

Tesis defendida por  
Diego Alonso Padilla Reyes  
y aprobada por el siguiente Comité

---

Dra. Zayre Ivonne González Acevedo  
Co-Director del Comité

---

Dr. José Alfredo Ramos Leal  
Co-Director del Comité

---

Dr. Thomas Günter Kretzschmar  
Miembro del Comité

---

Dra. Pilar Sánchez Saavedra  
Miembro del Comité

---

Dr. Juan García Abdeslem  
Coordinador del Posgrado  
en Ciencias de la Tierra

---

Dr. Jesús Favela Vara  
Director de la  
Dirección de Estudios de Posgrado

*Marzo de 2014*

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA**



---

Programa de posgrado en Ciencias  
en Ciencias de la Tierra con orientación  
en Geociencias Ambientales

---

Procesos hidrogeoquímicos que dan origen a la salinidad en el sistema acuífero  
de Tierra Nueva, San Luis Potosí.

Tesis  
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

Diego Alonso Padilla Reyes

Ensenada, Baja California, México  
2014

Resumen de la tesis de Diego Alonso Padilla Reyes, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

Procesos hidrogeoquímicos que dan origen a la salinidad en el sistema acuífero de Tierra Nueva, San Luis Potosí

Resumen aprobado por:

---

Dr. José Alfredo Ramos Leal

---

Dra. Zayre Ivonne González Acevedo

Este estudio se desarrolló en el municipio de Tierra Nueva en San Luis Potosí, México, está enfocado en una zona agrícola con cultivo de alfalfa (*Medicago sativa*) y una extensión de 230 hectáreas con clima semiárido. El objetivo del trabajo fue establecer la distribución espacial de la salinidad en suelo y agua y los procesos hidrogeoquímicos que la originan.

Para esto se tomaron 41 muestras de agua en dos campañas de muestreo en los años 2012 y 2013, ambas correspondientes a la temporada de sequía; y 22 muestras del suelo adyacentes a las muestras de agua en el primer periodo y en el segundo periodo, se tomaron 70 muestras de suelo en una rejilla regular con nodos cada 200 m.

Se realizaron análisis fisicoquímicos, así como, aniones y cationes para muestras de agua y extracto de suelo obtenido de una mezcla agua-suelo (1:1). Además, se efectuaron análisis elementales semicuantitativos con microscopia electrónica de barrido para muestras de sales que estaban presentes en el suelo y difracción de rayos X para evaluar sus fases cristalinas.

Los resultados muestran un sitio cercano al río Jofre con los mayores valores de salinidad tanto en el suelo como en el agua, además se identifican 3 tipos de agua: Na-HCO<sub>3</sub> (55%), Ca-Na-HCO<sub>3</sub> (31%) y Ca-HCO<sub>3</sub> (13%), sugiriendo un proceso de intercambio catiónico. Se interpretaron los datos a partir de gráficos de Piper, Gibss y de relaciones iónicas, los cuales permitieron establecer que los procesos que originan la composición del agua son el intercambio catiónico entre el calcio y el sodio, la interacción agua-roca y la evaporación. Según la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio, el suelo corresponde al tipo normal en la mayor parte de la zona de estudio, y sólo en el sitio cercano al río Jofre se trata de suelo salino-sódico y sódico, en donde la salinidad es el resultado de la evaporación del agua que asciende por capilaridad, debido a un nivel freático somero y suelos de textura fina, lo que finalmente lleva a la precipitación de minerales en el suelo, principalmente como natrita (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).

Palabras clave: **Tierra Nueva, salinidad, hidrogeoquímica, natrita, suelos salinos, suelos sódicos.**

Abstract of the thesis presented by Diego Alonso Padilla Reyes as a partial requirement to obtain the Master in Science degree in Earth Sciences with orientation in Environmental Geosciences.

Hydrogeochemical processes that cause salinity in the aquifer system of Tierra Nueva, San Luis Potosi.

Abstract approved by:

---

Dr. José Alfredo Ramos Leal

---

Dra. Zayre Ivonne González Acevedo

This study was conducted in the municipality of Tierra Nueva, San Luis Potosi, Mexico, it is focused in a 230 hectares agricultural field with alfalfa (*Medicago sativa*) and semiarid climate. The aim of this work was to establish the spatial distribution of soil and water salinity and the hydrogeochemical processes that cause it.

For this, 41 water samples were taken at two sampling campaigns in 2012 and 2013, both corresponding to the dry season; and 22 samples of soil adjacent to the water samples in the first period and the second period, 70 soil samples were taken on a regular grid with nodes every 200 m.

Physicochemical analyzes were performed, as well as anions and cations measurements in water samples and soil extracts obtained by water-soil (1:1). Furthermore, semi-quantitative elemental analyses were made by scanning electron microscopy for selected samples of salts present on the soil and X-ray diffraction to evaluate their crystal phases.

The results show a site near the river Jofre with the highest values of salinity in the soil and in the water, and 3 types of water are identified: Na-HCO<sub>3</sub> (55%), Ca-Na-HCO<sub>3</sub> (31%) and Ca-HCO<sub>3</sub> (13%), suggesting a cation exchange process. The results were interpreted by Piper, Gibbs and ion ratios graphs. These graphs revealed that the processes that cause water composition are: the cation exchange between calcium and sodium, water-rock interaction and evaporation. According to the electrical conductivity and sodium adsorption ratio, the soil corresponds to non-saline type, and only at the site of highest concentration are saline-sodic and sodic soils, where salinity is the result of the evaporation of water that ascends by capillarity due to a shallow water table and fine-textured soils, which eventually leads to precipitation of minerals on the soil, mainly as natrite (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).

**Keywords: Tierra Nueva, salinity, hydrogeochemistry, natrite, saline soils, sodic soil.**

## Dedicatorias

---

A mi esposa, Alejandra.

Sin tu amor, apoyo y comprensión nunca hubiera alcanzado esta meta. Este triunfo nos pertenece a los dos.

A mis padres, a mi hermana y su *solecito*.

Gracias por motivarme y apoyarme siempre.

## Agradecimientos

---

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante dos años para realizar mis estudios.

Al Dr. José Alfredo Ramos Leal del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, por confiar en mí y brindarme la oportunidad de trabajar con él. Gracias por todas sus enseñanzas y consejos.

A la Dra. Zayre Ivonne González Acevedo del Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada, por su paciencia, apoyo y enseñanzas. Gracias por su entusiasmo, dedicación y disposición para orientarme durante estos dos años.

Al Dr. Thomas Kretschmar y a la Dra. Pilar Sánchez que con sus observaciones, comentarios y sugerencias contribuyeron a mejorar en gran medida éste trabajo.

A la M.C. Eloísa Aparicio Ceja del Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM por la realización de los análisis de difracción de rayos X.

A los Técnicos del CICESE: Gabriel Rendón, Mario Vega, Víctor Pérez y Luis Gradilla por su gran ayuda en la preparación y análisis de las muestras.

A mis compañeros del IPICYT Alejandro, Simón, Sonia, Janeth y Liz por su invaluable ayuda en la toma de muestras.

A mis compañeros del CICESE: Tomás, Gina, Xóchitl, Román, Ismael, José Juan, Dania, Clemente, Luis, Anabel, Brenda y Carlos por todos los buenos momentos que pasamos juntos.

## Contenido

---

Resumen español .....	ii
Resumen inglés.....	iii
Dedicatorias .....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tablas.....	xii
Capítulo 1. Introducción .....	1
Capítulo 2. Marco teórico .....	6
2.1 El agua.....	6
2.1.1 Principales elementos disueltos y salinidad del agua.....	7
2.2 El suelo .....	13
2.2.1 Los suelos salinos y sus causas.....	16
2.2.2 Definición y clasificación de los suelos salinos.....	19
2.2.3 Principales tipos de sales .....	22
2.3 Efectos de la salinidad sobre las plantas y los suelos .....	26
2.4 Reacciones de equilibrio.....	27
Capítulo 3. Zona de estudio .....	29
3.1 Tierra Nueva .....	29
3.2 Clima.....	30
3.3 Tipo de suelo .....	31
3.4 Geología .....	33
3.5 Hidrogeología .....	36

Capítulo 4. Métodos y materiales.....	39
4.1 Muestreos .....	39
4.1.1 Agua subterránea .....	39
4.1.2 Muestreo de suelo .....	42
4.1.3 Muestreo de sales .....	44
4.1.4 Muestreo de rocas.....	45
4.2 Análisis de muestras.....	45
4.2.1 Para muestras de agua .....	45
4.2.2 Para muestras de suelo.....	47
4.2.3 Para muestras de roca .....	52
Capítulo 5. Resultados.....	54
5.1 Resultados de las muestras de agua.....	54
5.1.1 Parámetros medidos en campo .....	54
5.1.2 Aniones y Cationes.....	58
5.1.3 Índices de saturación.....	66
5.2 Resultados de las muestras de suelo .....	68
5.2.2 Parámetros fisicoquímicos en extracto de suelo .....	71
5.2.3 Determinación de aniones y cationes .....	73
5.3 Resultados de las muestras de sales .....	76
5.3.1 Microscopia electrónica de barrido .....	76
5.3.2 Difracción de rayos X.....	80
5.4 Resultados de las muestras de roca.....	82
Capítulo 6. Discusión .....	86
6.1 Agua .....	86
6.1.1 Salinidad del agua .....	86
6.1.2 Facies hidroquímicas.....	89
6.1.3 Procesos hidrogeoquímicos .....	93
6.2 Suelo.....	99

6.2.1 Salinidad del suelo.....	99
6.2.1 Sodicidad del suelo.....	105
6.3 Sales.....	107
Capítulo 7. Conclusiones .....	109
Recomendaciones .....	111
Referencias bibliográficas .....	112
Anexo .....	119

## Lista de Figuras

---

Figura		Página
1	Distribución mundial de las zonas áridas y semi-áridas	2
2	Mapa de localización de las tierras de cultivo y cabecera municipal de Tierra Nueva, San Luis Potosí	4
3	Incremento de la población mundial a lo largo de la historia	6
4	Distribución del agua en el planeta Tierra	7
5	Límites de los tamaños de las partículas de acuerdo con diferentes sistemas de clasificación usados	14
6	Distintas formas en que pueden presentarse los fluidos en la composición del suelo	16
7	Localización general del área de estudio, mostrando el estado de San Luis Potosí y el territorio municipal de Tierra Nueva	29
8	Distribución espacial de los climas presentes en el municipio de Tierra Nueva	30
9	Datos mensuales promedio de temperatura, evaporación potencial y precipitación registrados en la estación climatológica Tierra Nueva durante el período 1961-2001	31
10	Tipos de suelos que se presentan dentro del territorio municipal de Tierra Nueva	32
11	Mapa geológico de la zona de estudio indicando las muestras para el análisis petrográfico	36
12	Cartas de interpolación de resistividades para diferentes elevaciones	38
13	Mapa de localización de las muestras de agua	41
14	Mapa de localización de las muestras de suelo	43
15	Fotografía donde se observa la costra de sales precipitadas sobre la superficie del suelo de una zona cercana al río Jofre y muestras de sales recolectadas	44
16	Diagrama de flujo para determinar la textura de un suelo utilizando el método del tacto	48
17	Temperatura de las muestras de agua medida <i>in situ</i>	54

18	Potencial de hidrógeno medido <i>in situ</i> en las muestras de agua	56
19	Oxígeno disuelto medido <i>in situ</i> en las muestras de agua	57
20	Fotografías de las microalgas que quedaron en el filtro al tomar las muestras de agua Estanque 1 y Salitre Grande	58
21	Potencial óxido-reducción medido <i>in situ</i> en las muestras de agua	77
22	Conductividad eléctrica medida <i>in situ</i> en las muestras de agua	77
23	Micrografía de la muestra de sal número 3	78
24	Micrografía de la muestra de sal número 4	79
25	Micrografía de la muestra de sal número 2	80
26	Micrografía de la muestra de sal número 1	81
27	Difractograma de la muestra de sal 4	81
28	Difractograma de la muestra de sal 3	82
29	Difractograma de la muestra de sal 2	56
30	Difractograma de la muestra de sal 1	57
31	Micrografía de la muestra de roca 1	83
32	Micrografía de la muestra de roca 2	84
33	Micrografía de la muestra de roca 3	80
34	Distribución de las muestras de agua indicando las concentraciones de sólidos disueltos totales	87
35	Relaciones entre el ion sodio y sólidos disueltos totales (a) y el ion bicarbonato y sólidos disueltos totales (b)	88
36	Gráficos de Stiff indicando el tipo de agua de las muestras del primer periodo de muestreo	90
37	Representación de las muestras de agua en el diagrama de Piper	92
38	Diagrama de Gibbs indicando los mecanismos que gobiernan los procesos químicos del agua de la zona de estudio	95
39	Relaciones iónicas de las muestras de agua	97

40	Relación de metales alcalinos contra alcalinotérreos	99
41	Distribución vertical (a) y espacial (b) de la conductividad eléctrica de las muestras de suelo de la primera campaña de muestreo.	100
42	Relación entre la conductividad eléctrica del suelo y el agua de riego	101
43	Relación entre la conductividad eléctrica del suelo y su textura	102
44	Mapa de interpolación de la $CE_{1:1}$ de las muestras de suelo del segundo periodo de muestreo	104
45	Relación entre la interpolación de $CE_{1:1}$ , la relación de finos/arena del suelo (isolíneas) y el nivel freático medido en donde se tomaron las muestras de agua (triángulos)	105
46	Relaciones entre la conductividad eléctrica y la relación de absorción de sodio (RAS) (a) y entre el factor limo+arcilla/arena y la relación de absorción de sodio (RAS) (b)	106
47	Mapa de interpolación del potencial hidrógeno de extractos de las muestras de suelo del segundo periodo	107

Lista de Tablas

---

Tabla		Pagina
1	Clasificación de los suelos afectados por salinidad en función de la conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno, porcentaje de sodio intercambiable y relación de absorción de sodio	20
2	Resultados de los iones analizados en las muestras de agua del primer y segundo muestreo	60
3	Resultados estadísticos de los iones analizados de las muestras de agua de la primera y segunda campaña de muestreo	66
4	Resultados de los cálculos de índices de saturación de las muestras de agua de la primera campaña.	68
5	Resultados de textura de las muestras de suelo de la primera campaña	69
6	Resultados de textura de las muestras de la segunda campaña	70
7	Resultados de los parámetros fisicoquímicos realizados en el extracto acuoso de las muestras de suelo del primer muestreo	72
8	Resultados de los parámetros fisicoquímicos realizados en el extracto acuoso de las muestras de suelo del segundo muestreo	73
9	Resultados de los iones analizados en el extracto acuoso de las muestras de suelo de la primera campaña de muestreo	74
10	Resultados de los iones analizados en el extracto acuoso de las muestras de suelo de la segunda campaña de muestreo	75
11	Resultados de los análisis petrográficos de las muestras de roca	85
12	Matriz de correlación entre aniones y cationes analizados en las muestras de agua de la primera campaña de muestreo	89
13	Clasificación de la salinidad del suelo, considerando $CE_{1:1}$ en extractos del suelo según Dahnke y Whitney (1988)	103
14	Resultados de las cinco muestras de suelo del segundo periodo que presentaron algún grado de salinidad	103

## Capítulo 1. Introducción

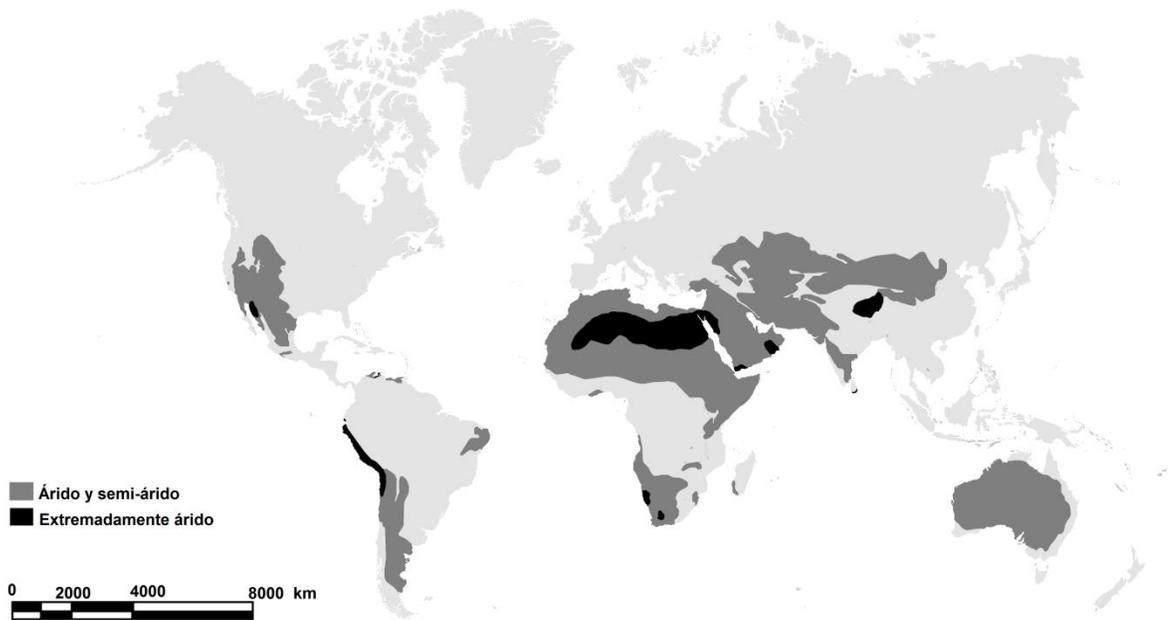
---

En todo el mundo, el empleo del agua y su gestión han sido un factor esencial para elevar la productividad de la agricultura y asegurar una producción previsible. El agua es esencial para aprovechar el potencial agrícola de la tierra. Al incrementar la productividad, la gestión sostenible del agua, especialmente si va unida a una gestión adecuada del suelo, contribuye a asegurar una mejor producción tanto para el consumo directo como para el comercio, favoreciendo así la producción de los excedentes económicos necesarios para elevar las economías (World Bank, 2008).

A escala global aproximadamente el 70% del recurso hídrico se utiliza en la agricultura—y en países emergentes llega a representar hasta el 95% (Pimentel *et al.*, 2004). El agua de riego proviene principalmente de fuentes naturales, primariamente de la lluvia y de los escurrimientos superficiales. Por esta razón, un factor clave para el manejo y disponibilidad del agua es lo relativo a la ocurrencia de la lluvia. En México, la precipitación media anual es de 722 mm, sin embargo, presenta marcadas diferencias. En la región sur de México es de 2265 mm, valor muy superior en contraste con los 202 mm en promedio que precipitan en la península de Baja California. Además, 67% de la lluvia a nivel nacional se presenta en tan sólo cuatro meses del año (de junio a septiembre), lo que ha llevado a la construcción de infraestructuras hidráulicas para su captación y mejor aprovechamiento. Tal es el caso de las presas, que permiten satisfacer de agua durante todo el ciclo anual a los diferentes sectores de la población: el agrícola, el industrial y el doméstico (CONAGUA, 2008).

El desarrollo de estructuras para la captación y aprovechamiento de aguas cobra mayor importancia en el norte del territorio nacional, pues está constituido por regiones áridas y semiáridas (Fig. 1), las cuales reciben en promedio menos de 400 mm de lluvia al año y poseen tasas de evaporación potencial en el rango de

1000-1500 mm para el mismo periodo. La desproporción que existe entre la cantidad de agua originada por escurrimiento y las vastas extensiones territoriales que comprenden estas zonas, aunado a la corta temporada de lluvias hace que la disponibilidad del agua sea menor. Bajo estas circunstancias las obras de almacenamiento, las de aprovechamientos de las aguas de escorrentía y el agua subterránea almacenada en los acuíferos, cobran vital importancia para la agricultura (CONAGUA, 2008).

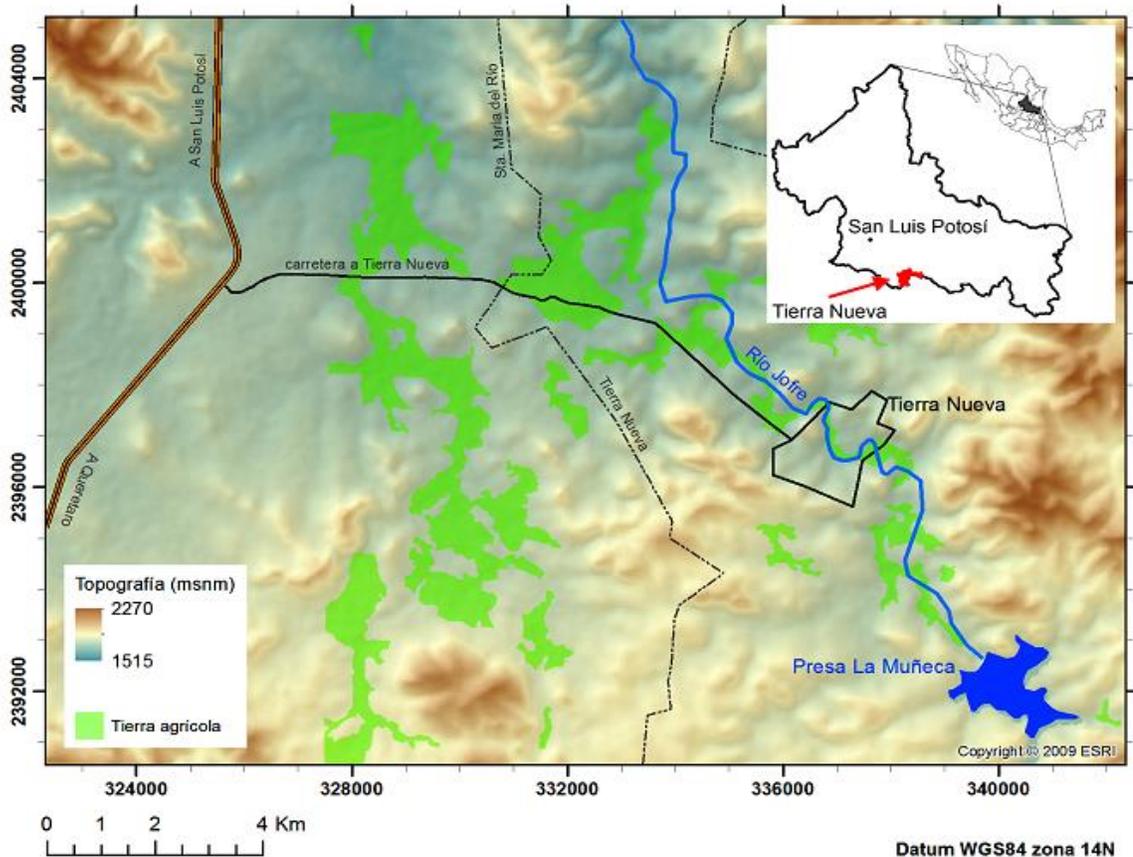


**Figura 1. Distribución mundial de las zonas áridas y semi-áridas. Adaptado de Williams, 1999.**

El desarrollo sostenible de la actividad agrícola requiere de la implementación de estudios no solamente relacionados con el agua, sino también con los suelos, con su calidad y cantidad de nutrientes a fin de evitar un impacto ambiental, económico o social negativo. Es por esto que se deben analizar los riesgos de contaminación o minado de los acuíferos debido a una mala gestión del recurso hídrico; así como, el problema de la degradación y salinización de los suelos.

Un suelo salino se define como aquel que contiene suficientes sales solubles para afectar desfavorablemente el crecimiento de los cultivos agrícolas (Silvertooth, 2001). A nivel mundial, aproximadamente la mitad de los suelos irrigados están adversamente afectados por la salinización (Hinrichsen *et al.*, 1998) y se estima que cada año se pierden aproximadamente 10 millones de hectáreas (Thomas y Middleton, 1993). En las regiones áridas y semi-áridas (Fig. 1) la salinización de los suelos es una característica común y podría representar un problema debido a su impacto negativo en el rendimiento de los cultivos (Abrol *et al.*, 1988).

En zonas áridas de México el problema de salinización está presente (De Pablo, 1985), en el caso de Tierra Nueva, del Estado de San Luis Potosí. En los últimos 5 años el nivel freático del acuífero ha ascendido en algunas zonas, posiblemente asociadas a un acuífero colgado que se ve influenciado por la agricultura, ocasionando con ello la interacción agua-roca-suelo, salinizando así el recurso hídrico utilizado para el riego y como consecuencia el suelo de uso agrícola. Estos cambios en el ambiente probablemente estén asociados a la presa La Muñeca, construida a principio de los años 70 sobre el cauce del río Jofre y que se localiza a 6 km al sureste de la cabecera municipal de Tierra Nueva. Cuenta con una capacidad total de 31 millones de metros cúbicos y su agua se aprovecha para el riego de una superficie estimada en 980 hectáreas de terrenos de diversas comunidades de los municipios de Tierra Nueva y Santa María del Río, San Luis Potosí, localizados aguas abajo de la presa y para abastecimiento público para la población de Tierra Nueva (Fig. 2). Actualmente, existen tierras agrícolas que según los mismos agricultores (comunicación personal) dan cosechas deficientes y en algunas otras zonas se pueden observar eflorescencias salinas y por lo tanto estos suelos no son aprovechables. A pesar de esto no se ha realizado ningún estudio que permita la identificación de la salinidad, procedencia y/o extensión.



**Figura 2.** Mapa de localización de las tierras de cultivo y cabecera municipal de Tierra Nueva, San Luis Potosí. Se muestra el río Jofre, principal afluente de la presa La Muñeca de la cual se deriva el agua utilizada para el riego. El flujo del río es de sureste hacia el noroeste. Realizado con ArcMap.

Haciendo los recorridos de reconocimiento en campo se estableció la siguiente hipótesis: se utiliza el agua de la presa o el agua de las norias para realizar el riego de los cultivos. El agua dentro del suelo interactúa con el material arcilloso y se produce un intercambio catiónico. El líquido con una composición química ya modificada se ve sometido al proceso de evapotranspiración, induciendo a una concentración de estos iones para posteriormente precipitarlos en forma de sales que se van acumulando en el suelo, mayormente en la superficie.

El objetivo general de este estudio es la caracterización hidrogeoquímica de la zona, para evaluar la variabilidad espacial de la salinidad y los mecanismos que la originan en el agua como en el suelo.

Para ello se ha determinado la consecución de los siguientes objetivos particulares:

- a) Estudiar y describir las características hidrogeológicas, geológicas y edafológicas del sitio.
- b) Recopilar e integrar los datos para generar en un Sistema de Información Geográfica los mapas temáticos correspondientes.
- c) Realizar el análisis fisicoquímico de muestras de agua y suelo.
- d) Determinar la variabilidad espacial de la salinidad en agua y suelo, y los procesos que la originan.

## Capítulo 2. Marco teórico

---

### 2.1 El agua

Si consideramos a la Tierra como un sistema cerrado, la cantidad de agua en el planeta se ha mantenido constante a través del tiempo debido al ciclo hidrológico, sin embargo, la población humana ha crecido exponencialmente (Fig. 3). Esto significa que cada año los retos para la extracción y suministro de agua para su uso en los diferentes sectores, también han aumentado o se vuelven más complejos. De acuerdo con las Naciones Unidas el uso del agua ha aumentado a más del doble de la tasa de crecimiento de la población en el último siglo (Cosgrove y Cosgrove, 2012).

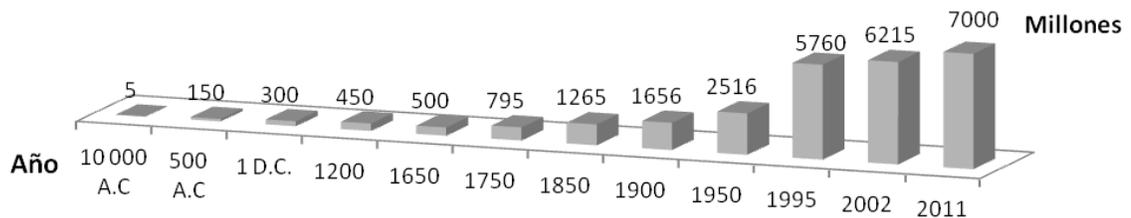


Figura 3. Incremento de la población mundial a lo largo de la historia. Adaptado de Haub, 2002.

Aunque el 70% de la superficie del planeta está cubierto por agua, aproximadamente el 97.5% es salada y está distribuida en los océanos y lagos salados; mientras que sólo el 2.5% restante es dulce, de la cual, casi el 70% se encuentra congelada en los glaciares, la mayor parte del resto se presenta como humedad en el suelo o yace en acuíferos profundos de difícil acceso. En esencia, menos del 1% de los recursos de agua dulce del mundo están disponibles para abastecer a los más de 7 mil millones de habitantes en el mundo (Fig. 4). Con este incremento de población también se ha producido una mayor presión en el territorio para su uso en la agricultura, con el fin de producir una mayor cantidad de alimentos.

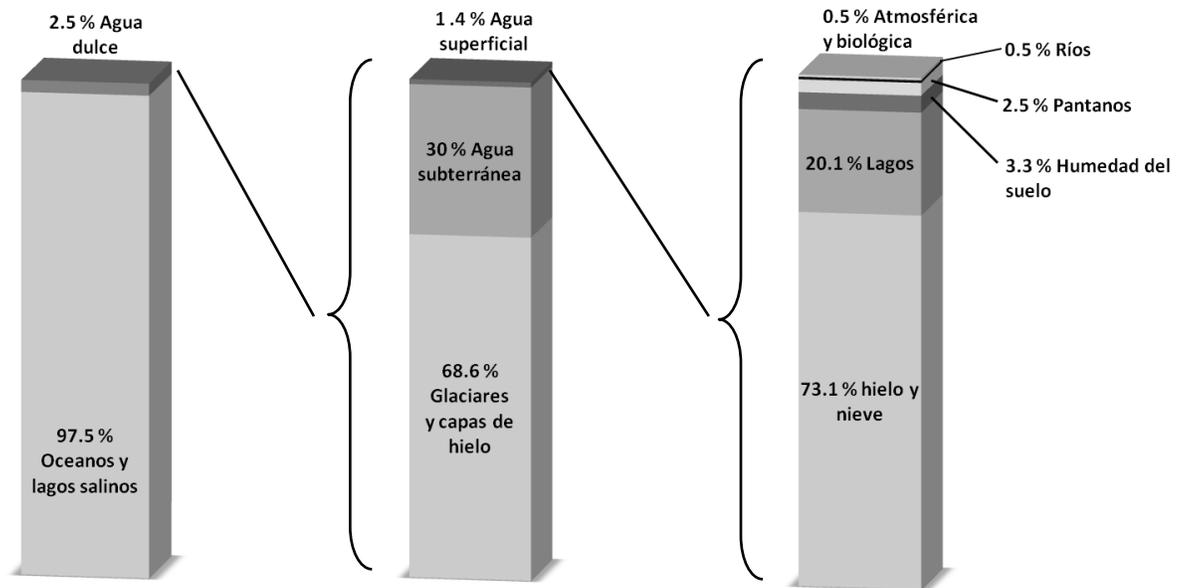


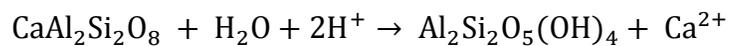
Figura 4. Distribución del agua en el planeta Tierra. Adaptado de Shiklomanov, 1993.

### 2.1.1 Principales elementos disueltos y salinidad del agua.

La diversidad de concentraciones iónicas en el agua superficial y subterránea se debe al contenido y tipo de minerales en las rocas y el suelo con los que tiene contacto durante su recorrido en el ciclo hidrológico. Aunque los iones que se pueden encontrar en el agua varían ampliamente en tiempo y espacio, existen algunos que se encuentran siempre en cantidades considerables y por lo tanto son llamados mayoritarios (Richards, 1954; Kovda *et al.*, 1967; Wedepohl, 1969; Szabolcs, 1989; Hem, 1992). Los más comunes son los que se presentan a continuación:

## Calcio

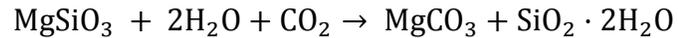
En la corteza terrestre se tiene un 3.2% de calcio. Es uno de los elementos ampliamente difundidos durante la cristalización del magma, está en la composición de las rocas máficas y en menor cantidad en rocas félsicas. El contenido del calcio en los basaltos alcanza un 6.4% y en los granitos disminuyen hasta 1.55%. El calcio se encuentra en la composición de los piroxenos, anfíboles y plagioclasas. La disolución de la anortita puede ser representada como:



Y de esta manera el calcio entra en la solución. El calcio es el ion dominante en la mayoría de las aguas superficiales y es el segundo en cantidad, después del sodio, en las aguas de formación. El equilibrio de los carbonatos es el mayor factor que limita la solubilidad del calcio en la mayoría de las aguas naturales, y el sistema  $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  ha sido estudiado ampliamente. El  $\text{CaCO}_3$  que forma durante el intemperismo de los minerales que contienen calcio, en presencia de  $\text{CO}_2$ , pasa a una forma más soluble como el bicarbonato de calcio  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . Las sales solubles de calcio:  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , se acumulan en las aguas naturales y con el flujo de éstas, ingresan a las depresiones internas, mares y océanos. Una parte del calcio, como resultado de la evaporación de las soluciones y de las reacciones de intercambio, se precipitan formando calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) y dolomita  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ .

## Magnesio

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



Las sales de  $\text{MgSO}_4$  y  $\text{MgCl}_2$  son muy solubles en el agua, el  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$  es menos soluble y el  $\text{MgCO}_3$  es débilmente soluble. En las rocas sedimentarias y en los suelos, el magnesio se acumula en forma de minerales salinos: magnesita ( $\text{MgCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), dolomita ( $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ ), epsomita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), kieserita ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), carnalita ( $\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) entre otras.

### Sodio

Su contenido en la corteza terrestre es de 2.35%. En las rocas de la magma alcalina el contenido de Na + K es de 15 -20%, y en los basaltos se encuentra en 2.3%. Se encuentra en las plagioclasas junto con el calcio en diferentes proporciones, siendo la albita el miembro extremo conteniendo solamente al sodio. El intemperismo de la albita puede representarse de la siguiente manera:



Las sales de sodio se encuentran en grandes cantidades en las aguas freáticas de las regiones semidesérticas y desérticas. La mineralización de las aguas freáticas en las zonas áridas varía de 1-2 hasta 100-200 g/L. Generalmente se acumula en los suelos sódicos y salinos, donde puede reaccionar con el  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  para formar carbonato y bicarbonato de sodio. Los suelos salinos contienen entre 2 y 3% de sales de sodio, las costras salinas pueden contener de 10 a 20%. Los siguientes minerales de sodio son los más ampliamente distribuidos y se precipitan durante la evaporación de las aguas de los suelos, freáticas y superficiales: halita ( $\text{NaCl}$ ), mirabilita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), salitre sódico ( $\text{NaNO}_3$ ), termonatrita ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ), trona ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y glauberita ( $2\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

## Potasio

La corteza terrestre contiene 2.3% de potasio. Al igual que el sodio, se encuentra en la composición de las rocas félsicas y máficas. En las primeras se encuentra en mayor cantidad que el sodio, mientras que en las otras el contenido de este elemento es menor si se compara con el contenido de sodio. En los basaltos su contenido es de 1.26%. El potasio está en la composición de la ortoclasa, muscovita y como trazas se encuentra en las plagioclasas y en la albita. En los procesos de intemperismo de los aluminosilicatos que contienen potasio las reacciones ocurren de acuerdo con la siguiente reacción:



Los carbonatos de potasio cuando interactúan con los ácidos y con las sales se transforman en cloruros, sulfatos y nitratos. En la hidrósfera, el potasio es de menor contenido que el sodio. Esto está relacionado con la resistencia al intemperismo de los minerales potásicos. En los suelos salinos y sódicos, el potasio adsorbido es considerablemente menor que el sodio debido a su bajo contenido en las aguas superficiales, freáticas y de los suelos. Las sales minerales del potasio son: silvita (KCl), carnalita (KClMgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O), kainita (KClMgSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O) y salitre potásico (KNO<sub>3</sub>).

## Cloro

El contenido de cloro en la corteza terrestre es de 0.1%. En las rocas extrusivas es de 0.05% y en las rocas alcalinas es de 0.7%. La mayor cantidad se encuentra en la hidrósfera, alrededor de 60% de sus reservas totales. La fuente principal de este elemento en las aguas oceánicas son emanaciones gaseosas primarias de los volcanes y la emanación secundaria de las lavas durante su enfriamiento. Una considerable cantidad ingresa a las depresiones oceánicas en forma de cloruros que han sido lixiviados de las rocas marinas saturadas con este ion o de la formación de éstos durante el intemperismo. En la corteza continental, una gran

cantidad se encuentra en las rocas sedimentarias de origen marino y en las rocas continentales. Durante la evaporación de lagos pequeños y lagunas, los cloruros de sodio, potasio y magnesio forman yacimientos de una gran potencia. En las aguas freáticas y de los suelos de las zonas áridas y de regiones sin escurrimientos se encuentran cantidades considerables de este ion.

Los minerales del cloro son: halita ( $\text{NaCl}$ ), silvita ( $\text{KCl}$ ), carnalita ( $\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), kainita ( $\text{KClMgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) y cloruros de magnesio y calcio.

### **Azufre**

En la corteza terrestre se contiene 0.06%. En las rocas cristalinas la cantidad de azufre en promedio es 0.05% y en las sedimentarias es de 0.22%. En las rocas sedimentarias predomina en forma de sales del ácido sulfúrico. Sus sales minerales son: yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), kiserita ( $\text{MgSO}_4$ ), mirabilita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), glauberita ( $2\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y kainita ( $\text{KClMgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ).

En la hidrósfera se contiene 0.09%, una cantidad considerable se encuentra en el agua de los océanos. En particular existen muchos compuestos en las aguas de las lagunas y de los lagos salados. Es uno de los elementos importantes en la nutrición vegetal, ya que forma parte en la composición de las proteínas. Participando en el ciclo biológico, durante la descomposición de las proteínas se transforma en ácido sulfhídrico. El ácido sulfhídrico al combinarse con el oxígeno del aire, se oxida y forma ácido sulfúrico, en estas condiciones participan bacterias oxidantes aeróbicas del ácido sulfhídrico. A su vez, el azufre elemental que se ha formado en condiciones de reducción de sulfatos. En seguida este azufre elemental reacciona con algunas cantidades de oxígeno disuelto formando el ion sulfito, posteriormente, el ion sulfito se combina con el agua formando ácido sulfúrico. Aquellas cantidades de ácido sulfúrico formadas reaccionan con los carbonatos de los metales alcalino térreos originándose con esto las sales de los sulfatos correspondientes como sulfato de calcio y sulfato de magnesio.

## Carbono

En la corteza terrestre los compuestos del carbono están distribuidos en forma de carbonatos de calcio, que forman parte de las calizas y mármoles. Los carbonatos de calcio uniéndose con el magnesio forman las dolomitas  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Una gran cantidad de carbonatos, fundamentalmente de  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$  están contenidos en las rocas sedimentarias. En las soluciones acuosas de los suelos sódicos y en los suelos que se han salinizado se encuentran carbonato y bicarbonato de sodio, carbonatos de calcio y de magnesio. Las sales que contienen carbono y que están ampliamente distribuidos son: calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita ( $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ ), magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ), natrita ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), potasa ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) y trona ( $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

El agua contiene dos tipos de sólidos: los suspendidos y los disueltos. Los primeros consisten de partículas orgánicas e inorgánicas que se encuentran, como su nombre lo indica, suspendidas en el líquido y que son las causantes de la turbidez. Los otros son aquellos que se encuentran completamente disueltos en el agua y no se pueden percibir con la vista. Estos sólidos disueltos provienen principalmente de 1) los gases, polvos y aerosoles presentes en la atmósfera y que la lluvia atrapa en su trayecto o que se depositan directamente en el agua superficial y 2) de la disolución de los minerales que componen las rocas o el suelo con los que se encuentra en contacto el agua durante su recorrido ya sea superficial o subterráneamente. El agua subterránea fluye con menor velocidad que el agua superficial, por lo tanto, pasa más tiempo en contacto con los minerales y por ello las concentraciones de sólidos disueltos serán mayores en ésta (Richards, 1954; Kovda *et al.*, 1967; Appelo y Postma, 2005). Todas las aguas naturales contienen sólidos disueltos totales en mayor o menor proporción, y a esta propiedad se le conoce como salinidad. El material disuelto sólo aparece cuando el agua es completamente evaporada dejando un residuo que consiste principalmente en sales como bicarbonatos, cloruros o sulfatos de calcio, magnesio, sodio y potasio.

La salinidad se concibió como una medida de la cantidad total de sales disueltas en un volumen determinado de agua. De esta manera se puede dar una clasificación del agua atendiendo a la cantidad de sales disueltas en un volumen determinado de agua, generalmente es reportada en g/L, mg/L o en ppm. El agua dulce posee menos de 1000 ppm de sales disueltas; el agua salobre entre mil y 5 mil; el agua altamente salobre entre 5 mil y 15 mil; el agua salina entre 15 mil y 30 mil; el agua marina entre 30 mil y 40 mil; y las salmueras más de 40 mil. Si bien los rangos establecidos para definir las categorías no son absolutos, estos representan límites que ayudan a distinguir un ambiente de otro.

La cantidad de sales en solución afecta algunas propiedades del agua como su densidad, viscosidad, tensión superficial, presión osmótica, punto de fusión, punto de ebullición y solubilidad de gases (Atkinson *et al.*, 1986).

## **2.2 El suelo**

El suelo es la capa superior intemperizada de la corteza terrestre y está compuesto por una mezcla de sólidos orgánicos e inorgánicos, aire, agua y microorganismos (Jenny, 1994). La cantidad y mezcla de estos componentes es muy variada y eso da lugar a los distintos tipos de suelo que existen. Sin embargo, de manera muy general, las partículas sólidas representan el 50% del total, entre las que dominan las fracciones de arenas, limos y arcillas, y en menor proporción los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, y las sales. Las partículas orgánicas, microorganismos vivos y los restos de otros, suponen el 5%. Y el restante 45% lo ocupan el aire y el agua. Todas estas facies se afectan unas a otras: las reacciones de los sólidos afectan la calidad del aire y el agua; el aire y el agua intemperizan los materiales sólidos; y los microorganismos catalizan muchas reacciones en los suelos.

La fracción sólida inorgánica del suelo deriva directamente de las rocas, las cuales son constantemente sometidas a procesos físicos y químicos que alteran su estructura y composición. Ello hace que ocurran partículas en un rango de

tamaños que varían desde menos de dos micras (fracción coloidal, arcillas), a tamaños muchos mayores como arenas y fragmentos de roca (Fig. 5). Dentro de estos fragmentos se incluyen un número de minerales primarios y secundarios de estructura cristalina definida. En la mayoría de los suelos la arena y la fracción limosa son minerales primarios, es decir, aquellos que se derivaron sin alterarse directamente de la roca original. Los más abundantes en los suelos son el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y los feldespatos ( $\text{XAlSi}_3\text{O}_8$ ), donde la X representa las combinaciones de los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ . Las micas, piroxenos y anfíboles también se encuentran presentes pero en cantidades más pequeñas (Jenny, 1994).

CLASIFICACIÓN				
	USDA	CCSC	ISSS	ASTM
0.0002	arcilla	arcilla fina	arcilla	arcilla y limo
0.002		arcilla gruesa		
0.005	limo	limo fino	limo	
0.02		limo medio		
0.05		limo grueso		
0.08	arena muy fina	arena muy fina	arena fina	arena fina
0.1	arena fina	arena fina		
0.3	arena media	arena media	arena gruesa	arena media
0.6	arena gruesa	arena gruesa		
1	arena muy gruesa	arena muy gruesa		
2	grava fina	grava	grava	arena gruesa
4				grava fina
10	grava gruesa			grava gruesa
20				grava gruesa
80	cantos rodados	cantos rodados	cantos rodados	

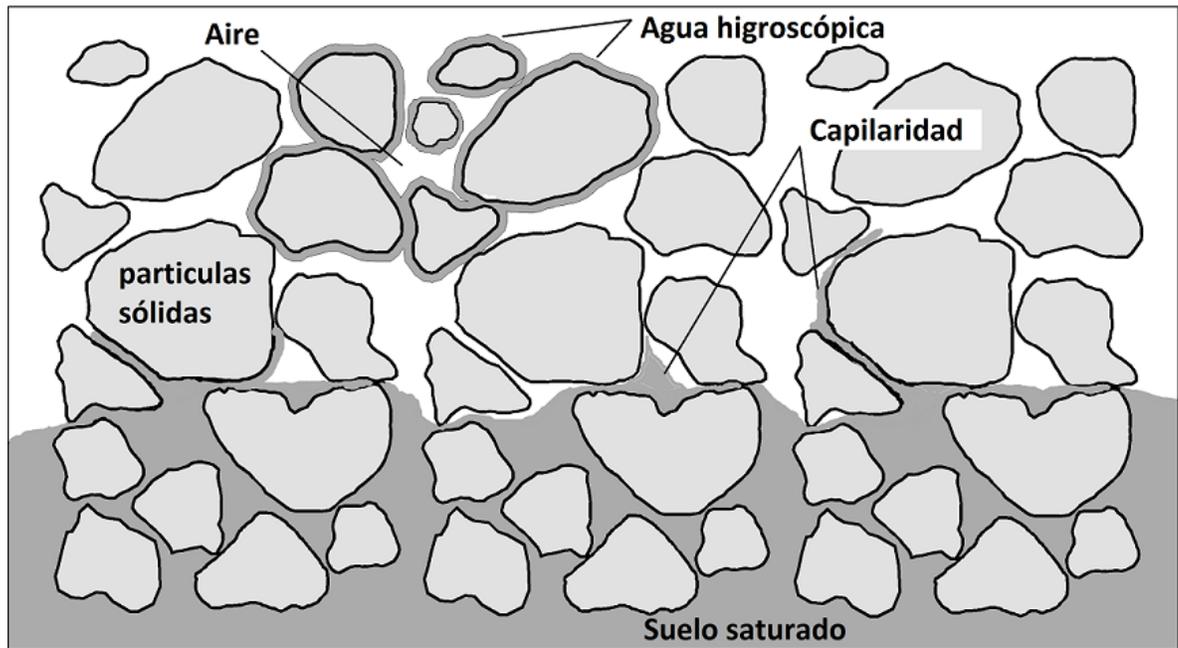
**Figura 5. Límites de los tamaños de las partículas de acuerdo con diferentes sistemas de clasificación usados. USDA = U.S. Department of Agriculture; CCSC = Canada Soil Survey Committee; ISSS = International Soil Science Society y ASTM = American Society for Testing and Materials.**

Los minerales de la fracción arcillosa de los suelos son principalmente de tipo secundario, esto es, que se han formado a partir de cambios químicos ocurridos en la roca madre o en otros minerales. Los minerales secundarios más comunes de los suelos incluyen los carbonatos, mayormente calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), y los sulfatos como la anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) y el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). También incluyen los óxidos e hidróxidos de hierro (hematita, limonita, goethita), de aluminio (gibbsite, boemita), de manganeso (pirolusita) y de titanio (rutilo, anatasa). Los silicatos laminares son quizá los más importantes minerales secundarios que se encuentran en la fracción arcillosa de los suelos. Si bien estos silicatos no están restringidos sólo a la fracción arcillosa, cuando toman el tamaño de la arcilla ( $< 2 \mu\text{m}$ ) se acentúa en gran medida su influencia en el comportamiento de los suelos (Ortega, 1981).

La fracción orgánica sólida está compuesta por los residuos tanto animales como vegetales, con diferentes grados de descomposición, organismos vivos y sustancias sintetizadas por éstos. El contenido de materia orgánica en la superficie de los suelos minerales es comúnmente de alrededor de 0.5% al 5% en peso, pudiendo llegar a 100% en suelos turbosos. A pesar de su bajo contenido la materia orgánica influye de manera importante en el comportamiento químico y físico de los suelos (Ortega, 1981).

Los fluidos, como parte composicional de los suelos, están representados por una parte de una disolución acuosa de sales en donde los iones más comunes encontrados son  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Su importancia radica en que ésta fase funciona como “vehículo” de las sustancias químicas del sistema suelo. En relación con los constituyentes sólidos del suelo, el agua puede presentarse en tres formas distintas (Fig. 6): como una película muy delgada y que se encuentra unida a una partícula sólida por fuerza molecular (agua higroscópica); retenida entre las partículas por capilaridad, la cual en función de la textura (tamaños de grano) puede ser superior a la fuerza de gravedad; y finalmente puede ocurrir llenando completamente todos los vacíos intersticiales

(suelo saturado). La otra parte de los fluidos corresponde a la fase gaseosa, fundamentalmente aire atmosférico: oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono, además de vapor de agua (Jenny, 1994).



**Figura 6.** Distintas formas en que pueden presentarse los fluidos en la composición del suelo. El Agua higroscópica es retenida por fuerza molecular, la capilaridad es una propiedad física del agua y el suelo saturado es cuando el agua llena por completo todos los vacíos entre las partículas. El aire es generalmente de composición igual al atmosférico.

### 2.2.1 Los suelos salinos y sus causas

La salinización de los suelos es un proceso originado de forma natural (salinidad primaria) y/o antrópica (salinidad secundaria) mediante el cual se produce una acumulación de sales solubles (Gartley, 2011). Principalmente incluyen los cationes sodio, calcio y magnesio, y los aniones cloruro, sulfato y carbonato. Esta acumulación ocurre debido a un desbalance entre los aportes y las salidas de éstas sales, influyendo en ello la composición y concentración iónica de las aguas usadas para riego, las prácticas de riego, las prácticas de fertilización, la

efectividad de las lluvias en el lavado (lixiviación) y las propiedades hidráulicas del perfil del suelo (Aguirre, 1993).

Los factores que determinan la movilidad y la acumulación de las sales en un sitio son diversos y de interacciones complejas, por lo que usualmente son poco estudiados de manera integral. Los suelos afectados por sales reciben aportes de varias fuentes, siendo el agua el medio de transporte dominante. El movimiento vertical de las sales a través del perfil ocurre en función de variaciones en diversos factores como el clima, la capacidad de drenaje del suelo, tipos y distancias a las fuentes de aporte y su fluctuación periódica, entre otros. Estos factores cambian en función de la escala de observación, por lo que a escalas regionales adquieren importancia el clima, la elevación del nivel freático y el macro-relieve; mientras que a nivel local los factores más relevantes son las características particulares del micro-relieve y la textura del suelo (Richards, 1954; Tanji, 1996).

Las fuentes de la salinidad en los suelos son el intemperismo de los minerales, la precipitación atmosférica, sedimentos salinos, las acumulaciones locales y las antrópicas. Mediante el intemperismo de los minerales de las rocas y del suelo se liberan constantemente iones, aunque rara vez se disuelven en una proporción estricta a su composición, tienen la tendencia de liberar primero los más solubles. La solubilidad de los diferentes tipos de sales determina en gran medida la afectación. Durante el proceso de intemperismo químico (hidrólisis, hidratación, solución, oxidación y carbonatación) los iones de cloro, sodio, calcio o magnesio son gradualmente liberados, adquiriendo mayor solubilidad y pasando a incorporarse a la solución del suelo. Existe una relación inversa entre la disolución de minerales y su precipitación, resultando en que los óxidos e hidróxidos de sílice y aluminio son los primeros en precipitarse y los últimos en disolverse, mientras que los iones de sodio, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos y carbonatos son los últimos en precipitar, dada su mayor solubilidad, por lo que; son los principales causantes de la salinización del suelo (Tanji, 1996; Ortega, 1981; Redly, 1986).

Las sales también pueden ser liberadas si el agua de escorrentía y las estructuras de almacenamiento o distribución de agua, se localizan sobre o interactúan durante su flujo con sedimentos salinos o lechos evaporíticos (Ortega, 1981).

La atmósfera también es capaz de aportar cantidades significativas de sales. La concentración salina del agua de lluvia es significativa en regiones costeras, pues en ella se pueden presentar concentraciones de cientos de mg/L, aunque disminuye conforme se desplaza hacia dentro del continente hasta alcanzar sólo algunos mg/L. De manera general las lluvias cercanas a la costa son ricas en sodio, cloruros y magnesio, mientras que; en los continentes los iones dominantes son calcio, magnesio, sulfatos y bicarbonatos (Aceves, 1985; Pizarro, 1985; Patchampreecha *et al.*, 1989).

La salinización del suelo también se puede derivar por la presencia de un nivel freático a poca profundidad, en donde las sales acumuladas en el manto freático pueden concentrarse en la superficie del suelo, debido al ascenso del agua por capilaridad, la cual; se ve sometida a procesos de evapotranspiración. Esto ocurre de manera recurrente en las zonas bajas de las regiones áridas y semiáridas, en donde las tasas de evaporación superan significativamente a la precipitación, la cual es insuficiente para lixiviar las sales. Asimismo, se puede asociar a zonas con un mal drenaje superficial o sub-superficial, donde se producen zonas de anegamiento y donde no se permite la percolación y la lixiviación de las sales, respectivamente (Richards, 1954; Carruthers, 1985; Suarez, 1989; Conacher, 1990; Peinemann *et al.*, 1998).

La principal causa antrópica de salinización es la irrigación debido al mal manejo del riego, la utilización de aguas de mala calidad o el uso excesivo de fertilizantes químicos (Ayers y Wescott, 1985; Szabolcs, 1987; Rhodes *et al.*, 1990; Richards, 1954). El agua superficial o subterránea usada para el riego de los cultivos agrícolas contiene sales disueltas, las cuales permanecen en el suelo después de que el agua ha sido evaporada. Por ejemplo, si se supone un agua con una baja

concentración de sales de 0.5 g/L, esto es equivalente a 0.5 kg/m<sup>3</sup>; y si se considera un suministro moderado anual de irrigación de 10 000 m<sup>3</sup>/ha, correspondiente a una lámina de agua de ~3 mm/día, esto produce la adición de 5 t/ha de sales cada año.

### **2.2.2 Definición y clasificación de los suelos salinos**

La salinización del perfil de un suelo puede ser definida como el incremento en la concentración y la eventual precipitación de sales más solubles que el yeso (Gartley, 2011). También se consideran como suelos salinos aquellos en los que se produce una acumulación suficiente de sales para interferir en el crecimiento y desarrollo de los cultivos y otras plantas no halófitas. Los suelos que contienen suficiente sodio intercambiable para que afecte adversamente la producción de los cultivos y la estructura en la mayoría de los suelos se denominan suelos sódicos. Aquellos que, además de ser salinos, cumplen con esta condición, se conocen como suelos salinos sódicos (Richards, 1954; Porta *et al*, 2003).

La incorporación de sales al suelo, además de la influencia en la concentración salina de la solución, puede alterar la composición del complejo de intercambio, incrementando típicamente el porcentaje intercambiable de los iones Na<sup>+</sup> ya que sus sales son las más solubles en la naturaleza. El incremento gradual de la saturación de Na<sup>+</sup> depende de la composición y concentración del agua añadida al perfil, de la cantidad de agua aportada anualmente y de la capacidad de intercambio catiónico del suelo. La concentración excesiva de sales solubles en la solución del suelo puede inhibir severamente el crecimiento de las plantas una vez que sus límites de tolerancia son rebasados (Aguirre, 1993).

Habitualmente los indicadores químicos utilizados para el diagnóstico e identificación de los suelos salinos incluyen la determinación de la conductividad eléctrica del extracto obtenido de la pasta saturada, o de los extractos de las relaciones 1:1, 1:2 o 1:5, de suelo y agua respectivamente. La pasta saturada es una mezcla de agua y suelo hasta saturar todos los poros con agua. Para la

identificación de los suelos sódicos se utiliza la determinación del potencial hidrógeno medido en el extracto, el porcentaje de sodio intercambiable o la relación de absorción de sodio. Tomando en cuenta estos parámetros, los suelos pueden clasificarse en tres grupos. En la Tabla 1 se presentan las bases de esta clasificación y sus categorías.

**Tabla 1. Clasificación de los suelos afectados por salinidad en función de la conductividad eléctrica (CE), potencial hidrógeno (pH), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y relación de adsorción de sodio (RAS). 1 dS/m = mmho/cm.**

Clasificación	CE (dS/m) a 25°C	PSI	RAS	pH
Salino	> 4	< 15	< 13	< 8.5
Salino-sódico	> 4	> 15	> 13	< 8.5
No salino-sódico	< 4	> 15	> 13	8.5-10

Los **suelos salinos** (también llamados álcali blanco) se generan en los climas secos, zonas con mal drenaje y alto índice de evaporación, a menudo presentan unas costras blancas de sales en su superficie. Poseen una conductividad eléctrica en el extracto de saturación mayor a 4 dS/m, con un porcentaje de sodio intercambiable menor a 15%. El sodio rara vez comprende más de la mitad de los cationes solubles. Las cantidades de calcio y magnesio presentes pueden variar considerablemente. Los principales aniones son los cloruros y sulfatos, y en algunas ocasiones los nitratos. Pequeñas cantidades de bicarbonato pueden ocurrir. En adición a las sales fácilmente solubles, también pueden contener sales de baja solubilidad como sulfato de calcio (yeso) y los carbonatos de calcio y magnesio (calcita). Debido a la presencia de sales en exceso y la ausencia de cantidades significativas de sodio intercambiable, los suelos salinos generalmente están floculados y como consecuencia su permeabilidad es igual o mayor que la de los suelos no salinos. Debido a que la salinidad en estos suelos está basada mayormente en sales solubles, con buena permeabilidad, la salinidad puede ser removida mediante lixiviación (Richards, 1954).

Los **suelos salinos-sódicos** contienen sales solubles y sodio intercambiable en tal cantidad que afectan el desarrollo de las plantas. Mientras que el exceso de sales esté presente, la apariencia y las propiedades de estos suelos son semejantes a los salinos, su pH es menor a 8.5 y las partículas permanecen floculadas. Si el exceso de sales solubles es lixiviado, las propiedades de estos suelos pueden cambiar marcadamente y volverse similares a los suelos no salinos-sódicos. Si la concentración de sales solubles en la solución del suelo desciende aún más, algo del sodio intercambiable se hidroliza y forma hidróxido de sodio (sosa caustica), y puede reaccionar con el dióxido carbónico de la atmósfera para formar carbonato de sodio. Bajo estas condiciones, el suelo se puede volver fuertemente alcalino alcanzando valores de pH mayores a 8.5, las partículas se dispersan y el suelo se vuelve desfavorable para la entrada y el movimiento del agua. Si las sales solubles regresan, pueden reducir el pH y restaurar las partículas a un estado floculado. El manejo de los suelos salino-sódicos continuará siendo problemático hasta que el exceso de sales solubles y el sodio intercambiable sean removidos de la zona radicular y se restablezca una condición física favorable para el suelo (Richards, 1954).

Los **suelos no salinos-sódicos** (también llamados suelos alcalinos) ocurren generalmente en condiciones de climas áridos y semiáridos en pequeñas zonas irregulares, excepto cuando el yeso está presente en el suelo o en el agua de riego. El drenaje y la lixiviación de las sales presentes en los suelos salinos-sódicos llevan a la formación de los suelos no salinos-sódicos. Este tipo de suelos padece una destrucción de su estructura debido a la dispersión de las partículas minerales inducida por la saturación de sodio, generando una pérdida de porosidad y por lo tanto; son suelos con muy baja permeabilidad. La dispersión provoca que las sales no sólo se presenten en la superficie, también suele ser característico que se presenten a lo largo del perfil del suelo alcanzando algunas decenas de centímetros de profundidad. Asimismo se provoca una dispersión y disolución de la materia orgánica, que después puede ser depositada en la

superficie por medio de la evaporación, induciendo un oscurecimiento en la apariencia del suelo, de ahí que a estos suelos también se les denomina álcali negro. Los aniones comúnmente encontrados son los carbonatos y bicarbonatos, con pequeñas cantidades de cloruros y sulfatos. Con valores de pH altos y con la presencia de iones de carbonato; el calcio y el magnesio son precipitados, por consiguiente, la disolución presenta valores bajos de estos cationes, mientras que es común encontrar cantidades considerables de los cationes sodio y potasio (Richards, 1954; Aceves, 1979; Aragües y Cerdá, 1998).

Los suelos no salinos-sódicos pueden adquirir características morfológicas peculiares debido a la gran dispersión de la arcilla parcialmente saturada con  $\text{Na}^+$ , la cual puede ser transportada hacia abajo y acumularse en los niveles inferiores dando como resultado unos cuantos centímetros de suelo superficial con textura relativamente gruesa, aunque más abajo; donde se acumula la arcilla, el suelo puede desarrollar una capa densa y de baja permeabilidad, con estructura prismática o columnar. Estas condiciones se desarrollan rápidamente si el agua usada para el riego posee concentraciones altas en  $\text{Na}^+$  (Aceves, 1979; Aragües y Cerdá, 1998).

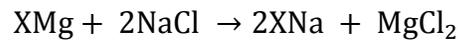
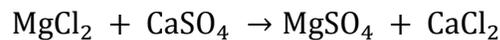
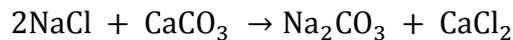
### **2.2.3 Principales tipos de sales**

Los suelos salinos contienen electrolitos en solución, principalmente cloruros, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, sodio, calcio, magnesio y potasio. Sin que cambie la mineralogía de las sales, se presenta una complejidad y variabilidad espacio-temporal en función de la temperatura y la humedad del medio en que cristalizan. Se consideran como más representativos los siguientes tipos de iones (Richards, 1954; Kovda *et al.*, 1967):

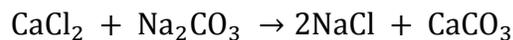
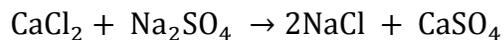
#### **Cloruros ( $\text{Cl}^-$ )**

Los  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  son más frecuentes en la formación de los suelos salinos. Los  $\text{Cl}^-$  son sales muy solubles y con una toxicidad alta. El  $\text{NaCl}$  es la sal más frecuente

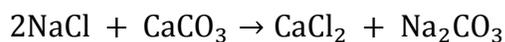
en los suelos salinos, su presencia afecta la solubilidad de otras sales que por efecto de ion común disminuye al aumentar la concentración de NaCl. La eliminación de esta sal requiere el lavado en condiciones de buen drenaje. La acumulación de  $\text{MgCl}_2$  se produce en suelos con una salinidad extremadamente alta. Es una sal altamente tóxica y muy perjudicial para las plantas. Se puede formar si el suelo recibe aguas ricas en iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ , el intercambio con el  $\text{Mg}^{2+}$  puede tener lugar por medio de las reacciones del tipo:



El  $\text{MgCl}_2$  hace que se mantenga húmeda la superficie del suelo mucho tiempo después de una lluvia. Esto se debe a que ésta sal es muy higroscópica y puede absorber agua del aire cuando la atmósfera no está totalmente seca. La mejora de los suelos con  $\text{MgCl}_2$  es difícil ya que por el efecto de dilución de valencia, el  $\text{Mg}^{2+}$  tenderá a ocupar los lugares de intercambio desplazando los iones monovalentes durante el lavado. El  $\text{CaCl}_2$  es una sal muy poco frecuente en los suelos, principalmente por la mayor estabilidad de otras sales a las que puede dar lugar:

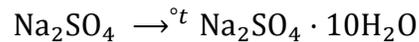


El  $\text{CaCO}_3$  precipita y el NaCl formado puede perderse por lavado, con lo que la reacción progresa a la derecha. La formación de  $\text{CaCl}_2$  se debe a una reacción análoga a la del  $\text{MgCl}_2$ :



### Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

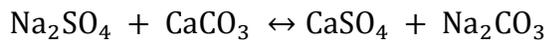
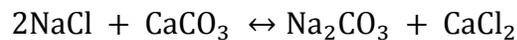
El  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  es un componente frecuente en los suelos salinos, durante el periodo cálido esta sal será transportada a la parte superior del suelo, al igual que otras sales, pudiendo dar lugar a eflorescencias blancas en la superficie. Su composición molecular varía con la humedad, lo que da lugar a dos especies mineralógicas diferentes:



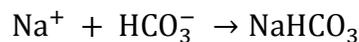
El  $\text{MgSO}_4$  es un constituyente frecuente, muy soluble y altamente tóxico. Su lavado resulta difícil. El  $\text{K}_2\text{SO}_4$  es muy poco frecuente en condiciones naturales, limitándose a crear mayores problemas en donde se hace uso de fertilizantes agrícolas.

### Carbonatos y bicarbonatos de sodio ( $\text{HCO}_3^-$ , $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

La formación de suelos sódicos está íntimamente ligada a la formación de carbonato de sodio en el suelo. Clarke (1908) propuso que la formación de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  puede ocurrir a partir de la reacción de sales neutras:



Otra forma en la que se produce  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  fue propuesta por Eaton (1939) citado por Porta *et al.*, (2003) indicando que es debido a los  $\text{HCO}_3^-$  contenidos en el agua de riego. Cuando en la solución del suelo se encuentra  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^+$  mediante los procesos de humedecimiento y secado se forman  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$  que se precipitan, si queda  $\text{HCO}_3^-$  y/o  $\text{CO}_3^{2-}$  reaccionan con el  $\text{Na}^+$  formando  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ :

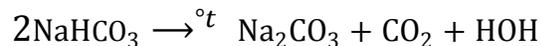


El  $\text{NaHCO}_3$  es muy soluble y se mueve por capilaridad con la solución del suelo, el agua se evapora y la sal se acumula en la superficie, pierde  $\text{CO}_2$  y se forma  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

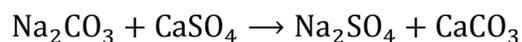
La presencia de  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  indica condiciones fisicoquímicas especiales, ligadas a procesos de alcalinización del suelo (relación de adsorción de sodio  $>13$ ). Los suelos con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y  $\text{NaHCO}_3$  tienen un pH superior a 9, pudiendo llegar a 12. Esta fuerte alcalinidad crea un medio inadecuado para el crecimiento de la mayoría de las plantas. La hidrólisis del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  es el origen de los valores de pH tan elevados:



Los efectos desfavorables del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  se pueden apreciar a partir de concentraciones del orden de 0.05 a 0.1 % de esta sal en el suelo. El  $\text{NaHCO}_3$  da lugar a unas condiciones menos alcalinas y por consiguiente menos tóxicas:



En medios naturales que contengan yeso, el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  tenderá a desaparecer debido al intercambio de bases entre dos sales solubles en las soluciones salinas



El  $\text{CaCO}_3$  formado podrá precipitarse y por su alta solubilidad el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  quedaría en la solución del suelo.

### **Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )**

Las sales de nitratos son raras en los suelos salinos de condiciones naturales, aunque se ha reportado  $\text{NaNO}_3$  en desiertos muy áridos de Chile, Perú e India. Pueden ser encontradas en sitios con un uso abundante de fertilizantes y abonos.

### 2.3 Efectos de la salinidad sobre las plantas y los suelos

De acuerdo con la *Soil Science Society of America (2011)*, los suelos salinos contienen suficientes sales solubles para afectar desfavorablemente el crecimiento de los cultivos. Estos efectos adversos pueden agruparse en tres categorías:

La primera es el efecto osmótico, mediante el cual las raíces de las plantas toman el agua a través de una membrana semipermeable, lo que involucra el movimiento del líquido contenido en el suelo de zonas de baja concentración de sales hacia zonas de alta concentración de sales, como el interior de las células de las raíces. Cuando la concentración en el suelo se eleva, el flujo de agua desde el suelo hacia las plantas se reduce, produciendo un estrés hídrico. Y si el contenido de sales en el suelo sobrepasa al de las células, el suelo extrae el agua contenida en las raíces y la planta se marchita y muere (Aguirre, 1993).

La segunda categoría, involucra el efecto de toxicidad de iones específicos que afectan los procesos metabólicos de las plantas. La toxicidad comienza con un desbalance de iones en los tejidos de la planta, frecuentemente asociado con el exceso de iones de  $\text{Na}^+$ . La planta puede soportar hasta cierto grado este exceso de  $\text{Na}^+$  regulando su asimilación o excretándolo. Este proceso, sin embargo, requiere de una cantidad de energía extra y por esta razón las plantas sujetas a condiciones salinas presentan mayores valores de respiración y reducen el almacén de azúcares en comparación con las plantas en condiciones no salinas (Poljakooff y Gale, 1988).

Bajo situaciones de alta intensidad luminosa, las plantas muestran generalmente una mayor capacidad de mantener los balances iónicos en los órganos de la planta. El desbalance iónico puede asociarse a los disturbios causados en la asimilación de  $\text{CO}_2$  y a la reducción drástica de la transformación de lípidos. La falta de energía, como una consecuencia de la salinidad, puede afectar varios procesos que requieren de ésta, tales como la asimilación de  $\text{CO}_2$ , la síntesis de proteínas o la asimilación de N inorgánico. La mayoría de las plantas son más

sensibles a la salinidad durante la germinación que en cualquier otra etapa de crecimiento (Aguirre, 1993).

Y la tercera categoría, corresponde al efecto secundario del ion sodio sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo, en donde su exceso provoca la expansión y/o dispersión del suelo, dificultando o limitando la penetración y respiración de las raíces. También provoca un aumento en el pH, limitando la absorción de micronutrientes (FAO, 2005).

El proceso de salinización también provoca la disminución de la estabilidad estructural del suelo influyendo en la reducción de las tasas de infiltración y conductividad hidráulica del suelo (Gómez, 2004). El alto contenido de sodio de los suelos produce dispersión de los coloides arcillosos y húmicos provocando la destrucción de los agregados del suelo y el taponamiento de poros, esto implica la formación de horizontes sub-superficiales con estructura prismática y muy baja permeabilidad, quedando en la superficie horizontes arenosos con estructuras débiles y baja fertilidad. La costra de coloides que se origina en la superficie al secarse se rompe creando un suelo con mayor susceptibilidad a la erosión (Sherard *et al.*, 1976).

## **2.4 Reacciones de equilibrio**

Un sistema puede ser cualquier objeto, cantidad de materia o región del espacio limitada por una superficie real o ficticia, seleccionado para estudiarlo (Smith *et al.* 1997). El resto del universo es el entorno o medio exterior. Se dice que un sistema se encuentra en estado de equilibrio termodinámico si es incapaz de experimentar espontáneamente algún cambio de estado cuando está sometido a condiciones determinadas. El estado de equilibrio puede ser calculado para un sistema en particular. Un sistema en equilibrio tiene la característica de estar en su estado de mínima energía; para un sistema con temperatura (T) y presión (P) constante la

medida apropiada de energía es la Energía libre de Gibbs (G) la cual está relacionada con la entalpía (H) y la entropía (S) por la siguiente ecuación:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Cuando un sistema se mueve hacia el equilibrio puede liberar calor e incrementar su entropía, o puede experimentar diferentes cambios de calor y entropía. De la ecuación un  $\Delta G$  negativo nos indica un proceso espontáneo mientras que  $\Delta G = 0$  indica que el proceso está en equilibrio. Es decir en una reacción del tipo  $A + B = C$ , cuando el  $\Delta G$  es negativo el proceso ocurre hacia la derecha, mientras que un  $\Delta G$  positivo indica que la reacción sucede en el sentido inverso (o que la reacción no se producirá en el sistema).

Para una reacción química del tipo  $aA + bB = cC + dD$  si el sistema está en equilibrio la siguiente relación es cierta:

$$\frac{a_C^c a_D^d}{a_A^a a_B^b} = Keq$$

Donde a, b, c y d son los moles de A, B, C y D respectivamente,  $a$  es la actividad y  $Keq$  es la constante de equilibrio. Si la expresión no se encuentra en equilibrio el lado izquierdo de la ecuación es llamado el producto de actividad (AP, por sus siglas en inglés) o el producto de la actividad iónica (IAP) cuando están involucrados los iones de las especies. Las expresiones (AP/Keq) y  $\log (AP/Keq)$  son utilizadas para saber qué tan alejado se encuentra el sistema del equilibrio (Drever, 1997). La expresión  $RT \ln(AP/Keq)$  representa el cambio de la energía libre utilizada en convertir un mol de reactantes a productos bajo las condiciones a las cuales el AP es medido ( $R$  es la constante de los gases). El uso más común para estas expresiones es para describir la extensión a la cual una solución en particular se encuentra súper saturada o sub saturada respecto a una fase sólida (mineral). El término índice de saturación (IS) es usado para  $\log (IAP/Keq)$  para una disolución.

## Capítulo 3. Zona de estudio

### 3.1 Tierra Nueva

El municipio de Tierra Nueva se localiza en la parte sur del estado de San Luis Potosí, a 75 km de la ciudad capital, en los límites con el estado de Guanajuato en México. Las coordenadas de la cabecera municipal son: 2397010 N y 337058 W (Datum WGS84), con una altura de 1780 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte y oeste con el municipio de Santa María del Río; mientras que al sur y al este con el estado de Guanajuato (Fig. 7). Cuenta con 138 localidades y una población total de 9024 habitantes (INEGI, 2010).

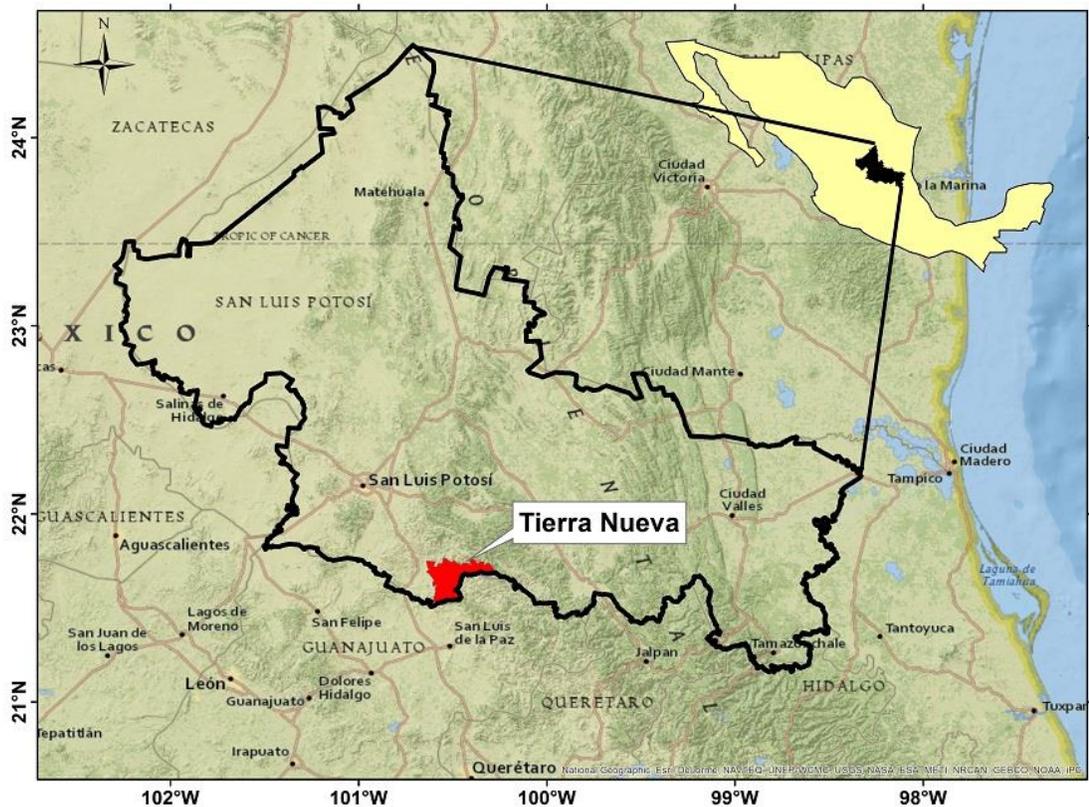


Figura 7. Localización general del área de estudio, mostrando el estado de San Luis Potosí (negro) y el territorio municipal de Tierra Nueva (rojo). Realizado con ArcMap.

### 3.2 Clima

El clima seco templado con lluvias en verano es el que predomina en la mayor parte del territorio municipal y se presenta hacia el centro; al noreste prevalece el semiseco semicálido; y al noroeste una porción de clima seco semicálido (Fig. 8). Su temperatura media anual es de 19°C, con registros de máxima de 44°C y mínima de -8°C, la temporada cálida comprende los meses de marzo a octubre y el periodo frío de noviembre a febrero. La precipitación anual promedio es de 363 mm, mientras que la evaporación potencial es de 1755 mm (Fig. 9).

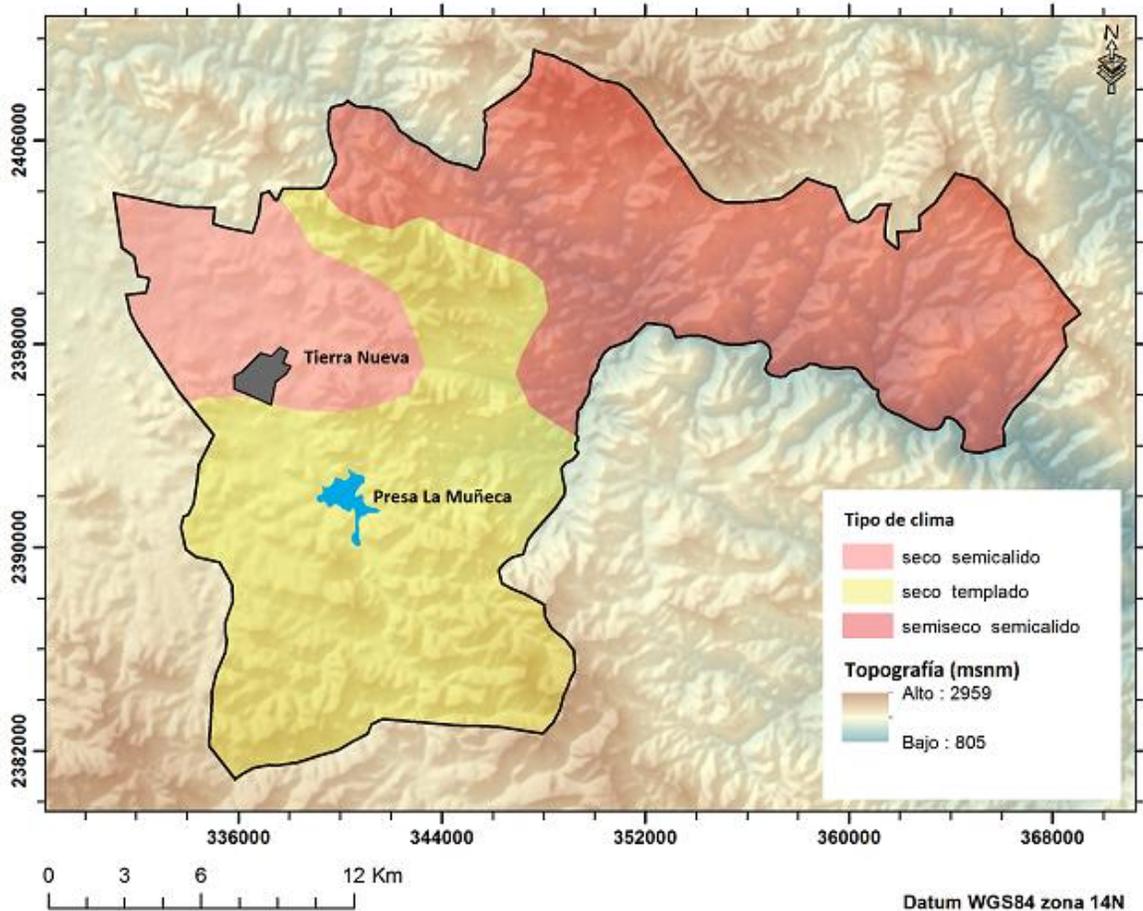
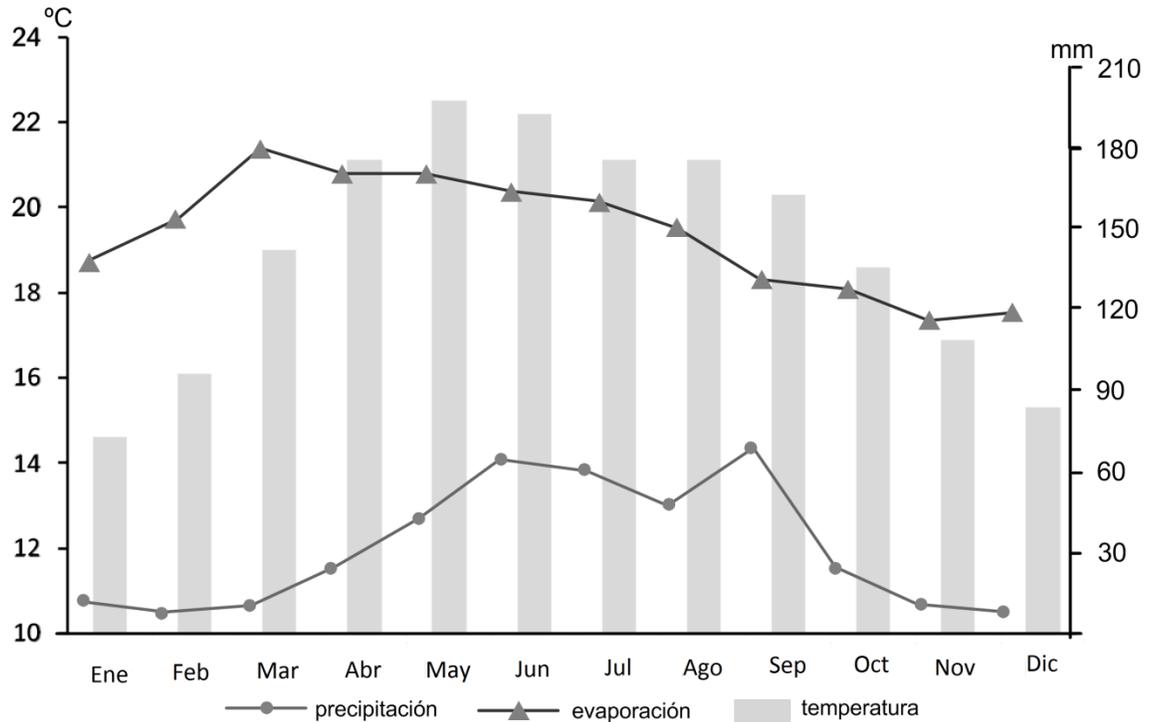


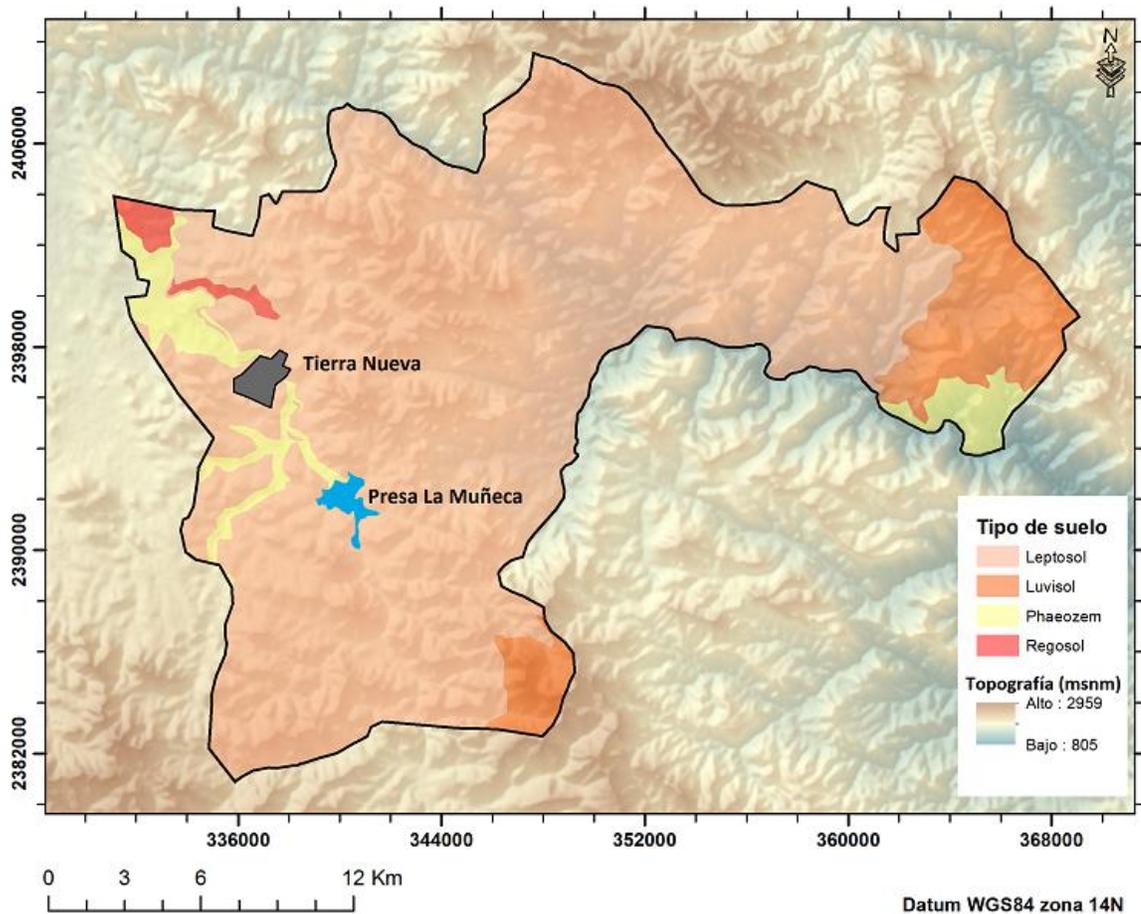
Figura 8. Distribución espacial de los climas presentes en el municipio de Tierra Nueva, San Luis Potosí, México. Realizado con ArcMap.



**Figura 9. Datos mensuales promedio de temperatura, evaporación potencial y precipitación registrados en la estación climática Tierra Nueva durante el período 1961-2001 (INIFAP, 2005).**

### 3.3 Tipo de suelo

El suelo que cubre la mayor parte del territorio municipal es del tipo Leptosol, le siguen en proporción el Luvisol, luego el Feozem y finalmente el Regosol (Fig. 10). El Leptosol se caracteriza por su escasa profundidad, normalmente menos de 25 cm, y contiene menos del 20 % de su volumen de material fino, como resultado poseen un buen drenaje interno. Aparecen fundamentalmente en zonas con una topografía escarpada y pendiente elevada. Son suelos con un potencial bajo para el desarrollo de la agricultura, y en las pendientes de las colinas son generalmente más fértiles que en las partes llanas; sin embargo; son suelos fácilmente erosionables (FAO, 2001).



**Figura 10. Tipos de suelos que se presentan dentro del territorio municipal de Tierra Nueva, San Luis Potosí, México. Realizado con ArcMap.**

El suelo Luvisol es el siguiente en extensión en la zona y se presenta hacia la zona oriental del municipio y otra pequeña zona en la parte sureste. Estos suelos poseen un horizonte árgico, el cual se compone de un estrato sub-superficial que contiene mayor cantidad de arcillas que el estrato superior, presente en la superficie. Las arcillas se caracterizan por ser de alta actividad pero sin lixiviación marcada de los cationes básicos. Se desarrollan en ambientes de tierras llanas o de pendientes suaves en regiones templadas y cálidas con estación seca y húmeda marcada. La mayoría de los Luvisoles son suelos fértiles y apropiados para un amplio rango de usos agrícolas, sin embargo; si se presentan en

pendientes fuertes y se les da este uso, requieren medidas de control para evitar su erosión (FAO, 2001).

Otro suelo presente en la zona corresponde al tipo Feozem, estos suelos poseen un horizonte superficial oscuro, rico en humus. Los carbonatos están ausentes en el metro superior del perfil, pero tienen alta saturación con bases. Se desarrollan en ambientes cálidos y húmedos, con estaciones secas, y sobre tierras llanas o con pendientes suaves. Son suelos porosos, fértiles y excelentes para el desarrollo de la agricultura (FAO, 2001).

El suelo de menor extensión que ocurre en el municipio se trata del tipo Regosol, son suelos minerales muy jóvenes y poco desarrollados en materiales no consolidados con bajo contenido de gravas y alto contenido de material fino. Son particularmente comunes en zonas de ambiente árido y en regiones montañosas. Tienen una importancia mínima para el desarrollo de la agricultura, debido a la baja retención de humedad que exhiben, si son utilizados para ese fin, necesitan riegos fuertes y constantes (FAO, 2001).

### **3.4 Geología**

Estratigráficamente las rocas reconocidas en la zona varían del Cretácico hasta el Holoceno. Estas rocas se dividen en dos grandes secuencias. Una sedimentaria que corresponde a la Cuenca Mesozoica del Centro de México; y una cubierta volcánica Cenozoica. También se presenta un batolito de composición granítica del Terciario. Las rocas sedimentarias están representadas por la Formación Santuario (?), las Facies Socavón de la Formación Doctor del Cretácico Inferior y la Formación Soyatal del Cretácico Superior. La primera está constituida por una calcarenita de color gris, de grano fino y estratificación delgada, ligeramente arcillosa, con esporádicas intercalaciones de limolitas de color rojizo. Esta secuencia varía hacia la cima desapareciendo las limolitas rojizas y aumentando la presencia de lutitas y areniscas, representando una alternancia de lutitas fisiles de color amarillo, calizas arcillosas de color gris oscuro que intemperizan a color

amarillo ocre y capas de areniscas del mismo color ligeramente calcáreas de grano medio. Sobre esta formación aflora una unidad calcárea constituida por capas de 0.3 a 1 metro de espesor de caliza criptocristalina, de color gris y fractura concoidea, con intercalaciones delgadas de pedernal y nódulos de pedernal de color negro, intemperiza en color rojizo amarillento. Esta unidad se correlaciona con la Formación Doctor (Servicio Geológico Mexicano, 1999).

Cubriendo a la Formación Santuario por discordancia angular se tiene una ignimbrita de composición riolítica con escasas intercalaciones de aglomerados y en su parte media existe un horizonte de vitrófido color negro. Hacia su cima las ignimbritas están fuertemente soldadas. Sobreyaciendo discordantemente a la ignimbrita se presentan derrames lávicos de composición dacítica de textura porfídica, con intercalaciones de tobas dacíticas y dos horizontes de vitrófidos. Sobreyaciendo a la dacita se exhibe un derrame de composición riolítica de color rojo, compacta con cristales orientados, hipocristalina, de grano medio con matriz intergranular; en la base está formada por riolitas porfídicas que gradúan hacia la cima a riolitas de grano fino, vesicular, culminando con horizontes lenticulares de vitrófidos. Dentro de esta unidad se han definido algunos domos, siendo el más relevante por sus dimensiones el de Cerro El Viejo, que alcanza una altura de 500 metros y tiene forma circular. Otros son elongados y se relacionan con fisuras orientadas NE-SW. Sobreyaciendo por discordancia a la riolita, se presentan tobas y riolitas y que consisten en su base de una intercalación entre tobas e ignimbritas de composición riolítica de color blanco a rosa con escasos fragmento líticos, cambiando en su parte alta a una brecha riolítica formada por fragmentos angulosos que varían en tamaño desde centímetros a un metro de diámetro, fuertemente soldada por una matriz cristalina. Por discordancia sobreyaciendo a la mayor parte de las rocas antes descritas se observa una andesita de color café oscuro a verde oliva, con cristales aislados de plagioclasa orientados en una matriz vítrea, hacia su base muestra estructura vesicular y hacia su cima un vitrófido (Servicio Geológico Mexicano, 1999).

Se presentan en la zona una serie de rocas intrusivas en forma de apófisis de distintas dimensiones y de composición granítica a tonalítica, que por su posición estratigráfica se les asigna edad Oligoceno Tardío. En su fase granítica es común encontrar xenolitos de caliza fuertemente silicificada (Servicio Geológico Mexicano, 1999).

El cuaternario está definido por conglomerados polimícticos de fragmentos de granito, dacita y riolita, así como aluviones depositados en los márgenes de los lechos de los ríos y arroyos compuestos por gravas, arenas y limos (Servicio Geológico Mexicano, 1999).

Hacia la zona sureste se observa la Cabalgadura El Vergel que es un deslizamiento que pone en contacto la Facies Socavón de la Formación Doctor con la Formación Santuario. Por otra parte, se presentan una serie de lineamientos, que forman parte de un sistema de tipo extensional, el cual forma pilares y fosas. Están orientados de manera preferencial NW-SE, y en algunos casos NE-SW (Servicio Geológico Mexicano, 1999).

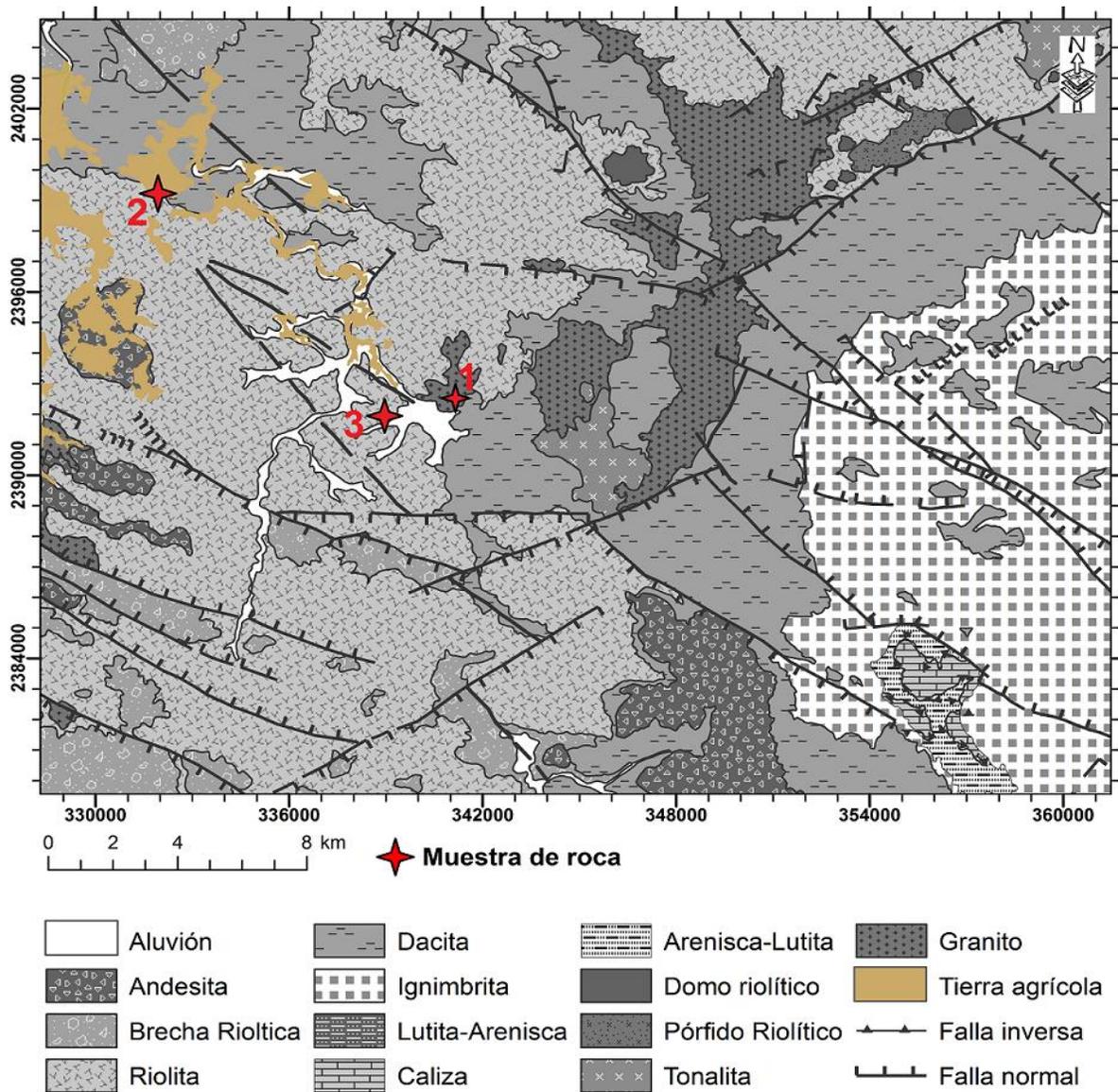


Figura 11. Mapa geológico de la zona de estudio indicando las muestras para el análisis petrográfico. Tomado y adaptado de la carta geológico-minera F14-C25 del Servicio Geológico Mexicano. Realizado con ArcMap.

### 3.5 Hidrogeología

Los pozos y norias localizados en el área de estudio, se encuentran sobre el valle del río Jofre, no hay pozos en los lomeríos formados por las rocas volcánicas. Esto indica que el principal acuífero se encuentra en el material que rellena el valle;

mientras el resto de la zona no tiene buena conductividad hidráulica. Lo cual coincide con los resultados de Rosas (2014) para el sitio de estudio, en donde se identifica una zonificación del subsuelo en cinco diferentes unidades geoeléctricas (U1-U5). La geometría de dichas unidades varía de forma compleja ya que su contexto geológico está dominado por flujos volcánicos de distribución irregular, sin embargo, se observan tendencias que pueden caracterizar la geometría regional del subsuelo. Se propone la siguiente correlación entre las unidades geoeléctricas y las características hidrogeológicas de las diferentes zonas (Fig. 12):

- (a) La parte Oeste con resistividades bajas representadas por las unidades U1 y U2. Se extienden de N a S. Sus condiciones hidrogeológicas son potencialmente favorables para albergar un acuífero. Sus resistividades se asocian a suelos arcillosos y rocas volcánicas andesíticas y dacíticas alteradas, respectivamente. Sin embargo, también podrían asociarse a rocas fracturadas con matriz arcillosa o con presencia de óxidos de hierro, lo que podría enmascarar la presencia de un acuífero.
- (b) La parte Central muestra resistividades medias en donde se tiene la unidad U3 con características hidrogeológicas poco permeables a ligeramente permeables, se asocia litológicamente a las rocas volcánicas andesíticas y riolíticas con poco grado de alteración. Se interpreta como una transición entre unidades adyacentes.
- (c) La parte este presenta resistividades altas y se tienen las unidades U4 y U5 de características hidrogeológicas muy poco permeables. Se asocian litológicamente a rocas riolíticas muy compactas y a rocas intrusivas de composición granítica, respectivamente.

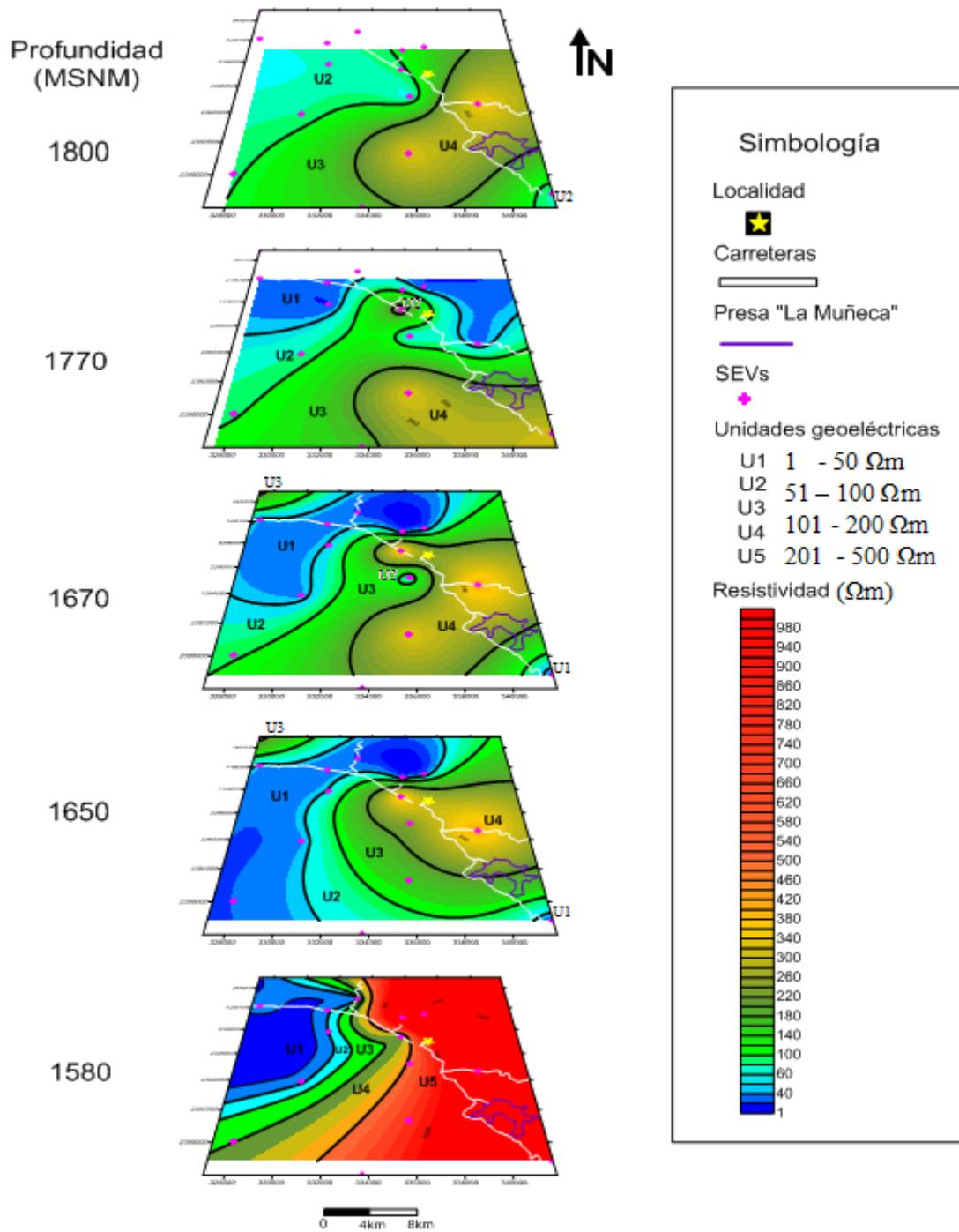


Figura 12. Cartas de interpolación de resistividades para diferentes elevaciones. Tomada de Rosas, 2014, p. 39.

## Capítulo 4. Métodos y materiales

---

El desarrollo del presente estudio consistió principalmente de tres etapas de trabajo:

- 1) La recopilación de información de clima, tipo de suelo, geología y censo de aprovechamientos hidráulicos de la zona mediante el análisis de los datos vectoriales elaborados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en escalas 1:250 000, 1:50 000 y 1:20 000 correspondientes a las hojas F14-7, F14C25 y F14C25a-f; de la carta geológico-minera escala 1:50 000 F14C25 editada por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) y de datos digitales en archivo Excel de los censos de aprovechamientos hidráulicos proporcionados por la Dirección Local San Luis Potosí de la Comisión Nacional del Agua.
- 2) En base a un análisis general de los datos anteriormente descritos se estableció una campaña de muestreo de agua y de suelos para su análisis en el laboratorio.
- 3) Una vez realizado la toma de muestras de agua, suelo, rocas y sales; se desarrolló la etapa de laboratorio en la cual se hicieron las determinaciones de aniones y cationes a las muestras de agua; de textura, potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica y aniones y cationes a las muestras de suelo; microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos a las muestras de sales, y descripción petrográfica de las muestras de roca.

### 4.1 Muestreos

#### 4.1.1 Agua subterránea

Se realizó una primera campaña de muestreo en septiembre de 2012 siguiendo el protocolo establecido en *Standard Methods for the Examination of Water and*

*Wastewater* (Clesceri *et al.*, 1998) publicado por la *American Public Health Association*. En total se tomaron 22 muestras de agua con una bomba peristáltica las cuales fueron filtradas con membrana de acetato de celulosa con poros de 45  $\mu\text{m}$ . Los sitios muestreados corresponden a tres pozos, 16 norias, dos manantiales y una muestra de agua de la presa La Muñeca (Fig. 13). Las muestras de los pozos se tomaron en la descarga del brocal de los mismos, las de las norias a una profundidad de 0.5 a partir del espejo de agua, mientras que las de los manantiales y la presa son muestras superficiales. En cada caso se determinaron *in situ* los parámetros temperatura, oxígeno disuelto, potencial óxido-reducción, potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica con un equipo multiparámetro de la marca YSI Environmental, modelo 556 MPS el cual fue calibrado en el laboratorio con soluciones estándar antes de cada salida. También se determinó la alcalinidad mediante el método de titulación, utilizando para ello el kit de alcalinidad HI 3811 de la marca Hanna Instruments.

En agosto de 2013 se realizó otra campaña de muestreo pretendiendo que fuera en los mismos 22 sitios en los que se realizó la vez anterior. Sin embargo, en cinco lugares no se pudieron tomar muestras ya que dos estaban secos, en otro no se obtuvo el permiso del dueño y dos pozos no estaban en funcionamiento; no obstante, se tomaron dos muestras que en el primer muestreo no se habían hecho. Por lo tanto, las muestras corresponden a 16 norias, un pozo, un manantial y a la presa La Muñeca. En cada caso se volvieron a determinar *in situ* los mismos parámetros y con el mismo instrumento.

Las muestras fueron almacenadas en envases de polietileno de alta densidad lavados previamente con Extran<sup>®</sup> y después con una solución de HCl al 10%, y enjuagados finalmente siete veces con agua desionizada. Los recipientes para la determinación de cationes fueron de 60 mL y se agregó ácido nítrico como conservador hasta alcanzar un  $\text{pH} \leq 2$  para evitar la precipitación de las especies ionizadas. Para los aniones, se tomaron en envases de 60 mL de capacidad y no se agregó ningún conservador.

Todas las muestras fueron almacenadas en refrigeración hasta su análisis en el laboratorio para minimizar la actividad bacteriana.

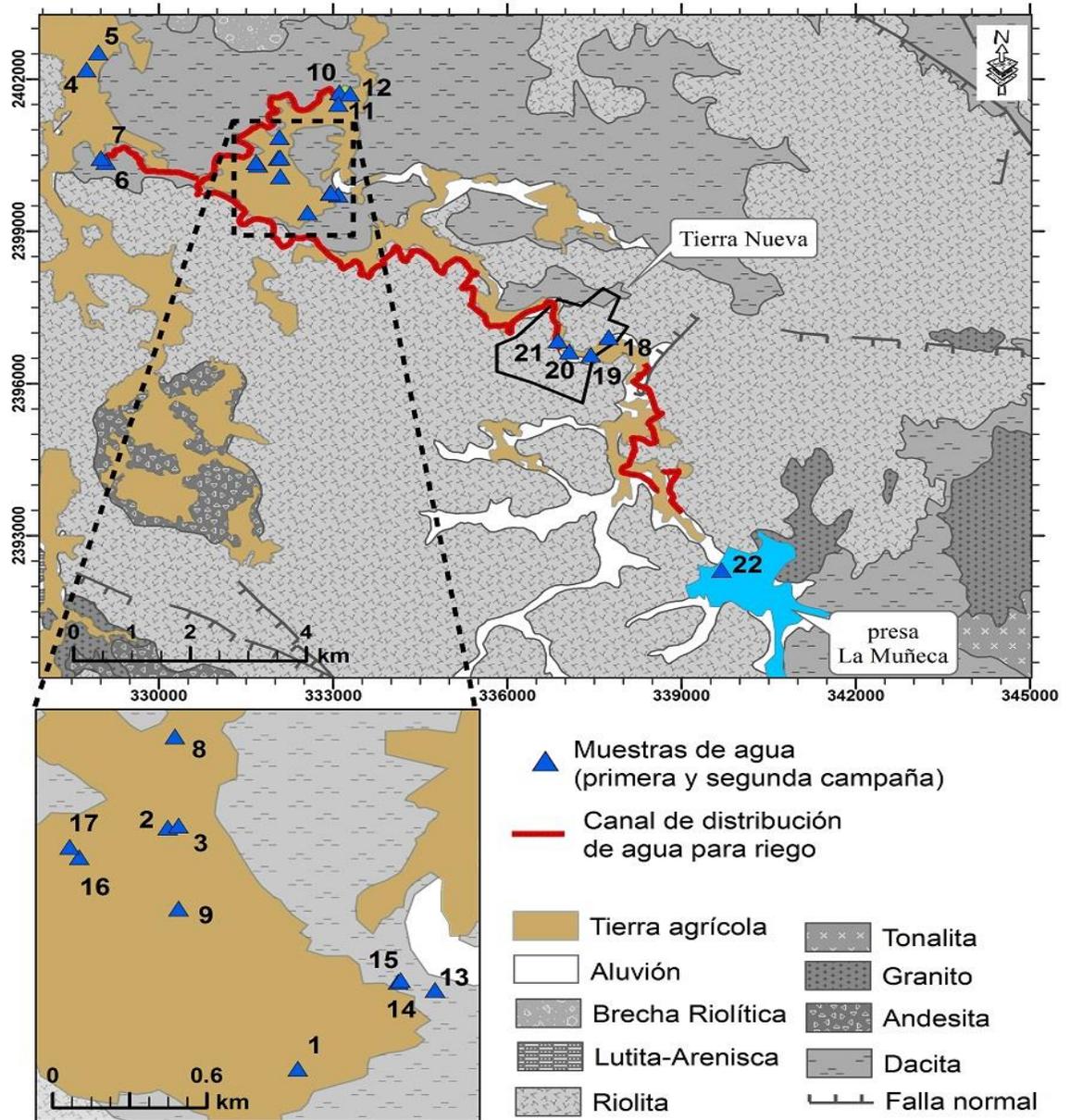


Figura 13. Mapa de localización de las muestras de agua tomadas para este estudio. Se realizaron dos campañas de muestreo, la primera fue en septiembre de 2012 y la segunda en agosto de 2013. Realizado con ArcMap.

#### 4.1.2 Muestreo de suelo

En el caso de las muestras de suelo se realizaron dos campañas siguiendo las recomendaciones establecidas por la *Canadian Society of Soil Science* (Carter y Gregorich, 2006), la primera fue en septiembre de 2012 en la cual se recolectaron muestras en 11 sitios cercanos a donde se tomaron las muestras de agua. En cada caso, se muestrearon de 0-30 cm y de 30-60 cm de profundidad, sumando un total de 22 muestras (Fig. 14).

El segundo periodo de muestreo fue en marzo de 2013 y las muestras se tomaron en la zona agrícola de riego tratando de que formaran una rejilla con nodos separados cada 200 metros cubriendo un área de 2.5 km<sup>2</sup> aproximadamente, en total fueron 70 muestras. En algunos casos no fue posible el acceso al lugar donde se debía extraer la muestra según la rejilla, por lo tanto, estas muestras se tomaron en otro sitio lo más cercano posible al que se planeó. En cada sitio se tomaron las coordenadas con GPS de la marca Trimble modelo GeoExplorer 3000 con precisión de 0.5 m (Fig.15). La muestra fue de un kilogramo aproximadamente y se tomaron de 0-30 cm de profundidad en todos los casos y sólo en tres casos se tomaron muestras de 30-60 cm de profundidad. Todas las muestras fueron almacenadas en bolsas de polietileno.

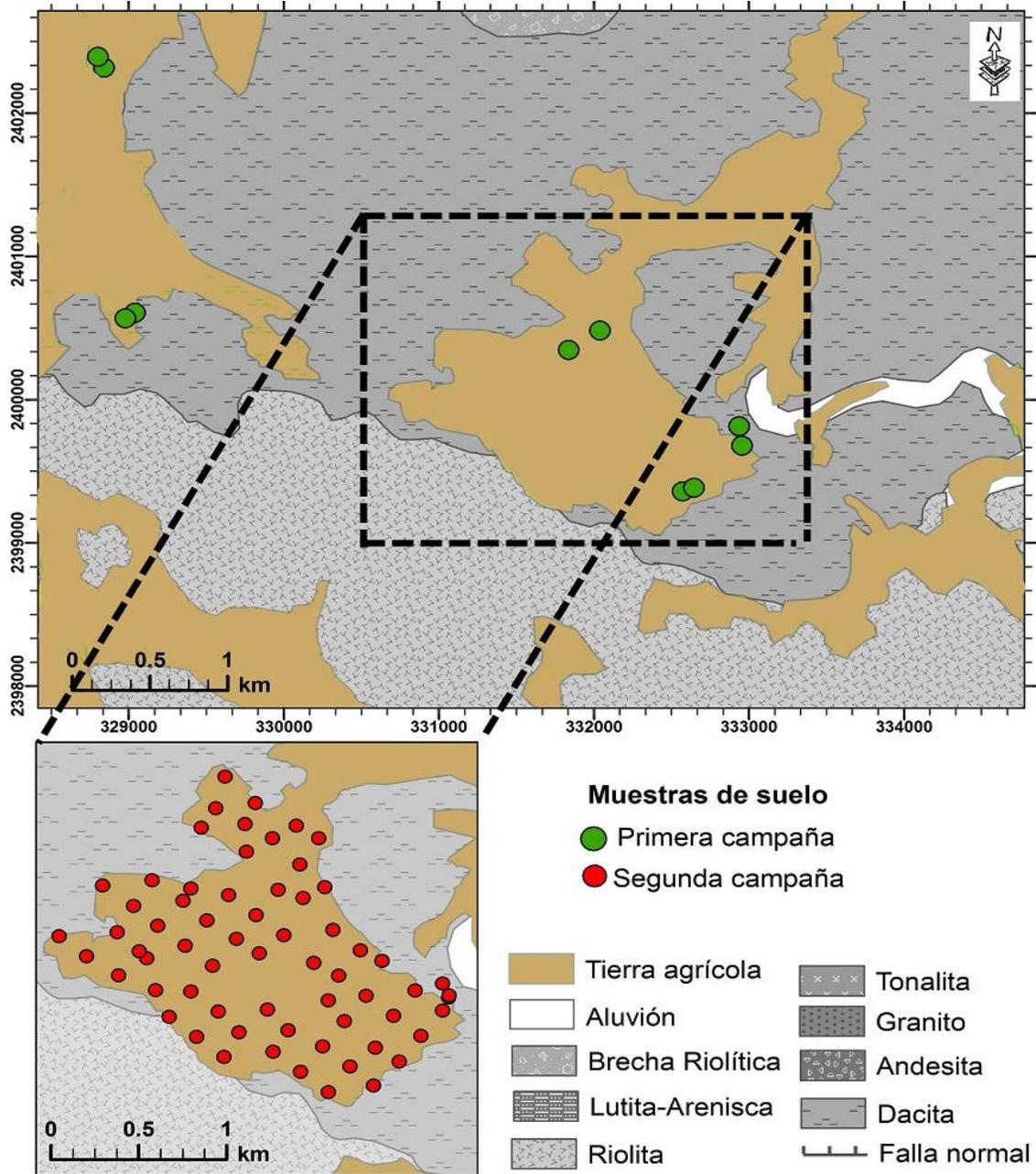


Figura 14. Mapa de localización de las muestras de suelo tomadas para este trabajo. Se hicieron dos campañas de muestreo: la primera fue en septiembre de 2012; la segunda fue en marzo de 2013. Realizado con ArcMap.

### 4.1.3 Muestreo de sales

En un sitio cercano al río Jofre se pudo observar una costra de sales precipitadas en la superficie del suelo (Fig. 15a). De aquí se tomaron cuatro muestras de sal que variaban de un color blanco a amarillento y a café (Fig. 15b), para realizarles un análisis de microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X.

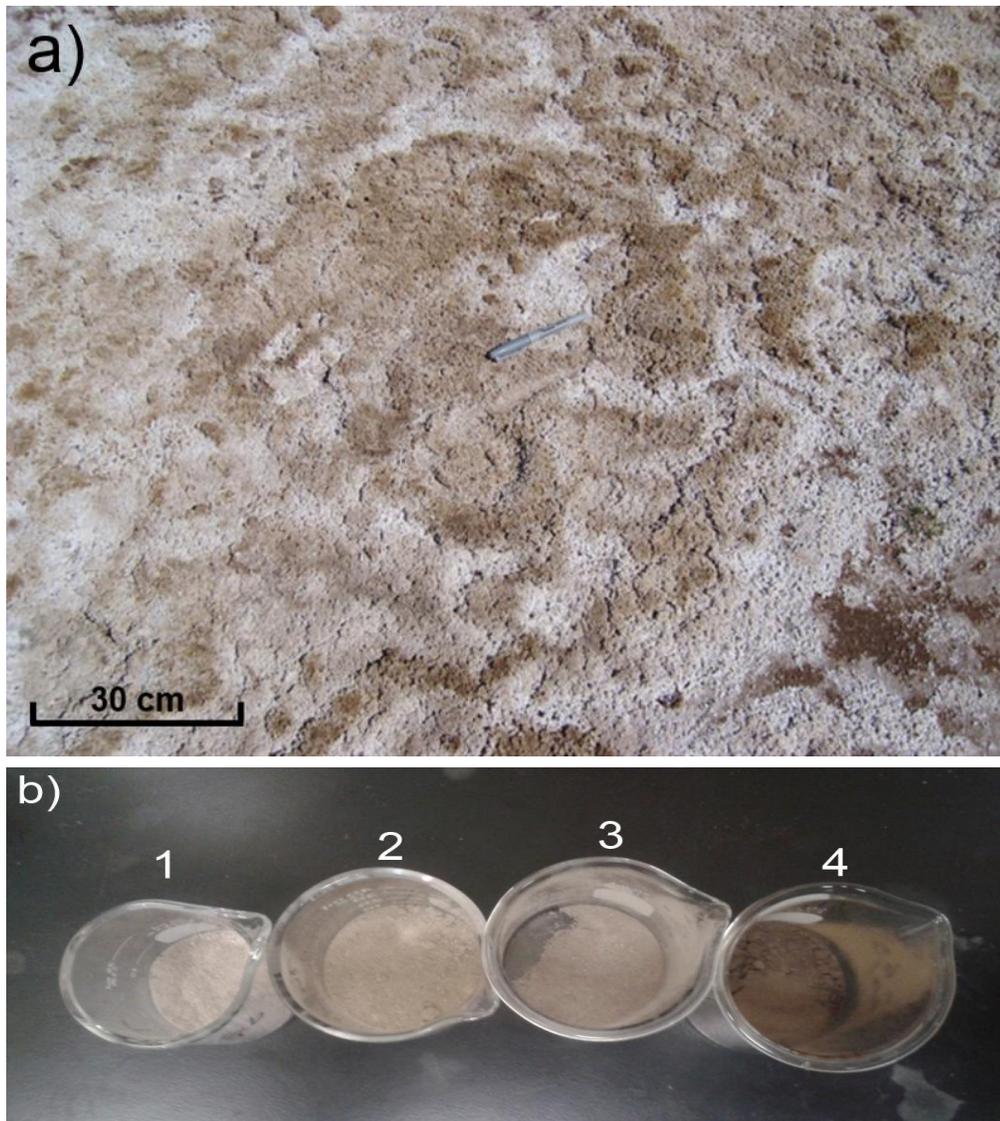


Figura 15. Fotografía donde se observa la costra de sales precipitadas sobre la superficie del suelo de una zona cercana al río Jofre (a) y muestras de sales recolectadas de ésta zona (b).

#### **4.1.4 Muestreo de rocas**

Del mapa geológico de la región se pudo observar que las zonas de donde se tomaron las muestras de agua y las muestras de suelo están desarrolladas sobre tres tipos de litologías distintas, lo cual fue corroborado durante los recorridos en campo. Estas tres unidades litológicas corresponden al granito, a la riolita y a la dacita, de las cuales se tomó una muestra de cada una para realizar una descripción petrográfica e identificar su mineralogía (Fig. 11). Las muestras de riolita y granito se hicieron cerca de la presa La Muñeca utilizando para ello un marro, se removió la parte exterior de la roca la cual estaba expuesta a la intemperie y se tomó la muestra de la parte “fresca” de la roca. La muestra de la dacita fue realizada cerca de la zona agrícola de estudio, de una zanja de tres metros de profundidad hecha por una retroexcavadora, en la cual el perfil de suelo media un metro aproximadamente, y los otros dos metros correspondían a la roca.

#### **4.2 Análisis de muestras**

##### **4.2.1 Para muestras de agua**

###### ***4.2.1.1 Parámetros fisicoquímicos en campo***

El equipo multiparámetro YSI Environmental, modelo 556 MPS, mide simultáneamente oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura y potencial de hidrógeno, teniendo todos los sensores en una única sonda con un peso en su extremo lo cual facilita su inmersión en el agua que se desea analizar. Para la medición de estos parámetros fisicoquímicos en las norias muestreadas y en la presa, se introdujo la sonda directamente al agua procurando mantenerla sumergida a unos 50 cm de profundidad; en el caso de los pozos, se tomó una muestra directamente de la descarga en un recipiente de plástico en el cual se metió la sonda; y para los manantiales la sonda se colocó directamente en el

nacimiento de los mismos. Todas las lecturas se tomaron hasta que los valores se mantuvieron estables.

La alcalinidad fue determinada mediante el método de titulación utilizando una jeringa calibrada y ácido clorhídrico de concentración 0.03 normal basándose en el método 2320 del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Clesceri *et al.*, 1998).

#### **4.2.1.1 Determinación de aniones y cationes**

A las muestras de la primer campaña se les realizaron la determinación de los aniones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), fluoruro ( $\text{F}^-$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C. (IPICYT) por el método de colorimetría usando un equipo SMART 2 de la marca LaMotte.

Los cationes sodio ( $\text{Na}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) fueron determinados por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado por inducción, marca Thermo ICAP 6500 Duo View, dentro del Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Para las muestras de la segunda campaña de muestreo se hicieron los análisis de aniones fluoruro ( $\text{F}^-$ ), cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) por cromatografía de iones en el Laboratorio de Hidrogeoquímica del CICESE. El análisis se realizó con el equipo ICS-2000 DIONEX, realizando las mediciones con 6 minutos de integración, utilizando como eluyente una solución de hidróxido de sodio a una concentración de 4 mM y agua mili-Q para la limpieza de las líneas.

Los cationes sodio ( $\text{Na}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) fueron analizados por espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado por inducción (ICP-AES) con un equipo Varian Liberty 110. La calibración se llevó a cabo con estándares de laboratorio y reactivos marca FISHER. Como control de calidad por cada cinco muestras se analizó un estándar.

#### **4.2.1.2 Determinación de los índices de saturación**

Para el cálculo de los índices de saturación se utilizó el software *The Geochemist's Workbench* (GWB, Bethke, 1996). Este modelo utiliza como datos iniciales los resultados de los análisis fisicoquímicos de agua y revela información de las especies acuosas y el índice de las fases sólidas posibles, de acuerdo con la composición química de la solución.

#### **4.2.2 Para muestras de suelo**

##### **4.2.2.1 Textura**

Las muestras de la primera campaña de muestreo fueron enviadas a la Universidad Autónoma de Chapingo para su análisis en donde se determinó la textura por el método del hidrómetro (Gee y Bauder, 1986).

Para la segunda campaña se utilizó el método propuesto por Thien (1979). El método consiste en tomar una porción de suelo (previamente secado al aire y pasado por tamiz de aberturas de 2 mm), del tamaño de la palma de la mano, humedecerla y seguir una serie de pasos consecutivos manipulando la muestra con la mano siguiendo un diagrama de flujo (Fig. 16). Conforme se avanza más en el diagrama las muestras poseen mayor contenido de arcilla.

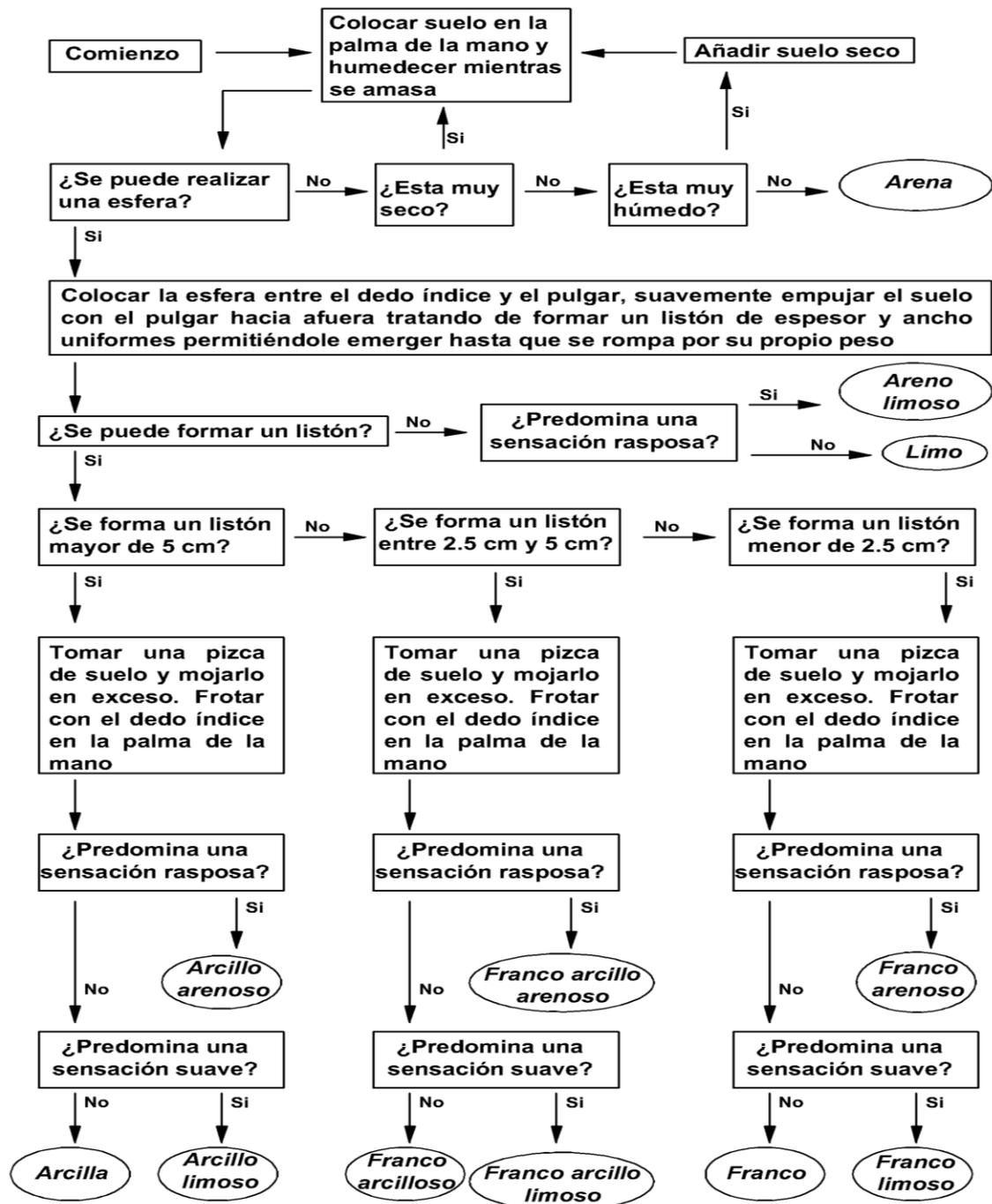


Figura 16. Diagrama de flujo para determinar la textura de un suelo utilizado en este trabajo. Adaptado de Thien, 1979.

#### **4.2.2.2 Parámetros fisicoquímicos**

Las muestras de suelo de la primera campaña de muestreo fueron enviadas a la Universidad Autónoma de Chapingo para su análisis en donde se determinó el pH en relación suelo-agua 1:2 y conductividad eléctrica en el extracto de la pasta de saturación.

##### **Potencial de Hidrógeno**

En la segunda campaña se utilizó un equipo Multiparámetro marca Thermo modelo Orion 250A+ con sonda para pH.

El procedimiento para preparar el extracto del suelo fue:

1. Pesar 100 g de suelo y colocar en un vaso de precipitado.
2. Agregar 100 mL de agua destilada.
3. Agitar durante 1 minuto con el agitador magnético y dejar reposar la muestra 10 minutos.
4. Calibrar el potenciómetro con las soluciones buffer.
5. Pasados los 10 minutos de reposo tomar la medida de pH en la solución sobrenadante.

##### **Potencial óxido-reducción**

Se usó un equipo Multiparámetro marca Thermo modelo Orion 250A+ con sonda para potencial óxido-reducción (ORP).

El procedimiento para preparar el extracto del suelo fue:

1. Pesar 100 g de suelo y colocar en un vaso de precipitado.
2. Agregar agua destilada recientemente hervida pero a temperatura ambiente hasta cubrir bien la muestra de suelo.
3. Agitar para causar la dispersión del suelo.

4. Introducir el electrodo en la solución y dejar reposar hasta que se muestre una medida estable.

### **Conductividad Eléctrica (CE)**

El equipo para medir la CE es un conductímetro que consiste en dos electrodos colocados a una distancia fija y con una solución entre ellos. Los electrodos son de platino y se encuentran sellados dentro de un tubo de plástico de tal manera que se puede sumergir en el líquido que se quiere medir. La CE cambia con la temperatura de la solución por lo que siempre se refiere a una temperatura estándar que es de 25°C.

El procedimiento para preparar el extracto del suelo fue:

1. El extracto que se preparó para medir el pH en el extracto de suelo, se deja reposar 24 horas.
2. Colocar papel filtro en el embudo Büchner y colocar la mezcla de suelo y agua.
3. Colocar el embudo en el matraz Kitasato y conectarlo a la bomba de vacío.
4. Recoger el extracto, si esta turbio volver filtrar.
5. Calibrar el conductímetro con la solución estándar.
6. En el extracto insertar el conductímetro y realizar la medición.

#### ***4.2.2.3 Determinación de aniones y cationes en extractos***

En la primera campaña de muestreo, se analizaron en el extracto los cationes magnesio ( $Mg^{2+}$ ) y calcio ( $Ca^{2+}$ ) por espectrofotometría de absorción atómica; potasio ( $K^+$ ) y sodio ( $Na^+$ ) por espectrofotometría de emisión de flama; y boro ( $B^{3+}$ ) extraído con cloruro de calcio 1M y analizado por fotocolorimetría de azometina-H. Los aniones cloruro ( $Cl^-$ ) por volumetría de nitrato de plata; sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) por

turbidimetría de cloruro de bario; y bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) por volumetría de ácido sulfúrico.

En la segunda campaña de muestreo, el extracto acuoso del suelo donde se realizó la medición de la CE fue separado en dos sub-muestras: una para realizar el análisis de los aniones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) mediante el método de cromatografía de iones con el equipo ICS-2000 DIONEX; y  $\text{HCO}_3^-$  por titulación con ácido clorhídrico. La otra fue acidificada con ácido nítrico y se usó para la determinación de los cationes sodio ( $\text{Na}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y boro ( $\text{B}^{3+}$ ) mediante espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado por inducción con el equipo Varian Liberty 110.

#### ***4.2.2.4 Fases cristalinas y caracterización de sales***

##### **Difracción de Rayos X**

El análisis de difracción de rayos X fue realizado en el Departamento de Nanoestructuras del Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México. El equipo utilizado fue el X' PERT PRO de la marca Phillips usando un arreglo Euler para la identificación de las fases cristalinas. La preparación de la muestra consistió en lo siguiente:

1. Homogeneización y molienda en mortero de ágata hasta obtener un polvo muy fino.
2. Separación de una alícuota para el análisis. La sub-muestra fue secada en un horno durante 24 horas a  $60^\circ\text{C}$ .

##### **Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)**

Éste análisis se realizó únicamente con las muestras de sales en el laboratorio de MEB del área de Ciencias de la Tierra del CICESE. El equipo usado fue el Jeol JSM-35c, el cual posee un microanalizador de rayos X de la marca Noran Instruments que permite determinar la composición química de la muestra en

estudio. Para realizar el análisis las muestras se prepararon de la siguiente manera:

1. Se colocaron al horno durante 24 horas a 60°C para eliminar cualquier humedad.
2. Una vez realizado esto, se tomó una parte de la muestra y se colocó en un portamuestra que tenía un recubrimiento de carbono.
3. Después, la muestra se metió al evaporador, en donde se produjo vacío, y se hizo pasar una corriente eléctrica para calcinar unos filamentos de carbono y con esto la muestra queda recubierta y puede ser conductora.

### **4.2.3 Para muestras de roca**

#### **4.2.2.1 Petrografía**

La preparación de las láminas delgadas para el estudio petrográfico se realizó en el CICESE en el Laboratorio de Preparación de Rocas y Minerales. El procedimiento fue el siguiente:

1. Las muestras de roca fueron cortadas con una sierra con disco de borde diamantado para obtener unos prismas rectangulares de 4 x 2 x 1 cm aproximadamente. El prisma fue lavado con agua corriente y posteriormente con agua destilada.
2. Uno de los lados del prisma fue pulido sobre un plato de hierro fundido utilizando polvo de carburo de silicio de grado 600, utilizando agua como lubricante. El prisma se colocó en ultrasonido por tres minutos en agua con el fin de remover el abrasivo y el material fino generado durante el corte, y finalmente se enjuaga con agua destilada y se dejó 24 horas en un horno a 60°C para eliminar completamente la humedad.
3. Sobre la cara pulida del prisma se pegó un portaobjeto petrográfico utilizando Epoxy-patch haciendo presión cuidando que no quedaran

burbujas de aire, dejando secarla en una plancha caliente durante dos horas. Una vez secos los portaobjetos fueron marcados con un lápiz de diamante para la identificación de la muestra.

4. En una cortadora-rectificadora INGRAM se realizó un segundo corte para lograr una lámina de dos a tres milímetros de espesor. Posteriormente, con la rectificadora, la lámina se desbastó para reducirla a hasta un espesor de 150 a 200  $\mu\text{m}$ .
5. Finalmente la lámina se trató en una desbastadora para obtener un grosor de 30  $\mu\text{m}$ . Finalmente, se limpió y se cubrió con un cubreobjetos utilizando bálsamo de Canadá.
6. La lámina delgada fue estudiada en el Laboratorio de Petrografía del CICESE utilizando el microscopio petrográfico Olympus BX60.

## Capítulo 5. Resultados

### 5.1 Resultados de las muestras de agua

En el Anexo, en la Tabla A.1, se presentan los datos de identificación de las muestras, de izquierda a derecha se muestran el número de identificación, el nombre del sitio donde fue tomada, la campaña en la que se realizó, el tipo de aprovechamiento, el uso que se le da y la profundidad al nivel freático medido en metros y correspondiente a la época de sequía.

#### 5.1.1 Parámetros medidos en campo

##### Temperatura

Para el primer muestreo, el rango de temperatura del agua se encontró entre 17.8°C y 25.1°C, siendo el valor promedio 21.3°C; mientras que para el segundo la temperatura más baja fue de 18.7°C y la más alta de 23.1°C con un promedio de 21°C. En la Figura 17 se puede observar que la temperatura en ambos periodos es similar y no tuvo grandes variaciones. Los valores promedio de ambas campañas fueron cercanos a 21°C de temperatura media ambiental correspondiente a los meses de agosto y septiembre, con lo que se puede apreciar que la temperatura del agua en la zona está controlada únicamente por la temperatura ambiente, por lo tanto es agua que circula a poca profundidad.

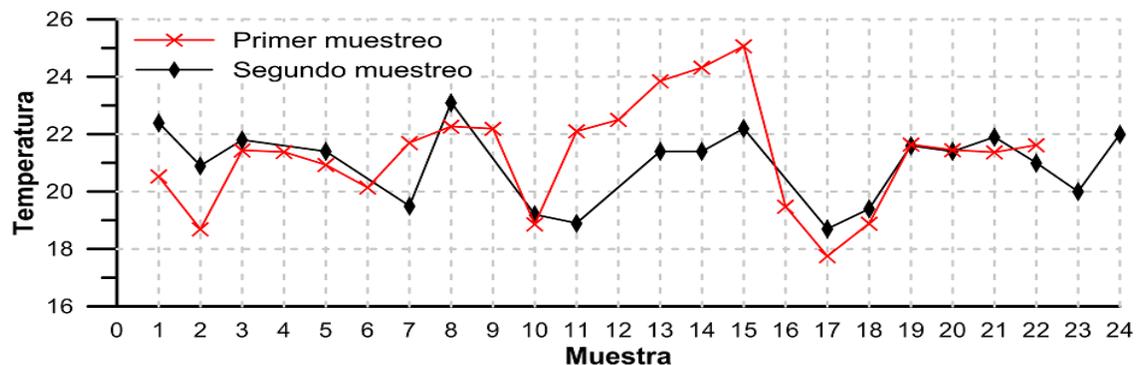


Figura 17. Temperatura de las muestras de agua de los dos muestreos.

### Potencial de hidrógeno (pH)

Los valores de pH de las muestras se encontraron cercanos al valor neutral y no mostraron grandes variaciones entre muestreos. Para el primero, estuvieron en el rango de 7.0 a 9.2 y de 7.0 a 10 en el segundo. Los valores menores en ambos períodos de muestreo correspondieron a las norias localizadas dentro de la ciudad de Tierra Nueva. Mientras que los valores mayores de 8.7 y 9.2 se determinaron en los Estanques 1 y 2 en el primer muestreo, y para el segundo presentaron valores de 9.6 y 10 (Fig. 18). Exceptuando estas dos muestras, todas las demás se encontraron dentro del rango normal de pH para las aguas naturales que es de 6 a 8.5 (Hem, 1992).

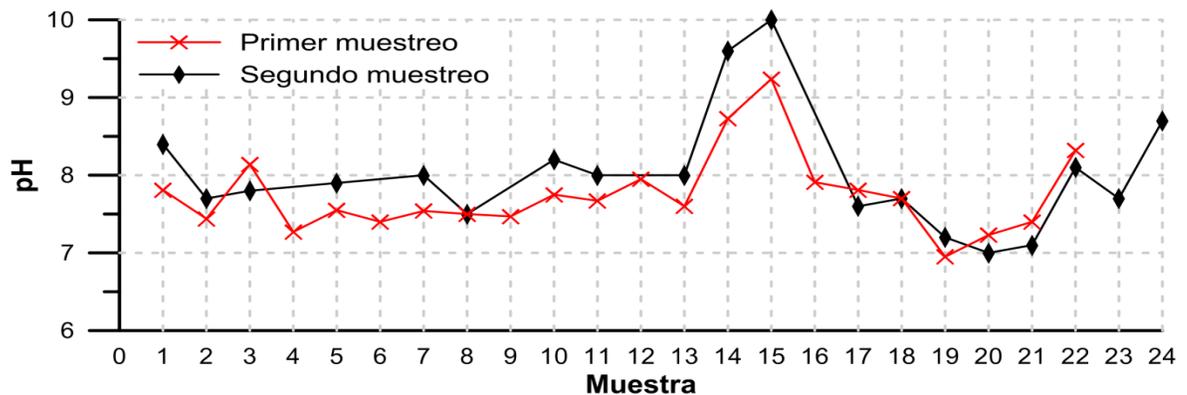


Figura 18. Potencial de hidrógeno medido en las muestras de agua de los dos muestreos.

### Oxígeno disuelto (OD)

En las muestras, el OD varió desde 9.5% de saturación en la muestra 17 hasta 108% en la muestra 14 para el caso de la primera campaña; y de 11.4% en la muestra 4 a 140% en la muestra 13 en la segunda. El valor promedio de OD para cada campaña fue de 50% y 51% respectivamente. Estos resultados indican que son aguas oxigenadas (Fig. 19). En ambos períodos de muestreo en las norias se observó un alto contenido de materia orgánica y estos sitios tuvieron los valores menores de OD. Además, al momento del muestreo no se estaba extrayendo

agua, por lo tanto el proceso de descomposición de la materia orgánica podría explicar estos valores bajos de OD. En el caso de las muestras que presentaron una sobresaturación con OD, que fueron Estanque 1 y Salitre Grande en el primer y segundo muestreo respectivamente, se observó que en ambas norias había una gran cantidad de microalgas (Fig. 20) que daban una coloración verdosa al agua. Las microalgas durante el proceso de fotosíntesis liberan oxígeno, por eso es común que en aguas con alto contenido de vegetación acuática se presente sobre saturación de OD (EPA, 2012).

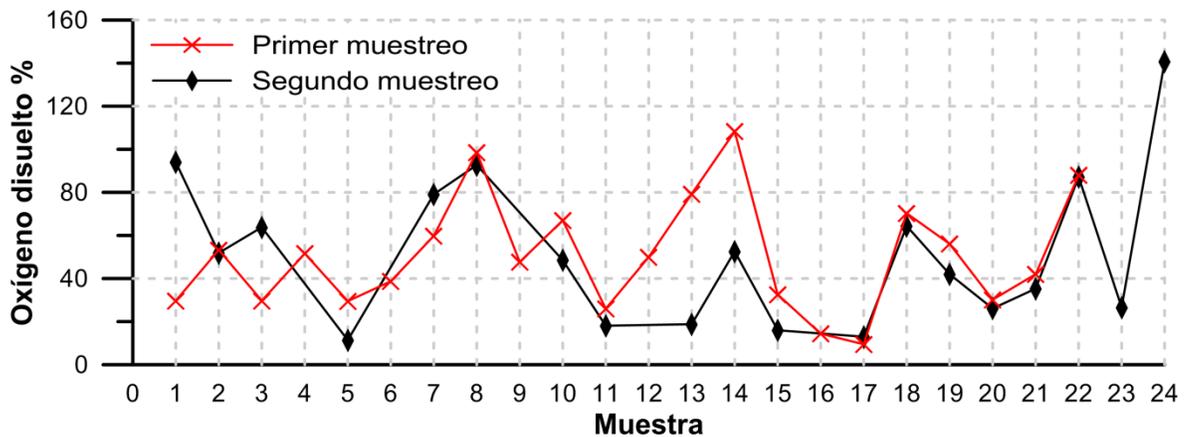


Figura 19. Oxígeno disuelto medido en las muestras de agua de los dos muestreos.

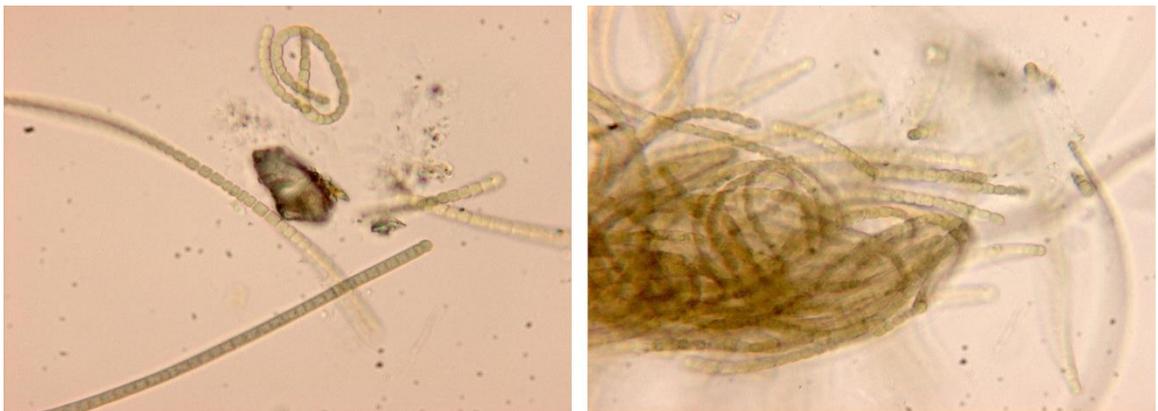


Figura 20. Micrografías de las microalgas que quedaron en el filtro al tomar las muestras de agua Estanque 1 y Salitre Grande.

### Potencial óxido-reducción (Potencial redox)

Para el primer muestreo, el potencial óxido-reducción varió ampliamente presentando valores negativos (reductores) y positivos (oxidantes). Los valores mínimos fueron de -130.8 mV, -89.1 mV, -66.4 mV y -23.7 mV en las muestras 17, 18, 15 y 16 respectivamente. Los valores positivos variaron desde 1.1 mV hasta 701 mV en las muestras 16 y 20 respectivamente. El promedio de los valores positivos fue de 163.3 mV, mientras que el de los negativos fue de -77.5 mV. En el caso de la segunda campaña sólo se registraron valores positivos. Los menores fueron de 7.2 mV y 7.3 mV en las muestras 15 y 18 respectivamente, mientras que los mayores fueron de 639.9 mV y 826 mV en las muestras 17 y 16 respectivamente. El valor promedio fue de 237 mV (Fig. 21).

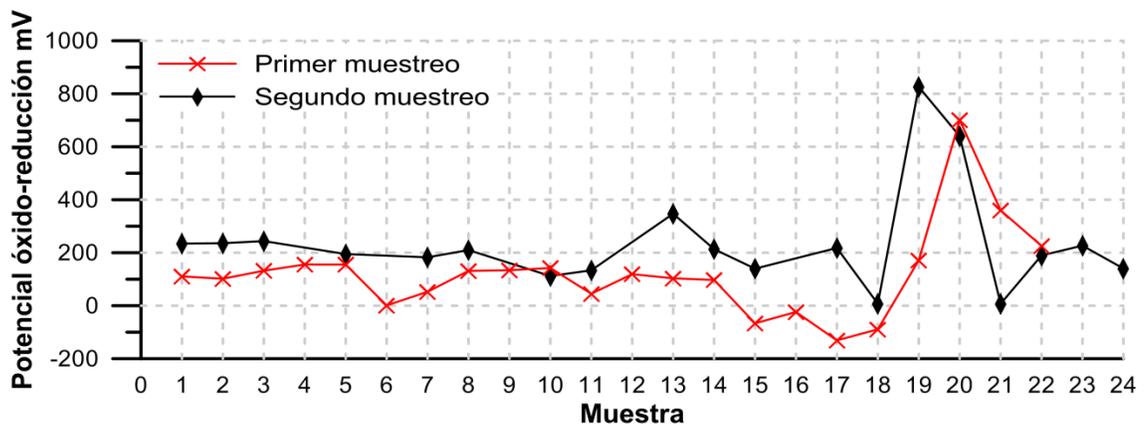


Figura 21. Potencial óxido-reducción medido en las muestras de agua de los dos muestreos.

Lindberg y Runells (1984) tomando una base representativa de 600 mediciones de potencial redox y pH en muestras de agua subterránea y superficial y usando los datos de hidroquímica de las mismas muestras para hacer cálculos usando la ecuación de Nernst, llegaron a la conclusión de que en aguas naturales se pueden tener valores en el rango de -225 a 900 mV. Morris y Stumm (1967), Wetzel (1983) y Horne y Goldman (1994) definieron que en ambientes naturales los valores de potencial redox variaban entre 300 y 800 mV. Por lo tanto, los valores registrados

en las muestras de agua de ambos períodos se encuentran dentro de los valores considerados como típicos de ambientes naturales, de acuerdo con estos autores.

### Conductividad eléctrica (CE)

En la Figura 22 se muestra la gráfica con los resultados de CE, de la figura se observa que el valor mínimo fue 0.27 dS/m y 0.25 dS/m en el primer y segundo muestreo respectivamente; ambos corresponden a la muestra de la presa La Muñeca. Mientras que los valores máximos fueron de 3.8 dS/m y 2.8 dS/m, los dos en la muestra Estanque 2 y correspondientes al primer y segundo muestreo respectivamente. El valor promedio fue de 1 dS/m en el caso de la primera campaña de muestreo y 0.8 dS/m en la segunda, y exceptuando la muestra Estanque 2, la cual es salobre, el resto se encontró en el rango de aguas dulces (Custodio y Llamas, 1983; Appelo y Postma, 2005).

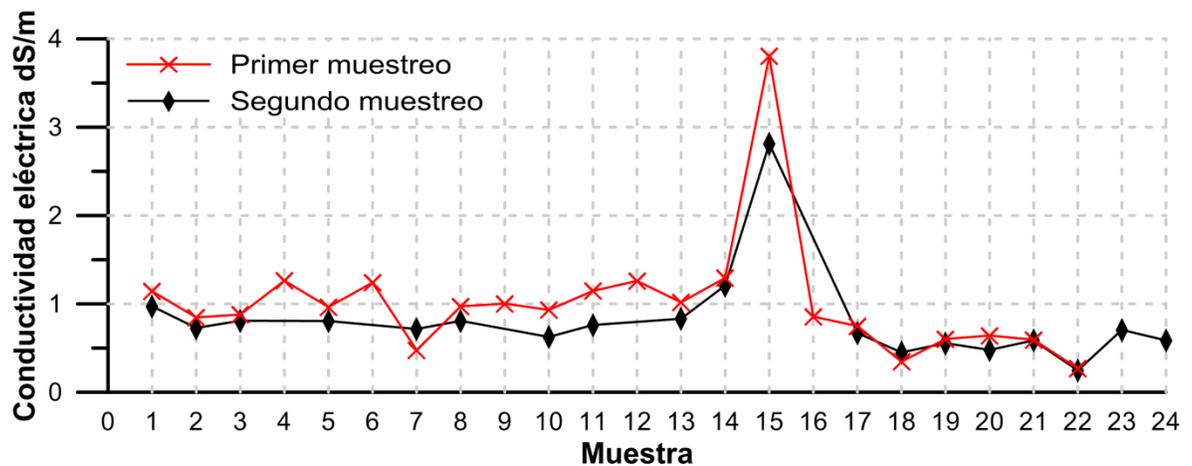


Figura 22. Conductividad eléctrica de las muestras de agua de los dos muestreos.

### 5.1.2 Aniones y cationes

Los resultados de la concentración de cationes y aniones en cada muestra fueron verificados mediante el cálculo del error de balance de carga o electroneutralidad de acuerdo con la ecuación siguiente, utilizando las concentraciones en meq/L:

$$Error (\%) = \frac{\Sigma aniones - \Sigma cationes}{\Sigma aniones + \Sigma cationes} * 100$$

En aguas poco salinas (<1000 mg/L) se admiten errores menores al 10% y los análisis que presenten un error mayor deben desecharse y por lo tanto se deberá tomar nuevamente la muestra y realizarle un nuevo análisis (Lloyd y Heathcote, 1985; Tostado, 2010). En el caso del primer muestreo, sólo los valores de una muestra presentan error mayor al permitido. Para el segundo muestreo, cinco resultados sobrepasan el límite. Es por ello que sólo se utilizaran los resultados del primer muestreo para hacer la interpretación, ya que el error del balance iónico es menor en la mayoría de los resultados obtenidos y las diferencias entre los dos muestreos no son significativas (Tabla 2).

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los análisis químicos de cationes y aniones realizados a las muestras de agua del primer (PM) y segundo muestreo (SM). Se indica además el método utilizado para su análisis.

En lo que respecta al sodio los valores mínimos fueron de 14.3 (PM) y 17.8 (SM) mg/L, ambos medidos en la muestra 22 que corresponde a la presa La Muñeca. Mientras que los máximos fueron de 800.1 (PM) y 793 mg/L (SM) en la muestra 15 la cual es una noria y el suelo cercano tiene sales visiblemente detectables. Las muestras más cercanas a la presa (18, 19, 20 y 21), y que se encuentran en la zona urbana de Tierra Nueva, presentaron valores menores (22-65 mg/L) que aquellas que se localizan en la zona agrícola (101-248 mg/L). Estos valores se encontraron en el rango de concentraciones típicas de aguas naturales, que va desde menos de 1 mg/L en agua de lluvia hasta 100 g/L en salmueras asociadas con depósitos evaporíticos o cuencas endorreicas (Hem, 1992).

**Tabla 2. Resultados de los iones analizados en las muestras de agua del primer y segundo muestreo. Todos los valores están en mg/L. ICP-OES=espectrómetro de emisión óptica con plasma acoplado por inducción. ICP-AES=espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado por inducción. COL=colorimetría. CI=cromatografía de iones. ALK=determinado a partir de la alcalinidad. PM=primer muestreo. SM=segundo muestreo.**

Ion	Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>		Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>	
	ICP-OES	ICP-AES	ICP-OES	ICP-AES	ICP-OES	ICP-AES	ICP-OES	ICP-AES
Muestra	PM	SM	PM	SM	PM	SM	PM	SM
1	235.6	217.8	11.9	9.7	21.7	18.8	3.6	3.3
2	101.5	109.8	13.6	18.3	50.9	51.1	17.4	15.6
3	101.6	85.71	19.1	14.1	47.5	48.5	15.1	12.8
4	172.4	nr	10.8	nr	76.7	nr	11.3	nr
5	135.6	116.4	7.9	5.4	57.2	53.2	9.2	8.1
6	166.8	nr	10.6	nr	41.3	nr	7.6	nr
7	38.0	170.4	8.6	12.8	41.9	25.7	8.3	7.1
8	105.7	116.3	20.1	17.8	48.7	46.8	17.4	14.3
9	140.2	nr	18.0	nr	40.1	nr	15.9	nr
10	143.4	118.6	30.5	25.9	37.8	38.2	9.8	8.0
11	217.9	213.8	17.1	17.0	19.8	17.3	7.4	5.5
12	238.8	nr	20.0	nr	18.4	nr	8.0	nr
13	164.8	159.0	24.2	23.6	28.0	33.2	11.9	12.4
14	248.5	351.2	17.4	15.8	8.7	6.7	7.5	2.3
15	800.1	793.0	35.3	25.8	4.1	4.5	1.6	0.7
16	122.7	nr	13.0	nr	44.9	nr	15.8	nr
17	81.1	90.3	14.4	12.5	56.3	74.2	13.2	13.8
18	22.4	40.5	7.2	14.7	35.4	57.4	4.7	7.4
19	65.4	58.2	7.8	6.3	40.7	49.1	6.9	7.2
20	53.4	50.4	10.8	11.9	50.9	47.9	7.3	6.7
21	44.0	57.1	10.5	14.0	50.1	64.1	7.2	8.0
22	14.3	17.8	6.4	9.3	25.5	28.9	3.7	4.5
23	nr	140.0	nr	9.0	nr	31.0	nr	6.8
24	nr	95.9	nr	28.0	nr	27.2	nr	12.8

nr = no realizado

Tabla 2. Continuación.

Ion	F <sup>-</sup>		Cl <sup>-</sup>		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	
	Método	COL	CI	COL	CI	COI	CI	COL
Muestra	PM	SM	PM	SM	PM	SM	PM	SM
1	3.7	3.0	2.9	30.1	5	3.1	40	32.8
2	1.6	2.1	4.0	42.1	6	8.5	18	46.3
3	1.6	2.0	12.1	37.4	9	11.2	21	47.9
4	1.6	nr	15.3	nr	7	nr	92	nr
5	1.8	2.0	4.4	25.5	8	15.9	86	80.2
6	3.4	nr	11.7	nr	10	nr	63	nr
7	1.1	2.5	1.6	58.6	9	0.5	11	130.8
8	1.3	1.9	3.2	44.1	7	4.3	40	61.6
9	1.8	nr	2.0	nr	7	nr	18	nr
10	1.9	1.7	3.8	28.0	2	21.7	40	39.5
11	1.8	1.6	6.5	20.3	1	2.4	60	21.5
12	1.7	nr	5.6	nr	nd	nr	40	nr
13	3.6	3.8	2.2	40.7	nd	12.3	50	44.0
14	5.7	7.1	3.3	99.3	1	14.0	60	98.0
15	1.8	1.6	15.1	114.4	9	1.1	60	110.1
16	1.7	nr	2.1	nr	3	nr	30	nr
17	1.2	1.2	4.8	40.7	1	0.4	11	57.9
18	0.7	0.5	3.5	29.5	3	1.0	6	18.7
19	1.1	1.0	5.0	31.4	4	12.7	40	27.3
20	1.1	1.3	14.7	63.7	21	12.7	18	54.8
21	1.0	0.8	5.2	79.8	24	42.3	11	64.8
22	0.5	0.3	2.2	8.0	1	0.02	1	8.2
23	nr	1.7	nr	15.4	nr	2.3	nr	33.6
24	nr	0.9	nr	17.2	nr	0.5	nr	25.4

nr = no realizado  
nd = no detectado

Tabla 2. Continuación.

Ion	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	
	Método	COL	nr	ALK	ALK	ALK
Muestra	PM	SM	PM	SM	PM	SM
1	0.4	nr	546	492	0	0
2	0.4	nr	417	373	0	0
3	1.0	nr	525	441	0	0
4	0.5	nr	558	nr	0	nr
5	0.4	nr	456	423	0	0
6	0.1	nr	465	nr	0	nr
7	0.2	nr	240	324	0	0
8	0.4	nr	420	414	0	0
9	0.3	nr	480	nr	0	nr
10	0.2	nr	420	372	0	0
11	0.8	nr	510	444	0	0
12	0.6	nr	615	nr	0	nr
13	0.3	nr	444	378	0	0
14	0.3	nr	330	486	192	342
15	3.4	nr	906	1098	540	510
16	0.3	nr	384	nr	0	nr
17	0.5	nr	387	456	0	0
18	0.2	nr	192	243	0	0
19	0.5	nr	267	300	0	0
20	0.4	nr	237	267	0	0
21	0.4	nr	240	222	0	0
22	2.5	nr	150	102	0	0
23	nr	nr	nr	351	nr	0
24	nr	nr	nr	258	nr	150

nr = no realizado

Los valores mínimos de potasio para el PM se detectó en la muestra 22 y para el SM en la muestra 5, siendo de 6.4 y 5.4 mg/L respectivamente. Los máximos se tuvieron en la muestra 15 para el PM y en la 24 para el SM con 35.3 y 28 mg/L respectivamente. En el caso del potasio no se observó diferencias significativas entre las muestras cercanas a la presa (18, 19, 20 y 21) y las de la zona agrícola, como fue el caso del sodio. Además los valores de potasio son menores que los del sodio, lo cual es característico de las aguas naturales debido a la mayor resistencia al intemperismo de los minerales potásicos (Hem, 1992).

Para el caso del calcio, los valores menores se obtuvieron en la muestra 15 en ambos periodos siendo de 4.1 y 4.5 mg/L respectivamente, y los mayores fueron de 76.7 mg/L en la muestra 4 para el PM y de 74.2 mg/L en la muestra 17 para el SM. Se puede observar que en ambos periodos las muestras que presentaron las mayores concentraciones de sodio (14 y 15) son las que tuvieron la menor concentración de calcio. La muestra de la presa y las cercanas a ella (18, 19, 20 y 21) poseen valores de calcio y sodio similares siendo la mayoría de las veces ligeramente mayor el primero, lo cual es representativo de las aguas naturales superficiales (Hem, 1992); mientras que en las muestras de la zona agrícola el sodio es el catión dominante.

En cuanto al magnesio, los valores mínimos en ambos periodos se determinaron en la muestra 15 siendo de 1.6 y 0.7 mg/L, caso similar al calcio. Los resultados mayores se tuvieron en la muestra 8 en ambos periodos y fueron de 17.4 y 14.3 mg/L respectivamente. Para este caso, no se observaron diferencias entre las muestras cercanas a la presa y las de la zona agrícola.

Las concentraciones de los cationes se mantuvieron similares en los dos periodos de muestreo para todos los casos y las variaciones no fueron significativas.

Para el fluoruro, los valores menores corresponden a 0.5 y 0.3 mg/L en el PM y SM respectivamente, ambos medidos en la muestra 22. Los máximos se obtuvieron en ambos periodos en la misma muestra: la 14, con 5.7 y 7.1 mg/L

respectivamente. Estos valores son típicos de zonas con rocas volcánicas félsicas, que es el caso de la zona de estudio, y en donde se pueden alcanzar valores de decenas de mg/L (Hem, 1992).

Para el cloruro los valores menores fueron de 2 mg/L en la muestra 9 para el PM y de 8 mg/L para el SM en la muestra 22. Los máximos fueron 15.3 mg/L en la muestra 4 y de 114.4 mg/L en la muestra 15 para el PM y SM respectivamente. Las concentraciones aumentaron en todos los casos en el SM. Debido a que el cloruro no se ve afectado por ambientes ácido alcalinos ni de oxidación-reducción, se pueden alcanzar concentraciones de centenares de gramos en las salmueras (Hem, 1992).

Los nitratos mantuvieron valores bajos con mínimos de 1 y 0.4 mg/L en las muestras 11 y 17 respectivamente. Los valores más altos fueron de 24 mg/L en el PM y de 42.3 mg/L, ambos en la misma muestra: la 21. En las zonas agrícolas pueden alcanzarse valores de cientos de mg/L (Hem, 1992).

En el caso del sulfato, los valores mínimos fueron de 1 y 8.2 mg/L en la muestra 22 en ambos periodos, mientras que los valores mayores fueron de 92 y 130.8 mg/L en las muestras 4 y 7 respectivamente. Las concentraciones del SM fueron ligeramente mayores a las del PM.

Para el bicarbonato, los valores mínimos fueron de 150 y 102 mg/L en la muestra de la presa La Muñeca (22) que es la presa, en el PM y SM respectivamente. Los máximos fueron 906 y 1098 mg/L en la muestra 15, para el PM y SM respectivamente. Las muestras 14 y 15 fueron las únicas que presentaron concentraciones de carbonatos en el PM registrando 510 y 540 mg/L respectivamente; y para el SM las muestras 14, 15 y 24 mostraron valores de carbonato de 192, 342 y 150 mg/L respectivamente. El bicarbonato en aguas superficiales generalmente posee valores <200 mg/L mientras que en las aguas subterráneas alcanza valores de hasta 1000 mg/L (Hem, 1992).

Los aniones, los fluoruros, bicarbonatos y carbonatos no tuvieron variación significativa entre periodos de muestreo; mientras que para los cloruros, nitratos y sulfatos, las concentraciones del segundo periodo son mayores a las del primero.

Durante la segunda campaña había una sequía intensa y la presa La Muñeca quedó al 15% de su capacidad, por lo que, las autoridades, tomaron la decisión de cerrar el suministro de agua, lo que originó que no hubiera riego y todas las norias mostraron un descenso en el nivel de agua, encontrándose algunas completamente secas. Por ello, el aumento de los valores en el segundo muestreo podría deberse a la concentración por evaporación para el caso de los cloruros; mientras que para los nitratos y sulfatos podría deberse a un aumento de la actividad bacteriana, o a un incremento en el uso de fertilizantes para sobrellevar el estrés hídrico ocasionado a las plantas.

En la Tabla 3 se muestran los resultados estadísticos de los análisis químicos de aniones y cationes para la primera (PM) y segunda campaña de muestreo (SM). En ésta tabla, se aprecia de manera resumida como las concentraciones de los iones en ambos periodos son muy similares. De acuerdo a los valores promedio hubo una mayor concentración en el SM de la mayoría de los iones, para el sodio fue de 3 mg/L; el potasio de 0.4 mg/L, el calcio de 0.1 mg/L; el magnesio de 1.7 mg/L; el fluoruro de 0.8 mg/L; el cloruro de 37.5 mg/L; el nitrato de 2.5 mg/L; el sulfato de 15.7 mg/L y el carbonato fue de 19.4 mg/L. Solamente el bicarbonato presentó una menor concentración en el SM de 25.9 mg/L.

**Tabla 3. Resultados estadísticos de los iones analizados de las muestras de agua de la primera (PM) y segunda campaña de muestreo (SM). Los valores están en mg/L.**

Ion	Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>		Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>		F <sup>-</sup>	
	PM	SM	PM	SM	PM	SM	PM	SM	PM	SM	PM	SM
Promedio	155	158	15.0	15.4	38.0	38.1	10.0	8.3	0.6	nr	1.9	2.7
Mínimo	14.3	17.8	6.4	5.4	4.1	4.5	1.6	0.7	0.07	nr	0.5	0.3
Máximo	800.1	793	35.3	28.0	76.7	74.2	17.4	15.6	3.44	nr	5.7	16.0
Desviación estándar	156.7	167.6	7.4	6.4	16.8	18.5	4.5	4.1	0.8	nr	1.2	3.5

Ion	Cl <sup>-</sup>		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	
	PM	SM	PM	SM	PM	SM	PM	SM	PM	SM
Promedio	6.0	43.5	6.3	8.8	37.1	52.8	417.7	391.8	33.3	52.7
Mínimo	1.6	8.0	1	0.02	1.0	8.2	150.0	102.0	0	0
Máximo	15.3	114.4	24.0	42.3	92.0	130.8	906.0	1098.0	540.0	510.0
Desviación estándar	4.5	27.6	6.1	10.1	24.8	31.7	164.1	193.6	117.6	135.1

nr = no realizado

### 5.1.3 Índices de saturación

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos del cálculo de los índices de saturación de las muestras de agua del primer muestreo con respecto a los minerales calcita, aragonita, dolomita, albita, anortita y feldespato potásico. El cálculo se realizó únicamente para el primer muestreo ya que es el que posee mejor ajuste de acuerdo con el balance de electroneutralidad, además; las variaciones entre el primer muestreo y el segundo no son significativas, considerando válida la interpretación para ambos resultados.

Con respecto a la calcita, algunas muestras de agua se encuentran ligeramente subsaturadas como es el caso de la presa La Muñeca (muestra 22) y dos norias dentro de Tierra Nueva (muestras 19 y 20) con valores de -0.55, -0.54 y -0.14 respectivamente. El resto de las muestras se encuentran ligeramente

sobresaturadas o casi en equilibrio con la calcita, con valores entre 0.04 y 1.04. La muestra con la mayor saturación es un pozo localizado en la zona agrícola (muestra 3).

Para el mineral aragonita se obtuvo algo muy similar a los índices de saturación respecto a la calcita, mostrando que para la presa La Muñeca (muestra 22) y las cuatro norias localizadas dentro de Tierra Nueva (muestras 18, 19, 20 y 21), el agua se encuentra subsaturada con la aragonita con valores entre -0.04 y -0.71; mientras que el resto de las muestras, localizadas en la zona agrícola, se encuentran en equilibrio y sobresaturadas, con valores entre 0 y 0.88.

En el caso de la dolomita las únicas muestras que están subsaturadas son dos norias localizadas dentro de Tierra Nueva: las muestras 19 y 20, y que son las mismas que están subsaturadas con la calcita. El resto de las muestras mostraron sobresaturación para la dolomita con índices de saturación entre 0.47 y 2.77.

Para al mineral albita, la mayoría de las muestras tuvieron índices de saturación positivos, lo que indica que se encuentran sobresaturadas para este mineral, con valores entre 0.05 y 3.26. Si bien, todas las muestras presentaron sobresaturación respecto a la albita, las norias dentro de Tierra Nueva mostraron valores más bajos (0.05-1.35) que las muestras localizadas en la zona agrícola (1.64-3.26). Las únicas muestras de agua que están subsaturadas son la presa La Muñeca y la muestra 7 con valores de -1.33 y -0.01 respectivamente.

Para la anortita, las muestras de agua se encuentran en todos los casos subsaturadas para este mineral, con valores en el rango de -5.47 a -3.43.

Para el caso del feldespato potásico todas las muestras se encontraron sobresaturadas respecto a este mineral presentando índices de saturación de 1.19 para la muestra de la presa La Muñeca (22) a 4.78 para la muestra 15 ubicada en la zona agrícola.

**Tabla 4. Resultados de los cálculos de índices de saturación de las muestras de agua de la primera campaña. Para el cálculo se utilizó el software The Geochemist's Workbench.**

<b>Muestra</b>	Calcita CaCO <sub>3</sub>	Aragonita CaCO <sub>3</sub>	Dolomita CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Albita NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Anortita CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Feldespato potásico KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
1	0.36	0.20	1.05	2.85	-3.66	4.46
2	0.27	0.10	1.17	2.40	-3.67	4.42
3	1.04	0.88	2.70	1.77	-4.04	3.93
4	0.32	0.16	0.92	2.35	-3.76	4.05
5	0.43	0.26	1.16	2.24	-3.86	3.92
6	0.21	0.04	0.81	1.45	-4.61	3.09
7	0.16	0.00	0.74	-0.01	-5.45	2.18
8	0.38	0.22	1.45	1.64	-4.64	3.73
9	0.24	0.08	1.19	2.45	-3.93	4.46
10	0.45	0.29	1.42	2.07	-4.54	4.30
11	0.16	-0.01	0.99	2.69	-3.99	4.48
12	0.49	0.33	1.74	-	-	-
13	0.20	0.03	1.14	-	-	-
14	0.68	0.51	2.42	3.02	-3.43	4.74
15	0.99	0.82	2.77	3.26	-4.00	4.78
16	0.73	0.57	2.15	1.96	-4.10	3.80
17	0.69	0.53	1.87	1.92	-4.07	4.05
18	0.13	-0.04	0.47	0.05	-4.89	2.46
19	-0.54	-0.71	-0.76	1.35	-4.91	3.33
20	-0.14	-0.31	-0.02	0.63	-5.09	2.81
21	0.04	-0.13	0.34	0.36	-5.19	2.63
22	-0.55	-0.39	1.37	-1.33	-5.47	1.19

## 5.2 Resultados de las muestras de suelo

En las Tablas A.2 y A.3 del Anexo, se muestran los datos de identificación de las muestras de suelo de la primera y la segunda campaña respectivamente. En las columnas se aprecia, de izquierda a derecha, el número de la muestra, las coordenadas donde fue tomada y la profundidad a la que se realizó. Aunque se

usa la misma nomenclatura, las muestras del primer periodo son distintas a las del segundo y por lo tanto, no existe correspondencia entre muestras con el mismo número de identificación.

### 5.2.1 Textura de las muestras de suelo

En la Tabla 5 se presentan los resultados de los análisis de textura de las muestras de la primera campaña. En estas muestras se aprecia un predominio de las texturas medias (franco arcillo arenoso, franco arcilloso, franco arenoso, franco limoso y franco) representando un 86%. Estas texturas son características de las zonas agrícolas y las ideales para su desarrollo. El restante 14% lo conforman texturas gruesas (arenoso y arenoso franco) que poseen buena permeabilidad y permiten la lixiviación de sales disueltas.

**Tabla 5. Resultados de textura de las muestras de suelo de la primera campaña. Los resultados de arena, limo y arcilla están en porcentaje.**

Muestra	arena	limo	arcilla	Textura	Muestra	arena	limo	arcilla	Textura
1	46.4	28.0	25.6	Fr	6b	66.4	18.0	15.6	Fare
1b	50.4	24.0	25.6	Faa	7	66.4	16.0	17.6	Fare
2	50.4	26.0	23.6	Faa	7b	84.4	6.0	9.6	Af
2b	52.4	28.0	19.6	Fr	8	60.4	20.0	19.6	Fare
3	48.4	18.0	33.6	Fr	8b	50.4	20.0	29.6	Faa
3b	70.4	16.0	13.6	Fare	9	24.4	56.0	19.6	Fl
4	60.4	14.0	25.6	Fr	9b	40.4	40.0	19.6	Fr
4b	82.4	8.0	9.6	Af	10	56.4	18.0	25.6	Faa
5	70.4	16.0	13.6	Fare	10b	36.4	24.0	39.6	Farc
5b	92.4	4.0	3.6	Are	11	62.4	30.0	7.6	Fare
6	54.4	26.0	19.6	Fare	11b	62.4	28.0	9.6	Fare

Af = Arenoso franco; Are = arenoso; Faa = Franco arcillo arenoso; Farc = Franco arcilloso; Fare = Franco arenoso; Fl = Franco limoso; Fr = Franco.

En la Tabla 6 se encuentran los resultados de las muestras de la segunda campaña de muestreo. Se puede ver que para este caso, se identificaron 9 de las 12 clases texturales según la clasificación del *US Department of Agriculture* (Soil Survey División Staff, 1993), por lo que la textura del suelo varía ampliamente. Los suelos que predominan son los gruesos (arenoso y arenoso franco) representando 56%; le siguen los suelos de textura media (franco arenoso, franco arcillo arenoso y franco arcilloso) con un 14% y finalmente los suelos finos (arcilloso, arcillo limoso, arcillo arenoso y limo) siendo el 13% del total.

**Tabla 6. Resultados de textura de las muestras de la segunda campaña. Los resultados de arena, limo y arcilla están en porcentaje.**

Muestra	arena	limo	arcilla	Textura	Muestra	arena	limo	arcilla	Textura
1	90	5	5	Are	20	90	5	5	Are
2	60	15	25	Faa	21	90	5	5	Are
3	60	15	25	Faa	22	60	15	25	Faa
4	90	5	5	Are	23	60	15	25	Faa
5	90	5	5	Are	25	90	5	5	Are
6	90	5	5	Are	26	60	15	25	Faa
7	90	5	5	Are	27	90	5	5	Are
8	80	10	10	Af	28	50	5	45	Aa
10	90	5	5	Are	30	90	5	5	Are
11	90	5	5	Are	31	80	10	10	Af
12	30	35	35	Farc	32	50	5	45	Aa
13	90	5	5	Are	33	50	5	45	Aa
14	90	5	5	Are	34	50	5	45	Aa
16	80	10	10	Af	35	90	5	5	Are
17	60	15	25	Faa	36	50	5	45	Aa
18	65	20	15	Fare	37	90	5	5	Are
19	80	10	10	Af	38	65	20	15	Fare

A = Arcilloso; Aa = Arcillo arenoso; Af = Arenoso franco; Al = Arcillo limoso; Are = arenoso; Faa = Franco arcillo arenoso; Farc = Franco arcilloso; Fare = Franco arenoso; L = Limoso.

Tabla 6. Continuación.

Muestra	arena	limo	arcilla	Textura	Muestra	arena	limo	arcilla	Textura
39	10	45	45	Al	55	90	5	5	Are
40	20	20	60	A	56	90	5	5	Are
41	80	10	10	Af	57	90	5	5	Are
42	10	45	45	Al	58	50	5	45	Aa
42b	50	5	45	Aa	59	80	10	10	Af
43	90	5	5	Are	60	65	20	15	Fare
44	90	5	5	Are	61	65	20	15	Fare
45	90	5	5	Are	62	80	10	10	Af
46	80	10	10	Af	64	90	5	5	Are
47	50	5	45	Aa	65	10	45	45	Al
48	90	5	5	Are	65b	10	85	5	L
49	30	35	35	Farc	66	90	5	5	Are
50	50	5	45	Aa	66b	60	15	25	Faa
51	90	5	5	Are	67	90	5	5	Are
52	90	5	5	Are	68	30	35	35	Farc
53	60	15	25	Faa	69	80	10	10	Af
54	50	5	45	Aa	70	90	5	5	Are

A = Arcilloso; Aa = Arcillo arenoso; Af = Arenoso franco; Al = Arcillo limoso; Are = arenoso; Faa = Franco arcillo arenoso; Farc = Franco arcilloso; Fare = Franco arenoso; L = Limoso.

### 5.2.2 Parámetros fisicoquímicos en extracto de suelo

En la Tabla 7 se presentan los resultados del potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE) en el extracto acuoso del suelo para el caso del primer muestreo. El rango de pH fue de 7.87 a 10.28, con promedio de 8.78, por lo tanto; se trata de suelos de ligeramente alcalinos (>7.6) a fuertemente alcalinos (>8.3), estos últimos con riesgo de exceso de sodio (Chesworth, 2008). Los valores de CE que se registraron fueron entre 0.25 y 3.59 dS/m con un promedio

de 0.78 dS/m. La mayoría de las muestras mostraron valores menores a 1.7 dS/m y solamente la muestra 9 tuvo el valor más alto, a pesar de esto, todas las muestras se clasifican como no salinas (Chesworth, 2008).

**Tabla 7. Resultados de los parámetros fisicoquímicos realizados en el extracto acuoso de las muestras de suelo del primer muestreo. pH = potencial de hidrógeno; CE = conductividad eléctrica (dS/m).**

Muestra	pH	CE	Muestra	pH	CE	Muestra	pH	CE
1	8.74	0.78	5	8.78	0.44	9	10.28	3.59
1b	9.78	1.16	5b	9.12	0.31	9b	9.86	1.46
2	9.59	0.85	6	8.65	0.74	10	8.07	0.51
2b	8.72	0.49	6b	8.57	1.53	10b	8.64	0.52
3	8.39	0.48	7	8.68	0.38	11	7.87	0.44
3b	8.56	0.33	7b	8.59	0.25	11b	8.28	1.68
4	8.53	0.35	8	8.68	0.36			
4b	8.66	0.29	8b	8.16	0.37			

En la Tabla 8 se muestran los resultados del potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE) y potencial óxido-reducción (potencial redox) para el segundo muestreo. El rango de pH se encontró entre 7.11 y 10.54 con un promedio de 8.18. El 15% se trata de suelos neutros (7-7.6); el 26% de suelos ligeramente alcalinos (7.6-8); el 32% de suelos moderadamente alcalinos (8-8.3) y el restante 27% de suelos fuertemente alcalinos. La CE varió entre 0.11 y 10.33 dS/m con un promedio de 0.66 dS/m. El 86% de las muestras tuvo valores menores a 1 dS/m; el 10% entre 1 y 2 dS/m y solamente las muestras 66 y 65 poseen valores altos de 4.75 y 10.33 dS/m respectivamente. Las muestras con los valores mayores se localizan en la zona donde se observaron las sales precipitadas sobre el suelo. En cuanto al potencial redox, los valores registrados estuvieron entre 103.9 y 307.7 mV, con un promedio de 199.4 mV, por lo que el suelo posee condiciones oxidantes.

**Tabla 8. Resultados de los parámetros fisicoquímicos realizados en el extracto acuoso de las muestras de suelo del segundo muestreo. pH = potencial de hidrógeno; CE = conductividad eléctrica (dS/m); y PR = potencial redox (mV).**

Muestra	pH	CE	PR	Muestra	pH	CE	PR	Muestra	pH	CE	PR
1	7.11	0.30	216.8	27	7.77	0.26	217.6	50	8.29	0.36	253.6
2	7.74	0.74	201.7	28	7.76	0.71	147.3	51	8.61	0.13	218.7
3	7.33	0.26	171.6	30	8.08	0.28	161.5	52	7.91	0.18	286.7
4	7.12	0.50	198.9	31	7.42	0.48	225.6	53	7.73	0.24	307.7
5	8.56	1.31	118.3	32	7.84	0.44	136.3	54	8.62	0.51	249.7
6	8.11	0.28	159.1	33	8.11	0.35	176.5	55	7.86	0.21	250.3
7	7.80	0.26	160.4	34	8.21	0.50	157.7	56	7.49	0.27	301.7
8	7.80	0.46	171.2	35	8.18	0.41	222.7	57	7.98	0.21	246.5
10	7.69	0.31	151.6	36	8.13	0.38	197.9	58	8.26	0.51	235.2
11	8.57	0.63	121.4	37	8.29	0.23	188.5	59	8.32	0.29	250.2
12	8.12	0.80	130.9	38	8.13	1.11	251.7	60	8.38	0.20	259.0
13	8.21	0.34	136.4	39	8.53	0.49	254.4	61	8.81	0.33	238.8
14	7.70	0.23	206.1	40	8.71	0.63	201.3	62	7.92	0.21	277.7
16	8.23	0.35	153.4	41	7.65	0.11	234.5	64	10.19	1.25	155.6
17	7.94	0.31	185.5	42	8.11	0.43	229.6	65	10.54	10.33	166.8
18	8.15	0.38	160.6	42b	8.50	0.23	210.4	65b	9.76	1.04	156.7
19	7.47	0.36	162.3	43	8.53	0.31	214.4	66	10.11	4.75	130.3
20	7.48	0.29	201.5	44	7.51	0.20	103.9	66b	10.05	2.11	170.0
21	8.10	0.33	151.8	45	7.63	0.11	131.0	67	8.2	0.18	271.4
22	7.61	0.75	160.2	46	9.66	1.05	127.1	68	8.26	0.38	225.0
23	8.06	0.38	155.3	47	7.48	0.21	255.0	69	7.86	0.25	261.3
25	7.38	0.24	208.4	48	8.09	0.37	227.9	70	8.06	0.31	248.6
26	8.02	0.47	193.1	49	8.60	1.24	254.3				

### 5.2.3 Determinación de aniones y cationes

En la Tabla 9 se observan los resultados de los aniones y cationes determinados en el extracto de las muestras de suelo de la primera campaña de muestreo. Los valores de sodio variaron entre 26.2 y 594.1 mg/L; los de potasio entre 12.9 y 167.7 mg/L; los de calcio entre 10.4 y 176.6 mg/L; los de magnesio entre 2.4 y 13 mg/L y el boro entre 0.2 y 4.9 mg/L. El catión dominante en todas las muestras es

el sodio. El ion cloruro presentó valores entre 5.3 y 310 mg/L; el sulfato entre 26.4 y 1219 mg/L; el bicarbonato entre 11 y 347.2 mg/L y el carbonato entre 3.6 y 107 mg/L. El anión dominante en la mayoría de las muestras analizadas fue el bicarbonato, únicamente en las muestras 6b y 9 el sulfato sobresale.

**Tabla 9. Resultados de los iones analizados en el extracto acuoso de las muestras de suelo de la primera campaña de muestreo. Todos los valores están en mg/L.**

Muestra	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	B <sup>3+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
1	77.9	32.5	50.5	9.2	4.8	53.2	26.4	347.2	7.2
1b	135.2	61.0	69.5	3.5	4.5	159.5	nd	338.6	36.3
2	120.7	48.1	20.2	6.0	4.0	53.2	51.4	347.2	7.2
2b	58.9	21.5	21.0	5.2	4.9	35.5	23.1	210.5	10.8
3	37.9	29.3	38.9	8.0	3.6	17.7	13.9	221.5	nd
3b	26.9	15.6	24.9	6.2	0.2	14.2	nd	156.8	14.4
4	26.2	15.6	32.9	4.1	3.2	8.9	4.8	173.3	10.8
4b	27.1	14.5	17.4	5.6	4.3	5.3	nd	166.6	3.6
5	45.1	24.2	28.1	4.7	3.2	17.7	nd	243.5	3.6
5b	35.9	19.6	16.4	2.4	3.4	17.7	nd	143.4	7.2
6	79.5	45.0	43.3	7.5	4.0	35.5	109.5	232.5	3.6
6b	166.2	66.1	92.0	13.0	2.3	44.3	541.3	160.5	10.8
7	30.4	16.0	31.1	5.8	2.8	17.7	nd	162.3	21.9
7b	30.4	15.3	10.4	2.7	3.9	8.9	19.2	114.7	nd
8	39.8	19.9	18.0	4.9	4.9	17.7	nd	188.5	3.6
8b	37.0	17.2	21.4	5.8	4.1	26.6	nd	176.3	nd
9	594.1	167.7	24.7	2.6	4.1	97.5	1219.0	11.0	107.1
9b	237.0	132.9	11.8	3.2	3.2	124.1	310.7	147.7	70.5
10	27.8	12.9	53.3	10.0	3.7	35.5	7.2	221.5	10.8
10b	59.5	32.1	26.3	5.2	3.8	35.5	29.3	221.5	3.6
11	45.1	27.4	28.1	4.7	3.2	17.7	53.8	174.5	nd
11b	120.7	53.2	176.6	12.0	4.9	310.2	282.9	103.1	nd

nd = no detectado

En la Tabla 10 se enlistan los resultados de los iones determinados en el extracto de las muestras de suelo que corresponden al segundo periodo de muestreo. Los análisis de cationes y aniones de la segunda campaña sólo se realizaron para aquellas muestras que tenían un pH mayor a 8.5. Además, se tomaron muestras representativas que abarcaran todo el rango de conductividades eléctricas detectadas (0.13 y 10.33 dS/m). En este caso no fue posible determinar los carbonatos ya que la titulación no se realizó inmediatamente, si no que la muestra permaneció guardada durante cinco días antes de realizar el análisis.

El rango de concentraciones de sodio se encontró entre 22.4 y 443.3 mg/L; los de potasio entre 2.9 y 63.3 mg/L; los de calcio entre 10.5 y 119.6 mg/L; los de magnesio entre 1.4 y 38.2 mg/L y los de boro entre 0.1 y 16.9 mg/L. El catión sodio también fue el dominante. Para los aniones, las concentraciones de cloruro estuvieron entre 3 y 4662.8 mg/L; las de sulfato entre 6.8 y 3561 mg/L y las de bicarbonato entre 5 y 700 mg/L. Para este caso el cloruro y el sulfato fueron los aniones dominantes.

**Tabla 10. Resultados de los iones analizados en el extracto acuoso de las muestras de suelo de la segunda campaña de muestreo. Todos los valores están en mg/L.**

Muestra	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	B <sup>3+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
2	22.4	23.6	119.6	9.9	0.1	96.6	226.6	35.0
5	181.8	16.4	28.0	6.0	0.3	220.7	211.1	25.0
11	204.2	12.5	53.8	5.9	0.2	21.8	128.3	20.0
12	73.9	18.5	92.2	7.3	0.1	68.4	293.8	60.0
17	3.7	21.9	52.5	4.7	nd	10.6	68.8	10.0
32	27.4	10.3	83.1	9.3	0.1	106.9	79.4	25.0
39	42.6	5.1	12.7	5.8	0.2	37.8	27.1	5.0
40	70.8	30.9	39.8	38.2	0.4	57.8	44.6	20.0
42b	17.6	2.9	31.7	5.3	nd	15.2	91.4	15.0
43	27.2	8.2	18.0	3.0	0.2	8.1	17.9	5.0
45	12.4	8.8	25.1	3.7	0.1	6.7	10.8	8.0

nd = no detectado

Tabla 10. Continuación.

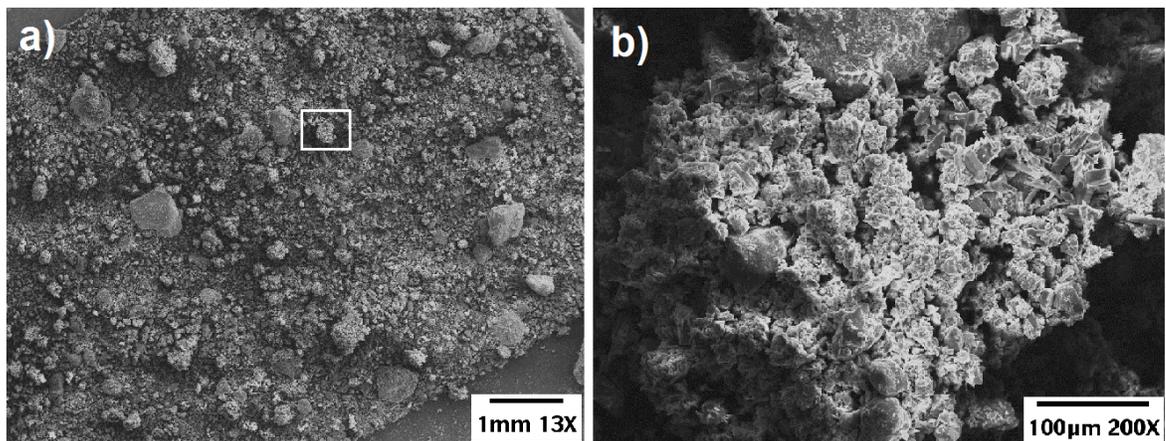
Muestra	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	B <sup>3+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
46	119.5	11.0	32.1	4.3	0.2	4.2	52.0	35.0
49	173.9	28.5	24.0	9.8	0.4	358.5	360.3	20.0
51	9.1	13.5	24.6	3.3	nd	3.2	19.1	10.0
54	130.0	8.0	35.7	6.1	0.2	153.4	798.6	20.0
58	25.0	6.0	51.3	4.3	nd	3.0	23.5	5.0
61	7.9	3.9	20.0	1.5	0.1	7.9	6.8	5.0
64	401.4	11.4	16.6	4.1	1.7	177.0	486.3	60.0
65	3707.0	63.4	71.7	1.4	16.9	4662.8	2673.7	700.0
65b	270.6	11.1	11.6	7.4	1.2	189.3	465.4	40.0
66	1549.0	56.4	10.5	1.4	2.6	3485.4	3561.9	150.0
66b	443.3	26.0	18.4	23.2	1.4	578.9	1643.3	50.0

nd = no detectado

### 5.3 Resultados de las muestras de sales

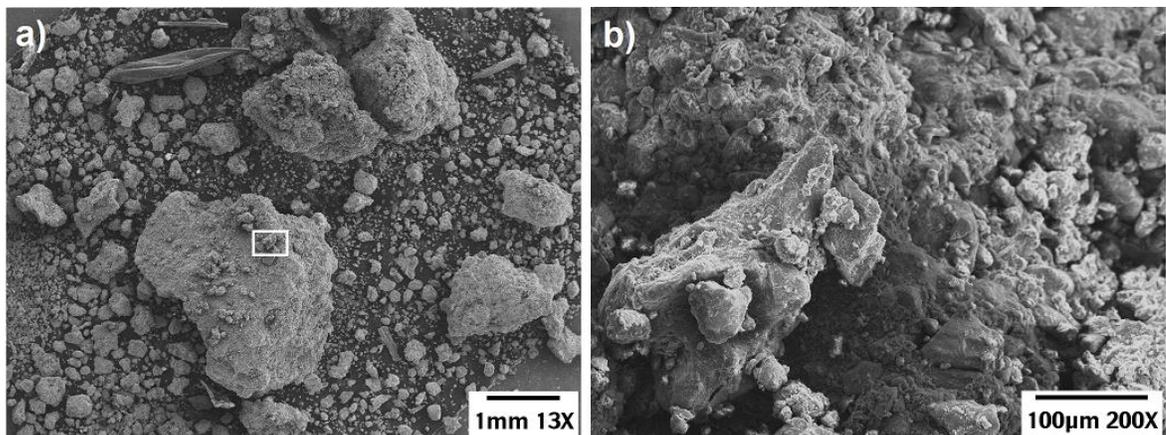
#### 5.3.1 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

En la Figura 23 se aprecia la micrografía de la muestra de sal número 3 de coloración café claro (Fig. 16b), del lado izquierdo (a) se observa la imagen de toda la muestra en donde se pueden apreciar los granos que componen el suelo y algunos cúmulos de cristales delgados y alargados que corresponden a la sal presente en el suelo. En la imagen de la derecha (b) se presenta un acercamiento de uno de estos cúmulos en donde se observan con más detalle los cristales alargados en la parte superior derecha de la imagen y los granos que componen el suelo con forma más redondeada.



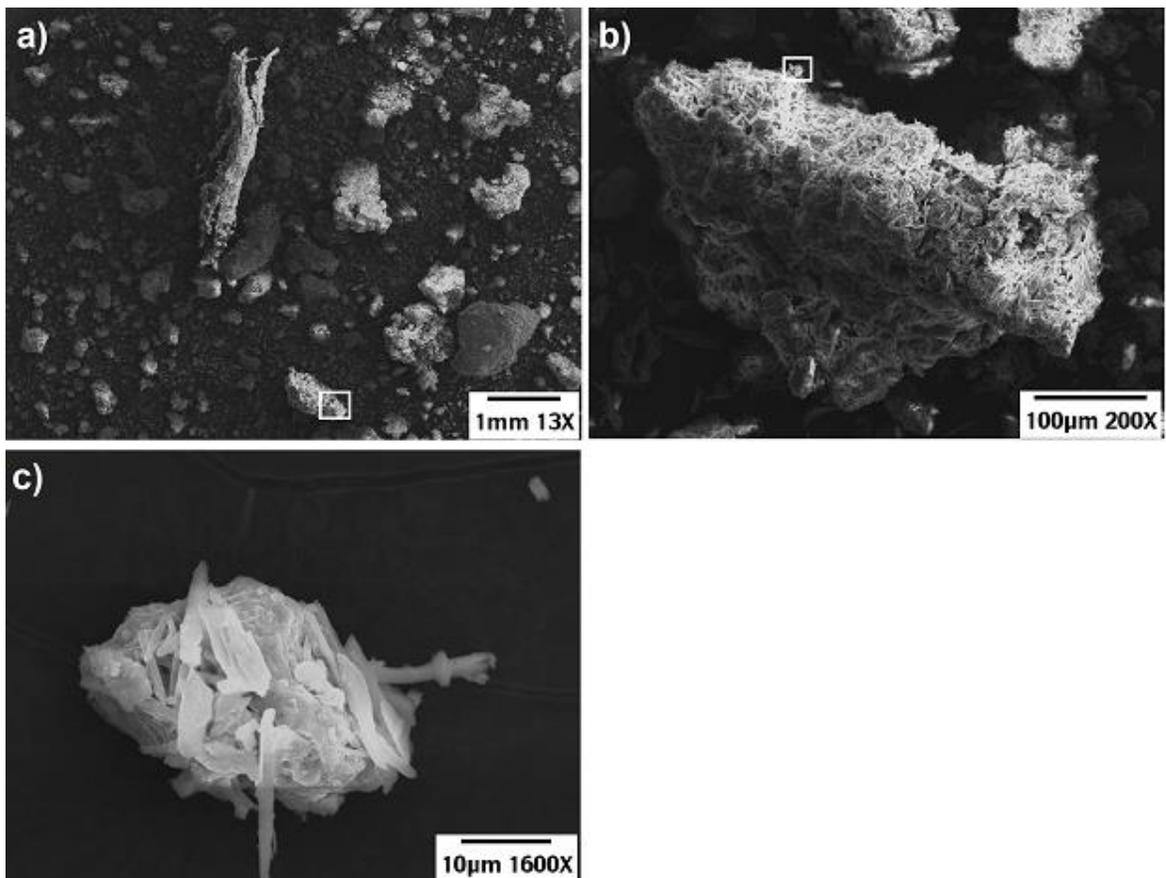
**Figura 23.** Micrografía de la muestra de sal número 3, a) imagen de la muestra total; b) acercamiento marcado por el recuadro blanco en a), aquí se observa un cúmulo de cristales que corresponden a la sal.

En la Figura 24 se observa la micrografía de la muestra número 4 que corresponde a la muestra de color café oscuro (Fig. 16b). Del lado izquierdo (a) se aprecia la muestra total mientras que el lado derecho (b) es un acercamiento del recuadro blanco. En a) se ven algunos restos de materia vegetal en la parte superior de la imagen, además, sólo se observaron algunos cúmulos de los cristales que conforman la sal.



**Figura 24.** Micrografía de la muestra de sal número 4, a) se muestra la imagen de la muestra total mientras que en b) se aprecia un acercamiento del recuadro blanco de a).

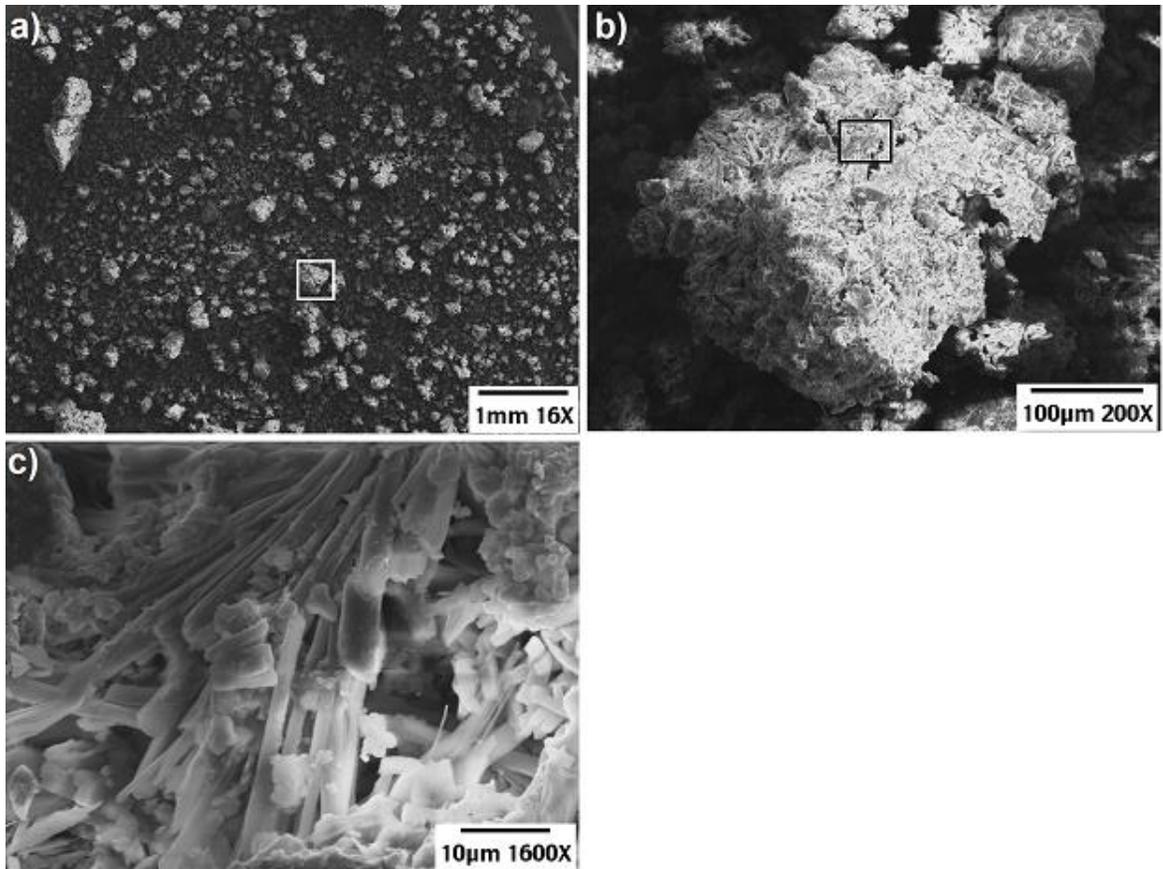
En la Figura 25 se muestra la micrografía de la sal número 2 la cual tenía un color amarillento (Fig. 16b). En a) se ve la muestra total en donde se observa mayor proporción de los cúmulos de cristales que corresponden a la sal; en b) se hizo un acercamiento de uno de estos cúmulos marcado en a) por el recuadro blanco; y en c) se realizó un mayor acercamiento del cumulo mostrado en b) en donde se observa que los cristales de la sal son delgados y alargados.



**Figura 25.** Micrografía de la muestra de sal número 2. En a) se aprecia la muestra total, en b) se muestra el acercamiento del recuadro blanco marcado en a); y en c) se tiene el acercamiento del recuadro blanco marcado en b).

En la Figura 26 se presenta la micrografía de la muestra de sal número 1 la cual fue la de coloración más clara con color blanco (Fig. 16b). En a) se aprecia la muestra total en donde se puede ver una mayor cantidad de cúmulos de los

cristales que conforman las sales precipitadas. En b) se hizo un acercamiento de uno de estos cúmulos marcado por el recuadro blanco en a); y finalmente en c) se realizó un mayor acercamiento del cúmulo marcado por el recuadro negro en b), se puede apreciar con mayor detalle la forma delgada y alargada que tienen los cristales que conforman las sales.



**Figura 26.** Micrografía de la muestra de sal número 1. En a) la muestra total; en b) se hizo un acercamiento de uno de los cúmulos marcado por el recuadro blanco en a); y en c) un mayor acercamiento marcado por el recuadro negro en b).

### 5.3.2 Difracción de rayos X

En las Figuras 27, 28, 29 y 30 se muestran los resultados de los análisis de difracción de rayos X de las muestras de sal 4, 3, 2 y 1 respectivamente. En todos los casos se obtuvieron que las facies cristalinas de las sales corresponden al mineral natrita. La anortita, anortoclasa y cuarzo se presentan por ser residuos del suelo que se quedó mezclado con las sales al momento de tomar la muestra y se derivan de los minerales que componen las rocas félsicas de la zona.

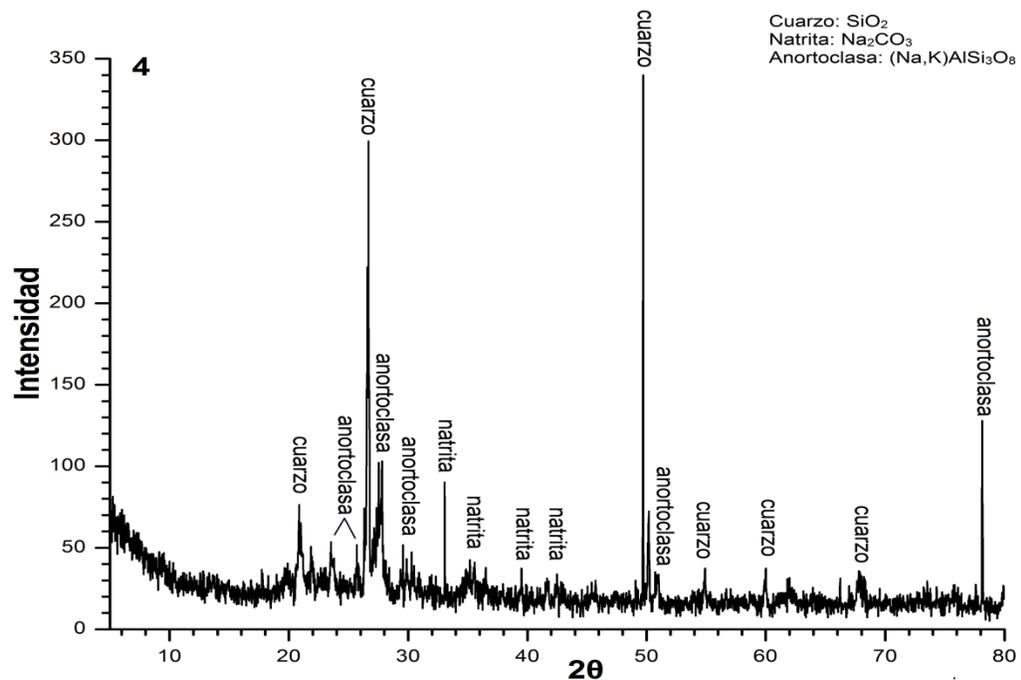


Figura 27. Difractograma de la muestra de sal 4.

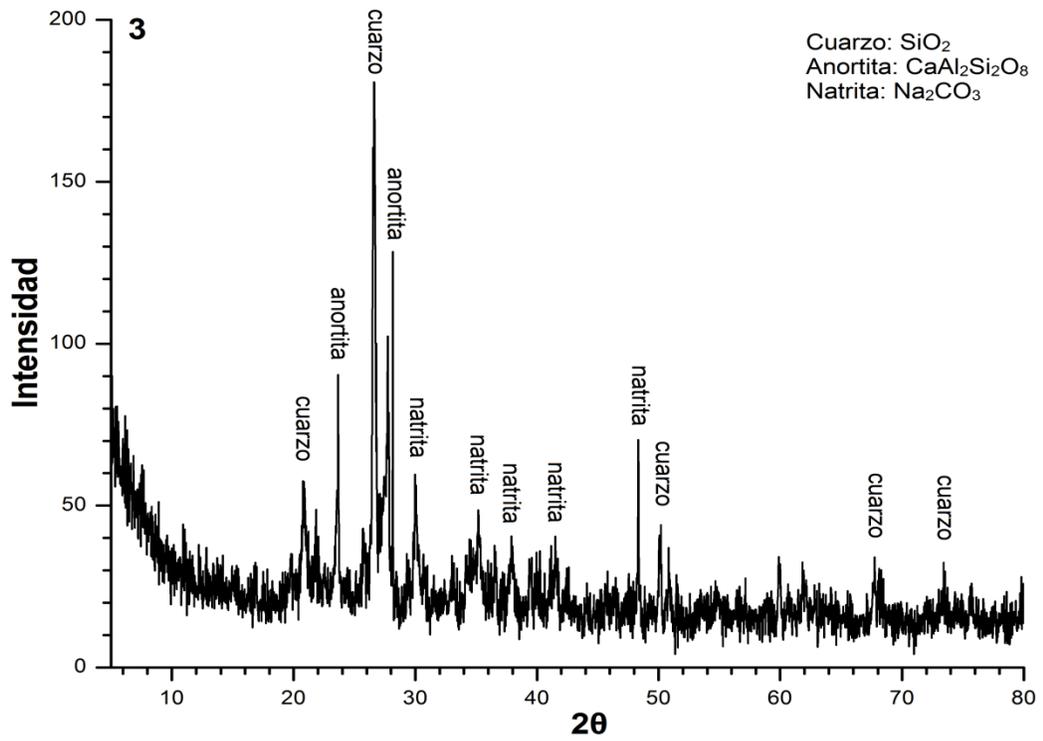


Figura 28. Difractograma de la muestra de sal 3.

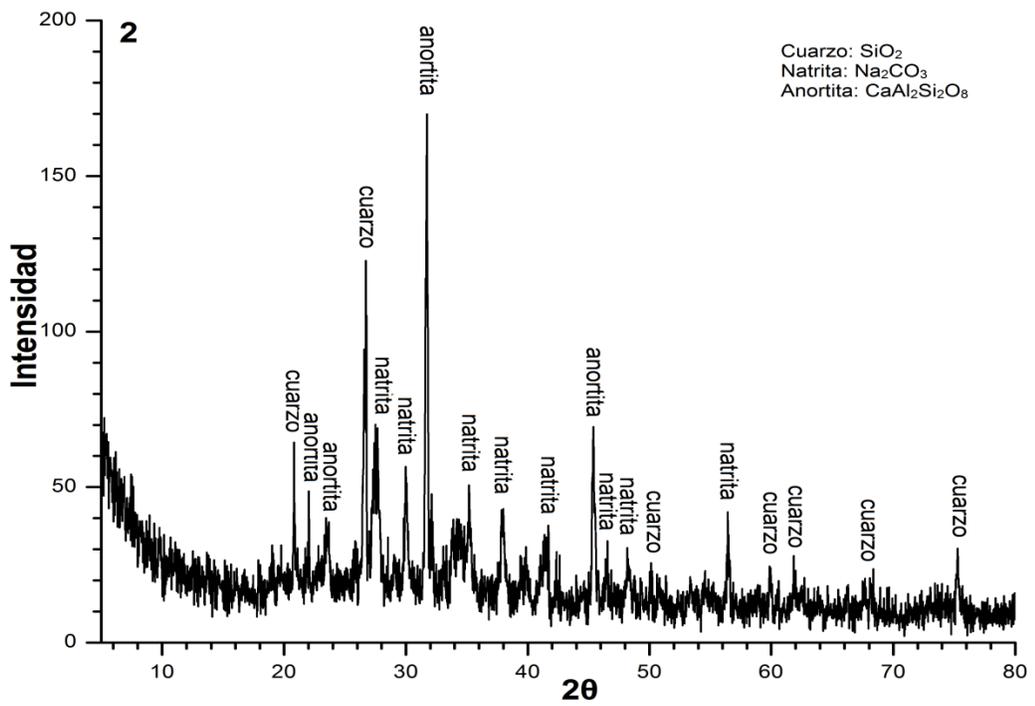


Figura 29. Difractograma de la muestra de sal 2.

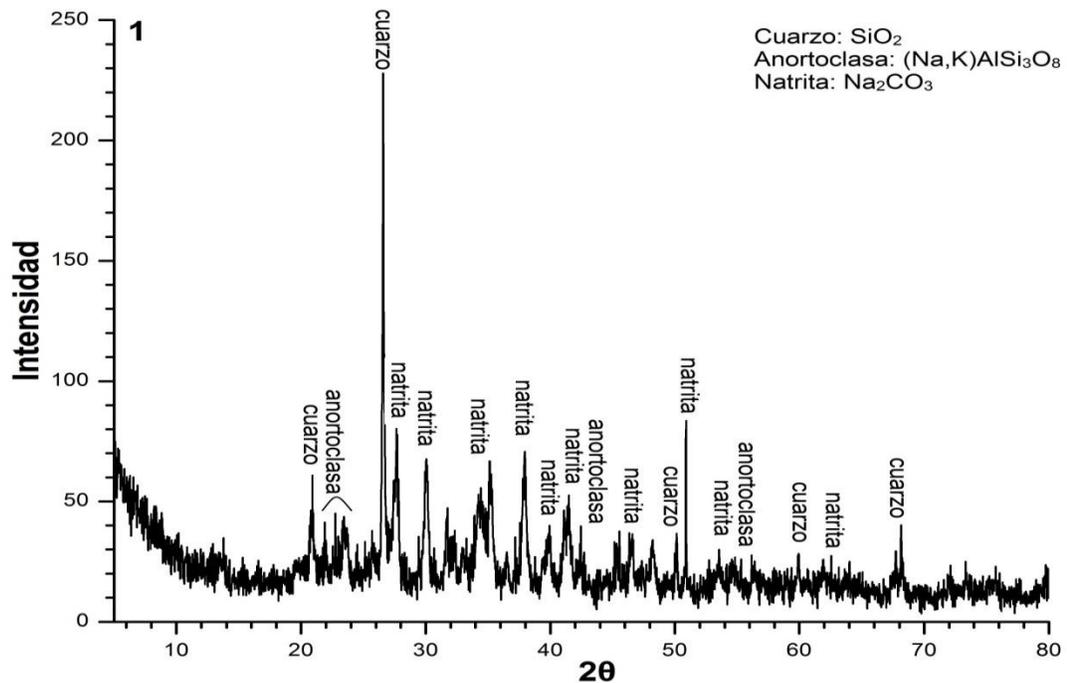
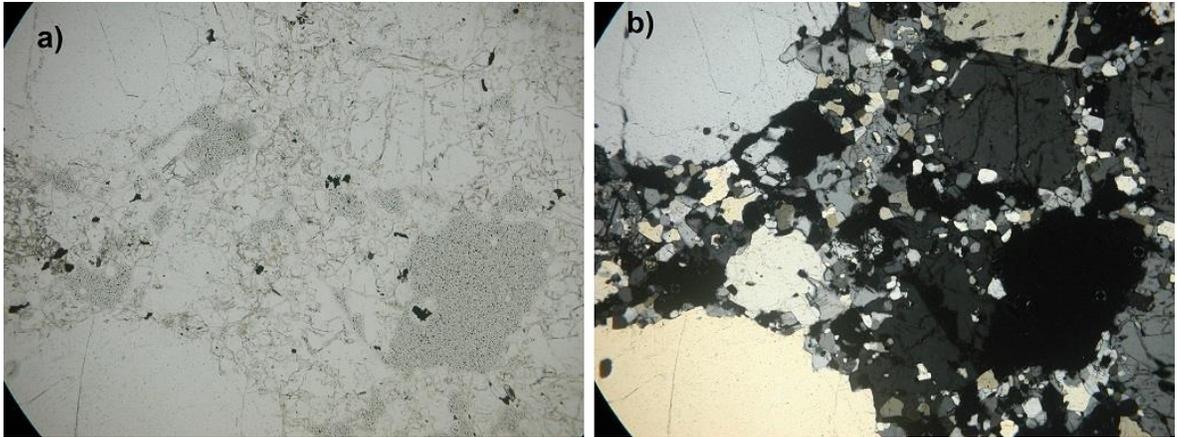


Figura 30. Difractograma de la muestra de sal 1.

#### 5.4 Resultados de las muestras de roca

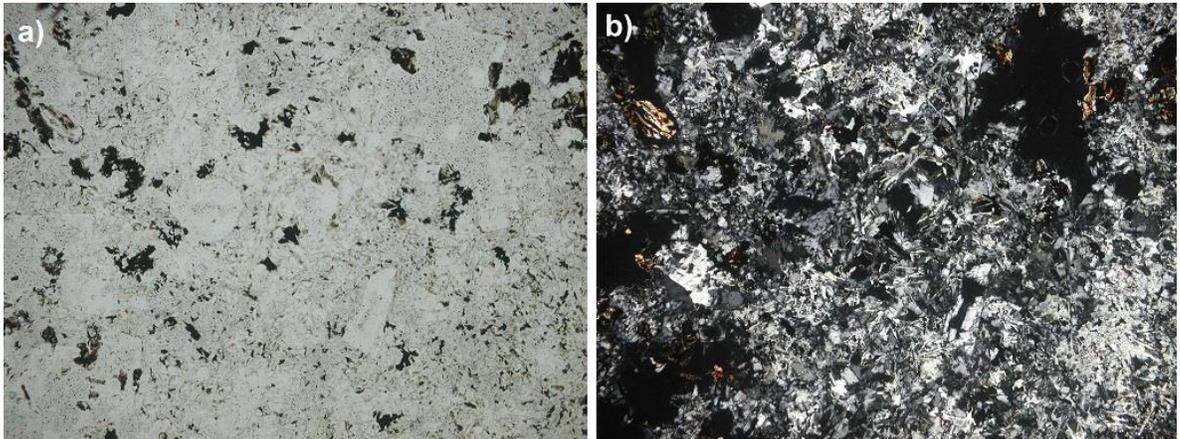
La muestra 1 (Fig. 31) posee textura fanerítica inequigranular. Los minerales esenciales son feldespato, cuarzo y plagioclasas, en ese orden de abundancia. El cuarzo ocupa el 40% de la muestra y se presenta como cristales inequigranulares de formas anhedrales a subeuhedrales. Se presenta como matriz rodeando a los feldespatos y plagioclasas, y en ocasiones embebidos en los feldespatos. Poseen extinción paralela. Los feldespatos son el 55% y se observan como fenocristales de forma anhedral. Se encuentran ligeramente alterados y fracturados y en ocasiones se observan pertitas moderadamente formadas. Las plagioclasas sólo son el 5% de la muestra y están presentes como fenocristales de forma euhedrales a subeuhedrales. Están moderadamente alterados. Poseen ángulos de extinción entre  $20^\circ$  y  $22^\circ$ , lo cual indica que se tratan de oligoclasa. Por la

proporción de los minerales y según la clasificación QAP (*quartz, alkali, plagioclase*; Le Maitre, 2002) se trata de una granito de feldespato alcalino.



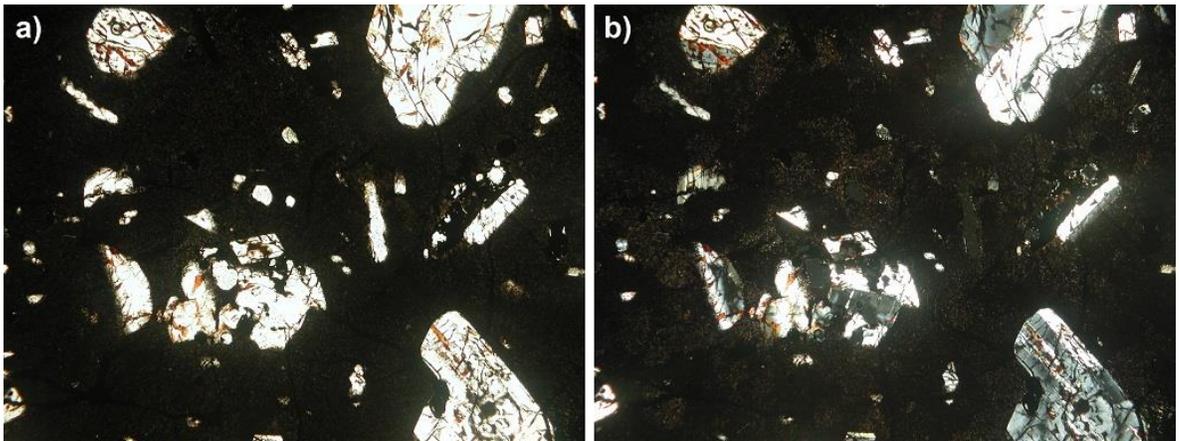
**Figura 31. Micrografía de la muestra de roca 1, a) imagen con luz polarizada y b) imagen con nicoles cruzados.**

La muestra 2 (Fig. 32) presenta textura pilotaxítica con cristales orientados aleatoriamente. Contiene abundantes óxidos. Los minerales esenciales son plagioclasas, cuarzo y feldespatos. Las plagioclasas (85%) se presentan como matriz de microlitos aciculares y como fenocristales de forma euhedral a subeuhedral con maclas y zoneamiento, moderadamente alterados. El cuarzo (10%) se encuentra crecido entre los espacios intergranulares y forma parte de la matriz. Posee forma anhedral con extinción paralela. Los feldespatos (5%) se encuentran como fenocristales subeuhedrales ligeramente alterados. De acuerdo con la clasificación QAP se trata de una dacita.



**Figura 32.** Micrografía de la muestra de roca 2, a) imagen con luz polarizada y b) imagen con nicoles cruzados.

La muestra 3 (Fig. 33) tiene textura porfídica, con los fenocristales embebidos en una matriz vítrea. La plagioclasa se presenta como fenocristales (90%) euhedrales a subeuhedrales, ligeramente alterados. Presentan maclas y zoneado. El cuarzo (10%) se encuentra como fenocristales anhedrales a subeuhedrales. Según la clasificación QAP (Le Maitre, 2002) es una dacita.



**Figura 33.** Micrografía de la muestra de roca 3, a) imagen con luz polarizada y b) imagen con nicoles cruzados.

En la Tabla 11 se tienen resumidos los resultados del análisis petrográfico de las láminas delgadas hechas de las muestras de roca.

**Tabla 11. Resultados de los análisis petrográficos de las muestras de roca.**

<b>Muestra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Textura</b>	Fanerítica inequigranular	Pilotaxítica	Porfídica
<b>Minerales esenciales</b>	Sanidino, cuarzo y oligoclasa	Oligoclasa, cuarzo y sanidino	Oligoclasa y cuarzo
<b>Minerales accesorios</b>	Biotita		
<b>Matriz</b>	Cuarzo	Vítrea y microlitos de plagioclasa acicular	Vítrea
<b>Minerales secundarios</b>	Óxidos de hierro	Óxidos de hierro	Óxidos de hierro
<b>Clasificación</b>	Granito alcalino	Dacita	Dacita
<b>Observaciones</b>		Disolución de plagioclasas	

## Capítulo 6. Discusión

---

### 6.1 Agua

#### 6.1.1 Salinidad del agua

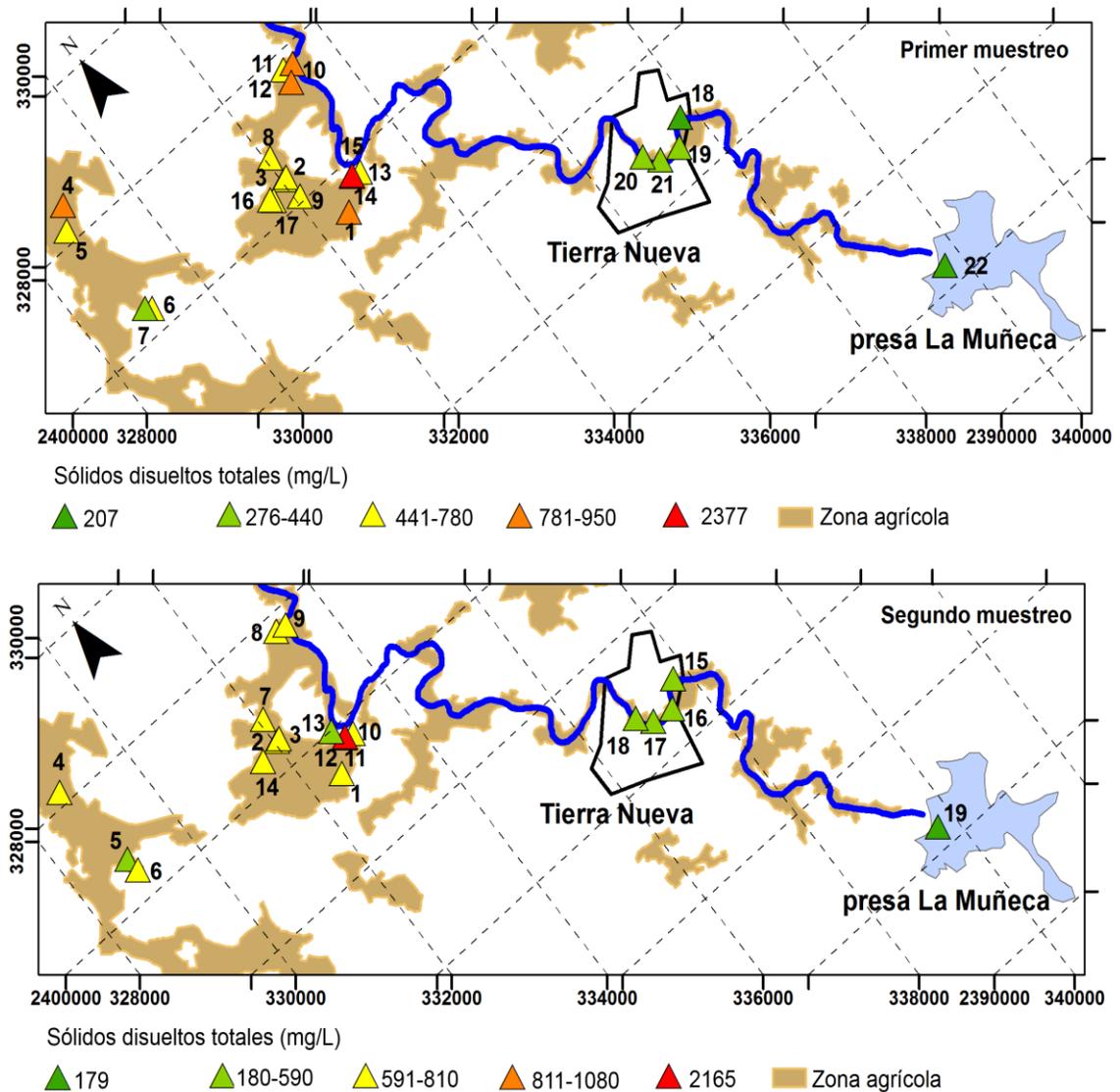
Habitualmente cuando se considera la salinidad del agua, ésta se asocia al contenido de NaCl (halita) ya que estos iones son los que se encuentran en mayor proporción en los océanos. Sin embargo, en términos más específicos, la salinidad del agua es directamente proporcional a la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT) que se presenta en las muestras de agua y que se calculan de la suma de los cationes y aniones obtenidos en los análisis químicos.

En el área de estudio, los valores de SDT se encuentran dentro del rango de 207 a 2377 mg/L para el primer muestreo y de 179 a 2165 mg/L en el caso del segundo. En la Figura 34 se puede apreciar la distribución de las muestras de agua mostrando la concentración de SDT.

Las muestras de agua utilizadas para el abastecimiento de la población de Tierra Nueva, es decir, las muestras presa La Muñeca, Barrio Los Nogales, Barrio del Santuario, Calle Corregidora y Avenida Hidalgo (triángulos verdes), poseen valores de SDT que varían entre 275 y 438 mg/L para el primer período, y de 412 a 552 mg/L en el segundo, por lo tanto; se clasifican como aguas dulces.

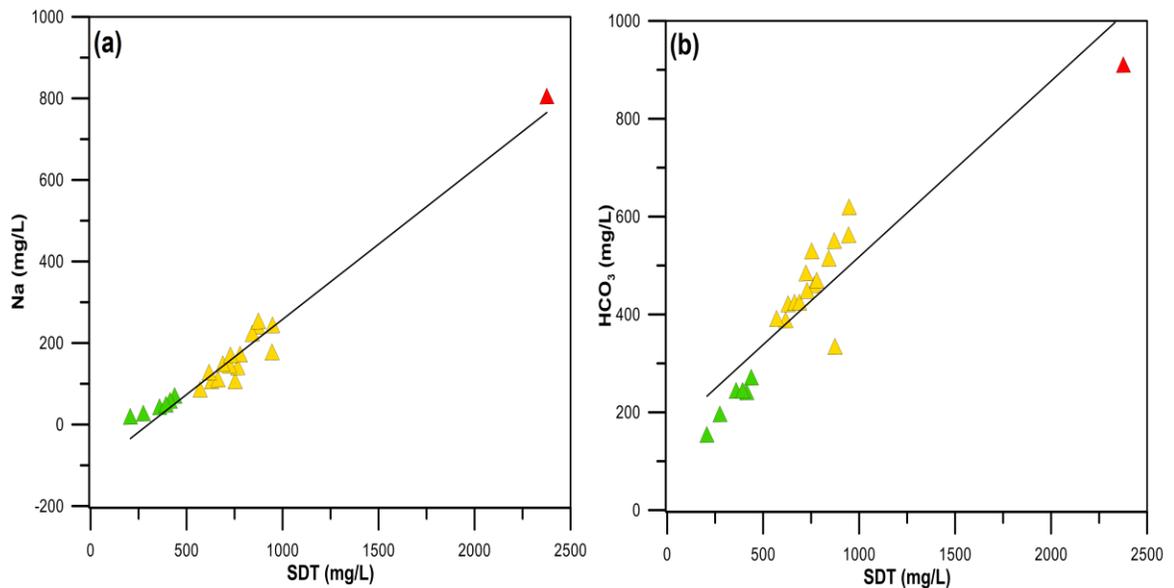
Las muestras usadas para el riego (triángulos amarillos) presentan valores de SDT de 440 a 948 mg/L en el caso del primer muestreo y valores de 590 a 1081 mg/L en el segundo. Por lo anterior; con excepción de la muestra del Estanque 1 en el segundo muestreo que cae dentro de la clasificación de salobre, las demás muestras consideradas siguen siendo aguas dulces.

En ambos períodos de muestreo se presentan en la misma muestra (Estanque 2) los valores máximos de SDT con 2377 y 2165 mg/L respectivamente, por lo que esta muestra se clasifica como salobre y aunque la normatividad mexicana permite el uso de agua para riego con concentraciones de hasta 5000 mg/L (CONAGUA, 2013), el agua del Estanque 2 no es utilizada para este fin.



**Figura 34.** Distribución de las muestras de agua indicando las concentraciones de sólidos disueltos totales.

La proporción de los cationes en orden de abundancia son  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$  representando en promedio el 69, 19, 8 y 4% respectivamente del total. Mientras que los aniones en orden de abundancia son  $\text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$  contribuyendo en promedio al 76, 12, 9, 2 y 1% respectivamente del total. La gráfica de  $\text{Na}^+$  respecto a los SDT (Fig. 35a) muestra que estos dos parámetros poseen un índice de correlación de 0.88 mientras que en la gráfica de  $\text{HCO}_3^-$  respecto a los SDT (Fig. 35b) se observa un índice de correlación de 0.87, mientras que los demás iones poseen índices de correlación menores a 0.4 (Tabla 12). El sodio y el bicarbonato tienen una correlación de 0.97 entre ellos, indicando que son directamente proporcionales. Lo cual revela que los iones que contribuyen principalmente a la salinidad del agua son el sodio y el bicarbonato. Estos dos iones en conjunto representan entre el 66 y el 90% de los SDT.



**Figura 35. Relaciones entre el ion sodio y sólidos disueltos totales (a) y el ion bicarbonato y sólidos disueltos totales (b). Los triángulos verdes representan las muestras 18, 19, 20, 21, 22 y 7; el triángulo rojo la muestra 15 y los triángulos amarillos las muestras restantes localizadas en la zona agrícola.**

**Tabla 12. Matriz de correlación entre aniones y cationes analizados en las muestras de agua de la primera campaña de muestreo.**

	Na	Mg	Ca	Cl	K	SO <sub>4</sub>	SDT	HCO <sub>3</sub>
Na	1	-0.345	-0.57	0.421	<b>0.701</b>	0.294	<b>0.883</b>	<b>0.975</b>
Mg		1	0.543	-0.194	0.083	-0.673	-0.186	-0.188
Ca			1	0.174	-0.449	-0.526	-0.387	-0.442
Cl				1	0.179	0.034	0.474	0.474
K					1	-0.007	<b>0.68</b>	<b>0.725</b>
SO <sub>4</sub>						1	0.198	0.162
SDT							1	<b>0.867</b>
HCO <sub>3</sub>								1

### 6.1.2 Facies hidroquímicas

La caracterización hidroquímica de las aguas y su distribución espacial proporcionan información sobre el origen de las mismas, los procesos fisicoquímicos que las afectan y su calidad, lo que contribuye a que se pueda hacer una mejor gestión de los recursos hídricos (Galindo, 2006; Lillo, 2009).

La representación espacial de los tipos de agua se hizo a través de los gráficos de Stiff, constituidos por polígonos que indican la concentración (en meq/L) de cada uno de los iones mayoritarios y la forma del polígono muestra el tipo de agua. Al sobreponer los polígonos obtenidos sobre el mapa de la zona de estudio se visualiza la variación espacial de los tipos de agua (Fig. 36).

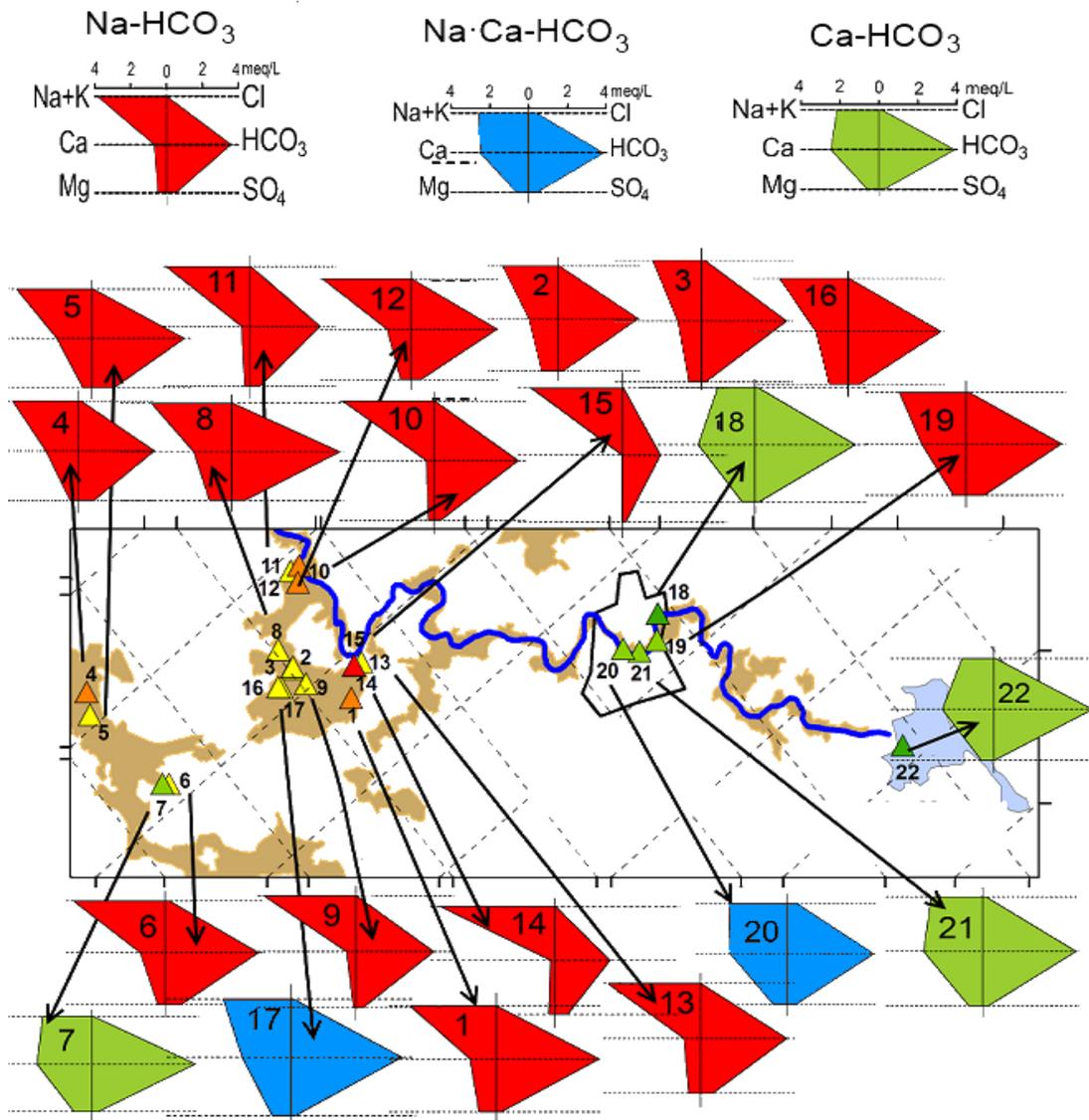


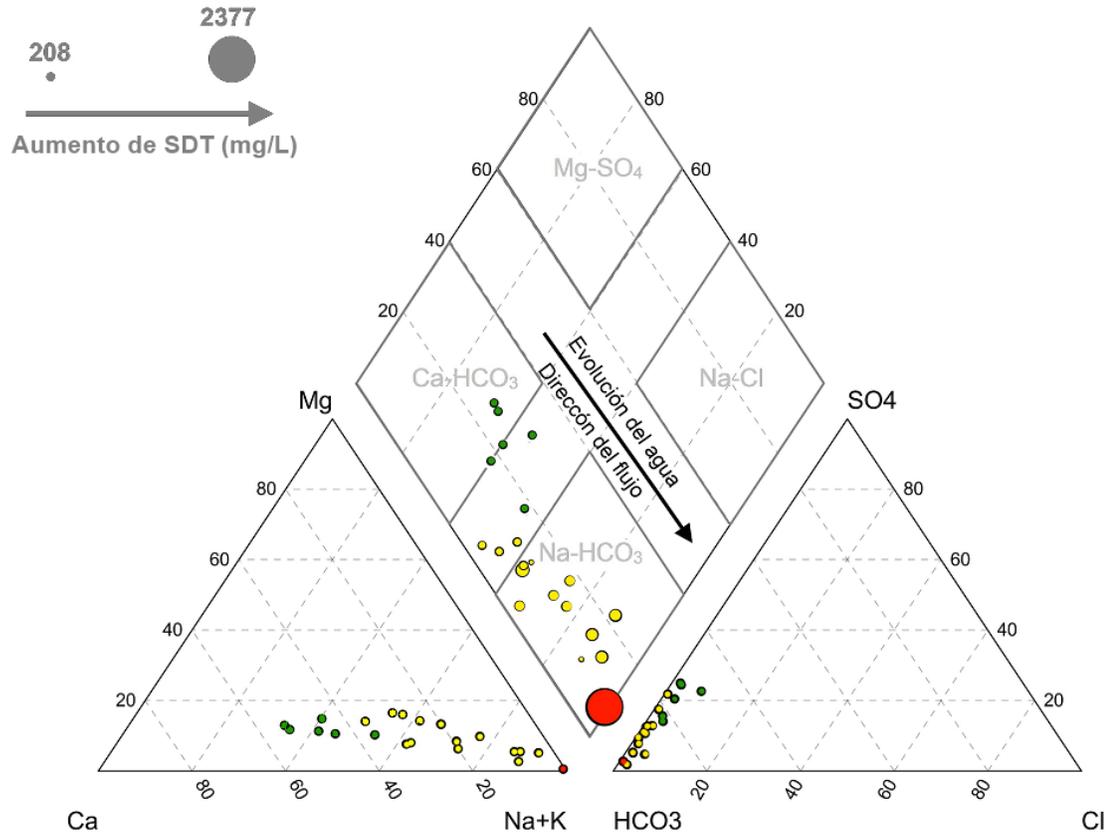
Figura 36. Gráficos de Stiff indicando el tipo de agua de las muestras del primer periodo de muestreo.

En la Figura 36, se puede apreciar que el anión que domina la composición en todas las muestras es el bicarbonato, mientras que los cationes dominantes son el sodio y el calcio, por lo tanto; se tienen tres tipos de agua: bicarbonatada-cálcica, bicarbonatada-cálcico-sódica y bicarbonatada-sódica. Las aguas bicarbonatadas-cálcicas corresponden a las muestras 22, 21, 18 y 7 que se encuentran cerca de la presa La Muñeca. El tipo bicarbonatada-cálcico-sódica se presenta en las

muestras 20 y 17 que se localizan una cerca de la presa y la otra en la zona agrícola. El tipo bicarbonatada-sódica corresponde al resto de las muestras.

Esto indica que las muestras que poseen menor cantidad de SDT (22, 18, 21 y 7) corresponden con el tipo de agua bicarbonatada-cálcica, lo cual es un aspecto característico de las aguas superficiales con poca evolución geoquímica (Karmegam *et al.*, 2011). A medida que el agua fluye por el cauce, ésta interactúa con la roca adquiriendo mayor cantidad de SDT (19 y 20) y a la vez va cambiando su composición química, aumentando su contenido de sodio, por lo que se identifican las aguas bicarbonatada-cálcico-sódica. Finalmente, las aguas que se encuentran en la zona agrícola y que son las que están más alejadas de la presa, han tenido mayor tiempo de interacción con el medio geológico. Además se localizan en una litología diferente (dacita) a la de las otras muestras (riolita) y poseen una composición química que sigue dominada por el anión bicarbonato, sin embargo, el sodio pasó a ser el catión dominante en estas aguas, por lo tanto, se tienen aguas de tipo bicarbonatada-sódica. Debido a que los resultados del segundo muestreo arrojaron la misma clasificación que del primero, los diagramas de Stiff se omitieron para el segundo muestreo.

El diagrama de Piper permite clasificar el agua de acuerdo con el catión y el anión dominante (>50%) y con esta información se pueden deducir procesos hidrogeoquímicos como mezcla de aguas, disolución de yesos e intercambio catiónico (Karmegam *et al.*, 2011). En la Figura 37 se representan los resultados en el diagrama de Piper y se puede observar que las muestras se agrupan en tres tipos de agua: bicarbonatada-cálcica (tres muestras); bicarbonatada-cálcico-sódica (siete muestras) y bicarbonatada-sódica (12 muestras). Esto coincide con los tipos de agua obtenidos con los diagramas de Stiff.



**Figura 37. Representación de las muestras de agua en el diagrama de Piper. Los círculos verdes representan las muestras 18, 19, 20, 21, 22 y 7; el círculo rojo la muestra 15 y los círculos amarillos las muestras restantes localizadas en la zona agrícola.**

Debido a la posición de las muestras de agua en el diagrama de Piper, en donde se observa la evolución del agua de tipo  $\text{Ca-HCO}_3$  a  $\text{Na-HCO}_3$  y que los sólidos disueltos totales se mantienen constantes, se deduce que existe un intercambio catiónico entre el calcio y el sodio, que ya ha sido documentado en otras investigaciones (Cates *et al.*, 1996). Esto implica que el sodio pasa a la solución mientras que el calcio que estaba en la solución es adsorbido.

Schoeller (1965) propuso el Índice de Intercambio de Base (también llamado índice cloro-alcálico) para la interpretación del intercambio iónico entre el agua subterránea y el medio geológico. El índice cloro-alcálico (CAI, por sus siglas en

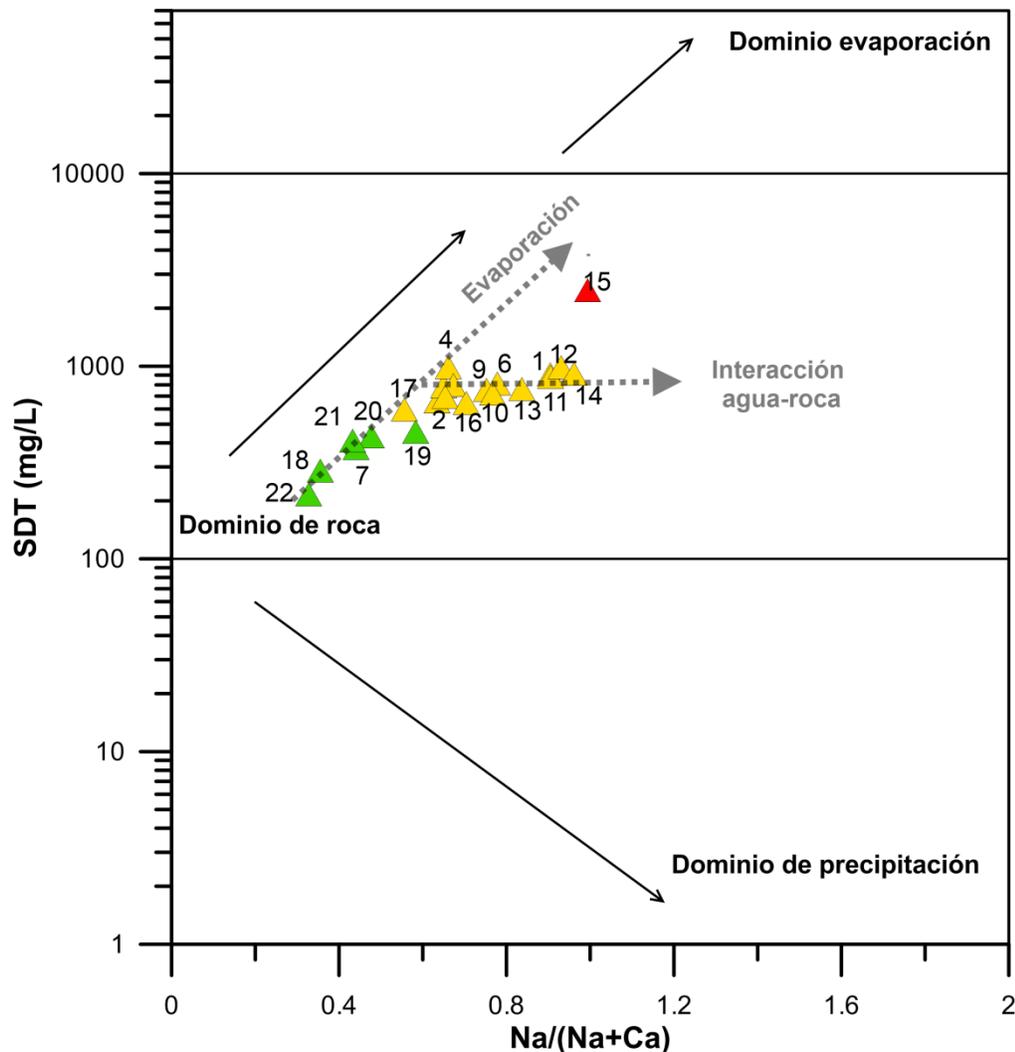
inglés) se calcula con la siguiente relación:  $CAI = [Cl - (Na+K)] / Cl$ , con las concentraciones en unidades de meq/L. Los valores positivos del índice indican intercambio de sodio y potasio del agua, con magnesio y calcio de las rocas; y si los valores son negativos entonces se da un intercambio entre calcio y magnesio del agua, con sodio y potasio de las rocas, como se ha comprobado en otros estudios (Nagaraju *et al.*, 2006). El índice cloro-alcálico de las muestras de agua de la zona de estudio es negativo en todos los casos, indicando un intercambio catiónico del calcio y magnesio del agua por el sodio y el potasio de las rocas. Los valores se encontraron entre -5 y -126. Esto confirma lo que se dedujo del diagrama de Piper. Debido al intercambio iónico, el agua de la presa que originalmente es bicarbonatada-cálcica evoluciona al tipo bicarbonatada-sódica. Esto implica un aumento del riesgo de sodificación para el suelo (Richards, 1954).

### 6.1.3 Procesos hidrogeoquímicos

Los procesos que controlan la química del agua pueden ser evaluados graficando las muestras en el diagrama de Gibbs (1970), que consiste en graficar los sólidos disueltos totales respecto a la relación de  $Na^+ / (Na^+ + Ca^{2+})$  arrojando información sobre la importancia relativa de los procesos naturales mayores que controlan la química del agua, como son: (1) precipitación atmosférica, (2) intemperismo de las rocas y (3) evaporación. En la Figura 38 se graficaron los resultados en el diagrama de Gibbs, donde se puede ver que el procesos químico predominante se debe al intemperismo de los minerales de la roca o del suelo con el que tiene contacto el agua. Asimismo, también tienen una tendencia hacia el dominio de la evaporación. La evaporación incrementa las concentraciones de los iones disueltos derivados del intemperismo químico, provocando una mayor salinidad del agua. Las actividades antrópicas influyen también en el proceso de evaporación, esto incrementa las concentraciones de  $Na^+$  y  $Cl^-$  y por consecuencia; los SDT (Hem, 1992). Recordando que la zona de estudio posee un

clima semiárido, es de esperarse que los procesos químicos del agua se vean influenciados por la evaporación.

En la gráfica de Gibbs, también se observa que las muestras se agruparon. Las muestras 18, 19, 20, 21 y 22 que son de la presa y las norias dentro de Tierra Nueva y la muestra 7, están más cerca del dominio de la roca y a la vez presentan los valores más bajos en SDT (llamado desde ahora grupo 1, color verde). Es necesario mencionar que la muestra 7 a pesar de estar localizada lejos de las demás muestras de este grupo, en el sitio, se pudo verificar que uno de los canales por donde se distribuye el agua de la presa para el riego, llega hasta ese lugar, por lo que es razonable encontrar que el agua de esa muestra tenga características similares a las de la presa. El otro grupo que se puede observar corresponde a las muestras: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 17 (grupo 2 desde ahora, color amarillo) que también se encuentran dentro del dominio de la roca, siguen una tendencia hacia el dominio de evaporación. Se puede ver además que los valores de SDT en este grupo se van incrementando y son por lo tanto; mayores a los de las muestras del grupo 1. Finalmente, se tiene separada de los otros dos grupos la muestra 15 que es la que presentó mayor salinidad en ambos periodos de muestreo; sus resultados están más desplazados hacia el dominio de la evaporación. Esta agrupación que se ve en el diagrama de Gibbs coincide con los tipos de agua que se representan con los diagramas de Stiff.



**Figura 38.** Diagrama de Gibbs indicando los mecanismos que gobiernan los procesos químicos del agua de la zona de estudio.

El intemperismo y disolución de la calcita y la dolomita han sido identificados como la fuente principal de los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$  en los sistemas de agua subterránea (Xing *et al.*, 2013). En la zona de estudio, la roca riolítica con la que está en contacto el agua de la presa tiene sus fracturas rellenas con calcita (Tristán, 1987; SGM, 1999) por lo tanto; la disolución de este mineral podría explicar la diferencia de composición entre las aguas más cercanas a la presa y las de la zona agrícola ya que el agua de la presa y las norias dentro de Tierra Nueva poseen índices de saturación (IS) respecto a la calcita de -0.5 en promedio,

lo que indica que es posible que esté ocurriendo la disolución de éste mineral; mientras que en la zona agrícola tienen IS de 0.45 en promedio, por lo que es posible que la calcita precipite.

En la gráfica de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  respecto a  $\text{HCO}_3^-$  (Fig. 39a) se observa que todas las muestras caen debajo de la equilínea (1:1) lo que demuestra que el exceso de alcalinidad en el agua ha sido balanceada por los metales alcalinos ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ). En el caso del diagrama de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  vs cationes totales (Fig. 39b) se aprecia que los datos se encuentran también debajo de la línea teórica, representando una mayor contribución de los elementos alcalinos. Asimismo, se nota un decaimiento de la concentración de los alcalinotérreos en las muestras del grupo 1, lo que apoya el intercambio iónico que sugieren el diagrama de Piper y el índice cloro-alcalino de Schoeller. El incremento de los elementos alcalinos no presenta ninguna correlación con los aniones  $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$  (Fig. 39c) lo que indica que estos iones se incorporan de distintas fuentes.

El exceso de  $\text{Na}^+$  sobre el  $\text{K}^+$  (Fig. 39d) se confiere a la mayor resistencia de los feldespatos al intemperismo y además tal exceso resulta de los iones que provienen del intemperismo de los silicatos (Jalali, 2007). Del mismo modo; el exceso de  $\text{Na}^+$  sobre el  $\text{Cl}^-$  (Fig. 39e) plantea que la alta concentración de álcalis proviene de fuentes distintas a la precipitación o a la halita. Las muestras de agua tienen una alta correlación de elementos alcalinos sobre los cationes totales (Fig. 39f) lo que refuerza la contribución de cationes a través del intemperismo de los silicatos, como se ha demostrado en otros estudios (Çetindag y Okan, 2004).

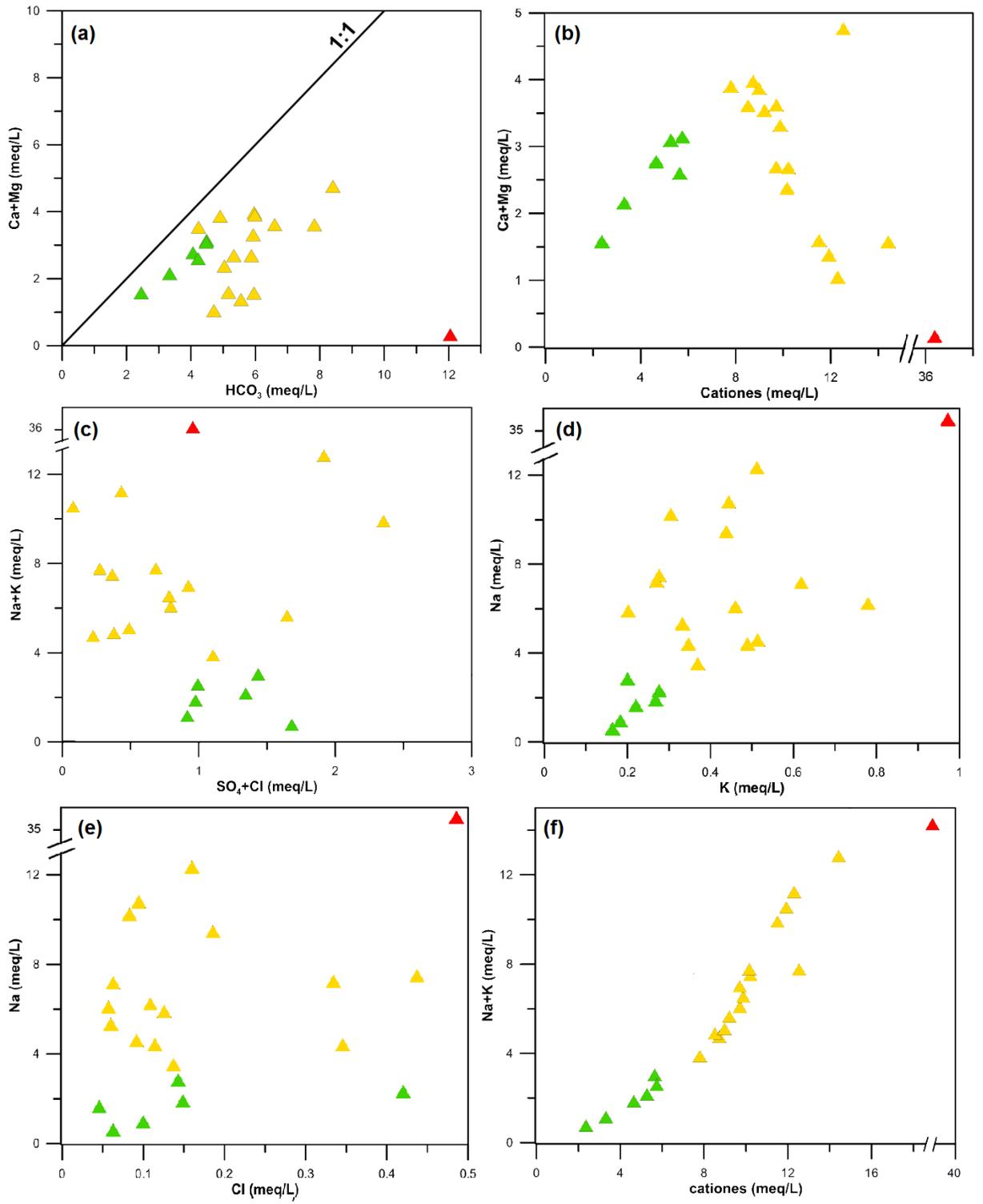


Figura 39. Relaciones iónicas de las muestras de agua.

A partir del análisis petrográfico, se observó que la dacita en la que se encuentran las muestras del grupo 2 (Fig. 11) muestra disolución de las plagioclasas que se presentan como matriz de microlitos, lo que a su vez facilita su disolución. Además usando el método de Michel-Levy se logró determinar que las plagioclasas corresponden a oligoclasa, coincidiendo con estudios petrográficos previos (Tristán, 1987; SGM, 1999) en los que para esta misma roca y para otras de la zona, las plagioclasas son andesina y oligoclasa. Considerando esto, es posible explicar que el exceso de sodio de las muestras de agua se deriva de la disolución de éstos minerales.

La relación  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  varió de 0.5 a 169, indicando una deficiencia de  $\text{Ca}^{2+}$ , lo cual es causado por el intercambio iónico y/o la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  (Stimson *et al.*, 2001; Chae *et al.*, 2006). La evaporación también induce la precipitación de  $\text{CaCO}_3$ . La precipitación de  $\text{CaCO}_3$  y el intercambio iónico llevan a un exceso de los metales alcalinos sobre los alcalinotérreos. En la Figura 40 se puede ver que las muestras de agua correspondientes al grupo 1, poseen mayor contenido de alcalinotérreos que de metales alcalinos, mientras que en el grupo 2 sucede lo contrario. Las muestras del grupo 1 poseen índices de saturación ligeramente negativos respecto a calcita y aragonita; y las muestras del grupo 2 presentan IS positivos respecto a estos mismos minerales. Considerando lo anterior, y que las relaciones iónicas y el diagrama de Piper indican un proceso de intercambio iónico, además de que ambos grupos se encuentran en litologías diferentes, es correcto pensar que la disolución de calcita, el intercambio catiónico entre el calcio y el sodio, y la disolución de minerales ricos en sodio, son los procesos que generan la composición química de las aguas de la zona de estudio.

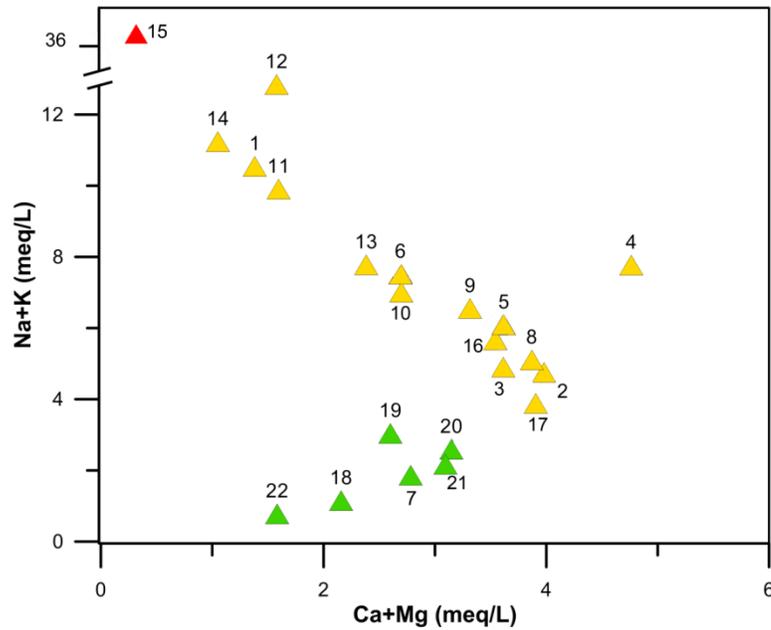
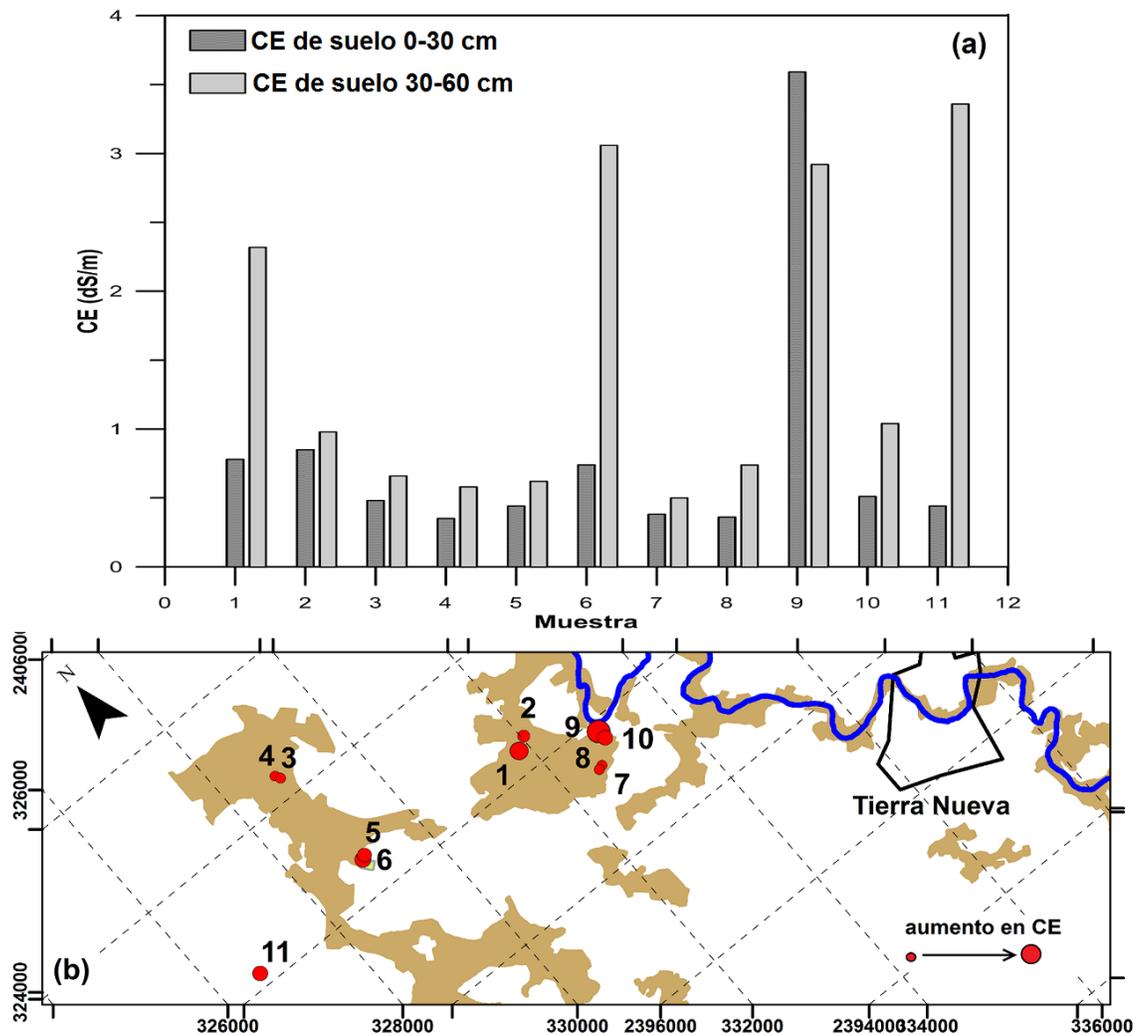


Figura 40. Relación de metales alcalinos contra alcalinotérreos.

## 6.2 Suelo

### 6.2.1 Salinidad del suelo

La conductividad eléctrica (CE) de los extractos de las muestras de suelo de la primera campaña de muestreo varió de 0.25 a 3.59 dS/m, con un valor promedio de 0.79 dS/m. De acuerdo con estos valores, las muestras de suelo se clasifican como no salinas. En la Figura 41a se tiene una comparación entre los resultados a las dos profundidades de muestreo. Se puede ver que la salinidad en las muestras de 30-60 cm es mayor que las registradas en aquellas que fueron tomadas de 0-30 cm, con excepción de la muestra 9 en la que sucede lo contrario. En la Figura 41b se presenta la distribución de la CE y se observa que la mayor salinidad es la de la muestra 9, localizada cerca del río Jofre y que es el sitio donde se identificó costra de sales precipitadas sobre el suelo.



**Figura 41. Distribución vertical (a) y espacial (b) de la conductividad eléctrica de las muestras de suelo de la primera campaña de muestreo.**

En la Figura 42 se compara la CE de las muestras de suelo y la CE de las muestras de agua. De aquí se observa que la CE del agua es mayor que la del suelo. Por lo anterior, el agua de riego no influye en la salinización del suelo, ya que se esperaría que el suelo fuera más salino debido al aporte constante de iones disueltos en el agua de riego.

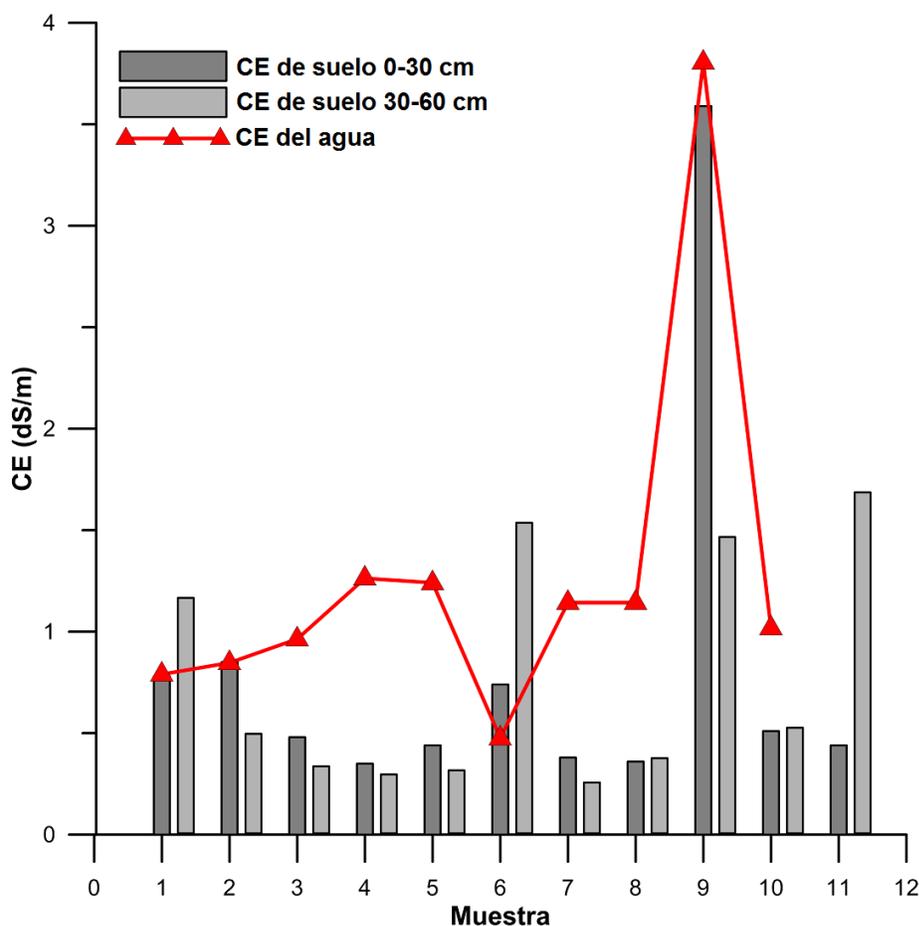


Figura 42. Relación entre la conductividad eléctrica del suelo y el agua de riego.

Con los análisis de textura del suelo se elaboró un cociente que relaciona el material más fino (limos y arcillas), con el material más grueso (arenas), obteniendo un factor, el cual se compara con la CE del suelo, como se muestra en la Figura 43. En la figura se observa como la CE del suelo y su textura están relacionadas en ambas profundidades (0-30 y 30-60 cm), de tal manera que, a medida que la textura del suelo se vuelve más fina, la CE del suelo aumenta, y viceversa. Esto es debido a que los suelos gruesos permiten una mayor lixiviación de las sales, como se ha encontrado en otros estudios (Aragües *et al*, 2011; Selim *et al*, 2012; Nosetto *et al*, 2013).

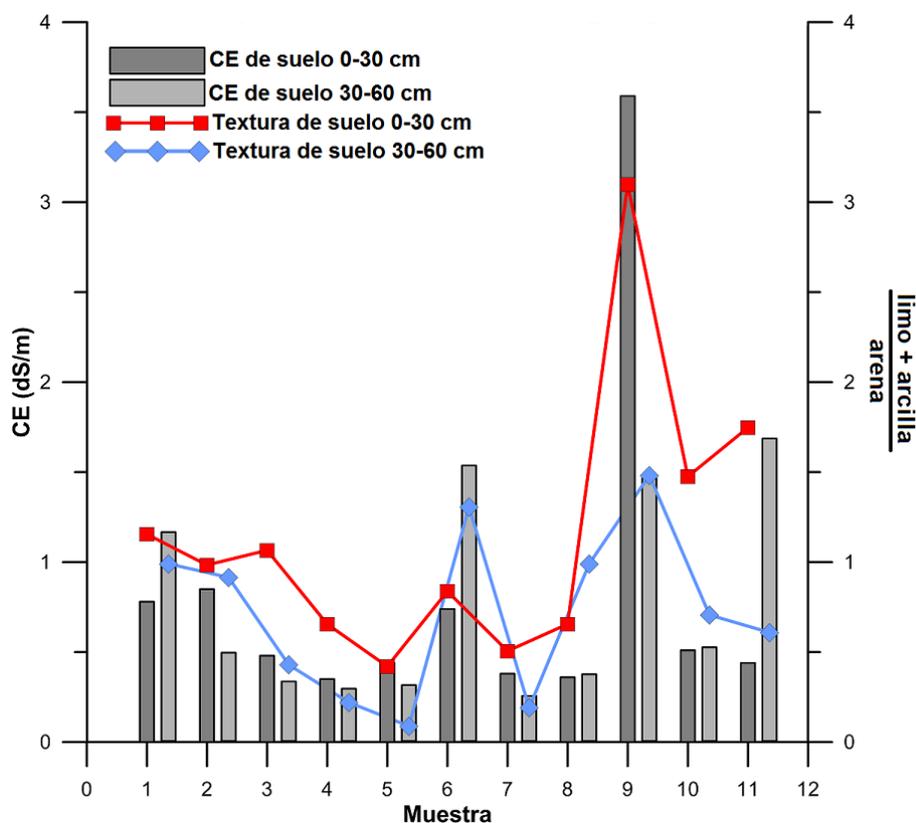


Figura 43. Relación entre la conductividad eléctrica del suelo y su textura.

Para el segundo muestreo la conductividad eléctrica varió entre 0.1 y 10.3 dS/m, con un valor promedio de 0.7 dS/m. Estos valores de CE se determinaron en el extracto acuoso del suelo manteniendo una relación agua:suelo 1:1 ( $CE_{1:1}$ ), por lo tanto; para hacer la clasificación de la salinidad se debe tener en cuenta la textura (Dahnke y Whitney ,1988; Liebig *et al.*, 2004). En la Tabla 13 se tiene la clasificación de la salinidad de acuerdo con la  $CE_{1:1}$  y la textura según Dahnke y Whitney (1988), por lo tanto; el 93% de las muestras son no-salinas, mientras que sólo cinco muestras muestran algún grado de salinidad y se presentan en la Tabla 14. Esto significa que la mayor parte del suelo de la zona de estudio no está afectado por la salinización, y el problema se restringe a una zona específica cercana al río Jofre, que es donde actualmente se observa la costra salina.

**Tabla 13. Clasificación de la salinidad del suelo, considerando  $CE_{1:1}$  en extractos del suelo según Dahnke y Whitney (1988).**

Textura	No salino	Ligeramente salino	Moderadamente salino	Fuertemente salino	Muy fuertemente salino
	dS/m				
Arenoso y Arenoso franco	0-1.1	1.2-2.4	2.5-4.4	4.5-8.9	9.0+
Franco arenoso, Franco arcillo arenoso y Franco	0-1.2	1.3-2.4	2.5-4.7	4.8-9.4	9.5+
Limoso, Franco limoso y Franco arcilloso	0-1.3	1.4-2.5	2.6-5.0	5.1-10.0	10.1+
Franco arcillo limoso, Arcillo arenoso, Arcillo limoso y Arcilloso	0-1.4	1.5-2.8	2.9-5.7	5.8-11.4	11.5+

**Tabla 14. Resultados de las cinco muestras de suelo del segundo periodo que presentaron algún grado de salinidad.**

Muestra	Profundidad	Textura	Conductividad eléctrica (dS/m)	Clasificación
5	0-30 cm	Arenoso	1.3	Ligeramente salino
64	0-30 cm	Arenoso	1.2	Ligeramente salino
65	0-30 cm	Arcillo limoso	10.5	Fuertemente salino
66	0-30 cm	Limoso	4.7	Moderadamente salino
66b	30-60 cm	Arcillo arenoso	2.1	Ligeramente salino

En la Figura 44 se presenta un mapa de interpolación en donde se ve la variación espacial de la salinidad de las muestras de suelo del segundo muestreo y se tiene la localización de las muestras que presentan algún grado de salinización (Tabla 13). Se puede ver que existe una zona cerca del río Jofre donde se concentran las muestras salinas y que coincide con los resultados del primer muestreo.

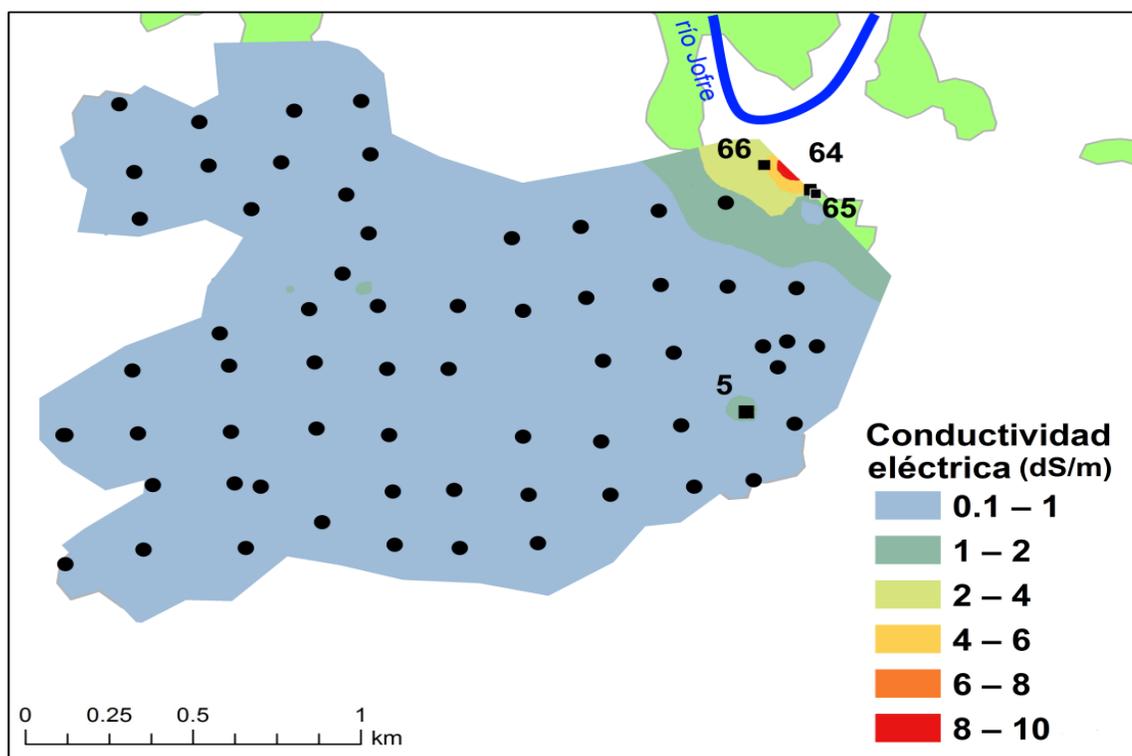


Figura 44. Mapa de interpolación de la  $CE_{1:1}$  de las muestras de suelo del segundo periodo de muestreo. Los cuadros corresponden a las muestras que presentan algún grado de salinidad, y los círculos las muestras no salinas.

En la Figura 45 se compara la  $CE_{1:1}$  con la textura del suelo, según la relación limo+arcilla/arena (marcada como isolíneas), y la profundidad del nivel freático en donde se tomaron las muestras de agua. Se puede ver que existen tres zonas en donde la textura del suelo es más fina pero la  $CE_{1:1}$  es baja, por lo que estas dos variables no están correlacionadas más que en la zona donde se identificaron los suelos salinos, en donde se tienen texturas finas y además un nivel freático somero (0.4 m). Esto indica que para que ocurra la salinización del suelo se requiere de la conjunción de suelos finos y un nivel freático somero. Como puede verse en la otra zona donde se presenta suelo fino, el nivel freático se encuentra a mayor profundidad (2.0 m) y la  $CE_{1:1}$  es baja (<1 dS/m); mientras que en la parte sur se encuentra una zona con niveles freáticos someros (0.3 – 0.7 m) pero una textura más gruesa, por lo tanto; aquí tampoco se tiene salinización del suelo.

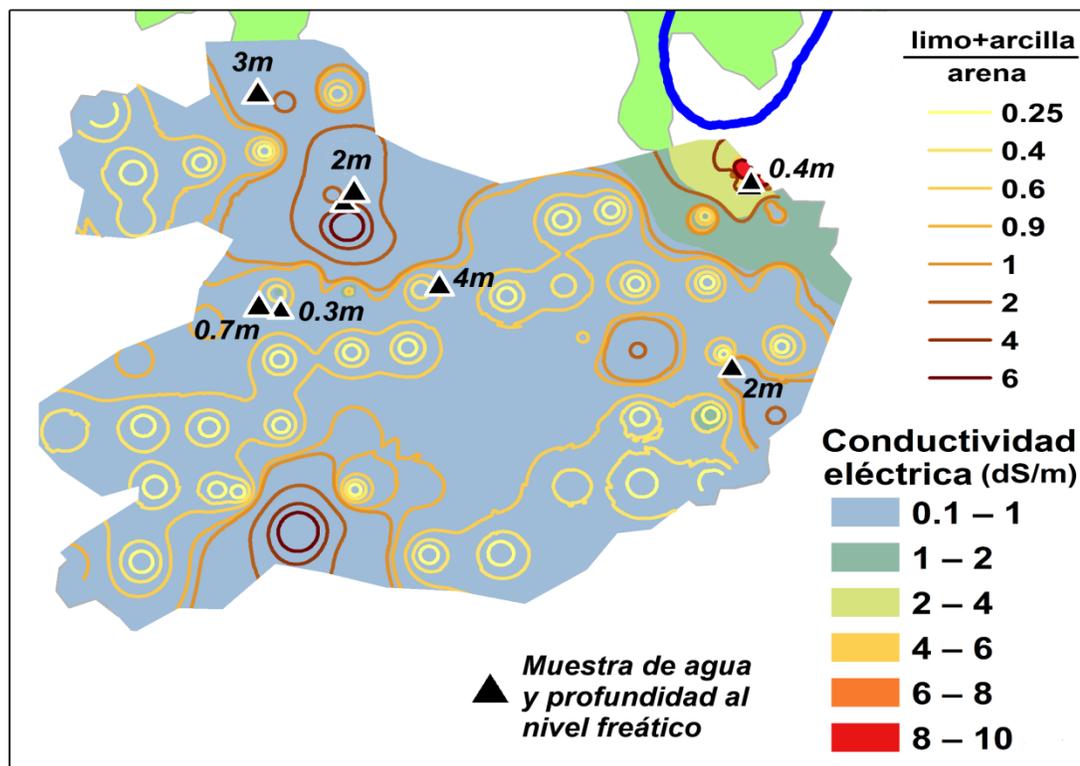


Figura 45. Relación entre la interpolación de  $CE_{1:1}$ , la relación de finos/arena del suelo (isolíneas) y el nivel freático medido en donde se tomaron las muestras de agua (triángulos).

### 6.2.1 Sodicidad del suelo

La relación de absorción de sodio (RAS) de las muestras de suelo del primer periodo varió entre 1.3 y 43 con valor promedio de 6.1. De las 22 muestras, 20 poseen RAS entre 1.3 y 8.57 por lo tanto; se trata de suelos no sódicos (Davis *et al*, 2012). Sólo dos muestras se clasifican como sódicas que son la 9 y la 9b con valores RAS de 43 y 22.4 respectivamente. Estas muestras son también las de mayor salinidad y se puede apreciar como la CE y la RAS están relacionadas, ya que al aumentar la CE, el RAS también aumenta, y viceversa (Fig. 46a). Esto es debido a que el sodio fue el catión dominante en los extractos acuosos del suelo en ambos periodos. La textura del suelo también está relacionada con la RAS, si la relación: limo+arcilla/arena aumenta (mayor cantidad de finos), la RAS también

muestra un aumento (Fig. 46b). Esto se debe a que mientras más arcillas estén presentes, el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) será mayor debido al incremento de los sitios donde el sodio puede ser intercambiado (Davis *et al*, 2012), ya que el PSI y la RAS poseen una correlación lineal (Chi *et al*, 2011).

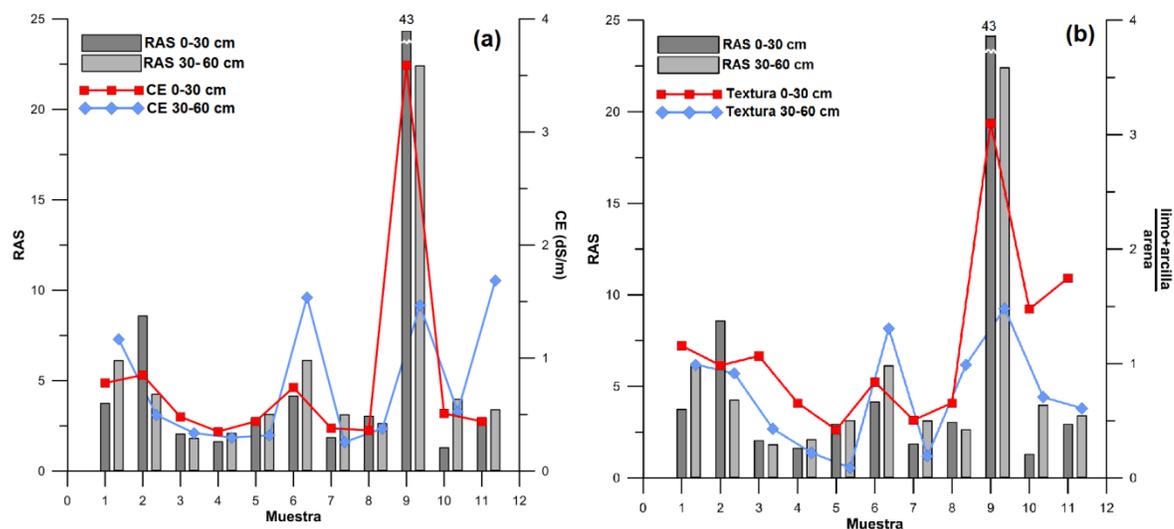


Figura 46. Relaciones entre la conductividad eléctrica y la relación de absorción de sodio (RAS) (a) y entre el factor limo+arcilla/arena y la relación de absorción de sodio (RAS) (b).

Para el segundo muestreo se hizo un mapa de interpolación de pH en el extracto del suelo para ver la distribución espacial de la sodicidad (Fig. 47), ya que un suelo con pH mayor o igual a 8.5 típicamente indica algún problema en el contenido de sodio (Davis *et al*, 2012). Del mapa se aprecia que existen tres zonas con valores altos de pH. La RAS de las muestras selectas (muestras con  $\text{pH} > 8.5$ ) varió de 0.13 a 119.20 con promedio de 15.36. De las 22 muestras selectas 17 resultaron no sódicas con RAS de 0.13-8.12. Estas muestras corresponden a las dos zonas de pH alto de la izquierda. Las cinco muestras restantes son las que resultaron ser sódicas con RAS de 15.29, 16.22, 22.86, 118.46 y 119.20, que corresponden a las muestras 65b, 66b, 64, 65 y 66 respectivamente. Estas muestras se encuentran en la zona cerca del río Jofre donde se han descrito los valores de salinidad altos.

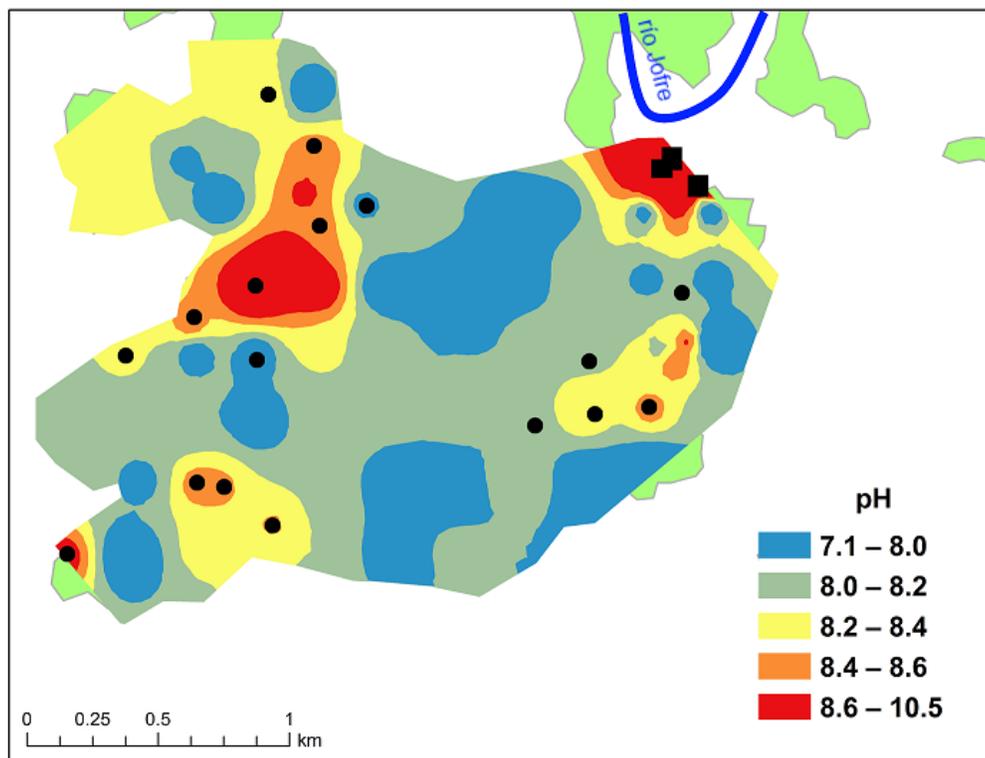
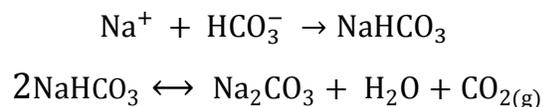


Figura 47. Mapa de interpolación del potencial hidrógeno de extractos de las muestras de suelo del segundo periodo. Los cuadros corresponden a las muestras sódicas y los círculos las no sódicas.

### 6.3 Sales

La zona donde se observaron los precipitados en la superficie del suelo es cerca del río Jofre, precisamente donde se encuentra la muestra de agua 15 que es la que tiene mayor salinidad junto con las muestras de suelos salinos y sódicos. Los análisis de difracción de rayos X permitieron la caracterización de la sal que causa el deterioro del suelo y por consiguiente, el de los cultivos. Para todos los casos se encontró que se trata de natrita, que es carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Esta sal se forma debido a la evaporación de las aguas que en su mayoría son de tipo  $\text{NaHCO}_3$ . En la zona donde se presenta la salinidad, existen suelos muy finos y un nivel freático somero. En estos escenarios, el agua sube a la superficie debido al efecto de la capilaridad y ya que el  $\text{NaHCO}_3$  es muy soluble se desplaza junto con

el agua, el agua entonces es evaporada precipitando los iones disueltos que contenía. La evaporación provoca que los iones se concentren y lleguen a la saturación. El  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^+$  reaccionan para formar  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$  que se precipitan, si queda  $\text{HCO}_3^-$  y/o  $\text{CO}_3^{2-}$  reaccionan con el  $\text{Na}^+$  formando  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (Porta *et al*, 2003):



La hidrólisis del  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  es el origen de los valores de pH tan elevados:



La diferencia de coloración en las sales que se observa *in situ* se debe al diferente grado de cristalización de la natrita. Cuando está mejor cristalizada, la muestra es de color blanco, mientras que las sales más oscuras se deben a una menor cristalización, como se logró ver en las micrografías realizadas con el microscopio electrónico de barrido.

## Capítulo 7. Conclusiones

---

En Tierra Nueva, San Luis Potosí, el agua está controlada únicamente por la temperatura ambiente, y por lo tanto; se trata de agua subterránea que circula a poca profundidad. Los valores de pH del agua se encontraron en el rango normal en la mayoría de los casos, y solo dos muestras presentaron valores más altos. Los valores de oxígeno disuelto medido en las muestras de agua indicaron que se trata de aguas oxigenadas.

La salinidad del agua fue determinada a partir de las concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT). Los valores de SDT se encontraron en el rango de aguas dulces para la mayoría de las muestras de agua, y sólo una presentó concentración de SDT en el rango de salobre.

El análisis hidrogeoquímico del área de estudio reveló que el agua subterránea es de tipo Na-HCO<sub>3</sub>, Na-Ca-HCO<sub>3</sub> y Ca-HCO<sub>3</sub> en ese orden de abundancia. Las concentraciones de los cationes y aniones mayores siguen el orden: Na > Ca > Mg > K y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Cl > SO<sub>4</sub>. Los elementos alcalinos (Na y K) exceden a los elementos alcalinotérreos (Ca y Mg) y el HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> excede a los otros aniones. Los iones alcalinos y en especial el sodio junto con el ion bicarbonato son los principales responsables de la salinidad del agua, siendo los sólidos disueltos totales en la mayoría de las muestras menores a 1000 mg/L. Los diferentes diagramas usados para la clasificación del agua y el uso de distintas relaciones entre los cationes y aniones permitieron determinar que ocurren los siguientes procesos hidrogeoquímicos: la disolución de calcita, el intercambio iónico y la disolución de minerales sódicos. Ya que, mediante el estudio petrográfico de muestras de roca, se encontró que las rocas volcánicas de la zona están compuestas de minerales ricos en sodio.

La salinidad y sodicidad del suelo fueron analizadas mediante la conductividad eléctrica (CE) del extracto acuoso y con la relación de absorción de sodio (RAS).

Del primer periodo de muestreo se encontró que todas las muestras son no salinas y sólo dos son sódicas. Mientras que para el segundo, de las 70 muestras que se procesaron, sólo cinco presentaron algún grado de salinidad y sodicidad, por lo tanto, se trata de suelos salinos-sódicos. Éstas muestras se encuentran restringidas en una zona cercana al río Jofre en donde también se encontró que el agua es salobre. Allí mismo se presentó un nivel freático somero (0.4 m) y se localizan también los suelos más finos, lo que provoca el ascenso del agua debido al efecto de capilaridad, que posteriormente deja precipitadas las sales disueltas al evaporarse, causando la salinización del suelo. Las condiciones de baja precipitación anual permiten la acumulación progresiva de estas sales.

Los análisis de difracción de rayos X permitieron determinar que las sales que se encuentran precipitadas en la zona salina, corresponden a la natrita, cuya fórmula química es  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , por lo tanto, se trata de carbonato de sodio, lo cual corresponde con la composición general del agua subterránea de la zona.

## Recomendaciones

---

Se recomienda, ampliar la investigación hacia las otras zonas de cultivo que no se desarrollaron en este estudio, y que se encuentren sobre dacita; para comprobar si en estas zonas también existe el problema de salinización y/o sodificación. Así mismo, estudiar y caracterizar las zonas de cultivo que se desarrollen sobre riolita, para poder comparar ambas zonas y definir en qué lugar se podría desarrollar mejor la agricultura.

Utilizar en mayor proporción el agua de la presa La Muñeca ya que posee la menor cantidad de sólidos disueltos totales y cantidades similares de iones de calcio y sodio. En contraste, el agua subterránea posee valores de sodio en mayor proporción que el calcio aumentando así el riesgo de sodificación del suelo.

Debido a la baja precipitación pluvial que ocurre en esta zona, es posible que el agua de la presa no sea suficiente para abastecer la zona agrícola durante todo el año; debido que el tipo de riego que se usa actualmente es de inundación. Si se mejoran las técnicas de riego optimizando el uso del agua, será posible que el agua de la presa La Muñeca, sea suficiente para abastecer la zona agrícola todo el año.

Otra sugerencia es darle un tratamiento previo al agua usada para riego ya sea agregando yeso agrícola, o bien, mezclándola con agua de lluvia o de la presa para así equilibrar la proporción de calcio y sodio.

Finalmente, un estudio agronómico detallado, en especial en las zonas el pH de los suelos mayor a 8.5, servirá para definir la extensión de los suelos sódicos y comprobar si el sodio es el causante del bajo rendimiento en las cosechas.

## Referencias bibliográficas

---

- Abrol, I.P., Yadav, J.S.P y Massoud, F. (1988). *Salt affected soils and their management*. FAO, Soils Bulletin 39, 131 p.
- Aceves, N. E. (1979). *Los terrenos ensalitrados y métodos para su recuperación*. Universidad Autónoma de Chapingo, pp. 45-80.
- Aceves, N. L. A. (1985). *Salinity problem in food production of the mexican irrigation districts*. In water and water policy in world food supplies. Texas A & M University, pp. 129-133.
- Aguirre, G. A. (1993). *Química de los suelos salinos y sódicos*. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México, 289 p.
- Appelo, C. A. J., y Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC Press, 668 p.
- Aragües, R. y Cerdá, A. (1998). Salinidad de aguas y suelos en la agricultura de regadío. En Jiménez, R. y Lamo de Espinosa, J. (Ed): *Agricultura sostenible*. Agrofuturo, Life y Mundi-Prensa, pp. 249-274.
- Aragüés, R., Urdanoz, V., Çetin, M., Kirda, C., Daghari, H., Ltifi, W., et al. (2011). *Soil salinity related to physical soil characteristics and irrigation management in four mediterranean irrigation districts*. *Agricultural Water Management*, 98(6):959-966.
- Atkinson S.F., Miller G.D., Curry D.S. y Lee, S.B. (1986). *Salt water Intrusion: Status and Potential in the Contiguous*. Lewis Publishers, 390 p.
- Ayers, R. S. y Wescott, D. W. (1985). *Calidad del agua para la agricultura*. FAO, Estudios de riego y drenaje, 29:121 p.
- Bethke, C. (1996). *Geochemical reaction modeling concepts and and applications*. Oxford University Press, 397 p.
- Carter, M. R. y Grogorich, E. G. (2006). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC Press, 198 p.
- Carruthers, I. (1985). *Como cuidar la inversión en riego, el factor drenaje*. *Revista Ceres*, 18(4):15-21.

- Cates, D., Knox, R. y Sabatini, D. (1996). *The impact of ion exchange processes on subsurface brine transport as observed on Piper diagrams*. *Ground Water*, 34 (3):532-544.
- Çetindag, B. y Okan, Ö. (2004). *Hydrochemical characteristics and pollution potential of Uluova aquifers, Elazığ, Turkey*. *Environmental Geology*, 45:796-807.
- Chae, G. T., Yun, S. T., Kim, K., y Mayer, B. (2006). *Hydrogeochemistry of sodium-bicarbonate type bedrock groundwater in the Pocheon spa area, South Korea: water-rock interaction and hydrologic mixing*. *Journal of Hydrology*, 321(1-4):326-343.
- Chesworth, W. (2008). *Encyclopedia of Soil Science*. Springer, 902 p.
- Chi, C. M., Zhao, C. W., Sun, X. J. y Wang, Z. C. (2011). *Estimating exchangeable sodium percentage from sodium adsorption ratio of salt-affected soil in the Songnen Plain of Northeast China*. *Pedosphere*, 21(2):271-276.
- Clarke, F. W. (1908). *Data of geochemistry*. Government Printing Office, 716 p.
- Clesceri, L., Greenberg, A. y Eaton, A. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, 1183 p.
- Conacher, A. J. (1990). *Salt of the earth. Secondary soil salinization in the Austration wheat bilt*. *Environment*, 32(6):9-42.
- Cosgrove, C. E. y Cosgrove, W. J. (2012). *The Dynamics of Global Water Futures Driving Forces 2011-2050*. Report on the findings of Phase One of the UNESCO-WWAP Water Scenarios Project to 2050. UNESCO, 100 p.
- Custodio, E. y Llamas, R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Omega, 1224 p.
- Dahnke, W., y Whitney, D., (1988). Measurement of Soil Salinity. En W.C. Dahnke (Ed.) *Recommended chemical soil test procedures for the North Central Region*. North Central Regional Research Publication, 22:32-34.
- Davis, J. G., Waskom, R. M., y Bauder, T. A. (2012). *Managing sodic soils*. Crop Series, Fact Sheet No. 0.504. Colorado State University. Recuperado de <http://www.ext.colostate.edu/pubs/crops/00504.pdf>
- DePablo, A. (1996). *Ingeniería Ambiental: Contaminación y Soluciones*. Alfaomega, 139 p.

- Drever, J.I. (1997). *The geochemistry of natural waters, surface and groundwater environments*. Prentice Hall, 436 p.
- Environmental Protection Agency. (2012). *CADDIS: Sources, Stressors & Responses*. Recuperado de [http://www.epa.gov/caddis/ssr\\_do\\_wtl.html#area](http://www.epa.gov/caddis/ssr_do_wtl.html#area)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2001). *Lecture notes on the major soils of the world*. World Soil Resources Reports, 94:307 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2005). *20 things to know about the impact of salt water on agricultural land in Aceh province*. Recuperado de <http://www.fao.org/ag/tsunami/docs/saltwater-guide.pdf>
- Galindo, E. M. (2006). *Caracterización geoquímica del agua subterránea en la zona este de Gran Canaria*. Instituto Geológico y Minero de España, 9 p. Recuperado de <http://www.ingenierosdeminas.org/documentos/08-Hidrogeoquimica-5.pdf>
- Gartley, K. (2011). Recommended Soluble Salts Tests. En *Recommended Soil Testing Procedures for the Northeastern United States*. University of Delaware, pp. 87-94.
- Gee, G. W. y Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. En Klute, A (Ed) *Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods*. Soil Science Society of America, Book Series 5:383-411.
- Gibbs, R. J. (1970). *Mechanism controlling world water chemistry*. Science, 170:1088–1090
- Gómez, O. D. (2004). *Recuperación de espacios degradados*. Mundi-Prensa, 583 p.
- Haub, Carl. (2002). *How Many People Have Ever Lived on Earth?*, Population Reference Bureau, 4 p. Recuperado de <http://www.unc.edu/~pnc/pop/HowManyPeopleHaveEverLived.pdf>
- Hem, J.D. (1992). *Study and interpretation of chemical characteristics of natural water*. U.S. Geological Survey Water-Supply, 2254:263 p.
- Hinrichsen, D., Robey, B. and Upadhyay, U.D. (1998). *Solutions for a water-short world*. Johns Hopkins School of Public Health, 26(1):31 p.
- Horne, A. J., y Goldman, C. R. (1994). *Limnology*. McGraw-Hill, 576 p.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI, (2010). *Censo de Población y Vivienda*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/>
- Jalali, M. (2007). *Salinization of groundwater in arid and semi-arid zones: an example from Tajarak, Western Iran*. *Environmental Geology*, 52:1139-1149.
- Jenny, H. (1994). *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology*. Dover Publications, 271 p.
- Karmegam, U., Chidambaram, S., Prasanna, M. V., Sasidhar, P., Manikandan, S., Johnsonbabu, G., et al. (2011). *A study on the mixing proportion in groundwater samples by using piper diagram and phreeqc model*. *Chinese Journal of Geochemistry*, 30(4):490-495.
- Kovda, V. A., Berg, C. V. y Hagan, R. M. (1967). *International source-book on irrigation and drainage of arid lands in relation to salinity and alkalinity*. FAO-UNESCO, 663 p.
- Le Maitre, R.W. (2002). *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge University Press, 236 p.
- Liebig, M. A., Tanaka, D. L. y Wienhold, B. D. (2004). *Tillage and cropping effects on soil quality indicators in the northern Great Plains*. *Soil and Tillage Research*, 78:131-141.
- Lillo, J. (2009). *Técnicas Hidrogeoquímicas*. Tesis de maestría. Universidad Rey Juan Carlos. Madrid, España, 140 p.
- Lindberg, R. D. y Runells, D. D. (1984). *Ground water redox reactions: An Analysis of Equilibrium State Applied to Eh Measurements and Geochemical Modeling*. *Science*, 225(4665):925-927.
- Lloyd, J.W., y Heathcote, J.A. (1985). *Natural inorganic hydrochemistry in relation to ground water*. Claredon Press, 296 p.
- Morris, J. C. y Stumm, W. (1967). Redox equilibria and measurements of potentials in the aquatic environment. En *Advances in chemistry*. American Chemical Society, 67:270-285.
- Nagaraju, A., Suresh, S., Killham, K. y Hudson-Edwards, K. (2006). *Hydrogeochemistry of Waters of Mangampeta Barite Mining Area, Cuddapah Basin, Andhra Pradesh, India*. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 30:203-219.

- Nosetto, M. D., Acosta, A. M., Jayawickreme, D. H., Ballesteros, S. I., Jackson, R. B., y Jobbágy, E. G. (2013). *Land-use and topography shape soil and groundwater salinity in central Argentina*. *Agricultural Water Management*, 129:120-129
- Ortega, E. (1981). *Química de suelos*. Universidad Autónoma de Chapingo, 417 p.
- Patchampreecha, P., Topark, B., Goto, I., y Kimura, M. (1989). *Studies on saline soils in Khon Kaen Region Northeast Thailand*. *Soil Science and Plant Nutrition*, 35(2):171-179.
- Peinemann, N., Zorita, M., Villamil, M.B., Lusarreta, H. y Grunewald, D. (1998). *Consecuencias del riego complementario sobre propiedades edáficas en la Llanura Pampeana*. *Ciencia del Suelo*, 16(1):39-42.
- Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., Newton, M., Wolfe, B., Karabinakis, E., Clark, S., Poon, E., Abbet E. y Nandagopal, S. (2004). *Water Resources, Agriculture and the Environment*. College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University, Report 04:47 p.
- Pizarro, F. (1985). *Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos*. Editorial Agrícola Española, 542 p.
- Poljakooff, A. y Gale, J. (1988). *Plants in saline environments*. Springer, 213 p.
- Porta, J., Lopez, M., y Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa, 929 p.
- Redly, M. (1986). *Métodos para la determinación de la concentración total y la composición iónica de las sales solubles de los suelos*. *Ciencias de la Agricultura*, 26:114-131.
- Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. United States Department of Agriculture, *Agriculture handbook* 60:172 p.
- Rhodes, J. D., Bingham, F. T., Letey, J., Hoffman, G. J. Dedrick, A. P., Pinter, P. J., y Replogle, J. A. (1990). *Use of saline drainage water for irrigation: Imperial Valley Study*. *Agricultural Water Management*, 16:25-36.
- Rosas, A. C. (2014). *Caracterización geoelectrica de la cuenca hidrológica de Tierra Nueva, S. L. P.* Tesis de licenciatura. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México, 59 p.

- Schoeller, H. (1965). Qualitative Evaluation of Groundwater Resources. En: *Methods and Techniques of Groundwater Investigation and Development*. UNESCO, Water Resources Series 33:44-52.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2005). *Estadísticas climatológicas básicas del estado de San Luis Potosí*, Libro Técnico 2:328 p.
- Secretaría de Economía. Servicio Geológico Mexicano (1999). *Carta geológico-minera Tierra Nueva F14-C25*.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua (2008). *Programa Nacional Hídrico 2007-2012*, 158 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua (2013). *Ley Federal de Derechos. Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales*, 102 p.
- Selim, T., Berndtsson, R., Persson, M., Somaida, M., El-Kiki, M., Hamed, et al. (2012). *Influence of geometric design of alternate partial root-zone subsurface drip irrigation with brackish water on soil moisture and salinity distribution*. *Agricultural Water Management*, 103:182-190
- Sherard, L., Dunnigan, P., y Decker, S. (1976). *Identification and nature of dispersive soils*. *Journal of Geotechnical Engineering*, 102:287-301.
- Shiklomanov, I. (1993). World fresh water resources. En Peter H. Gleick (ed). *Water in crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. Oxford University Press, 25 p.
- Silvertooth, J. C. (2001). *Saline and sodic soil identification and cotton management*. University of Arizona, Publication az1199:2 p. Recuperado de <http://cals.arizona.edu/pubs/crops/az1199.pdf>
- Smith, J., Van Ness, H. y Abbott, M. (1997). *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. McGrawHill/Interamericana, 845 p.
- U.S. Department of Agriculture. Soil Survey Division Staff (1993). *Soil Survey Manual*. *Agricultural handbook* 18:315 p.
- Stimson, J., Frape, S., Drimmie, R., y Rudolph, D. (2001). *Isotopic and geochemical evidence of regional-scale anisotropy and interconnectivity of an alluvial fan system, Cochabamba Valley, Bolivia*. *Applied Geochemistry*, 16(10):1097-1114.

- Suarez, D. L. (1989). *Impact of agricultural practices on groundwater salinity*. Outlook on Agriculture, 21(4):287-291.
- Szabolcs, I. (1987). *The global problem of salt-affected soils*. Acta Agronomica Hungarica, 36:159-172.
- Szabolcs, I. (1989). *Salt-affected soils*. CRC Press, 274 p.
- Tanji, K. K. (1996). *Agricultural Salinity Assessment and Management*. American Society of Civil Engineers, 619 p.
- Thien, S. J. (1979). *A flow diagram for teaching texture-by-feel analysis*. Journal of Agronomic Education, 8:54-55.
- Thomas, D.S.G. y Middleton, N.J. (1993). *Salinisation: new perspectives on a major desertification issue*. Journal of Arid Environments, 24(1):95-105.
- Tostado, M. M. (2010). *Desarrollo hidrogeoquímico de la cuenca San Miguel, Baja California*. Tesis de Maestría. CICESE, Ensenada, México, 99 p.
- Tristán, M. G. (1987). *Cartografía geológica "Hoja Tierra Nueva", S. L. P. escala 1:50000*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Folleto Técnico 109.
- Wedepohl, K. H. (1969). *Handbook of geochemistry*. Springer, 442 p.
- Wetzel, R. G. (1983). *Limnology*. Saunders College Publishing. 760 p.
- Williams, D.W. (1999). *Salinisation: A major threat to water resources in the arid y semi-arid regions of the world*. Lakes and Reservoirs: Research and Management, 4(3):85-91.
- World Bank (2008). *Agriculture for development*. World Development Report 2008, 386 p. Recuperado de [http://siteresources.worldbank.org/INTWDR2008/Resources/WDR\\_00\\_book.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTWDR2008/Resources/WDR_00_book.pdf)
- Xing, L., Guo, H., y Zhan, Y. (2013). *Groundwater hydrochemical characteristics and processes along flow paths in the North China Plain*. Journal of Asian Earth Sciences, 71:250-264.

## Anexo

**Tabla A.1. Número de identificación, lugar donde se tomó, periodo en que se realizó, tipo de aprovechamiento, uso del agua y profundidad del nivel freático de las muestras de la primera y segunda campaña. PM=primer muestreo; SM=Segundo muestreo y NF=profundidad al nivel freático.**

Muestra	Lugar	PM	SM	Tipo	Uso	NF (m)
1	Rancho el Portón	Sí	Sí	Noria	Agrícola	2.0
2	Rancho el Patol	Sí	Sí	Noria	Agrícola	2.0
3	Rancho el Patol	Sí	Sí	Pozo	Agrícola	nd
4	Los Granjenos	Sí	No	Manantial	Sin uso	na
5	Los Granjenos	Sí	Sí	Noria	Agrícola	8.0
6	Rancho La Norita	Sí	No	Pozo	Agrícola	nd
7	Rancho La Norita	Sí	Sí	Noria	Agrícola	3.0
8	El Patol	Sí	Sí	Noria	Agrícola	1.0
9	El Patol	Sí	No	Pozo	Agrícola	nd
10	Hacienda Vieja	Sí	Sí	Noria	Agrícola	6.0
11	Hacienda Vieja	Sí	Sí	Manantial	Sin uso	na
12	Rancho los Arroyos	Sí	No	Noria	Agrícola	5.0
13	Las Tapias	Sí	Sí	Galería	Sin uso	1.5
14	Estanque 1	Sí	Sí	Noria	Agrícola	0.4
15	Estanque 2	Sí	Sí	Noria	Sin uso	0.5
16	Rancho El Patol	Sí	No	Noria	Agrícola	0.3
17	Rancho El Patol	Sí	Sí	Noria	Agrícola	3.0
18	Barrio Los Nogales	Sí	Sí	Noria	Doméstico	6.0
19	Barrio del Santuario	Sí	Sí	Noria	Doméstico	5.9
20	Calle Corregidora	Sí	Sí	Noria	Doméstico	5.3
21	Avenida Hidalgo	Sí	Sí	Noria	Doméstico	5.6
22	Presa La Muñeca	Sí	Sí	Presa	Agrícola	na
23	La Norita	No	Sí	Noria	Agrícola	4.5
24	Salitre Grande	No	Sí	Noria	Agrícola	1.0

na = no aplica (superficial); nd = no determinado.

**Tabla A.2. Número de identificación, coordenadas y profundidad a la que se tomaron las muestras de suelo del primer muestreo.**

<b>Muestra</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Prof.</b>	<b>Muestra</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Prof.</b>
1	331836	2400345	1751	0-30	6b	328978	2400567	1757	30-60
1b	331836	2400345	1751	30-60	7	332571	2399358	1759	0-30
2	332040	2400480	1755	0-30	7b	332571	2399358	1759	30-60
2b	332040	2400480	1755	30-60	8	332645	2399383	1752	0-30
3	328839	2402315	1746	0-30	8b	332645	2399383	1752	30-60
3b	328839	2402315	1746	30-60	9	332938	2399812	1745	0-30
4	328800	2402392	1745	0-30	9b	332938	2399812	1745	30-60
4b	328800	2402392	1745	30-60	10	332955	2399676	1753	0-30
5	329040	2400604	1750	0-30	10b	332955	2399676	1753	30-60
5b	329040	2400604	1750	30-60	11	326679	2400210	1771	0-30
6	328978	2400567	1757	0-30	11b	326679	2400210	1771	30-60

**Tabla A.3. Número de identificación, coordenadas y profundidad a la que se tomaron las muestras de suelo del segundo muestreo.**

<b>Muestra</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Prof.</b>	<b>Muestra</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>Prof.</b>
1	332703	2399330	1754	0-30	39	332012	2400389	1740	0-30
2	332828	2399487	1748	0-30	40	332136	2400546	1740	0-30
3	332952	2399643	1741	0-30	41	332245	2400709	1745	0-30
4	332298	2399141	1755	0-30	42	331315	2399770	1755	0-30
5	332422	2399298	1752	0-30	42b	331315	2399770	1755	30-60
6	332566	2399414	1748	0-30	43	331263	2399966	1751	0-30
7	332671	2399611	1745	0-30	44	331482	2400044	1747	0-30
8	332795	2399768	1741	0-30	45	331607	2400200	1744	0-30
10	332141	2399265	1757	0-30	46	331731	2400357	1743	0-30
11	332266	2399422	1754	0-30	47	331831	2400625	1744	0-30
12	332390	2399579	1751	0-30	48	331980	2400708	1742	0-30
13	332514	2399735	1746	0-30	49	332116	2400785	1737	0-30
14	332605	2399950	1744	0-30	50	331103	2399861	1754	0-30
16	331985	2399390	1761	0-30	51	331221	2400009	1749	0-30
17	332069	2399523	1761	0-30	52	331326	2400168	1749	0-30
18	332299	2399706	1748	0-30	53	331469	2400323	1747	0-30
19	332358	2399860	1749	0-30	54	331515	2400398	1749	0-30
20	332482	2400016	1745	0-30	55	331823	2400795	1742	0-30
21	331704	2399357	1759	0-30	56	330920	2399979	1757	0-30
22	331789	2399510	1759	0-30	57	331189	2400291	1752	0-30
23	331951	2399650	1764	0-30	58	331293	2400449	1755	0-30
25	332216	2399939	1747	0-30	59	331575	2400774	1750	0-30
26	332325	2400141	1745	0-30	60	331658	2400893	1751	0-30
27	331547	2399482	1756	0-30	61	330764	2400103	1761	0-30
28	331671	2399638	1752	0-30	62	331012	2400417	1758	0-30
30	331904	2399997	1750	0-30	64	332985	2399726	1739	0-30
31	332044	2400108	1745	0-30	65	332987	2399738	1739	0-30
32	332154	2400338	1744	0-30	65b	332987	2399738	1739	30-60

33	332279	2400407	1748	0-30	66	332952	2399810	1740	0-30
34	331390	2399606	1758	0-30	66b	332952	2399810	1740	30-60
35	331515	2399763	1751	0-30	67	331709	2401087	1755	0-30
36	331639	2399919	1748	0-30	68	331884	2400926	1746	0-30
37	331775	2400087	1747	0-30	69	331094	2400127	1756	0-30
38	331888	2400233	1743	0-30	70	332558	2399182	1753	0-30

---