aguas naturales su origen es la intemperización de rocas ígneas y lixiviación de la materia orgánica del suelo (Perez *et al*., 2019). En las aguas residuales el origen del exceso de fósforo es diverso, pero el aporte de fertilizantes y detergentes es determinante.

En el muestreo realizado tanto en primavera de 2018 como en verano de 2019 se observa que la mayoría de las muestras tienen un nivel alto de fósforo ($P\text{-}PO_4$), un pocentaje muy elevado supera 2 mg L^{-1}, que es el límite de la concentración más común

en las aguas de riego (Figura 69 y Figura 70). Si bien no se reporta como un riesgo para los cultivos, el 40.5% de las muestras supera los 2 mg L^{-1} de $P\text{-}PO_4$ en el primer muestreo, y el 71.4% supera esta concentración en el segundo muestreo.

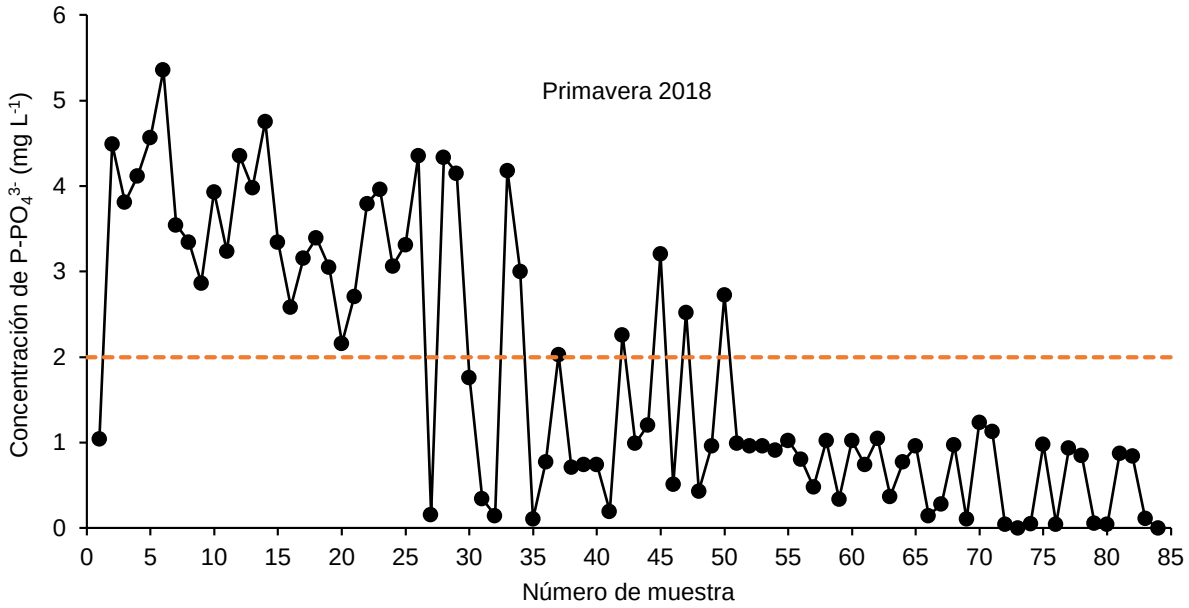


Figura 69. Concentración de fósforo de los fosfatos ($P\text{-}PO_4$) en las aguas del muestreo 1.

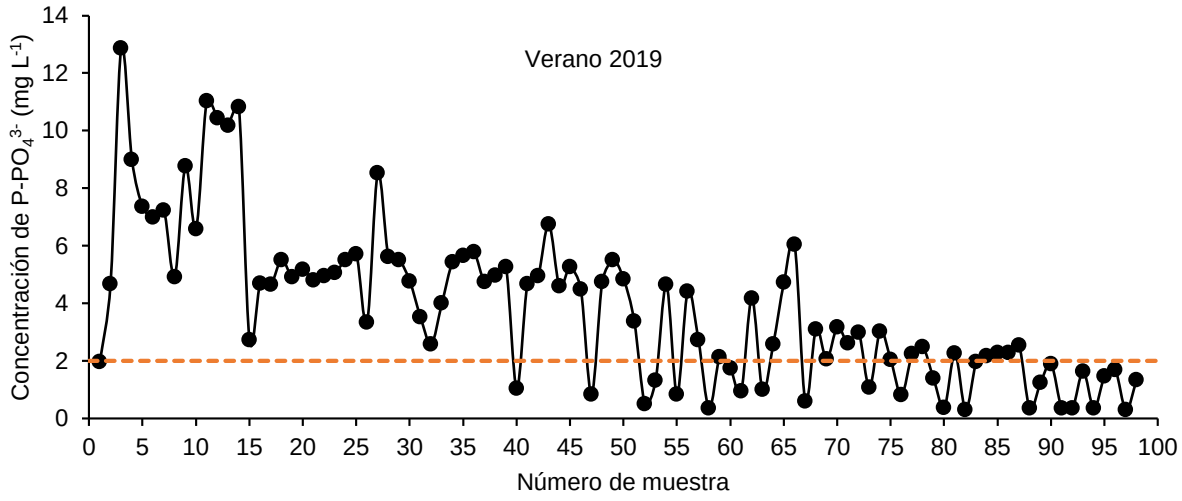


Figura 70. Concentración de fósforo de los fosfatos ($P\text{-}PO_4$) en las aguas del muestreo 2.

4.10.2 Nitrógeno de los nitratos ($N\text{-}NO_3$)

El nitrógeno es un elemento esencial en la nutrición de los cultivos. Las raíces de las plantas absorben el intrógeno del suelo en forma de nitratos (NO_3) o amonio (NH_4) dependiendo de diferentes factores, pero especialmente del tipo de cultivo. Aunque está presente en el suelo de manera natural, las cantidades disponibles de nitrógeno por lo general no son suficientes para satisfacer la demanda de los cultivos, y se hace necesario hacer aplicaciones de abonos orgánicos o fertilizantes químicos con alto contenido de nitrógeno. Sin embargo, la aplicación excesiva de fertilizantes con alto contenido de nitrógeno provoca un problema de contaminación por nitratos en el agua.

Debido a que se lixivian con facilidad, los nitratos pueden llegar hasta las aguas subterráneas donde se concentran en cantidades nocivas para los humanos y animales que la consumen. Los nitratos representan además un peligro ambiental cuando se almacenan en cuerpos de agua como lagos o lagunas, causando eutrofización.

Aunque el nitrógeno es indispensable para la nutrición de los cultivos, de acuerdo con Ayers y Westcot (1985), cuando se superan los 5 mg L^{-1} de $N\text{-}NO_3$ en el agua, algunos cultivos sensibles pueden ser afectados, y se debe considerar con ligera a moderada restricción para su uso en el riego. En el análisis químico de las muestras tomadas en el alto y bajo Pánuco, en la primavera del año 2018, se encontró que 27 muestras de un total de 84 superaron la concentración de 5 mg L^{-1}, es decir, un 32%. Los valores altos se atribuyen al aporte de fertilizantes en las zonas agrícolas como el Valle del Mezquital en Hidalgo. A partir de la muestra número 71 inicia la zona baja de la cuenca del Pánuco en donde la influencia de la zona agrícola es menor. En la Figura 71 se observa con claridad la diferencia de concentración de $N\text{-}NO_3$ a partir de la muestra 71 que corresponde a la presa Zimapán.

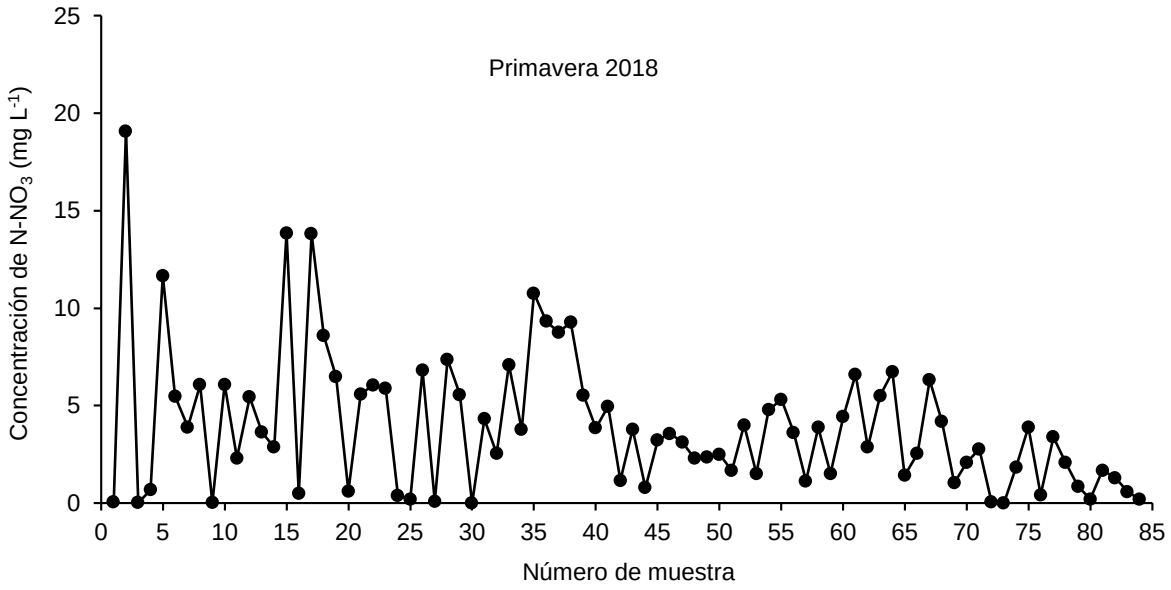


Figura 71. Concentración de nitrógeno de los nitratos ($N\text{-}NO_3$) en las aguas del primer muestreo

En el segundo muestreo, de acuerdo con la Figura 72, 79 muestras de un total de 98 superan la concentración de 5 mg L^{-1}, por lo que tienen restricción ligera a moderada para el riego, es decir, el 81% de las muestras. También se puede notar una menor concentración a partir de la muestra 84 que corresponde a la presa Zimapán. Esto se debe a que la influencia agrícola del Valle del Mezquital es menor a partir de este punto. Algunos sitios de muestreo como el 40 (Arroyo Tepetitlán), 82 (cauce de arroyo en Maconi, Qro.) 92 (río Huichihuayán en Axtlán de Terrazas, S.LP.), 95 (río Tampaón), 97 (río Tempoal), 94 (río Coy), presentaron valores muy bajos de nitratos (cercanos a cero) debido al poco o nulo aporte de fertilizantes derivados de las actividades agrícolas.

En el segundo muestreo los valores resultaron más altos que en el primero a pesar de que se esperaría una menor concentración por el aporte del agua de lluvia en el segundo muestreo. Sin embargo, el que resultaran mayores concentraciones en el verano del 2019 se atribuye a una mayor actividad agrícola y por consiguiente mayores aportes de nitrógeno.

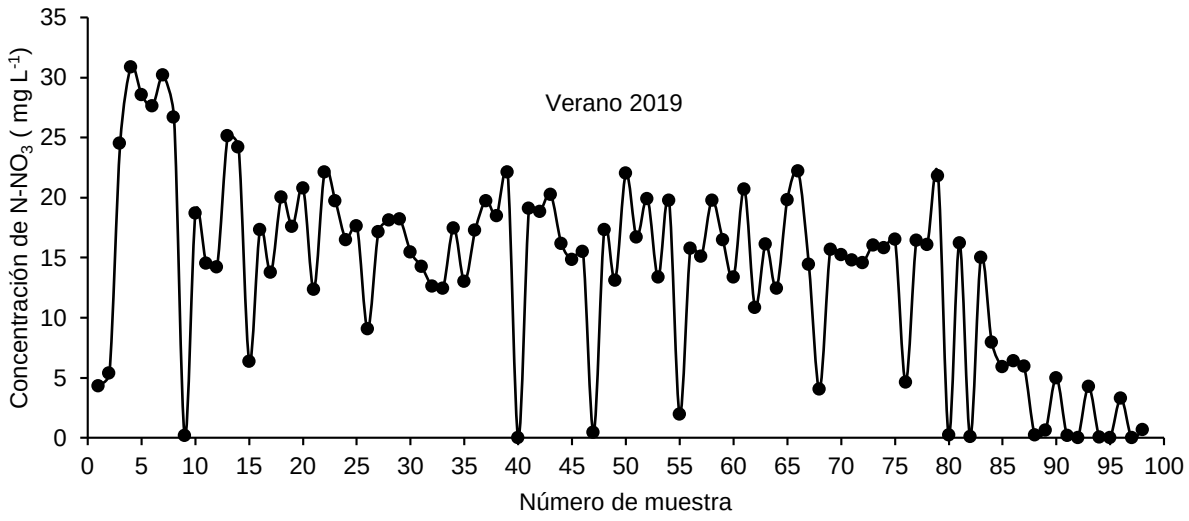


Figura 72. Concentración de nitrógeno de los nitratos ($N\text{-}NO_3$) en las aguas del segundo muestreo

4.10.3 Silicio

El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y está presente en la mayoría de las aguas debido a que es un constituyente común de las rocas ígneas, el cuarzo y la arena. Se encuentra normalmente como óxido de silicio (SiO_2) y como silicato (SiO_3^{2-}) (Mancilla-Villa, 2012).

El silicio no se considera tóxico para las plantas, pero es importante su determinación debido a que es un elemento necesario para el desarrollo de las plantas, y para aminorar el daño causado por otros elementos. En el suelo sí puede haber problemas cuando las cantidades son excesivas al punto de formar depósitos con la suficiente dureza para impedir la labranza y la infiltración del agua en el suelo.

En el primer muestreo realizado en la primavera del año 2018, el valor mínimo de SiO_2 fue de 0.76 mg L^{-1} en la muestra 79 que fue tomada en el río Claro (en Tamazunchale S.L.P), y el valor máximo fue de 6.45 mg L^{-1} en la muestra número 2, que fue tomada en un canal de distribución de aguas negras en el municipio de Zumpango (Figura 73). El promedio de todas las concentraciones en el alto y bajo Pánuco es de 3.67 mg L^{-1} en el primer muestreo.

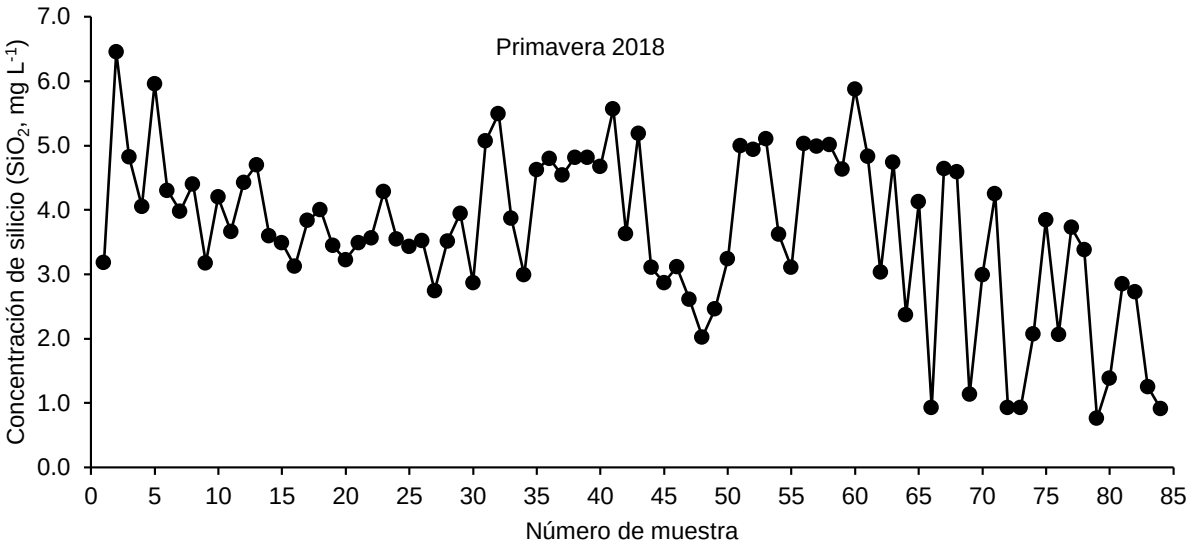


Figura 73. Concentración de silicio en el primer muestreo.

En el muestreo realizado durante el verano del año 2019 (Figura 74), se determinaron varias muestras con concentraciones de 0.0 mg L^{-1}, como la muestra número 40 (arroyo Tepetitlán), 47 (presa Dolores), 80 (agua de pozo en Maconi), 82 (agua de arroyo en Maconi), y 91 (río Huichihuayán). Aunque los valores encontrados de 0.0 mg L^{-1} pueden deberse a imprecisiones analíticas, lo cierto es que las concentraciones de SiO_2 en dichas muestras son muy bajas. El valor máximo de SiO_2 fue de 6.29 mg L^{-1} y el promedio de todas las muestras fue de 2.34 mg L^{-1}.

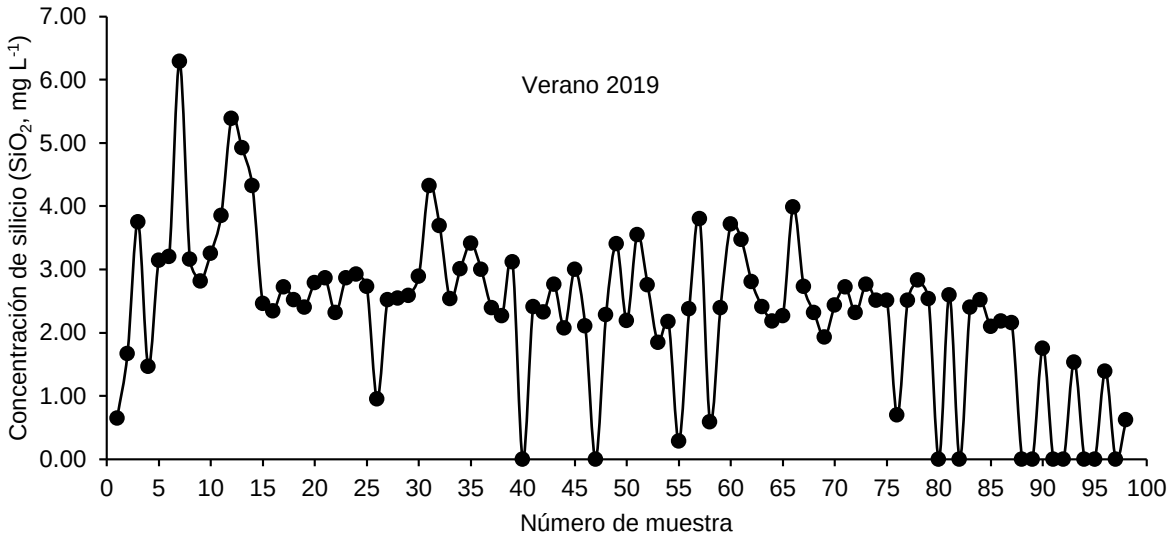


Figura 74. Concentración de silicio en el segundo muestreo.

Los valores de concentración de $P\text{-}PO_4$, $N\text{-}NO_3$ y SiO_2 en las aguas muestreadas de diferentes sitios en el alto y bajo Pánuco se presentan en el Cuadro 30, con el fin de que puedan ser consultados y comparados con otras investigaciones. Dentro del mismo cuadro se muestran los resultados obtenidos en ambos muestreos, sin embargo, debe aclararse que los números de muestra de uno y otro muestreo no corresponden al mismo sitio de donde se obtuvo la muestra.

Cuadro 30. Concentración de $P\text{-}PO_4$, $N\text{-}NO_3$ y SiO_2 en los sitios muestreados.

Primer muestreo				Segundo muestreo			
No. de muestra	$P\text{-}PO_4$ (mg L^{-1})	$N\text{-}NO_3$ (mg L^{-1})	SiO_2 (mg L^{-1})	No. de muestra	$P\text{-}PO_4$ (mg L^{-1})	$N\text{-}NO_3$ (mg L^{-1})	SiO_2 (mg L^{-1})
1	1.04	0.05	3.18	1	1.96	4.32	0.65
2	4.49	19.07	6.45	2	4.67	5.37	1.67
3	3.81	0.03	4.83	3	12.86	24.52	3.75
4	4.12	0.68	4.06	4	8.99	30.88	1.46
5	4.57	11.67	5.96	5	7.35	28.57	3.15
6	5.36	5.49	4.30	6	6.98	27.63	3.21
7	3.55	3.89	3.98	7	7.23	30.19	6.29
8	3.35	6.08	4.40	8	4.92	26.71	3.16
9	2.87	0.03	3.17	9	8.77	0.17	2.82

Cuadro 30. Continuación

Primer muestreo				Segundo muestreo			
No. de muestra	Fosfatos (mg L^{-1})	Nitratos (mg L^{-1})	Silicio (mg L^{-1})	No. de muestra	Fosfatos (mg L^{-1})	Nitratos (mg L^{-1})	Silicio (mg L^{-1})
10	3.93	6.09	4.20	10	6.58	18.71	3.25
11	3.24	2.31	3.67	11	11.03	14.52	3.85
12	4.35	5.44	4.43	12	10.43	14.22	5.39
13	3.98	3.63	4.70	13	10.18	25.14	4.92
14	4.76	2.87	3.60	14	10.83	24.23	4.33
15	3.35	13.85	3.49	15	2.73	6.36	2.46
16	2.59	0.50	3.12	16	4.69	17.34	2.34
17	3.16	13.81	3.84	17	4.64	13.77	2.72
18	3.39	8.58	4.00	18	5.51	20.04	2.52
19	3.05	6.48	3.45	19	4.92	17.62	2.40
20	2.16	0.61	3.23	20	5.17	20.78	2.79
21	2.71	5.58	3.49	21	4.79	12.37	2.86
22	3.80	6.05	3.56	22	4.94	22.11	2.32
23	3.97	5.88	4.28	23	5.07	19.72	2.86
24	3.07	0.38	3.55	24	5.51	16.51	2.93
25	3.31	0.19	3.43	25	5.71	17.63	2.73
26	4.35	6.82	3.52	26	3.33	9.07	0.95
27	0.16	0.10	2.74	27	8.52	17.14	2.52
28	4.34	7.37	3.51	28	5.61	18.13	2.55
29	4.15	5.57	3.95	29	5.51	18.20	2.58
30	1.76	0.00	2.87	30	4.77	15.46	2.89
31	0.35	4.33	5.07	31	3.53	14.27	4.33
32	0.15	2.55	5.49	32	2.58	12.63	3.69
33	4.18	7.09	3.87	33	4.00	12.46	2.54
34	3.01	3.78	2.99	34	5.44	17.46	3.01
35	0.11	10.77	4.62	35	5.66	13.00	3.41
36	0.77	9.32	4.80	36	5.79	17.29	3.00
37	2.03	8.77	4.54	37	4.74	19.74	2.39
38	0.71	9.28	4.82	38	4.97	18.49	2.27
39	0.74	5.55	4.82	39	5.26	22.15	3.12
40	0.74	3.85	4.67	40	1.04	0.00	0.00

Cuadro 30. Continuación

Primer muestreo				Segundo muestreo			
No. de muestra	Fosfatos (mg L^{-1})	Nitratos (mg L^{-1})	Silicio (mg L^{-1})	No. de muestra	Fosfatos (mg L^{-1})	Nitratos (mg L^{-1})	Silicio (mg L^{-1})
41	0.20	4.97	5.57	41	4.67	19.12	2.41
42	2.26	1.17	3.63	42	4.94	18.83	2.33
43	0.99	3.78	5.19	43	6.75	20.27	2.77
44	1.21	0.80	3.11	44	4.59	16.18	2.07
45	3.21	3.23	2.87	45	5.26	14.83	3.00
46	0.51	3.56	3.12	46	4.50	15.52	2.11
47	2.52	3.13	2.61	47	0.84	0.46	0.00
48	0.43	2.29	2.02	48	4.74	17.31	2.28
49	0.96	2.35	2.46	49	5.51	13.12	3.40
50	2.73	2.51	3.24	50	4.84	22.03	2.19
51	0.99	1.67	4.99	51	3.38	16.73	3.55
52	0.96	4.00	4.94	52	0.50	19.92	2.76
53	0.96	1.52	5.10	53	1.32	13.38	1.84
54	0.91	4.78	3.62	54	4.64	19.77	2.17
55	1.02	5.33	3.11	55	0.84	1.95	0.28
56	0.81	3.62	5.03	56	4.42	15.79	2.38
57	0.48	1.13	4.99	57	2.73	15.09	3.80
58	1.02	3.89	5.01	58	0.35	19.75	0.59
59	0.34	1.52	4.63	59	2.14	16.51	2.39
60	1.02	4.43	5.88	60	1.74	13.36	3.72
61	0.74	6.60	4.83	61	0.94	20.71	3.47
62	1.05	2.87	3.03	62	4.17	10.87	2.80
63	0.37	5.51	4.74	63	0.99	16.15	2.41
64	0.77	6.72	2.37	64	2.58	12.46	2.18
65	0.96	1.42	4.12	65	4.72	19.82	2.27
66	0.15	2.55	0.93	66	6.03	22.20	3.99
67	0.28	6.32	4.64	67	0.60	14.44	2.73
68	0.97	4.18	4.59	68	3.10	4.05	2.32
69	0.11	1.03	1.13	69	2.06	15.69	1.93
70	1.24	2.08	2.99	70	3.18	15.24	2.44
71	1.13	2.78	4.25	71	2.61	14.81	2.72

Cuadro 30. Continuación

Primer muestreo				Segundo muestreo			
No. de muestra	Fosfatos (mg L^{-1})	Nitratos (mg L^{-1})	Silicio (mg L^{-1})	No. de muestra	Fosfatos (mg L^{-1})	Nitratos (mg L^{-1})	Silicio (mg L^{-1})
72	0.05	0.06	0.93	72	2.98	14.59	2.32
73	0.00	0.00	0.93	73	1.07	16.06	2.77
74	0.05	1.85	2.07	74	3.03	15.82	2.51
75	0.98	3.89	3.84	75	2.04	16.54	2.51
76	0.05	0.42	2.07	76	0.82	4.65	0.69
77	0.94	3.39	3.73	77	2.24	16.44	2.51
78	0.85	2.07	3.38	78	2.48	16.08	2.83
79	0.06	0.86	0.76	79	1.39	21.82	2.54
80	0.04	0.20	1.39	80	0.37	0.24	0.00
81	0.87	1.68	2.85	81	2.26	16.23	2.60
82	0.84	1.30	2.73	82	0.30	0.09	0.00
83	0.11	0.59	1.25	83	1.96	15.04	2.40
84	0.00	0.19	0.91	84	2.16	7.96	2.52
				85	2.28	5.91	2.10
				86	2.28	6.42	2.18
				87	2.53	5.95	2.16
				88	0.35	0.24	0.00
				89	1.24	0.63	0.00
				90	1.89	5.01	1.76
				91	0.35	0.19	0.00
				92	0.35	0.00	0.00
				93	1.64	4.25	1.54
				94	0.35	0.07	0.00
				95	1.47	0.00	0.00
				96	1.69	3.30	1.39
				97	0.30	0.00	0.00
				98	1.34	0.70	0.62

5 CONCLUSIONES

1. Por efecto de la alta concentración de sodio, bicarbonatos y cloruros provenientes de las aguas residuales que aportan a la red hidrográfica de la región hidrológica 26 Pánuco, las aguas en general son clasificadas como bicarbonatadas sódicas cloruradas. Esto fue confirmado por la pendiente de la relación funcional mg L^{-1} = **a***f*(CE), que fue de 0.6052 y 0.6569, valores que corresponden al tipo de aguas bicarbonatadas. La clasificación realizada con los diagramas de Piper y Durov también confirmaron que se trata de este tipo de aguas.
2. El riesgo de salinidad es muy alto debido a que en más del 88% de las muestras se supera la conductividad eléctrica de 750 µS cm^{-1}; en el 89% de las muestras se supera los 3 $mmol_c$ L^{-1} de salinidad efectiva y en el 87% de las muestras se superan los 3 $mmol_c$ L^{-1} de salinidad potencial.
3. En cuanto al riesgo de disminución en la permeabilidad del suelo por efecto de la sodicidad, existe un riesgo que debe tomarse en cuenta en las prácticas de manejo por los usuarios de aguas residuales en la agricultura, debido a que al menos el 70% de las muestras presentan riesgo de ligero a moderado riesgo en la disminución de la permeabilidad del agua en el suelo.
4. Las sales hipotéticas que predominan en el alto y bajo Pánuco, y que son típicas de las aguas residuales industriales y urbanas son: $NaCl > NaHCO_3 > Mg(HCO_3)_2 > Ca(HCO_3)_2$. Este tipo de sales, sobre todo el NaCl, son las sales más frecuentes en suelos y aguas freáticas salinas y son muy tóxicas para las plantas por su alta solubilidad.
5. Del cálculo de la relación catiónica de la estabilidad estructural (CROSS) en su ecuación optimizada ($CROSS_{opt}$) se concluye que los valores obtenidos son mayores que los obtenidos mediante la RAS_{or}, también son mayores que los obtenidos con la RAS_{corr} y en muchos casos también mayor que la RAS_{aj}, debido a que al agregar la concentración del ion K^+, el numerador de la ecuación aumenta en las muestras en las que los valores de K^+ son elevados. Además, la corrección del ion Mg^{2+} por un factor que toma en cuenta la disminución del poder floculante del magnesio, modifica la concentración del ion Mg^{2+} en el denominador y eleva los valores de la $CROSS_{opt}$.

6 RECOMENDACIONES

Se requiere manejo de suelos mediante aportes de mejoradores como el sulfato de calcio ($CaSO_4$), debido a que 72 muestras de 84 en el primer muestreo y 87 muestras de 98 en el segundo muestreo presentan riesgos alto y muy alto de salinidad, es decir, presentan valores de conductividad eléctrica superiores a 750 $\mu S\ cm^{-1}$, además de los índices de sodicidad elevados. Sin embargo, debido a la diversidad de características y propiedades de los diferentes tipos de suelos en el alto y bajo Pánuco, se sugiere que se diseñen las dosis apropiadas de mejoradores químicos tomando en cuenta los valores máximos y mínimos del porcentaje de sodio intercambiable. Esa es la razón de que en esta investigación se hayan comparado las tres formulaciones de la RAS: RAS_{or}, RAS_{aj}, RAS_{corr} y la relación catiónica de la estabilidad estructural ($CROSS_{opt}$).

7 LITERATURA CITADA

Aboukarima, A.M., M. A. Al-Sulaiman, and M.S.A. El Marazky. 2018. Effect of sodium adsorption ratio and electric conductivity of the applied water on infiltration in a sandy-loam soil. Water S.A. 44: 105-110.

Adams, F. 1971. Ionic concentrations and activities in soil solutions. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35: 420-426.

Ahmed, B. A., T. Yamamoto, V. Rasiah, M. Inoue, and H. Anyoji. 2007. The impact of saline water irrigation management options in a dune sand on available soil water and its salinity. *Agricultural water management*, 88(1-3): 63-72.

Alhammadi, M.S., and D.M. Miller. 2006. Effect of ionic strength and sodium adsorption ratio on the flocculation/dispersion of two surface soils from eastern Arkansas. Soil Science 171(12): 960-967.

Ali, F., A. Ali, H. Gul, M. Sharif, A. Sadiq, A. Ahmed, A. Ullah, A. Mahar, and S.A. Kalhoro. 2015. Effect of Boron Soil Application on Nutrients Efficiency in Tobacco Leaf. American Journal of Plant Sciences. 6: 1391-1400.

Alva, A. K., M. E. Sumner and W. P. Miller. 1991. Relationship between ionic strength and electrical conductivity for soil solutions. Soil Sci. 152: 239-242.

Alvarado, R. 2002. Principios de termodinámica. 1ra Edición. Grupo Editorial Esfinge. 232p.

APHA (American Public Health Association). 1998. Standard methods for examination of water and wastewater. American Water Works Association, WPCF (Water Pollution Control Federation), Washington D.C., USA. 1035 pp.

Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., y Cervantes-Jaimes, C. E. 2020. Los retos del agua en México/Water challenges in Mexico. Tecnología y ciencias del agua. 11(2): 341-371.

Ayers, R.S. y Westcot, D.W. 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev.1, Roma, 174 p.

Beletse, Y. G., J. G. Annandale., J. M. Steyn., I. Hall and G. J. Levy. 2008. Can crops be irrigated with sodium bicarbonate Rich CBM deep aquifer water? Theorical and field evaluation. Ecol. Eng: 1-11.

Bolaños, L., Lukaszewski, K., Bonilla, I., & Blevins, D. 2004. Why boron? Plant Physiology and Biochemistry. 42(11): 907-912.

Bower, C. A. 1959. Cation-exchange equilibria in soils affected by sodium salts. *Soil Science*. 88(1): 32-35.

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.

Bower, C. A., G. Ogata, and J. M. Tucker. 1968. Sodium Hazard of Irrigation Waters as Influenced by Leaching Fraction and by Precipitation or Solution of Calcium Carbonate. Soil Sci. 106(1): 29-34.

Bower, C. A., and M. Maasland. 1963. Sodium hazard of Punjab ground waters. In Symposium on Waterlogging and Salinity in West Pakistan (Lahore: West Pakistan Engineering Congress.

Bower, C. A. 1969. Origin, properties, and amelioration of sodic soils. Agrokémia es Talajtan. 18: 69-72.

Bresler, E., B. L. MacNeal, and D.L. Carter. 1982. Saline and sodic soils. Priciples-Dynamics-Modeling. Springer-Verlag. 236p.

Buelow M.C., K. Steenwerth, S.J. Parikh. 2015. The effect of mineral-ion interactions on soil hydraulic conductivity. Agr Water Manage. 152:277-85.

Camacho B. A. 2019. Calidad de las aguas residuales urbano-industriales del estado de Oaxaca, México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Texcoco, México. 291 p.

Camacho-Ballesteros, A., H. M. Ortega-Escobar, E. I. Sánchez-Bernal, y A. Can-Chulim. 2020. Indicadores de calidad físico-química de las aguas residuales del estado de Oaxaca, México. Terra Latinoamericana. 38(2): 361-375.

Can, Á., C. Ramírez, H.M. Ortega, C. Trejo, y J. Cruz. 2008. Evaluación de la relación de adsorción de sodio en las aguas del río Tulancingo, estado de Hidalgo, México. Terra Latinoamericana. 26(3): 243-252.

Carrasquilla-Batista, A., A. Chacón-Rodríguez, K. Núñez-Montero, O. Gómez-Espinoza, J. Valverde, y M. Guerrero-Barrantes. 2016. Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgal. Revista Tecnología en Marcha, 29(5): 33-45.

Cardona, D.F., J.L. González, M. Rivera, E.H. Cárdenas. 2013. Aplicación de la regresión lineal en un problema de pobreza. Rev. Interacción. 12: 73-84.

Cath, T. Y., A. E. Childress, and M. Elimelech. 2006. Forward osmosis: principles, applications, and recent developments. Journal of membrane science. 281(1-2): 70-87.

Chahal, R. S. and R. N. Kundu. 1985. Ameliorating effects of pyrites as influenced by $CaCO_3$ in saline sodic soils. J. Indian Soc. Soil Sci. 33: 635-640.

Chang, R. 2017. Quimica inorgánica. 12ª. Ed, Mc Graw Hill.

Chartres, C.J. 1993. Sodic soils - an introduction to their formation and distribution in Australia. Australian Journal of Soil Research. 31(6): 751.

Chirinos I. J., y M. E. Mattiazzo. 2004. Variación de la conductividad hidráulica en suelos saturados, en función de la concentración de sodio presente en residuo agroindustrial. Revista Facción Agronómica. 21: 1-11.

Choudhary, O. P., B.S. Ghuman, Bijay-Singh, N. Thuy, y R. J. Buresh. 2011. Effects of long-term use of sodic water irrigation, amendments and crop residues on soil properties and crop yields in rice–wheat cropping system in a calcareous soil. Field Crops Research. 121(3): 363-372.

Geilfus, C. M. 2018. Chloride: from nutrient to toxicant. Plant and Cell Physiology. 59(5): 877-886.

Clarke, R. and J. King. 2004. The Water Atlas. New Press, New York, NY.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2018. Estadísticas del agua en México, edición 2018. Gobierno Federal, Ciudad de México, México.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2017. Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. Año Agrícola 2015-2016. Gobierno Federal, Ciudad de México, México.

Conley, D. J., and J.C. Carey. 2015. Silica cycling over geologic time. Nature Geoscience. 8(6): 431-432.

Coskun, D., D. T. Britto, W. Q. Huynh, and H. J. Kronzucker. 2016. The Role of Silicon in Higher Plants under Salinity and Drought Stress. Frontiers in Plant Science, 7.

Crescimanno, G. and P. Garofalo. 2006. Management of irrigation with saline water in cracking clay Soils. Soil Science Society American Journal. 70: 1774-1787.

Custodio, E y M, Llamas. 1983. Hidrología subterránea. Tomo I. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España. 1157p.

Dantas, B.F., L. de Sá Ribeiro, and C. A. Aragao. 2007. Germination, initial growth and cotyledon protein content of bean cultivars under salinity stress. *Rev Bras de Sementes.* 29: 106-110.

Dell B. and L. Huang. 1997. Physiological response of plants to low boron. Plant and Soil. 193: 103-120.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2018. ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos.

Doneen, L. D. 1975. Water quality for irrigated agricultural. In: A. Poljakoff, Mayber A., and J. Gale (eds). Plant in Saline Environments. (pp. 56-76). Springer-Verlang. New York. U.S.A.

Eaton, F. M. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. Soil Sci. 69: 123-133.

Emerson, W. W. 1977. Physical properties and structure. In: Soil Factors in Crop Production in Semi-arid Environments. Russell, J. S., and E. L. Greacen (eds.). Queensland University Press, Brisbane, Australia, pp. 78-104.

Endo, T., S. Yamamoto, T. Honna, and A. E. Eneji. 2002. Sodium-calcium exchange selectivity as influenced by clay minerals and composition. *Soil Science*. 167(2): 117-125.

Espejel M. J. 2019. La Zona Metropolitana del Valle de México: arreglos formales y fragmentación. Economía, sociedad y territorio. 19(60): 241-271.

Evangelou, V. P., and F.J Coale. 1987. Dependence of the Gapon Coefficient on Exchangeable Sodium for Mineralogically Different Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 51(1): 68-72.

Farahani, E., H. Emami, A. Fotovat, and R. Khorassani. 2019. Effect of different K: Na ratios in soil on dispersive charge, cation exchange and zeta potential. *European journal of soil science.* 70(2): 311-320.

Fassbender, H. W, y E. Bornemisza. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA. 380p.

Fox, R.H. 1968. The effect of calcium and pH on boron uptake from high concentrations of boron by cotton and alfalfa. Soil Sci. 106:435-439.

Frenkel, H., Hadas, A., and Jury, W. A. 1978. The effect of salt precipitation and high sodium concentrations on soil hydraulic conductivity and water retention. *Water Resources Research*. 14(2): 217-222.

Furcal-Beriguete, P., and A. Herrera-Barrantes. 2013. Efecto del silicio y plaguicidas en la fertilidad del suelo y rendimiento del arroz. Agronomía Mesoamericana. 24(2): 357-364.

García-Salazar, E. M. 2019. El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional. 29(54): 1-34.

Gillman, G. P. and L. C. Bell. 1978. Soil solution studies on weathered soils from tropical North Queensland. Australian Journal of Soil Research. 16: 67-77.

Gomes-Filho, E., C.R.F. Machado, J.H. Costa, A.C. da Silva, L.M. da Guia Silva, C.F. de Lacerda, J.T. Prisco. 2008. Cowpea ribonuclease: properties and effect of NaCl-salinity on its activation during seed germination and seedling establishment. *Plant Cell Rep.* 27: 147-157

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

Grattan, S. R. and C. M. Grieve. 1994. Mineral nutrient and response by plants grown in saline environments. In: M. Pessarakly (ed.) Handbook of plant and crops stress. Marcel Decker Inc. New York. pp: 203-226.

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.

Gupta, I. C. 1983. Concept of residual sodium carbonate in irrigation waters in relation to sodic hazard in irrigated soils. Curr. Agric. 7(3/4): 97-113.

Gupta, U. C., Y. W. Jame, C. A. Cambell, A. J. Leyshon, and W. Nicholaichuk. 1985. Boron toxicity and deficiency: A. Review. Can. J. Soil Sci. 65(3): 381-409.

Haynes, R. J. 2014. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 177(6): 831-844.

Heidarpour, M., B. J. Mostafazadeh-Fard, Abedi Koupai, and R. Malekian. 2007. The effects of treated wastewater on soil chemical properties using subsurface and surface irrigation methods. Agricultural Water Management. 90: 87-94.

Herrera-Rodríguez M.B., A. González-Fontes, J. Rexach, J.J. Camacho-Cristóbal, J. M. Maldonado, M.T. Navarro-Gochicoa. 2010. Role of boron in vascular plants and response mechanisms to boron stress. Plant Stress. 4: 115-122.

Hoogesteger, J. 2018. The ostrich politics of groundwater development and neoliberal regulation in Mexico. Water Alternatives. 11(3): 552-571.

Hussein, A. H. and M. C. Rabenhorst. 2001. Tidal inundation of transgressive coastal areas: pedogenesis of salinization and alkalinization. Soil Science Society American Journal. 65(2): 536-544.

INEGI. 1981. Síntesis geográfica del estado de Tamaulipas.

Jalali, M., T. M. Arian, and F. Ranjbar. 2020. Selectivity coefficients of K, Na, Ca, and Mg in binary exchange systems in some calcareous soils. *Environmental Monitoring and Assessment*. 192(2): 80.

James, D. W., R. J. Hanks, and J. J. Jurinak. 1982. Modern irrigated soils. A Wiley-Interscience Publication. 235p.

Jurinak, J. J., y 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. 1963. Use of saline irrigation water. Soil Sci. 95: 385-391.

Khan M.A, and Y. Rizvi. 1994. Effect of salinity, temperature and growth regulators on the germination and early seedling growth of Atriplex griffithii var. Stocksii. Can J Bot. 72: 475-479

Kovács, J., and S. Czigány. 2017. Soils and Weathering. International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology: 1-8.

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.

Kumar, U. M., A. K. Bhardwaj, D. N. Warrington, D. Goldstein, A. T. Bar and G. J. Levy. 2008. Changes in Soil Hydraulic Conductivity, Runoff, and Soil Loss due to Irrigation with Different Types of Saline-Sodic Water. Geoderma. 144:509-516.

Leffelaar, P. A., A. Kamphorst, and R. Pal. 1983. Nomographic Estimation of Activity Coefficients from the Electrical Conductivity Data of Soil Extracts. J. Indian Soc. Soil Sci. 31:20-27.

López, G. A. D., H. M. Ortega E., C. Ramírez A., E. I. Sánchez B., A. Can C., D. J. Gómez M. y R. E. Vázquez A. 2016. Caracterización fisicoquímica del agua residual urbano-industrial y su importancia en la agricultura. Tecnología y Ciencias del Agua. 7: 139-157.

López, G. A. D. 2015. Caracterización físico-química del agua de los sistemas hidrográficos (Lerma-Chapala-Santiago) y (Alto-Bajo Pánuco). Tesis de doctorado en ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, edo. de México. 291 p.

Maathuis, F. J. 2014. Sodium in plants: perception, signalling, and regulation of sodium fluxes. Journal of Experimental Botany. 65(3): 849-858.

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

Mancilla-Villa, O. R. 2012. Índices de salinidad y calidad de las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, edo. de México. 263 p.

Mancilla-Villa, O. R., A. L. Bautista-Olivas, H. M. Ortega-Escobar, C. Ramírez-Ayala, A. L. Reyes-Ortigoza, H. Flores Magdaleno, D. R. González-Eguiarte, and Guevara R. D. Gutiérrez. 2014. Contenido de boro en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Tecnología y Ciencias del Agua. 5(5): 97-109.

Mau, Y., and A. Porporato. 2015. A dynamical system approach to soil salinity and sodicity. *Advances in Water Resources*. 83: 68-76.

McNeal, B. L., and N. T. Coleman. 1966. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. Soil Science Society of America Journal. 30(3): 308-312.

Mendoza, S. 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, edo. de México, México. 195 p.

Mihelcic, J. R., and J. B. Zimmerman. 2012. Química. In J. R. Mihelcic, y J. B. Zimmerman. Ingeniería ambiental: fundamentos, sustentabilidad y diseño. (pp. 52-104). México DF, México: Alfaomega.

Montesillo, J. L. 2017. México, entre la carencia y la abundancia de agua, Revista Digital Universitaria, 1 de febrero de 2017. 18(2): 1-13.

Mullins, C. E., D. A. Macleod, K. H. Northcote, J. M. Tisdall, and I. M. Yong. 1990. Hard setting soils: Behavior, occurrence, and management. In: Soil Degradation: Advances in Soil Science. R. Lal, and B. A. Stewart (eds.). CRC Press, New York, NY, pp. 37-108.

Munns, R., and M. Tester. 2008. Mechanisms of Salinity Tolerance. Annu. Rev. Plant Biol. 59: 651-681.

Naidu, R. and P. Rengasamy. 1993. Ion interaction and constraints to plant nutrition in Australian sodic soils Aust. J. Soil Sci. 28(3): 410-411.

Nasr, P., and Sewilam, H. 2018. Fertilizer drawn forward osmosis for irrigation. *Emerging Technologies for Sustainable Desalination Handbook*. 433-460.

Nwite, J. C., B. O. Unagwu, C. C. Okolo, C. A. Igwe, and T. Wakatsuki. 2019. Improving soil silicon and selected fertility status for rice production through rice-mill waste application in lowland sawah rice field of southeastern Nigeria. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture. 8(1): 271-279.

Ortega, E. H. M. 1983. Algunos aspectos teóricos de carácter geoquímico, físico-químico y químico involucrados en la génesis de los suelos de salinidad sódica. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Hidrociencias, 65 p.

Ortega E. H. M. y E. García. 1994. La formación geoquímica de los suelos sódicos y sus propiedades. Transac. on 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México July 10-16, 1994. 3: 279-291.

Ortega, S. F. y G. R. Orellana. 2007. El riego con aguas de mala calidad en la agricultura urbana. Aspectos a considerar. II. Aguas residuales urbanas. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 16(1): 41-44.

Oster, J., G. Sposito, and C. Smith. 2016. Accounting for potassium and magnesium in irrigation water quality assessment. California Agriculture. 70(2): 71-76.

Oster, J. D. 1994. Irrigation with poor quality water. Agricultural water management. 25(3): 271-297.

Oster, J. D., and F. W. Schroer. 1979. Infiltration as influenced by irrigation water quality. Soil Science Society of America Journal. 43(3): 444-447.

Oster, J. D., and G. Sposito. 1980. The Gapon Coefficient and the Exchangeable Sodium Percentage-Sodium Adsorption Ratio Relation. *Soil Science Society of America Journal.* 44(2): 258-260.

Osterrieth, M., L. Frayssinet, L. Benvenuto, R. Donna, M. Paolicchi, C. Frayssinet, N. Borrelli, H. Fernández, E. M. Morel. 2019. Sílice amorfa y biogeoquímica del silicio en secuencias pedosedimentarias del sudeste bonaerense. V Reunión Argentina de Geoquímica de la Superficie. La Plata, 12-14 de junio de 2019.

Othman Y, G. Al-Karaki, A. R. Al-Tawaha, and A. Al-Horani. 2006. Variación en la germinación y la absorción de iones en genotipos de cebada en condiciones de salinidad. *World J Agric Sci.* 2: 11-15.

Pal, B., and U. V. Singh. 1985. Effect of Phosphorus on yield and nutrient content en Berseem (Trifollium alexandrium L.) irrigated with saline waters. J. Indian Soc. Soil Sci. 33: 646-653.

Pasricha, N. S. 1987. Predicting ionic strength from specific conductance in aqueous soil solutions. Soil Science. 143: 92-96.

Parida, A. K., and A. B. Das. 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and environmental safety*. 60(3): 324-349.

Parihar, P., S. Singh, R. Singh, V. P. Singh, and S. M. Prasad. 2015. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 22(6): 4056-4075.

Pérez, D. J. P., 2018. Calidad agronómica del sistema hidrográfico Lerma-Santiago-Pacífico y de las aguas que riegan el Valle del Mezquital, Hidalgo, Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Texcoco, México. 444 p.

Pescod, M.B. 1992. Wastewater treatment and use in agricultural. Irrigation and drainage. Paper 47. FAO. Rome. pp:114-117.

Phogat, V., D. Mallants, J. W. Cox, J. Šimůnek, D. P. Oliver, and J. Awad. 2020. Management of soil salinity associated with irrigation of protected crops. *Agricultural Water Management*. 227: 105845.

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.

Pratt, P. F., L. D. Whittig, and B. L. Grover. 1962. Effect of pH on the Sodium-Calcium Exchange Equilibria in Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 26(3): 227-230.

Pupisky, H. and I. Shainberg. 1979. Salt effects on the hydraulic conductivity on the sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 429-433.

Rahil, M. H., and V. Z. Antonopoulos 2007. Simulating soil water flow and nitrogen dynamics in a sunflower field irrigated with reclaimed wastewater. Agric. Water Manage. 92: 142-150.

Rejili, M., A. M. Vadel, A. Guetet, and M. Neffatti. 2007. Effect of NaCl on the growth and the ionic balance K^+/Na^+ of two populations of Lotus creticus (L. Papilionaceae). *South African Journal of Botany*. 73(4): 623-631.

Rengasamy P. 2018. Irrigation Water Quality and Soil Structural Stability: A Perspective with Some New Insights. Agronomy. 8(5):72.

Rengasamy, P., and A. Marchuk. 2011. Cation ratio of soil structural stability (CROSS). Soil Research. 49(3): 280-285.

Rodier, J. 1978. Análisis de las aguas. Barcelona, España. Omega, pp. 186-191.

Richards, L. A., L. E. Allison, J. W. Brown, H. E. Hayward, L. Bernstein, M. Fireman, G. A. Pearson, L. W. Wilcox, C. A. Bower, J. T. Hatcher, y R. C. Reeve. 1974. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos (sexta edición). L. A. Richards, editor. Laboratorio de Salinidad, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. Limusa, México.

Robarge, W. P., A. Edwards, and B. Johnson. 1983. Water and waste water analysis for nitrate via nitration of salicylic acid. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 14: 1207-1215.

Ryan, J., S. Miyamoto and J. L. Stroehlein. 1977. Relation of solute and sorbed boron to the boron hazard in irrigation water. Plant and soil 47:253-256.

Salazar-Ledesma, M., L. Mora, B. Chávez, D. Gómez, O. Zamora, y B. Prado. 2018. Susceptibilidad del suelo al impacto humano: caso del herbicida atrazina. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 70(1): 95-119.

Sánchez-Bernal, E. I., H. M. Ortega-Escobar, G. T. Sandoval-Orozco, R. A. Hernández-Viruel, and C. Estrada-Vázquez. 2012. Lavado de sales en suelos aluviales costeros de Oaxaca, México, con aguas residuales municipales tratadas. Revista internacional de contaminación ambiental. 28(4): 343-360.

SCFI (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial). 1980. Norma Mexicana NMX-AA-003-SCFI-1980. Aguas residuales, Muestreo. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. Diario Oficial de la Federación. 25 de marzo de 1980.

SCFI (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial). 1980. Norma Mexicana NMX-AA-003-SCFI-1980. Cuerpos receptores, Muestreo. Secretaria de Comercio y Fomento Industrial. Diario Oficial de la Federación. 5 de septiembre de 1980.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Informe de la situación del medio ambiente en México. Edición 2002. México, D. F.: Compendio de Estadísticas Ambientales.

Shainberg I. and J. Letey. 1984. Response of soils to sodic and saline conditions. Hilgardia. 52(2): 1-57.

Singer, M.J., and D. N. Munns. 2002. Soils: An Introduction, 5th Edition: Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 448 p.

Singh, B., P. C. Srivastava, and M. Shrivastava. 2018. Calcium–sodium exchange equilibria in two soils of Chambal Command Area of Rajasthan, India. *Land Degradation & Development.* 29(8): 2739-2745.

Smith C.J., J. D. Oster, and G. Sposito. 2015. Potassium and magnesium in irrigation water quality assessment. Agr Water Manage. 157:59-64.

Sommer, M., D. Kaczorek, Y. Kuzyakov, and J. Breuer. 2006. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes—a review. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 169(3): 310–329.

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. 1981. Relation Between c pH 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., and J. D. Wood. 1996. Short-and long-term weathering rates of a feldspar fraction isolated from an arid zone soil. Chemical Geology. 132(1-4): 143-150.

Suarez, D. L., and J. J. Jurinak. 2011. The chemistry of salt-affected soils and waters. In W. W. Wallender, & K. K. Tanji (Ed). Agricultural salinity assessment and management. Second edition. (pp. 57-88). United States of America: American Society of Civil Engineers (ASCE).

Suriyaprabha, R., G. Karunakaran, R. Yuvakkumar, P. Prabu, V. Rajendran, and N. Kannan. 2012. Growth and physiological responses of maize (Zea mays L.) to porous silica nanoparticles in soil. Journal of Nanoparticle Research. 14(12).

Tolentino Martínez, J. M. 2014. La producción de arroz del estado de Morelos: una aproximación desde el enfoque SIAL. Estudios sociales (Hermosillo, Son.). 22(44): 39-61.

Velázquez-Machuca, M. A. 1995. Efecto de las sales y fertilización sobre la emergencia de plántulas de siete cultivares. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Texcoco, Estado de México, México.

Velázquez-Machuca. M. A. 2001. Las variaciones de los procesos de adsorción de sodio en función de los diferentes valores de la relación de adsorción de sodio en las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan, Valle del Mezquital, Hgo. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo Texcoco, Edo. de México.

Velázquez-Machuca, 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.

Verma, L. P. 1983. Tolerance of wheat to boron in irrigation water. J. Indian Soc. Soil Sci. 31:167-168.

Wilcox, L. V., G. Y. Balir and C. A. Bower. 1954. Effect of bicarbonate on suitability of water for irrigation. Soil Sci. 77(4): 259-266.

Zaman M., Shahid S.A., Heng L. 2018. Irrigation Water Quality. In: Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques. Springer, Cham

Zenteno, D. J. M. 1985. Geología de la República Mexicana: México, 1984. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.

Zhu, Y., and H. Gong. 2013. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. Agronomy for Sustainable Development. 34(2): 455-472.