

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**“CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DEL ACUÍFERO LOS JUNCOS  
UBICADO EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, MÉXICO”**

**POR:**

**ARQ. ROSA ISELA MARTÍNEZ GONZÁLEZ**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO**

**OCTUBRE DE 2019**



Caracterización hidrogeoquímica del acuífero Los Juncos ubicado en el estado de Chihuahua, México. Tesis presentada por Rosa Isela Martínez González como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, ha sido aprobada y aceptada por:

**M.I. Javier González Cantú**  
Director de la Facultad de Ingeniería

**Dr. Alejandro Villalobos Aragón**  
Secretario de Investigación y Posgrado

**M.I. Miguel Ángel González Núñez**  
Coordinador Académico

**María Socorro Espino Valdés**  
Directora de Tesis

**Septiembre de 2019**

Fecha

Comité:

**Dra. María Socorro Espino Valdés**  
**Dr. Adán Pinales Munguía**  
**Dra. Beatriz Adriana Rocha Gutiérrez**  
**Dr. Alejandro Villalobos Aragón**

© Derechos Reservados

**Rosa Isela Martínez González**  
Circuito No. 1, Campus  
Universitario II, Chihuahua,  
México.

Septiembre de 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
**CHIHUAHUA**

26 de septiembre de 2019

**ARQ. ROSA ISELA MARTÍNEZ GONZÁLEZ**  
Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dra. María Socorro Espino Valdés** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DEL ACUÍFERO LOS JUNCOS UBICADO EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, MÉXICO”**.

## **ÍNDICE**

### **Índice de contenido**

#### **Capítulo 1. Introducción**

- 1.1 Antecedentes
- 1.2 Hidrogeoquímica. Marco teórico
- 1.3 Justificación
- 1.4 Objetivos
- 1.4 Hipótesis

#### **Capítulo 2. Descripción del área de estudio**

- 2.1 Delimitación geográfica
- 2.2 Fisiografía
- 2.3 Hidrografía
- 2.4 Clima
- 2.5 Suelos
- 2.6 Vegetación. Uso de suelo
- 2.7 Geología del acuífero
- 2.8 Funcionamiento del acuífero

#### **Capítulo 3. Metodología**

- 3.1 Análisis de la información
- 3.2 Muestreo en campo
- 3.3 Análisis de muestras
- 3.4 Aplicación de técnicas hidrogeoquímicas
- 3.5 Integración de información para interpretación de resultados

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00  
[www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
CHIHUAHUA

#### Capítulo 4. Resultados y discusión

- 4.1 Balance hidrológico
- 4.2 Calidad del agua
- 4.3 Diagramas hidrogeoquímicos
- 4.4 Clasificación de las muestras por su composición. Familias de agua subterránea
- 4.5 Evaluación del agua para uso agrícola
- 4.6 Comparación de parámetros con la norma de calidad para agua potable
- 4.7 Flúor
- 4.8 Arsénico
- 4.9 Nitratos
- 4.10 Sólidos disueltos totales (SDT)
- 4.11 Planos de concentración de iones principales del acuífero los juncos
- 4.12 Evolución del agua subterránea

#### Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

- 5.1 Conclusiones
- 5.2 Recomendaciones

#### Lista de referencias

#### Anexos

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE  
*"Naturam subiecit aliis"*

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
U.A.CH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN  
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00  
[www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)

“Hemos empezado a progresar  
al descubrir el significado de la vida humana  
cuando plantamos árboles que dan sombra  
sabiendo que nunca nos sentaremos bajo ellos”.

*Elton Trueblood*

## **Dedicatoria**

*A mi esposo Juan Pablo Carrillo.; él es mi apoyo y mi compañero de vida, me impulsa a hacer las cosas hasta el final y no decaer cuando me desanimo.*

*A mis padres Herminio Martínez y Alicia González por haber sido mi mejor ejemplo y me motivan a dar lo mejor; les dedico el presente trabajo, que representa un paso importante y que tanto anhelaba alcanzar, todo lo hago por ellos.*

*A mis sobrinas Aylin y Regina, esperando que algún día lean este trabajo y se interesen por la ciencia y el conocimiento. Espero ser un ejemplo para ellas y que lleguen a ser grandes profesionistas.*

## **Agradecimientos**

*Agradezco a todos y cada uno de mis maestros por su conocimiento compartido, haciendo cada clase amigable, por haber confiado en mí. Especialmente a la Dra. María Socorro Espino Valdez le agradezco su paciencia y su tiempo y por transmitirme su conocimiento con tanto ahínco.*

*Gracias a mi esposo Juan Pablo por darme el espacio necesario para poder estudiar y concluir un escalón más.*

*Mención especial a los ingenieros Daniel Olguín, Oscar Uranga y C.P. Francisco Javier Alicano por su apoyo en el trabajo de campo recorriendo cada uno de los pozos de Los Juncos y a sendos propietarios que facilitaron la toma de muestras necesarias para este trabajo, sin su valiosísima colaboración no hubiese sido posible.*

*Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por sostener mis estudios durante 2 años, haciendo posible que yo pudiera realizar mi posgrado de tiempo completo.*

*Agradezco a la Universidad Autónoma de Chihuahua por darme la oportunidad de ser parte de esta casa de estudios, gracias al apoyo de la Mtra. Martha Calderón durante todo mi proceso de ingreso al programa y a todo el personal de la Universidad que con disposición atendieron toda solicitud de mi parte. A mis compañeros de clase agradezco que se tomaron el tiempo de explicarme los temas más difíciles para mí.*

## Resumen

La importancia de conocer la calidad del agua del acuífero Los Juncos radica en la grave situación que vive el estado de Chihuahua en cuanto a calidad y disponibilidad de aguas subterráneas. La caracterización hidrogeoquímica es el resultado de dicha investigación y del análisis de la información mediante una metodología de trabajo de campo y trabajo de gabinete. La caracterización hidrogeoquímica describe los fenómenos físicoquímicos que involucran la composición de las aguas naturales y su evolución. Se describe al acuífero de manera global en su funcionamiento hidrogeológico, considerando factores de tipo geológico, hidrogeológico, geomorfológico, climático y ambiental. Obteniendo dando como resultado un modelo conceptual que incluye la química del agua, parámetros físicos y puntos de concentración de salinidad. El área de estudio corresponde a un extenso valle que se desarrolla en un depósito sedimentario aluvial y conglomerático de mediana permeabilidad, intercalado con rocas volcánicas basálticas. Las rocas calcáreas y volcánicas antiguas de baja permeabilidad que subyacen al acuífero representan a profundidad el basamento del mismo. La mayor parte los afloramientos corresponden a roca riolítica y toba, así como algo de caliza al oeste de la zona. La metodología para el análisis químico de agua subterránea se dividió en trabajo de campo y trabajo de gabinete. Las visitas a campo y recorridos dentro de la zona de estudio comprendieron las siguientes acciones: reconocimiento de la zona, censo de aprovechamientos y mediciones de parámetros físicoquímicos. Luego de la selección de 27 pozos representativos del acuífero y recolección de las muestras, se evaluaron los siguientes iones: Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Sodio ( $\text{Na}^+$ ), Potasio ( $\text{K}^+$ ), Cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), que constituyen los iones mayores en el agua subterránea; además se analizaron los elementos menores Arsénico (As) y Fluoruro (F-). En cuanto a las actividades de gabinete se llevaron a cabo la recopilación y análisis de información existente, análisis de laboratorio, elaboración de gráficas, integración de resultados, mapas y base de datos para su visualización en ArcView, elaboración de informe y planos finales. De acuerdo con el análisis hidrogeoquímico, a través de diversos diagramas se observaron seis tipos de aguas predominantes en el área de estudio: Bicarbonatada Sódica (8%), Bicarbonatada-Sulfatada Sódica-cálcica (27%), Sulfatada-Bicarbonatada Sódica (15%), Sulfatada Sódica o Sódica-cálcica (23%), Sulfatada Cálcica-Sódica (23%) y Clorurada Sódica (4%). Entre los aspectos más relevantes, 23 de 27 muestras revelaron contener cantidades de flúor superiores a la Norma Mexicana de Agua Potable, encontrándose hasta 8.25 mg/l (LJ-21).



## Índice de Contenido

Dedicatoria.....	vi
Agradecimientos .....	vii
Resumen .....	viii
Índice de Tablas.....	xi
Índice de Figuras.....	xii
Capítulo 1. INTORDUCCION .....	1
1.1 ANTECEDENTES .....	5
1.2 HIDROGEOQUÍMICA. MARCO TEÓRICO.....	8
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	12
1.4 OBJETIVOS.....	12
1.4 HIPÓTESIS.....	13
Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	14
2.1 DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA.....	14
2.2 FISIOGRAFÍA .....	15
2.3 HIDROGRAFÍA .....	15
2.4 CLIMA.....	15
2.5 SUELOS.....	16
2.6 VEGETACIÓN. USO DE SUELO.....	19
2.7 GEOLOGÍA DEL ACUÍFERO .....	21
2.8 FUNCIONAMIENTO DEL ACUÍFERO.....	30
Capítulo 3. METODOLOGÍA.....	34
3.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	34
3.2 MUESTREO EN CAMPO .....	35
3.3 ANÁLISIS DE MUESTRAS.....	39
3.4 APLICACIÓN DE TÉCNICAS HIDROGEOQUÍMICAS .....	41
3.5 INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN PARA INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	45
Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	46
4.1 BALANCE HIDROLÓGICO.....	46
4.2 CALIDAD DEL AGUA.....	59



4.2.1	Características físicas.....	64
4.3	DIAGRAMAS HIDROGEOQUÍMICOS .....	66
4.3.1	Diagramas de Piper y Schöeller.....	66
4.3.2	Diagramas de Stiff.....	73
4.3.3	Diagramas Circulares.....	80
4.3.4	Diagramas de Collins.....	83
4.4	CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS POR SU COMPOSICIÓN. FAMILIAS DE AGUA SUBTERRÁNEA .....	86
4.5	EVALUACIÓN DEL AGUA PARA USO AGRÍCOLA.....	93
4.6	COMPARACIÓN DE PARÁMETROS CON LA NORMA DE CALIDAD PARA AGUA POTABLE .....	97
4.6.1	Dureza del agua subterránea.....	98
4.7	FLÚOR .....	100
4.7.1	Índice de Saturación del Flúor.....	101
4.8	ARSÉNICO.....	103
4.9	NITRATOS .....	104
4.10	SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT) .....	106
4.11	PLANOS DE CONCENTRACIÓN DE IONES PRINCIPALES DEL ACUÍFERO LOS JUNCOS.....	109
4.11.1	Sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ).....	109
4.11.2	Cloruros ( $\text{Cl}^-$ ).....	111
4.11.3	Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) .....	113
4.11.4	Sodio ( $\text{Na}^+$ ) .....	115
4.11.5	Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ).....	117
4.12	EVOLUCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	119
Capítulo 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		123
5.1	CONCLUSIONES .....	123
5.2	RECOMENDACIONES .....	125
Lista de referencias .....		126
Anexos .....		129



## Índice de Tablas

Tabla 1.- Acuíferos sin disponibilidad para nuevas concesiones. (DOF, 2018).....	1
Tabla 2.- Lista de principales poblados ubicados en el acuífero Los Juncos (Calendario agrícola 2018-2019).....	4
Tabla 3.- Volumen de riego requerido (CONAGUA, 2010).....	5
Tabla 4.- Unidades hidroestratigráficas del acuífero Los Juncos.....	29
Tabla 5.- Datos de estaciones climatológicas (1) (CONAGUA, 2019).....	48
Tabla 6.- Polígonos de Thiesen de las estaciones climatológicas del Acuífero Los Juncos.....	49
Tabla 7.- Cálculo de la Evapotranspiración anual para cada cultivo.....	52
Tabla 8.- Cálculo de volumen necesario de riego.....	53
Tabla 9.- Valores de K en función del tipo y uso del suelo (NOM-011-CONAGUA-2000).....	55
Tabla 10.- Calculo del Coeficiente de escurrimiento.....	56
Tabla 11.- Parámetros de campo y datos de los pozos muestreados en 2018.....	61
Tabla 12.- Concentraciones de iones principales (mg/l) en el agua subterránea. Muestreo 2018.....	62
Tabla 13.- Resumen de familias de agua subterránea en el acuífero Los Juncos.....	93
Tabla 14.- Clasificación de las aguas según el contenido de sales y el índice RAS.....	94
Tabla 15.- Clasificación del agua del acuífero Los Juncos de acuerdo al diagrama de Wilcox.....	96
Tabla 16.- Listado de parámetros limitados para agua potable considerados en este estudio.....	97
Tabla 17.- Pozos con características destacadas en el acuífero Los Juncos. 2018.....	98
Tabla 18.- Clasificación de las muestras de acuerdo a su Dureza Total.....	99



## Índice de Figuras

Figura 1.- Acuíferos sin disponibilidad para nuevas concesiones (Fuente: CONAGUA, 2018). .....	2
Figura 2.- Poblado El Oasis (Imagen Google Earth). .....	3
Figura 3.- Poblados en el acuífero (Fuente: Google Earth). .....	4
Figura 4.- Localización de pozos muestreados por “Calidad del Agua - JCAS”, años 2009 y 2011. ....	8
Figura 5.- Ubicación del acuífero Los Juncos en el estado de Chihuahua. ....	14
Figura 6.- Distribución de suelos en el acuífero Los Juncos (CONAGUA, 2010). ....	18
Figura 7.- Distribución de la Vegetación en el acuífero Los Juncos (CONAGUA, 2010). ....	19
Figura 8.- Vegetación típica en el acuífero Los Juncos (Fuente: Google earth). ....	20
Figura 9.- Evolución de las zonas de cultivo de los campos menonitas, años 1985 y 2018. (Imagen Google Earth).....	21
Figura 10.- Geología en el acuífero Los Juncos (CONAGUA, 2010).....	22
Figura 11.- Columna estratigráfica en el acuífero Los Juncos (CONAGUA, 2010).....	23
Figura 12.- Sección geológica en el acuífero Los Juncos (CONAGUA, 2010).....	30
Figura 13.- Sierras de la cuenca del acuífero los Juncos. ....	31
Figura 14.- Acuíferos adyacentes al Acuífero Los Juncos (CONAGUA, 2010).....	32
Figura 15.- Topografía en el Acuífero Los Juncos (CONAGUA, 2010). ....	32
Figura 16.- Mapa de curvas de nivel topográficas (CONAGUA, 2010). ....	33
Figura 17.- Equipo multiparamétrico marca HANNA y Figura 18 .- Sensores del equipo multiparamétrico HANNA. ....	37
Figura 19.- Vista del pozo LJ- 1 y Figura 20.- Vehículo proporcionado por la universidad. ....	38
Figura 21.- Medición de parámetros de campo del pozo LJ-16 y Figura 22.- Vista del pozo LJ-16. ....	38
Figura 23.- Recolección y medición en sitio de la muestra LJ-16 en la comunidad “Las Bombas”.....	38
Figura 24.- Equipo Cromatógrafo de Iones ICS 1100 marca DIONEX.....	39
Figura 25.- Análisis del arsénico: Equipo de Absorción Atómica (Facultad de Ciencias Químicas). ....	41
Figura 26.- Diagrama de Piper (Piper-Hill-Langelier, 1940). ....	42
Figura 27.- Simbología diagrama de Schöeller. ....	43
Figura 28.- Simbología del Diagrama de Collins. ....	44
Figura 29.- Simbología diagrama de Stiff (Desarrollado por H.A. Stiff, 1951). ....	44
Figura 30.- Simbología de Diagramas Circulares (Daves and De Wiest, 1966).....	45
Figura 31.- Área de balance hidrológico. ....	47
Figura 32.- Estaciones cercanas al acuífero Los Juncos. ....	50
Figura 33.- Entradas de agua subterránea y direcciones de flujo (CONAGUA, 2010).....	58
Figura 34.- Pozos muestreados en el año 2018.....	59
Figura 35.- Relación de la suma de aniones con la conductividad eléctrica / Sólidos Disueltos totales...63	
Figura 36.- Relación de la suma de cationes con la conductividad eléctrica /Sólidos Disueltos totales...63	
Figura 37.- Temperatura en muestreo de pozos, año 2018.....	64
Figura 38.- Conductividad eléctrica en muestreo de pozos, año 2018. ....	65
Figura 39.- Diagrama de Piper grupo 1. Familia Bicarbonatada Sódica. Pozos 2 y 14. ....	67



Figura 40.- Diagrama de Schöeller grupo 1. Familia Bicarbonatada Sódica. Pozos 2 y 14.....	67
Figura 41.- Diagrama de Piper grupo 2. Familia Bicarbonatada–Sulfatada Sódica–Cálcica. Pozos 1, 3, 4, 6, 8, 9,18 y 27. ....	68
Figura 42.- Diagrama de Schöeller grupo 2. Familia Bicarbonatada–Sulfatada Sódica–Cálcica. Pozos 1, 3, 4, 6, 8, 9,18 y 27. ....	68
Figura 43.- Diagrama de Piper grupo 3. Familia Sulfatada-Bicarbonatada Sódica. Pozos 5, 13 y 26. ....	69
Figura 44.- Diagrama de Schöeller grupo 3. Familia Sulfatada-Bicarbonatada Sódica. Pozos 5, 13 y 26. ....	69
Figura 45.- Diagrama de Piper grupo 4. Familia Sulfatada Sódica o Sódica-Cálcica. Pozos 10, 11, 12, 20, 21 y 24. ....	70
Figura 46.- Diagrama de Schöeller grupo 4. Familia Sulfatada Sódica o Sódica-Cálcica. Pozos 10, 11,12, 20, 21 y 24. ....	70
Figura 47.- Diagrama de Piper grupo 5. Familia Sulfatada Cálcica–Sódica pozos 15, 16, 17, 19, 23 y 25. ....	71
Figura 48.- Diagrama de Schöeller grupo 5. Familia Sulfatada Cálcica–Sódica pozos 15, 16, 17, 19, 23 y 25. ....	71
Figura 49.- Diagrama de Piper grupo 6. Agua Clorurada Sódica. Pozo 7.....	72
Figura 50.- Diagrama de Schöeller grupo 6. Agua Clorurada Sódica. Pozo 7.....	72
Figura 51.- Familia Bicarbonatada – Sódica. GRUPO 1.....	73
Figura 52.- Familias Bicarbonatada–Sulfatada Sódica o cálcica-sódica. GRUPO 2. ....	74
Figura 53.- Familia Sulfatada-Bicarbonatada Sódica GRUPO 3. ....	75
Figura 54.- Familia Sulfatada Sódica o Sódica-Cálcica GRUPO 4.....	75
Figura 55.- Familia Sulfatada Cálcica–Sódica. GRUPO 5.....	76
Figura 56.- Agua Clorurada Sódica GRUPO 6. ....	76
Figura 57.- Mapa Diagramas de Stiff, red de pozos 2018.....	78
Figura 58.- Mapa Diagramas de Stiff, red de pozos 1985.....	79
Figura 59.- Evolución geoquímica del agua subterránea de acuerdo a la secuencia de Chebotarev.....	80
Figura 60.- Diagramas circulares, muestras 1 a la 27.....	81
Figura 61.- Mapa de ubicación de diagramas circulares. ....	82
Figura 62.- Diagrama de Collins. GRUPO 1.....	84
Figura 63.- Diagrama de Collins. GRUPO 2.....	85
Figura 64.- Diagrama de Collins. GRUPO 3.....	85
Figura 65.- Diagrama Wilcox para la clasificación de las aguas según el índice RAS y la conductividad eléctrica (Software Easy Quim).....	95
Figura 66.- Dureza total de la red de pozos 2018.....	98
Figura 67.- Calcificación por la dureza (mg/l CaCo <sub>3</sub> ).....	99
Figura 68.- Concentraciones de flúor (mg/l) en el acuífero Los Juncos, año 2018.....	101
Figura 69.- Índice de Saturación del Flúor (F-). ....	102
Figura 70.- Índices de Saturación (IS) para diferentes fases en los pozos LJ-15, LJ-16, LJ-7 y LJ-23 calculados mediante el programa PHREEQC. ....	103
Figura 71.- Concentraciones de Nitratos (mg/l) en el acuífero Los Juncos, 2018.....	106



Figura 72.- Sólidos Disueltos Totales (SDT) (mg/l) en el acuífero Los Juncos, año 1985. ....	107
Figura 73.- Sólidos Disueltos Totales (SDT) en el acuífero Los Juncos, año 2018. ....	108
Figura 74.- Concentraciones de Sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) en el acuífero Los Juncos, año 1985. ....	109
Figura 75.- Concentraciones de Sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) en el acuífero Los Juncos año 2018. ....	110
Figura 76.- Concentraciones de Cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) en el acuífero Los Juncos, año 1985. ....	111
Figura 77.- Concentraciones de Cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) en el acuífero Los Juncos, año 2018. ....	112
Figura 78.- Concentraciones de Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) en el acuífero Los Juncos, año 1985. ....	113
Figura 79.- Concentraciones de Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) en el acuífero Los Juncos, año 2018. ....	114
Figura 80.- Concentraciones de Sodio (Na) en el acuífero Los Juncos, año 1985. ....	115
Figura 81.- Concentraciones de Sodio (Na) en el acuífero Los Juncos año 2018. ....	116
Figura 82.- Concentraciones de Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) en el acuífero Los Juncos, año 1985. ....	117
Figura 83.- Concentraciones de Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) en el acuífero Los Juncos, año 2018. ....	118
Figura 84.- Comparativa de familias de aguas de los años 1985 y 2018 (diagramas de Piper). ....	119
Figura 85.- Comparativa de los antecedentes de pozos en el acuífero Los Juncos. ....	120
Figura 86.- Elevación del nivel estático Año 2010 (CONAGUA, 2010). ....	121
Figura 87.- Evolución del nivel, Años 2005- 2010 (CONAGUA, 2010). ....	122



## Capítulo 1. INTORDUCCION

El agua dulce es empleada de diversas formas en prácticamente todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir e intercambiar bienes y servicios. Las aguas subterráneas constituyen la fuente principal de agua dulce y son fundamentales tanto como fuente de agua potable para la sociedad, como para el mantenimiento de los sistemas acuáticos (Llamas *et al.*, 2000). Las aguas subterráneas constituyen el 2.5% del agua total disponible en el mundo del cual sólo el 30% está disponible en los acuíferos (Estadísticas del agua en México, 2011) y su distribución es muy variable.

En el estado de Chihuahua la situación de las aguas subterráneas es crítica ya que existen actualmente 30 acuíferos sin disponibilidad para nuevas concesiones (DOF, 2018). De acuerdo con Fagundo (2005), las características hidrogeológicas, tamaño del acuífero y la secuencia climática, son factores esenciales e influyentes en el desequilibrio de los acuíferos sobreexplotados. El concepto de sobreexplotación debe entenderse a partir de una comparativa de los beneficios y costos derivados de la explotación intensiva de las aguas subterráneas. El crecimiento en la demanda del agua es el principal factor y puede atribuirse a 3 importantes hechos: el crecimiento de la población, el desarrollo industrial y la expansión de la agricultura de regadío (Llamas *et al.*, 2000).

Tabla 1.- Acuíferos sin disponibilidad para nuevas concesiones (DOF, 2018).

No.	CLAVE	ACUIFERO	DÉFICIT
1	801	ASCENSIÓN	107.283.944
2	803	BAJA BABÍCOR	94.389.801
3	804	BUENAVENTURA	116.684.714
4	805	CUAUHTÉMOC	11.505.972
5	806	CASAS GRANDES	20.102.283
6	807	EL SAUZ-ENCINILLAS	54.653.188
7	808	JANOS	44.425.161
8	809	LAGUNA DE MEXICANOS	6.907.104
9	810	SAMALAYUCA	8.413.001
10	812	PALOMAS-GUADALUPE VICTORIA	2.962.073
11	813	LAGUNA TRES CASTILLOS	28.427.866
12	814	LAGUNA DE TARABILLAS	209.016.531
13	817	LAGUNA DE PATOS	26.149.574
14	818	LAGUNA DE SANTA MARÍA	266.083.392
15	819	LAGUNA LA VIEJA	166.291.751
16	821	FLORES MAGÓN- VILLA AHUMADA	116.319.714
17	822	SANTA CLARA	12.832.017
18	823	CONEJOS- MÉDANOS	82.017.728
19	824	LAGUNA DE HORMIGAS	205.386.264
20	827	EL CUARENTA	2.986.520
21	828	LOS MOSCOS	0.760738
22	830	CHIHUAHUA- SACRAMENTO	57.664.816
23	831	MEOQUI-DELICIAS	170.639.378
24	832	JIMÉNEZ- CAMARGO	161.501.316
25	833	VALLE DE JUÁREZ	86.238.624
26	834	PARRAL-VALLE DEL VERANO	12.071.393
27	838	ALTO RÍO SAN PEDRO	0.134375
28	840	VILLALBA	9.578.876
29	847	LOS JUNCOS	470.706.932
30	849	LLANO DE GIGANTES	36.585.926



El Acuífero Los Juncos, objeto de este estudio, se encuentra dentro de los 30 acuíferos que reportan cifras negativas en su disponibilidad, con un déficit de 470,706,932 m<sup>3</sup> (Tabla 1 y Figura 1).

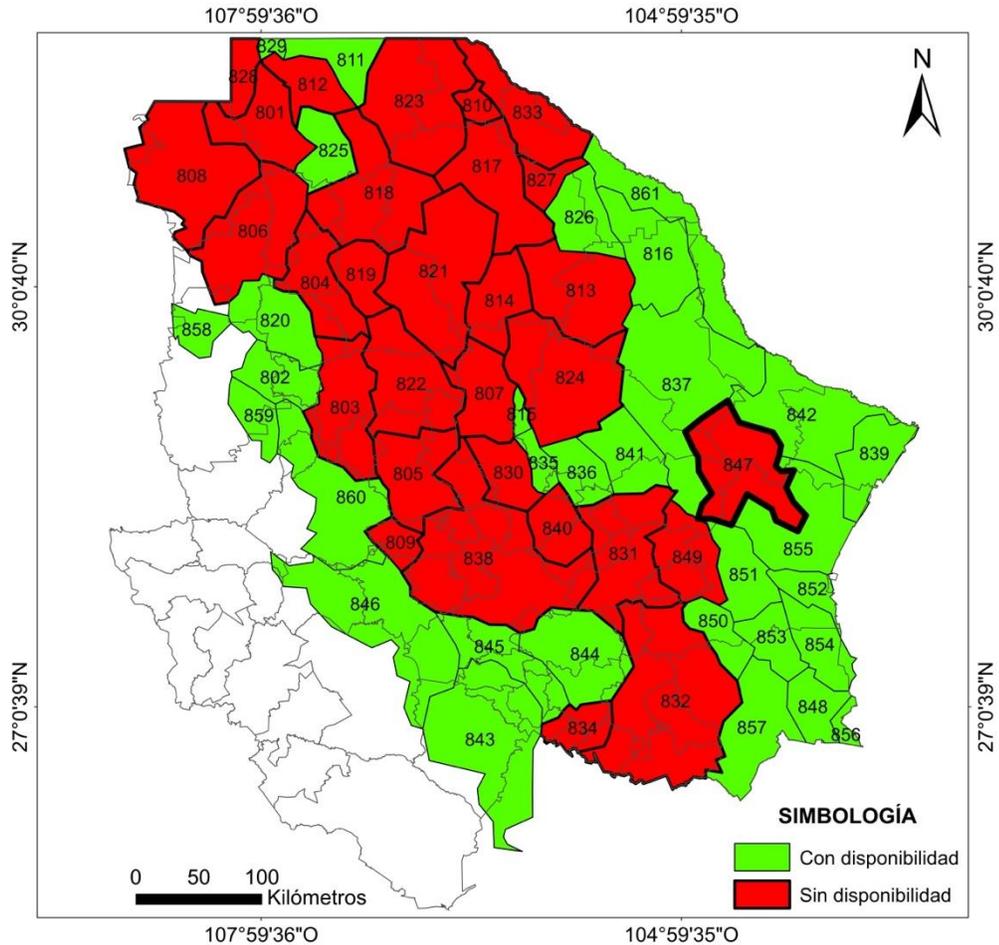


Figura 1.- Acuíferos sin disponibilidad para nuevas concesiones (Fuente: CONAGUA, 2018).

En el acuífero Los Juncos se ubican algunas comunidades menonitas como son: *El Oasis*, *Nueva Holanda*, *Las Bombas*, entre otras, pertenecientes al Municipio de Ojinaga (INEGI, 2010). En ellas la actividad principal es la agricultura de riego, que depende del agua subterránea. El Oasis, localizado a 1,234 m de altitud y fundado hace poco más de 20 años, es el segundo campo agrícola más grande del estado de Chihuahua después de Cuauhtémoc. En él se produce principalmente algodón y diverso cereales y legumbres, mismos que son exportados a diversos países de América y Europa (CONAGUA, 2010).



### *Situación administrativa del Acuífero*

A pesar de que en el año 2011 la CONAGUA declaró disponibilidad cero de agua en el acuífero Los Juncos por ser un acuífero en riesgo, los productores menonitas se han acogido al derecho de perforación y extracción de agua subterránea en la zona, sin asumir las medidas y sujeción a las disposiciones del “*ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento de las aguas nacionales del subsuelo en los siete acuíferos que se indican*” (Figura 2). Una prueba de ello es que no se cuenta con distrito o unidad de riego, ni se ha conformado un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS), por lo que la medición de los volúmenes extraídos no ha sido concisa (CONAGUA, 2010).



*Figura 2.- Poblado El Oasis (Imagen Google Earth).*

De acuerdo al calendario agrícola 2018-2019, la demanda de agua en la zona corresponde principalmente al riego de los siguientes cultivos; algodón (26,768 has), maíz sorgo (1,803 has), alfalfa (5,847 has), cacahuete (3,140 has), chiles (1,686 has), frijol (1,207 has), sandía (1,040 has) y nogal (747 has), dando un total de 42,238 has de cultivos pertenecientes a 18 poblados incluyendo pequeñas comunidades rurales o rancherías (Tabla 2 y Figura 3), características que en conjunto determinan la mayoría de las poblaciones y representan poco menos de 900 habitantes (INEGI 2010).



Tabla 2.- Lista de principales poblados ubicados en el acuífero Los Juncos (Calendario agrícola 2018-2019)

ID	Poblado	Ha	ID	Poblado	Ha
70	Volcanes	3683	79	Los Cienes	13826
71	Nvo.Oasis	2589	80	TFO y mas	3297
72	El Oasis	12370	81	Cadillal	4113
73	El Oasis-3	2219	82	Los Juncos	4342
74	San Francisco	2536	83	Las Bombas	6084
75	Nva. Holanda	16043	84	Palmeras	4377
76	San Guillermo	1780	85	Verjel	1962
77	Trebol	5251	86	Anteojito	5125
78	Milagro	2533	87	Mimbres	3775
				Total Has	95905

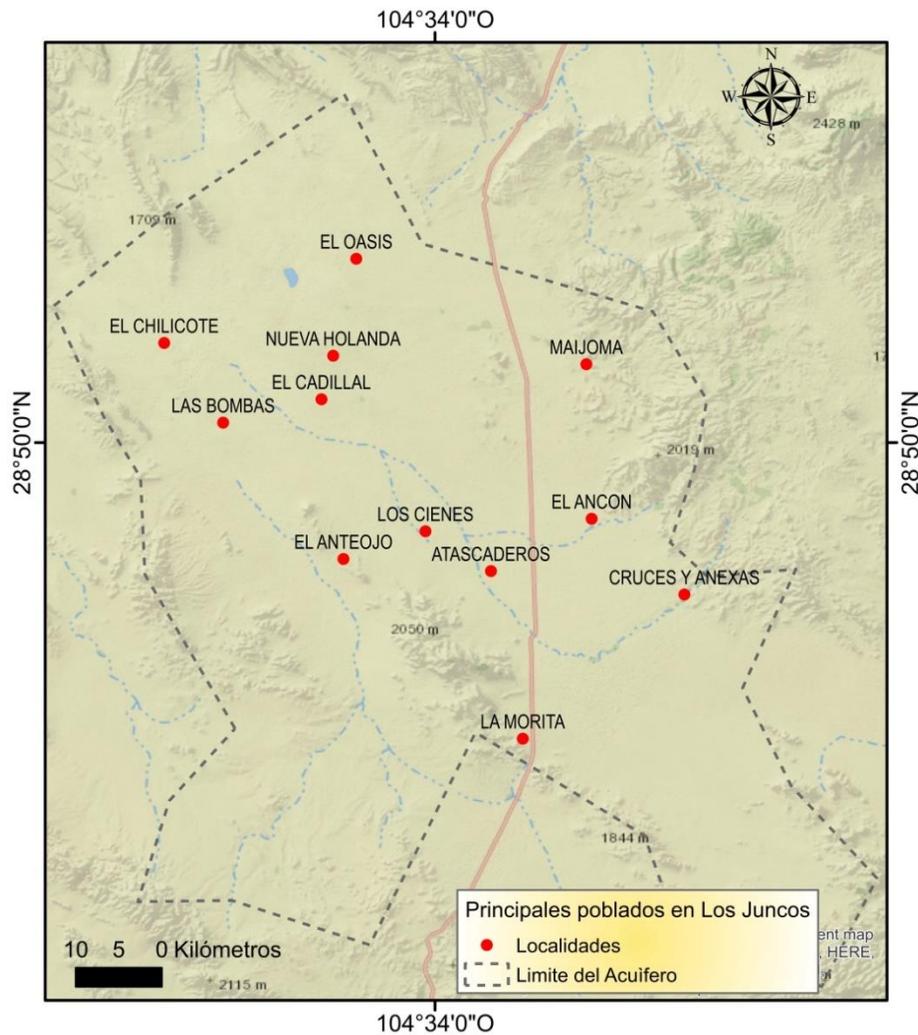


Figura 3.- Poblados en el acuífero (Fuente: Google Earth).



Debido a que no se cuenta con medidores, el volumen de extracción anual se basa en el “cálculo de volumen requerido de riego” realizado en el estudio de CONAGUA (2010), que toma en cuenta los valores de evapotranspiración para cada tipo de cultivo para así determinar una lámina de riego que multiplicada por el área (has), dando como resultado el volumen de extracción anual del acuífero para el año 2010. El volumen de extracción total calculado es de 404.2 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales, 403.95 hm<sup>3</sup> (99.9 %) se destinan para uso agrícola y los 0.27 hm<sup>3</sup> restantes (0.1 %) para usos doméstico - pecuario.

El volumen concesionado, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), con fecha del año 2010 era de 235.58 hm<sup>3</sup>/año (CONAGUA, 2010). De acuerdo al cálculo de “volumen de riego requerido por cultivo” realizado en el estudio de CONAGUA en el 2010 para determinar el volumen anual extraído del acuífero, éste último supera el volumen concesionado (Tabla 3).

*Tabla 3.- Volumen de riego requerido (CONAGUA, 2010)*

Año	Área de cultivos (has)	Volumen Total (hm <sup>3</sup> )
1985	155.9	2.13
2010	29628.0	269.3
2019	42238.0	-

## **1.1 ANTECEDENTES**

De acuerdo con la información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se cuentan con algunos estudios hidrogeológicos previos que han logrado caracterizar el acuífero.

En el año 1985, la empresa Ariel Consultores realizó para la Subdirección de Geohidrología de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) el llamado “Estudio de Prospección Geohidrológica en la Zona de Los Juncos, Chihuahua”. Se llevó a



cabo el censo de 39 aprovechamientos de agua subterránea de uso principalmente doméstico, abrevadero y agrícola, con una extracción total anual de  $2.13 \text{ Mm}^3$ , así como el análisis químico de muestras de agua de 17 pozos. Dentro del mismo estudio y mediante prospección geofísica, que consistió en la ejecución de 40 sondeos eléctricos verticales, se logró definir en el subsuelo la profundidad y secuencia de los materiales de relleno como aluvión y conglomerados que rellenan las extensas planicies, rocas volcánicas y calizas cretácicas. Además quedó establecido que el flujo de agua subterránea va predominantemente de oriente a poniente (CONAGUA, 2005).

En el año 2005 la empresa Consultores y Constructores del Norte S.A. de C.V. realizó la “Reactivación de la Red de Monitoreo Piezométrico del Acuífero Los Juncos”, integrada por 35 pozos, en su mayoría agrícolas, localizados al oeste del acuífero, en donde se detectaron dos conos de abatimiento correspondientes a la zona de Las Bombas y Nuevo Holanda. Se determinó que el acuífero tiene un comportamiento irregular, formado por depósitos aluviales del Cuaternario, compuesto por riolitas, basaltos, tobas y calizas, con un grado de granulometría que va desde gravas hasta limos, y que se trata de un acuífero de tipo libre. La recarga se da principalmente por retorno de riego, ya que por infiltración de lluvia existen pocas probabilidades (CONAGUA, 2005).

De acuerdo al estudio realizado en 2010 para la CONAGUA que lleva por título “Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Los Juncos (clave 0847), Estado de Chihuahua”, la disponibilidad de agua subterránea para el acuífero era de  $-101.98 \text{ Mm}^3$  (millones de metros cúbicos anuales negativos) extraídos del almacenamiento no renovable del acuífero, mientras que el volumen medio anual de recarga era de  $133.6 \text{ Mm}^3$  y un volumen concesionado de  $235.58 \text{ Mm}^3$ . Las curvas piezométricas indican que los niveles tienen una dirección preferencial sureste noroeste y un cono depresivo situado al noreste del acuífero, elevaciones máximas de 1230 msnm y mínimas de 1,110 msnm. Dicho estudio determinó que no existe disponibilidad para el otorgamiento de nuevas concesiones. Con base en la evolución de niveles del año 2005 al 2010, el descenso del nivel llega hasta -7 metros por año en la parte central de la meseta donde se ubica el poblado El Oasis (CONAGUA, 2010).



En el año 2014 se realizó la tesis de Maestría en Ingeniería en Hidrología Subterránea titulada “Modelación Matemática del Acuífero Los Juncos” (Núñez, 2014) cuyo objetivo fue construir un modelo de flujo del agua subterránea y predecir el comportamiento del nivel freático a los años 2015, 2020 y 2025, determinar los niveles de agua subterránea, así como las zonas que presentan los máximos abatimientos para los mismos años y proponer alternativas de manejo del acuífero. Se asignaron 1438 pozos de bombeo al modelo que suman una extracción anual de 585.13 hm<sup>3</sup> y 52 pozos de observación. Los resultados de las predicciones indicaron abatimientos considerables en niveles de agua subterránea, principalmente en zonas de la porción norte donde se encuentra la mayor cantidad de pozos de extracción. Al hacer la caracterización del acuífero mediante este modelo matemático se observó que la recarga más significativa proviene de la sierra que se encuentra en la porción suroeste del área.

En relación a la información histórica disponible sobre la calidad del agua en el acuífero Los Juncos, se partió de la base de datos proporcionada por el Departamento de Calidad del Agua del organismo operador de agua potable, saneamiento y alcantarillado de Chihuahua denominado Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado (JCAS). Entre la información proporcionada correspondiente a los municipios de Camargo, Julimes, Ojinaga, Coyame y Aldama, únicamente se detectaron 3 pozos que coinciden dentro del área de estudio, siendo éstos el pozo 1, en el ejido Maijoma, el pozo 2, en el poblado El Oasis y el pozo 3, en el ejido Las Cruces y Anexas, todos del municipio de Ojinaga. Dentro de estos datos se detectaron importantes concentraciones de flúor, hasta 4.3 mg/l en el poblado El Oasis (año 2009) y de 2.8 mg/l en Las Cruces y Anexas (año 2011). El arsénico tampoco mostro problema ya que las concentraciones encontradas no superan 0.01mg/l. La localización de dichos pozos dentro del acuífero se muestra en la Figura 4.

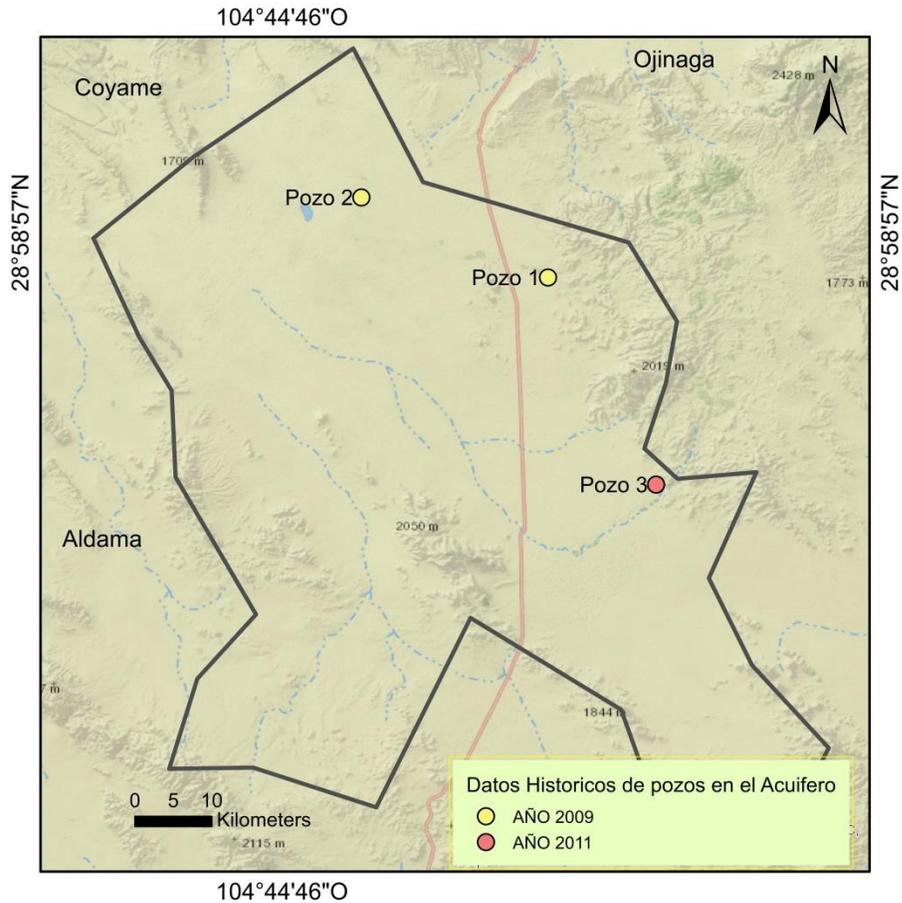


Figura 4.- Localización de pozos muestreados por “Calidad del Agua - JCAS”, años 2009 y 2011.

## 1.2 HIDROGEOQUÍMICA. MARCO TEÓRICO

Las aguas naturales adquieren su composición química mediante un proceso complejo, donde además de los principios fisicoquímicos involucrados intervienen factores de tipo geológico, hidrogeológico, geomorfológico, climático y ambiental (Fagundo *et al.*, 2005). Gracias a esta diversidad de factores, la composición química de las aguas puede ser expresada mediante uno o varios patrones hidrogeoquímicos.

El agua subterránea a través de su recorrido por el subsuelo disuelve ciertos minerales, tiene intercambio con otros y precipita algunos, siendo estos fenómenos precisamente el objeto de estudio de la hidrogeoquímica (Peña, 2006). El agua subterránea



que circula a través de un medio poroso constituido por materiales con cierta solubilidad, incrementa su contenido de minerales disueltos y es posible asociar las trayectorias de flujo con el incremento de salinidad del agua; de esta forma, las zonas de menor concentración iónica corresponden a las zonas de recarga y las de mayor concentración, a las de descarga (Custodio y Llamas 1987).

En las pendientes pronunciadas de las rocas, las partículas disgregadas tienden a ser acarreadas antes que las plantas establezcan las condiciones necesarias para su desarrollo y crecimiento; por esta razón, es común encontrar en dichas pendientes, amplias zonas con roca desnuda que funcionan como áreas de recarga. En zonas con menor pendiente, el tipo de suelo y su velocidad de desarrollo depende en gran medida de factores como el clima y el tipo de roca que origina los minerales en el suelo (Price, 2003).

### ***Calidad del agua***

El agua subterránea de reciente infiltración o meteórica es generalmente de buena calidad, aunque en zonas urbanas e industriales, al precipitar, arrastra contaminantes de la atmósfera; por otra parte, al infiltrarse y estar en contacto con los materiales que constituyen los acuíferos, disuelve algunos de ellos y cambia su calidad. A continuación se anotan algunas unidades geológicas que dan origen de los principales iones disueltos (Bouwer, 1978).

*Calcio:* Sus fuentes en las rocas ígneas son los minerales tales como piroxenos, anfíboles y feldespatos, pero al ser de solubilidad pequeña, sus contenidos son bajos. En las rocas sedimentarias, el calcio ocurre como carbonatos (calcita y aragonita), carbonatos de calcio y magnesio (dolomita), calcita (limonita) y sulfatos de calcio (yeso y anhidrita); el carbonato de calcio es uno de los agentes principales de cementación de los detritos. El agua subterránea proveniente de depósitos calcáreos es generalmente dura, y las fuentes de calcio en los depósitos aluviales no consolidados (Peña, 2006).



*Magnesio:* En rocas ígneas deriva de los minerales ferro magnesianos (olivino, piroxenos, anfíboles). En las rocas metamórficas ocurre en los minerales como clorita, montmorillonita y serpentina. En las rocas sedimentarias ocurre como carbonato, algunas veces mezclado con carbonatos de calcio. En general las aguas subterráneas contienen pocas cantidades de magnesio, excepto cuando están en contacto con dolomitas o evaporitas ricas en Mg (Peña, 2006).

*Sodio:* El sodio se deriva de dos fuentes: los feldespatos de rocas ígneas y sus derivados, como las arcillas continentales y las de origen marino (Peña, 2006).

*Potasio:* En las rocas ígneas el potasio es menos común que el sodio, pero es más abundante en las rocas sedimentarias. Generalmente es poco soluble, por lo que sus concentraciones en el agua subterránea en general son menores que el sodio (Peña, 2006).

*Carbonatos y bicarbonatos:* Sus fuentes están relacionadas primeramente con los contenidos de CO<sub>2</sub> en el agua meteórica y algunas rocas carbonatadas y minerales. Las concentraciones de carbonatos en agua subterránea suelen ser menores de 10 mg/l; para los bicarbonatos son mucho más altas (Peña, 2006).

*Cloruros:* Sus principales fuentes son las evaporitas, las aguas salinas connatas y el agua de mar. Las rocas ígneas contribuyen poco a los contenidos de cloruros. Altos contenidos de cloruro y de sodio indican la posibilidad de haber tenido contacto con agua de mar (Peña, 2006).

*Sulfatos:* Se forman por oxidación de sulfuras como por ejemplo la pirita; las aportaciones más abundantes provienen de los depósitos de evaporitas, yesos, anhidritas y sulfatos de sodio (Peña, 2006).

*Nitrógeno:* Existen dos formas principales, los nitratos y los nitritos; son producidos por organismos oxidantes en agua de riego y por residuos de fertilizantes en las zonas agrícolas (Peña, 2006).



Otras características importantes del agua subterránea se mencionan a continuación:

### *pH*

El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. Su valor varía con la temperatura. En una solución neutra es de 7.0 a 25°C. Las soluciones ácidas tienen un pH menor que 7, y las alcalinas, mayor a 7.0 (Price, 2003). En aguas con pH inferior a 8.3, como son la mayoría de las aguas subterráneas naturales, la especie carbonatada dominante es el ion bicarbonato. En estas aguas la concentración de  $\text{HCO}_3^-$  suele variar entre 50 y 400 mg/l.

### *Temperatura*

Uno de los aspectos físicos más importantes en el agua subterránea es su temperatura. A mayores profundidades la temperatura se incrementa. En general, las aguas relacionadas con sistemas de flujo locales tendrán una temperatura menor que las de sistemas de flujo más profundos y mayores temperaturas corresponderán a sistemas de flujo regionales (Price, 2003). Medir la temperatura del agua a la descarga en un pozo puede ser un indicador del tipo de flujo que se está captando en ese momento particular, cuya evidencia es un gradiente geotérmico, que en promedio incrementa la temperatura 1°C / 35 a 40 m de profundidad de acuerdo con Freeze y Cherry (1979).

### *Conductividad eléctrica*

La conductividad eléctrica mide la capacidad de una solución acuosa para transportar corriente eléctrica. Ésta es conducida por el movimiento de los iones presentes; así, a mayor movilidad de iones mayor concentración de sales y por ende, mayor conductividad. Para el caso del agua subterránea el intervalo de conductividad más común es de 200 a 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



En las zonas desérticas y semidesérticas del estado de Chihuahua es común encontrar regiones con altos valores de dureza producto de reacciones de intemperismo, arsénico, flúor y sulfatos en el agua subterránea. Por otro lado, la intensa actividad agrícola ha sido un detonante en la problemática del agua no sólo en disponibilidad sino también en la calidad de la misma. En los últimos años la agricultura ha propiciado la utilización de gran cantidad de agroquímicos, que han derivado en la contaminación de suelos y acuíferos. México ocupa el sexto lugar a nivel mundial en superficie con infraestructura de riego, mientras que los primeros lugares los ocupan China, India y los Estados Unidos (Estadísticas del Agua en México, edición 2011).

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

En el acuífero Los Juncos no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea, por lo que, como respuesta a la intensificación de la agricultura, en las últimas dos décadas se ha incrementado la explotación de la misma, generando fuertes abatimientos en el área. Mediante el análisis hidrogeoquímico del acuífero se podrán identificar los procesos que controlan la evolución de las aguas subterráneas en la zona y la calidad de la misma, así como determinar las condiciones hidrogeológicas que prevalecen en el acuífero, contribuyendo con información importante para la definición de un modelo conceptual sobre el comportamiento del mismo.

### **1.4 OBJETIVOS**

Objetivo general:

Determinar las condiciones hidrogeoquímicas que caracterizan la calidad de agua en el acuífero Los Juncos en el estado de Chihuahua, el cual sirve primordialmente para el abastecimiento a comunidades que tienen como principal actividad económica la agricultura.



#### Objetivos específicos:

- Definir una red de monitoreo de agua subterránea para valorar el estado actual y la dinámica de la calidad de la misma, considerando el origen y causas de sus variaciones en el acuífero.
- Determinar los siguientes parámetros de campo: pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (SDT), así como efectuar los análisis de laboratorio para obtener los siguientes iones:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^{-1}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{As}^{+3}$  y  $\text{F}^-$ , mediante una campaña de muestreo en los puntos de mayor interés (aproximadamente 30 pozos).
- Identificar los parámetros de calidad del agua que superan los criterios en la normatividad mexicana para el abastecimiento potable y la agricultura.
- Realizar la caracterización hidrogeoquímica de las muestras colectadas mediante el empleo de gráficas y planos específicos que permitan relacionarlas con las condiciones hidrogeológicas del área de estudio.

#### 1.4 HIPÓTESIS

Existe una relación entre las características hidrogeoquímicas e hidrogeológicas del acuífero Los Juncos y la intensa actividad agrícola que se ha dado en las últimas tres décadas en la zona.



## Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 2.1 DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA

El acuífero Los Juncos, definido con la clave 0847 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción oriental del estado de Chihuahua, entre las coordenadas geográficas 28°20'0" Y 29°10'0" de latitud norte y 104°10'0 y 105°0'0" de longitud oeste (Figura 5). Posee una extensión de aproximadamente 4601 km<sup>2</sup> y abarca parcialmente los municipios de Ojinaga, Camargo, Aldama, Coyame y Julimes; pertenece además a la Región Hidrológica No. 35 “Bolsón de Mapimí” (CONAGUA, 2010). Sus vías de comunicación principales son la carretera estatal 341 que va de Camargo a Ojinaga y la autopista Chihuahua-Ojinaga, así como una importante red de brechas y veredas.

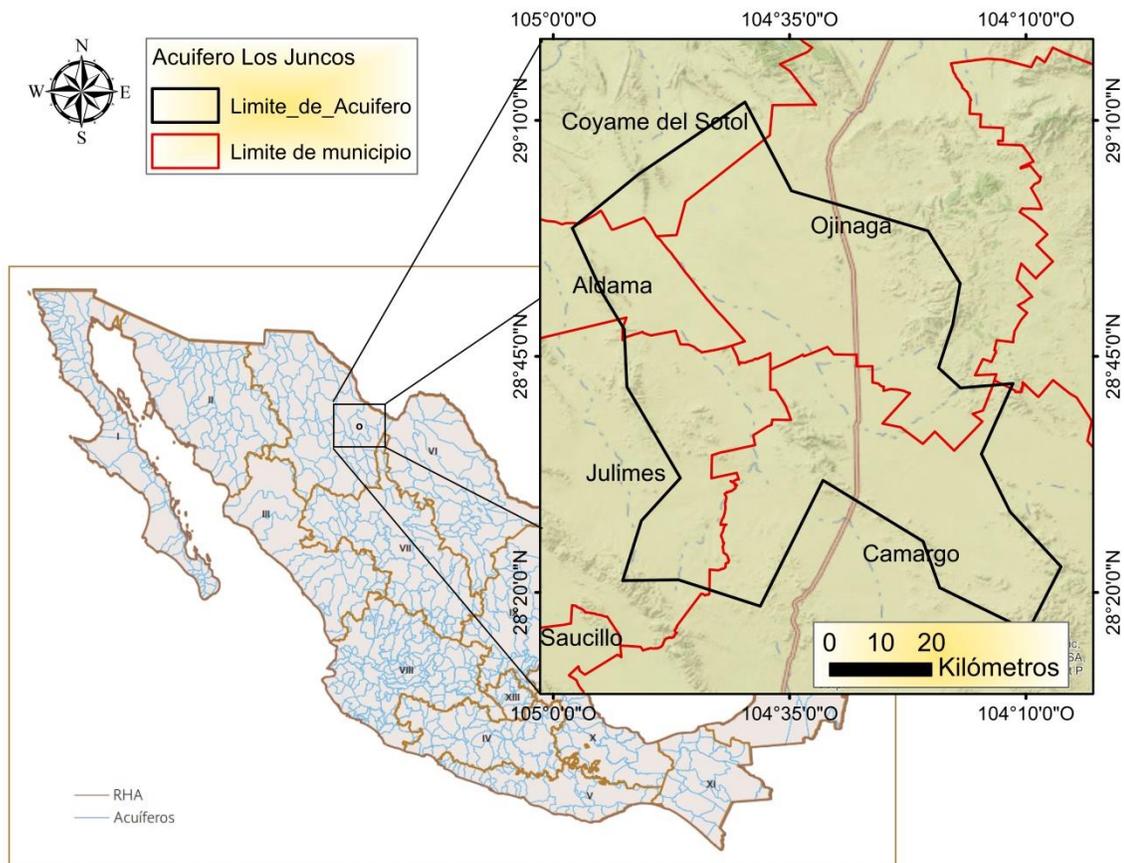


Figura 5.- Ubicación del acuífero Los Juncos en el estado de Chihuahua.



## **2.2 FISIOGRAFÍA**

El Acuífero los Juncos se localiza en la provincia de las “Sierras y Llanuras del Norte”. La zona se caracteriza por ser árida y semiárida, la presencia de sierras asimétricas y paralelas orientadas hacia el noroeste; los elementos orográficos se separan por amplios valles como el que ocupa la mayor área de estudio con elevaciones que varían entre 1200 y 1500 msnm. Dominan rocas volcánicas félsicas al oeste y calizas en el este y norte. La morfología en la región es de bolsones, esto es, cuencas con drenaje interno (CONAGUA, 2010).

## **2.3 HIDROGRAFÍA**

La zona de los Juncos es una cuenca cerrada topográficamente. Las corrientes fluviales son intermitentes y desintegradas, y se infiltran o drenan hacia lagunas intermitentes. Por el poniente los arroyos de Maijoma y Los Acebuches, drenan la sierra El Aguaje. Los arroyos que aportan a la laguna de Los Juncos son La Mota y El Chilicote, que drenan la sierra de El Chupadero al SW de la laguna y parte del área al norte de la cuenca, respectivamente. Otros escurrimientos superficiales son los arroyos La Víbora, Mota de San Juan y La Copa, al sur. Todos se conectan al Río Conchos, aunque la mayoría de ellos se infiltran o evaporan durante su recorrido (CONAGUA, 2010).

## **2.4 CLIMA**

Las condiciones climatológicas de la zona de estudio influyen en la calidad del agua. En el acuífero Los Juncos la precipitación media anual es mínima y hay un alto índice de evaporación debido al alto índice de radiación solar que prevalece en la zona. Los climas predominantes son dos: “Seco” y “Muy Seco”. El subclima dentro del “Seco” es el “Seco Templado”. La mayor cantidad de precipitación se da en el verano en los meses de junio a octubre. La escasa humedad propicia el crecimiento de matorral desértico, pastizal natural y vegetación halófila donde los suelos son salinos, por esto sólo es posible la agricultura de riego. Dentro del clima “Muy Seco” se encuentran los subclimas “Muy Seco Semicálido” y



el “Muy Seco Templado”, en los que su baja humedad depende de la escasa precipitación, la naturaleza del suelo y la cubierta vegetal. Estos climas tienen como característica principal que la evaporación potencial excede a la precipitación (CONAGUA, 2010).

## 2.5 SUELOS

De acuerdo con CONAGUA (2010) los suelos que predominan en la región son del tipo xerosol háplico con mezclas con regosol calcárico, xerosol lúvico, xerosol cálcico, vertisol crómico, todos con una textura granular media. En segundo lugar se encuentran los suelos del tipo rendzima con mezcla de regosol calcárico y litosol de granulometría media.

En tercer lugar se encuentran los suelos del tipo yermosol cálcico con mezcla de xerosol cálcico de fase química sódico salina y yermosol cálcico, con mezcla de xerosol cálcico y regosol eútrico de fase sódico salina y textura media. Estos son suelos de pH moderadamente alcalino (7.9-8.4). En la mayor parte del acuífero a menos de 1 metro de profundidad se encuentran capas de caliche muy duro, así como capas rocosas. (Figura 6).

A continuación se describen los diferentes tipos de suelo que se encuentran en el acuífero Los Juncos de acuerdo con CONAGUA (2010).

### *Xerosoles*

Son suelos con horizonte A ócrico, de origen aluvial y de origen residual sobre rocas sedimentarias (conglomerado, caliza, caliza-lutita, arenisca, arenisca-conglomerado, lutita) e ígneos (extrusivas básicas y ácidas). Son suelos de buena fertilidad.

Los xerosoles háplicos, están limitados por fases físicas (petrocálcica, petrogypsica, lítica, gravosa y pedregosa) y químicas (sódica, salina y salino-sódica); contienen poca materia orgánica. Los xerosoles lúvicos presentan debajo un horizonte cálcico o gypico, poca materia orgánica; la saturación de bases indica poco sodio, potasio y magnesio y altas en calcio (CONAGUA, 2010).



### *Rendzimas*

Son suelos que se caracterizan por presentar un horizonte A mólico con 50 cm de espesor que contiene material calcáreo con un equivalente de carbonato de calcio mayor de 40%. Con cantidades muy altas de calcio, magnesio y potasio y moderadas de sodio.

### *Litsoles*

Los litsoles son suelos menores de 10 cm de profundidad y están limitados por un estrato duro, no son aptos para la agricultura, su utilización es pecuaria y aprovechamiento forestal (CONAGUA, 2010).

### *Yermosoles*

Tienen un horizonte A ócrico, suelos áridos. Comparten muchas de las características con los xerosoles, son de buena fertilidad y aptos para la agricultura de riego. Sustentan matorral desértico micrófilo, matorral desértico rosetófilo, pastizal natural, vegetación halófila. Los yermosoles cálcicos presentan un horizonte de acumulación de carbonatos de calcio con 15 cm de espesor, denominado horizonte cálcico. Presentan limitantes por la presencia de una capa de caliche, gravas y por la acumulación de sales y/o sodio, tiene poca materia orgánica (<1%), la capacidad de retención de bases va de baja a moderada; la saturación de bases es alta, con cantidades muy altas de potasio y de calcio, altas de magnesio y de sodio (CONAGUA, 2010).

### *Regosoles*

Son suelos que presentan un horizonte A ócrico, a más de 50 cm de la superficie. Su origen es muy diverso: residual, a partir de rocas ígneas extrusivas ácidas y básicas, y de rocas sedimentarias como conglomerado y caliza, que conforman topoformas de sierras, mesetas y lomeríos; aluvial, a partir de sedimentos de los valles; y eólico, por sedimentos arenosos que constituyen dunas. Los regosoles calcáricos, son calcáreos en una capa del suelo entre 20 y 50 cm de profundidad y son bastante fértiles. 61 % se encuentran limitados por fases lítica y petrocálcica, 20% por fases gravosa y pedregosa, 4% por fase salino-



sódica. Por lo general son de muy fuerte alcalinidad en suelos salinos, pobres en materia orgánica (<1%) y altos en calcio (CONAGUA, 2010).

### *Vertisoles*

Se caracterizan por tener 30% o más de arcilla en todos los horizontes a menos de 50 cm de la superficie. La presencia de minerales de arcilla hace que estos suelos se expandan y contraigan presentando adiciones y pérdidas de agua, lo que provoca el agrietamiento del suelo, creando un horizonte homogéneo. Presentan mayormente fases salina y/o sódica (59%) y alta capacidad de retención de bases; altas cantidades de potasio, calcio, magnesio y sodio (CONAGUA, 2010).

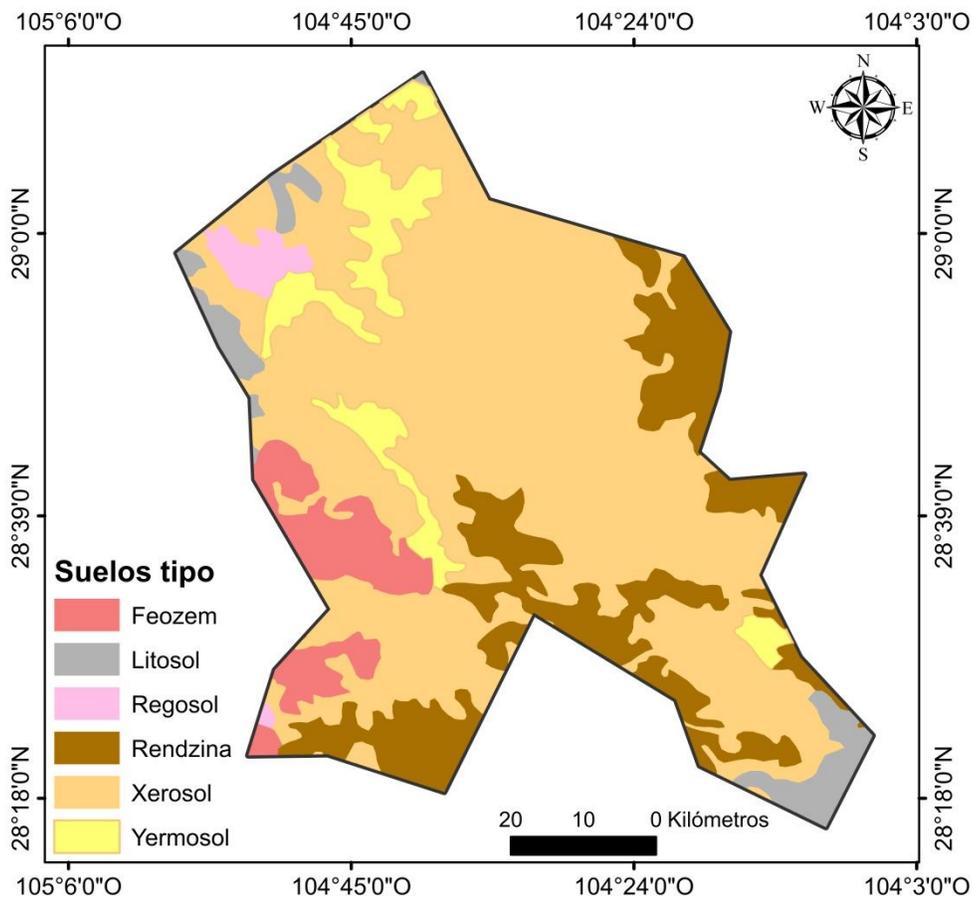


Figura 6.- Distribución de suelos en el acuífero Los Juncos (CONAGUA, 2010).



## 2.6 VEGETACIÓN. USO DE SUELO

La vegetación predominante en el acuífero en orden descendente es el matorral desértico micrófilo, el pastizal natural, matorral desértico rosetófilo y por último la vegetación halófila (CONAGUA, 2010) (Figuras 7 y 8).

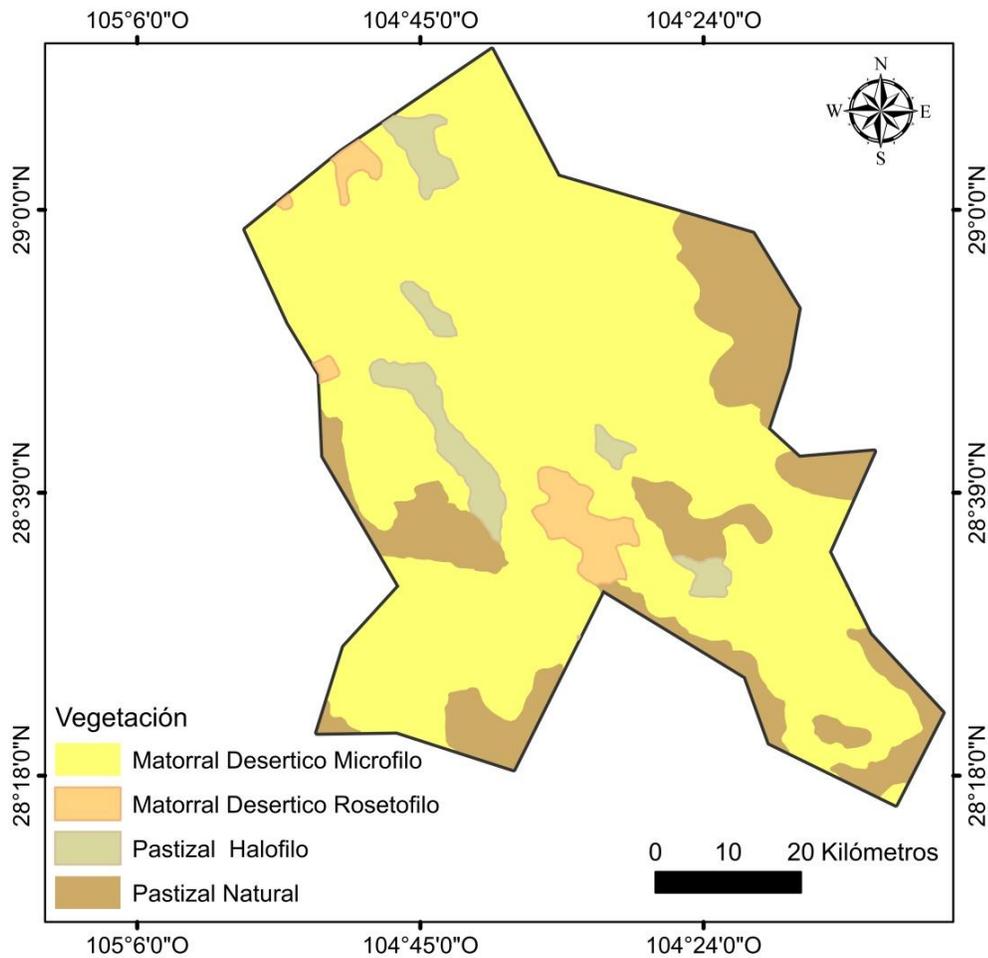


Figura 7.- Distribución de la Vegetación en el acuífero Los Juncos (CONAGUA, 2010).

### 1. Matorral desértico

Los matorrales son una vegetación arbustiva y con alturas variables pero inferiores a 4m y se encuentran dos tipos:

- Matorral micrófilo; crece en terrenos aluviales, son arbustos espinosos y hojas pequeñas.
- Matorral desértico rosetófilo; son arbustivos espinosos con hojas alargadas y estrechas.



Los elementos más típicos de este matorral son: *Agave Lechuguilla* (lechuguilla), *Dasyllirion Leiophyllum* (sotol), *Agave sp.*, *A. Scabra* (maguey). Destacan como eminencias: *Yucca spp.*, *Fouquieria Splendens* (ocotillo) y *Acacia spp.* y las gramíneas que son menos abundantes.

## 2. Pastizal

El segundo tipo de vegetación es el pastizal natural que se encuentra mayormente en las sierras y el pastizal halófilo, este último prospera en suelos con altos contenidos de sales solubles; dichos suelos son del tipo aluvial alimentados con arcillas que les presentan un drenaje deficiente. La vegetación halófila está conformada por especies herbáceas y arbustivas donde están presentes plantas suculentas y algunas ramíneas rizomatosas. En la entidad ocupa los fondos de las llanuras aluviales inundables, suelos profundos con texturas finas y drenaje lento, acumulando fuertes concentraciones de sales solubles (CONAGUA, 2010).



Figura 8.- Vegetación típica en el acuífero Los Juncos (Fuente: Google earth).

## 3. Zona agrícola

El uso de suelo en la parte central del valle es principalmente agricultura de riego, que como bien se menciona en el capítulo 1, abarca un área de 42,000 has. Este cambio de uso de suelo desde el año 1995 ha ido incrementando a la par con la demanda (ver Figura 9).

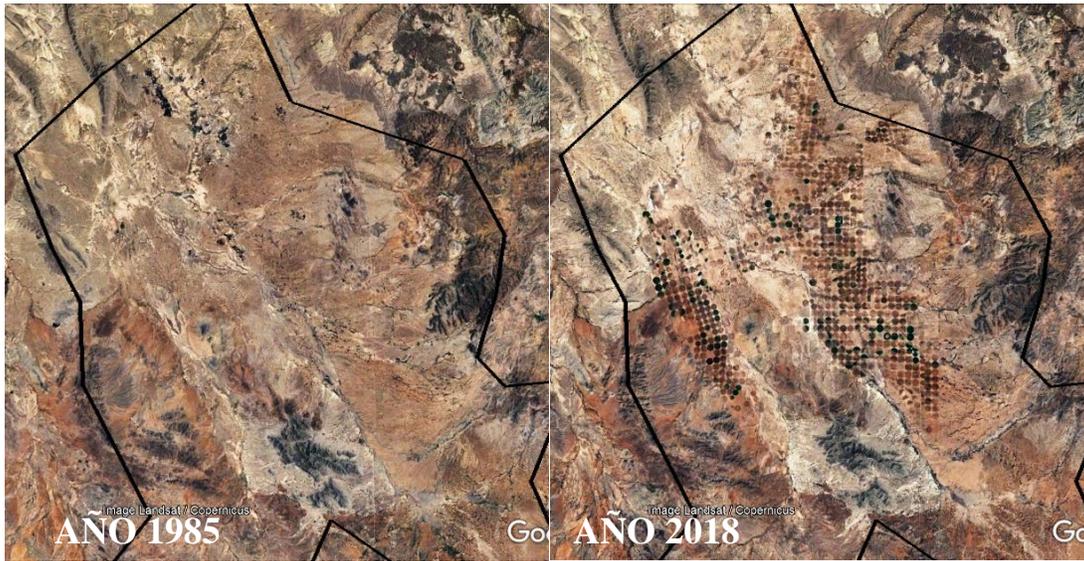


Figura 9.- Evolución de las zonas de cultivo de los campos menonitas, años 1985 y 2018. (Imagen Google Earth)

## 2.7 GEOLOGÍA DEL ACUÍFERO

De acuerdo con el estudio de CONAGUA (2010) en la superficie cubierta por el acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas extrusivas e intrusivas, cuyo registro estratigráfico comprende el periodo del Mesozoico hasta el Reciente, calizas que conforman las sierras Mojina y El Chupadero, así como lutitas y areniscas al noroeste (Figura 10). Las rocas extrusivas de tipo andesítico relacionadas con la primera fase volcánica que dio origen a la Sierra Madre Occidental sobreyacen a las rocas sedimentarias cretácicas, que a su vez infrayacen discordantemente a tobas del Oligoceno-Mioceno. Se observaron secuencias vulcano-sedimentarias denominadas por Mc Dowell y Clabaugh (1979) como “Complejo Volcánico Superior”. La segunda fase volcánica está representada por tobas de composición riodacítica y riolítica con intercalación de depósitos vulcanoclásticos; estas unidades sobreyacen en discordancia a las rocas del “Complejo Volcánico Inferior”. Andesitas post-miocénicas sobreyacen concordantemente a unidades ácidas e infrayacen a basaltos que representan las últimas manifestaciones volcánicas.

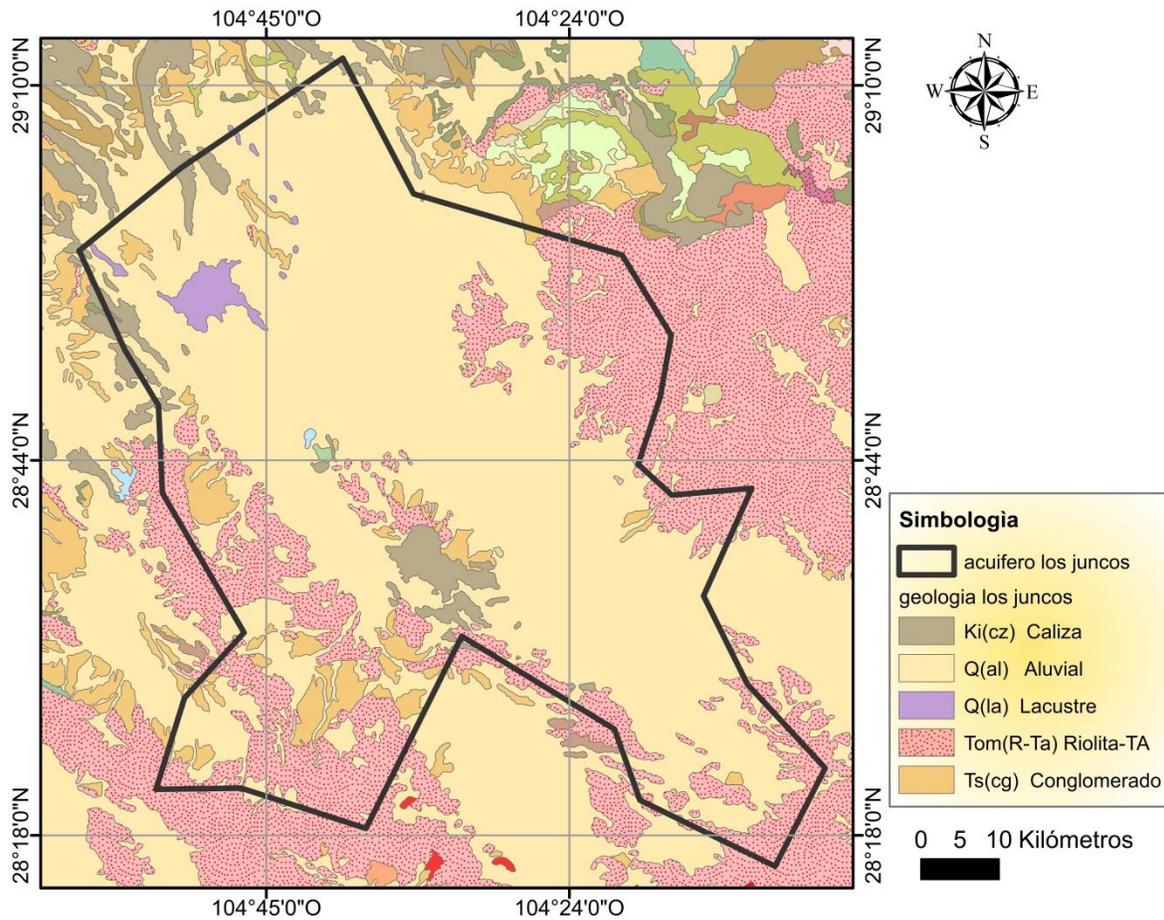


Figura 10.- Geología en el acuífero Los Juncos (CONAGUA, 2010).

## 1. Geología local. Estratigrafía

### Unidades hidroestratigráficas

En el estudio del año 2010 de CONAGUA se presentó un modelo geológico que define la conformación del subsuelo con base en la geología superficial del área de estudio. De acuerdo con la Figura 11, el valle central del acuífero se conforma por conglomerados y depósitos aluviales, con algunas zonas de formación lacustre, como una especie de costra en el suelo y de baja permeabilidad. Se delimita el acuífero con sierras de roca desnuda, principalmente de Toba Félsica y Riolita.

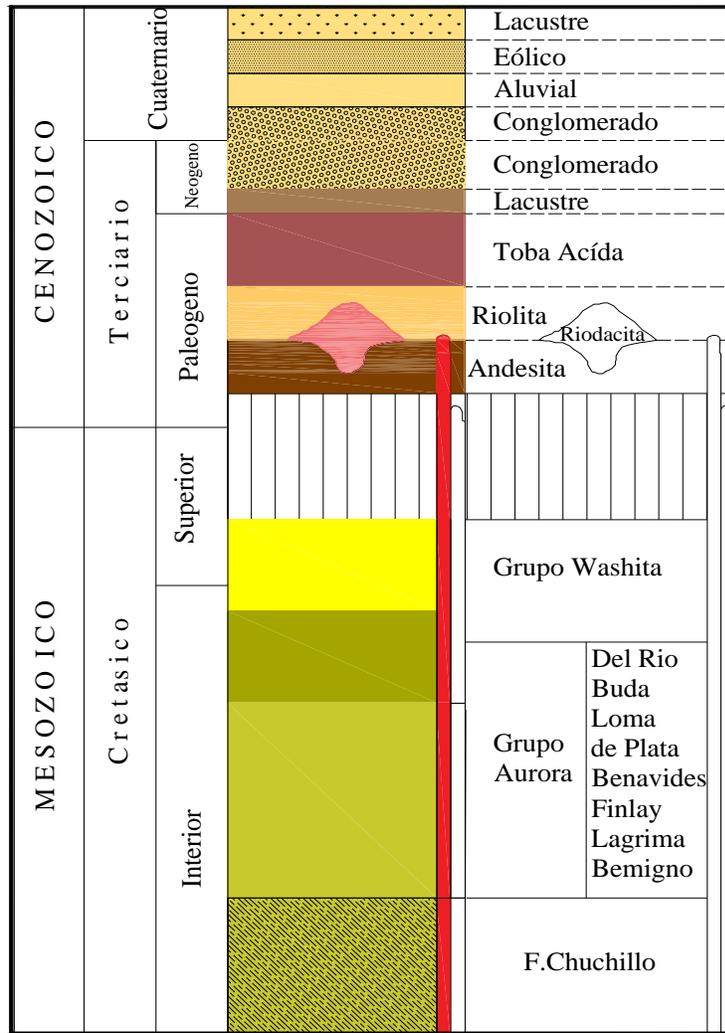


Figura 11.- Columna estratigráfica en el acuífero Los Juncos (CONAGUA, 2010).

## 2. Rocas Sedimentarias

### Caliza, Ki (cz)

En general la mineralogía de la unidad está representada por: calcita (micrita y espatita), trazas de sílice, trazas de hematita y feldspatos autógenos. La estratificación es variable, de 30 a 40 cm en caliza arcillosa, de 20 a 40 cm con intercalación de limolita arenosa y abundantes fósiles. Los esfuerzos compresivos que afectaron a la unidad están representados por pliegues abiertos. Acusa fallas normales de dirección NW-SE, fracturas las cuales sirvieron de conducto para la extrusión de toba ácida y fisuras que generalmente



se encuentran rellenas de calcita. Su expresión morfológica es de sierra alta con pendientes abruptas y sierras aisladas, como se muestra en la fotografía de la Sierra La Mojina vista desde el este (CONAGUA, 2010).

#### *Caliza-lutita, Ks (cz-lu)*

Forma valles erosionales y lomeríos de pendientes suaves (CONAGUA, 2010). No aflora.

#### *Conglomerado, Ts (cg)*

Unidad constituida por un conglomerado polimíctico depositado en facies continentales, en las que predominan los fragmentos de roca calcárea, en menor proporción fragmentos de rocas ígneas, encuentran unidos por una matriz arcillosa de color café cementante calcáreo, ocasionalmente se presentan con fracturas rellenas de calcita, se observaron pliegues y pequeñas fallas locales y en discordancia angular con conglomerados Cuaternarios. Estos conglomerados sobreyacen a rocas sedimentarias del Cretácico y de igual forma a rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno, está cubierto también en discordancia por basaltos del Terciario Superior, por la relación que mantiene con las demás unidades se le considera de edad Terciario Superior. La unidad se encuentra rellenando fosas tectónicas, con expresión morfológica de lomas de pendiente suave y medianamente disectados (CONAGUA, 2010).

#### *Lacustre, Q (la)*

Depósitos de facies continentales lacustres que forman una secuencia alternante de arenas de grano fino, limo y arcilla, con estratos de 5 a 10 cm de espesor. En la superficie se nota la presencia de sales, las cuales han formado una costra. Estos depósitos afloran en las depresiones que dan origen a zonas de inundación (CONAGUA, 2010).

#### *Aluvial, Q (al)*

Depósitos de origen fluvial derivados de la erosión y denudación de las rocas pre-existentes en el área; la acumulación de éstos representa el evento más joven del área y se



encuentra rellenando extensos valles y fosas tectónicas. Los materiales de relleno son arcillas, limos arenas y gravas, destacan grandes cantidades de granos de cuarzo, fragmentos de roca y feldespatos. Su permeabilidad es alta, dando origen a la formación de acuíferos de tipo libre. Los espesores de estos depósitos son variables con expresión morfológica de extensas planicies que en ocasiones están disectadas por pequeños arroyuelos que desembocan en lagunas endorreicas (CONAGUA, 2010).

### ***3. Rocas Ígneas Extrusivas***

#### *Riolita-toba félsica, T (R-Ta)*

Unidad volcánica de mayor distribución en el área de estudio, constituida por diversas rocas de composición ácida: tobas riolíticas, tobas riodacíticas. En general la mineralogía de la unidad lo constituyen: microclina, sanidino, andesina, oligoclasa y cuarzo; como minerales accesorios: circón, hematita, biotita, pirita y fragmentos de roca. En general la unidad presenta fracturamiento vertical, ocasionando la formación de bloques. Sobreyace discordantemente a rocas cretácicas y a las unidades del Complejo Volcánico Inferior e infrayace a basalto y andesita del Terciario superior, así como a depósitos recientes. La unidad se correlaciona con el Complejo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental (Mc Dowell y Clabaugh, 1979) del Oligoceno-Mioceno. En general esta unidad forma mesetas disectadas, mesetas basculadas y sierras escarpadas (CONAGUA, 2010).

#### *Andesita, Ts (A)*

Unidad ígnea efusiva formada por andesina y oligoclasa, unidas por una matriz microlítica con misma composición; se reportan minerales accesorios como: augita, apatito, piogenita y circón. Su textura es microcristalina afanítica y porfídica. Los afloramientos presentan fracturamiento en varias direcciones, el cual ha ocasionado la formación de bloques, estructura fluidal y amígdalas rellenas de calcita. Morfológicamente forma cerros aislados y aflora en los escarpes de las sierras (CONAGUA, 2010).



### *Riodacita-toba félsica, T (Rd-Ta)*

Unidad que incluye una alternancia de derrames de riodacita y tobas de composición riolítica, líticas cristalinas y soldadas. Los derrames son de color gris con vivos blancos con textura holocristalina porfídica. Estas rocas están sobrepuestas localmente a conglomerados cretácicos y a aparatos andesíticos terciarios y cubierta parcialmente por basaltos y conglomerados del Terciario (CONAGUA, 2010). No aflora.

### *Traquita T (Tq)*

Unidad que abarca traquitas afaníticas. Presenta color café, rosa y rojo y textura por lo regular holocristalina traquítica, con feldespato potásico, plagioclasa sódica, augita, egiirina, hematita, apatito, actinolita y magnetita. Se sobreponen característicamente a esta unidad riolitas y tobas ácidas. Su expresión morfológica consiste en sierras de mediana elevación y en pequeños cerros y lomas alineadas en el sentido noroeste-sureste (CONAGUA, 2010). No aflora.

### *Riolita, Tom (R)*

Roca ígnea extrusiva de quimismo ácido formado por cuarzo, sanidino y ortoclasa, como minerales accesorios biotita y circón. En general la roca presenta tono gris claro en muestra y gris oscuro al intemperismo, pseudo estratificación y fracturamiento vertical que favorece la formación de bloques de 1 a 3 metros de diámetro. Su morfología es de cerros con laderas escarpadas (CONAGUA, 2010). No aflora.

### *Toba ácida, Tom (Ta)*

Unidad ígnea explosiva formada por: toba ácida, toba riolítica, toba riodacítica e ignimbrita; en general la mineralogía está representada por andesina, oligoclasa y cuarzo, unidos por una matriz vítrea. Las rocas presentan intercalaciones de riolita y horizontes volcano clásticos, cuyos fragmentos varían de 5 a 10 mm de diámetro, unidos por una matriz tobácea y cementante silíceo.



La unidad presenta fracturamiento vertical y subvertical, formando bloques de dimensiones variables. Sobreyace discordantemente a caliza del Cretácico e infrayace a roca ígnea y sedimentaria del Terciario Superior. La expresión morfológica está representada por: mesetas, mesetas basculadas, sierras y lomerío de pendiente suave. No aflora.

#### *Toba intermedia, Ts (Ti)*

Unidad en la que se incluyen tobas soldadas de composición traquítica a latítica de color gris, pardo y rojizo, textura piroclástica mero y holocristalina. Está sobrepuesta por tobas ácidas y cubierta por conglomerados de terciario (CONAGUA, 2010). No aflora.

#### *Basalto, Ts (B)*

Unidad ígnea efusiva, formada mineralógicamente por: labradorita, con minerales accesorios: olivino y augita, unidos por una matriz de plagioclasas sódicas. Generalmente forma derrames de gran magnitud, por extrusión fisural o de un cono central. La roca es masiva con vesículas las cuales se encuentran rellenas de calcita, acusa disyunción columnar prismática, así como intercalación de horizontes de escoria volcánica y ceniza volcánica. Sobreyace discordantemente a calizas del Cretácico inferior y a rocas ígneas del Oligoceno-Mioceno.

La unidad es correlacionable con las emisiones basálticas ocurridas en el Plio-Cuaternario (Marc Tardy, 1977). La morfología está representada por: conos volcánicos, derrames con fase de malpaís y mesetas. Sus afloramientos son amplios (CONAGUA, 2010).

### ***4. Rocas Ígneas Intrusivas***

#### *Granito, T (Gr)*

Esta unidad consiste de granito de muscovita, de textura holocristalina equigranular. Es de color gris claro con tonos de verde en superficie fresca, mientras que en superficie intemperizada, presenta tono café. La unidad se presenta poco fracturada. Se presenta como un gran promontorio de peñascos redondeados que contrasta con las ricas circundantes (CONAGUA, 2010).



## **5. Rocas Volcanosedimentarias**

### *Volcanosedimentario, Ti*

Unidad formada por material ígneo piroclástico, depositado en zonas cercanas al centro de expulsión e intercalada con horizontes sedimentarios. Texturalmente al microscopio presenta textura volcánico-clástica, formada mineralógicamente por: cuarzo, feldespatos, fragmentos de roca hematizadas y biotita, cementadas por carbonato de calcio, los fenocristales se encuentran en una matriz vítrea. La secuencia presenta horizontes tobáceos de 20 a 30 cm de espesor, estratos volcánico-sedimentarios de granulometría arenosa y estratos de 30 a 40 cm de espesor. Acusa fracturas verticales y sub verticales en diferentes direcciones. La unidad infrayace a tobas ácidas del Oligoceno-Mioceno, se infiere que descansa en discordancia con caliza del Cretácico inferior. Se expresa morfológicamente en forma de lomas de pendiente suave (CONAGUA, 2010). No aflora.

## **6. Geología del subsuelo**

Con excepción de los materiales de depósito como el aluvión y lacustre, la mayor parte los afloramientos corresponden a roca riolítica y toba félsica, así como algo de caliza al oeste de la zona. Hacia la parte de la laguna, la ausencia de pozos con caudales considerables nos da un indicio de una constitución predominantemente arcillosa de los depósitos cuaternarios de aluvión.

De acuerdo a la información de estratigrafía del acuífero reportada por CONAGUA (2010) se elaboró la Tabla 4. En dicha Tabla y en la Figura 12 tomada del estudio mencionado, se observa que las unidades hidroestratigráficas 3 y 4 constituyen propiamente el acuífero, comprendido por un medio sedimentario continental aluvial y el un medio conglomerados terciarios compuesto por gravas y arenas de buena permeabilidad.



Tabla 4.- Unidades hidroestratigráficas del acuífero Los Juncos

NIVEL	ESTRATIGRAFÍA	DESCRIPCIÓN
Unidad 1	Ki(cz) y Ki(cz-lu) Rocas Sedimentarias	Calizas y lutitas del Cretácico inferior con porosidad secundaria por fracturas y fallas, también se presentan procesos de disolución. Funcionan como zonas de recarga al constituir partes altas de las sierras de El Chilicote, El Jabalí y Chupadero (noroeste), y de la sierra la Mojina (centro sur); a profundidad llegan a formar parte del basamento del acuífero.
Unidad 2	Ts(A) y T(R-Ta) Rocas ígneas extrusivas	Tobas riolíticas y tobas riodacíticas y andesitas en menor proporción, con fuertes cambios texturales y estructurales con diferentes grados de porosidad, por fracturamiento fundamentalmente. Se extienden ampliamente desde las sierras El Aguaje, Los Órganos y Encinillas (zona de recarga), pero pueden constituir parte del acuífero.
Unidad 3	(UH3). Ts(Cg) y Ts(B) Conglomerados terciarios	Gravas y arenas continentales de rocas volcánicas con buena permeabilidad y basaltos con mediana a alta permeabilidad, forman el acuífero principal de la zona.
Unidad 4	(UH4). Q(la) y Q(al) Sedimentos fluviales de relleno de valle	Resultan en un medio poroso granular de buen espesor, con mediana permeabilidad y bajo de ellos basaltos pliocénicos-cuaternarios de alta permeabilidad.

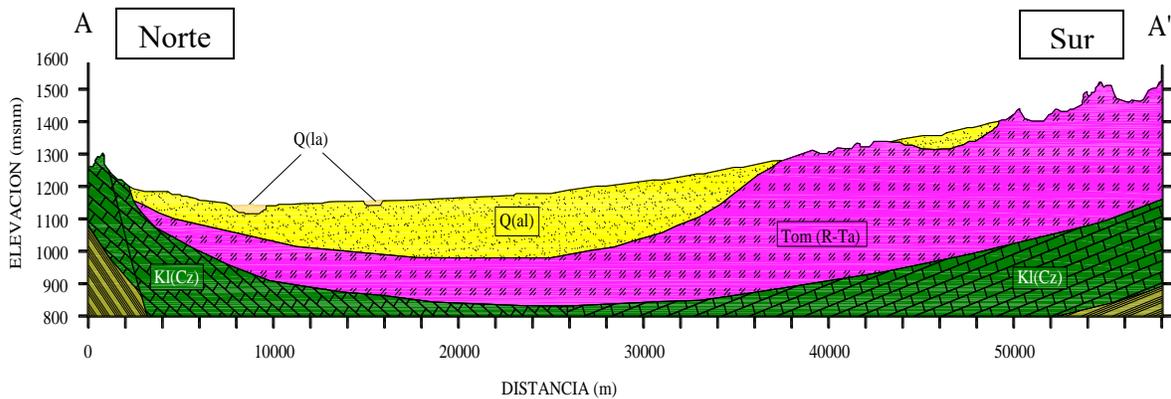


Figura 12.- Sección geológica en el acuífero Los Juncos (CONAGUA, 2010)

## 2.8 FUNCIONAMIENTO DEL ACUÍFERO

A continuación se presenta un resumen de la descripción del funcionamiento hidrogeológico del acuífero Los Juncos realizado por CONAGUA en el año 2010.

### 1. Hidrogeología

El acuífero es de naturaleza geológica esencialmente volcánica, están expuestas rocas ígneas de tipo extrusivo; andesítica- riolítica y basáltica. Limos, arenas y gravas con cantidades variables de arcilla, un depósito sedimentario de buena permeabilidad de origen aluvial y conglomerático que se intercala con las rocas volcánicas basálticas permeables (CONAGUA, 2010).

### 2. Parámetros hidráulicos

Mediante diversas pruebas de bombeo fue posible obtener valores puntuales de los parámetros hidráulicos del acuífero, esencialmente en la zona centro norte, que es donde se concentran la mayor cantidad de aprovechamientos; la conductividad hidráulica tiene un valor medio de 1.08 m/día. La permeabilidad hidráulica comprende entre 0.6 y 1.7 m/día en la parte central del acuífero, al noroccidente del acuífero varía de 0.10 a 0.15 (CONAGUA, 2010).



### 3. Zonas de recarga

En el área de estudio tres sierras importantes contribuyen a los escurrimientos superficiales más significativos: Sierra Mojina, Sierra el Chilicote y Sierra el Chupadero (Figura 13), ya que a mayor pendiente corresponderá una mayor escorrentía de las aguas en la red de drenaje y afluentes del cauce principal (Navarrete, 2004).



*Figura 13.- Sierras de la cuenca del acuífero los Juncos.*

Las sierras muestran una permeabilidad de baja a media, porosidad secundaria por fracturamiento y fallamiento. El Chilicote, El Jabalí y Chupadero en la porción noroccidental del acuífero, y de la sierra la Mojina en la porción centro sur; a profundidad llegan a formar parte del basamento del acuífero. Así mismo la vegetación presente tanto en las sierras como en el valle retarda el flujo hídrico superficial otorgando tiempo adicional para penetrar al suelo favoreciendo la infiltración (López Cadenas de Llano, 1998). De acuerdo con CONAGUA (2010) la recarga al acuífero ocurre además por flujo horizontal del acuífero adyacente “Laguna Los Alazanes” en la porción suroriental (Figura 14).

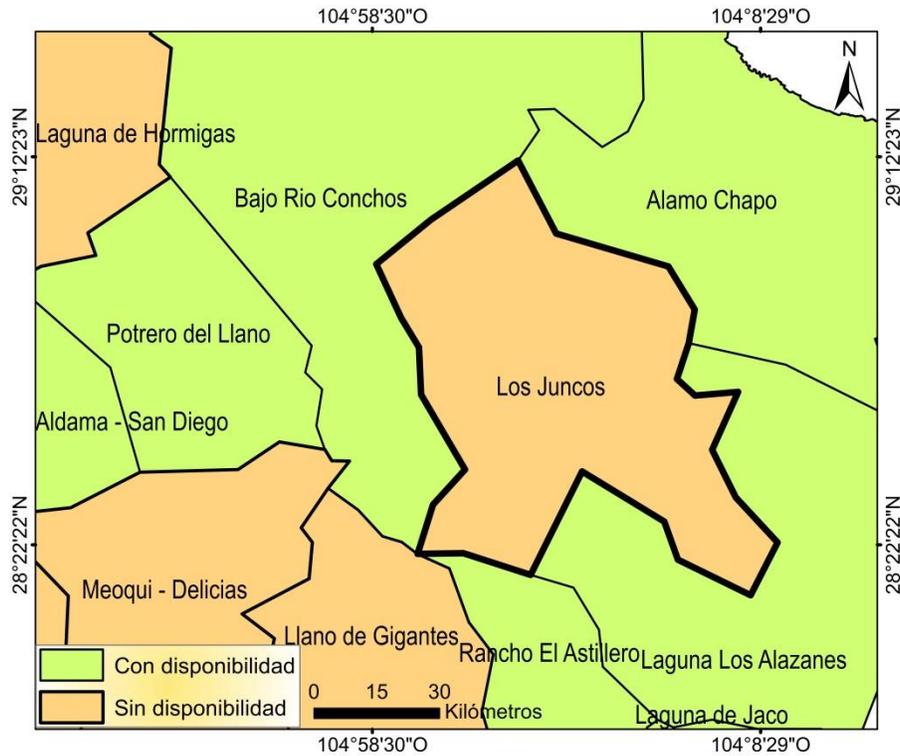


Figura 14.- Acuíferos adyacentes al Acuífero Los Juncos (CONAGUA, 2010).

#### 4. Topografía

La topografía del acuífero se distingue por una gran llanura con niveles entre 1140 y 1340 msnm, rodeada de sierras que no rebasan de 2040 msnm (Figura 15). El nivel máximo corresponde a la Sierra Encinillas, al Sur-este del Acuífero y la sierra El Aguaje al Este del acuífero (Figura 16).



Figura 15.- Topografía en el Acuífero Los Juncos (CONAGUA, 2010).

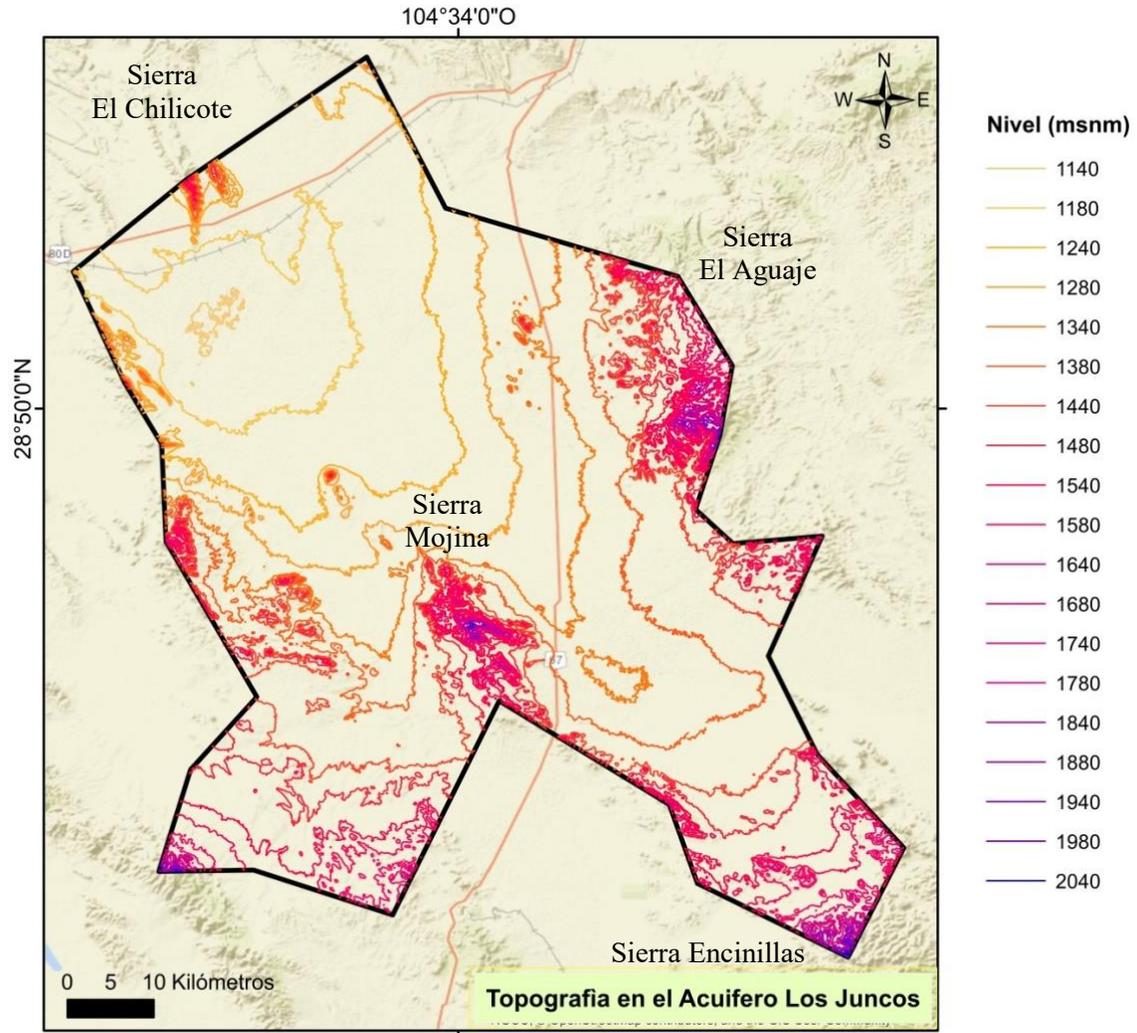


Figura 16.- Mapa de curvas de nivel topográficas (CONAGUA, 2010).



## Capítulo 3. METODOLOGÍA

### 3.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La metodología se divide en trabajo de campo y trabajo de gabinete. Contando con amplia información sobre el acuífero, el trabajo de gabinete consistió en el análisis de los antecedentes, principalmente de estudios químicos del agua, registros históricos, así como la información disponible sobre el acuífero: la hidrografía, fisiografía, hidrología, climatología, geología, entre otros. Con lo anterior fue posible establecer un marco de referencia respecto a las condiciones actuales del funcionamiento del sistema del acuífero y correlacionarlas principalmente con la información obtenida en el trabajo de campo.

#### *Trabajo de gabinete*

Para el análisis de antecedentes y la interpretación de la información disponible se realizaron mapas, gráficas y Tablas de datos, que podrán compararse con los resultados del estudio presente (Capítulo 4). De esta forma se podrá comprender aspectos hidrogeológicos de la evolución del acuífero.

#### *Datos climatológicos*

Como parte del trabajo de gabinete se hizo un análisis de datos climatológicos sobre el acuífero. Entre los datos más recientes proporcionados por la dependencia de CONAGUA en Chihuahua están los datos de las estaciones meteorológicas que se localizan cerca del acuífero, registrando la precipitación media, la temperatura media y evaporación media. Con la aportación de dichos registros históricos se pueden aplicar métodos de cálculo para obtener el balance de agua subterránea tales como el Método de Turc y Torntwahit para el cálculo de evapotranspiración, el método de Blanney-Criddle para determinar la evapotranspiración de los cultivos, la metodología de la norma mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 para determinar el volumen de escurrimiento y, de la misma norma, la ecuación de balance hidrometeorológico para determinar la disponibilidad de agua en el acuífero.



### *Investigación bibliográfica*

Para enriquecer el tema se consultaron estudios previos; artículos de investigación, revistas científicas, publicaciones diversas y libro de importantes autores fueron consultados para complementar la investigación y fundamentar los resultados. Evaluando la información obtenida se dio prioridad a aquella aportación en temas de calidad del agua así como a la información geológica del sitio.

### **3.2 MUESTREO EN CAMPO**

En esta sección del capítulo se describen las actividades de campo relativas al programa de monitoreo de aprovechamientos de agua subterránea. El monitoreo se realizó en el mes de noviembre del año 2018. Cabe mencionar que la temporada alta para el funcionamiento de pozos de acuerdo al calendario agrícola es de marzo a agosto. La selección de pozos se basó en el censo realizado en el año 2010 por la CONAGUA, que consta de 1489 pozos, los usos corresponden en un 85% a la agricultura, 10% al uso doméstico, 4% al uso pecuario y un poco menos del 1% al servicio urbano e industrial (CONAGUA, 2010). Se hizo una comparativa con los pozos de la red de 1985 con la intención de continuar con dicha red, sin embargo la selección de pozos se redujo a la disponibilidad con la que se contaba para tomar la muestra de acuerdo a diversos factores.

En las visitas al sitio se recabó amplia información como: datos del propietario, profundidad de la obra, equipo de bombeo, usos, antigüedad, etc. La localización de los pozos fue posible con apoyo de sendos propietarios en el caso de algunos pozos, así mismo se contó con el apoyo de trabajadores de la zona para ubicar pozos en las zonas más retiradas de la población. Por medio de un equipo multiparamétrico marca HANNA modelo HI 9828 (Figura 17) se hicieron las mediciones de los parámetros físicos en campo como: conductividad eléctrica (CE), pH, sólidos disueltos totales (STD) y Temperatura (T) en todos los pozos (Figura 18). En todos y cada uno de los pozos visitados se tomaron dos muestras; la primera de 1000 ml para el análisis de iones principales, y la segunda de 250 ml para análisis del arsénico.



Equipo y materiales que se utilizaron para el muestreo:

- Una jarra de plástico de boca ancha para tomar la muestra de agua directa del pozo
- Botellas de plástico con tapa hermética de 1000 ml y 250 ml, debidamente etiquetadas con número.
- Una hielera con hielo suficiente para mantener a baja temperatura las muestras recolectadas
- Equipo GPS para registrar coordenadas de los pozos
- En algunos casos se utilizó una varilla corrugada cubierta con plástico para presionar la válvula tipo “bola” para mayor presión de agua
- Tabla de apoyo y formato impreso para anotaciones
- Cámara fotográfica
- Se contó con apoyo de vehículo por parte de la universidad
- Equipo multiparamétrico marca HANNA modelo HI 9828

Procedimiento realizado en campo:

- Una vez localizado el pozo con ayuda de su propietario, se accionó la válvula del pozo y se dejó correr el agua unos minutos antes de tomar la muestra.
- Se prepararon los envases marcados, y se conectó la sonda al equipo multiparamétrico.
- Se lavó la jarra con el agua del pozo mismo para posteriormente llenarla nuevamente con la muestra, ahí mismo se hizo la medición de los parámetros mencionados, con el equipo multiparamétrico introduciendo los sensores del equipo en la muestra con agua del pozo y dejándolos sumergidos unos minutos hasta que las lecturas se estabilizaran.
- Se tomaron fotografías de la lectura en la pantalla del equipo multiparamétrico.
- Se anotaron los datos indicados en el equipo multiparamétrico y las observaciones de los datos más importante del sitio en un registro.



- Los envases de plástico de 1000 ml y 250 ml se lavaron con el agua de pozo para posteriormente ser llenados con agua del mismo.
- Se almacenaron las muestras tomadas en los envases dentro de la hielera de manera inmediata.
- Se tomaron fotografías del pozo.
- Una vez terminado del trabajo de muestreo en el sitio se corroboran las coordenadas del mismo con el equipo GPS.



Figura 17.- Equipo multiparamétrico marca HANNA. Figura 18.- Sensores del equipo multiparamétrico HANNA.

Siguiendo las indicaciones que establece la NOM-230SSA1-2002 se muestrearon un total de 27 aprovechamientos a lo largo de 2 días, de los cuales 26 están destinados al uso agrícola y 1 al uso doméstico y se encuentran distribuidos principalmente en los poblados El Oasis, Las Bombas, Nueva Holanda, Cadillal y Los Cienes. Todos los pozos son de fácil acceso y ubicación, se llega a ellos por medio de brechas y veredas. El muestreo se realizó entre dos personas. Entre las observaciones más importantes se menciona que algunos pozos no se encontraban en funcionamiento, siendo necesario activarlos por alrededor de 10 minutos para tomar la muestra correspondiente (Figuras 19 a la 23).



Figura 19.- Vista del pozo LJ- 1 y Figura 20.- Vehículo proporcionado por la universidad.



Figura 21.- Medición de parámetros de campo del pozo LJ-16 y Figura 22.- Vista del pozo LJ-16.



Figura 23.- Recolección y medición en sitio de la muestra LJ-16 en la comunidad “Las Bombas”.



### 3.3 ANÁLISIS DE MUESTRAS

El análisis de los parámetros fisicoquímicos se llevó a cabo en dos laboratorios distintos:

1. Laboratorio de Química III de la Facultad de Ciencias Químicas, UACH.
2. Laboratorio de Química Analítica III de la Facultad de Ciencias Químicas, UACH.

#### *1. Laboratorio de Química III de la Facultad de Ciencias Químicas, UACH.*

En este laboratorio que se encuentra a cargo de la Dra. Beatriz Adriana Rocha Gutiérrez, se midieron los parámetros de Alcalinidad Total y aniones y cationes; los resultados fueron reportados en unidades de mg/l  $\text{CaCO}_3$  y mg/l, respectivamente. Para las 27 muestras colectadas se midieron los siguientes cationes: Sodio ( $\text{Na}^+$ ), Potasio ( $\text{K}^+$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y los aniones: Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), Cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), Fluoruros ( $\text{F}^-$ ) y Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ).

Las técnicas utilizadas se describen en la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-036SCFI-2001. En este laboratorio se encuentra el equipo Cromatógrafo de Iones ICS 1100 marca DIONEX (Figura 24), y puede medir aniones y cationes por separado, utilizando columnas específicas para cada uno de ellos.



Figura 24.- Equipo Cromatógrafo de Iones ICS 1100 marca DIONEX



El equipo se basa en la cromatografía de intercambio iónico donde conservan los analitos (que son los aniones o cationes que se van a cuantificar) basándose en las interacciones de Coulomb. La fase estacionaria muestra en la superficie grupos funcionales iónicos que interactúan con iones de carga opuesta del analito. Una reacción de intercambio iónico es aquella en la cual un átomo o una molécula que ha ganado o perdido un electrón, y que por lo tanto adquiere una carga positiva o negativa, se intercambia por otra partícula de igual signo pero de naturaleza diferente. Esta partícula, inicialmente ligada a la superficie de un cuerpo sólido inerte, pasa a la solución y su lugar es suplido por otra partícula que queda retenida temporalmente en la superficie del polímero o soporte (Rocha, 2010). Este tipo de cromatografía se subdivide a su vez en dos técnicas:

- La cromatografía de intercambio catiónico, que retiene cationes cargados positivamente debido a que la fase estacionaria muestra un grupo funcional cargado negativamente.
- La cromatografía de intercambio aniónico, que retiene aniones usando grupos funcionales cargados positivamente.

## ***2. Método para la alcalinidad***

De acuerdo a la norma NMX-AA-036-SCFI-2001 que establece el método de prueba para la determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, se analizaron las muestras en el laboratorio de Química III de la Facultad de Ciencias Químicas, UACH. Mediante este procedimiento se reporta la Alcalinidad total como  $\text{CaCO}_3$  en mg/l, y mediante dichos valores se obtiene la concentración de bicarbonatos en la muestra.

## ***3. Laboratorio de Química Analítica III de la Facultad de Ciencias Químicas, UACH.***

El laboratorio de Química Analítica III a cargo la Dra. María de Lourdes Ballinas Casarrubias, cuenta con un equipo de Absorción Atómica (Figura 25). Para el análisis de arsénico, a este laboratorio se llevaron 13 muestras seleccionadas de entre las 27 tomadas en los puntos visitados, estas fueron seleccionadas de acuerdo a los niveles de Flúor que presentaron, ya que As y F<sup>-</sup> presentan normalmente una alta afinidad geoquímica.



El análisis que se lleva a cabo en el laboratorio sigue la técnica de "Determinando arsénico en muestras de agua potable mediante la técnica de generador de hidruros en el equipo de absorción atómica", este procedimiento se realiza siguiendo la NOM-AA-051-SCFI-2001: Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. El equipo de Espectrometría de Absorción Atómica es sin duda la técnica más utilizada en el análisis elemental, debido a la simplicidad de su operación y sensibilidad asequible, así como la robustez y costo moderado de la instrumentación.



*Figura 25.- Análisis del arsénico: Equipo de Absorción Atómica (Facultad de Ciencias Químicas).*

### **3.4 APLICACIÓN DE TÉCNICAS HIDROGEOQUÍMICAS**

Para la representación e interpretación de los resultados de laboratorio, se aplicaron algunas técnicas hidrogeoquímicas como gráficas, diagramas y mapas hidrogeoquímicos. El análisis de la calidad del agua muestra su composición y con ésta se determinan los posibles usos de la misma en base a los límites oficiales permisibles, ya sea que se trate de agua para consumo humano, riego agrícola o determinados usos en la industria. Por otra parte, a partir de las técnicas hidrogeoquímicas es posible definir el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero, identificar la dirección del flujo subterráneo, mezclas e interconexiones de agua de diferentes procedencias, origen y tipo de agua subterránea, etc. También permite ver con facilidad el comportamiento y evolución de agua en un territorio determinado a través del tiempo (Fagundo, 2002).



Los gráficos a utilizar son: Diagrama de Wilcox, Diagramas de Piper, Diagramas de Schöeller, Diagramas de Collins y Diagramas de Stiff.

### *Diagramas de Piper*

Es uno de los diagramas más utilizados y resulta muy útil para representar tres componentes de aniones o cationes, ya que se trata de dos triángulos equiláteros en los cuales cada vértice representa un componente puro, tal y como los simboliza el 100% colocado en cada uno de ellos (Freeze & Cherry, 1979). La muestra se ubica en el gráfico de acuerdo al porcentaje de concentración de cada ion, dicho porcentaje se refiere a los meq/l del ion considerado, éste se obtiene mediante el balance iónico. La ventaja del diagrama de Piper es que permite clasificar los diferentes tipos de familias de aguas de varias muestras a la vez (Figura 26).

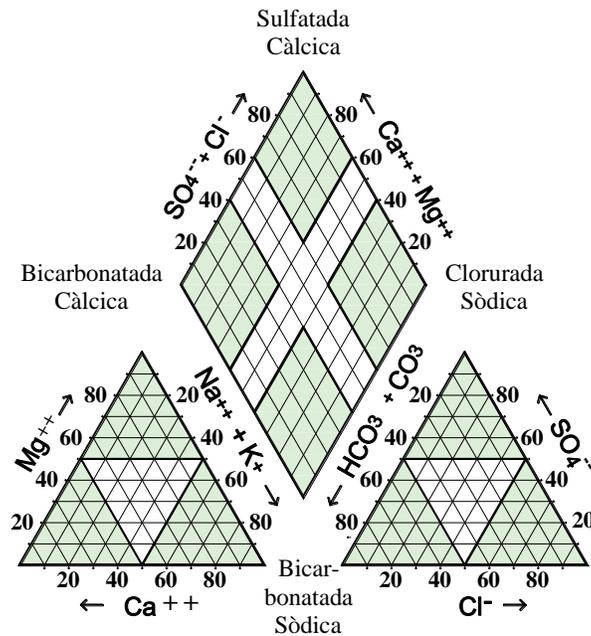


Figura 26.- Diagrama de Piper, (Piper-Hill-Langellier, 1940).



### *Diagrama de Schöeller*

El Diagrama de Schöeller permite representar varias muestras en un mismo diagrama en forma de gráfica, para que puedan ser comparadas (Freeze & Cherry, 1979). En el eje vertical del grafico se asocian los valores numéricos mientras que en el eje horizontal se disponen los iones y cationes que se representa. Recomendable para presentar un volumen pequeño de muestras (Figura 27).

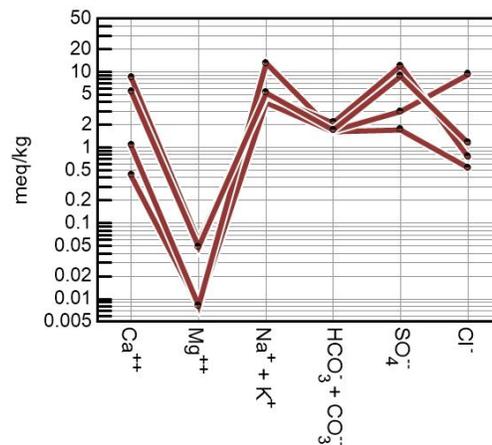


Figura 27.- Simbología diagrama de Schöeller.

### *Diagrama de Collins*

Mejor conocido como “de barras” y propuesto por Collins (Figura 28). Permite visualizar a los iones presentes en el agua por columnas verticales y se dividen en segmentos que indican las concentraciones de los aniones y cationes que contiene la muestra, la concentración está expresada en meq/L (Freeze & Cherry, 1979). La ventaja de este diagrama es que cuando las diferencias en el balance iónico de una muestra son muy grandes, éstas se ponen de manifiesto en forma notoria en el diagrama de Collins.

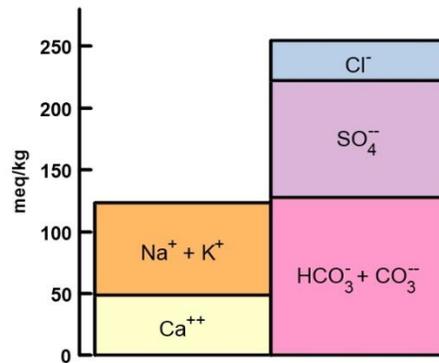


Figura 28.- Simbología del Diagrama de Collins.

### Diagramas de Stiff

Los diagramas de Stiff (Figura 29) permiten clasificar las familias de aguas y presentan una mejor imagen del total de la concentración de sales. La disposición del diagrama permite apreciar la variación de las relaciones entre cationes o aniones. Una ventaja de este tipo de gráfico es que se adapta muy bien a ser utilizado en mapas hidrogeoquímicos y se pueden hacer comparaciones rápidas (Freeze & Cherry, 1979).

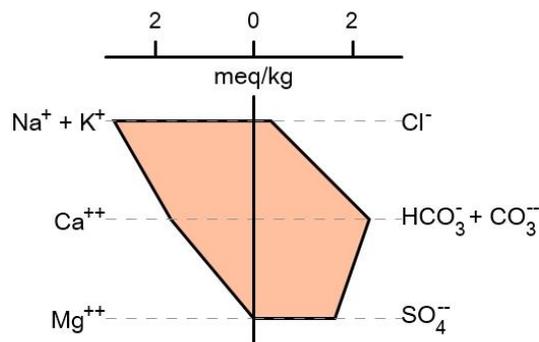


Figura 29.- Simbología diagrama de Stiff (Desarrollado por H.A. Stiff, 1951).

### Diagramas Circulares

Consiste en representar en un círculo de radio proporcional al contenido de iones (mg/l o meq/l) (Pulido, 2014), por lo que el tamaño del círculo corresponderá a su concentración total de iones (Figura 30). Tiene diversas ventajas; permiten visualizar su



concentración total comparando con cada muestra y representar en mapas hidrogeoquímicos los puntos de mayor concentración de SDT y sus direcciones de flujo.

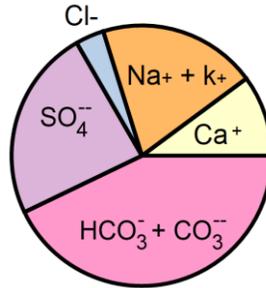


Figura 30.-Simbología de Diagramas Circulares (Daves and De Wiest, 1966)

### 3.5 INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN PARA INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Una vez integrada la información de campo, laboratorio y bibliográfica, se continúa con trabajo de gabinete para la interpretación de resultados y conclusiones. Con la asistencia del software GWB 12 (Geochemist's Workbench) se realizaron los diagramas de Collins, Piper, Schöeller y Circulares. El diagrama de Wilcox se elaboró con el programa Easy-Quim. Para cálculo de índice de saturación (IS) se aplicó la herramienta PHREEQC. Con el apoyo del Software ARCGIS 10.2 se elaboraron los mapas hidrogeoquímicos, de isolíneas de concentración para los Sólidos Disueltos Totales (SDT), Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Sodio (Na<sup>+</sup>), Bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Fluoruros (F<sup>-</sup>), Cloruros (Cl<sup>-</sup>), Sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) y Arsénico (As) de las muestras de agua subterránea.



## Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en los antecedentes con los que se cuenta y que se describen en el capítulo 2, se enfatizaron algunos aspectos del acuífero que se consideran importantes, mismos que se describen a continuación.

El acuífero se desarrolla en un depósito sedimentario aluvial y conglomerático de mediana permeabilidad, que se intercala con rocas volcánicas basálticas; las rocas calcáreas y volcánicas antiguas de baja permeabilidad que subyacen al acuífero representan a profundidad el basamento del mismo. La recarga al acuífero ocurre por la infiltración de agua de lluvia en las elevaciones montañosas que bordean la planicie y, en menor proporción, por infiltración de agua de lluvia directa sobre el valle, por flujo subterráneo del acuífero adyacente de Laguna Los Alazanes en la porción suroriental y por retorno de riego. La descarga ocurre preferentemente por el bombeo de pozos.

Como una aportación a los resultados de esta investigación se presenta a continuación el balance hidrológico realizado para el área y, posteriormente, los resultados de la evaluación hidrogeológica obtenida con la información de calidad del agua disponible.

### 4.1 BALANCE HIDROLÓGICO

El balance hidrometeorológico tiene como principio el modelo del ciclo hidrológico donde la precipitación, sea en forma de lluvia, nieve, etc., constituye la entrada de agua al sistema. Una parte de ésta puede ser interceptada por plantas o construcciones, para posteriormente ser evaporada hacia la atmósfera. La otra fracción de la precipitación que llega hasta la superficie puede infiltrarse para en su momento formar parte del flujo de agua subterránea, o puede permanecer sobre el terreno, llenando depresiones topográficas. Nótese que el concepto no es tan simple, puesto que el agua que se almacena parcialmente en la superficie puede estar sujeta a evaporaciones, infiltraciones y escurrimientos superficiales; incluso la parte infiltrada que se encuentra en zonas someras; participa en los procesos de capilaridad y en ciertas condiciones también es evaporada. La zona de estudio



referente al acuífero tiene una extensión de 2500 km<sup>2</sup>, de acuerdo a la poligonal simplificada que se muestra en la Figura 31. Haciendo un análisis de las componentes anteriores, para un periodo anual en donde se considere nulo el almacenamiento, la precipitación que se genere toma diversos caminos, dando con ello la ecuación simplificada de balance hidrometeorológico siguiente:

$$\text{Precipitación} = \text{Evapotranspiración} + \text{Escurremientos Superficiales} + \text{Infiltración}$$

### *Manejo de datos climatológicos*

Son 3 las estaciones climatológicas que se localizan cerca del acuífero: Ojinaga, Luis L. León y Camargo, con registros históricos mensuales que van del año 1980 a la actualidad. A partir de esta información, proporcionada por la dependencia estatal de CONAGUA en Chihuahua, se organizaron los datos de precipitación y temperatura correspondientes a los últimos 29 años (1990 a 2018), como se observa en la Tabla 5.

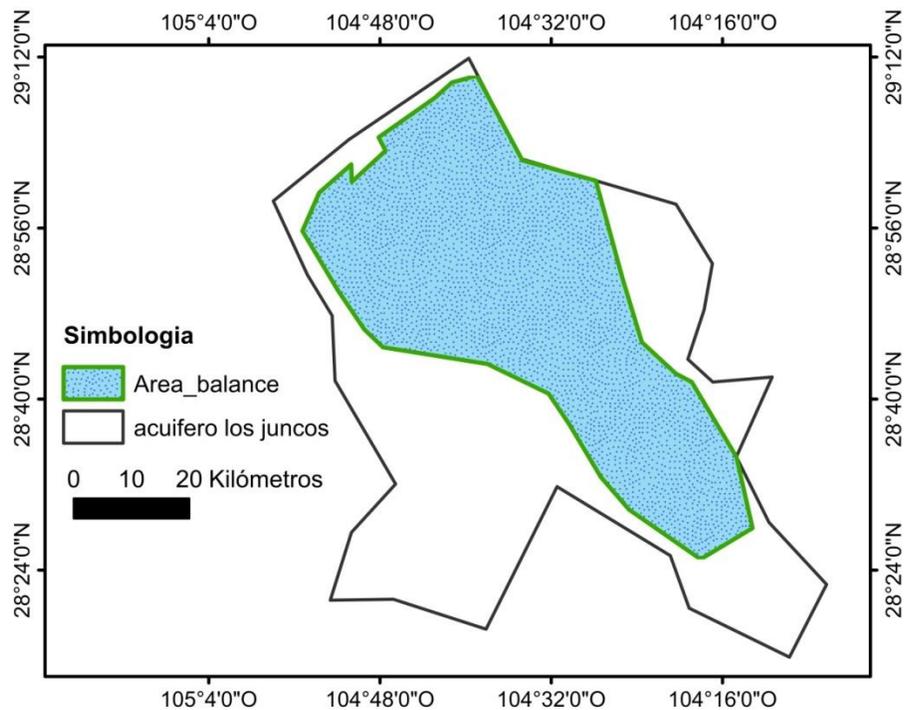


Figura 31.- Área de balance hidrológico.



Tabla 5.- Datos de estaciones climatológicas (1) (CONAGUA, 2019)

AÑO	A CAMARGO (CCOCH) (27°41'11.3' 105°10'19.1')		B OJINAGA (OJNCH) (29°33'54.78' 104°24'39.66')		C LUIS L. LEON (LLNCH) (28°59'3.08' 105°16'51.33')	
	Precipitación (mm)	Temperatura (media)	Precipitación (mm)	Temperatura (media)	Precipitación (mm)	Temperatura (media)
1990	478,4	19,5	305,9	21,1	315,2	20,2
1991	533,6	18,6	361,2	20,6	465,7	19,3
1992	308,3	19,1	346,1	21,1	274,4	18,8
1993	312,7	18,6	300,0	21,8	252,0	18,9
1994	201,3	20,7	133,2	23,5	163,3	20,2
1995	234,9	20,3	106,3	22,2	226,3	19,3
1996	363,4	19,8	270,5	20,2	374,2	19,7
1997	281,6	19,3	245,3	20,7	362,1	19,8
1998	190,7	20,6	141,4	23,1	222,0	21,4
1999	211,4	19,8	116,0	22,7	206,3	20,5
2000	218,7	20,2	227,5	22,8	389,8	20,9
2001	205,6	21,4	146,9	23,8	212,4	22,0
2002	254,0	20,8	151,1	23,0	275,2	22,2
2003	450,5	20,4	283,6	22,5	370,6	21,8
2004	505,0	19,9	399,5	22,5	574,1	21,1
2005	212,1	20,5	171,5	23,3	258,0	22,0
2006	264,5	20,3	143,1	22,6	284,2	21,7
2007	268,3	20,4	145,6	22,6	263,1	21,9
2008	478,5	20,6	260,5	21,9	404,2	20,6
2009	363,3	21,2	140,0	22,1	388,1	20,7
2010	451,9	20,5	149,5	21,3	234,5	19,9
2011	97,7	20,8	76,8	22,1	58,1	21,4
2012	294,4	22,1	137,5	22,3	220,3	21,9
2013	479,5	20,3	292,6	21,2	447,4	21,0
2014	312,0	21,1	223,4	21,2	316,8	20,8
2015	307,5	21,7	182,5	21,8	244,0	21,8
2016	299,0	21,9	283,8	22,6	317,5	24,3
2017	376,4	20,8	239,5	22,9	348,2	25,3
2018	127,1	19,0	266,1	22,6	224,2	25,0

(1) Los datos no registrados en las estaciones fueron calculados mediante regresión lineal y corresponden al año 1990 en la estación Ojinaga y a los años 1990 y 1991 de la estación Luis L. León.



Los datos de la Tabla 5 muestran que en el año 2004 se tuvo la mejor temporada de lluvias, mientras que el año 2011 se consideró como un año de sequía. Es posible deducir a partir de los datos históricos climatológicos que en los últimos 29 años el acuífero Los Juncos no ha podido obtener recarga significativa a partir de la lluvia, por lo que el agua subterránea que se extrae no es renovable. Esto será determinado mediante el balance de agua subterránea en el que se cuantifica la diferencia de entradas y salidas al acuífero. La temperatura media anual y la evaporación son datos sustanciales en los cálculos para determinar valores en el balance de agua.

### ***Precipitación***

Como bien se mencionó, el balance de agua parte de la precipitación como principal fuente de entrada. Con la finalidad de obtener el valor ponderado de precipitación en el área total del acuífero se aplicó la técnica de polígonos de Thiesen, utilizando la información de la Tabla 5. La cuenca que corresponde al acuífero Los Juncos tiene un área total de 4949 km<sup>2</sup>. Los resultados se observan en la Figura 32 y la Tabla 6.

*Tabla 6.- Polígonos de Thiesen de las estaciones climatológicas del Acuífero Los Juncos*

	ESTACION	PPmedia (mm)	AREA KM <sup>2</sup>	% AREA	PP ponderada
A	CAMARGO (27°41'11.3' 105°10'19.1')	313,2	544,0	11,0	34,4
B	OJINAGA (29°33'54.78' 104°24'39.66')	215,4	1324,0	26,8	57,6
C	LUIS L. LEON (28°59'3.08' 105°16'51.33')	299,7	3081,0	62,3	186,6
	Total		4949,0	Promedio	278,7

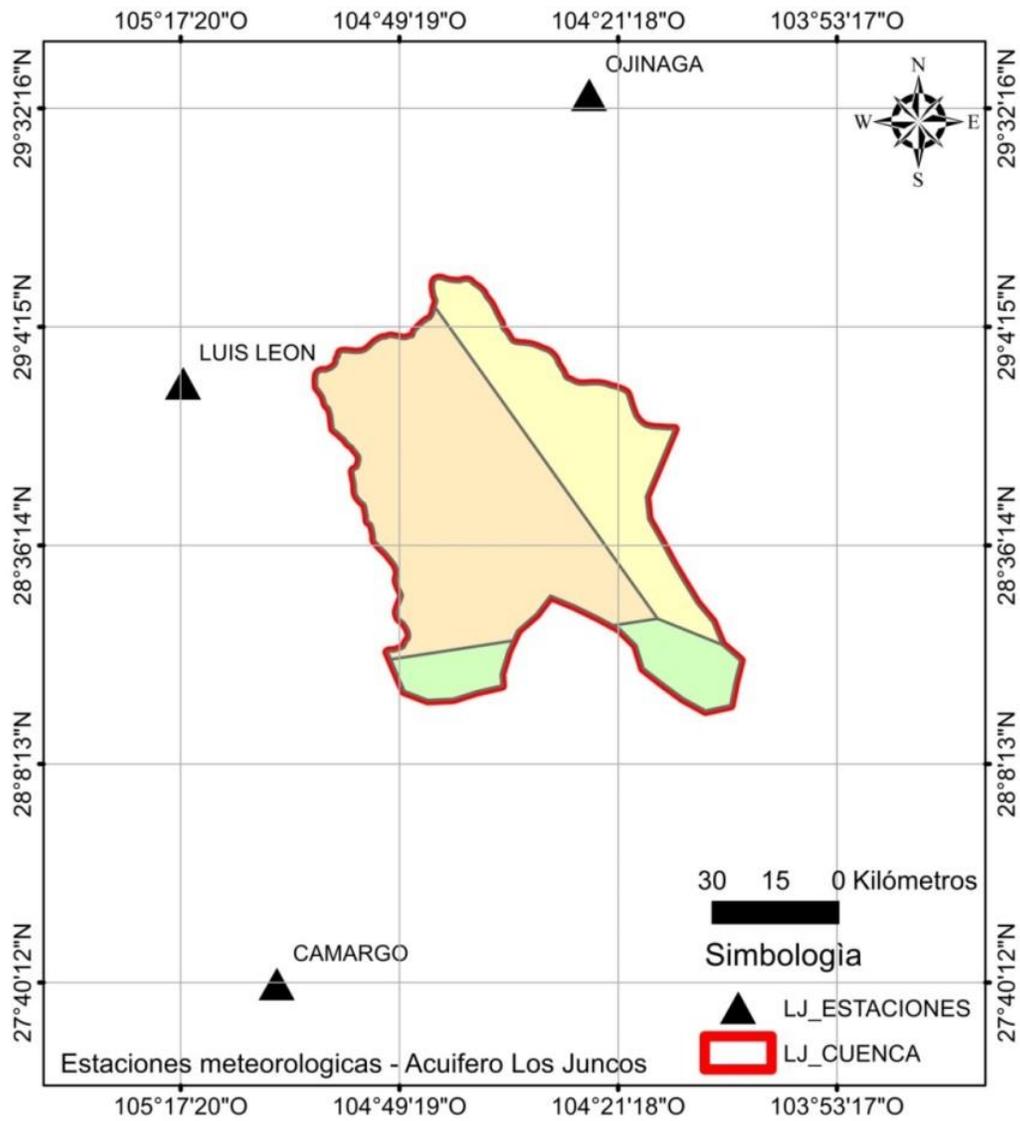


Figura 32.- Estaciones cercanas al acuífero Los Juncos.

Según datos mencionados en la Tabla 6, la lámina promedio de precipitación anual en la zona es de 278.7 mm, la cual aplicada al área del balance (Figura 31), nos da la cifra de 696.75 Mm<sup>3</sup> anuales por concepto de precipitación directa.

### ***Estimación de la extracción de agua subterránea***

El principal destino del agua subterránea extraída en el área de estudio es para el riego de los cultivos y una minoría para fines domésticos y pecuarios. Debido a que no se



cuenta con medidores en los aprovechamientos no se puede conocer el volumen de extracción (bombeo), pero si obtenemos el volumen requerido por cultivo, se puede conocer cuántos m<sup>3</sup> se están aprovechando. La evapotranspiración es un parámetro que evalúa la cantidad de agua que se utiliza para lograr el crecimiento de un cultivo dado. Este parámetro involucra la porción de agua que se evapora durante el riego, y el agua que es consumida por la propia planta cultivada. Para este acuífero, este parámetro es el que tiene más influencia en el balance geohidrológico, ya que representa el 98 por ciento del uso del agua que se extrae del acuífero.

*Método de Blanney-Criddle para determinar la evapotranspiración de los cultivos*

Blanney y Criddle desarrollaron una fórmula en EEUU en la que intervienen la temperatura media mensual y el porcentaje de horas luz mensual (CONAGUA, 2010). Utilizando como base la ecuación de Blanney-Criddle, la evaporación de los cultivos (ETc) está dada por:

$$ETc = ETo * Kc$$

Siendo:

Kc = el factor de cultivo, es decir, la proporción de agua que consume respecto a los otros cultivos;

ETo = la evapotranspiración de referencia que se calcula mediante:

$$ETo = p (0.46t + 8.13)$$

Donde:

ETo = evapotranspiración de referencia, donde se involucran los factores climáticos

p = porcentaje de radiación solar diaria respecto a la anual, según la latitud, y

t = temperatura media diaria

Los valores de Kc y p se obtienen mediante la Tabla de “Coeficientes de cultivo (Kc) para cultivos anuales”, para el valor de “p” se aplica la Tabla de porcentajes de horas de luz solar al día para cada mes del año en relación al total de días por mes. Dichas Tablas son información disponible para consulta y de las cuales se obtuvieron los valores para la zona



de estudio; adicionalmente el factor de cultivo depende de la etapa de crecimiento de la planta, es decir, según sea su desarrollo tendrá diferentes consumos de agua. Con la información climática se procede a calcular la evapotranspiración, considerando solamente factores ambientales (Tabla 7).

Con los valores de lámina anual por cultivo y el área total por hectáreas sembradas de cada cultivo se obtiene el volumen anual de agua necesario para el riego del distrito, como se muestra en la Tabla 8. Es decir, se requiere un mínimo de 468.89 Mm<sup>3</sup> de agua de pozo (volumen por bombeo) para satisfacer la necesidad de riego de 42,238 Has de cultivos.

*Tabla 7.- Cálculo de la Evapotranspiración anual para cada cultivo*

Mes		feb-18	mar-18	abr-18	may-18	jun-18	jul-18	ago-18	sep-18	oct-18	nov-18	dic-18	ene-19	Anual mm/ha
Dias		28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	
Horas sol (%)		0,3	0,3	0,3	0,31	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	
Temp.°C		18,8	24,0	24,5	34,3	35,5	34,0	30,5	29,5	22,0	15,5	16,5	13,5	
Eto (mm/d)		4,2	5,2	5,6	7,40	7,8	7,4	6,6	6,1	4,7	3,7	3,6	3,4	
alfalfa	Kc	0,8	0,9	1,0	1,10	1,1	1,1	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	
	ET (mm)	88,0	136,4	168,8	252,49	265,3	255,8	222,6	182,3	132,4	87,9	72,9	69,3	1934,1
Frijol	Kc				0,35	0,7	1,1	1,1	0,3					
	ET (mm)				80,34	164,4	251,3	226,7	54,7					777,4
Chile	Kc				0,35	0,7	1,1	1,1	0,9	0,9				
	ET (mm)				80,34	164,4	239,9	216,4	164,1	132,4				997,4
Algodón	Kc				0,45	0,8	0,8	1,2	1,2	0,8				
	ET (mm)				103,29	176,1	171,3	237,0	209,6	110,3				1007,7
Maíz	Kc				0,35	0,8	1,1	0,7	0,7					
	ET (mm)				80,34	176,1	251,3	134,0	118,5					760,2
Cacahuate	Kc				0,45	0,8	1,1	0,9	0,9					
	ET (mm)				103,29	176,1	239,9	175,2	154,9					849,4
Nogal	Kc	0,7	0,8	1,0	0,95	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	
	ET (mm)	76,2	120,3	160,3	218,06	223,1	251,3	226,7	173,2	139,7	71,4	72,9	69,3	1802,5
Sandía	Kc	0,7	0,8	1,0	0,95	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	
	ET (mm)	76,2	120,3	160,3	218,06	223,1	251,3	226,7	173,2	139,7	71,4	72,9	69,3	1802,5



Tabla 8.- Cálculo de volumen necesario de riego

Cultivo	Superficie (Has)	%	Evapotranspiración m <sup>3</sup> /año
Alfalfa	5847	13,8	113089230,9
Frijol	1207	2,9	9382757,7
Chile	1686	4,0	16815986,7
Algodón	26768	63,4	269732947,0
Maiz Sorgo	1803	4,3	13705704,0
Cacahuate	3140	7,4	23869057,5
Sandía	1040	2,5	8833413,3
Nogal	747	1,8	13465006,2
TOTAL	42238	100	468894103,4

### ***Evapotranspiración***

Del agua que precipita una gran parte se evapora a la atmosfera durante los escurrimientos, representando una pérdida importante. Para una estimación de la evapotranspiración real anual (ETR) cuando solamente se dispone de datos de precipitación y temperatura, se utilizan la fórmula de Turc y la formula Coutagne, obtenidas correlacionando datos de numerosas cuencas de todo el mundo.

#### ***a) Método de Turc***

La fórmula propuesta por Turc para calcular la evapotranspiración real se muestra a continuación.

$$Ev = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Donde:

Ev = Evapotranspiración (mm)

P = Precipitación (mm)

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

Con los datos de precipitación anual de 278.7 mm y temperatura promedio anual de 21,2°C respectivamente,  $L = 1308$ , el valor de evapotranspiración es de  $Ev = 293.7$  mm/añal.



### ***b) Método de Coutange***

La fórmula de Coutange también usa los mismos datos climatológicos y es la siguiente:

$$Evpt = P - x P^2$$

Donde:

Evpt = evapotranspiración en

P = precipitación en m/año, y

$$x = \frac{1}{0.8 + 0.14 T} \quad \text{m/año}$$

Donde:

T = temperatura media anual en °C

Este cálculo es aplicable para valores de precipitación comprendidos entre:  $1/8x < P < 1/2x$

Realizando los cálculos correspondientes el valor de evapotranspiración es  $Evpt = 258$  mm anual, los valores de evapotranspiración real (ETR) son cercanos al límite de validez que se establecen en los métodos empíricos de *Turc* y *Coutagne*. La primera nos arroja un valor superior a la cantidad de precipitación, indicando que no existiría ni escurrimientos ni infiltraciones, por lo que se considera en este caso más apropiado tomar los resultados de la segunda fórmula empírica.

Según el valor de la ETR obtenida por Coutagne (258 mm anuales) y aplicando el área de balance, el volumen de la ETR es:

$$VETR = 2500 \text{ km}^2 (0.258 \text{ m}) = 645.25 \text{ Mm}^3 \text{ anuales}$$

### ***Escurremientos***

La Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 estableció el método para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia la siguiente relación:

$$\text{VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL DE LA CUENCA} = \overline{\text{PRECIPITACION ANUAL DE LA CUENCA}} * \text{ÁREA DE LA CUENCA} * \text{COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO}$$



El coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ) se puede determinar en función del parámetro  $K$  que depende del tipo y uso de suelo, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) (Tabla 9). Los escurrimientos en la cuenca llegan a formar pequeñas lagunas o charcos para finalmente evaporarse también a la atmósfera.

Debido a que en la cuenca existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de  $K$  se calcula al subdividir la cuenca en zonas para obtener el promedio ponderado. Los usos de suelo que se encuentran en la cuenca son matorral desértico, pastizal y agricultura de riego.

Tabla 9.- Valores de  $K$  en función del tipo y uso del suelo (NOM-011-CONAGUA-2000)

USO DE SUELO	TIPO A	TIPO B	TIPO C
Barbecho, áreas desnudas	0.26	0.28	0.30
Cultivos	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizal (% cubierto)			
Más del 75% - poco	0.14	0.20	0.28
del 50 al 75% - regular	0.20	0.24	0.30
menos del 75% - excesivo	0.24	0.28	0.30
Bosque (% cubierto)			
Más del 75% - poco	0.07	0.16	0.24
del 50 al 75% - regular	0.12	0.22	0.26
del 25 al 50% - regular	0.17	0.26	0.28
Menos del 75% - excesivo	0.22	0.28	0.30
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30
Suelos permeables. Tales como arenas profundas y loes poco compactos.			A
Suelos medianamente permeables, tales como arenas de media profundidad; loes algo más compactos que los correspondientes a los suelos tipo A; terrenos migajosos.			B
Suelos casi permeables, tales como arenas o loes muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.			C



El coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ) se calcula mediante las fórmulas siguientes:

Si  $K$  resulta menor o igual que 0.15,

$$C_e = K (P-250) / 2000;$$

Si  $K$  es mayor que 0.15,

0.15) / 1.5;

$$C_e = K (P-250) / 2000 + (K -$$

Donde:

$P$  = Precipitación anual;

$C_e$  = Coeficiente de escurrimiento anual;

$K$  = Parámetro que depende del tipo, uso y cubierta del suelo;

Con los valores de la Tabla 9, los tipos y usos de suelo y sus correspondientes áreas de influencia y la ecuación de escurrimientos ( $C_e$ ) se obtiene el valor  $K$  para escurrimiento como se observa en la Tabla 10 a continuación.

*Tabla 10.- Calculo del Coeficiente de escurrimiento*

VEGETACION	SUELO	AREA (km <sup>2</sup> )	SUELO TIPO B	% AREA	K PONDERADO
AREA AGRICOLA	Xerosol	451,1	0,27	95	0,26
	Yermosol	13,5	0,27	3	0,01
	Rendzima	11,8	0,27	2	0,01
	SubTotal	476,4		K=	0,27
MATORRAL DESERTICO MICROFILO	Xerosol	1315,9	0,24	78	0,19
	Rendzima	228,7	0,24	13	0,03
	Regosol	152,9	0,24	9	0,02
	SubTotal	1697,5		K=	0,24
PASTIZAL NATURAL	Xerosol	198,9	0,28	61	0,17
	Rendzima	127,2	0,28	39	0,11
	SubTotal	326,1		K=	0,28
Área de Balance =		2500,0			

Considerando que en la cuenca del acuífero el 19% del suelo es de uso agrícola, 68% es matorral y 13% pastizal, tenemos:

$$K \text{ ponderado} = (0.27 * 19\%) + (0.24 * 68\%) + (0.28 * 13\%) = \mathbf{0.251}$$



De esta manera, el valor de K es igual a 0.251, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

$$Ce = K (P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5$$
$$Ce = 0.251 (278.7 - 250)/2000 + (0.251 - 0.15) / 1.5 = 0.070$$
$$Ce = 0.070$$

Aplicando este coeficiente de escurrimiento al valor de la lluvia se obtiene el volumen del escurrimiento:

$$VESC = 0.070 (696.75 \text{ Mm}^3) = 49.4 \text{ Mm}^3 \text{ anual}$$

### ***Infiltración***

Dada la ecuación de balance hidrometeorológico:

$$\text{Precipitación} = \text{Evapotranspiración} + \text{Escurremientos Superficiales} + \text{Infiltración}$$

$$\text{Infiltración} = \text{Precipitación} - \text{Evapotranspiración} - \text{Escurremientos superficiales}$$

Sustituyendo valores en la ecuación, se obtiene lo siguiente:

$$VINF = VPp - VETR - VESC$$
$$VINF = 696.75 - 645.25 - 49.40$$
$$VINF = 2.1 \text{ Mm}^3/\text{año}$$

### ***Retorno por riego***

Un cierto volumen del agua de riego se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, ese volumen generalmente representa un 20%.

$$Rr = (0.20) (468.9 \text{ Mm}^3/\text{año}) = 93.78 \text{ Mm}^3 \text{ anuales}$$

$$\text{Entradas verticales al acuífero: } 93.8 + 2.1 = 95.9 \text{ Mm}^3 \text{ anuales}$$

### ***Flujos Subterráneos***



Una fracción del volumen de lluvia que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. Es posible calcularlo mediante celdas de flujo horizontal, de acuerdo a la piezometría realizada por CONAGUA para el año 2010, que es la fecha con la que se cuenta con datos de configuraciones de niveles estáticos. Dicho cálculo fue realizado dentro del trabajo de “Modelación Matemática del Acuífero Los Juncos” en el año 2014. Tomando en cuenta los valores obtenidos en dicha modelación así como los datos de piezometría proporcionados por CONAGUA en 2010. En un total de 19 celdas de flujo, con base en el trazo de curvas de nivel y direcciones de flujo (Figura 33), se obtuvo un total de entradas por concepto de flujo horizontal subterráneo de 14.24 hm<sup>3</sup> anuales (Núñez, 2014).

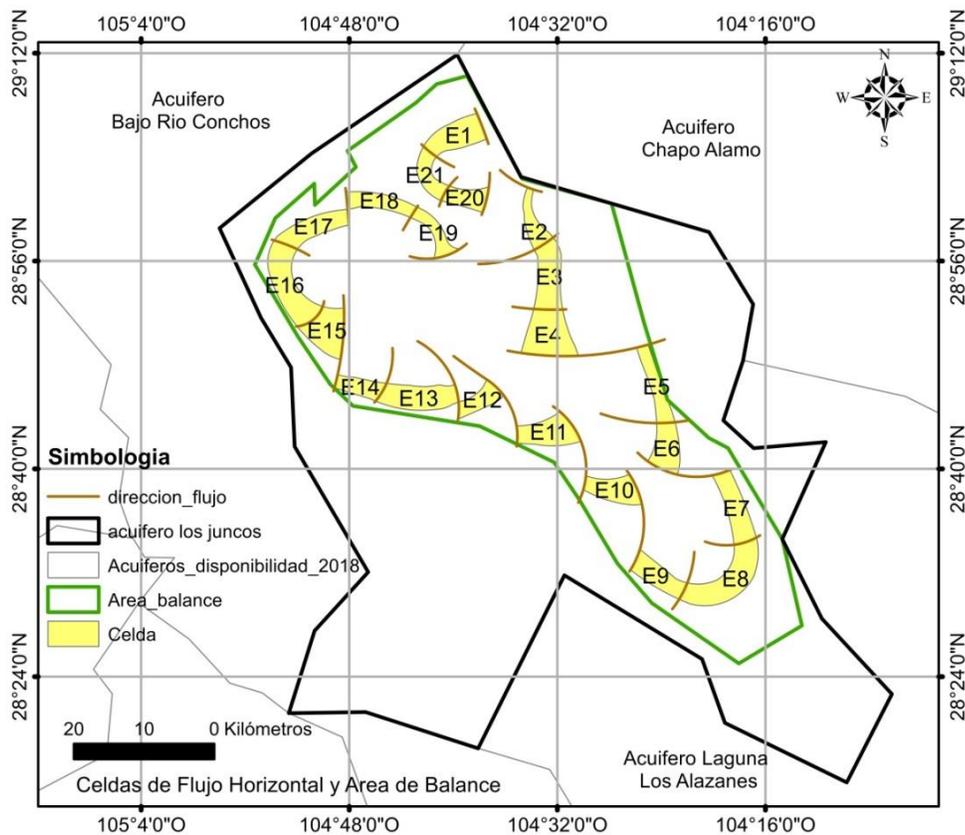


Figura 33.- Entradas de agua subterránea y direcciones de flujo (CONAGUA, 2010).



### Entrada de agua subterránea (Eas)

Empleando los cálculos anteriores se llega al valor de entradas al acuífero, de modo que:

$$\text{Entradas Totales al acuífero: } 95.9 + 14.24 = 110.14 \text{ Mm}^3 \text{ anuales}$$

### 4.2 CALIDAD DEL AGUA

En la Figura 34 se observan la localización de los puntos muestreados durante el año 2018, que corresponden principalmente a la zona central del acuífero Los Juncos.

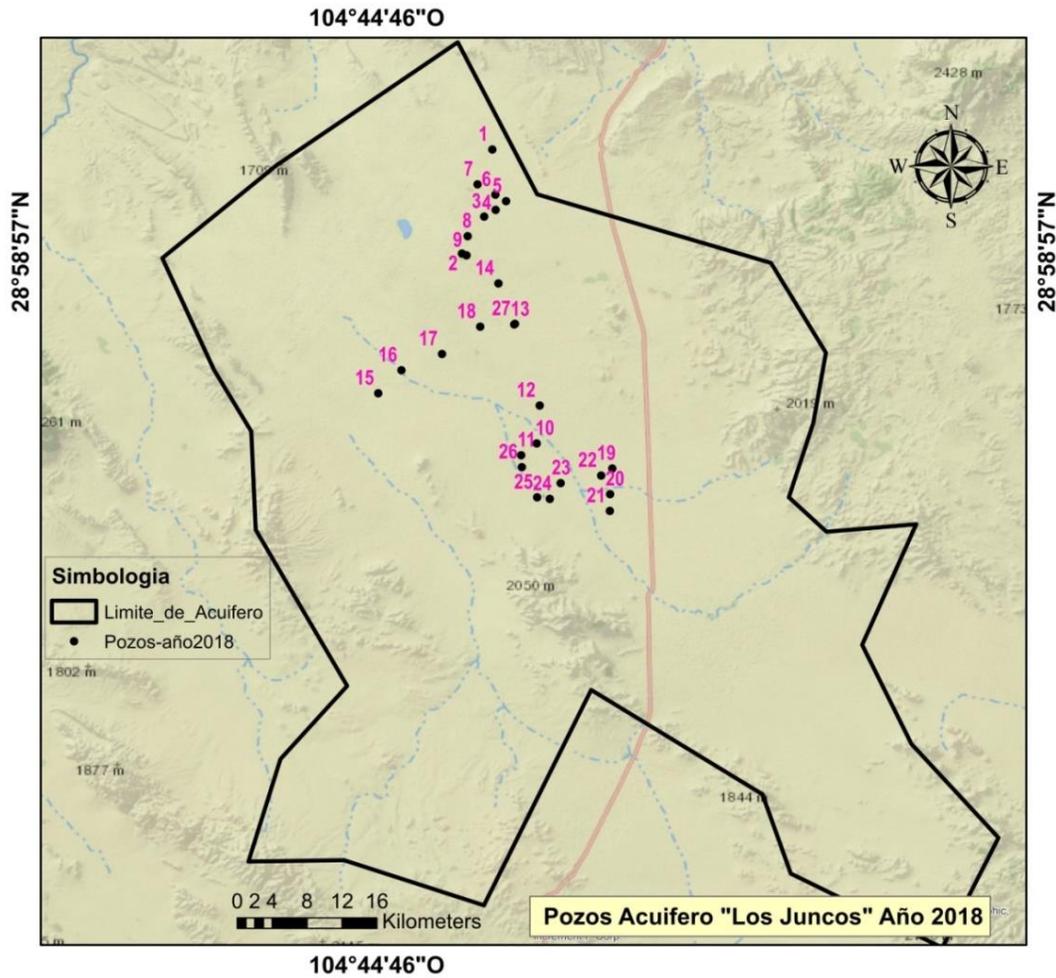


Figura 34.- Pozos muestreados en el año 2018.



La Tabla 11 contiene los parámetros medidos en campos y algunos datos importantes de los pozos muestreados.

En la Tabla 12 se muestran los resultados de las concentraciones (mg/l) de aniones y cationes encontrados en las 27 muestras analizadas y reportadas por personal de laboratorio. Tomando en cuenta dichos resultados se realizó el balance iónico, como primer paso de análisis de resultados, con la finalidad de calcular el porcentaje de error en el mismo, considerando como buenos los resultados que presentan menos de 5% de error en el balance y como aceptables si son menores a 10%.

Se aplicó la siguiente fórmula para calcular el error del Balance de Cargas (%EBC):

$$\%EBC = \frac{(\Sigma_{a-} - \Sigma_{c+})}{(\Sigma_{a-} + \Sigma_{c+})} * 100$$



Tabla 11.- Parámetros de campo y datos de los pozos muestreados en 2018

<i>Pozo</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Temp.</i> <i>°C</i>	<i>pH</i>	<i>CE</i> <i>μS/cm</i>	<i>SDT</i> <i>mg/L</i>	<i>Profundidad</i>	<i>Origen</i>
LJ-1	536302	3217604	26,0	7,18	421,0	293	600 pies (182.88 m)	Oasis
LJ-2	533294	3205710	30,2	7,69	417,0	293	700 pies (213.3m)	Oasis
LJ-3	535510	3209933	29,9	7,81	352,0	247	800 pies (243.84m)	Oasis
LJ-4	536662	3210703	30,7	7,76	368,0	257	700 pies (213.36m)	Oasis
LJ-5	537681	3211639	30,2	8,07	415,0	291	1000 pies (304.8m)	Oasis
LJ-6	536628	3212447	29,8	7,47	423,0	296	800 pies (243.84m)	Oasis
LJ-7	534832	3213616	34,2	8,14	1112,0	778	800 pies (244 m)	Oasis
LJ-8	533861	3207694	28,1	7,92	420,0	294	500 pies (152.40m)	El Oasis
LJ-9	533755	3205509	29,8	7,59	481,0	337	750 pies (228.60m)	Oasis
LJ-10	540876	3184037	19,7	9,02	751,0	526		Nvo. Holanda
LJ-11	539316	3182685	24,8	8,80	682,0	480		Nvo. Holanda
LJ-12	541158	3188370	19,7	10,15	670,0	469		Nvo. Holanda
LJ-13	538567	3197626	20,1	9,94	420,0	294		Nvo. Holanda
LJ-14	536965	3202306	25,4	8,60	372,0	260	1100 pies (335.3m)	Nva. Holanda
LJ-15	524923	3189726	25,7	7,93	950,0	666	924.2 pies (300m)	Las Bombas
LJ-16	527251	3192359	28,1	7,33	1083,0	758	590.55 pies (180m)	Las Bombas
LJ-17	531321	3194227	23,2	7,78	680,0	476	300 pies (91.44m)	Las Bombas
LJ-18	535153	3197359	20,9	7,88	431,0	301		Las Bombas
LJ-19	548488	3181206	19,5	7,70	829,0	580		Los Cienes
LJ-20	548280	3178272	27,3	7,73	641,0	449		Los Cienes
LJ-21	548264	3176356	21,0	8,82	553,0	387		Los Cienes
LJ-22	547373	3180395	18,1	8,02	706,0	494		Los Cienes
LJ-23	543301	3179515	20,0	7,67	991,0	694		Los Cienes
LJ-24	542212	3177705	29,8	8,10	873,0	611		Los Cienes
LJ-25	540937	3177884	24,1	7,78	802,0	562		Los Cienes
LJ-26	539388	3181326	19,7	8,03	740,0	518		Los Cienes
LJ-27	538641	3197696	26,7	8,20	413,0	289		Los Cienes
Promedio			25,6	8,1	626,5	438,7		



Tabla 12.- Concentraciones de iones principales (mg/l) en el agua subterránea. Muestreo 2018

No. Pozo	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N-NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	As	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	% error
LJ-1	144,04	0,88	12,15	10,01	2,26	80,15	ND	65,47	1,37	0,10	34,12	-0,07
LJ-2	127,58	1,30	32,30	9,80	2,22	47,20	ND	73,02	1,55	0,10	24,49	-2,62
LJ-3	123,46	1,19	14,41	11,51	2,60	60,19	ND	45,58	1,33	0,10	34,62	2,44
LJ-4	104,94	2,13	17,32	12,81	2,90	68,59	ND	63,55	1,19	0,10	21,01	1,44
LJ-5	98,77	5,50	19,24	13,65	3,09	83,28	ND	91,24	0,99	0,10	8,68	-0,25
LJ-6	148,16	0,78	11,65	10,58	2,39	90,61	ND	53,10	1,53	0,10	47,78	1,27
LJ-7	102,89	6,92	332,4	13,29	3,01	144,1	ND	297,7	2,19	0,10	21,74	1,91
LJ-8	131,69	3,95	20,13	11,12	2,52	70,80	ND	63,60	1,77	0,11	30,96	2,44
LJ-9	139,93	3,42	28,77	12,18	2,76	88,24	ND	72,05	1,51	0,06	41,10	0,85
LJ-10	119,35	3,50	43,33	14,86	3,36	276,0	ND	118,4	1,62	0,35	61,65	5,95
LJ-11	131,69	1,69	32,44	15,14	3,43	220,8	ND	95,15	0,19	1,29	57,19	5,96
LJ-12	131,69	2,97	35,78	8,68	1,96	221,8	ND	97,34	0,54	2,34	62,87	3,22
LJ-13	109,06	6,69	23,03	10,80	2,44	84,55	ND	78,69	0,10	0,10	17,40	4,80
LJ-14	135,81	3,95	16,22	10,98	2,49	51,64	ND	61,64	0,10	0,10	25,54	2,32
LJ-15	115,23	3,46	29,72	12,39	2,80	466,4	ND	122,7	0,97	2,00	116,6	6,09
LJ-16	131,69	3,27	27,02	12,17	2,75	576,7	ND	112,9	0,13	0,68	170	6,42
LJ-17	113,18	4,33	25,34	11,91	2,69	298,4	ND	87,54	0,50	0,65	85,10	5,50
LJ-18	135,81	4,14	19,58	9,62	2,18	77,63	ND	64,50	0,10	0,10	33,22	3,29
LJ-19	123,46	2,20	39,47	7,87	1,78	244,4	ND	79,52	0,81	1,56	87,15	3,11
LJ-20	146,10	2,66	38,17	16,08	3,64	169,0	ND	104,1	0,10	0,34	35,60	7,69
LJ-21	119,35	8,25	31,73	5,50	1,25	139,3	ND	100,7	0,12	0,10	29,84	3,32
LJ-22	127,58	2,49	63,15	26,06	5,90	499,5	ND	196,9	0,10	1,10	132,4	-1,47
LJ-23	104,94	2,76	41,59	19,82	4,48	428,1	ND	123,0	0,10	0,59	111,6	5,59
LJ-24	115,23	2,19	45,33	24,65	5,58	305,5	ND	108,9	0,10	0,63	78,67	7,07
LJ-25	123,46	1,49	40,66	22,47	5,08	278,4	ND	83,43	0,10	2,57	97,73	3,80
LJ-26	123,46	1,75	19,54	14,57	3,30	106,6	ND	112,9	0,10	0,10	55,20	-19,9
LJ-27	123,46	3,82	18,39	10,05	2,27	76,56	ND	68,10	0,10	0,10	29,04	0,99

NOTA: Los valores marcados en color rojo en las tablas 11 y 12 corresponden a los parámetros cuyas concentraciones se encuentran por encima de límite máximo permisible de la Modificación a la NOM-127-SAA1-1994.



### Correlación de datos

Mediante un análisis de correlación de datos referentes a los resultados reportados por laboratorio (concentración de aniones y cationes), se revisó la concordancia entre éstos y los parámetros medidos en campo, es decir Sólidos Disueltos Totales (mg/l) en el eje horizontal vs Aniones/Cationes así como Conductividad Eléctrica (CE) en el eje vertical ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) vs Aniones/Cationes. Se observa que todas las muestras mantienen una relación aceptable entre datos de campo y datos de laboratorio, ya que la tendencia es de alineación a la recta según la gráfica de dispersión, con excepción de la muestra correspondiente al pozo LJ-22 (Figuras 35 y 36). Por lo que los resultados de este pozo no se consideraron para incluirlos en la interpretación hidrogeoquímica que se presenta más adelante. Concluyendo con el procesamiento de datos, de la muestra LJ-22 sólo se tomaron en cuenta los datos recabados en campo (SDT, pH, temperatura y CE). De las 27 muestras colectadas en el acuífero Los Juncos, 26 se analizan más adelante aplicando técnicas hidrogeoquímicas.

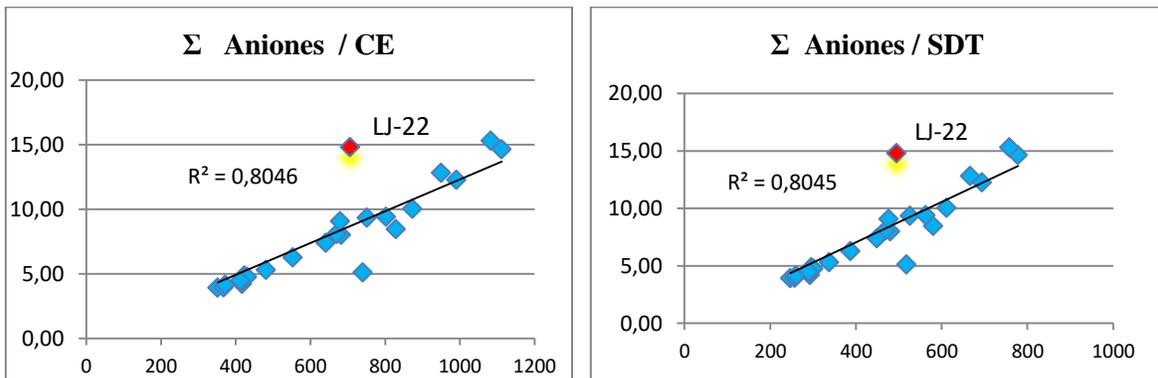


Figura 35.- Relación de la suma de aniones con la conductividad eléctrica / Sólidos Disueltos totales (SDT).

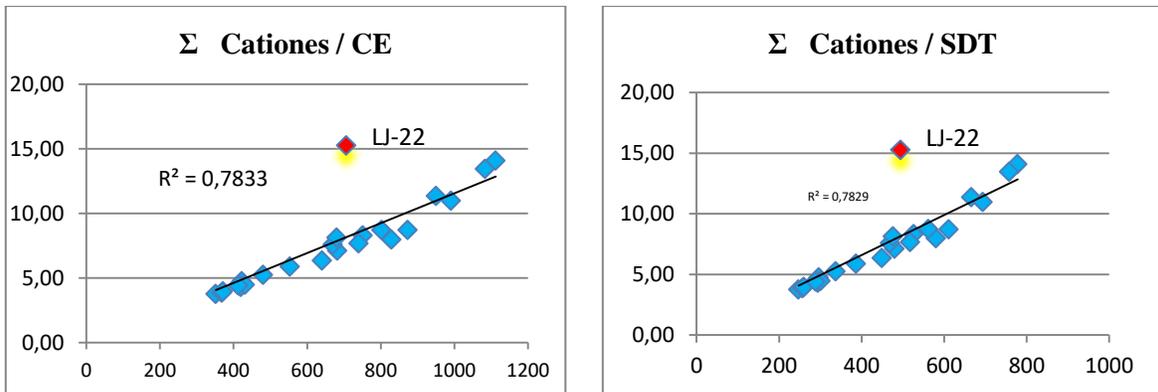


Figura 36.- Relación de la suma de cationes con la conductividad eléctrica / Sólidos Disueltos totales (SDT).



#### 4.2.1 Características físicas

##### Temperatura

En la red de pozos 2018 se observó en cuanto a la temperatura que se presentaron variaciones de este parámetro entre 18,1° la mínima y 34,2 °C la máxima, con un promedio de 25,6 °C y siendo la moda 29.8 °C (Figura 37). En general, los pozos localizados al norte en el poblado El Oasis se encuentran mayores temperaturas, con un promedio de 30°C. El Pozo LJ-7 en El Oasis con 34.2°C indica tener una de las mayores concentraciones de iones (SDT). En la parte Centro-Sur y Poniente las temperaturas son más variables (entre 18,1°C a 29,8°C), como ocurre en los poblados Las Bombas, Los Cienes, El Trébol y Nueva Holanda. Este mapa puede ser comparado con el mapa de isolíneas de cloruros y sodio que se muestran más adelante, ya que muestran un punto de concentración máxima en el pozo LJ7 y que disminuye gradualmente hacia el sur del acuífero.

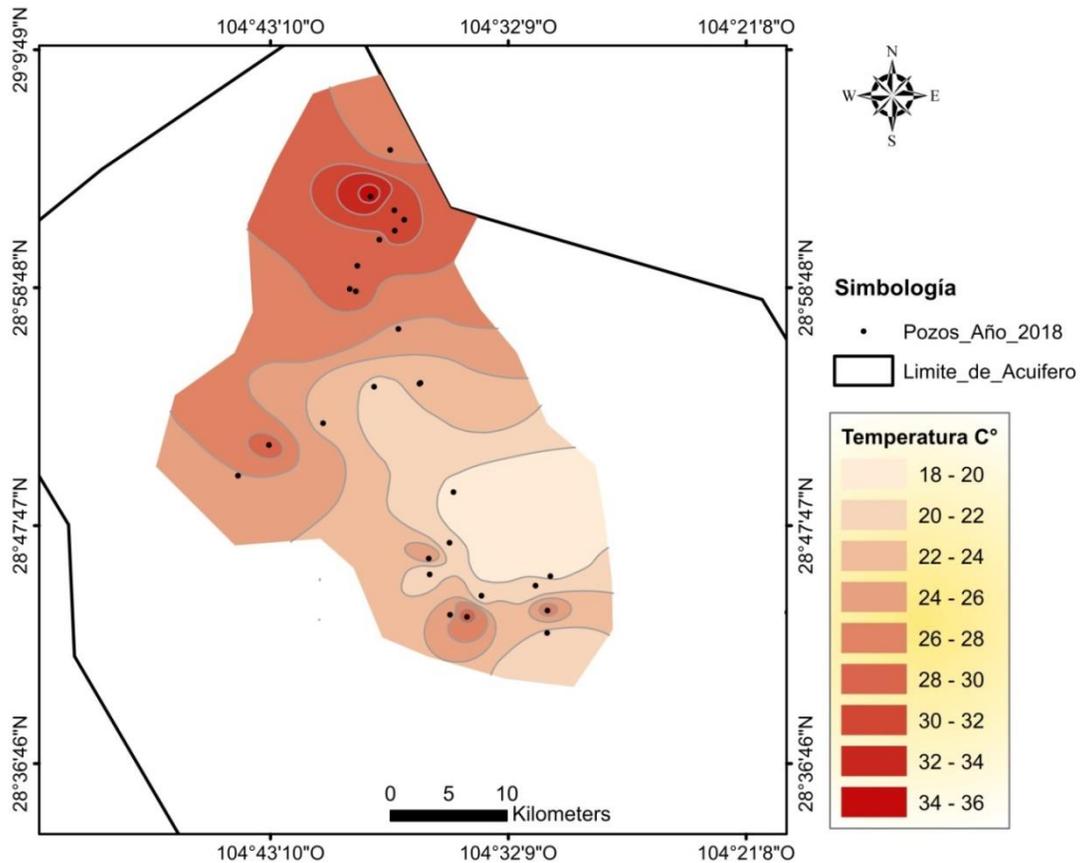


Figura 37.- Temperatura en muestreo de pozos, año 2018.



### Conductividad eléctrica

Este parámetro físico en el agua nos muestra la capacidad para conducir la corriente eléctrica, y es, por lo tanto, una medida indirecta del contenido iónico de la solución. El rango que presenta la Tabla 11 para este parámetro es de 352  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 1112  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; el valor máximo corresponde al pozo LJ-7 de la red y se ubica en la parte norte del acuífero. Otros valores altos se observan en los pozos LJ-15 y LJ-16 (950  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 1083  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente) ubicados al poniente de la zona de estudio, así como en LJ-23 y LJ-24 (991  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 873  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente), al sur de la misma. La totalidad de las muestras colectadas presentan un promedio de 626.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una moda de 420  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figura 38).

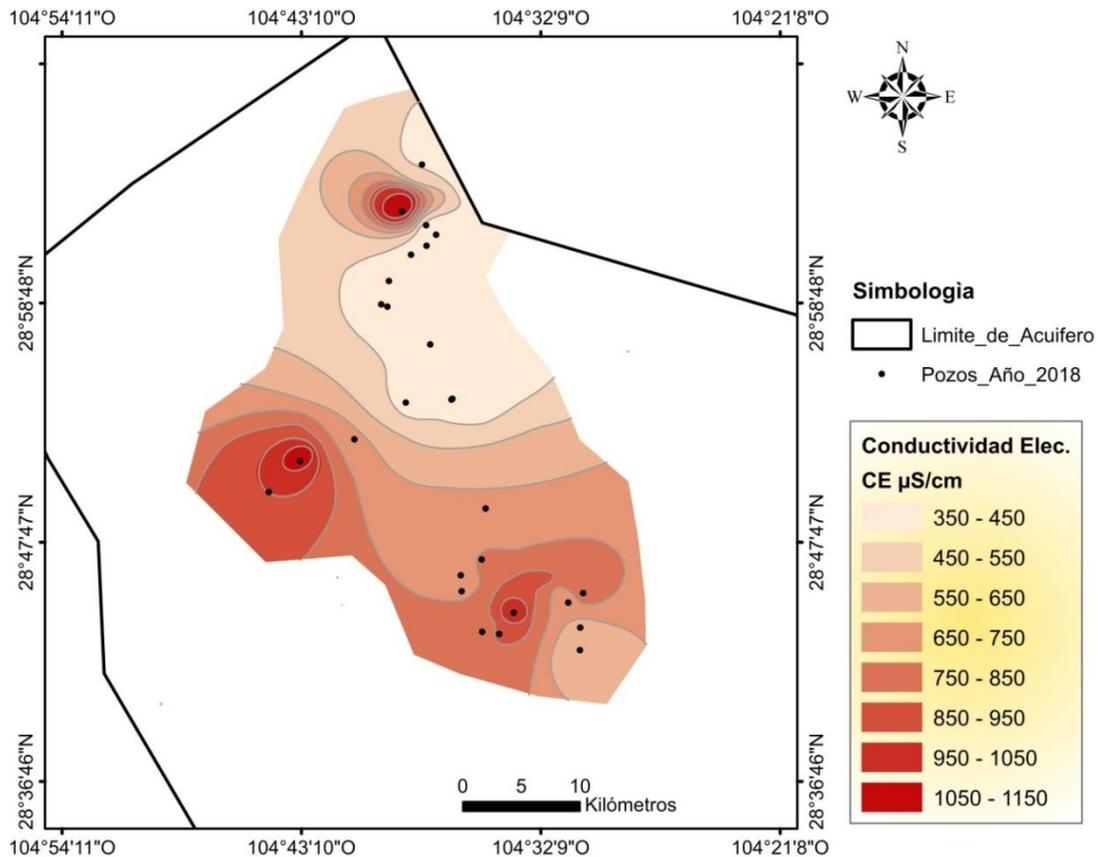


Figura 38.- Conductividad eléctrica en muestreo de pozos, año 2018.



### 4.3 DIAGRAMAS HIDROGEOQUÍMICOS

A continuación se presentan los resultados de aplicación de las técnicas hidrogeoquímicas mediante los diagramas de Piper, Schöeller, Stiff y Circulares, a partir de los cuales se deducen las familias de agua presentes en el acuífero (Tabla 13).

También con ayuda de los diagramas de Stiff (Figuras 51 a la 56) y Circulares (Figura 60) se elaboraron mapas hidrogeoquímicos que permiten visualizar la distribución espacial de los iones y ubicación de las muestras por familia.

#### 4.3.1 *Diagramas de Piper y Schöeller*

Los diagramas de Piper y Scholler tienen en común que nos permiten apreciar un grupo de muestras en un solo gráfico, por lo que estos diagramas se muestran continuos, de modo que en el diagrama triangular (Piper) se aprecia la ubicación de las muestras en el lado del anión y catión dominantes. En la diagrama de Scholler de igual manera destacarán los iones dominantes pero en forma de pico. Las muestras se ubican en los diagramas en mg/l (Figuras 39 a la 50).

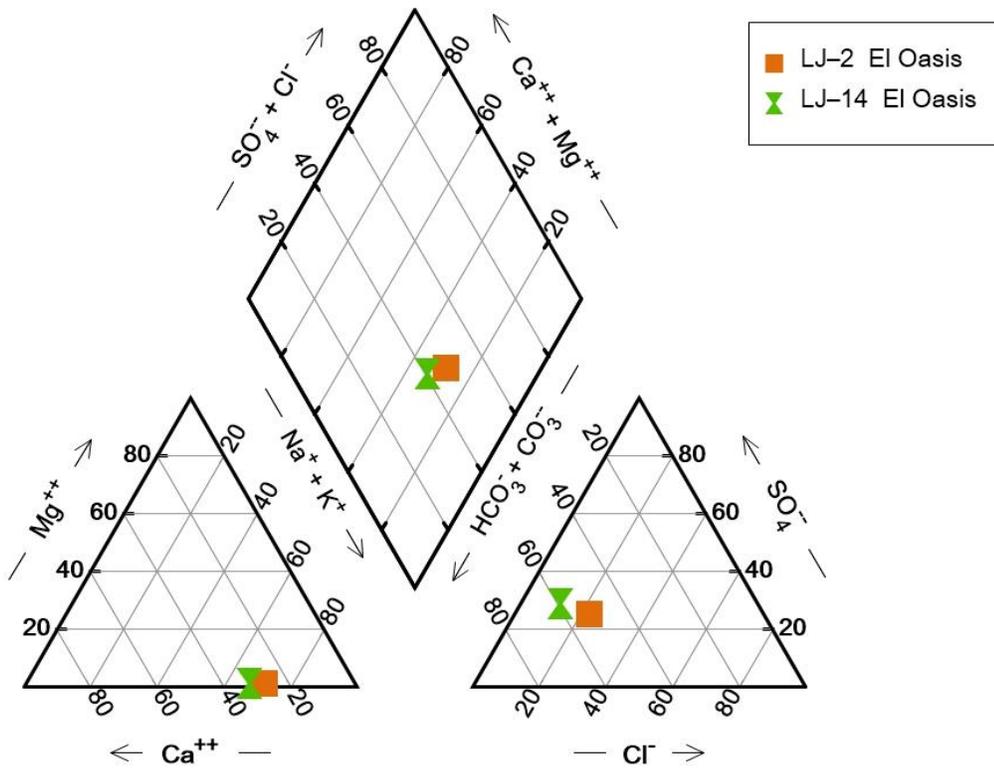


Figura 39.- Diagrama de Piper grupo 1. Familia Bicarbonatada Sódica. Pozos 2 y 14.

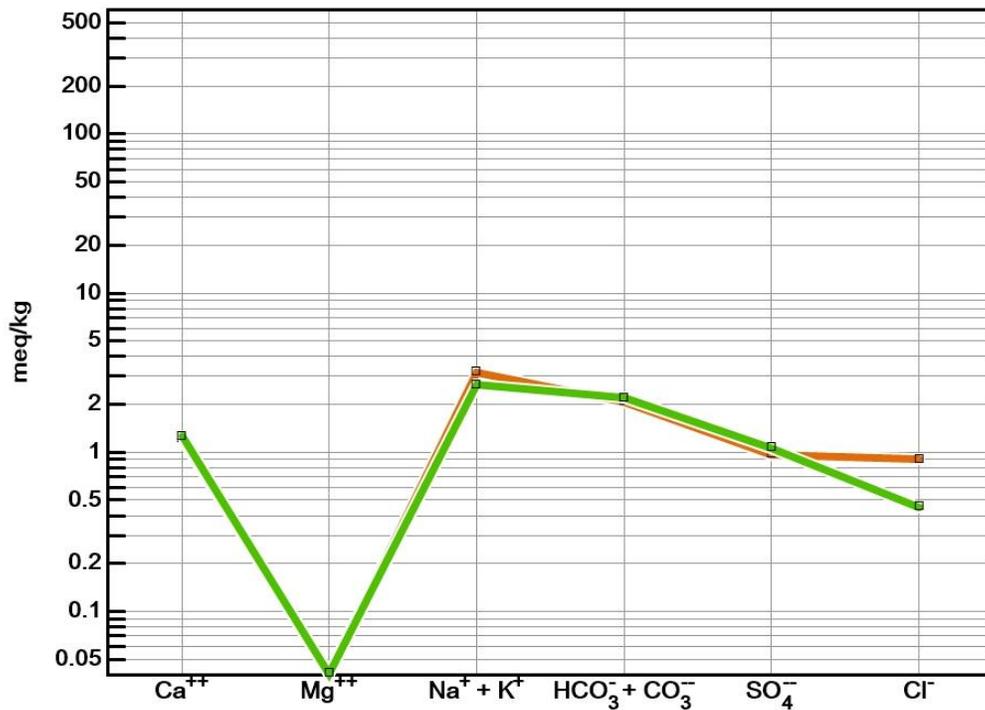


Figura 40.- Diagrama de Schöeller grupo 1. Familia Bicarbonatada Sódica. Pozos 2 y 14.

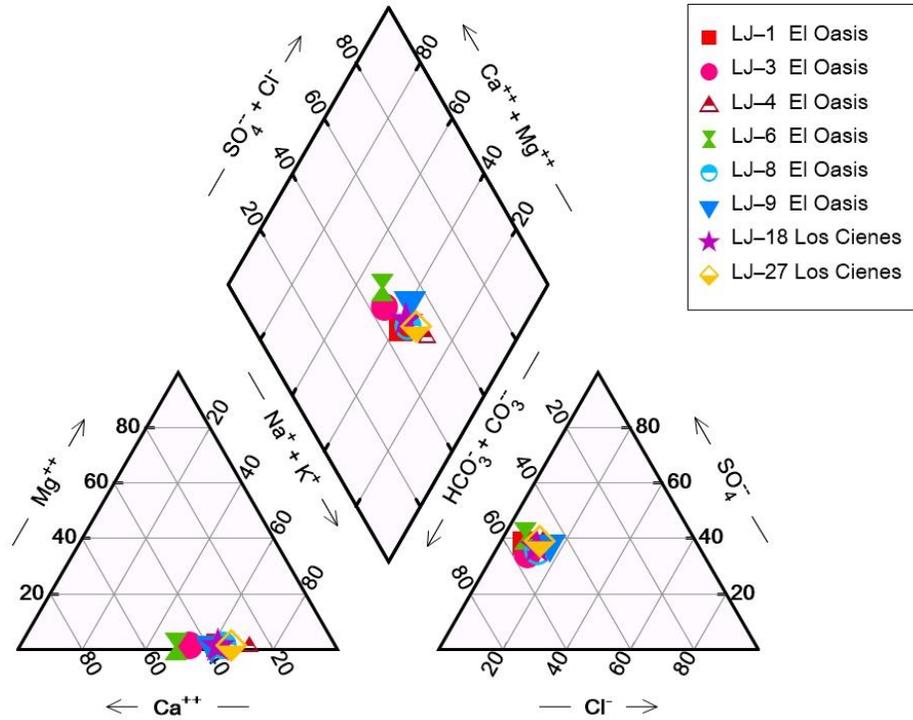


Figura 41.- Diagrama de Piper grupo 2. Familia Bicarbonatada-Sulfatada Sódica-Cálcica. Pozos 1, 3, 4, 6, 8, 9, 18 y 27.

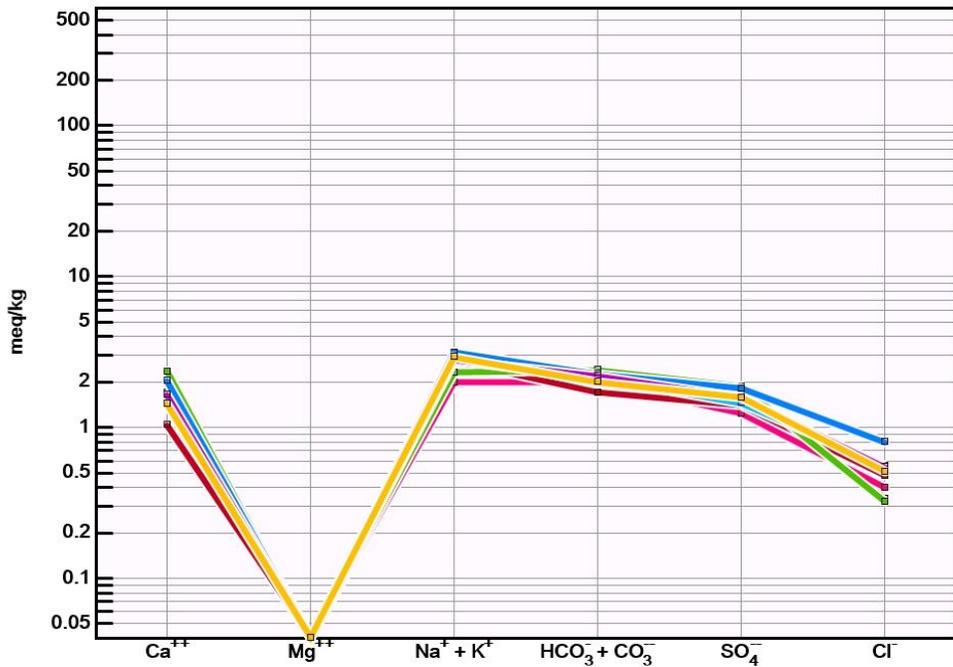


Figura 42.- Diagrama de Schöeller grupo 2. Familia Bicarbonatada-Sulfatada Sódica-Cálcica. Pozos 1, 3, 4, 6, 8, 9, 18 y 27.

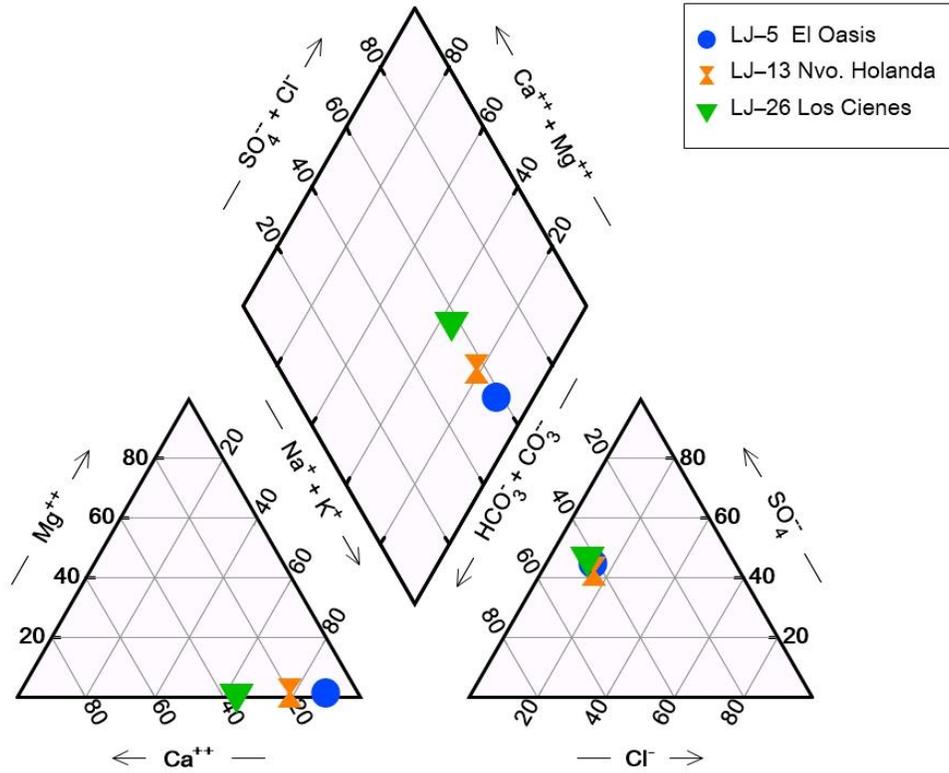


Figura 43.- Diagrama de Piper grupo 3. Familia Sulfatada-Bicarbonatada Sódica. Pozos 5, 13 y 26.

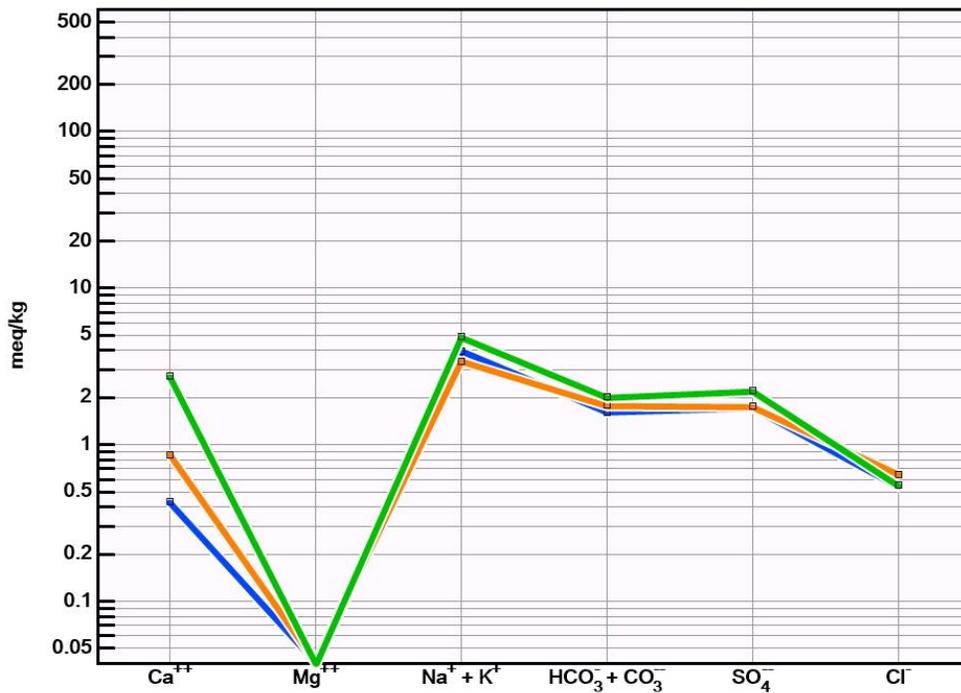


Figura 44.- Diagrama de Schöeller grupo 3. Familia Sulfatada-Bicarbonatada Sódica. Pozos 5, 13 y 26.

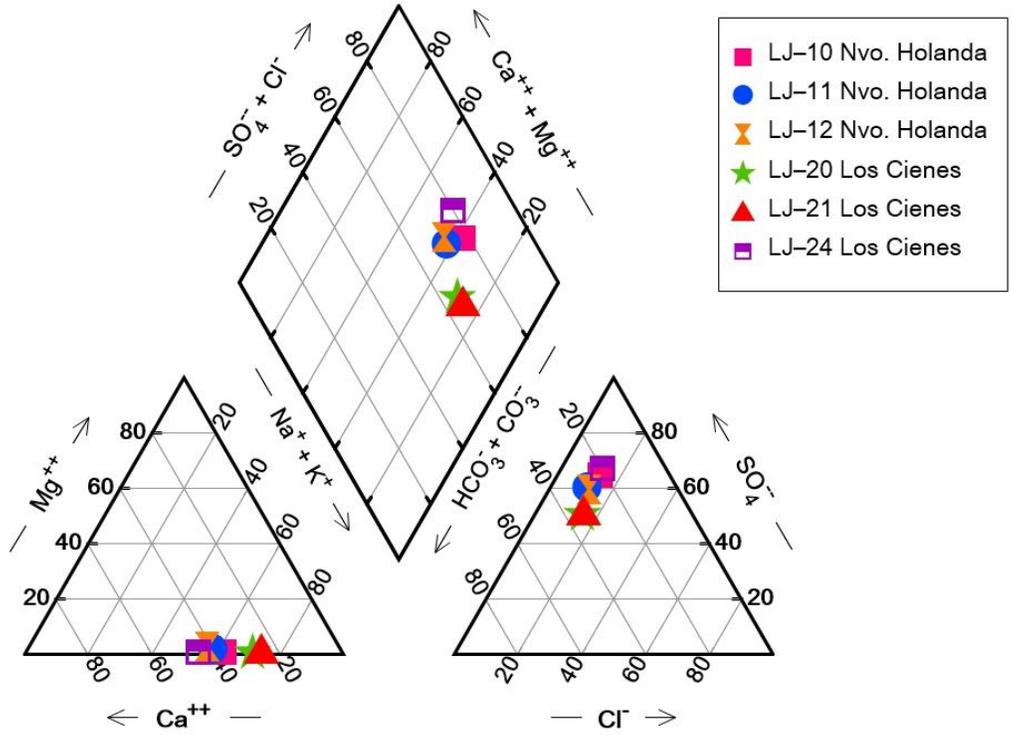


Figura 45.- Diagrama de Piper grupo 4. Familia Sulfatada Sódica o Sódica-Cálcica. Pozos 10, 11, 12, 20, 21 y 24.

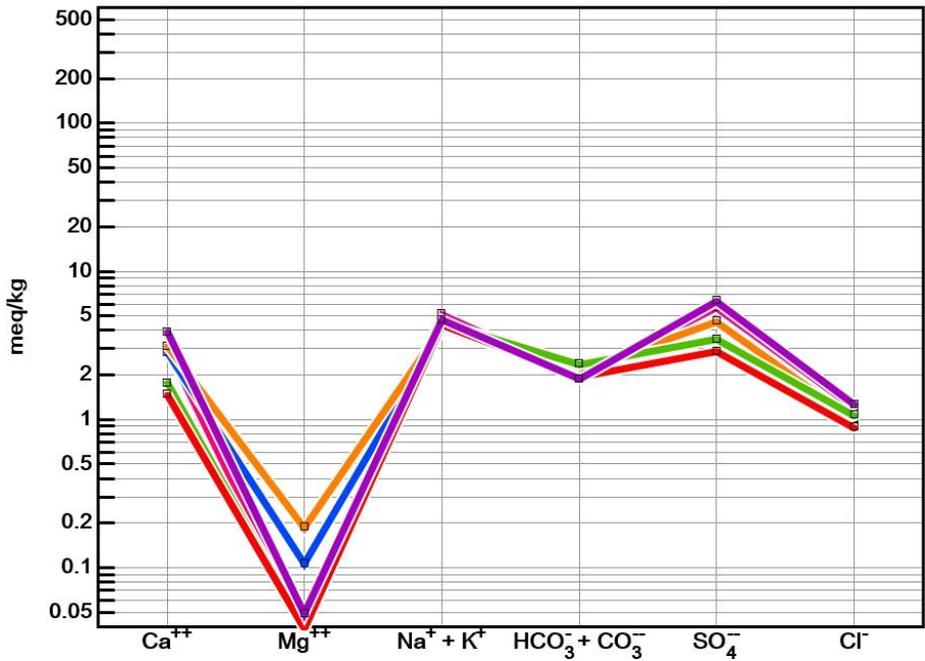


Figura 46.- Diagrama de Schöeller grupo 4. Familia Sulfatada Sódica o Sódica-Cálcica. Pozos 10, 11, 12, 20, 21 y 24.

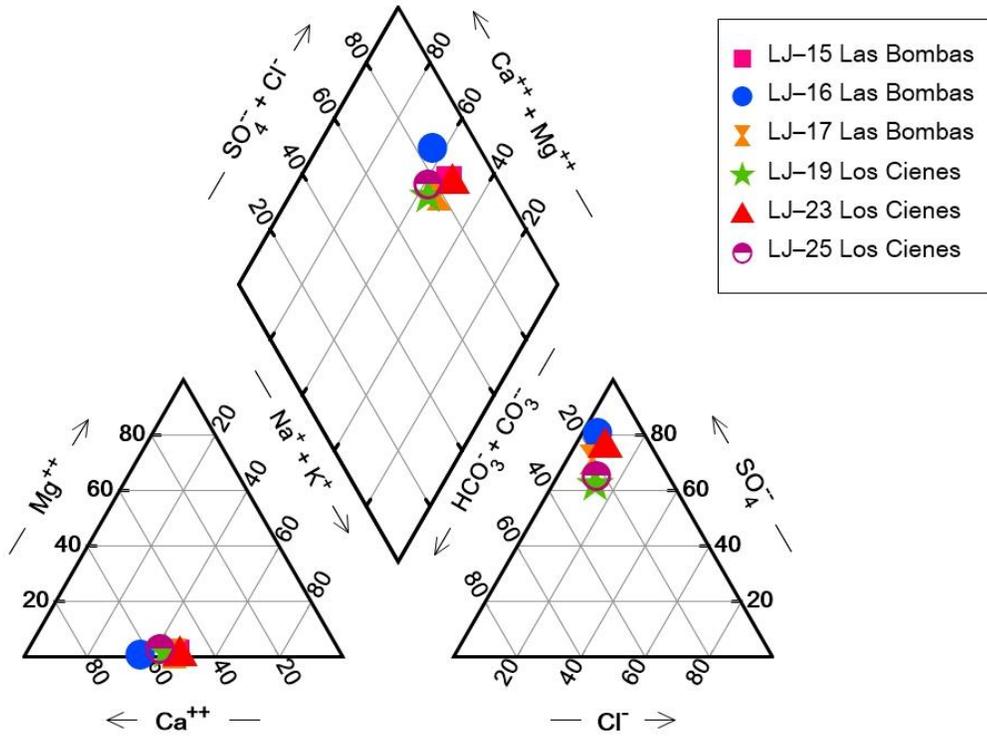


Figura 47.- Diagrama de Piper grupo 5. Familia Sulfatada Cálculo-Sódica pozos 15, 16, 17, 19, 23 y 25.

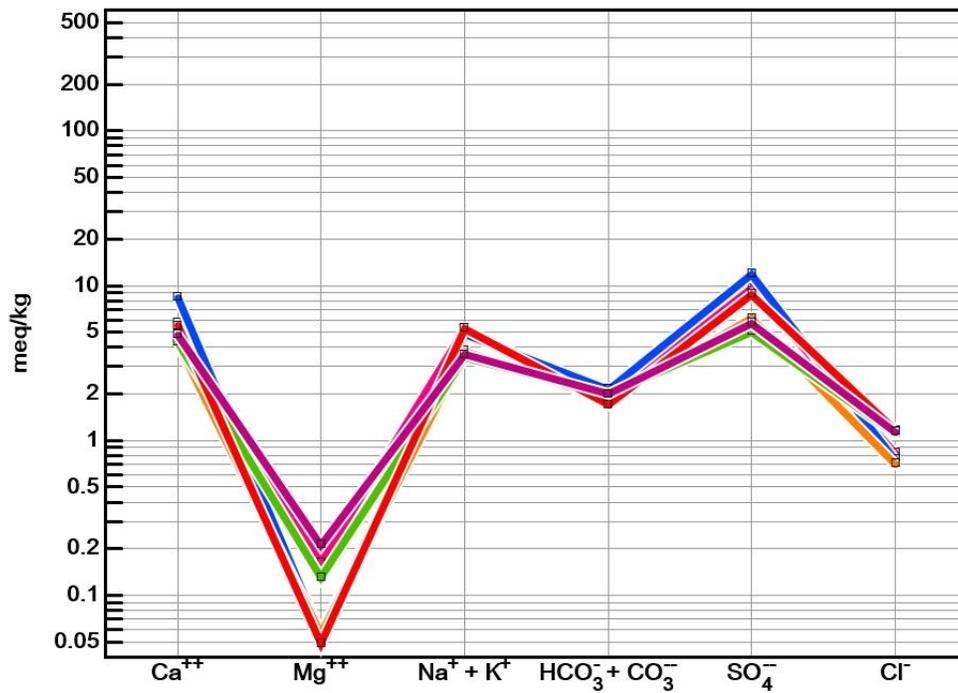


Figura 48.- Diagrama de Schöeller grupo 5. Familia Sulfatada Cálculo-Sódica pozos 15, 16, 17, 19, 23 y 25.

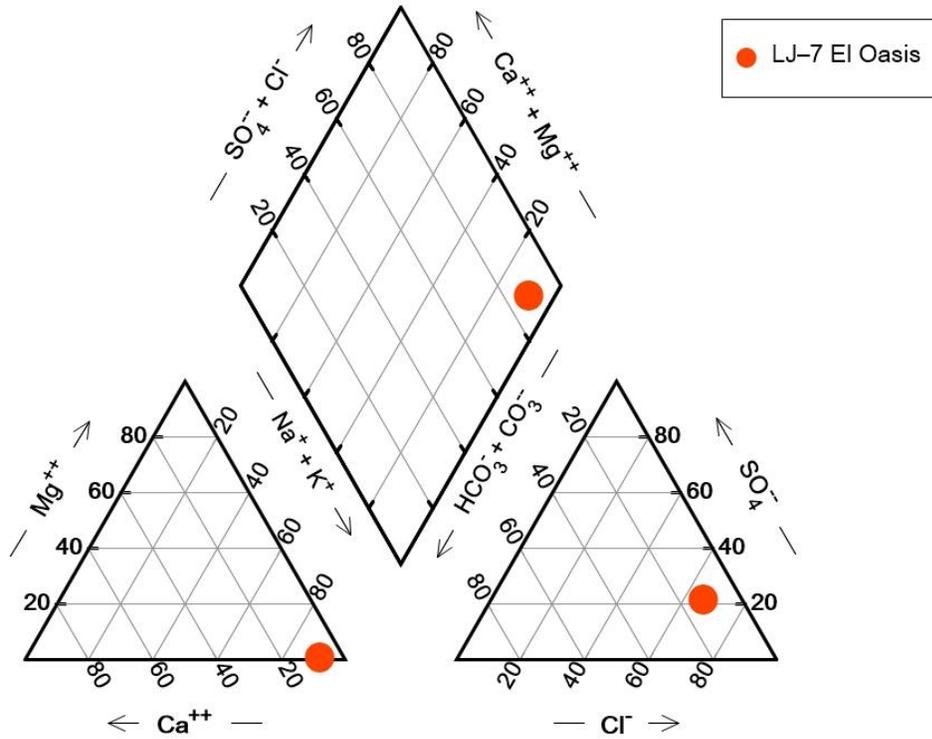


Figura 49.- Diagrama de Piper grupo 6. Agua Clorurada Sódica. Pozo 7.

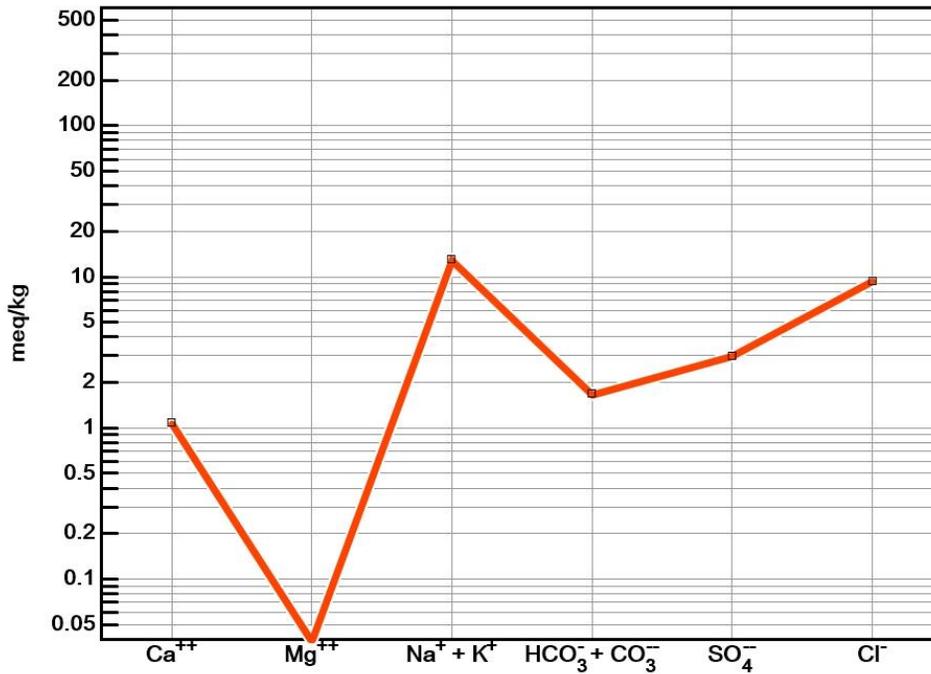


Figura 50.- Diagrama de Schöeller grupo 6. Agua Clorurada Sódica. Pozo 7.



### 4.3.2 Diagramas de Stiff

Otra manera de apreciar la clasificación por familias para cada una de las muestras analizadas son los diagramas Stiff, que se presentan en las Figuras 51 a la 56. En esta sección se observan los diagramas correspondientes a las 26 muestras de la red de pozos 2018, en donde se visualiza de una manera rápida la familia de agua encontrada en cada pozo. Dichos diagramas se representan en un mapa del acuífero (Figura 57) y permiten visualizar una buena apreciación de la evolución espacial de la calidad del agua subterránea.

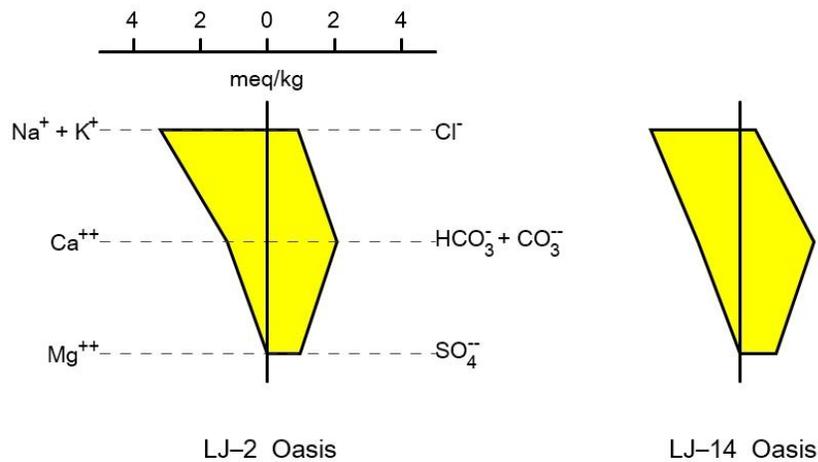


Figura 51.- Familia Bicarbonatada – Sódica. GRUPO 1

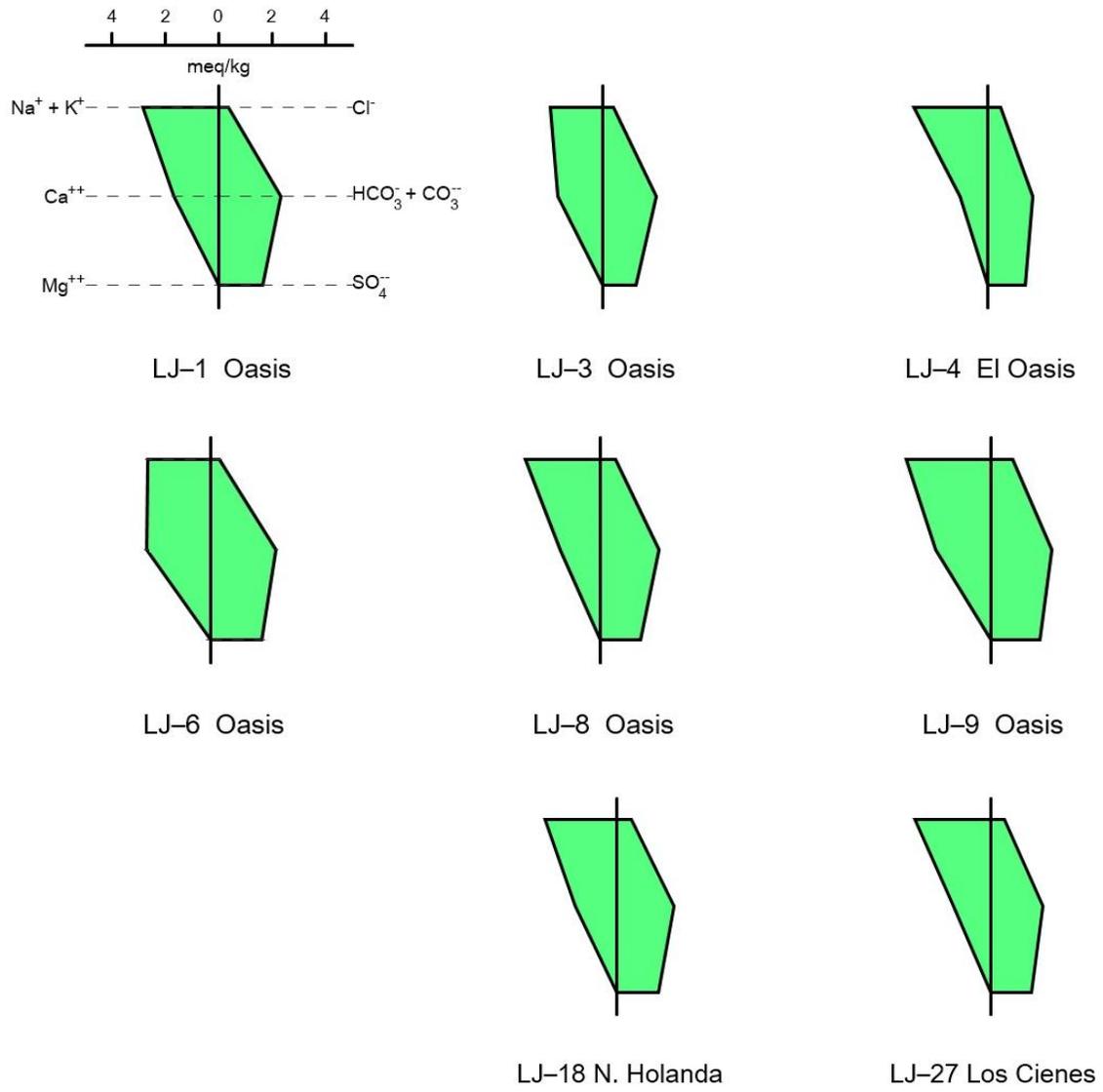


Figura 52- Familias Bicarbonatada-Sulfatada Sódica o cálcica-sódica. GRUPO 2.

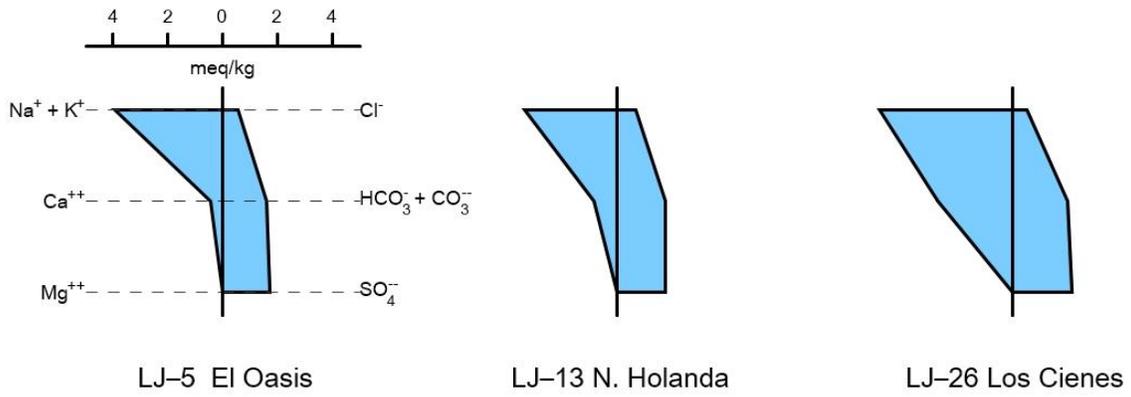


Figura 53.- Familia Sulfatada-Bicarbonatada Sódica GRUPO 3.

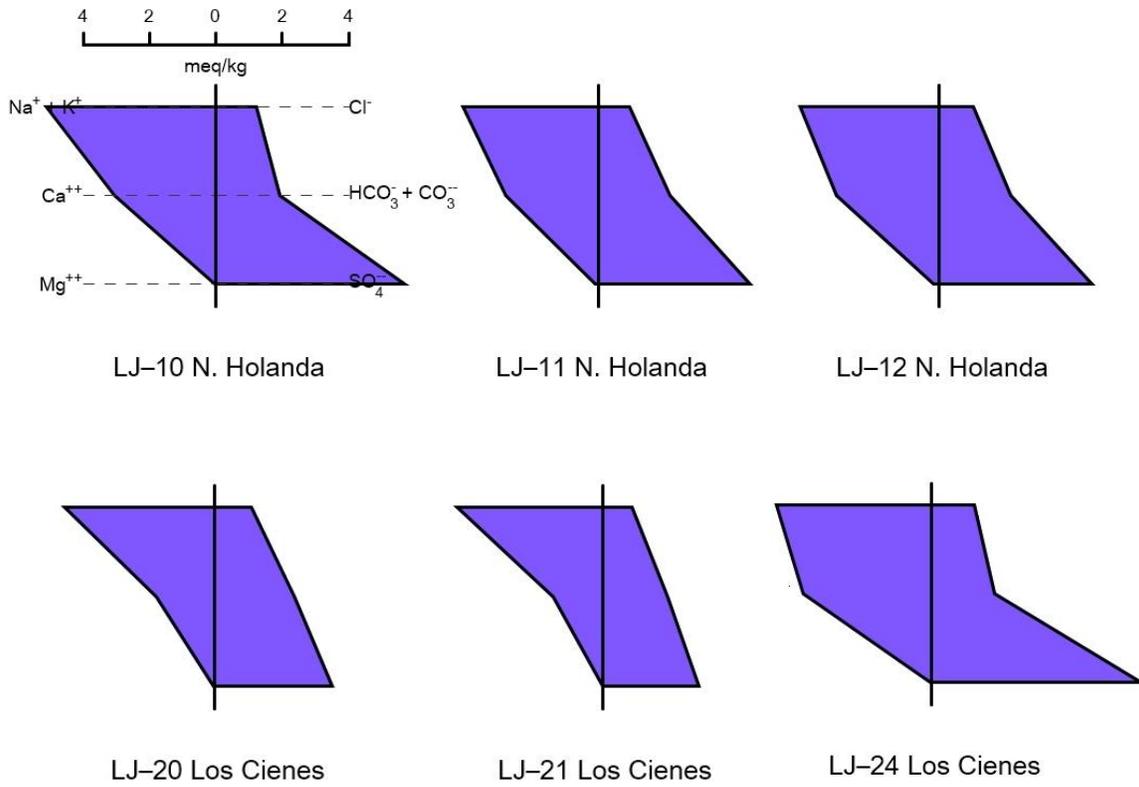


Figura 54.- Familia Sulfatada Sódica o Sódica-Cálcica GRUPO 4.

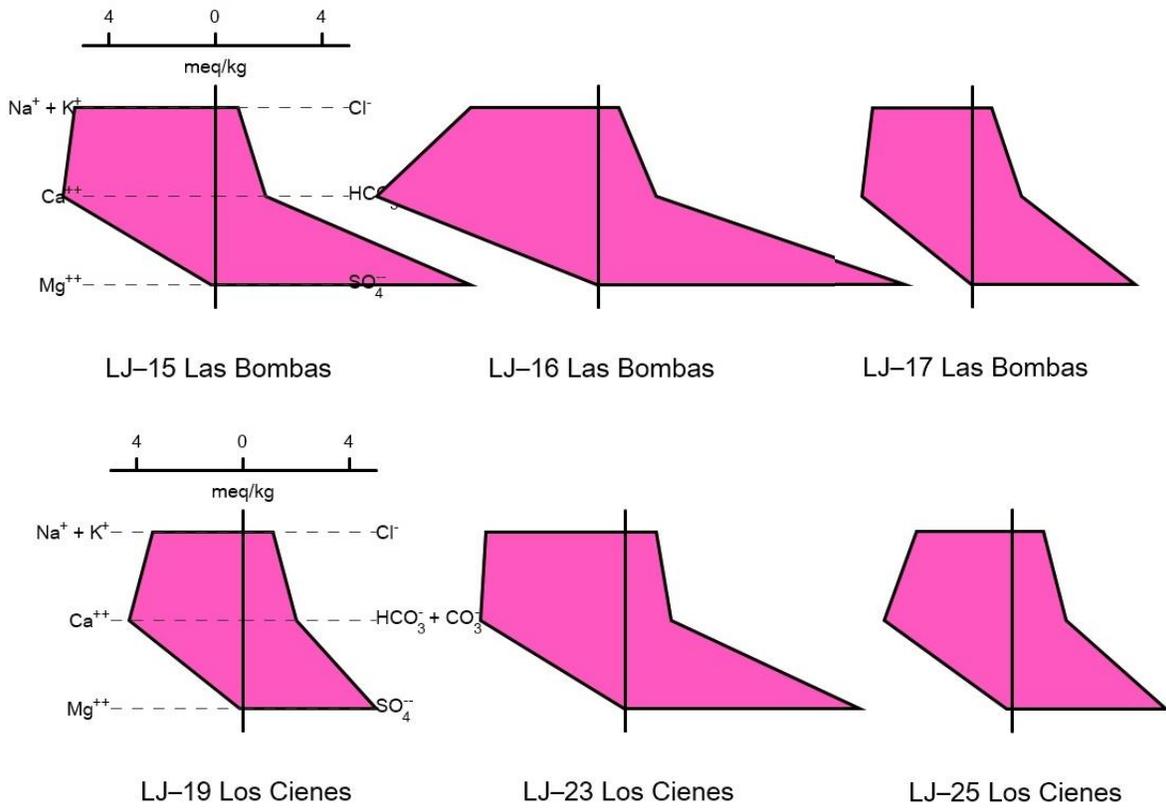


Figura 55.- Familia Sulfatada Cálctica-Sódica. GRUPO 5.

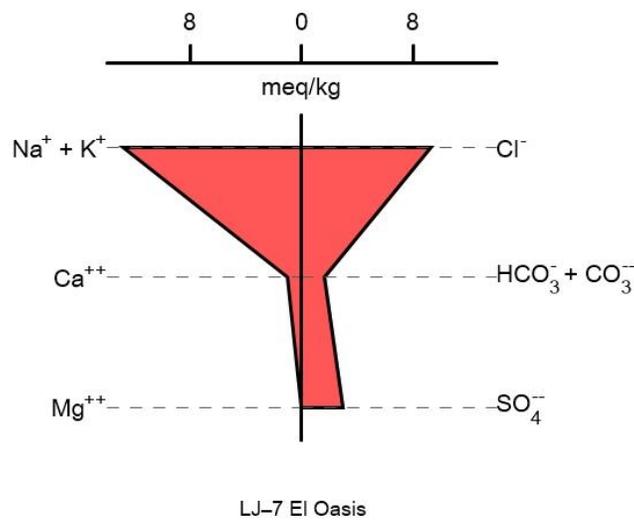


Figura 56.- Agua Clorurada Sódica GRUPO 6.



En dichos diagramas se observa que hay un tipo de agua subterránea que predomina en el mapa del acuífero Los Juncos (Figura 52), ya que en 8 del total de las muestras (31%) el agua es catalogada por su composición química dentro de la familia **Bicarbonatada-Sulfatada Sódica** (Grupo 2).

Las siguientes familias más abundantes son la **Sulfatada Cálcica-Sódica** (Grupo 5). Estas muestras tienen en común las concentraciones de sulfatos más altas entre las muestras totales y tienen además importantes concentraciones de calcio (entre 111.6 y 170 mg/l). En este grupo la Conductividad eléctrica y, por lo tanto, los Sólidos Disueltos Totales son altos y van de 657 a 1146  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y de 476 a 758 mg/l, respectivamente, que corresponden a las zonas con puntos de mayor salinidad de toda la red, ubicadas en la parte oeste y sur del acuífero. La familia **Sulfatada Sódica o Sódica-Cálcica** (Grupo 4) se ubica en la parte central del acuífero, y en los diagramas destacan los puntos representativos del anión sulfato y el catión sodio. A cada una de las familias pertenecen 6 de las muestras analizadas (23%).

Esta última tiene las concentraciones de bicarbonatos más alta de la red, aunque no rebasan el valor de 144 mg/l. Muestran además las más bajas concentraciones totales de iones.

Las 6 muestras restantes (23%) están distribuidas en tres grupos, correspondientes a las siguientes familias; **Bicarbonatada – Sódica** (8%), 2 muestras en las cuales destaca el contenido de bicarbonatos y el sodio en más del 60% entre los cationes. La familia de agua **Sulfatada-Bicarbonatada Sódica** se presenta en 3 muestras (12%) y se caracterizan además de contener bicarbonatos y sodio en forma destacada, por un buen contenido de fluor (4.7 mg/l en promedio). Sólo una muestra (4%) está clasificada como **Clorurada Sódica**. En ésta última que corresponde a la muestra LJ-7 (El Oasis) se manifiesta el ion cloruro con valor significativo (332.4 mg/l) junto al sodio (297.7 mg/l).

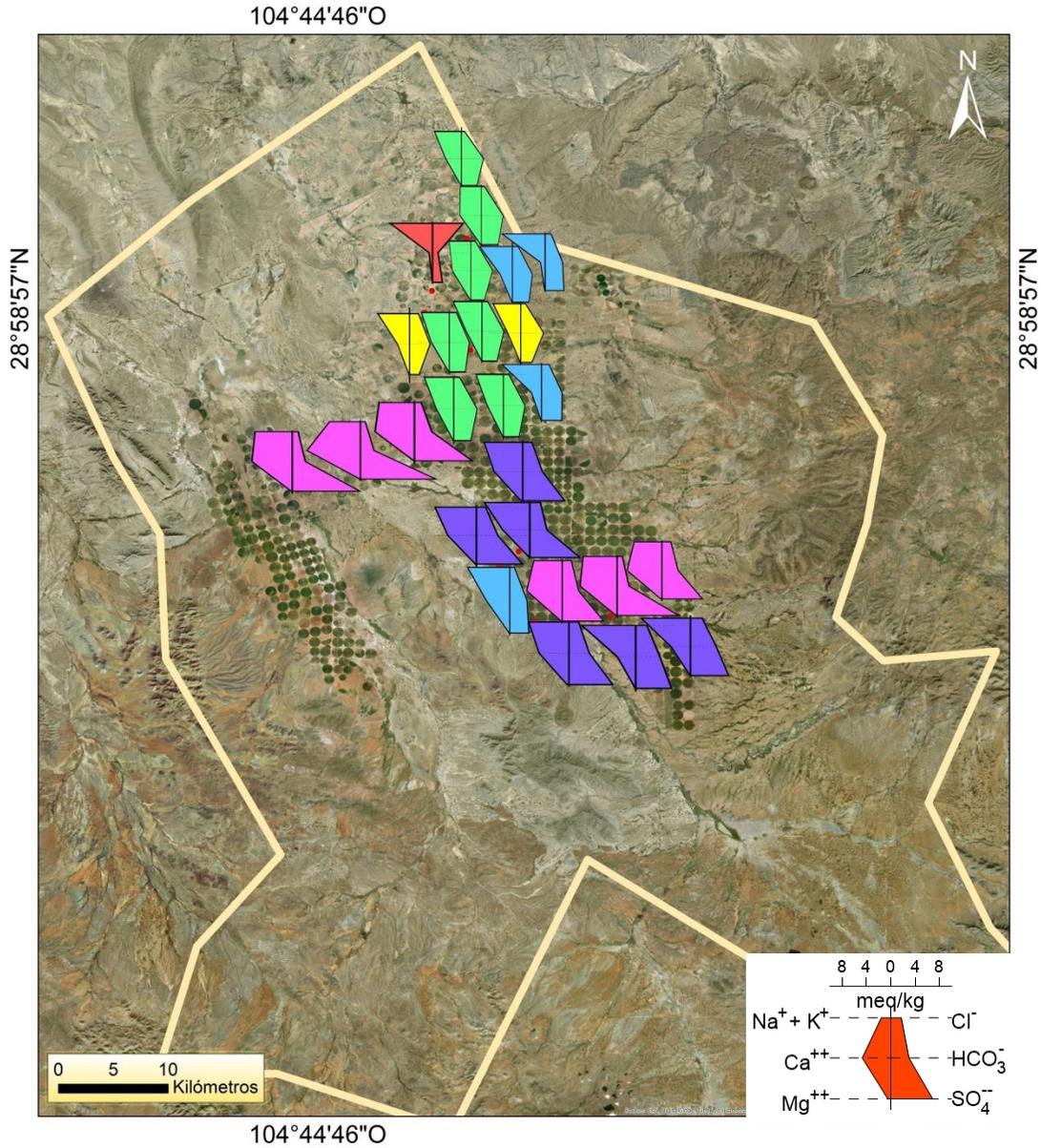


Figura 57.- Mapa Diagramas de Stiff red de pozos 2018.

Las muestras en color verde que representan agua bicarbonatada (al norte) (Figura 57), presentaron bajas concentraciones de SDT y altas temperaturas (promedio 30°C), por lo que probable que se trate de aguas con intrusión de roca ígnea.

De acuerdo a las familias de agua encontradas en las muestras de la red de pozos de 1985 (Figura 58), se aprecia claramente las aguas bicarbonatadas (diagramas amarillos) al norte y en las sierras Mojina, al suroeste y El Aguaje, al noreste del acuífero y pie de sierras se da



una combinación entre agua bicarbonatada y sulfatada bicarbonatada, que corresponde a las zonas de recarga. Por otra parte, se distinguen las aguas sulfatadas (diagramas magenta) al sur y noroeste del acuífero donde se forman los principales conos de concentración alta de iones.

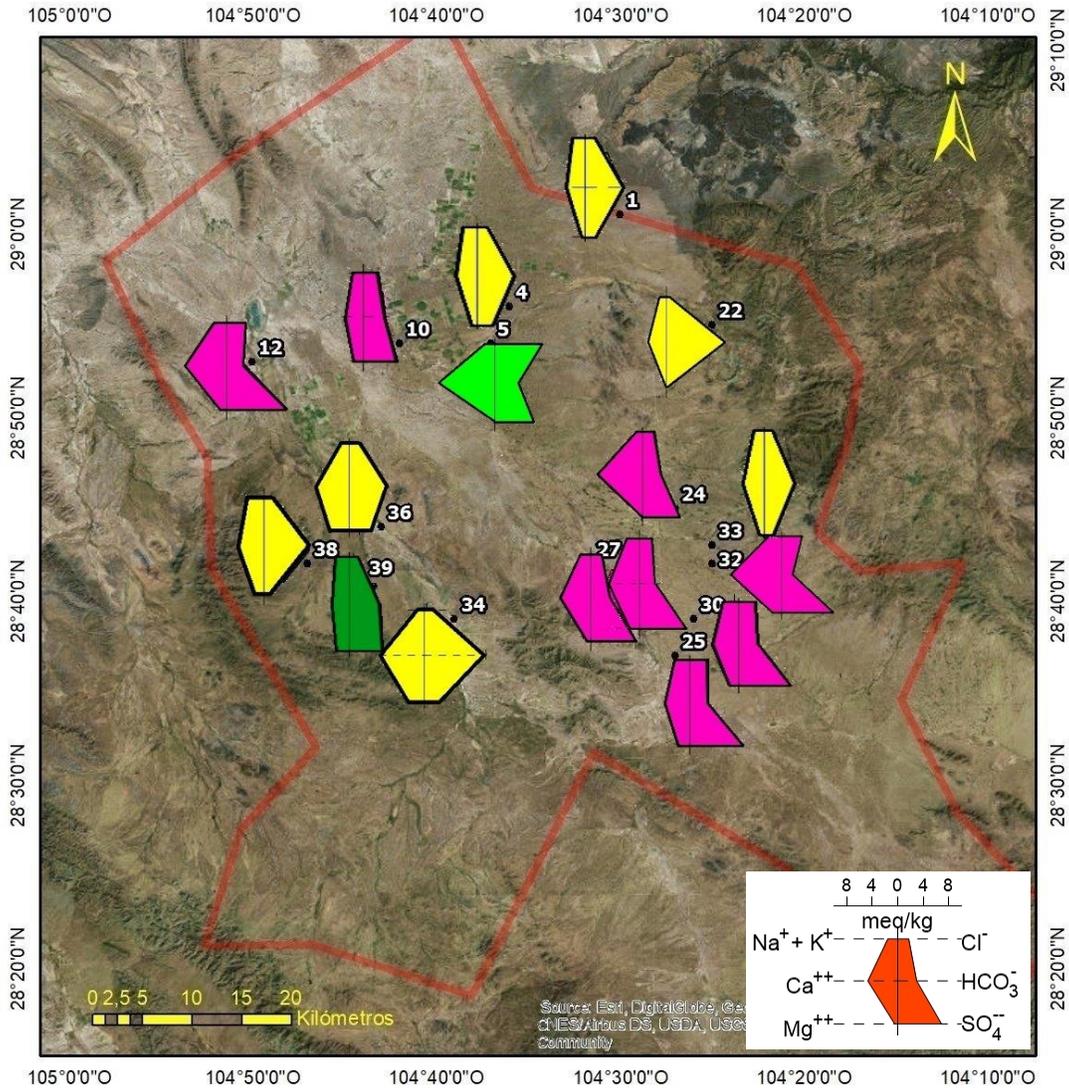


Figura 58.- Mapa Diagramas de Stiff. Red de pozos 1985.

De acuerdo a la secuencia de Chevotareb (Figura 59), las aguas bicarbonatadas son aguas recientes, esto es debido a que el agua en el suelo procede de la reacción del CO<sub>2</sub> con el H<sub>2</sub>O (formado HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Después se encuentran las aguas bicarbonatadas-sulfatadas y las aguas menos recientes serán sulfatadas (Langmuir, 1997). Esto es visiblemente comparable



al comportamiento que se observa en la red de pozos 2018 en la que a pesar de no encontrarse muestras de pozos sobre la sierra Mojina, se observa que las muestras que corresponden a los diagramas color rosa y azul son aguas sulfatadas sódicas-cálcicas y cálcicas-sódicas respectivamente y agua bicarbonatada al norte, este y oeste. Esto demuestra que el patrón de comportamiento en el acuífero se conserva luego de 34 años.

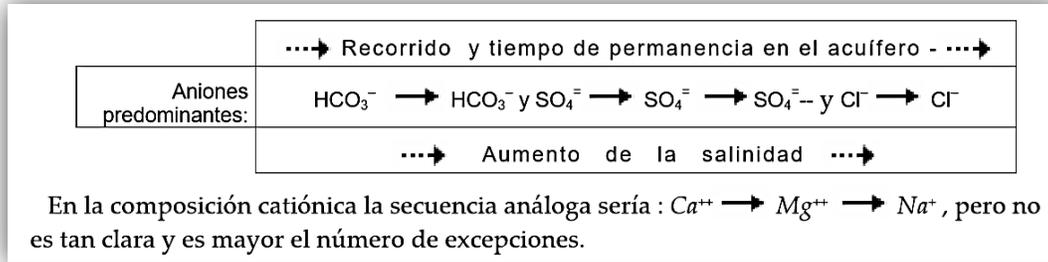
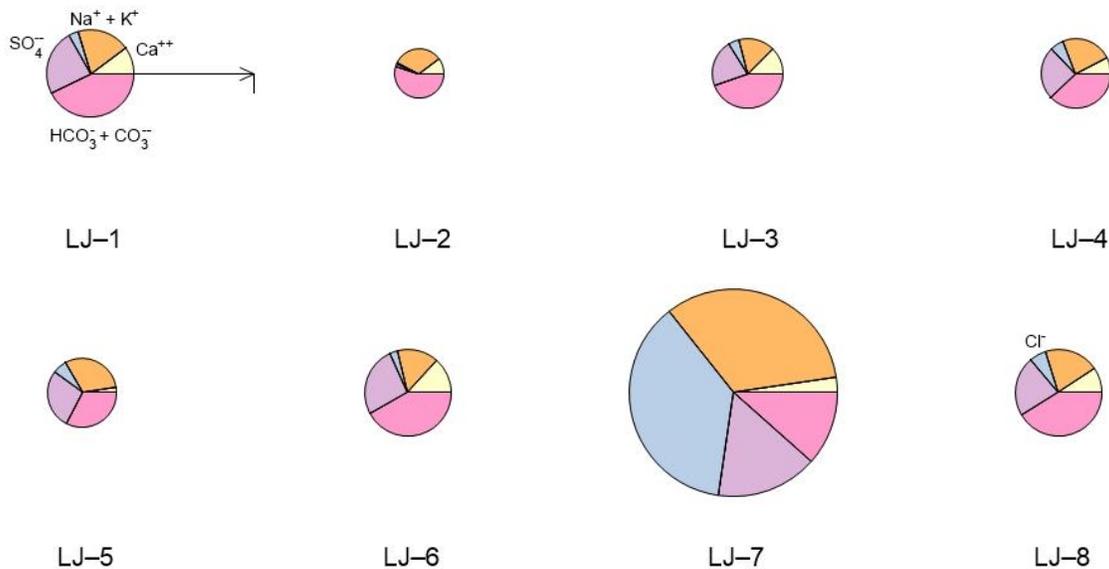


Figura 59.- Evolución geoquímica del agua subterránea de acuerdo a la secuencia de Chebotarev.

### 4.3.3 Diagramas Circulares

Los diagramas circulares correspondientes a 26 muestras de agua indican a continuación la relación de concentración total de iones entre cada una de ellas (Figura 60).



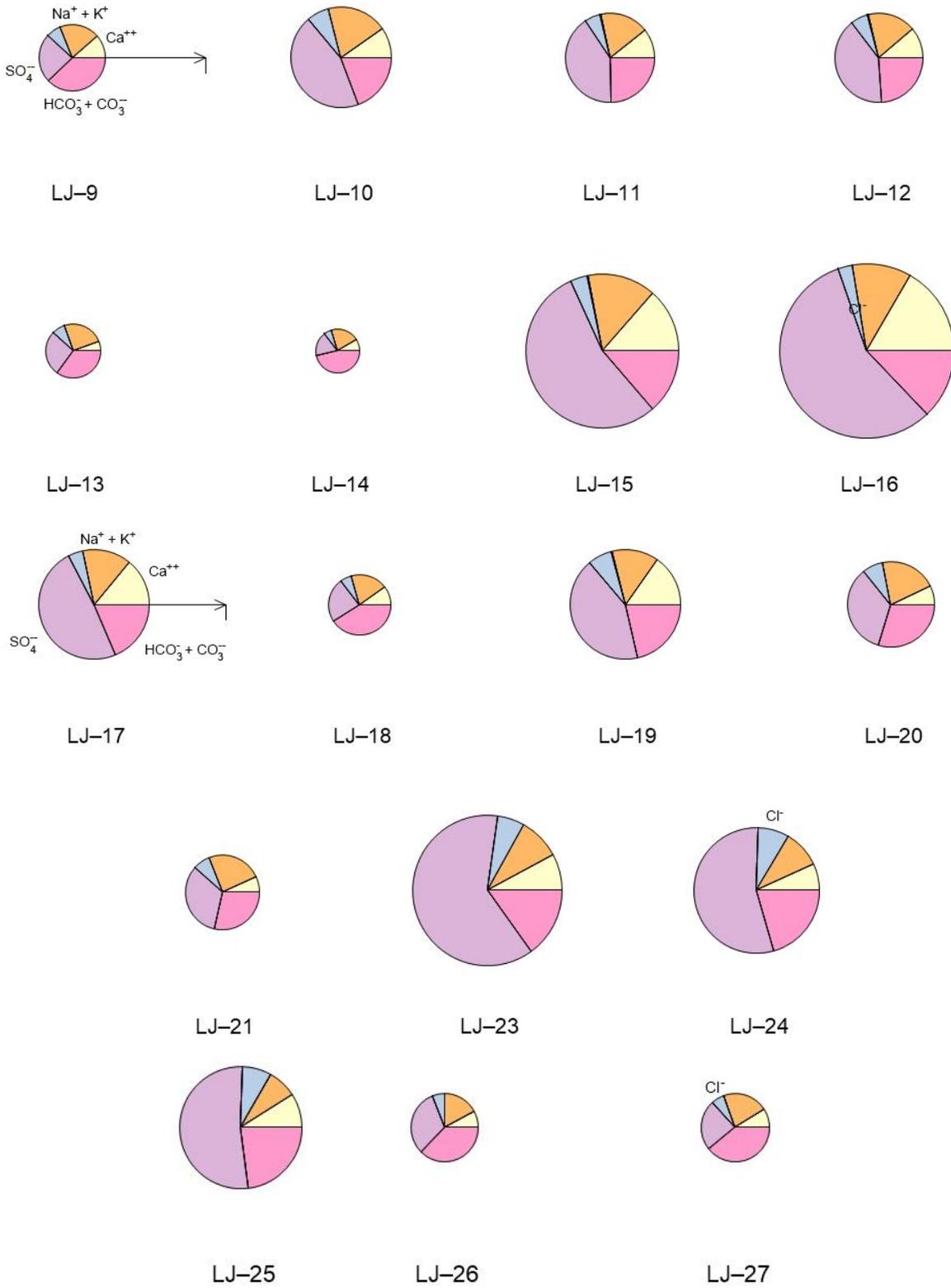


Figura 60.- Diagramas circulares, muestras 1 a la 27.



En el mapa de la Figura 61 se ubican las gráficas circulares de cada muestra y refleja la concentración total de acuerdo al tamaño del círculo, por lo que puede apreciarse claramente la dirección en que se mueven los iones, que deberá verse de forma similar a las isólinas de los Sólidos Disueltos Totales. La concentración total de iones crece de noreste a suroeste, con excepción de lo que se observa en el círculo del pozo LJ-7, cuyo gran tamaño representa una anomalía en este grupo de muestras colectadas en la zona de El Oasis.

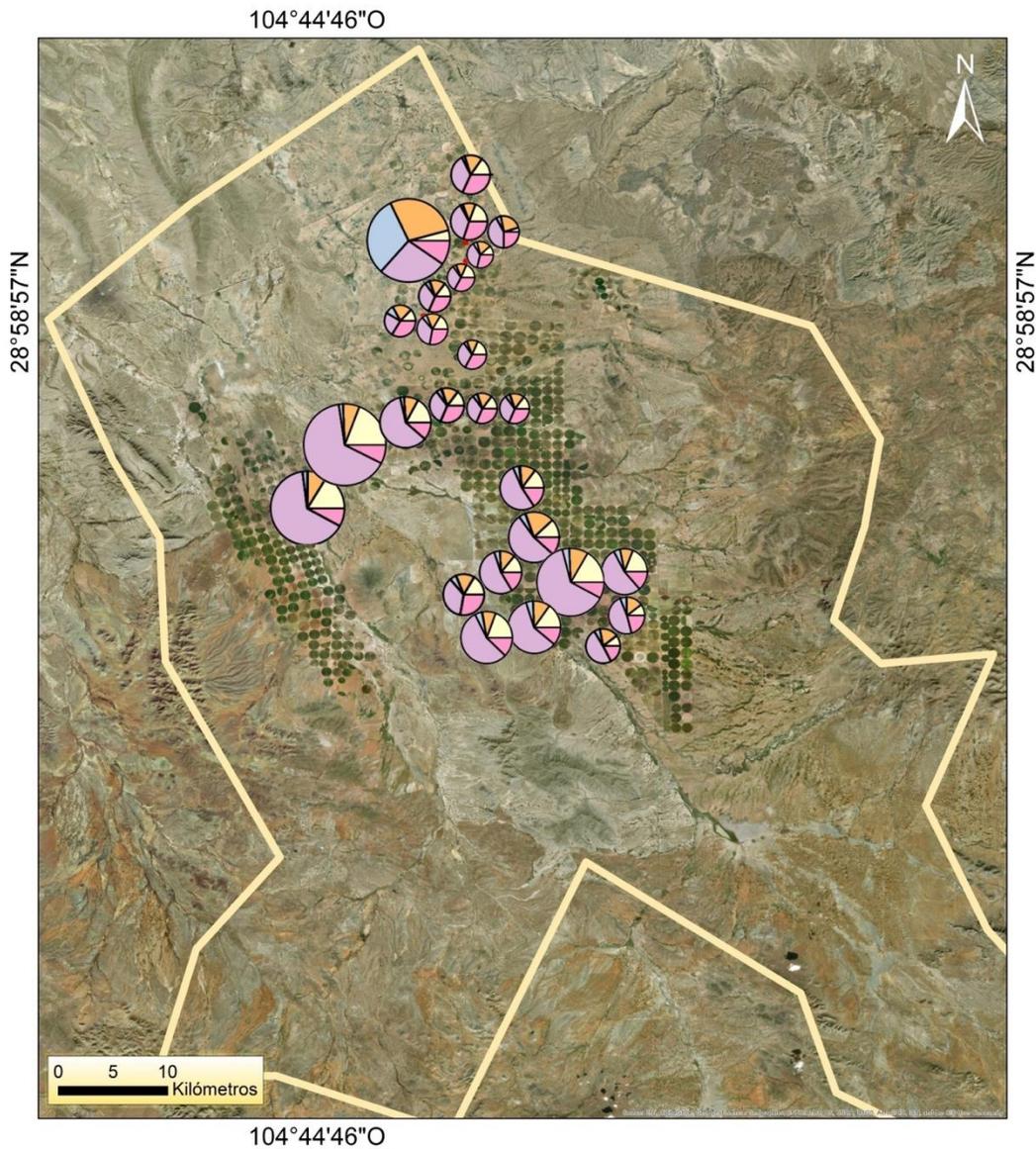


Figura 61.- Mapa de ubicación de diagramas circulares.



#### 4.3.4 Diagramas de Collins

Otra forma de analizar las muestras es mediante las gráficas de Collins (o de barras). Estas graficas muestran de inmediato dos características: la concentración de sólidos disueltos totales de cada una y la diferencia de concentración entre aniones y cationes, es decir manifiesta qué tanto porcentaje de error hay en el balance iónico. También se clasifican por ubicación, de modo que las muestras cercanas mostraran una composición iónica similar. De acuerdo a la red de pozos se distinguen 4 poblados principales entre los cuales se agrupan las muestras.

En el primer grupo de muestras de la LJ-1 a la LJ-9 y LJ-14 (Figura 62), pertenecientes al poblado El Oasis al norte del Acuífero, se distinguen por su bajo contenido de sales en todas las muestras indicando buena calidad del agua, con excepción de la LJ-7, y tienen el rango más alto de temperatura registrada en campo con 30°C promedio. Los pozos 7 y 5 presentan similitud catiónica con 90% de sodio y 10% de calcio; esto se relaciona con la calidad de agua clasificada según su relación de absorción de sodio.

El siguiente grupo de muestras (Figura 63) ubicadas en Las Bombas, al oeste (LJ-15 a la 18) y Nuevo Holanda al centro del acuífero (LJ-10 a la 13), muestra variadas cantidades de sales, siendo que las concentraciones más altas corresponden a Las Bombas y los iones dominantes son los sulfatos y el calcio, por lo que la dureza de esta agua es destacada. Las de menor concentración y ubicada en Nuevo Holanda, indican más contenido de sodio que de calcio y abundan los sulfatos; la muestra LJ-16 forma un punto de alta concentración de sólidos disueltos totales como se puede apreciar en los diagramas Collins.

En el tercer grupo de muestras (LJ-19 a la 27) ubicadas en el poblado Los Cienes, al sur-centro del acuífero se aprecian composiciones variadas (Figura 64), pero claramente destacan los sulfatos sobre los bicarbonatos, mientras el contenido de calcio y el sodio varía en cada muestra. Los pozos 26 y 27 ya muestran un contenido dominante de bicarbonatos, convirtiéndolas en aguas bicarbonatadas-sulfatadas. La muestra LJ-26 se ubican al pie de la



sierra Mojina, mientras que la LJ-27 se ubica al centro del acuífero, lo que explica su cambio de composición iónica. El pozo LJ-23 tiene los sólidos disueltos totales más altos de esta zona. Los diagramas de Collins en general nos aclaran la composición iónica de la red, distinguiéndose diversas calidades de agua, donde la mejor corresponde al norte en El Oasis, y al centro y sur se cataloga como agua de calidad media.

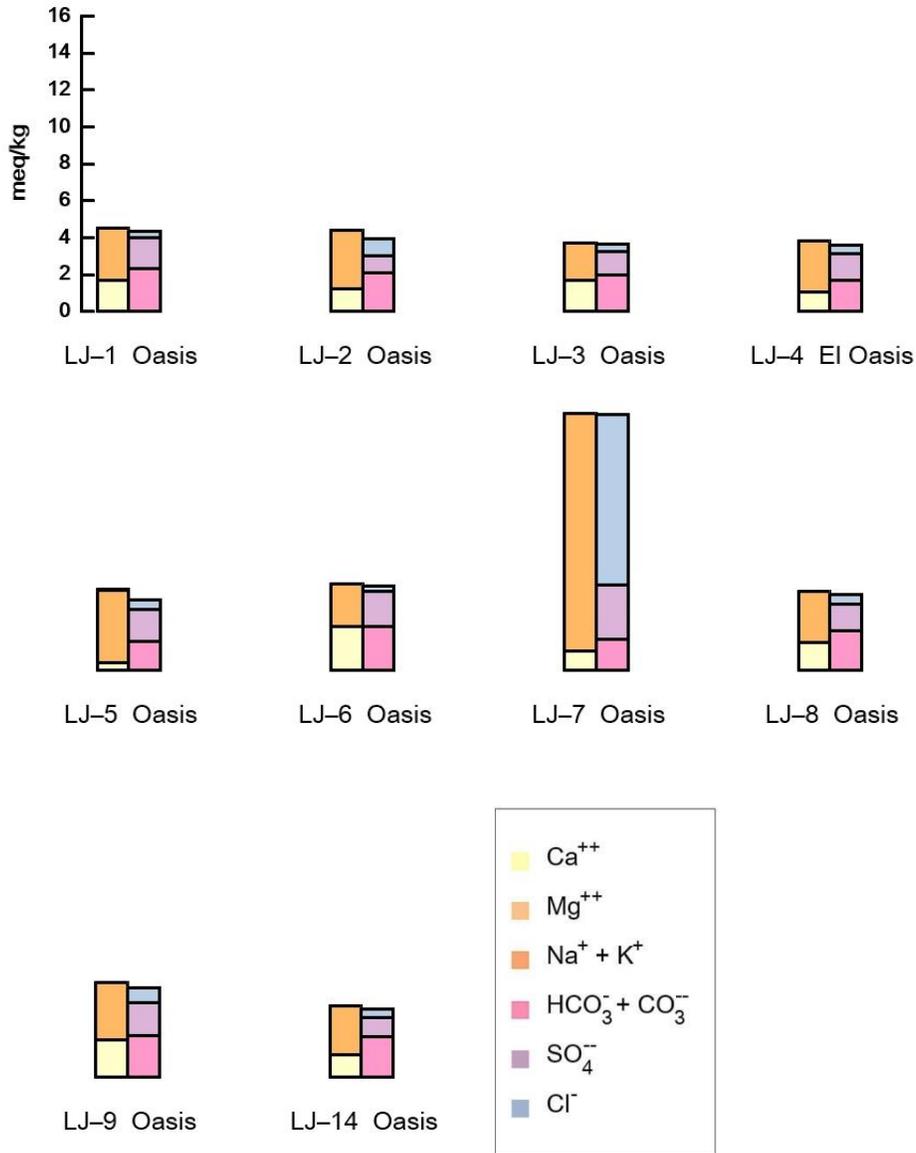


Figura 62.- Diagrama de Collins. GRUPO 1.

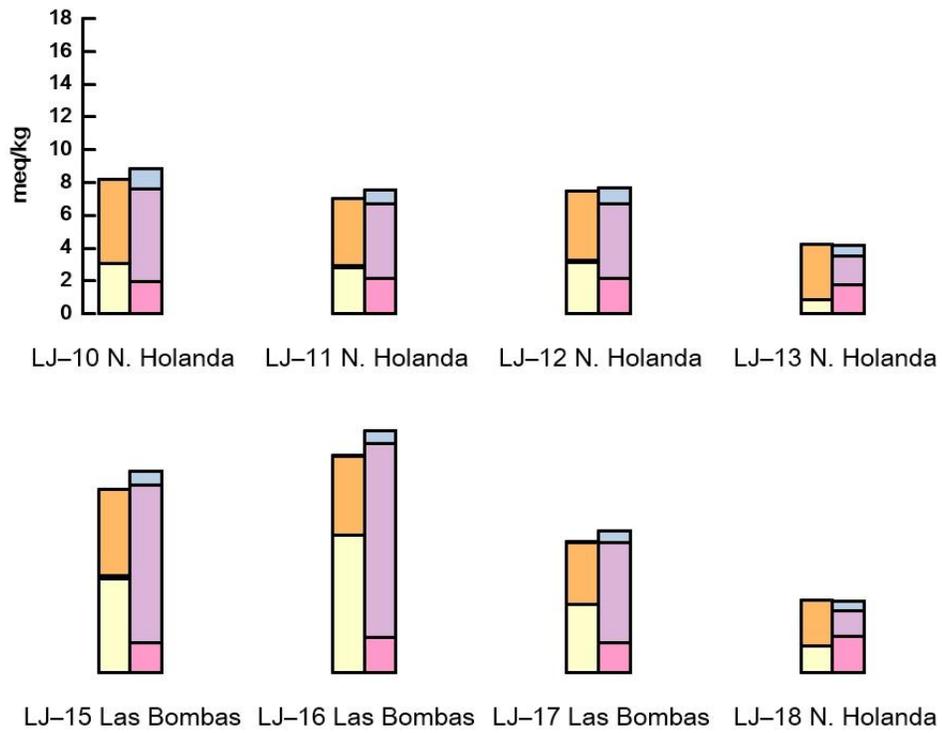


Figura 63.- Diagrama de Collins. GRUPO 2.

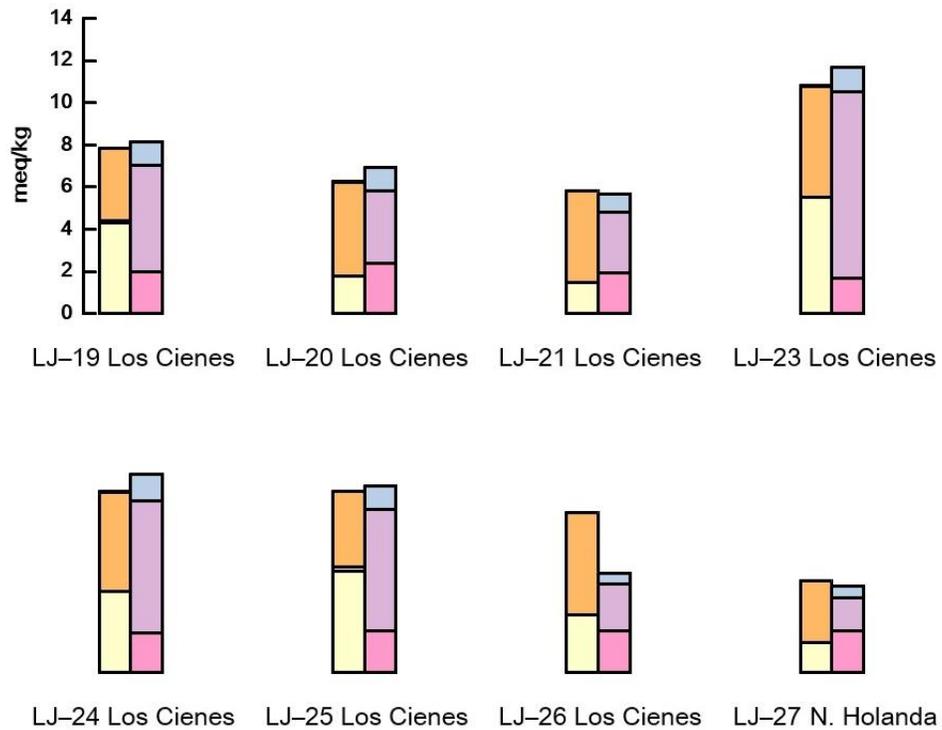


Figura 64.- Diagrama de Collins. GRUPO 3.



#### 4.4 CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS POR SU COMPOSICIÓN. FAMILIAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

##### 1. *Bicarbonatada Sódica*

En esta familia los iones dominantes son  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Na}^+$ , y corresponde a los pozos LJ-2 y LJ-14 del poblado El Oasis ubicado al norte del acuífero. Se observa buen contenido de bicarbonatos y poco en sulfatos, mientras que el sodio domina en más del 60% en todas las muestras. Presenta baja concentración de sólidos disueltos totales con promedio de 276.5 mg/l y un pH de 8.1, considerado típico para aguas subterráneas. Se detectaron temperaturas altas al rango normal con promedio de 27.8°C así como alto contenido de flúor con promedio de 2.63 mg/l. A excepción del flúor esta familia de agua no presenta más problemas en su calidad recomendada por la norma de agua potable.

En los diagramas de **Piper** (Figura 39) se observan al centro del romboide donde suelen ubicarse las aguas bicarbonatadas y con inclinación a la derecha del romboide que corresponde al carácter sódico. En el diagrama de **Schöeller** destaca por mucho el ion sodio que representa el 60% de la concentración catiónica de las muestras mientras que los bicarbonatos destacan sobre los sulfatos con un pico más alto como se observa en la Figura 40.

Los diagramas de **Stiff** muestran que este grupo de muestras tiene pequeñas concentraciones de sulfatos lo que hace que resalte el contenido de bicarbonatos con hasta 53% de la concentración entre los aniones, y a su vez denota mayor contenido de sodio con más del 65% de éste entre los cationes (Figura 51).

Los diagramas **circulares** para estas muestras indican bajo contenidos de sólidos disueltos totales al estar entre los círculos más pequeños de las 26 muestras.



## **2. Bicarbonatada–Sulfatada Sódica-Cálcica**

En esta familia los iones dominantes son  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Na}^+$ , y corresponde a los pozos LJ-1, LJ-3, LJ-4, LJ-6, LJ-8, LJ-9, en el poblado El Oasis, LJ-18 en Nvo. Holanda y LJ-27 en el poblado Los Cienes. Esta familia es una de las más abundantes y presenta buen contenido de bicarbonatos con hasta 148.2 mg/l, con valores de pH en el rango promedio y en general los sólidos disueltos totales con promedio de 289 mg/l. Se le atribuyen altas temperaturas a estos pozos con promedio de 27.7°C y alto contenido de flúor, en promedio de 2.6 mg/l. En el balance iónico se aprecia que tanto los sulfatos como los bicarbonatos dominan en porcentajes similares, aunque los contenidos de sulfatos no representan problema alguno y por el lado de los cationes domina el sodio hasta en un 60% de la concentración catiónica en algunas muestras (1,8 y 27) y en el resto de los pozos el sodio y calcio se concentran en cantidades muy similares, el sodio como catión dominante es de hecho característico en todas las familias. Este grupo de muestras con bajos contenidos de calcio, presentan en general pocos problemas en su calidad, con excepción de los altos contenidos de flúor que es en sí característico en 21 de 26 muestras.

Los diagramas de **Piper** y **Schöeller** confirman la composición química de estas aguas. En el diagrama de Piper se ven las muestras proyectadas al centro del romboide, haciendo evidente que las muestras son de aguas bicarbonatadas-sulfatadas en porcentajes similares y los cationes principales también corresponden a una mezcla de sodio y calcio. El diagrama de **Schöeller** destacan por muy poco los bicarbonatos y el sodio (Figuras 41 y 42).

Esto también es visible en los diagramas de **Stiff**, Figura 52, donde se aprecia claramente que los aniones que resaltan son los bicarbonatos, aunque éstos no rebasan los 148 mg/l (pozo LJ-6) junto con el anion sulfato con % de concentración similar, mientras que el cation dominante es el sodio con hasta 72 mg/l (pozo LJ-9), seguido del calcio.

En los diagramas **circulares** (Figura 60) estas muestras se distinguen como los círculos más pequeños, ya que representan las menores concentraciones de sólidos disueltos



totales. En general son los pozos menos problemáticos y se ubican principalmente en la parte norte del acuífero.

### **3. Sulfatada-Bicarbonatada Sódica**

En esta familia los iones dominantes son  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Na}^+$ , y corresponde a los pozos LJ-5 en el poblado El Oasis, LJ-13 en Nuevo Holanda y LJ-26 en Los Cienes. Esta familia se compone de 3 muestras que presentan el 12% del total de las muestras. Se caracteriza por principalmente por su alto porcentaje de sodio hasta en 90% en la muestra LJ-5 mientras que la LJ-13 con 80%. Las cantidad de calcio de este grupo es el más bajo en toda la red de pozos con excepción del pozo LJ-26 con contenido promedio de calcio. Los sulfatos y bicarbonatos se encuentran en % similares de acuerdo al balance iónico. 4.65 promedio tiene en su contenido de flúor y aunque el resto de los iones mayores no se presentan en cantidades preocupante, esta agua se caracteriza como agua de mala calidad para consumo humano gracias al fluor. Este grupo tiene una temperatura promedio de  $27^\circ\text{C}$  considerada alta de acuerdo al rango típico para aguas subterráneas y un pH de 8.6, parámetro aceptable en agua subterránea. El conjunto indica también baja concentración de solidos disueltos totales, 340 mg/l en promedio.

En el diagrama de **Piper** las muestras se definen como sulfatadas con ligera tendencia hacia los bicarbonatos (parte central del romboide) con una clara inclinación a la derecha que corresponde a un alto % de sodio en las muestras (Figura 43). En el diagrama de **Schöeller** sobresaliendo el sodio entre los cationes, mientras los sulfatos y bicarbonatos se encuentran en porcentajes muy similares y es posible que los sulfatos destaquen muy poco de los bicarbonatos (Figura 44).

Los diagramas de **Stiff** hacen evidente en la Figura 53, como el sodio destaca en la composición química de las 4 muestras, principalmente en los pozos 5 y 13 en los que el sodio representa un 90% de su composición catiónica. Los sulfatos y bicarbonatos se encuentran en % muy similares.



Los diagramas **circulares** para estas 3 muestras se aprecian como círculos pequeños, es decir con pocos sólidos disueltos totales y los colores representativos de los sulfatos y bicarbonatos se aprecian en % similares. El color del sodio abarca el área mayor correspondiente a los cationes, el bajo contenido de calcio prácticamente no se aprecia en este diagrama.

#### ***4. Sulfatada Sódica o Sódica-Cálcica***

En esta familia los iones dominantes son  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Na}^+$ , y corresponde a los pozos LJ-10, LJ-11 y LJ-12 en el poblado Nvo. Holanda y LJ-20, LJ-21 y LJ-24 en el poblado Los Cienes al centro-sur del acuífero, 6 muestras que presentan el 23% del total. En los pozos 20 y 21 el ion sodio se hace presente con más del 70% de la concentración total de cationes en ambas muestras mientras el ion sulfato no rebasa lo recomendado por la norma de agua potable en sus concentraciones. Los altos contenidos del flúor caracterizan la calidad de esta agua con promedio de 3.8 mg/l y en especial el pozo LJ-21 con hasta 8.25 mg/l. El pH y la temperatura se encuentran en el rango promedio para agua subterránea. Los pozos LJ-10 y LJ-12 muestran un pH excepcionalmente alto de 9.02 y 10.15, respectivamente. Las muestras 12 y 24 ubicadas al sur ya comienzan a presentar buen contenido de calcio dándole tendencia a ser agua sódica-cálcica. La temperatura promedio registrada en este grupo es de 23,7°C y un pH de 8.8 promedio. Los sólidos disueltos totales comienzan a aumentar en este grupo de muestras con 487 mg/l promedio.

Los diagramas de **Piper y Schöeller** confirman la composición química de estas aguas de acuerdo a las Figuras 45 y 46. En el diagrama de Piper se ven las muestras proyectadas a la derecha del romboide, haciendo evidente un buen % de sodio y calcio, mientras que en los aniones se observa alto % de sulfatos y pocos bicarbonatos. En el diagrama de **Schöeller** destaca los sulfatos sobre los bicarbonatos, el ion sodio predomina en los cationes principalmente en las muestras 20, 21 y 26 donde el sodio representa hasta un 74% mientras en las muestras 10, 11 y 12 el ion calcio se proyecta con contenido muy cercano al sodio.



El dominio del ion sulfato se aprecia claramente en los diagramas de **Stiff** así como en los diagramas circulares. Es lógico encontrarse con sulfatos en concentraciones dominantes, ya que en dicha zona así se ha caracterizado desde los estudios realizados en el año 1985. Los sulfatos tienen origen naturalmente geológico por la disolución de yeso y anhidrita y esto es común en gran parte de territorio de Chihuahua (Figura 54).

Los diagramas **circulares** indican que su concentración total de sólidos disueltos es promedio entre el total de muestras de la red, y se ubican cerca de un punto alto de concentración de iones (pozo LJ-23) por lo que estas muestras no presentan problemas de calidad en el agua excepto por que su contenido de flúor es alto.

### ***5. Sulfatada Cálcica o Cálcica-Sódica***

En esta familia los iones dominantes son  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Na}^+$  y los pozos que corresponden a la familia de agua son LJ-15, LJ-16 y LJ-17 en el poblado Las Bombas y LJ-19, LJ-23 y LJ-25 en el poblado Los Cienes. Este es el segundo tipo de agua más abundante en el Acuífero con 27% del total de las muestras. Los antecedentes del año 1985, muestran indicios de alto contenido de sulfatos en la zona de Las Bombas y Los Cienes, superando el límite permisible de 400 mg/l en la norma de agua potable. En las rocas sedimentarias, el calcio ocurre como carbonatos, carbonatos de calcio y magnesio y sulfatos de calcio (yeso y anhidrita) por lo que suele asociarse con el ion sulfato. El contenido en sulfatos de las aguas naturales es muy variable, pero en contenidos superiores a 300 mg/l pueden ocasionar trastornos gastrointestinales. 3 de las 6 muestras contienen en promedio 490 mg/l de sulfatos. Se observó en la zona lacustre al norte del acuífero una especie de costra en el suelo que corresponde a la laguna Los Juncos, donde es congruente haber encontrado importantes contenidos de sulfatos. La dureza del agua es característica cuando el calcio es un ion predominante como ocurre con este grupo de muestras. En la superficie de esta zona censada se encuentra suelo del tipo Yermosol que se caracteriza por aportar alto contenido de sodio y muy alto de calcio. Las sales en el agua tienden a aumentar su solubilidad conforme aumenta la temperatura; con las sales de calcio ocurre a la inversa,



disminuyendo su grado de disolución y precipitando. Esta familia además de alto contenido de sulfatos y buen contenido de calcio, indica las mayores concentraciones de sólidos disueltos totales de la red 2018, donde alcanza hasta 758 mg/l (LJ-16) y un promedio de 622 mg/l, formando 2 puntos concéntricos de alta contenido de iones. El pH y la temperatura se encuentran en el rango promedio para agua subterránea. El flúor en esta familia también se encuentra en valores altos, en promedio 2.9 mg/l, y una concentración máxima de 4.33 mg/l (LJ-17) y hasta 24,6 mg/l máximo de nitratos (LJ-24).

En el diagrama de **Piper** se ubican las muestras en la parte superior derecha del romboide donde claramente resalta la concentración del anión sulfato como dominante (Figura 47), al igual que el calcio entre los cationes. La gráfica de **Schöeller** confirma también los iones dominantes en esta familia de agua destacando los sulfatos con más de 70% de la concentración de aniones y el calcio se ubica ligeramente sobre el sodio con % similares en la concentración catiónica (Figura 48).

Se aprecia claramente en los diagramas de **Stiff** los picos que representan a los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  sobresalen en el esquema del diagrama según la Figura 55.

De acuerdo a los diagramas **circulares** la muestra LJ-16 representa el segundo círculo más grande al igual que el círculo representativo del pozo LJ-23, lo que significa que ambos tienen las mayores concentraciones de sólidos disueltos totales en la red 2018.

## **6. Clorurada Sódica**

En esta familia los iones dominantes son el cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) y el sodio ( $\text{Na}^+$ ), y corresponde al pozo LJ-7 en el poblado El Oasis, al norte del acuífero. Este pozo mostró en campo una temperatura fuera del rango esperado para aguas subterráneas ( $34,2^\circ\text{C}$ ), por lo que puede considerarse que el agua extraída de este aprovechamiento proviene de un flujo regional o estrato más profundo en posible contacto con un cuerpo intrusivo ígneo. El pH (8.14) es un valor típico de agua subterránea y los sólidos disueltos totales (778 mg/l) son



los más altos de toda la red. Nuevamente el flúor se hace presente con importante contenido de 6.92 mg/l, rebasando el límite de la norma de agua potable incluso lo recomendado por la EPA que acepta hasta 4 mg/l de flúor, como límite primario. De igual forma el sodio y los cloruros, con 297.7 mg/l y 332.2 mg/l respectivamente rebasan el limite permisible. Estas características explican que dicha muestra sea considerada con la peor calidad de agua encontrada en la red de pozos 2018.

Así lo demuestra el diagrama de **Piper** en la Figura 49, ya que el punto de la muestra se ubica al extremo derecho del romboide y se aprecia como el ion cloruro ocupa un 64% de la concentración total total de la muestra y el ion sodio representa el 92% entre los cationes. La grafica de **Schöeller** (Figura 50) muestra también como dominante los iones cloruro y sodio y muy bajo el calcio y los bicarbonatos con respecto de la mayoría de pozos. El ion cloruro puede provenir de la disolución de rocas ígneas y se llega a acumular en las partes bajas donde, debido a las características de aridez y cuenca cerrada, se forman horizontes evaporíticos de cloruro de sodio (SARH, 1982). En este caso, se relaciona el posible proceso de evaporación con la temperatura elevada encontrada en el pozo LJ-7 de El Oasis.

Confirmando lo anterior los diagramas de **Stiff** indican claramente los iones predominantes (cloruro y sodio) mientras que los bicarbonatos y el calcio no destacan en esta composición (Figura 56).

De acuerdo a los diagramas **circulares** la muestra LJ-7 es el círculo más grande entre todas las muestras por su alto contenido de iones. La conductividad eléctrica es alta (1112 uS/cm) al igual que la concentración de sodio, por lo que la calidad del agua se compromete a tener una mala calidad para el riego agrícola.



Tabla 13.- Resumen de familias de agua subterránea en el acuífero Los Juncos

No. Grupo	FAMILIA	No. de muestras	Pozos
1	Bicarbonatada – Sódica	2	LJ-2, LJ-14
2	Bicarbonatada–Sulfatada Sódica–Cálcica	8	LJ-1, LJ-3, LJ-4, LJ-6, LJ-8, LJ-9, LJ-18, LJ-27
3	Sulfatada-Bicarbonatada Sódica	3	LJ-5, LJ-13, LJ-26
4	Sulfatada Sódica o Sódica-Cálcica	6	LJ-10, LJ-11, LJ-12, LJ-20, LJ-21, LJ-24
5	Sulfatada Cálcica–Sódica	6	LJ-15, LJ-16, LJ-17, LJ-19, LJ-23, LJ-25
6	Clorurada Sódica	1	LJ-7

#### 4.5 EVALUACIÓN DEL AGUA PARA USO AGRÍCOLA

Uno de los parámetros de mayor preocupación para agricultores es la salinidad y los riesgos de alcalinización por sodio, ya que pocos cultivos son resistentes a estas condiciones. Por lo tanto, para usos agrícolas, el agua se clasifica con base a la Relación de Adsorción de Sodio (RAS).

##### *Diagrama Wilcox*

En este diagrama se relaciona la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) con respecto a la conductividad eléctrica (C). Este parámetro expresa la posibilidad de que el  $\text{Na}^+$  se adsorba en el complejo de intercambio del suelo y la presencia de otros cationes, en especial el  $\text{Ca}^{+2}$  reduce esta posibilidad (Ortega & Orellana, 2007). El diagrama se basa en una fórmula empírica (RAS) que relaciona los contenidos de sodio, calcio y magnesio, expresados en meq/l de la manera siguiente:

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



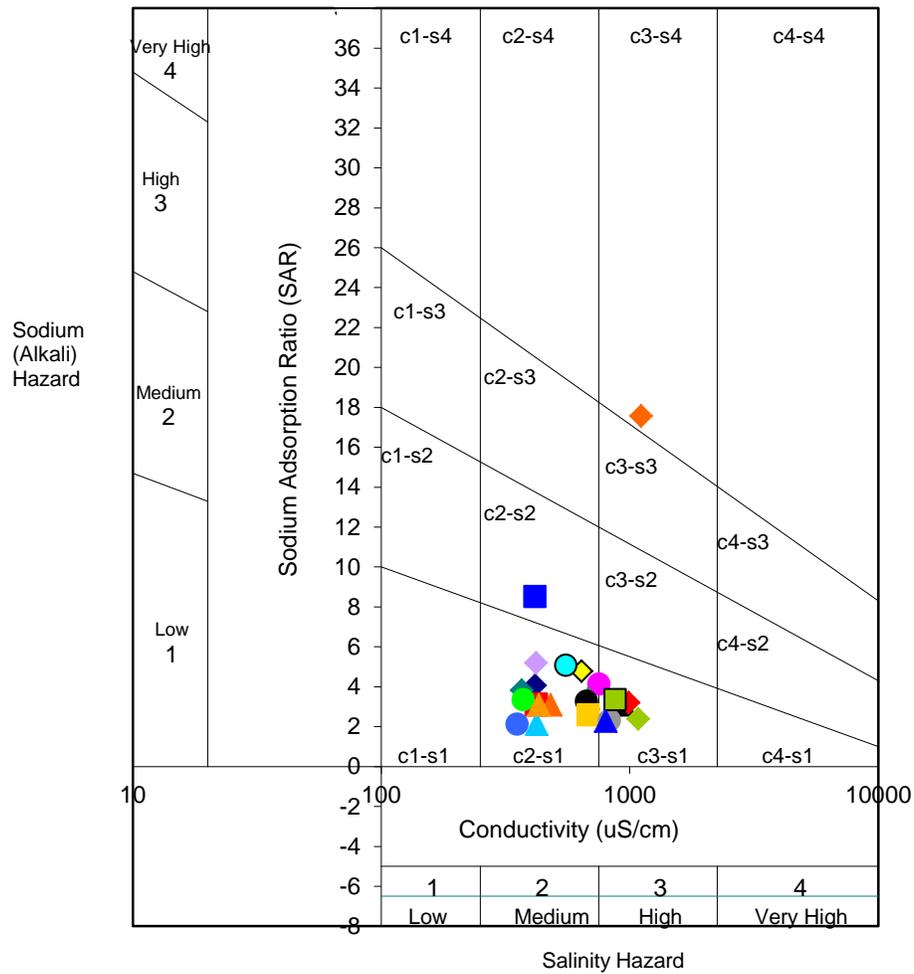
El empleo del diagrama de Wilcox es uno de los procedimientos más utilizados para predecir y evaluar el riesgo de alcalinización por concentraciones elevadas de sodio (S). El agua se clasifica por su calidad de acuerdo a la combinación de este parámetro con el riesgo de salinización (C). (Tabla 14). En la Figura 65 se ubicaron las 26 muestras del acuífero Los Juncos con base en su valor de RAS (S) y su conductividad eléctrica (C) (Freeze, R. Cherry, J., 1979).

*Tabla 14.- Clasificación de las aguas según el contenido de sales y el índice RAS*

<i>Grado</i>	<i>Calidad</i>	<i>Clase</i>	<i>Recomendación</i>
1	Excelente	C1-S1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua que se puede utilizar para cultivos y suelos sin riesgo.</li> </ul>
		C2-S1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua apta para el riego de plantas con tolerancia media a las sales en suelos con buena permeabilidad.</li> </ul>
2	Buena	C2-S2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocasiona problemas en plantas sensibles al sodio y en suelos con elevada capacidad para intercambiar iones (suelos arcillosos)</li> </ul>
3	Admisible	C3-S1 C4-S1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua conveniente para la irrigación de cultivos tolerables a la sal en suelos con buen drenaje. La salinidad debe ser controlada.</li> </ul>
4	Media	C4-S2 C3-S3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua con alto contenido de sales minerales, es sólo para especies muy tolerables y suelos con buen drenaje y lixiviación.</li> </ul>
5	Mala	C3-S4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua no adecuada para riego, útil en suelos muy permeables, con buena lixiviación y plantas altamente tolerables a la sal.</li> </ul>
6	Muy mala	C4-S4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua no adecuada para riego.</li> </ul>



### Salinity Diagram for Classification of Irrigation Waters



- 1    ◆ 2    ● 3    ◆ 4    ■ 5    ▲ 6    ◆ 7    ■ 8    ▲ 9    ● 10    ▲ 11    ● 12    ◆ 13
- 14    ▲ 15    ◆ 16    ■ 17    ▲ 18    ● 19    ◆ 20    ● 21    ◆ 23    ■ 24    ▲ 25    × 26    × 27

Figura 65.- Diagrama Wilcox para la clasificación de las aguas según el índice RAS y la conductividad eléctrica (Software Easy Quim).



Tabla 15.- Clasificación del agua del acuífero Los Juncos de acuerdo al diagrama de Wilcox

ID	RAS	CE umhos	Riesgo	Calidad	ID	RAS	CE umhos	Riesgo	Calidad
LJ-1	3,08	421	C2-S1	Excelente	LJ-14	3,36	372	C2-S1	Excelente
LJ-2	4,06	417	C2-S1	Excelente	LJ-15	3,04	950	C3-S1	Admisible
LJ-3	2,13	352	C2-S1	Excelente	LJ-16	2,37	1083	C3-S1	Admisible
LJ-4	3,81	368	C2-S1	Excelente	LJ-17	2,58	680	C2-S1	Excelente
LJ-5	8,51	415	C2-S2	Buena	LJ-18	3,08	431	C2-S1	Excelente
LJ-6	2,11	423	C2-S1	Excelente	LJ-19	2,28	829	C2-S1	Excelente
LJ-7	17,57	1112	C3-S4	Mala	LJ-20	4,73	641	C2-S1	Excelente
LJ-8	3,13	420	C2-S1	Excelente	LJ-21	5,07	553	C2-S1	Excelente
LJ-9	3,09	481	C2-S1	Excelente	LJ-23	3,18	991	C3-S1	Admisible
LJ-10	4,12	751	C2-S1	Excelente	LJ-24	3,34	873	C2-S1	Excelente
LJ-11	3,34	682	C2-S1	Excelente	LJ-25	2,23	802	C2-S1	Excelente
LJ-12	3,19	670	C2-S1	Excelente	LJ-26	4,18	740	C2-S1	Excelente
LJ-13	5,19	420	C2-S1	Excelente	LJ-27	3,48	413	C2-S1	Excelente

De acuerdo a los resultados de la clasificación presentados en la Tabla 65, 3 pozos se encuentran en el rango Admisible (LJ-15, LJ-16 y LJ-23), 1 es de calidad mala (LJ-7) y 1 es de calidad buena (LJ-5), lo que significa que su tolerancia está en el límite. El promedio de RAS obtenido en la red es de 3.96, se considera de Baja peligrosidad sódica cuando  $RAS < 3$ . El pozo LJ-7 tiene alto riesgo de alcalinización y salinidad debido al sodio y la conductividad eléctrica respectivamente, el pozo LJ-5 tiene buena calidad pero con tendencia a la alcalinización, no presenta alto contenido de sodio ni de conductividad eléctrica sin embargo está influyendo el contenido muy bajo de calcio. Las muestras clasificadas con calidad Admisible tiene una buena concentración de solidos disueltos totales y por ende de conductividad eléctrica (897  $\mu\text{S}/\text{cm}$  promedio), y su contenido de sodio promedio es de 126.4 mg/l. De las 21 muestras restantes, 7 pertenecen al poblado el Oasis, 4 muestras en el poblado Nuevo Holanda con calidad Excelente y el resto en el poblado Los Cienes, todas con Calidad Excelente.



#### 4.6 COMPARACIÓN DE PARÁMETROS CON LA NORMA DE CALIDAD PARA AGUA POTABLE

El agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas; esto lo define la Modificación a la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION" (Tabla 16).

Tabla 16.- Listado de parámetros limitados para agua potable considerados en este estudio

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994	
Característica	Limite permisible (mg/L)
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250.00
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00
Sodio (Na)	200.00
Flúor (F <sup>-</sup> )	1.50
Arsénico (As)	0.025
Nitratos (como N)	10.00
Sólidos disueltos totales (SDT)	1000.00
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	400.00

A continuación se enlistan en la Tabla 17 los pozos más críticos de acuerdo a los resultados de laboratorio. Los pozos son clasificados con calidad admisible, ya que si bien el fluor presente en el agua es considerado toxico en cantidades superiores a 1.5 mg/l para consumo humano, es tolerable para riego de cultivo pero con restricciones. Los valores que superan los límites máximos permisibles (LMP) se encuentran marcados en rojo.



Tabla 17.- Pozos con características destacadas en el acuífero Los Juncos. 2018

ID	Geología	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	NA <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Conc. Total	FAMILIA	Calidad	Localidad
LJ-7	Q(al) Aluvial	6,92	332,40	144,1	297,7	21,7	14,4	Clorurada Sódica	Mala	El Oasis
LJ-13	Q(al) Aluvial	6,69	23,03	84,6	78,7	17,4	4,5	Sulfatada Bicarbonatada Sódica	Admisible	Nva. Holanda
LJ-15	Q(al) Aluvial	3,46	29,72	466,4	122,7	116,6	12,1	Sulfatada Sódica-Cálcica	Admisible	Las Bombas
LJ-16	Q(al) Aluvial	3,27	27,02	576,7	112,9	170,0	14,4	Sulfatada Sódica-Cálcica	Admisible	Las Bombas
LJ-21	Q(al) Aluvial	8,25	31,73	139,3	100,7	29,8	6,1	Sulfatada Sódica	Admisible	Los Cienes
LJ-23	Q(al) Aluvial	2,76	41,59	428,1	123,0	111,6	11,6	Sulfatada Sódica-Cálcica	Admisible	Los Cienes

#### 4.6.1 Dureza del agua subterránea

La concentración de dureza total en el agua es una característica que también está limitada por la norma mexicana de agua potable y que se refiere a la concentración de calcio y magnesio presentes. La dureza en el agua no debe rebasar 500 mg/l (como CaCo3). En el acuífero los juncos los pozos 15 y 16 muestran el agua más dura (Figura 66), pero dentro del límite recomendado (Ver Figura 67 y Tabla 18).

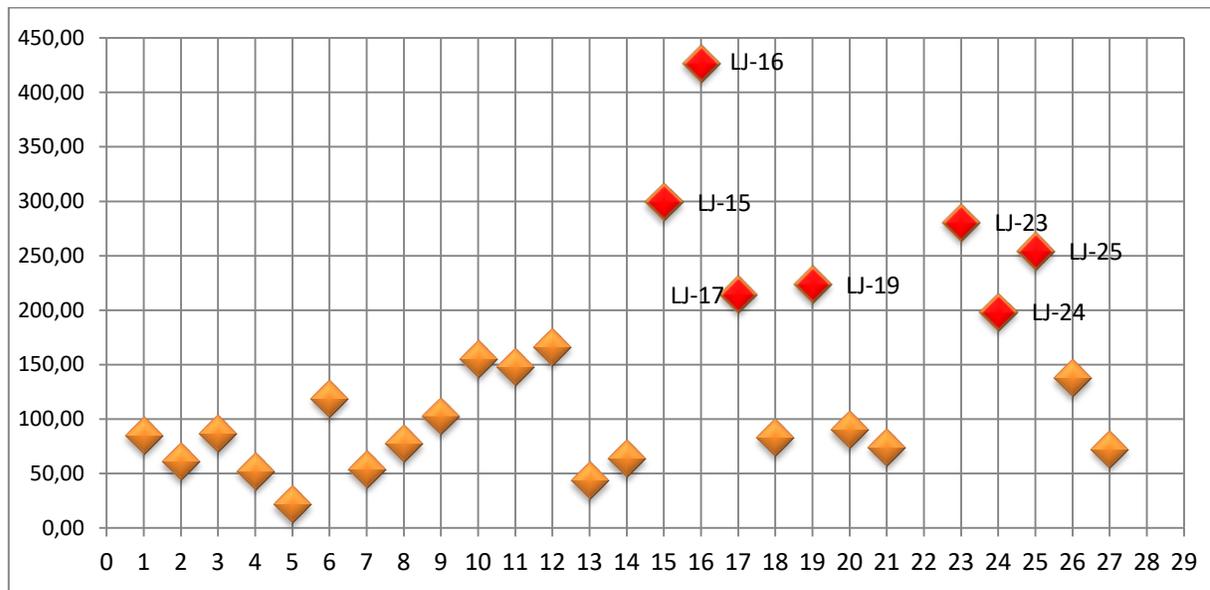


Figura 66.- Dureza total de la red de pozos 2018.



Tipo de agua	Dureza (mg/l CaCO <sub>3</sub> )
1. Agua blanda	0 – 60
2. Agua moderadamente dura	61 – 120
3. Agua dura	121 – 180
4. Agua muy dura	> 180

Figura 67.-Calcificación por la dureza (mg/l CaCo3)

Tabla 18.- Clasificación de las muestras de acuerdo a su Dureza Total.

Id pozo	Dureza total	Calidad
LJ-1	85,18	Moderadamente Dura
LJ-2	61,10	Agua Blanda
LJ-3	86,37	Moderadamente Dura
LJ-4	52,41	Agua Blanda
LJ-5	21,65	Agua Blanda
LJ-6	119,21	Moderadamente Dura
LJ-7	54,23	Agua Blanda
LJ-8	77,71	Moderadamente Dura
LJ-9	102,82	Moderadamente Dura
LJ-10	155,28	Agua Dura
LJ-11	148,00	Agua Dura
LJ-12	166,50	Agua Dura
LJ-13	43,41	Agua Blanda
LJ-14	63,73	Moderadamente Dura
LJ-15	299,25	Agua muy Dura
LJ-16	426,84	Agua muy Dura
LJ-17	214,99	Agua muy Dura
LJ-18	82,89	Moderadamente Dura
LJ-19	223,84	Agua muy Dura
LJ-20	90,20	Moderadamente Dura
LJ-21	74,45	Moderadamente Dura
LJ-23	280,94	Agua muy Dura
LJ-24	198,87	Moderadamente Dura
LJ-25	254,44	Agua muy Dura
LJ-26	137,71	Agua Dura
LJ-27	72,44	Moderadamente Dura



#### 4.7 FLÚOR

El flúor se encuentra en la corteza terrestre y se distribuye naturalmente en el aire, agua y suelo. En concentraciones considerables este elemento representa también para el ser humano un riesgo tanto por los efectos nocivos sobre distintos tejidos del organismo, el sistema nervioso, así como fluorosis dental y problemas óseos.

Los efectos tóxicos agudos pueden aparecer con dosis de flúor entre 0,5 y 8 mg, y las letales entre 32 y 64 mg. El flúor afectaría principalmente al hueso que se encuentra en activa reabsorción. El límite para este elemento en la norma mexicana de agua potable es de 1.5 mg/l. Las poblaciones más afectadas por fluorosis son las que se ubican en áreas geográficas con alto contenido natural de flúor en el agua, como ciertos lugares de la India (20 mg/l), África del Este (2800 mg/l), Sudáfrica (58 mg/l), Checoslovaquia (28 mg/l), Portugal (23 mg/l), Estados Unidos (16 mg/l), Australia (13 mg/l). Los datos mencionados dan idea del índice de gravedad que se puede encontrar al utilizar las aguas subterráneas de dichas regiones como agua de consumo (Rivera et al., 1993).

El análisis de los principales iones en el Acuífero los Juncos muestra que el flúor se encuentra en cantidades superiores a los límites recomendados por Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 (1.5 mg/l) en la mayoría de los pozos muestreados. Entre ellos sobresalen los valores de 8.25 mg/l en el pozo LJ-21, 6.92 mg/l en el pozo LJ-7 y 6.69 mg/l en el pozo LJ-13; el promedio en el conjunto de datos es 3.3 mg/l. La distribución espacial de este elemento en el acuífero se observa en el mapa de isolíneas de concentración de flúor que se muestra en la Figura 68.

No se cuentan con datos de concentraciones de flúor en el estudio de 1985 del acuífero Los Juncos. En los que respecta a los registros históricos para los años 2009 y 2011 de análisis de agua de pozo realizados por el Departamento de Calidad del Agua de la Junta Central de Agua y Saneamiento del estado de Chihuahua (JCAS) se encontraron un máximo de 4.6 mg/l de  $F^-$  en el poblado El Oasis (año 2009), mientras que en el presente estudio se encontró un máximo de 8.25 mg/l en el pozo LJ-21 (poblado Los Cienes).

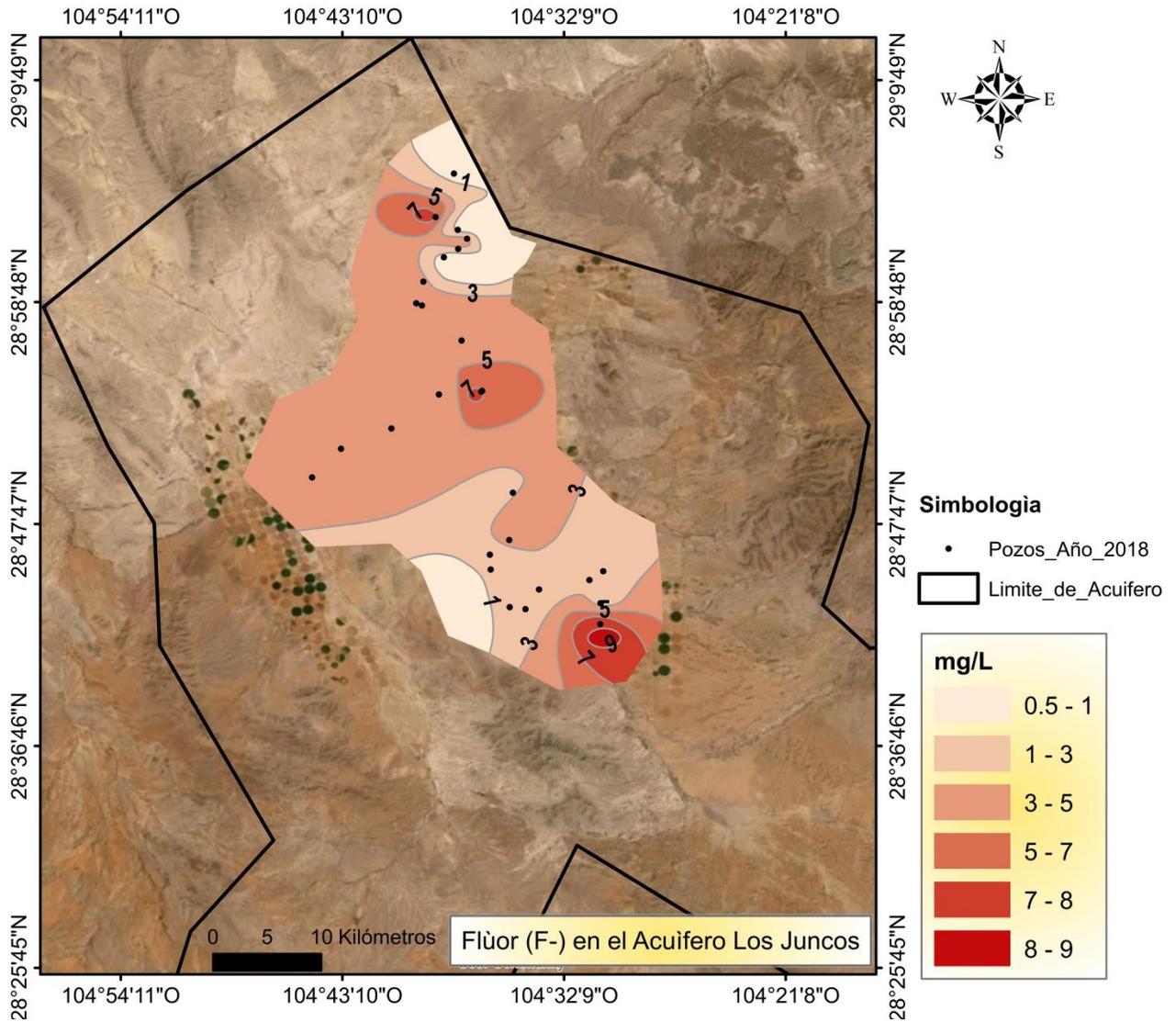


Figura 68.- Concentraciones de flúor (mg/l) en el acuífero Los Juncos, año 2018.

#### 4.7.1 Índice de Saturación del Flúor

El Índice de Saturación (IS) determina si una solución se encuentra en equilibrio (cuando el índice de saturación es 0), está insaturada o sobresaturada respecto de algún soluto de interés. Debido a que destaca la presencia de flúor en concentraciones arriba del límite para agua potable. Se consideró como posible fuente del ion fluoruro la disolución de fluorita, de acuerdo con el equilibrio siguiente:



Se realizó el cálculo del Índice de Saturación para cada una de las muestras de agua colectadas en el acuífero Los Juncos, empleando la relación siguiente:

$$\text{IS} = \log \frac{\text{PCI}}{\text{Kps}}$$

Donde:

$\text{PCI} = [\text{Ca}^{+2}] * [\text{F}^-]^2 =$  Producto de Concentración Iónica (moles/L) y

$\text{Kps} = 3.9 \times 10^{-11}$  para la disolución de la fluorita.

El resultado de los cálculos de IS, arroja valores negativos para 16 muestras, insaturadas en relación a la fluorita, es decir, con una tendencia a la disolución y 8 muestras sobresaturadas (valores positivos) como se aprecia en la Figura 69, donde el eje Y representa el índice de saturación (IS) y el eje X indica el producto de concentración iónica (PCI). Esto significa que 60% de las muestras tienen posibilidades de incrementarse con el tiempo hasta lograr el equilibrio  $\text{Ca}^{+2}$  vs  $\text{F}^-$  definido por el IS calculado para el mineral mencionado, mientras que 40% se encuentran sobresaturados.

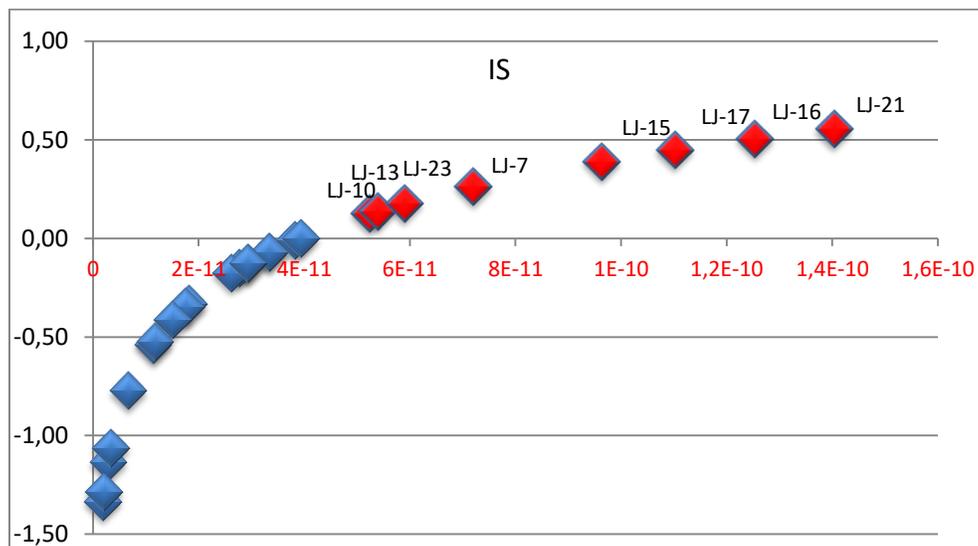


Figura 69.- Índice de Saturación del Flúor (F-).

Así mismo debido al buen contenido de sulfatos, calcio y flúor en las muestras LJ-15, LJ-16 LJ-7 y LJ-23 que en la red representan los pozos con mayor concentración iónica,



estos pueden precipitar también en otros minerales como se aprecia en la Figura 70 que muestran los resultados de acuerdo al software PHREEQC que permite calcular los índices de saturación de cada muestra según su composición y concentración iónica.

Pozo LJ-15					Pozo LJ-16				
-----Saturation indices-----									
Phase	SI**	log IAP	log K(298 K, 1 atm)		Phase	SI**	log IAP	log K(301 K, 1 atm)	
Anhydrite	0.98	-3.31	-4.29	CaSO4	Anhydrite	1.19	-3.12	-4.31	CaSO4
Aragonite	2.58	-5.76	-8.34	CaCO3	Aragonite	2.22	-6.14	-8.36	CaCO3
Calcite	2.73	-5.76	-8.48	CaCO3	Calcite	2.36	-6.14	-8.50	CaCO3
CO2(g)	-1.40	-2.87	-1.48	CO2	CO2(g)	-0.72	-2.22	-1.50	CO2
Dolomite	3.76	-13.35	-17.11	CaMg(CO3)2	Dolomite	2.41	-14.75	-17.16	CaMg(CO3)2
Fluorite	3.11	-7.48	-10.59	CaF2	Fluorite	3.16	-7.40	-10.56	CaF2
Gypsum	1.26	-3.32	-4.58	CaSO4:2H2O	Gypsum	1.45	-3.13	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-23.91	-27.01	-3.10	H2	H2(g)	-22.72	-25.82	-3.11	H2
H2O(g)	-1.49	-0.01	1.48	H2O	H2O(g)	-1.43	-0.01	1.42	H2O
Halite	-4.49	-2.92	1.57	NaCl	Halite	-4.59	-3.01	1.57	NaCl
O2(g)	-35.24	-38.14	-2.90	O2	O2(g)	-36.84	-39.76	-2.91	O2
Sylvite	-6.02	-5.11	0.90	KCl	Sylvite	-6.97	-6.06	0.92	KCl

\*For a gas, SI = log10(fugacity). Fugacity = pressure \* phi  
For ideal gases, phi = 1.

\*\*For a gas, SI = log10(fugacity). Fugacity = pressure \* phi  
For ideal gases, phi = 1.

Pozo LJ-7					Pozo LJ-23				
-----Saturation indices-----									
Phase	SI**	log IAP	log K(307 K, 1 atm)		Phase	SI**	log IAP	log K(293 K, 1 atm)	
Anhydrite	0.07	-4.31	-4.38	CaSO4	Anhydrite	0.91	-3.31	-4.22	CaSO4
Aragonite	2.33	-6.07	-8.40	CaCO3	Aragonite	2.23	-6.07	-8.31	CaCO3
Calcite	2.46	-6.07	-8.54	CaCO3	Calcite	2.38	-6.07	-8.45	CaCO3
CO2(g)	-1.60	-3.17	-1.57	CO2	CO2(g)	-1.19	-2.59	-1.41	CO2
Dolomite	1.75	-15.55	-17.30	CaMg(CO3)2	Dolomite	2.52	-14.46	-16.97	CaMg(CO3)2
Fluorite	3.10	-7.40	-10.50	CaF2	Fluorite	3.01	-7.65	-10.66	CaF2
Gypsum	0.26	-4.32	-4.59	CaSO4:2H2O	Gypsum	1.26	-3.33	-4.58	CaSO4:2H2O
H2(g)	-24.35	-27.47	-3.12	H2	H2(g)	-23.38	-26.47	-3.09	H2
H2O(g)	-1.28	-0.01	1.27	H2O	H2O(g)	-1.64	-0.01	1.63	H2O
Halite	-2.98	-1.41	1.58	NaCl	Halite	-4.32	-2.76	1.57	NaCl
O2(g)	-31.62	-34.58	-2.95	O2	O2(g)	-38.24	-41.10	-2.85	O2
Sylvite	-4.54	-3.60	0.94	KCl	Sylvite	-7.80	-6.93	0.87	KCl

\*For a gas, SI = log10(fugacity). Fugacity = pressure \* phi  
For ideal gases, phi = 1.

\*\*For a gas, SI = log10(fugacity). Fugacity = pressure \* phi  
For ideal gases, phi = 1.

Figura 70.- Índices de Saturación (IS) para diferentes fases en los pozos LJ-15, LJ-16, LJ-7 y LJ-23 calculados mediante el programa PHREEQC.

## 4.8 ARSÉNICO

La presencia de arsénico en altas concentraciones en el agua subterránea puede resultar en un peligro de salud para los consumidores, debido a que es muy tóxico en su forma inorgánica, ya que se asocia al desarrollo de cáncer en la piel, así como con enfermedades pulmonares, cardiovasculares, neurotoxicidad y diabetes. Los estados de la República con esta problemática son Coahuila, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí y Chihuahua. En el caso específico de Chihuahua los acuíferos Meoqui-Delicias, Jiménez-Camargo, Tabaloapa-Aladama y el Sauz-Encinillas muestran altos niveles de arsénico



(Sifuentes et al., 2018). El agua subterránea puede contener arsénico debido al contacto directo con las rocas y sedimentos que contienen el ion, cuya mineralización se relaciona con las rocas ígneas, tales como las riolitas y andesitas basálticas propias de la región (Espino Valdés et al., 2009).

En los resultados de laboratorio del análisis del ion arsénico (As) realizado en 13 muestras representativas del Acuífero Los Juncos no se encontraron cantidades significativas por encima del límite de detección. El resultado para todas las muestras fue “ND” (no detectado), asumiendo que las cantidades que pudieran estar presentes en las muestras son ínfimas a la que puede ser detectada en las lecturas del equipo utilizado para dicho análisis (Absorción Atómica con generación de hidruros). Así mismo, en los registros históricos de los años 2009 y 2011 de análisis de agua de pozos realizados para la Junta Central de Agua (JCAS) sólo se encontraron 3 pozos con 0.01 mg/l de este elemento, es decir que hasta la fecha no se han encontrado en la zona de Los Juncos concentraciones de arsénico superiores a la norma mexicana para agua potable (0.025 mg/l).

#### **4.9 NITRATOS**

Los nitratos en altas concentraciones en el agua subterránea son indicadores de la existencia de una posible fuente de contaminación del acuífero. El límite permisible regulado por la norma de agua potable es de 10 mg/l de N de nitratos, equivalente a 44.3 mg  $\text{NO}_3^-/\text{l}$ . Su presencia se atribuye principalmente a la contaminación puntual y continua originada a partir de fosas sépticas, tuberías de drenaje con fugas o estiércol procedente de las granjas de engorda y establos lecheros, por lo que su presencia en el agua subterránea no se considera de origen natural.

La utilización de fertilizantes nitrogenados en zonas agrícolas sugiere que éstos pueden ser la fuente principal de nitratos en el agua subterránea, ya que la fracción de nitrógeno no aprovechado por los cultivos es lixiviada a través del suelo y transportada al nivel freático por infiltración. Una solución parcial para este problema que se aplica en la zona de cultivos dentro del acuífero, es la agricultura de volteo, de tal modo que una buena cantidad



de nitrato sea aprovechada por las mismas (Price, 2003), en Los Juncos el fertilizante mayormente utilizado es el sulfato de amonio. Los resultados del análisis químico muestran cantidades significativas de nitratos en el agua, considerando que no debe encontrarse de forma natural en el agua subterránea, aunque su contenido está dentro del límite permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (10 mg N-NO<sub>3</sub>/l equivalentes a 44.3 mg/l de nitratos).

No se analizaron concentraciones de nitratos en el estudio de 1985. En lo que respecta a los registros históricos se encontraron un máximo de 13.6 mg/l de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el poblado El Oasis (año 2009), mientras que en el presente estudio se encontró un máximo de 24.65 mg/l en el pozo LJ-24 (poblado Los Cienes) como se muestra en la Figura 71.

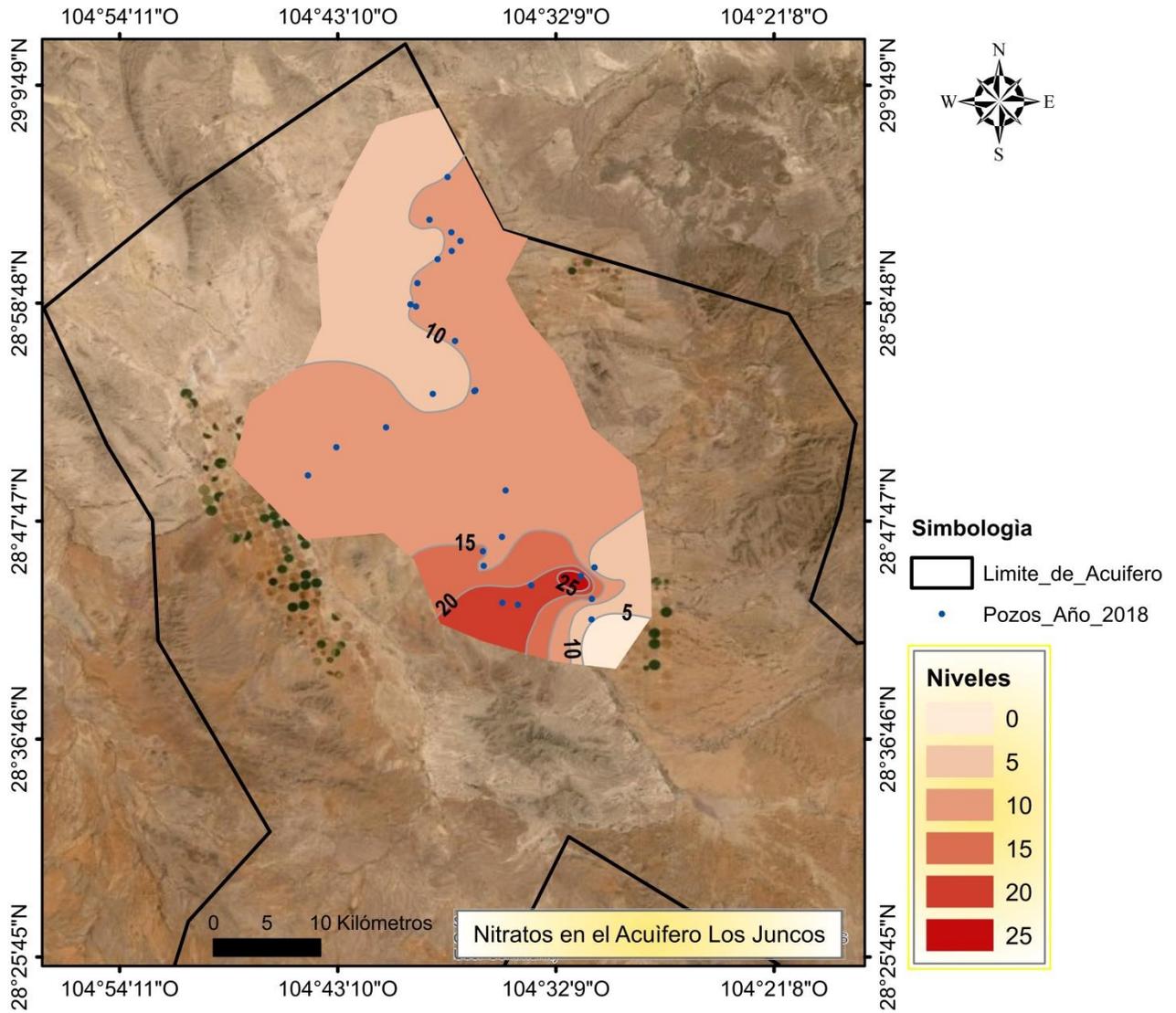


Figura 71.- Concentraciones de Nitratos (mg/l) en el acuífero Los Juncos, 2018.

#### 4.10 SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT)

Los sólidos disueltos totales (SDT) son indicadores del contenido total de iones en una muestra de agua. Durante la colección de muestras se determina el valor de Conductividad Eléctrica, que es directamente proporcional al contenido de sales disueltas.

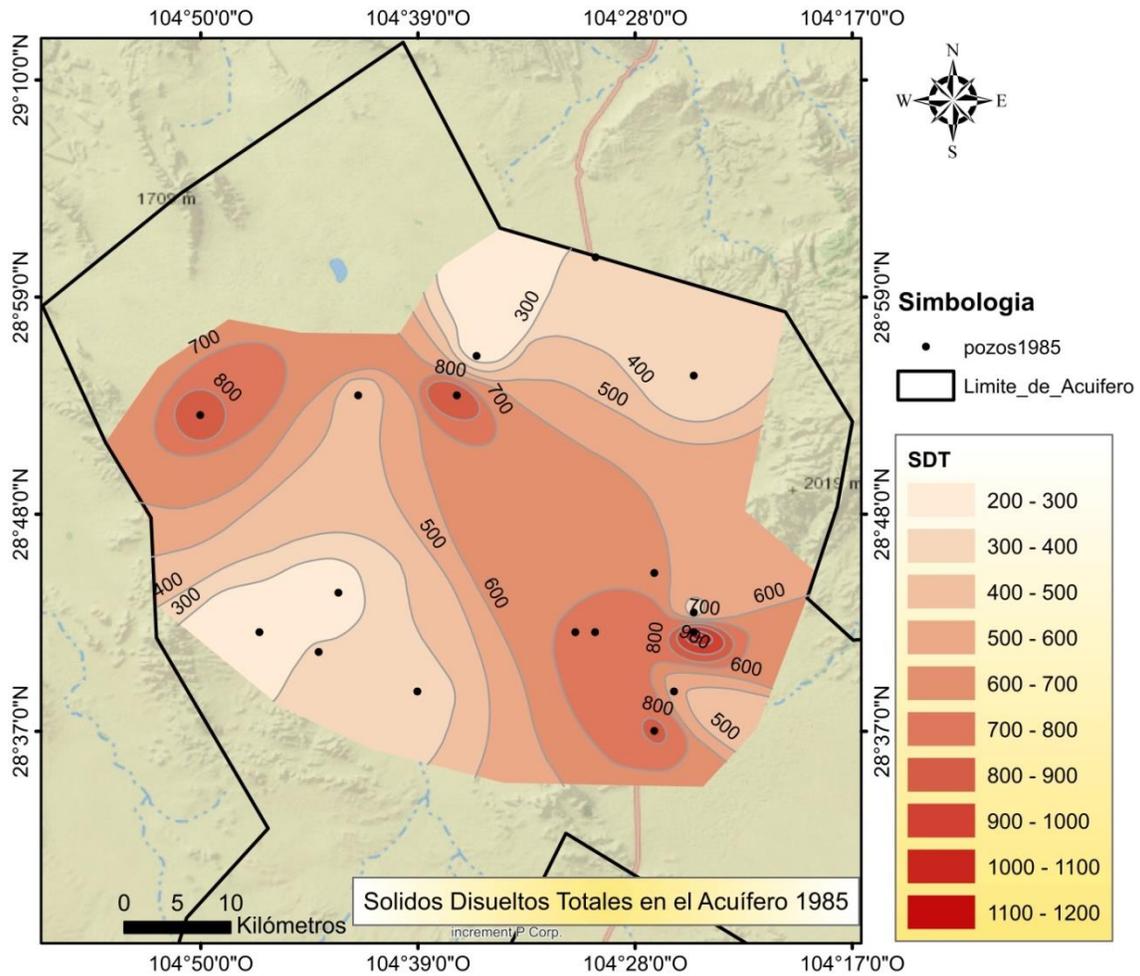


Figura 72.- Sólidos Disueltos Totales (SDT) (mg/l) en el acuífero Los Juncos, año 1985.

En el estudio del año 1985 se analizaron sólidos disueltos totales (SDT) que, como bien se observa en la Figura 72, se concentran principalmente en la parte sureste del acuífero con más de 1100 mg/l de SDT. De acuerdo a dicha información, las concentraciones de iones, en general, se incrementan en dirección de suroeste y noreste hacia la parte central del acuífero para finalmente desplazarse hacia el sureste y noroeste del acuífero, en donde se detectan dos puntos de máxima concentración.

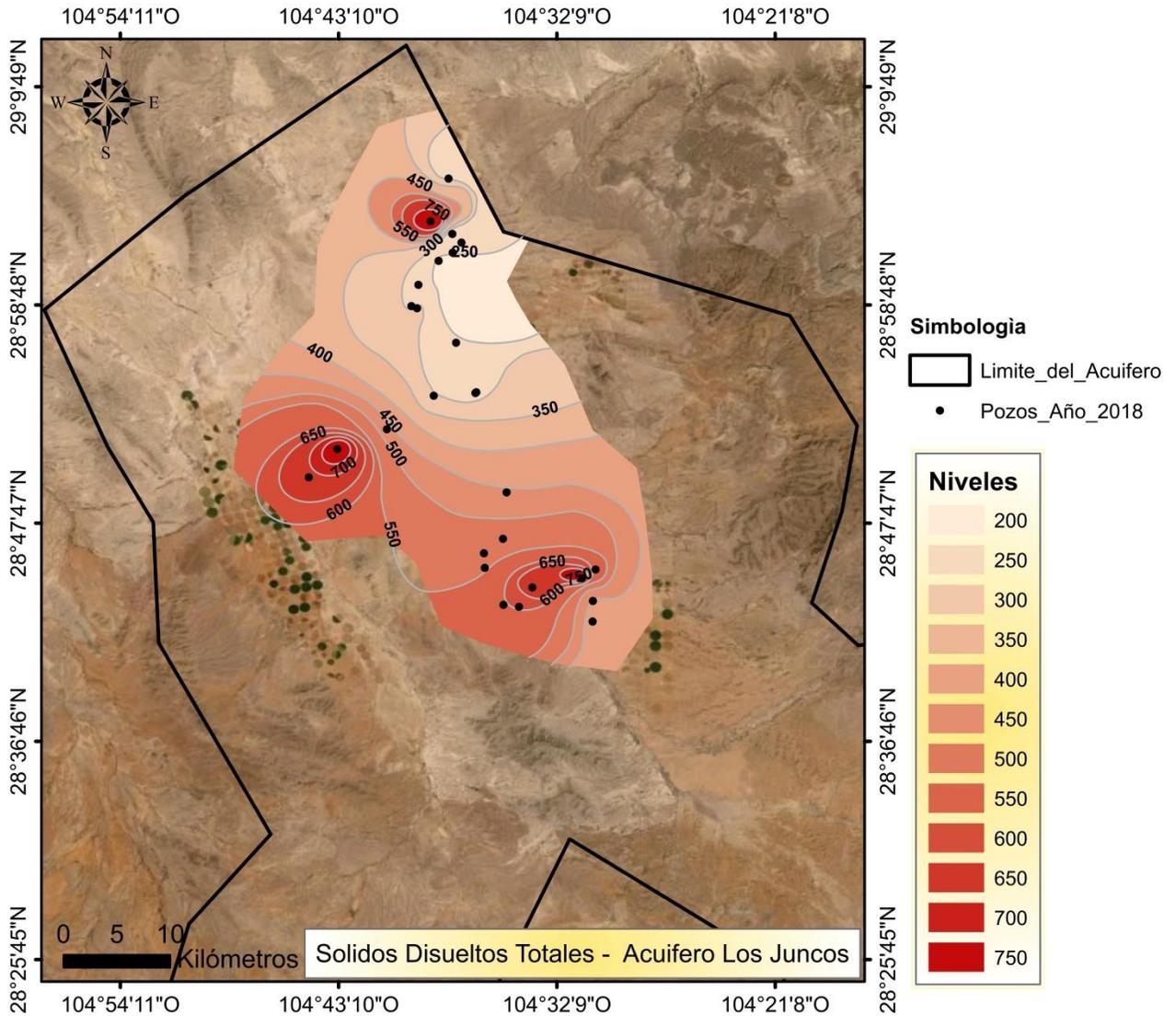


Figura 73.- Solidos Disueltos Totales (SDT) en el acuífero Los Juncos, año 2018.

En la Figura 73, correspondiente a la distribución de SDT en el acuífero en el año 2018, las isolíneas muestran 3 zonas de concentración máxima de iones correspondientes a los pozos LJ-7, LJ-16 y LJ-23, ubicados en los poblados El Oasis, Las Bombas y Los Cienes, respectivamente. En este conjunto de muestras el promedio de SDT es de 438.7 mg/l y la moda es de 293 mg/l. La dirección de flujo preferencial indica que los iones se desplazan de NE a SO y finalmente se distribuyen hacia el N, S y O del acuífero.



## 4.11 PLANOS DE CONCENTRACIÓN DE IONES PRINCIPALES DEL ACUÍFERO LOS JUNCOS

### 4.11.1 Sulfatos ( $SO_4^{-2}$ )

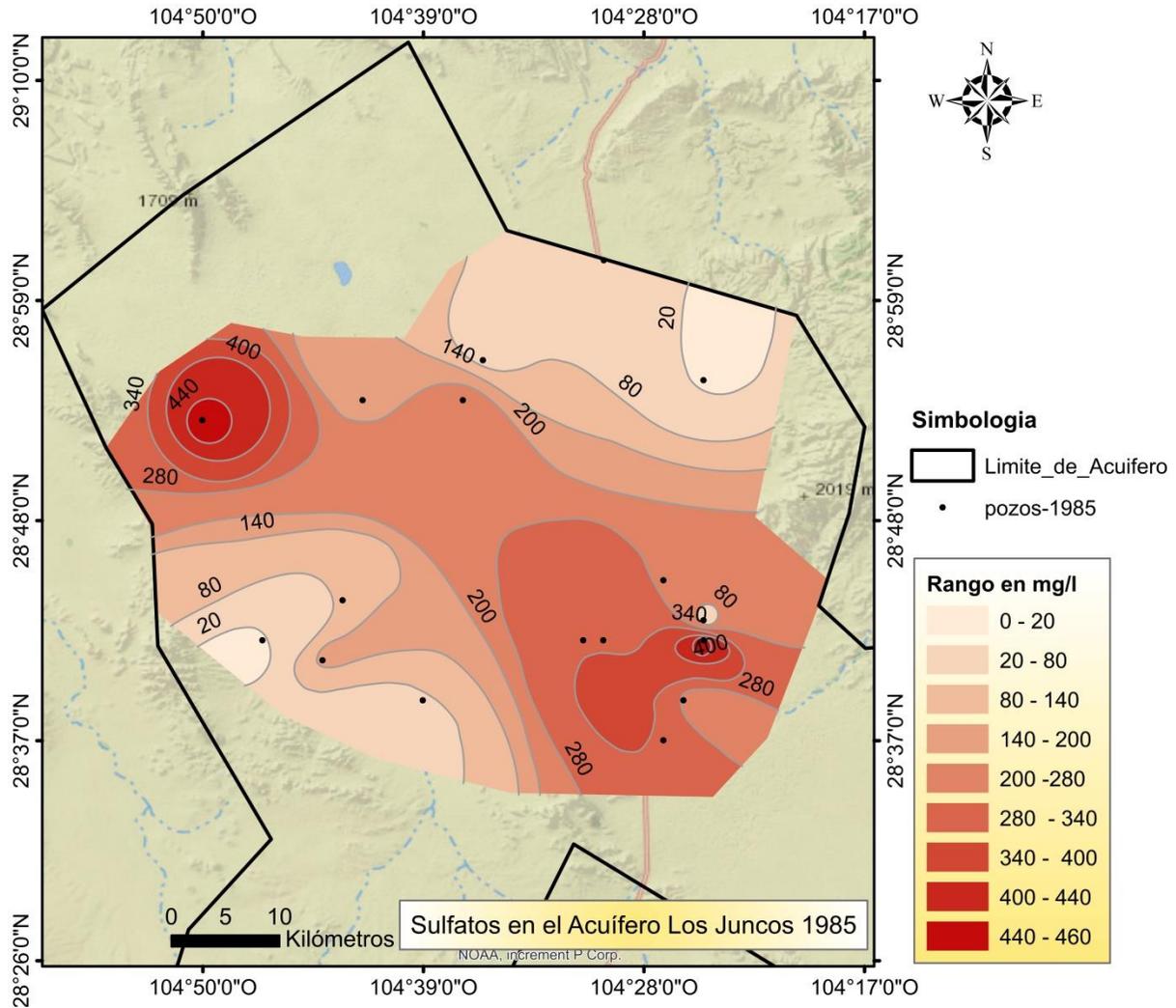


Figura 74.- Concentraciones de Sulfatos ( $SO_4^{-2}$ ) en el acuífero Los Juncos, año 1985.

En el estudio del año 1985 se analizaron sulfatos ( $SO_4^{-2}$ ) (Figura 74) y el desplazamiento de la concentración de los iones es similar al de los sólidos disueltos totales de 1985 (Figura 72). Las concentraciones mayores se detectan principalmente en la parte sureste del acuífero con más de 440 mg/l; además en el noroeste donde se presenta una zona lacustre con alta evaporación en suelos. En general, las concentraciones de iones van



en dirección de SO y NE hacia la parte central del acuífero para finalmente desplazarse hacia el SE y NO del acuífero formando dos zonas de máxima concentración.

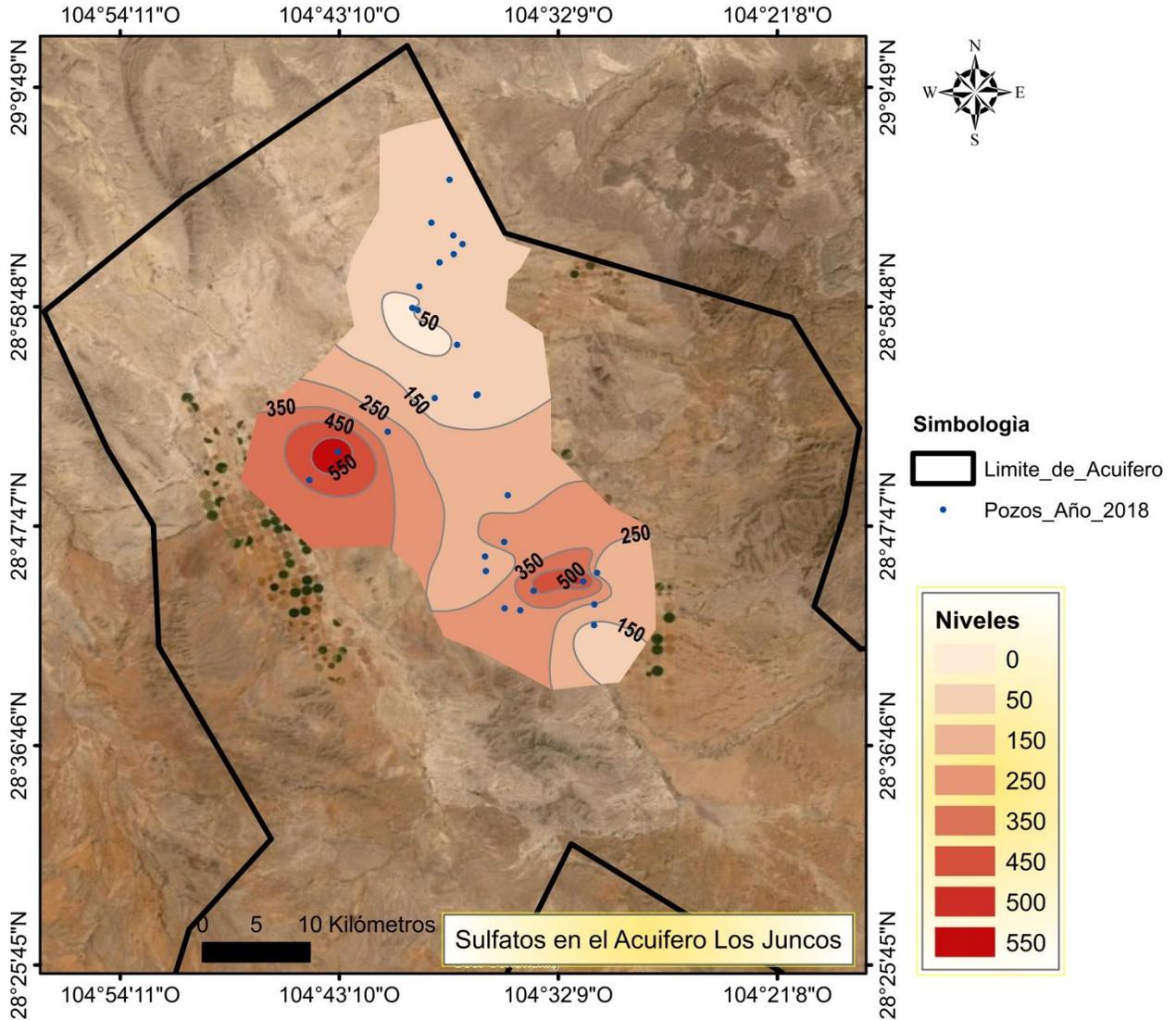


Figura 75.- Concentraciones de Sulfatos ( $SO_4^{-2}$ ) en el acuífero Los Juncos año 2018.

Las curvas de isocóncntraciones del ion sulfato para el año 2018 (Figura 75) muestran una similitud con las isocóncntraciones de SDT de ese mismo año (Figura 73). El ion sulfato se concentra en forma destacada en el pozo LJ-16 (576,7 mg/l), seguido por el pozo LJ-15 (466,4 mg/l) al poniente del área de estudio; como antes se mencionó, ésta es una zona de lacustre en la que se observa un punto de máxima concentración de sólidos disueltos totales, mismo caso que en el pozo LJ-23 con 428 mg/l de sulfatos. Estos puntos con mayor



concentración de ion sulfato también se reflejaron en el año 1985 como se observa en la Figura 74, este se desplaza de NE a SO y finalmente se distribuyen hacia el Norte, Sur y Oeste del acuífero como se aprecia en la Figura 73 de isolíneas de SDT del año 2018.

#### 4.11.2 Cloruros (Cl)

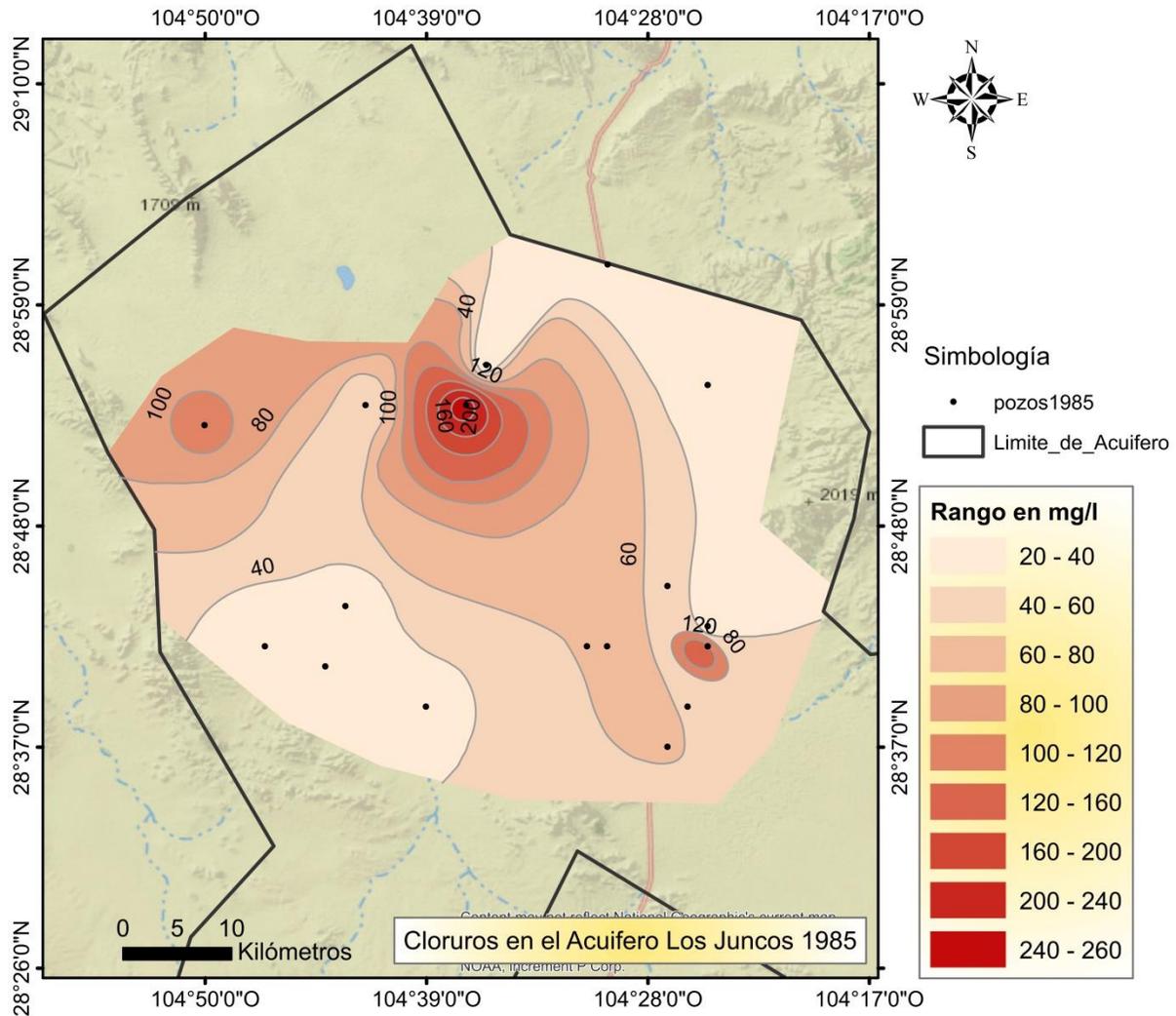


Figura 76.- Concentraciones de Cloruros (Cl) en el acuífero Los Juncos, año 1985.

En el estudio del año 1985 se analizaron cloruros (Cl) (Figura 76), concentrándose principalmente en la parte central del acuífero donde con hasta 260 mg/l de cloruros y se



desplaza en dirección de SO y NE hacia la parte central del acuífero para finalmente distribuirse hacia el SE y NO.

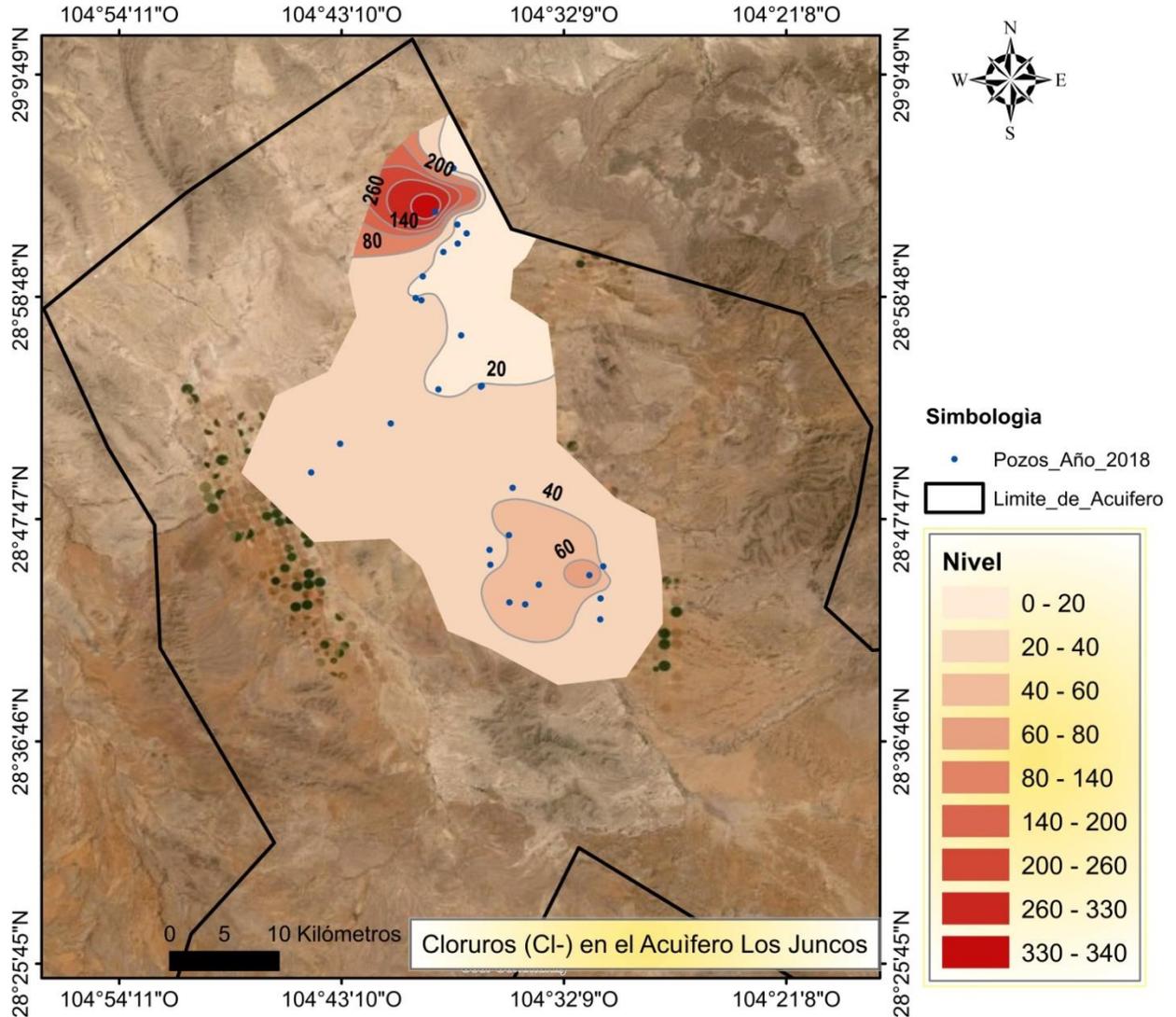


Figura 77.- Concentraciones de Cloruros (Cl-) en el acuífero Los Juncos, año 2018.

Las altas concentraciones de cloruro en aguas que son utilizadas para el riego en campos agrícolas deteriora en forma importante la calidad del suelo (NMX-AA-108-SCFI-2001), la norma mexicana Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 sugiere que el agua no debe contener más de 250 mg/l. En general, el contenido cloruro en las muestras del año 2018 arroja cantidades promedio de 40 mg/l, con excepción del pozo LJ-7 que contiene



332,4 mg/l (Figura 77) y que, como se mencionó antes, corresponde a agua clorurada sódica. No se encontraron cantidades importantes de cloruros en la parte central, como ocurrió en el año 1985 (Figura 76).

#### 4.11.3 Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ )

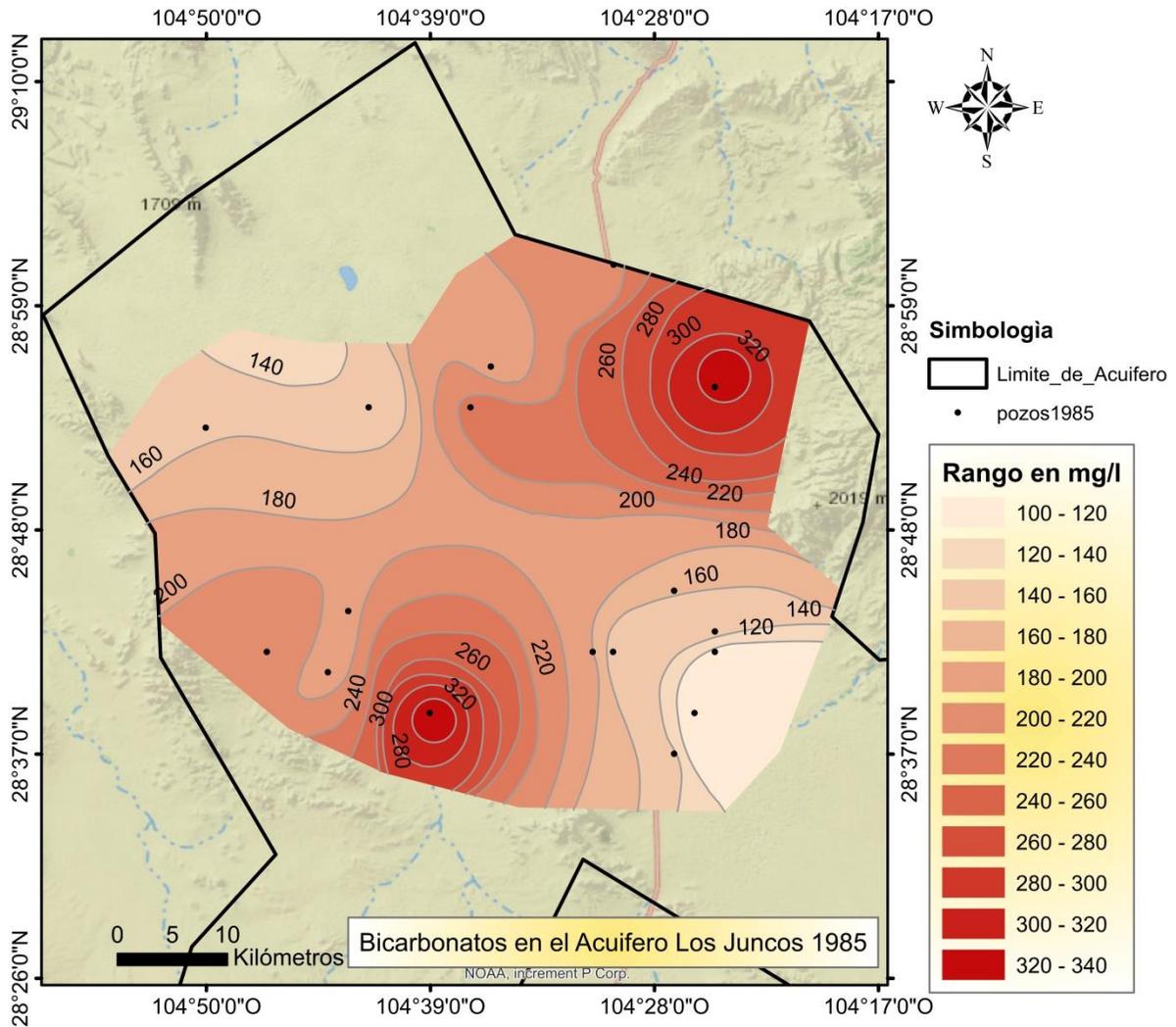


Figura 78.- Concentraciones de Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) en el acuífero Los Juncos, año 1985.

En el estudio del año 1985 se analizaron Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) (Figura 78), cuyos máximos valores se muestran en los extremos del acuífero donde se ubican al SO la sierra Mojina y al NE Majoma (zonas de recarga) y van disminuyendo hacia el centro del valle.

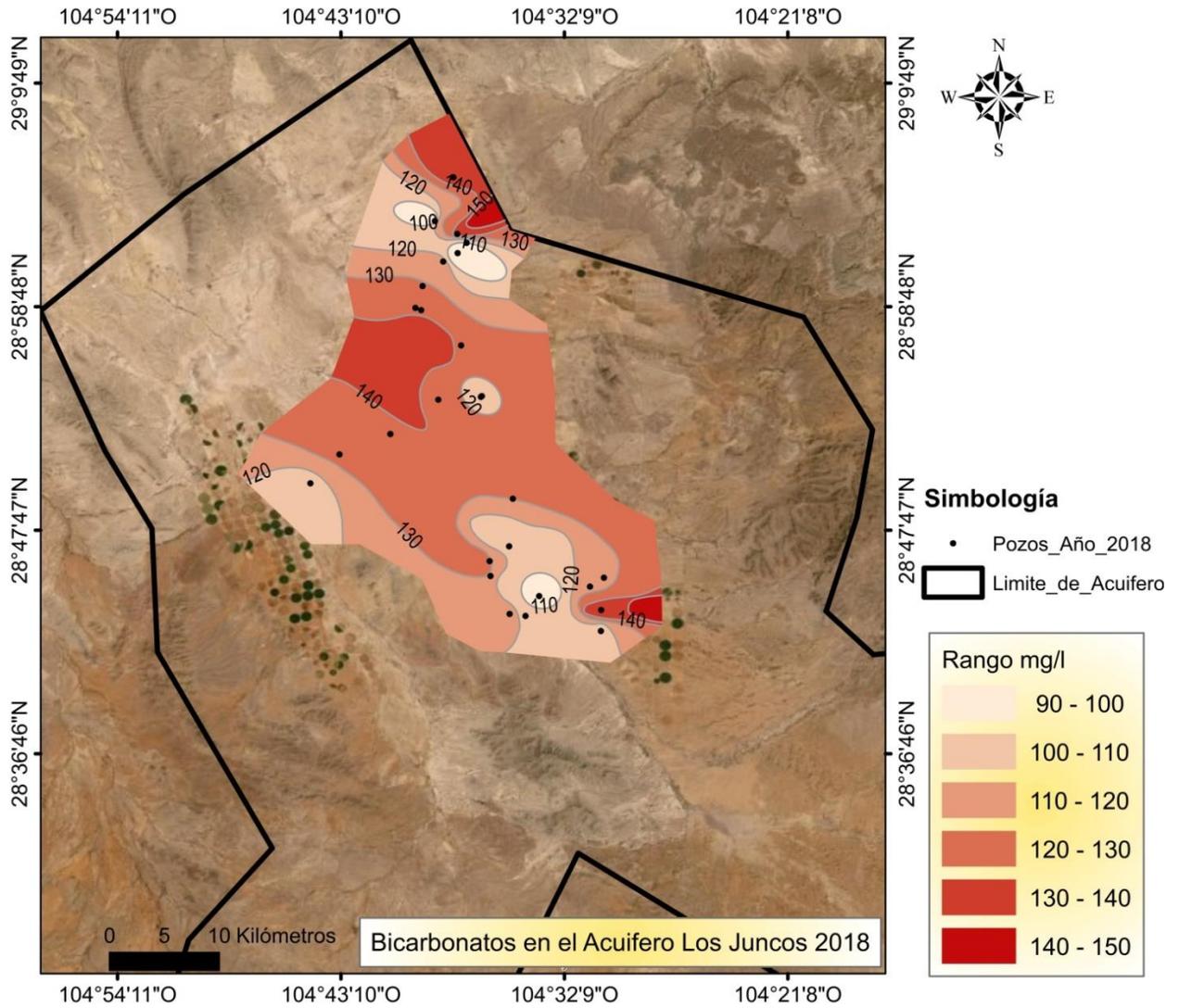


Figura 79.- Concentraciones de Bicarbonatos ( $HCO_3^-$ ) en el acuífero Los Juncos, año 2018.

Las curvas de isolíneas de bicarbonatos para el año 2018 se observan prácticamente uniformes a lo largo de toda la zona de muestreo; todos los puntos se ubican sobre la meseta central del acuífero (aluvial) por lo que ninguno de los puntos muestreados se ubica en sierra o alguna zona alta (Figura 79). Las concentraciones más bajas de bicarbonatos se encontraron en los pozos LJ-7 y LJ-23 que representan dos áreas de concentración mayor de sales según el mapa de isolíneas de sólidos disueltos totales del 2018 (Figura 73).



#### 4.11.4 Sodio ( $\text{Na}^+$ )

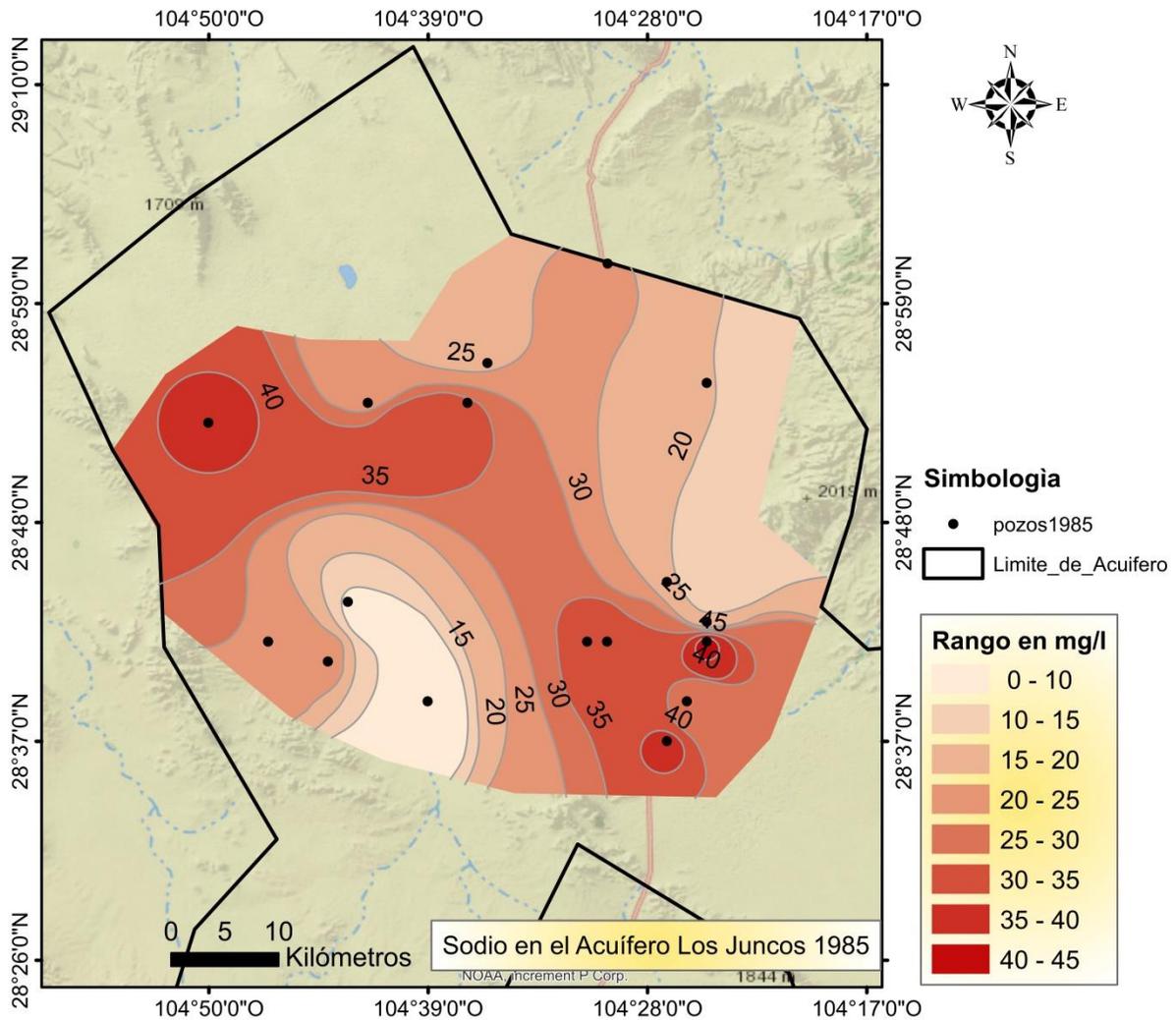


Figura 80.- Concentraciones de Sodio ( $\text{Na}$ ) en el acuífero Los Juncos, año 1985.

En el estudio del año 1985 se analizó el Sodio ( $\text{Na}^+$ ) que como bien se observa en la Figura 80, el comportamiento de los iones es muy similar al de los sólidos disueltos totales de 1985 (Figura 72), ya que se concentran principalmente en la parte sureste y noroeste. A partir de estas zonas bajas, las concentraciones del ion se incrementan en dirección de suroeste y noreste hacia la parte central del acuífero para finalmente ir aumentando su concentración hacia el sureste y noroeste del acuífero.

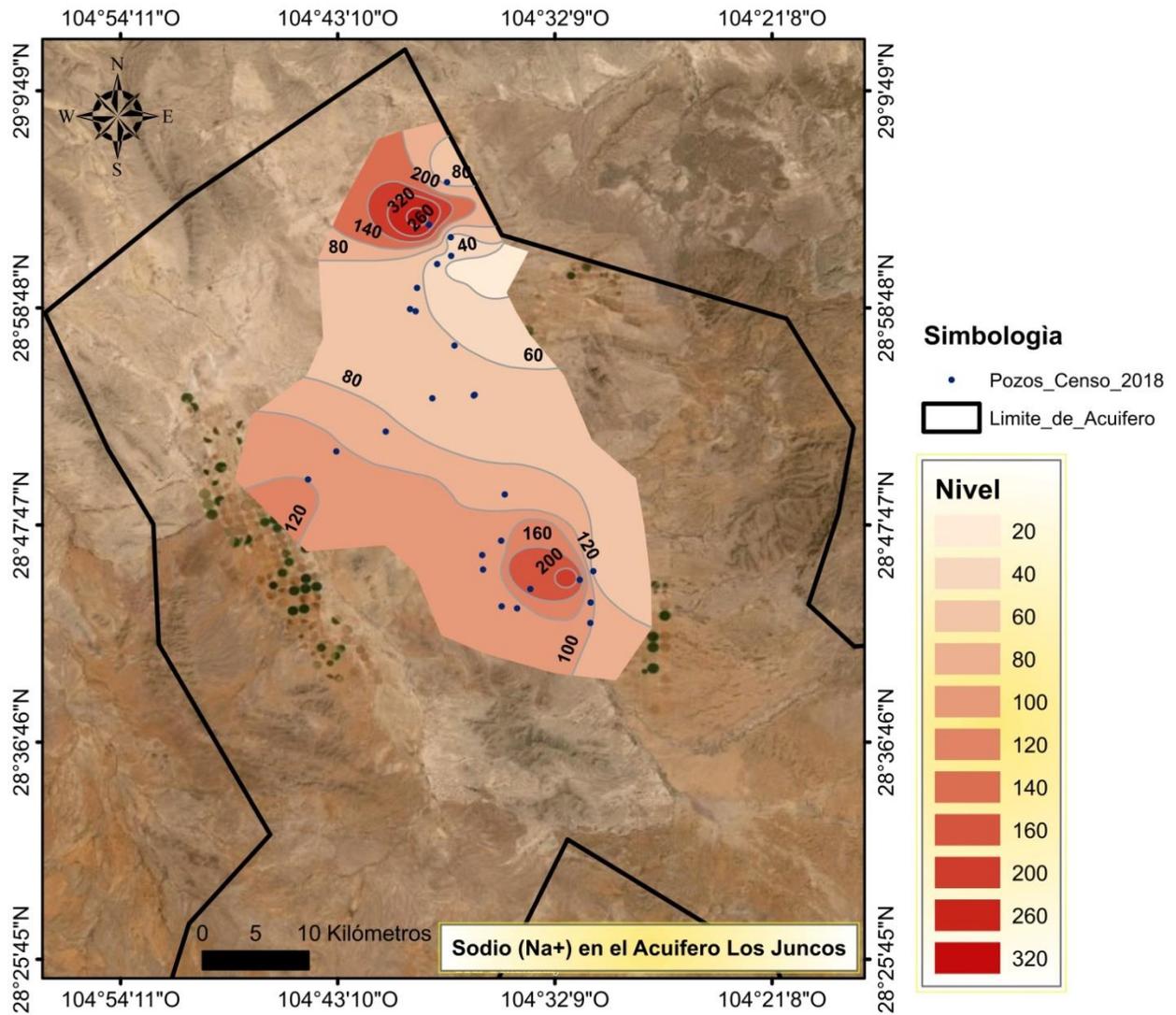


Figura 81.- Concentraciones de Sodio (Na) en el acuífero Los Juncos año 2018.

Para el año 2018 el ion sodio se concentra mayormente en el pozo LJ-7 (297.7 mg/l) como se observa en la Figura 81, que además muestra importantes concentraciones de cloruros. Este mapa de isolíneas tiene similitud con la distribución que muestran las isolíneas de cloruros (2018) (Figura 77); también tiene semejanza con las isolíneas de Sólidos Disueltos Totales del año 2018, indicando desplazarse en la misma dirección, en el cual su distribución parte del noreste hacia el suroeste para finalmente distribuirse hacia el sur, oeste y norte del acuífero.



#### 4.11.5 Calcio ( $Ca^{+2}$ )

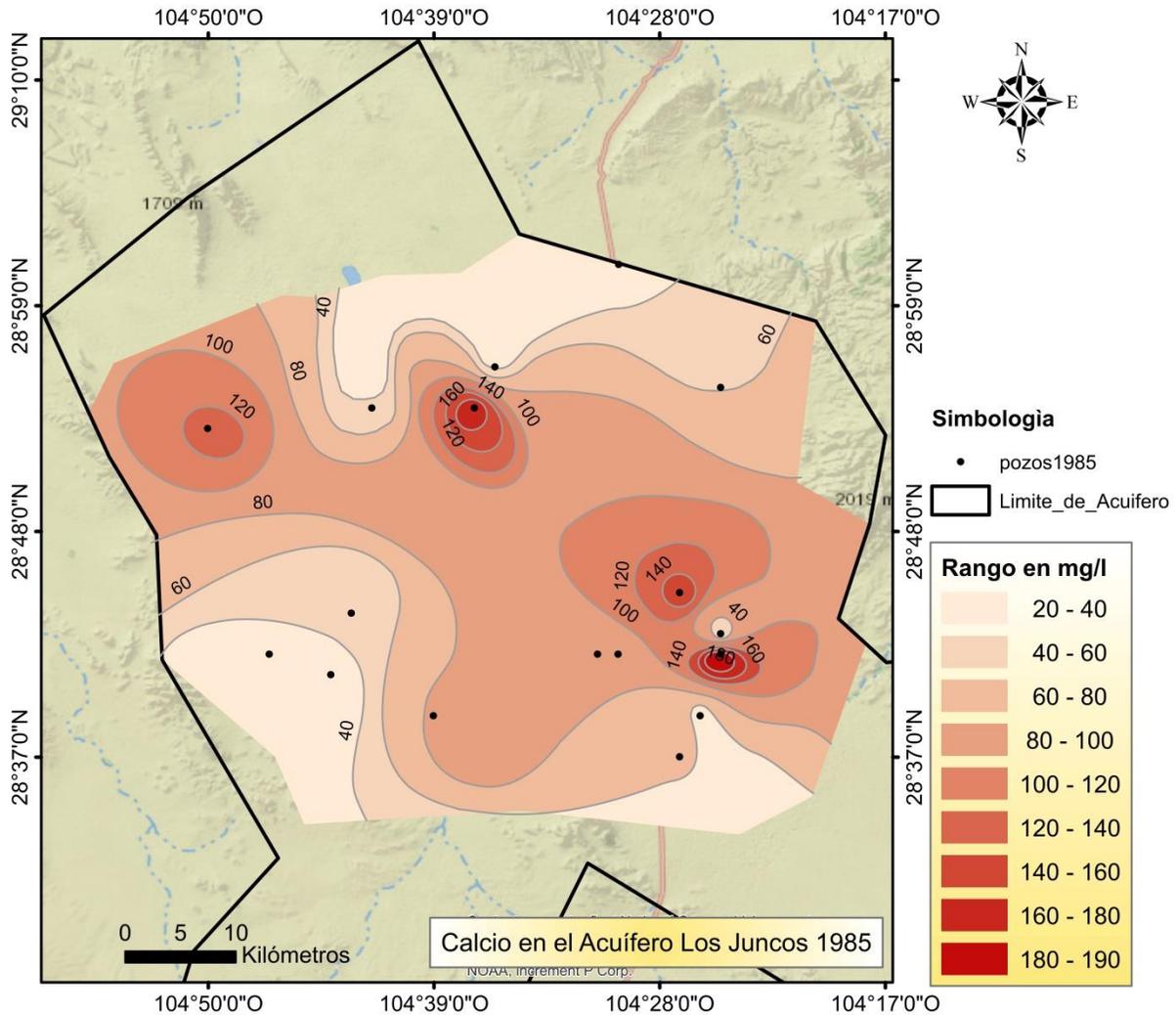


Figura 82.- Concentraciones de Calcio ( $Ca^{+2}$ ) en el acuífero Los Juncos, año 1985.

En el estudio del año 1985 se analizó el Calcio ( $Ca^{+2}$ ) que como bien se observa en la Figura 82 la distribución de la concentración de estos de los iones es similar a la de los sólidos disueltos totales de 1985 (Figura 72). Se concentran principalmente en la parte sureste, noroeste y centro del acuífero con una concentración máxima de 180 mg/l al sureste y en la parte central 178 mg/l donde se observa un máximo de concentración similar al del plano de cloruros de 1985 (Figura 76). En general, las concentraciones de iones van en aumento de la dirección de sureste y noroeste hacia la parte central del acuífero para finalmente desplazarse hacia el suroeste, noreste del acuífero.

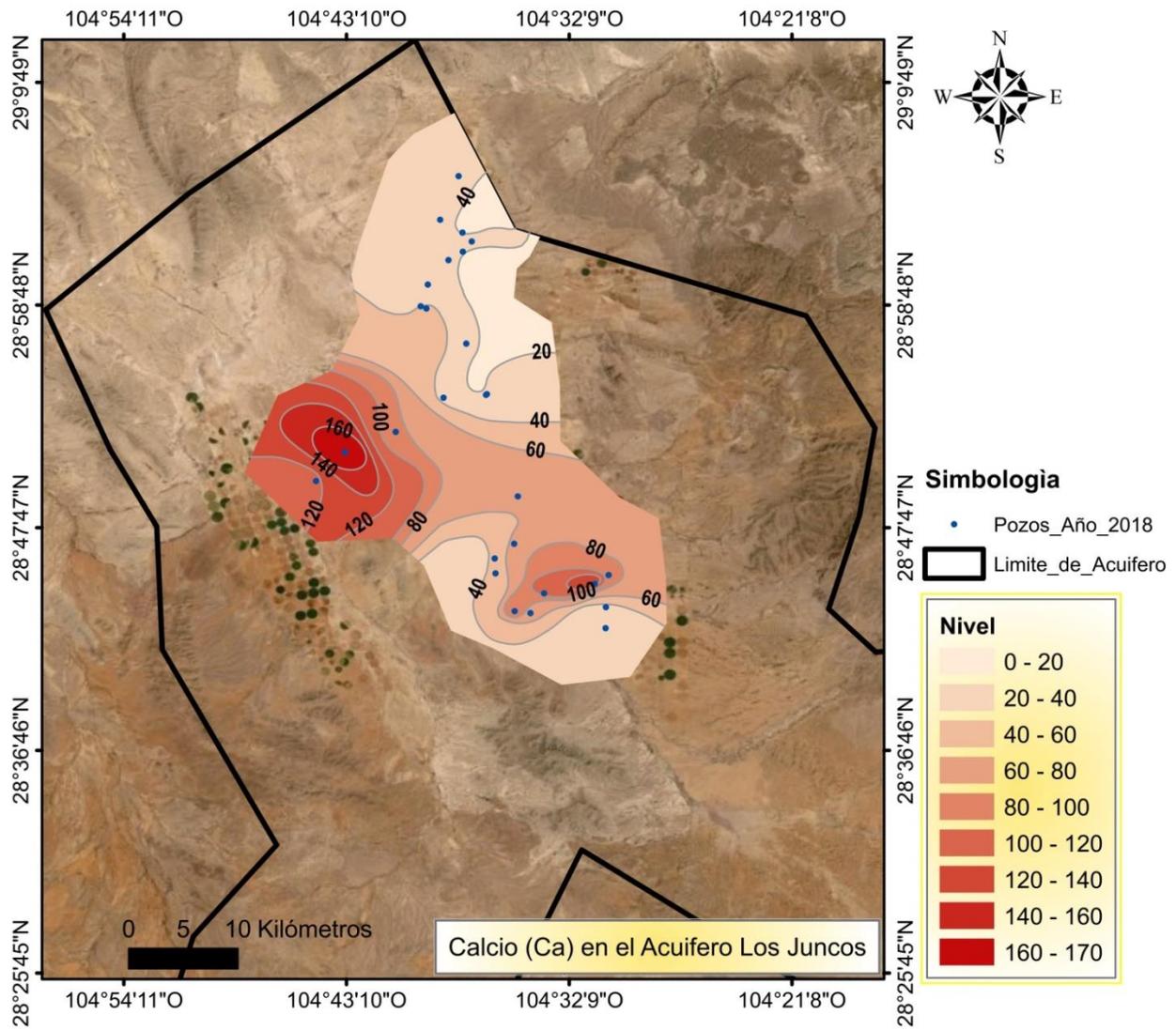


Figura 83.- Concentraciones de Calcio ( $Ca^{+2}$ ) en el acuífero Los Juncos, año 2018.

Para el año 2018, las mayores concentraciones de calcio ( $Ca^{+2}$ ) se encontraron en el pozo LJ-16 con 426,8 mg/l, por lo tanto este pozo tiene el agua más dura de acuerdo a su concentración de dureza total (Figura 83), seguida por los pozos LJ-15 y LJ-23 con 266,2 y 253,6 mg/l respectivamente; por esta razón el agua de estos pozos fue clasificada como agua “Muy dura”. Las isóneas indican en el ion calcio un aumento en la concentración de SO a NE, tal como el comportamiento que muestra el mapa de sólidos disueltos totales (2018) en la Figura 4.43. Este mapa de isóneas también muestra una distribución semejante al mapa de isóneas de sulfatos del año 2018 (Figuras 75).

## 4.12 EVOLUCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

### 1. Calidad del agua

En una comparativa de resultados entre pozos muestreados por calidad del agua (JCAS) en el 2009, red de pozos del año 1985 y la red de pozos del año 2018, se encuentran algunas características importantes que se mencionan a continuación.

- En todos los casos comparados se muestra un aumento importante en el ion sodio.
- En el análisis químico realizado en el año 1985 se encontraron familias de agua principalmente sulfatada-cálcica; esto tiene sentido ya que el calcio como catión dominante se hace presente en suelo Xerosol que abarca la mayor área del acuífero y que aporta importantes cantidades de calcio, al igual que la geología del sitio.
- Las muestras proporcionadas por la JCAS del año 2009 indican agua preferentemente sulfatada-cálcica y bicarbonatada-cálcica.
- El análisis químico de la red de pozos 2018 indica familias de agua subterránea principalmente sulfatada cálcica-sódica y bicarbonatada sódica, dominando el sodio como resultado de un intercambio iónico en la zona de estudio (Figura 84).

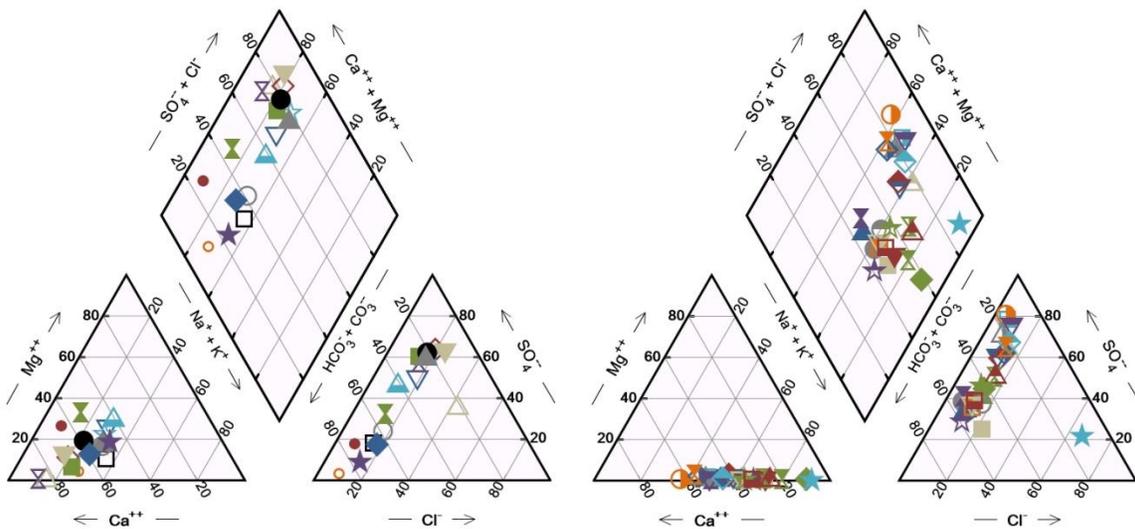


Figura 84.- Comparativa de familias de aguas de los años 1985 y 2018 (diagramas de Piper).

En la Figura 85 se aprecian los pozos de los registros históricos y de la red 1985 y 2018, comparando los pozos más cercanos se encuentra que:



- Entre los pozos 22 (año 1985) y 5 (año 2009) destaca un aumento del calcio de hasta 600%.
- En los pozos 6 (2009) y 4 (2018) hubo un ligero incremento en bicarbonatos y el sodio.
- Entre los pozos 21 y 28, 12 y 15, 24 y 19, 10 y 17 se incrementó el sodio en un 300% del año 1985 al año 2018.
- De igual manera en los pozos 5 y 27 entre los años 1985 y 2018 se incrementó el sodio en un 200% pero disminuyó drásticamente el contenido de cloruros.

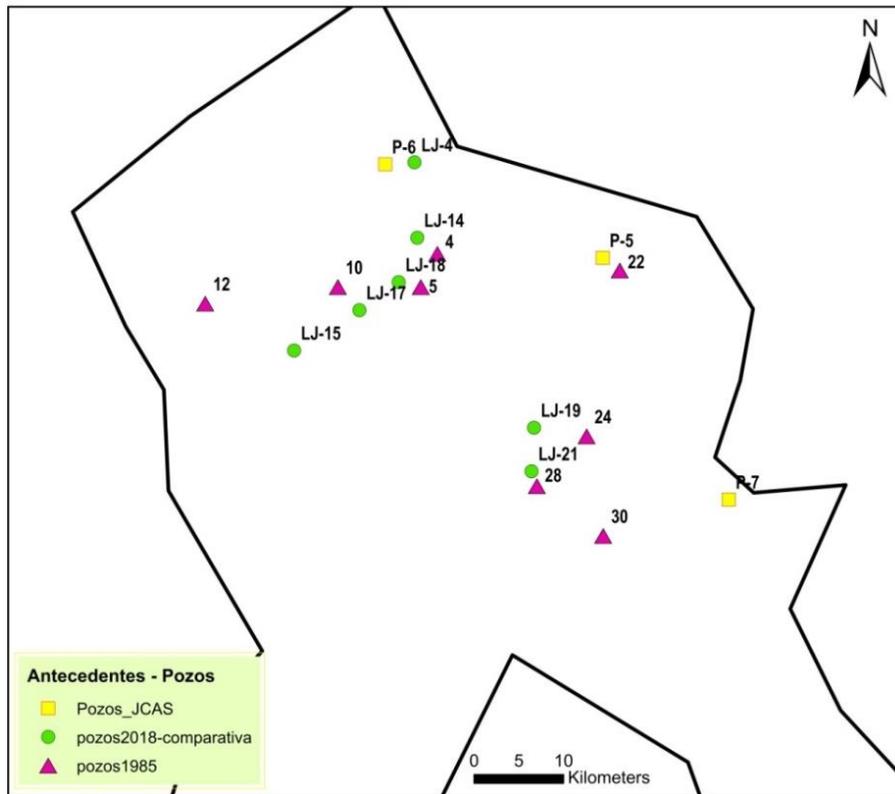


Figura 85.- Comparativa de los antecedentes de pozos en el acuífero Los Juncos.

## 2. Dirección de flujo y calidad del agua

La red de pozos 2018 tiene similitud con la red 2005-2010, abarcando principalmente el área norte, centro y oeste del acuífero.



En los estudios realizados por CONAGUA en los años 2005 y 2010, se observa una dirección de flujo preferencial de sureste a noroeste gracias a la piezometría realizada en el acuífero en los años mencionados (Figuras 86 y 87). De acuerdo a dichos trabajos la mayor elevación del nivel estático se encuentra en la parte sureste, zona colindante con el Acuífero “Los Alazanes”, mientras que la menor elevación del nivel estático se encuentra en la parte noroeste. Los niveles piezométricos siguen una configuración similar con la topografía (Figura 16).

Sin embargo, en el estudio químico de agua subterránea realizado en el año 1985 se observa en los mapas de isolíneas de SDT el incremento de iones de SO y NE hacia el centro del acuífero de forma difusa (Figura 72), en cambio se aprecia en los mapas de isolíneas de SDT de la red 2018 (Figuras 73) que el aumento en la concentración de iones ocurre de NE hacia el S y O del acuífero.

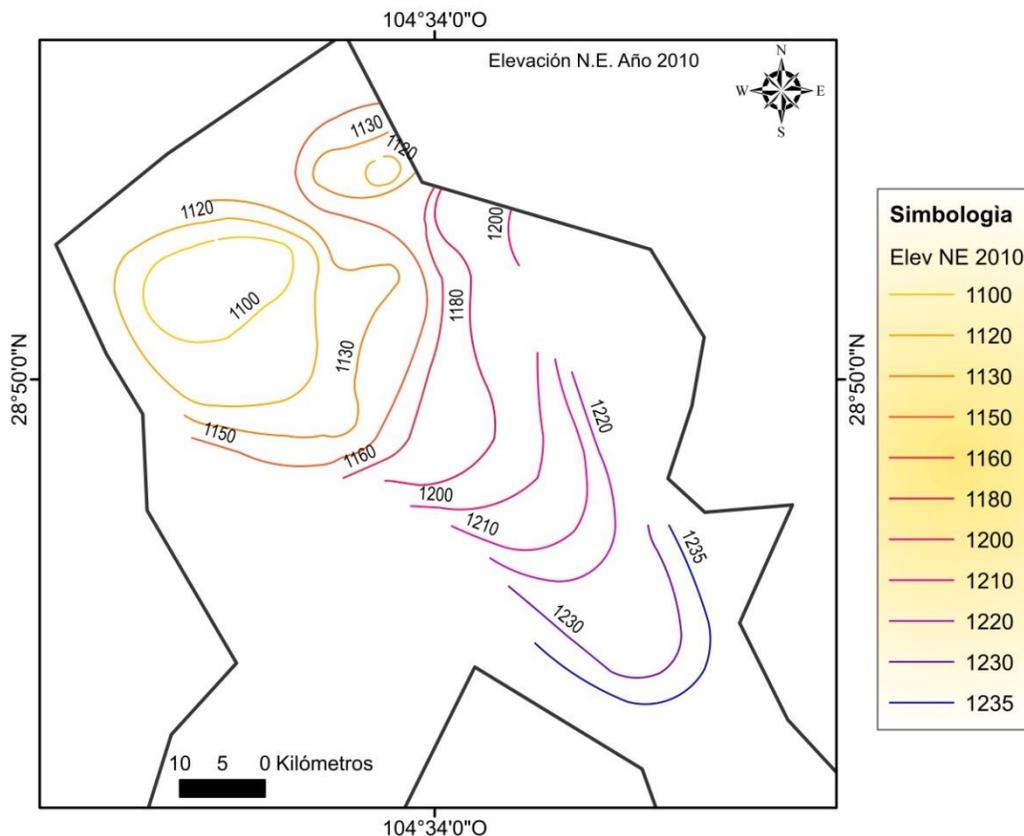


Figura 86.- Elevación del nivel estático Año 2010 (CONAGUA, 2010).

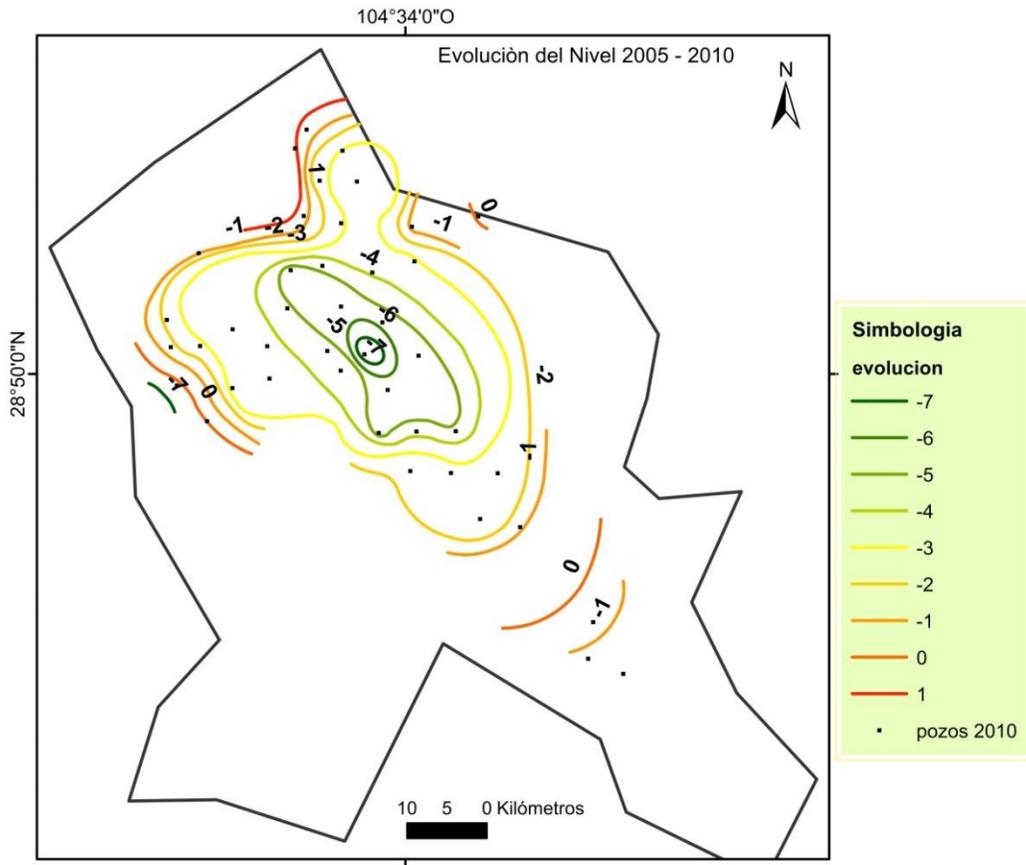


Figura 87.- Evolución del nivel, Años 2005- 2010 (CONAGUA, 2010).



## Capítulo 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

#### *I. Calidad del agua*

1. Este trabajo de investigación es el más moderno realizado en el acuífero Los Juncos en lo respectivo a calidad del agua.
2. Las familias de agua dominantes tienen un carácter aniónico sulfatado, mientras que en los cationes resaltan el sodio y la combinación de éste con calcio.
3. El pozo LJ-7 del campo “El Oasis” presenta excepcionalmente un carácter clorurado sódico y destaca también por su mayor salinidad y alto contenido de flúor. Su temperatura está por encima de la media de los demás pozos, lo que indica un posible contacto del agua con un estrato profundo de carácter intrusivo ígneo.
4. El 85% de las muestras presentan fluoruro en concentraciones superiores al límite establecido para agua potable, algunas de las cuales se encuentran sobresaturadas en este ion. Las mayores concentraciones se localizan hacia el S y O del acuífero.
5. El ion sulfato supera el límite de agua potable únicamente en 3 pozos ubicados en los poblados “Las Bombas” y “Los Cienes”. Estas fuentes se caracterizan también por contener los mayores valores de salinidad, dureza y tendencia a precipitar fluoruros y otros minerales.
6. El pozo LJ-15, que es utilizado como fuente de agua potable de la comunidad “Las Bombas”, presenta altas concentraciones de dureza, sulfatos y flúor.
7. El nitrato en el agua del acuífero se encuentra presente en cantidades pequeñas, de manera que ninguna de las muestras supera el límite permisible para agua potable.
8. No se detectó presencia de arsénico en ninguna de las muestras analizadas.
9. En relación a los criterios de agua para riego, la mayoría de los pozos presentan calidad excelente, con excepción del pozo LJ-7, cuyo alto contenido de sodio le confiere al agua alto riesgo de alcalinización del suelo. Dos pozos al poniente y uno al sur del acuífero son de calidad admisible.
10. La distribución espacial de los iones mayores observados en los respectivos mapas indica una tendencia a incrementar las concentraciones desde la zona E (Sierra El



Aguaje) hacia el N, O y S del acuífero, evidenciando que la salinidad se desplaza claramente de NE, donde se concentran los pozos de mejor calidad con agua de familia bicarbonatada (con excepción del pozo LJ-7), hacia el O y S donde se encontró preferentemente agua sulfatada sódica-cálcica.

## ***II. Evolución de la calidad del agua***

11. La evolución histórica observada en los pozos no muestra un aumento de salinidad entre los años 1985 y 2018; esto no es estrictamente un indicio de que la calidad del agua haya mejorado, sino que luego de tres décadas se dan movimientos de los iones, así como aportación de nuevos flujos horizontales provenientes de los acuíferos adyacentes potenciados por el intenso bombeo de agua en Los Juncos.
12. En el estudio de 1985 las familias predominantes eran sulfatadas cálcicas, es decir eran dominantes el anión sulfato y el catión calcio. Las familias encontradas en la red de pozos 2018 han pasado de ser Sulfatada-Cálcica a ser Sulfatada Sódica-cálcica y bicarbonatada sódica, por lo que en la secuencia catiónica el calcio deja de ser el catión dominante y cede el lugar al sodio.
13. El recorrido de algunos iones muestra cambios principalmente en el calcio que se desplaza del centro (“Nuevo Holanda”) y N (“El Chilicote”) para concentrarse hacia el O (“Las Bombas”). De igual manera el sodio, que en el año 1985 se concentraba principalmente en el sur y oeste, en la red de pozos 2018 se observa que se incrementa de sur a norte en el acuífero Los Juncos.
14. La red de pozos 1985 muestra en general una distribución difusa de los iones mayores en el agua subterránea. La red de pozos 2018 indica movimientos de los iones mayores en una dirección más concreta; de E (Ej. Maijoma) hacia O (Las Bombas) y S (Los Cienes). El sodio y los cloruros se mueven claramente de S a N.

## ***III. Funcionamiento del acuífero***

15. La ubicación espacial de los diagramas de Stiff tanto para la red 2018 como para la red de 1985 reafirman el comportamiento hidrogeológico de Los Juncos, con zonas de recarga claramente definidas. En las sierras El Aguaje y Mojina, al E y SO



respectivamente, se observaron aguas de familias bicarbonatadas, que representan aguas más recientes, mientras que al sureste y noroeste donde se aprecian los puntos de mayor concentración iónica, se ubicaron las aguas sulfatadas, representando las aguas más antiguas, de acuerdo con la secuencia de Chebotarev.

16. De acuerdo al balance de agua basado en registros climatológicos de los últimos 29 años, la recarga vertical del acuífero no ha sido significativa pues en la zona de Los Juncos se dan bajos niveles de precipitación pluvial así como altos índices de evaporación, por lo que el agua subterránea que se extrae no es renovable.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

1. Para agua de consumo doméstico es necesario contar con un sistema de purificación, ya que los niveles de flúor que se reportan en el análisis son considerados tóxicos.
2. Un nuevo estudio piezómetro para conocer los niveles de abatimiento del acuífero.
3. Aplicar las alternativas de manejo para Los Juncos propuestas por el modelo matemático del año 2014 para reestablecer los abatimientos observados desde 2010.
4. Ampliar este estudio hidrogeoquímico con datos de un mayor número de pozos de zonas periféricas del acuífero (cerca de las sierras).
5. Actualizar y ampliar los estudios geohidrológicos para los acuíferos adyacentes a “Los Juncos”: Acuífero Los Alazanes, Acuífero Bajo Rio Conchos y Acuífero Chapo Álamo, y determinar la conexión que existe entre ellos.
6. Trabajar en un marco jurídico aplicable a la zona, procurando la debida administración de aguas subterráneas, monitoreo del sitio, censo y control de aprovechamientos actualizados.
7. Valoración de los impactos de la relación “actividad económica - medio ambiente” en la vertiente de agua subterránea, la vegetación y el uso de suelo.
8. La recarga inducida es un proyecto complejo, pues las principales fuentes de recarga (lluvia y agua tratada) escasean. La construcción de canales o bordos para colectar en época de lluvias puede ser aprovechable para uso pecuario, como una actividad alterna para mitigar la intensa demanda que genera el riego de cultivos.



## Lista de referencias

- Bouwer, H. (1978). *Groundwater Hydrology*, McGraw-Hill Book, New York, 480.
- Comisión Nacional del Agua (2005). *Reactivación de la Red de Monitoreo Piezométrico del Acuífero Los Juncos*.
- Comisión Nacional del Agua (2010). “*Actualización Geohidrológica de los Acuíferos: Laguna de Palomas, Llano de Gigantes, Las Pampas, Rancho el Astillero, Laguna de Jaco, Rancho la Gloria, Rancho Denton, Laguna Los Alazanes, Laguna del Rey, Valle del Peso, Flores Magón – Villa Ahumada, El Sabinal y Los Juncos, Estado de Chihuahua*”. Universidad Autónoma de Chihuahua. Noviembre de 2010, Dirección General del Organismo de Cuenca Río Bravo. Base de datos.
- CONAGUA (2019). Datos históricos climatológicos de los municipios de Aldama, Ojinaga y Camargo.
- Custodio E. y R. M. Llamas. (1987). *Hidrología Subterránea*. España: Omega.
- DOF (2018). Diario Oficial de la Federación a 04 de enero de 2018.
- Espino-Valdés, M. S., Y. Barrera-Prieto y E. Herrera-Peraza. (2009). *Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México*. Tecnociencia Chihuahua, II, 8-18.
- Fagundo, J. y Beato, O. (2002). *Hidrogeoquímica e hidrología isotópica. En Parte 2: Análisis químico y calidad de las aguas*. Cuba. Centro Nacional de Termalismo. MINSAP.
- Fagundo, J. R., P. González, E. Álvarez, G. Tillán, I. Vinardell, J. Fagundo Sierra, M. Suárez Muñoz, C. Melián Rodríguez. (2005). *Solución de problemas ambientales mediante la Modelación Hidrogeoquímica*. Revista CENIC, vol. 36.
- Freeze, R. A. and J. A. Cherry. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs. Prentice-Hall, Inc.
- JCAS (2018) Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua, Depto. de Calidad del Agua.
- INEGI (2010), Censo de Población 2010.
- Langmuir, D. (1997). *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice-Hall, 600 pp.
- Llamas, M. R., N. Hernández-Mora, L. Martínez. (2000). “*Uso Intensivo de las Aguas*



- Subterráneas*”. 23 de agosto de 2018, de Fundación Marcelino Botín. Sitio web: [https://www.fundacionbotin.org/89dguuytdfr276ed\\_uploads/Observatorio%20Tendencias/PUBLICACIONES/MONOGRAFIAS/PAS/PAS1.pdf](https://www.fundacionbotin.org/89dguuytdfr276ed_uploads/Observatorio%20Tendencias/PUBLICACIONES/MONOGRAFIAS/PAS/PAS1.pdf)
- Llamas, R. y E. Custodio. (1999). *Aguas subterráneas*. REVISTA CIDOB d’AFERS INTERNATIONALS, 45 y 46, 35-37.
- López Cadenas de Llano, F. (1998). *Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de la erosión*. Ed. TRAGSA. Madrid. 945 pp.
- Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SAA1-1994. (2000). Salud Ambiental. Agua para Uso y Consumo Humano. Límite Permisible de Calidad y Tratamientos a que debe someterse para su potabilización. Secretaría de Salud. México, D.F.
- Navarrete, M. D. (2004). *Propuesta metodológica para el análisis territorial en la cuenca hidrográfica del Estero El Peral, Comuna de Carahue, IX Región*. Universidad Católica de Temuco, Chile. Facultad de Ciencias Ambientales. Vol (6): p. 133-134.
- Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000. *Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas subterráneas*.
- Núñez P., J. (2014) Tesis “Modelación Matemática del Acuífero Los Juncos”. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua. México.
- Ortega, S. & Orellana, G., 2007. *El riego con aguas de mala calidad en la agricultura urbana. Aspectos a considerar i. Aguas salinas o alcalinas*. Ciencias técnicas agropecuarias, 41-44. México.
- Peña, S. (2006). Introducción a la Hidrología Subterránea. México: Proyectos, Estudios y Sistemas S.A. de C.V.
- Price, M. (2003) Agua Subterránea. México. Limusa. Pags. 30, 31, 40, 44, 58, 82, 204 y 240.
- Pulido, A. (2014). *Nociones de Hidrogeología Para Ambientólogos*. España: Editorial Universidad de Almería.
- Secretaría de Agricultura y de Recursos Hidráulicos (SARH), (1985). *Estudio de prospección geohidrológica en la zona de Los Juncos, Chih.*”. Contrato no. Acsh-85-12-e.
- Sheril Rivera V.; Sergio Godorccci B.; Laura Borgel A.; Esteban Diaz O.; Tzandra Fuchs W.; M. Isabel Martin P.4. (1993). *Efectos adversos del flúor*. Revista Chilena de Pediatría, 64, De - Base de datos.



Sifuentes, K., I. Cervantes, A. Villalobos, V. Espejel y D. Espejel. (2018). *Problemática del arsénico y el flúor en el agua subterránea en Chihuahua*. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua, año 5, Num 15, Marzo-Mayo 2018 pags. 4-5.

Páginas web consultadas:

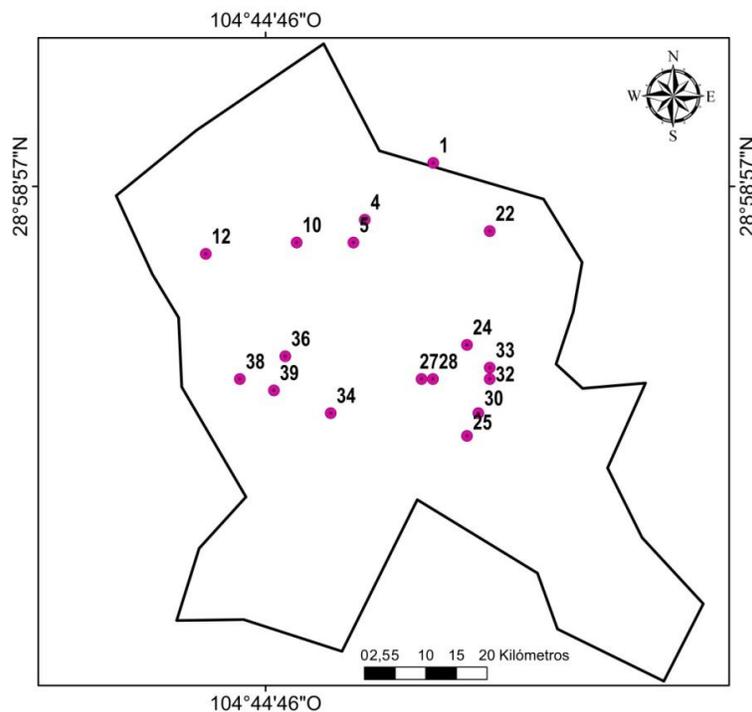
Estadísticas del agua en México, edición 2011. Capítulo 8 “Agua en el mundo”,  
[http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/sina/capitulo\\_8.pdf](http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/sina/capitulo_8.pdf))



## Anexos

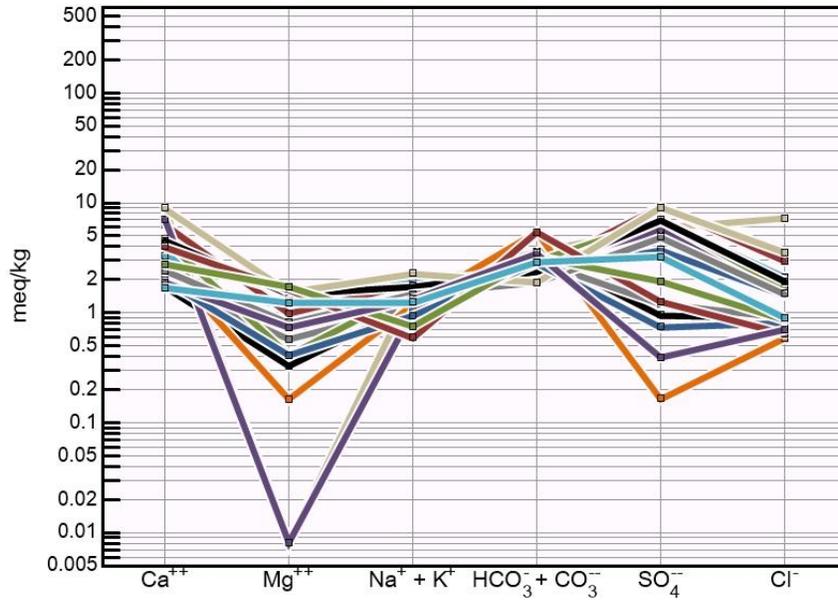
Tabla de resultados de análisis químico del año 1985 y figura de ubicación de pozos.

ID	Coordenadas		CE umhos	SDT ppm	HCO3 ppm	SO4 ppm	Cl ppm	Na ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm
	latitud	longitud									
1	29	104,30	476	312	218,3	46	32,4	26	2,4	34,6	4,3
4	28,56	104,36	455	284	184,2	57,5	32,4	23,5	3,6	34,6	6,5
5	28,54	104,37	1250	885	221,7	287	259,7	36	5,9	177,8	0
10	28,54	104,42	667	438	146,6	181	51,5	28,5	3,4	40,8	14
12	28,53	104,50	1111	882	153,4	450	105	40	5,2	128	12,4
22	28,55	104,25	526	364	331,3	8	21	21	10,6	58,6	2,2
24	28,45	104,27	833	674	167,1	278	57,3	20,5	4,8	143,1	0
25	28,37	104,27	1111	812	139,8	333	74,5	43	6,8	65,7	19,4
27	28,42	104,31	909	700	180,7	338	61,1	34	5,4	94,2	5,4
28	28,42	104,30	1000	728	146,6	338	68,7	37	6,4	90,6	18,3
30	28,39	104,26	714	508	115,9	236	53,4	32	4,4	48,8	10,2
32	28,42	104,25	1429	1137	115,9	438	127	45,5	12	180,5	19,4
33	28,43	104,25	333	238	173,9	36	28,6	18,5	4,9	40	5,4
34	28,39	104,39	526	358	331,3	61	22,9	12	2,7	80,8	19,9
36	28,44	104,43	455	298	197,8	92,5	30,5	14,5	3,6	56	21,6
38	28,42	104,47	385	252	214,8	19	24,8	28,5	3,4	38,2	9,7
39	28,41	104,44	526	344	177,3	157	32,4	27	3,4	33,7	15,1





Grupo de muestras de agua año 1985, Diagrama de Schöeller.



Grupo de muestras de agua año 2018, Diagrama de Schöeller.

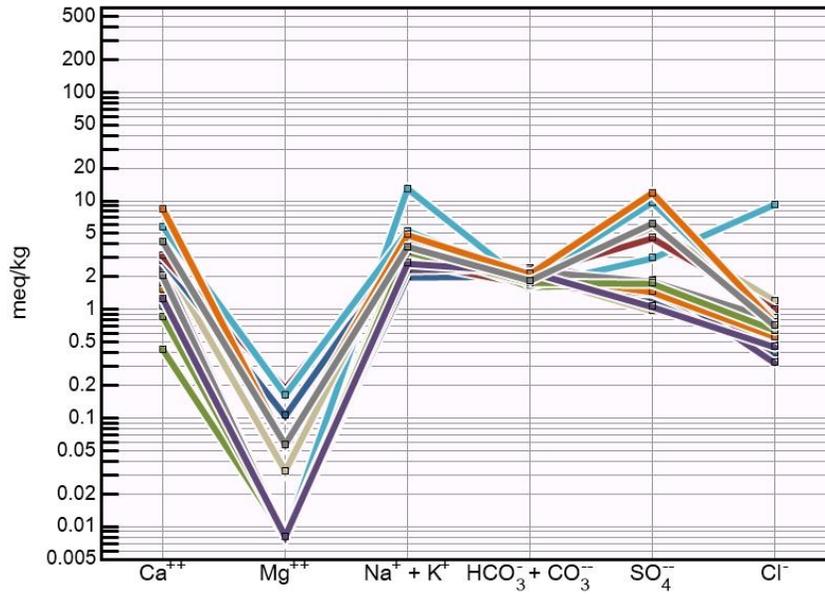




Tabla de registros históricos (calidad del agua, JCAS)

Año	Pozo	Ph	C.E.	SDT	Dureza total	HCO3	Cl	SO4	F	NO3	Ca	Mg	Na	Ar
2009	6	7,9	485	363	32,9	82,9	36,6	83,8	4,3	13,6	78,5	5,8		0,01
2009	5	7,7	474	265	158,5	279,9	10,3	4,1	1,3	11,2	392	5,5	25	0,01
2011	8	7,8	695	448	134,4	301,6	17,5	42,4	2,8	0,6	45,8	4,9	1,8	0,01

Tabla de cálculo de índice de saturación del flúor (IS)

No. Pozo	Calcio		Flúor		Pci	IS	Grado de saturación
	mg/l	mol/	mg/L	mol/L			
LJ-1	34,12	0,000851	0,88	0,000046	1,8065E-12	-1,334	INSATURADO
LJ-2	24,49	0,000611	1,30	0,000068	2,8603E-12	-1,135	INSATURADO
LJ-3	34,62	0,000864	1,19	0,000063	3,3789E-12	-1,062	INSATURADO
LJ-4	21,01	0,000524	2,13	0,000112	6,5841E-12	-0,773	INSATURADO
LJ-5	8,68	0,000216	5,50	0,000289	1,8141E-11	-0,332	INSATURADO
LJ-6	47,78	0,001192	0,78	0,000041	2,022E-12	-1,285	INSATURADO
LJ-7	21,74	0,000542	6,92	0,000364	7,1909E-11	0,266	SOBRESATURADO
LJ-8	30,96	0,000772	3,95	0,000208	3,3389E-11	-0,067	INSATURADO
LJ-9	41,10	0,001026	3,42	0,000180	3,3273E-11	-0,069	INSATURADO
LJ-10	61,65	0,001538	3,50	0,000184	5,2228E-11	0,127	SOBRESATURADO
LJ-11	57,19	0,001427	1,69	0,000089	1,1296E-11	-0,538	INSATURADO
LJ-12	62,87	0,001569	2,97	0,000156	3,8239E-11	-0,009	SATURADO
LJ-13	17,40	0,000434	6,69	0,000352	5,3774E-11	0,140	SOBRESATURADO
LJ-14	25,54	0,000637	3,95	0,000208	2,7573E-11	-0,151	INSATURADO
LJ-15	116,64	0,002910	3,46	0,000182	9,6232E-11	0,392	SOBRESATURADO
LJ-16	169,96	0,004240	3,27	0,000172	1,2528E-10	0,507	SOBRESATURADO
LJ-17	85,10	0,002123	4,33	0,000228	1,1006E-10	0,451	SOBRESATURADO
LJ-18	33,22	0,000829	4,14	0,000218	3,9376E-11	0,004	SATURADO
LJ-19	87,15	0,002174	2,20	0,000116	2,9263E-11	-0,125	INSATURADO
LJ-20	35,60	0,000888	2,66	0,000140	1,7463E-11	-0,349	INSATURADO
LJ-21	29,84	0,000745	8,25	0,000434	1,4021E-10	0,556	SOBRESATURADO
LJ-23	111,63	0,002785	2,76	0,000145	5,8841E-11	0,179	SOBRESATURADO
LJ-24	78,67	0,001963	2,19	0,000115	2,6127E-11	-0,174	INSATURADO
LJ-25	97,73	0,002438	1,49	0,000078	1,5014E-11	-0,415	INSATURADO
LJ-26	55,20	0,001377	1,75	0,000092	1,1703E-11	-0,523	INSATURADO
LJ-27	29,04	0,000724	3,82	0,000201	2,9222E-11	-0,125	INSATURADO