



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTADES DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA

PROGRAMA MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO EN
CIENCIAS AMBIENTALES

**EFFECTO DE LA EVOLUCIÓN GEOQUÍMICA EN LA CALIDAD DEL AGUA
SUBTERRÁNEA EN LA PORCIÓN CENTRAL DE LA ZONA MEDIA DEL
ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

ING . JEJANNY LUCERO HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS:
DR. JAVIER CASTRO LARRAGOITIA

COMITÉ TUTELAR:
DR. ANTONIO CARDONA BENAVIDES
DRA. CATALINA ALFARO DE LA TORRE

**PROYECTO REALIZADO EN:
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA, ÁREA DE CIENCIAS DE LA TIERRA**

**CON FINANCIAMIENTO DE:
SEDESOL Y MUNICIPIOS DE RIOVERDE Y CD. FERNÁNDEZ**

**NOMBRE DEL PROYECTO:
ESTUDIO PARA LA DETERMINACIÓN DE PROYECTOS PRIORITARIOS PARA LA
RECARGA DEL ACUÍFERO RIOVERDE-CD FERNÁNDEZ Y REGIÓN HIDROLÓGICA PÁNUCO**

**CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT)
BECA-TESIS (CONVENIO No. 190567)**

**LA MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES ESTA INLUIDO EN EL
PADRON NACIONAL DE POSGRADOS DEL CONACYT.**

DEDICADO A:

LA MUJER QUE HA ESTADO CONMIGO
EN TODO MOMENTO SUFRIENDO MIS
ANGUSTIAS Y DISFRUTANDO MIS LOGROS

MI MADRE.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres José Francisco Hernández Barrón y Juana Martínez López, simplemente no existen palabras para describir el amor que les tengo y el agradecimiento que siento. A mi hermano José Francisco, por existir y ser mi compañero en aventuras, regaños y desvelos.

Agradezco al Dr Javier Castro Larragoitia por brindarme la oportunidad de trabajar con él y obtener el conocimiento para llevar a buen fin este trabajo de tesis. Al Dr Antonio Cardona Benavides por las observaciones, apoyo y conocimiento brindado a mi persona durante mis estudios de maestría. Al Dr José Alfredo Ramos Leal por sus atinados comentarios a este trabajo, apoyo y amistad. A la M.C Leticia Padilla Sánchez por las observaciones realizadas durante la redacción de este trabajo de investigación y por mostrar una disponibilidad absoluta desde mí llegada al área de Ciencias de la Tierra de la UASLP. A la Dra Catalina Alfaro de la Torre por su valiosa asesoría.

Agradezco enormemente al Dr Surendra Pal Verma Jaiswal por brindarme sus conocimientos, amistad, hospitalidad y disposición desde el momento en que lo conocí hasta el lapso de la terminación de este trabajo.

Mi agradecimiento a todos y cada uno de los Doctores que participan en el Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales por los conocimientos brindados a mi formación académica.

Agradezco a la I.Q María de los Ángeles Navarro, I.Q. Ana María Guadalupe López, I.Q Héctor Isidoro Solís Torres y I.Q Sandra Dinorah Ramos, personal del Laboratorio de Análisis Químicos del Área de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la UASLP, por su colaboración en el análisis de las muestras de agua. A la Dra Ofelia Morton Bermea quien es responsable del Laboratorio ICP-MS (espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo) del Instituto de Geofísica de la UNAM, por el análisis de las muestras

de agua. Al Ing Jorge Aceves de Alba del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica del Área de Ciencias de la Tierra por la generación del sistema de elevación utilizado.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante los estudios de maestría No 190567.

Para tratar de no omitir de forma involuntaria a alguna persona que ha contribuido de manera significativa durante el lapso de mi vida que me llevo concluir mi formación y la presente tesis, quiero agradecer a todos mis amigos. Ya que estando lejos o cerca de mí, han mostrado un apoyo constante y preocupación sincera.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Estudios previos	4
1.2.	Objetivos	9
1.3.	Localización de la zona de estudio.....	11
2.	DESCRIPCION DEL MEDIO FISICO	13
2.1.	Fisiografía	13
2.2.	Morfología	15
2.3.	Clima.....	17
2.4.	Hidrología superficial.....	17
2.5.	Geología	19
2.5.1.	Estratigrafía.....	19
2.5.1.1.	Cretácico.....	19
2.5.1.2.	Terciario.....	22
2.5.1.3.	Terciario Neógeno.....	23
2.5.1.4.	Cuaternario	24
2.6.	Hidrogeología.....	25
2.6.1.	Modelo hidrogeológico conceptual	26
3.	METODOLOGÍA	28
3.3.	Trabajo de campo.....	28
3.3.1	Medición de parámetros de campo	30
3.3.1.1.	Temperatura.....	34
3.3.1.2.	Conductividad eléctrica (CE).....	34
3.3.1.3.	pH.....	35
3.3.1.4.	Potencial de oxido reducción (Eh)	35
3.3.1.5.	Oxígeno disuelto (OD).....	36
3.3.1.6.	Alcalinidad.....	37
3.3.1.7.	Nivel estático	40
3.3.2	Toma de muestras.....	41
3.4.	Análisis de laboratorio.....	44
3.5.	Trabajo de gabinete.....	49
4.	CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA E IDENTIFICACIÓN DE ZONAS AFECTADAS POR CONTAMINACIÓN (ANTRÓPICA/NATURAL)	51
4.1	Calidad de agua para uso potable	55
4.1.1	Evaluación en relación a características químicas	58
4.1.1.1	Elementos mayores	58
4.1.1.2	Elementos traza	71
4.2	Clasificación del agua para riego agrícola	81
4.2.1	Salinidad.....	83
4.2.2	RAS.....	86
4.2.3	Peligro por Mg.....	92
4.2.4	Peligro por elementos traza.....	93
5.	INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA.....	96
5.1.	Balance iónico	96
5.2	Diagramas de Stiff.....	97
5.3	Familias de Agua por ión dominante.....	100

5.4	Facies hidrogeoquímicas	106
5.5	Estadística.....	109
5.5.1	Parámetros estadísticos	110
5.5.2	Matriz de correlación.....	110
6.	MODELO CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOQUÍMICO E ISOTÓPICO	115
6.1.	Índices de saturación con relación a especies minerales seleccionadas	115
6.1.1	Geoquímica de carbonatos.....	116
6.1.2	Geoquímica de sulfatos	118
6.2.	Isótopos estables	120
6.3.	Modelación hidrogeoquímica inversa.....	126
6.3.1	Fundamentos teóricos	128
6.3.2	Modelación hidrogeoquímica inversa en el área sur de la zona de estudio.....	133
6.3.3	Modelación hidrogeoquímica inversa en el área norte de la zona de estudio.....	136
	CONCLUSIONES	139
	BIBLIOGRAFIA	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Estimación de balance de agua mundial (modificado de Freeze y Cherry,1979)	1
Tabla 2 Pozos censados en el año 2000 (Ballín, 2003)	5
Tabla 3 Superficie irrigada con agua subterránea (Ballín, 2003)	5
Tabla 4 Clasificación del agua subterránea en base a la salinidad	6
Tabla 5 Superficie irrigada por calidad de agua (Ballín, 2003)	6
Tabla 6 Clases de agua en la zona de estudio (Ballín, 2003)	6
Tabla 7 Superficie y tipo de riego en relación con la calidad del agua (Ballín, 2003)	7
Tabla 8 Resultados de los datos obtenidos de parámetros químicos reportados por la empresa HIDROTEC en el año de 1972	8
Tabla 9 Resultados de los datos obtenidos de parámetros químicos reportados por la empresa PROYESCO en el año de 1980.....	8
Tabla 10 Valores encontrados de N-NO ₃ (tomados de Planer-Friedrich, 1999)	9
Tabla 11 Información del tipo de conservador utilizado para las muestras colectadas en el área de estudio	43
Tabla 12 Límites de detección de los elementos analizados en el Espectrómetro de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo	46
Tabla 13 Tipo y número de aprovechamientos muestreados	52
Tabla 14 Límites permisibles para calidad de uso potable (NOM-127-SSA1-1994)	56
Tabla 15 Parámetros que rebasan el límite máximo permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994 en cada uno de los aprovechamientos del área de estudio	57
Tabla 16 Grupos de agua para irrigación basada en la conductividad eléctrica (modificado de Lloyd y Heathcote, 1985)	84
Tabla 17 Grupos de agua para irrigación basada en la conductividad eléctrica (modificado de Lloyd y Heathcote, 1985)	84
Tabla 18 Categorías de agua establecidas en la calidad de agua para riego (modificado de Lloyd y Heathcote, 1985)	92
Tabla 19 Concentraciones máximas recomendadas para diversos elementos traza disueltos en el agua destinada para irrigación (modificada de Lloyd y Heathcote, 1985)	95
Tabla 20 Clasificación de los resultados obtenidos en los aprovechamientos en base a la familia de agua a la que pertenecen.....	102
Tabla 21 Clasificación de aprovechamiento de acuerdo a las 3 familias de agua principales.....	104
Tabla 22 Tabla de concentraciones promedio de parámetros de campo y de laboratorio para las familias de agua identificadas en el área de estudio	106
Tabla 23 Clasificación de aprovechamientos de acuerdo a las facies hidrogeoquímicas identificadas en el área de estudio	108
Tabla 24 Resumen estadístico de elementos mayores, metales y traza en el área de estudio	111
Tabla 25 Matriz de correlación de datos químicos para las muestras de la zona de estudio	113
Tabla 26 Resultados del cálculo de la altitud de la precipitación	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Localización del área de estudio	12
Figura 2 Fisiografía del Estado de San Luis Potosí (modificado de INEGI, 2002)	14
Figura 3 Morfología del área de estudio	16
Figura 4 Regiones y cuencas hidrológicas del Estado de San Luis Potosí (modificado de INEGI, 2002).....	18
Figura 5 Geología del área de estudio (modificado de UASLP, 2004)	20
Figura 6 Modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio (modificado de Ballín et al., 2004).....	27
Figura 7 Pozo en condiciones óptimas para la toma de muestras y medición de parámetros físicos y químicos del agua subterránea	30
Figura 8 Hoja de campo utilizada para recabar información durante el trabajo de campo	31
Figura 9 Celda de aislamiento empleada para la medición de parámetros de campo	32
Figura 10 Medición de parámetros de campo en la descarga natural de un manantial.....	33
Figura 11 Equipo portátil utilizado en mediciones de campo y celda de aislamiento debidamente instalada con los electrodos en su interior; así como, soluciones de calibración	33
Figura 12 Gráfico del método de la titulación de Gran para la determinación de la alcalinidad (modificada de Appelo y Postma 1996).....	38
Figura 13 Determinación de alcalinidad en campo por el método de Gran....	39
Figura 14 Procedimiento utilizado para la determinación de la alcalinidad por medio de la Titulación de Gran	39
Figura 15 Medición del nivel estático en un aprovechamiento del área de estudio	41
Figura 16 Proceso de filtrado en campo (izquierda), equipo de filtración utilizado (derecha-abajo) y filtro utilizado (derecha-arriba).....	42
Figura 17 Adición de HNO ₃ como conservador a la muestra (izquierda) y conservadores utilizados (derecha)	43
Figura 18 Muestras tomadas en cada uno de los aprovechamientos.....	44
Figura 19 Distribución de aprovechamientos hídricos donde se tomaron muestras de agua subterránea	53
Figura 20 Dirección del flujo del agua subterránea en el área de estudio.....	54
Figura 21 Distribución espacial de muestras que rebasan y que no rebasan el límite permisible en relación al cloruro (en mg/L) en el área de estudio.....	60
Figura 22 Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación a la dureza total (en mg/L de CaCO ₃) en el área de estudio	62
Figura 23 Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al sulfato (en mg/L) en el área de estudio	64
Figura 24 Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación a los sólidos totales disueltos (en mg/L) en el área de estudio	65

Figura 25	Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al sodio (en mg/L) en el área de estudio	67
Figura 26	Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al N-NO ₃ (en mg/L de N-NO ₃) en el área de estudio	69
Figura 27	Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al arsénico (en µg/L) en el área de estudio	73
Figura 28	Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al cadmio (en µg/L) en el área de estudio.....	75
Figura 29	Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al plomo (en µg/L) en el área de estudio	76
Figura 30	Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al hierro (en mg/L) en el área de estudio	78
Figura 31	Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al fluoruro (en mg/L) en el área de estudio.....	80
Figura 32	Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al manganeso (en µg/L) en el área de estudio...	82
Figura 33	Distribución geográfica del agua subterránea del área de estudio clasificada de acuerdo con la salinidad a partir de la conductividad eléctrica..	85
Figura 34	Distribución espacial de la concentración de adsorción de sodio (SAR) en el agua del área de interés	88
Figura 35	Clasificación de agua para uso agrícola	89
Figura 36	Distribución porcentual de los tipos de agua identificados en el área de estudio de acuerdo con la clasificación de agua para uso agrícola.....	90
Figura 37	Distribución espacial de los tipos de agua de acuerdo con la clasificación de agua para riego en el área de interés.....	91
Figura 38	Distribución geográfica de los valores obtenidos para determinar el peligro por Mg en el área de estudio.....	94
Figura 39	Gráfica de resultados de % de error correspondientes a las 109 muestras recolectadas en el área de estudio	97
Figura 40	Diagrama de Stiff correspondiente a una muestra del área de estudio	98
Figura 41	Distribución de Diagramas de Stiff en el área de estudio.....	99
Figura 42	Diagrama triangular de Piper para las muestras de agua subterránea en el área de estudio.....	101
Figura 43	Distribución porcentual de las familias de agua identificadas en el área de interés.....	102
Figura 44	Diagrama triangular de Piper mostrando las 3 familias de agua principales.....	103
Figura 45	Distribución porcentual de las familias de agua principales del área de estudio	103
Figura 46	Distribución espacial de las tres principales familias de agua identificadas en el área de estudio	105
Figura 47	Distribución de valores de conductividad eléctrica (µmhos/cm) en el área de estudio y su relación espacial con las principales familias de agua identificadas	107
Figura 48	Distribución de valores estadísticos calculados para los resultados de análisis químicos.....	111

Figura 49 Índice de saturación en relación a la Calcita	117
Figura 50 Índice de saturación en relación a la Dolomita.....	118
Figura 51 Índice de saturación en relación a la Anhidrita	119
Figura 52 Índice de saturación en relación al Yeso	119
Figura 53 Composición isotópica de ^{18}O y ^2H en agua subterránea tipo HCO_3^- - Ca del área de estudio	122
Figura 54 Composición isotópica de ^{18}O y ^2H en agua subterránea tipo SO_4^{2-} - Ca y SO_4^{2-} -Mg-Mixta del área de estudio	122
Figura 55 Contenido de ^{18}O en el área de estudio expresado como $\delta^{18}\text{O}$ vs. VSMOW (‰).....	124
Figura 56 Correlación entre sulfato y $\delta^{18}\text{O}$	126
Figura 57 Efectos y manifestaciones de la circulación de flujo de agua subterránea en una cuenca regional (modificado de Tóth, 1999)	128
Figura 58 Procedimiento de cálculo efectuado por el programa PHREEQC ..	130
Figura 59 Procedimiento empleado para realizar la modelación inversa en las muestras de agua subterránea del área de estudio	131
Figura 60 Aprovechamientos utilizados en la modelación hidrogeoquímica inversa del área de estudio	134

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para todas las formas conocidas de vida. Al igual que algunos otros recursos naturales, la demanda de ésta se ha incrementado con la creciente población mundial. Cada año caen aproximadamente 110 billones (10^{12}) de metros cúbicos (m^3) de agua en forma de precipitaciones pluviales sobre los continentes del globo terráqueo. En el año de 1950, la población mundial ascendía a 2,520 millones de personas, mientras que para el 2005, había aumentado a 6,464 millones (CNA, 2007-a). Lo que significa que cada uno recibe en promedio cerca de 47,000 litros de agua dulce por día (Price, 2003).

Sin embargo, la tabla 1 muestra el balance de agua y queda bastante claro que, si se elimina el 94% correspondiente al volumen de agua que se encuentra en mares y océanos debido a los niveles de salinidad, entonces el agua subterránea constituye las dos terceras partes del agua dulce disponible en el mundo. Otra fuente de agua dulce son los icebergs y glaciares pero no se puede acceder a ella tan fácilmente, por lo que se considera como no disponible. Frezze y Cherry (1979) mencionan que el agua dulce disponible entonces se distribuye como sigue: agua subterránea, 95%; lagos, pantanos/marismas, reservorios y cauces de ríos, 3.5%; y humedad del suelo 1.5%.

Tabla 1 Estimación de balance de agua mundial (modificado de Freeze y Cherry, 1979)

Parametro	Area (km^2) $\times 10^6$	Volumen (km^3) $\times 10^6$	Volumen (%)	Tiempo de residencia
Océanos y mares	361	1370	94	4000 años
Lagos y reservorios	1.55	0.13	<0.01	10 años
Pantanos/marismas	<0.1	<0.01	<0.01	1-10 años
Cauces de rios	<0.1	<0.01	<0.01	2 semanas
Humedad del suelo	130	0.07	<0.01	2 semanas - 1 año
Agua subterránea	130	60	4	2 semanas - 10 000 años
Icebergs y glaciares	17.8	30	2	10-10 000 años
Agua atmosférica	504	0.01	<0.01	10 días
Agua bioférica	<0.1	<0.01	<0.01	1 semana

Entonces de acuerdo a las cifras analizadas anteriormente, el agua subterránea es de esencial importancia para la civilización, porque supone la mayor reserva de agua potable en las regiones habitadas por los seres humanos. El agua subterránea puede aparecer en la superficie en forma de manantiales, o puede ser extraída mediante pozos.

La extracción de agua subterránea en la República Mexicana es \pm 28,000 millones de metros cúbicos siendo; el 72% para uso agrícola, el 20% para uso urbano, el 6% para uso industrial y el 3% para uso doméstico (CNA, 2007-a). En las cifras anteriores, queda reflejada la importancia del agua subterránea y los grandes volúmenes que son utilizados para la agricultura en el país.

En el estado de San Luis Potosí, el volumen total concesionado de agua (subterránea y superficial) es de 1,310.5 millones de metros cúbicos. El 81% de este volumen es destinado a la agricultura del estado, el 13% a abastecimiento público y el 6 % restante a la industria y termoeléctricas.

La cantidad de agua y el aumento en el número de personas en el planeta, no son los únicos problemas relacionados con el agua, sino la distribución relativa de ambos, el hecho de que el agua no llega de manera regular a través del tiempo así como la calidad de ésta.

Dado que el movimiento de las aguas subterráneas suele ser lento, el agua contaminada puede pasar desapercibida durante mucho tiempo. De hecho, la mayor parte de la contaminación se descubre sólo después de haberse visto afectada el agua potable y de que las personas se enferman. Llegados a este punto, el volumen de agua contaminada puede ser muy grande y, aún cuando se elimine inmediatamente la fuente de contaminación, no se resuelve el problema. Aunque las fuentes de contaminación del agua subterránea son numerosas, las soluciones son relativamente pocas. Debido a lo anterior la mejor solución a la contaminación del agua subterránea es la prevención.

En lo que respecta a la calidad del agua subterránea, se debe hacer hincapié en la diferencia entre agua de mala calidad natural y agua contaminada. La primera está condicionada por procesos y reacciones químicas que se llevan a cabo en el material geológico a lo largo de la trayectoria de flujo del agua subterránea; mientras que la segunda, es debido a la incorporación de especies químicas a consecuencia de actividades humanas.

El tener conocimiento de la distribución, trayecto y concentración de los principales iones que están condicionando el uso del agua subterránea a nivel regional, es de gran importancia para delimitar zonas y darle un uso apropiado al agua subterránea.

Por lo anteriormente expuesto, en el presente trabajo se lleva a cabo una evaluación de la calidad del agua subterránea condicionada principalmente por el medio geológico, puesto que ésta representa un importante sustento para la actividad agrícola y abastecimiento de la población en la porción central de Zona Media del Estado de San Luis Potosí.

Este trabajo de investigación surgió como parte del proyecto denominado "ESTUDIO PARA LA DETERMINACIÓN DE PROYECTOS PRIORITARIOS PARA LA RECARGA DEL ACUÍFERO RIOVERDE-CIUDAD FERNÁNDEZ Y REGIÓN HIDROLÓGICA PÁNUCO" desarrollado por un gran número de personal e investigadores de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí bajo la dirección del MI Arturo Dufour Candelaria. El objetivo fue determinar la calidad del agua subterránea y establecer una relación entre el agua superficial y el agua subterránea, para localizar posibles zonas de recarga del sistema acuífero y posteriormente determinar los proyectos prioritarios para establecer dicha recarga (UASLP, 2004). Se participó activamente en campo y los datos generados fueron utilizados para los cálculos e interpretaciones desarrollados en este trabajo de tesis.

1.1. Estudios previos

Los municipios de Rioverde y Ciudad Fernández conforman la región agrícola de Rioverde. La agricultura es la actividad económica principal y se sustenta fundamentalmente en las aguas subterráneas, siendo ésta una de las más importantes del estado de San Luis Potosí, México.

El desarrollo agrícola inicia en la época prehispánica, utilizando para la irrigación de cultivos agua superficial, principalmente del manantial de La Media Luna, mediante la construcción de acequias y presas de cal y cantos rodados que almacenaban las escorrentías provenientes de las serranías aledañas.

Al transformarse las estancias en haciendas (1645) la agricultura adquiere mayor importancia que la ganadería siendo los cultivos principales el maíz, chile, cebada y garbanzo.

En los años de 1810 a 1917 debido al ya marcado desarrollo agrícola, fue necesario el establecimiento del Banco Agrícola. La introducción del ferrocarril propició que los productos generados fueran a mercados nacionales e internacionales siendo estos: piloncillo, naranja, algodón y cacahuate.

En la época de la Reforma Agraria (1923) comienza el reparto de parcelas ejidales, en esta época el agua del manantial de La Media Luna se distribuía por medio de cinco canales a los ejidos y pequeñas propiedades. Alrededor del año de 1950, se inicia el aprovechamiento del agua subterránea para irrigar los cultivos mediante pozos, se comenzó a usar maquinaria agrícola; así como, también fertilizantes e insecticidas en los cultivos de hortalizas (Charcas, 2002).

La tabla 2 presenta en resumen, las características que se obtuvieron en el censo realizado en el año 2000 (Ballín, 2003), con un total de 462 pozos

censados en Rioverde y Ciudad Fernández. Resulta importante apreciar como la mayoría de los aprovechamientos se usan para el riego agrícola.

Tabla 2 Pozos censados en el año 2000 (Ballín, 2003)

Profundo	443(96%)
A cielo abierto	19(4%)
Agrícola	411
Público urbano	32
Doméstico	3

En un lapso de 34 años los aprovechamientos de Rioverde y Ciudad Fernández han sido modificados de una manera importante (ver tabla 3), ello ha originado mayores extracciones debido a la implementación de equipos de mayor potencia. En este lapso de tiempo, la superficie agrícola se incrementó en casi 3,000 ha (60.43%) de toda la superficie aprovechada de la zona.

Tabla 3 Superficie irrigada con agua subterránea (Ballín, 2003)

Censo	Superficie (ha)
Año 1966	4,348
Año 2000	7,195

En el mismo lapso los pozos muestran cambios importantes en las profundidades ya que mientras en 1966 el 21% eran pozos profundos, el 79% restante eran a cielo abierto. Para el año de 1981 los datos disponibles señalan que el número de aprovechamientos considerados como profundos se incrementó, debido a que el porcentaje de éstos alcanzaba el 56% por 44% de los considerados a cielo abierto. En este sentido, es importante señalar que los aprovechamientos profundos comenzaban a proliferar debido a dos importantes hechos; primero la electrificación de la zona y los créditos de avío otorgados en la región por parte del gobierno. En este sentido, para el año 2000 el 96% son pozos profundos y el 4% a cielo abierto (Ballín, 2003).

Una guía para clasificar el agua de acuerdo con la salinidad (definida a partir de la conductividad eléctrica) es la establecida por el Laboratorio de Salinidad

de los Estados Unidos de América (US Salinity Laboratory) que considera 4 clases de agua como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4 Clasificación del agua subterránea en base a la salinidad

		CE ($\mu\text{S/cm}$)
Clase 1	Baja salinidad	100-250
Clase 2	Salinidad media	250-750
Clase 3	Altamente salinas	750-2,250
Clase 4	Salinidad extrema	>2,250

La tabla 5 presenta la superficie irrigada identificada de acuerdo a la calidad del agua (Ballín, 2003), tomando únicamente en cuenta la clasificación con base en la salinidad en el área de estudio (Cd Fernández-Rioverde), es claro que es una superficie mínima la que es irrigada con agua de baja salinidad.

Tabla 5 Superficie irrigada por calidad de agua (Ballín, 2003)

C1	C2	C3	C4
67 ha	2,124 ha	2,729 ha	2,275 ha

Según los censos comparativos realizados en los años 1981 y 2000 (tabla 6) referente a las clases de aguas, los datos reportados para las cuatro categorías y los porcentajes obtenidos para cada una de las clases, es prácticamente la misma en la región de Rioverde-Ciudad Fernández.

Tabla 6 Clases de agua en la zona de estudio (Ballín, 2003)

Censo	Clases de agua			
Año	C1	C2	C3	C4
1981 (SRH)	1%	45%	29%	25%
2000 (Ballín, 2000)	1%	46%	31%	22%

En la tabla 7 se puede apreciar que son pocas las hectáreas regadas por aspersión y goteo en comparación con las irrigadas por gravedad, partiendo de que el riego por gravedad tiene una eficiencia del 30% y del 60 % con óptima operación, se puede inferir que existen pérdidas de agua por falta de tecnología adecuada, esto puede traer serias consecuencias ya que el exceso

de irrigación percola a través de la zona no saturada hacia el agua subterránea, cargando productos químicos como fertilizantes y pesticidas.

Tabla 7 Superficie y tipo de riego en relación con la calidad del agua (Ballín, 2003)

Calidad del agua	Tipo de riego		
	Gravedad	Aspersión	Goteo
	Superficie (ha)		
C1	67	0	0
C2	1,976	0	0
C3	2,386	165	15
C4	2,219	0	13

En lo referente a la geoquímica, la empresa HIDROTEC realizó un estudio en el año de 1972 y la empresa PROYESCO otro en el año de 1980. Ambos estudios coinciden en la interpretación hidrogeoquímica del área de estudio. Ellos reportan que las clases dominantes de tipo de agua para todos los manantiales es bicarbonatada-cálcica; así como, a las muestras recolectadas en la zona denominada El Refugio, que corresponde al agua de buena calidad ya que el contenido en sólidos totales disueltos (STD) varía de 250 a 1,000 ppm.

En la zona del margen izquierdo del río Verde, reportan como clase dominante la familia sulfatada-sódica o sulfatada-mixta, con contenidos de STD en un rango de 1,000-3,000 ppm, lo que refleja que la recarga ha ocurrido en formaciones con alto contenido de yeso.

La empresa HIDROTEC realizó el análisis de 42 muestras en la zona de interés y los resultados son resumidos en la tabla 8.

En el estudio realizado por la empresa PROYESCO fueron definidas 3 zonas con agua de buena calidad, siendo la primera de estas zonas al poniente de Río Verde, entre El Capulín y La Noria; la segunda, en el extremo sureste, en las cercanías de la población de Santa Rita y la última, al norte, cerca de Ojo de Agua.

En la porción restante del medio geológico, la calidad del agua es mala con contenidos de STD de 1,000 o más ppm, debido al contacto del agua con

formaciones calcáreas y/o yesíferas. Esta empresa recolectó 90 muestras en el área de interés obteniendo los resultados mostrados en la tabla 9.

Tabla 8 Resultados de los datos obtenidos de parámetros químicos reportados por la empresa HIDROTEC en el año de 1972

PARAMETRO	MINIMO	MAXIMO	UNIDADES	OBSERVACIONES
Nitratos	2.2	9	ppm	En 21 de las muestras al W de Ríoverde, se rebasa la norma debido al uso de fertilizantes
Boro	202	1,059	gammas/l	Proviene de la disolución de algunos minerales de las rocas ígneas que afloran en la región.
Calcio	70	100	ppm	Pozos de buena calidad de las calizas que afloran al oeste de dichos pozos
	< L.D	672	ppm	Pozos de mala calidad debido a la presencia de Caliche y yesos en los rellenos.
Magnesio	< L.D	10	ppm	En el área de pozos de agua de buena calidad
	80	353	ppm	Zona de pozos de mala calidad.
Sodio	2	718	ppm	Proviene de la disolución de los feldespatos de las rocas ígneas y/o algunos horizontes sódicos dentro de las rocas sedimentarias.
Sulfatos	< L.D	70	ppm	En el área de pozos de agua de buena calidad, disolución de productos de cómo yesos y anhidritas.
	200	3,500	Ppm	Zona de pozos de mala calidad.
Bicarbonatos	130	350	ppm	Se produce por la reacción química entre sales carbonatadas y bióxido de carbono.
Cloro	6	60	ppm	En el área de pozos de agua de buena calidad.
	60	430	ppm	Proviene de los constituyentes de las rocas ígneas. Zona de pozos de mala calidad.
Sílice	27	70	ppm	Proviene de los constituyentes de las rocas ígneas.
S.T.D.	220	650	ppm	En el área de pozos de agua de buena calidad.
	3,000	5,400	ppm	Zona de pozos de mala calidad.

Tabla 9 Resultados de los datos obtenidos de parámetros químicos reportados por la empresa PROYESCO en el año de 1980

PARAMETRO	MINIMO	MAXIMO	UNIDADES	OBSERVACIONES
STD	250	4,000	ppm	Zonas de buena calidad del agua en la margen derecha del río y en los alrededores de Santa Rita
Cloruros	30	500	ppm	Valores menores en la zona inmediata al Refugio y Bordo Blanco.
Sulfatos	40	1,000	ppm	Valores menores en la zona inmediata al Refugio.
Bicarbonatos	100	300	ppm	Valores mayores en la porción central del valle sobre la margen izquierda del río.
Sodio	1	10	ppm	
	50	600	ppm	
Magnesio	5	500	ppm	

En el año de 1999, Planer-Friedrich realizó un estudio donde recolectó muestras en 27 sitios del área de: El Refugio (en el municipio de Ciudad Fernández) y Pastora (en el municipio de Río Verde). El muestreo incluyó pozos de agua potable y de uso agrícola; así como, también manantiales, y se obtuvo como conclusión que en la región ya existen pozos de agua potable que presentan elevadas concentraciones de nitrato. Los resultados son los siguientes (tabla 10):

Tabla 10 Valores encontrados de N-NO₃ (tomados de Planer-Friedrich, 1999)

Localidad: "El Refugio" en la zona norte del área de estudio	
Máximo	Mínimo
17.13 N-NO ₃ mg/L	0.40 N-NO ₃ mg/L
Localidad: "Pastora" en la zona norte del área de estudio.	
Máximo	Mínimo
9.46 N-NO ₃ mg/L	1.86 N-NO ₃ mg/L

El nitrato es un compuesto que sin lugar a dudas señala la presencia de impacto relacionado con agroquímicos, ya que su origen en las aguas subterráneas generalmente está asociado a la disolución de fertilizantes que contienen nitrógeno en su composición. La correlación entre el aumento en la utilización de fertilizantes nitrogenados y el incremento en la concentración de nitrato en el agua subterránea sugiere que el fertilizante es la fuente principal del nitrato adicional. Debido a que una porción del nitrato es lixiviada de la zona del suelo y transportada al nivel freático durante los procesos de infiltración, lo que produce que las plantas capten únicamente el 50 % del fertilizante aplicado, pero además hay que señalar que otra fuente también es el estiércol, pues contiene grandes cantidades de nitrógeno orgánico, esto es digno de tomarse en consideración ya que en el área de estudio la gente cuenta con ganado vacuno, caprino, ovino y equino.

1.2. Objetivos

JUSTIFICACIÓN

La calidad del agua subterránea es motivo de preocupación, ya que la contaminación se hace presente ante elementos provenientes de diversas fuentes.

Debido a las actividades humanas, se vierten al medio geológico sustancias contaminantes que alteran su calidad, poniendo en serio peligro el desarrollo de la región y la calidad de vida de sus habitantes.

La importancia de conocer la composición química del agua subterránea, direcciones de flujo y controles físicos y químicos que condicionan la buena calidad de ésta a nivel regional es enorme, ya que este tipo de estudios permiten un manejo más adecuado del recurso.

HIPÓTESIS

Las actividades humanas en el área de estudio, tienen el potencial de impactar el agua subterránea principalmente debido a actividades agrícolas y ganaderas comprometiendo así la disponibilidad del recurso. Los controles que gobiernan la química del agua en la región están asociados con las reacciones fisicoquímicas que se llevan a cabo en los materiales geológicos.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el estado actual de la calidad del agua subterránea en el área de estudio con especial énfasis en posibles impactos debidos a actividades humanas y al ambiente geológico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Actualizar el conocimiento de la calidad y realizar una interpretación hidrogeoquímica del agua subterránea.
- Correlacionar la contaminación del agua subterránea por componentes fisicoquímicos con las actividades humanas y con el medio geológico.
- Identificar las regiones donde las concentraciones de los contaminantes en el agua subterránea rebasan los límites permisibles sancionados en cuanto a las características físicas y químicas establecidas en la NOM-127-SSA1-1994.
- Clasificar el agua subterránea para riego agrícola mediante varios criterios
- Distinguir los sistemas de flujo de agua subterránea utilizando datos relacionados con la calidad química del agua.

- Modelar la evolución química del agua subterránea.
- Identificar indicadores de impacto antrópico.

1.3. Localización de la zona de estudio

El área de interés se encuentra localizada en la porción central de la zona Media del Estado de San Luis Potosí. La altura varía entre los 840 y 1,460 m.s.n.m (INEGI, 2002). Específicamente el área de estudio comprende los municipios de Rioverde, Ciudad Fernández y una pequeña porción del municipio de Villa Juárez (figura 1).

Las principales vías de comunicación son la carretera federal No. 70 Tampico-San Luis Potosí, en su tramo Valles-San Luis Potosí; la carretera interestatal No 69 Rioverde-Jalpan, Qro; la carretera estatal la cual comunica a Rioverde con Cd Fernández, Villa Juárez y Cerritos, la supercarretera San Luis-Cerritos-Rioverde; así como, por el eje ferroviario Aguascalientes-San Luis-Tampico.

Con base en las cifras de INEGI (2005) la población total es de 85,945 habitantes en el municipio de Rioverde y 41,042 en Ciudad Fernández, otras localidades con población mayor a los 1,500 habitantes son El Capulín, Progreso, El Jabalí, San Francisco y San José del Tapanco del municipio de Ciudad Fernández; y La Reforma y Ojo de Agua de Solano en el municipio de Rioverde; el resto de la población se agrupa en comunidades de 500 a pocas decenas de habitantes, por lo cual existe una gran dispersión de la población en esta región. De acuerdo a datos del Gobierno del Estado el índice de marginalidad en la zona varía entre medio, en lo que corresponde a la zona de Ciudad-Fernández-El Refugio y Rioverde, y bajo en el resto de la zona. La densidad de la población varía de 200 hab/km² en la zona de El Refugio-Cd. Fernández y Rioverde hasta menos de 100 hab/ km² en el resto del área. La actividad económica preponderante es la agricultura, seguida de la prestación de servicios y en muy baja proporción, la industrial (CNA, 2002).

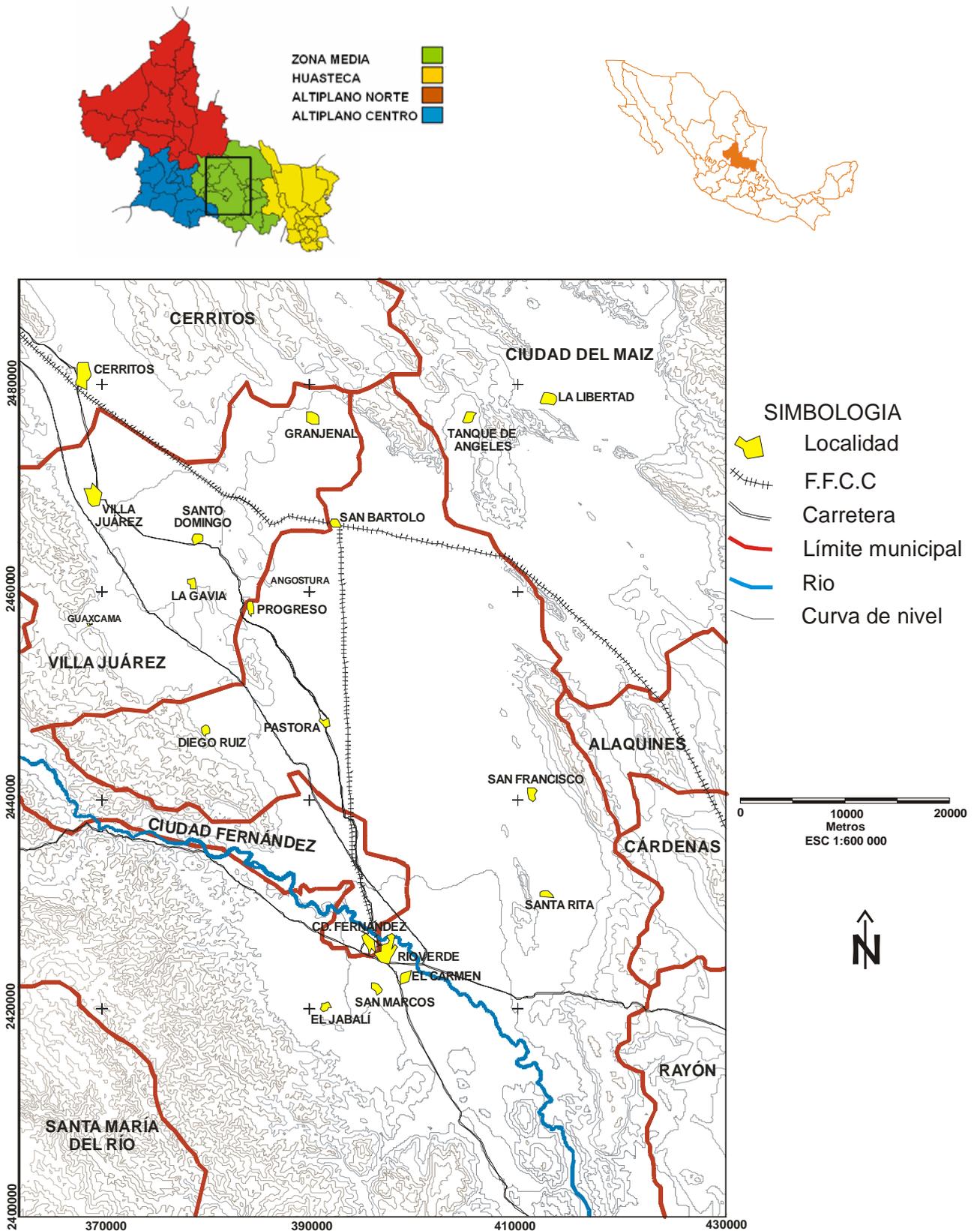


Figura 1 Localización del área de estudio

2. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO

2.1. Fisiografía

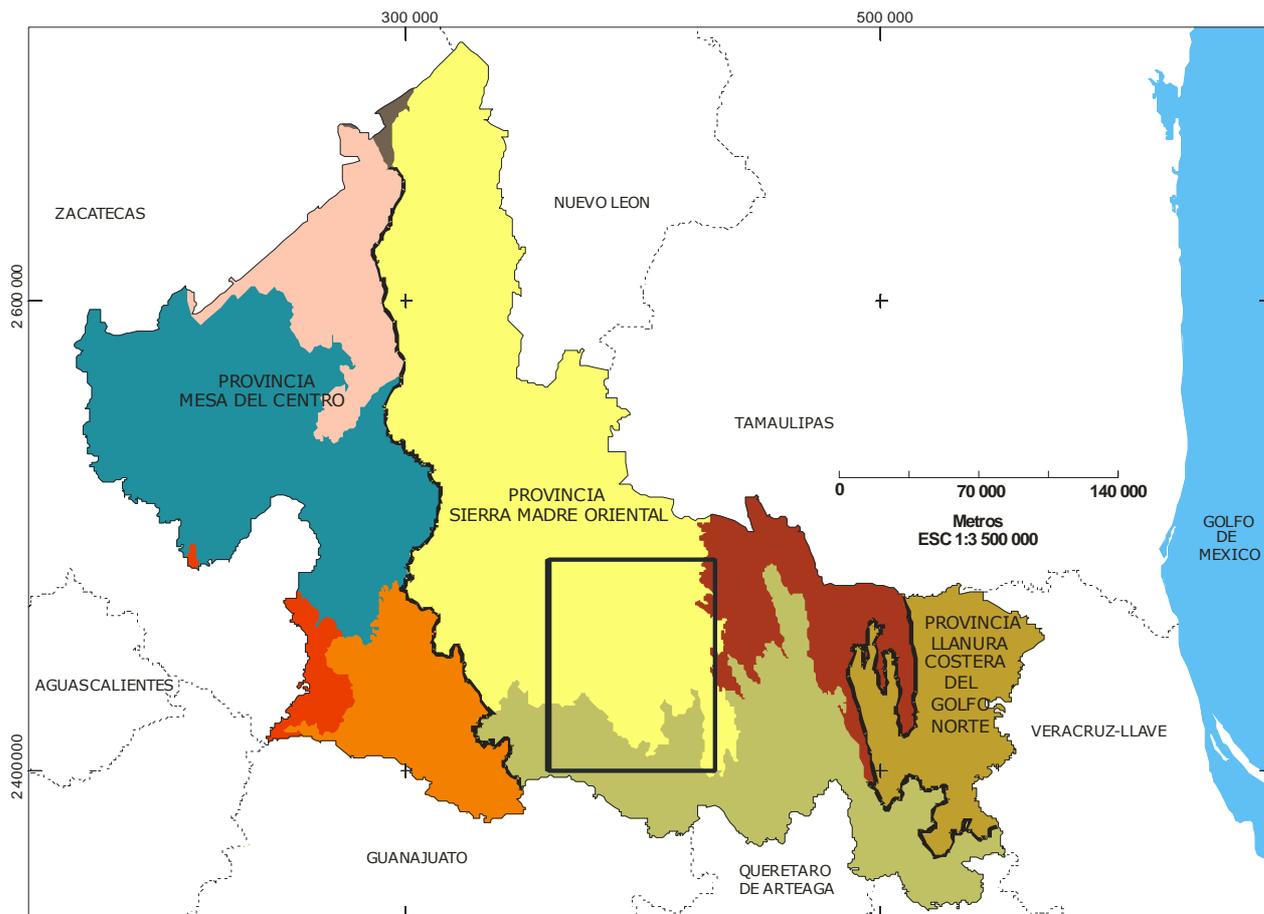
El territorio de San Luis Potosí forma parte de tres de las quince Provincias Fisiográficas en que se divide el país: Sierra Madre Oriental, que atraviesa de norte a sur toda la porción central de la entidad y se extiende hacia el sureste; Mesa del Centro, en la región occidental; y Llanura Costera del Golfo Norte, en la zona este-sureste.

El área de estudio se localiza en la Provincia Sierra Madre Oriental la cual es fundamentalmente un conjunto de sierras menores de estratos plegados (figura 2). Constituidos por antiguas rocas sedimentarias marinas (del Cretácico y del Jurásico Superior) entre las que predominan las calizas, quedando en segundo lugar las areniscas y lutitas. La Provincia comprende 57.08% de la superficie total del estado, por medio de las fracciones pertenecientes a las subregiones Sierras y Llanuras Occidentales, Carso Huasteco, Gran Sierra Plegada y Sierras Transversales.

El área de estudio esta incluida dentro de las Subprovincias denominadas Sierras y Llanuras Occidentales y Carso Huasteco. En la primera se tienen sierras en las que predominan rocas calizas, orientadas norte-sur y generalmente enlazadas por brazos cerriles que siguen la misma dirección o son oblicuos a las sierras. Esta configuración produce una especie de red de sierras entre las cuales hay espacios planos (llanuras) cubiertos de aluvión.

La Subprovincia Carso Huasteco constituye la porción sur de la Provincia Sierra Madre Oriental; se entiende aproximadamente desde las cercanías de Rioverde y Ciudad del Maíz, San Luis Potosí, hasta las inmediaciones de Teziutlán, Puebla. Es una sierra plegada que presenta un fuerte grado de disección, inclusive desarrollo de cañones por la acción de los importantes ríos que fluyen

en ella hacia el oriente, como el Tampaón, y un mayor grado de expresiones de rasgos propios de un carso que todo el resto de la Provincia. El carso es una región de rocas solubles en el agua, en este caso calizas (dominantes en la Subprovincia), en las que se producen cavidades (dolinas), grutas e infiltración del agua al subsuelo (INEGI, 2002).



SIMBOLOGIA

- PROVINCIA SIERRA MADRE ORIENTAL**
 - SUBPROVINCIA SIERRAS TRANSVERSALES
 - SUBPROVINCIA GRAN SIERRA PLEGADA
 - SUBPROVINCIA SIERRAS Y LLANURAS OCCIDENTALES
 - SUBPROVINCIA CARSO HUASTEKO
 - PROVINCIA LLANURA COSTERA DEL GOLFO NORTE**
 - SUBPROVINCIA LLANURAS Y LOMERIOS
 - PROVINCIA MESA DEL CENTRO**
 - SUBPROVINCIA SIERRAS Y LOMERIOS DE ALDAMA Y RIO GRANDE
 - SUBPROVINCIA LLANURAS Y SIERRAS POTOSINO-ZACATECANAS
 - SUBPROVINCIA LLANURAS DE OJUELOS-AGUASCALIENTES
 - SUBPROVINCIA SIERRAS Y LLANURAS DEL NORTE DE GUANAJUATO
- LIMITE DE PROVINCIA
- ▭ AREA DE ESTUDIO

Figura 2 Fisiografía del Estado de San Luis Potosí (modificado de INEGI, 2002)

2.2. Morfología

La morfología en el área de estudio (figura 3) es resultado de la intensa meteorización, denudación y erosión que ha ocurrido sobre un paisaje originalmente cárstico, afectado por procesos tectónicos de plegamiento, afallamiento, levantamiento y extrusión de paquetes de rocas volcánicas, distinguiéndose las siguientes topoformas:

SIERRA ALTA DE LADERAS CONVEXAS.- Representada por la sierra el Camarón y la Noria, situadas en la porción occidental del área de interés, es el elemento de mayor elevación con 2,000 msnm, labrada sobre un anticlinal de calizas de la Formación El Abra cubierto por rocas volcánicas; así como, la Sierra de Gallinas o del Palote, con elevación máxima de 1,650 msnm, labrada sobre un diapiro de anhidrita perteneciente a la Formación Guaxcamá, y calizas de la Formación El Abra, intensamente plegadas.

SIERRAS BAJAS ALARGADAS.- Se presenta en las sierras de la parte oriental y norte del área. En forma de pequeñas sierras alargadas orientadas en dirección NW-SE, esculpidas sobre formaciones sedimentarias (calizas, areniscas y lutitas) que alcanzan elevaciones de 1,200 a 1,500 msnm (Sierra El Vetado, Cordón San Francisco).

LOMERIO SUAVE.- Se encuentra en la porción septentrional del área de estudio., separando ésta de la zona de Cerritos-Villa Juárez, a la altura de La Gavia y La Angostura, en forma de protuberancias aisladas del terreno con altitudes cercanas a los 1,300 msnm, entre ellos destaca el Cerro El Cabrero, por ser el más elevado; así como, el Cerro La Boquilla y Cerrito Blanco, los cuales están labrados sobre rocas basálticas.

VALLE ABIERTO.- Sobre la margen izquierda del río Verde, el valle tiene una mayor amplitud (20 km de ancho por 40 km de largo) formando una extensa llanura de altitud cercana a los 1,000 msnm, en la cual el drenaje es muy pobre. Existen algunas zonas de lagunas, como en las inmediaciones de las

localidades Ojo de Agua y Rancho Verde, también se presentan algunos manantiales en las estribaciones de las sierras del borde oriental de la planicie.

VALLE FLUVIAL.- Constituye el encauzamiento del río Verde que disecta al valle abierto en forma transversal; constituye la geoforma más reciente de la región.

MANANTIAL.- Sobre la margen derecha del río se presenta una zona de manantiales denominados Media Luna de origen cárstico (CNA, 2002).

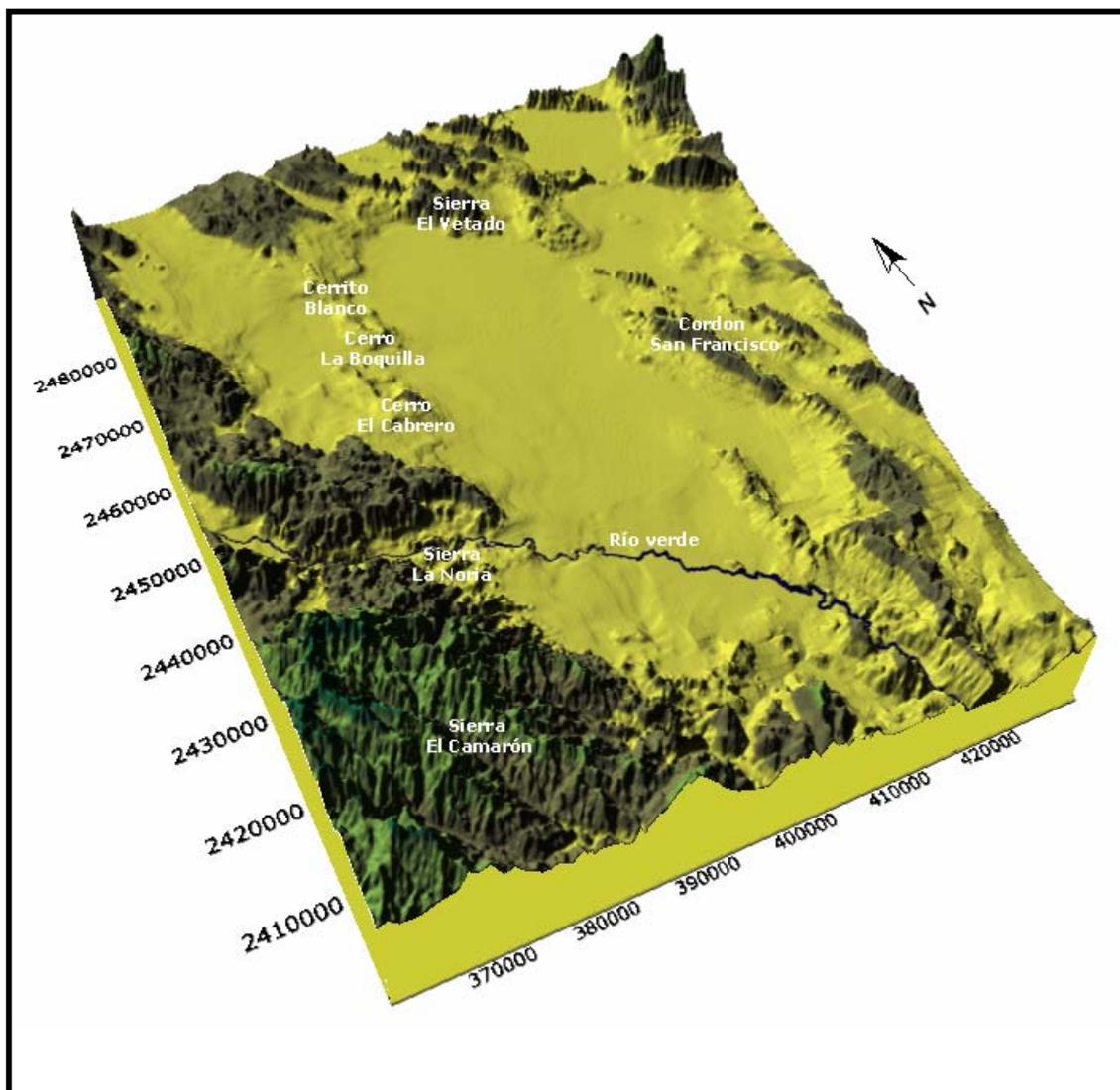


Figura 3 Morfología del área de estudio

2.3. Clima

El clima es seco estepario con clave BShwg, que de acuerdo a la clasificación de Köpen modificada por Enriqueta García es caracterizado por ser un clima seco, con vegetación de tipo estepario, que cambia transicionalmente hacia el sur del área de estudio a clima semicálido húmedo con lluvias en verano (INEGI, 2002).

La temperatura máxima anual es de 25.8 °C, la mínima anual de 14.8 °C y la media anual de 21.6 °C; siendo Mayo el mes que presenta la máxima temperatura y Enero la mínima (Montañez, 1992). La temporada de lluvias es de Mayo a Agosto y la precipitación media anual es del orden de 553.80 mm (CNA-b, 2007).

La Comisión Nacional del Agua (CNA) en base en una configuración de isolíneas de igual evaporación calculó, en el año 2002 mediante el método de áreas de igual magnitud, un valor promedio anual de 1,685 mm. El rango de la evaporación potencial varía entre 1,500 y 1,925 mm anuales. Los datos se tomaron del registro de evaporación medida en evaporímetros clase "A", en las siguientes estaciones meteorológicas: Pastora, Villa Juárez, Nogal Oscuro, La Morita, Las Tablas, Rioverde, Huizachal, Media Luna y El Charco. La evapotranspiración real media anual se calculó empleando la fórmula de Turc, en función de la temperatura y la precipitación, con lo cual se obtuvo un valor de 492.74 mm (CNA, 2002).

2.4. Hidrología superficial

El área de estudio pertenece a la Región Hidrológica N°26, pues coincide con la Cuenca Media del río Verde, la cual es subafluente del río Tampaón, que a su vez es afluente del río Pánuco (figura 4). Esta corriente se origina a 35 km al oriente de la ciudad de San Luis Potosí, a una elevación aproximada de 2,600 msnm, en las proximidades de Armadillo de los Infante y San Nicolás

Tolentino, en la cordillera que divide al río Pánuco de la Región N°37. Su curso general es este-sureste, sensiblemente paralelo al río Santa María y confluye a él por su margen izquierda a una elevación de 1,250 msnm. La topografía es variada existiendo zonas planas en sus orígenes y principalmente en la parte intermedia del municipio de Rioverde, SLP.

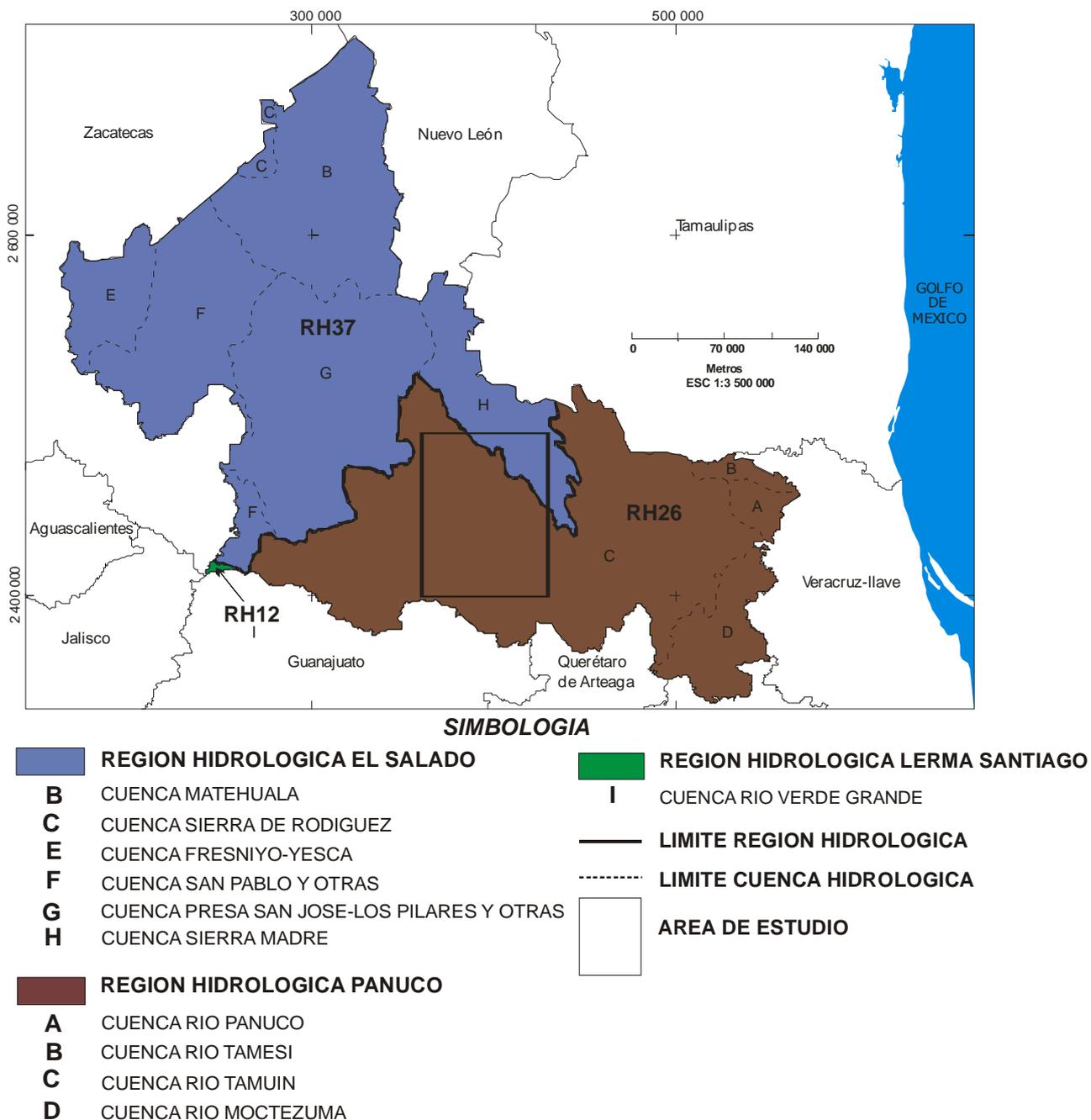


Figura 4 Regiones y cuencas hidrológicas del Estado de San Luis Potosí (modificado de INEGI, 2002)

2.5. Geología

La Universidad Autónoma de San Luis Potosí realizó un extenso trabajo en cuanto a la geología se refiere en el año 2004 y mencionan que la columna estratigráfica del área en estudio está constituida por rocas sedimentarias del Cretácico Inferior representado por la Formación Guaxcamá del Barremiano-Aptiano y El Abra del Albiano-Santoniano, el Cretácico Superior por la Formación Tamasopo del Turoniano-Santoniano y la Formación Cárdenas del Campaniano- Maestrichtiano.

El Oligoceno está representado por rocas volcánicas de composición predominantemente félsica como la unidad de riolita-dacita, toba riolítica, ignimbrita-riolita y el final del Oligoceno consiste de derrames de andesita y basalto conformando la unidad denominada Terciario Volcánico (Tv).

Del Mioceno Superior al Plioceno afloran unidades terrígenas continentales compuestas por conglomerado polimíctico y arenisca, sobreyaciendo a éstas se encuentran arena y limo.

En el Cuaternario se tienen los depósitos de basalto, conglomerado polimíctico y por último se presentan los depósitos del aluvi3n en los arroyos, compuestos principalmente por grava y arena (figura 5).

2.5.1. Estratigrafía

2.5.1.1. Cretácico

FORMACIÓN GUAXCAMA (Ki-y), Barremiano-Aptiano.

Con el nombre de Formación Guaxcamá, se denominó a una secuencia evaporítica que se encuentra en la porción central de la Plataforma de Valles-San Luis Potosí.

Está constituida por yesos y anhidritas bien estratificadas en capas de 5 a 50 cm de espesor. Intercaladas con los yesos se encuentran calizas y dolomitas fracturadas. Se le considera un espesor de 300 m.

Dentro del área de estudio queda expuesta en la porción occidental del área en el Picacho Ojo de Agua y al noroeste de la comunidad de San Bartolo. El afloramiento ubicado a 0.8 km al Sur del poblado Guaxcamá, consiste de dolomitas de color gris claro con algunas fracturas rellenas de azufre. La Formación Guaxcamá subyace a las rocas de la Formación El Abra, su contacto inferior no aflora dentro del área de estudio.

FORMACION EL ABRA (Km-cz), Albiano-Cenomaniano.

Esta formación está constituida por una secuencia de calizas de color gris oscuro. Se estima un espesor de más de 1,500 m. Está expuesta en la porción centro y sur occidental del área de estudio; en gran parte de las sierras El Tablón y la Noria. En la zona de estudio le sobreyace la formación Tamasopo.

FORMACION TAMASOPO (Ks-cz), Turoniano-Senoniano Inferior.

Las calizas tienen un espesor variable, se considera de 300 a 400 m. Dentro del área de estudio está expuesta en la porción norte y nororiente; y en menor proporción en la parte sureste de la zona.

La Formación Tamasopo descansa concordantemente sobre la Formación El Abra subyaciendo de igual forma con la Formación Cárdenas. El conjunto faunístico de esta Formación lo ubica del Turoniano al Santoniano.

FORMACION CARDENAS (Ks-lu), Campaniano-Maestrichtiano.

Rocas arcillo-calcáreas que se encuentran aflorando en las cercanías de la estación del Ferrocarril Cárdenas, S.L.P. Esta formación es una secuencia de lutitas de color gris a café amarillento, su espesor en el área va de 80 a 100 m. Dentro del área de estudio está expuesta en la porción sur oriental del área; en el Cordón de San Francisco y en menor proporción parte noroeste de la zona.

Esta formación cubre a sedimentos de la unidad Tamasopo (Miembro Superior) y subyace a depósitos recientes y a derrames ígneos

2.5.1.2. Terciario

TERCIARIO VOLCÁNICO (Tv).

Con la finalidad de simplificar el mapa geológico, las unidades volcánicas del Terciario fueron agrupadas en una unidad denominada Terciario Volcánico, sin embargo, la descripción de las diferentes unidades que lo componen, se presenta a continuación.

Riolita Porfídica-Dacita Porfídica.- Esta unidad es la que más ampliamente aflora en la zona de estudio, litológicamente comprende derrames de riolita-dacita. Su espesor es muy variado, dependiendo si se encuentra en los derrames puede ser de 50 a 100 m, pero si se ubica cerca de las fuentes de emisión llámese fisuras o domos su espesor puede ser superior a los 600 m. Sobreyace discordantemente a las calizas de la Formación El Abra y subyacen a las tobas riolíticas.

Andesita-Traquiandesita.- La andesita-traquiandesita es de color gris oscuro verdoso. Su espesor se estima de 50 a 80 m.

Toba Riolítica.- Tobas riolíticas de color gris blanco a rosado. El espesor se estima en 200 m. Esta unidad sobreyace a las Riolitas y Dacitas porfídicas y subyace al paquete de Ignimbrita- Riolita.

Ignimbrita-Riolita.- Con un espesor estimado de 100 a 150 m. Este paquete volcánico descansa sobre las tobas riolíticas y subyace a derrames de composición andesítica-basáltica encontrándose coronando las partes más altas de la sierra.

Andesita-Basalto.- Las rocas son de color gris oscuro a gris verdoso, conforman mesas con ligera inclinación, como característica de esta unidad, en la parte superior de éstos derrames cambian gradualmente a basaltos de textura vesicular, con espesores de 2 a 3 m, el espesor total de la unidad es de 50 a 70 m. Los derrames de andesitas-basalto sobreyacen al paquete de tobas riolíticas o a las calizas de la Formación El Abra y no le sobreyace ninguna unidad de roca, pues se encuentra coronando las partes altas de las sierras.

ROCAS INTRUSIVAS. INTRUSIVO PALO VERDE (Tpv).

Se trata de una roca de color gris a café claro. No se conoce con exactitud la edad de esta roca, sin embargo puede abarcar gran parte del Oligoceno cortando a casi todo el paquete de rocas volcánicas extrusivas (Tv) presentes en la zona, aflorando solamente en la porción suroeste del área.

2.5.1.3. Terciario Neógeno

CONGLOMERADO POLIMÍCTICO (Tcgp), NEÓGENO.

Los depósitos son producto de la erosión de las diferentes unidades que conforman las sierras cercanas a cada afloramiento y varían según el tipo de roca que predomina en la localidad, la composición consisten de fragmentos de caliza y en una baja proporción por rocas volcánicas.

Esta unidad está constituida por un conglomerado de clastos de caliza y esporádicamente algunos fragmentos de riolitas. El tamaño comprende desde arena, gravas y bloques de un metro, se tiene como cementante una matriz arcillo-arenosas. No se conoce con exactitud el espesor, pero se calcula que puede tener entre 15 y 100 m.

Dentro del área de estudio esta expuesta en la porción sur oriental y noroccidental de la comunidad de El Jabalí las mejores expresiones se tienen en los poblados La Loma, San Diego y al norte de San Isidro de Vigas. Ésta unidad se localiza sobreyaciendo al paquete de rocas volcánicas del terciario y

a su vez está cubierta por depósitos de basaltos, conglomerados y depósitos aluviales mas recientes.

2.5.1.4. Cuaternario

BASALTO (Qb).

A la unidad se le asigna provisionalmente una edad Cuaternario, pero podrían ser de edad Terciario, y asociarse a un proceso de extensión.

En el área de estudio está expuesta en la porción nororiental y suroriental del área como en la Mesa Alta; así como, en la parte centro occidental. Se localiza un afloramiento en el límite oriental de la zona, sobre la carretera Rioverde-Valles, el cual consiste de basaltos de estructura vesicular. Al Oeste de la comunidad La Gavia, el afloramiento de basalto es de color pardo oscuro con tonalidades. Otro afloramiento de basalto es localizado al noroeste de la comunidad El Progreso.

CONGLOMERADO POLIMÍCTICO (Qcgp).

Como unidades sedimentarias continentales representativas del Cuaternario, se presentan conglomerados y aluvión. Es común que se presenten los conglomerados como un material formado por fragmentos constituidos de rocas sedimentarias que varían en tamaño desde unos cuantos centímetros hasta un metro. Su forma es de redondeada hasta subredondeada, el cementante es arcillo-arenoso mal consolidado sobreyaciendo discordantemente a las rocas más antiguas del Cretácico.

En el área de estudio está expuesto en su mayoría al Norte y Oriente de la zona, encontrándose afloramientos pequeños al Sur y Este del área. El afloramiento de conglomerado polimíctico mal clasificado, que es el más grande en cuanto a extensión pues se extiende desde la carretera Rioverde-Valles hasta al sureste de la comunidad de San Francisco, consiste de fragmentos de caliza, basalto y arenisca.

ALUVIÓN (Qal).

El aluvión esta formado por arcillas y se encuentra en los cauces de los ríos y arroyos como producto de la erosión a la que se encuentran sometidas las rocas y sedimentos del área, su distribución es amplia en la porción central de la zona de estudio (UASLP, 2004).

2.6. Hidrogeología

La principal fuente de recarga de la zona está constituida por la precipitación pluvial, la que a través de la infiltración en formaciones permeables fuera de ésta y su conducción dentro de las formaciones calcáreas, logra llegar hasta el área de estudio, alimentando el medio granular por medio de los manantiales que se observan en su superficie y por las fisuras o grietas en el contacto entre las dos formaciones, cuya evidencia superficial lo constituyen la localización de algunos manantiales dentro de la parte plana del área. La precipitación pluvial que no logra infiltrarse en las formaciones calcáreas y que escurre por las laderas que rodean el valle, puede ser una fuente de recarga al llegar a zonas más permeables, en las cuales se pueda infiltrar y alimentar de esta manera al medio granular (Alvarado, 1973).

Tomando en cuenta la información geológica (superficial y del subsuelo) y geofísica disponibles, establecen que las unidades hidrogeológicas que controlan el movimiento del agua subterránea en la zona de interés son (Ballín et al.,2004):

- 1) medio poroso,
- 2) medio fracturado y
- 3) medio cárstico.

El primero está integrado por materiales geológicos conformados por sedimentos no consolidados del Cuaternario que forman parte del material de relleno de la fosa tectónica. El segundo se encuentra constituido por las rocas volcánicas del Terciario y Cuaternario, y el tercero por las rocas calcáreas del

Cretácico. También con base en la distribución de las unidades hidrogeológicas, distinguen que en la zona de estudio existe un acuífero cuya respuesta hidráulica es de tipo libre, y que presenta una naturaleza heterogénea. No existe información disponible para identificar la ubicación del basamento del acuífero (Ballín et al., 2004).

2.6.1. Modelo hidrogeológico conceptual

El agua subterránea se mueve a lo largo de líneas de flujo de las áreas de recarga a las de descarga. La clasificación básica de los sistemas de flujo de agua subterránea fue hecha por Tóth quien reconoció sistemas de flujo local, intermedio y regional. Dichos sistemas, están gobernados principalmente por la topografía del terreno y la profundidad a la cual circula el agua. En superficies topográficas muy abruptas y a pocas profundidades predominarán en teoría, los sistemas de flujo locales. Los sistemas de flujo intermedios recargan en zonas topográficamente más altas y circulan a profundidades mayores que el sistema de flujo local. Los sistemas de flujo regionales recargan en los parteaguas de las cuencas y descargan en las zonas más bajas de éstas, circulando a mayor profundidad y a una velocidad más lenta que los dos anteriores (Kehew, 2001).

La figura 6 presenta una sección hidrogeológica con dirección SW-NE que describe el modelo hidrogeológico conceptual (Ballín et al., 2004), en ella se representan los sistemas de flujo de agua subterránea; así como, los medios en que circula, la dirección general del flujo subterráneo y las principales zonas de recarga y descarga.

Ballín et al., (2004) mencionan que aproximadamente el 95% de la extracción de agua subterránea se lleva a cabo a expensas del sistema de flujo regional; el 5% restante consiste en agua de buena calidad del sistema de flujo intermedio. La salinidad del agua subterránea, en las zonas de recarga es de

250 mg/L, mientras que para el norte del área de estudio llega hasta 5,000 mg/L en algunas localidades.

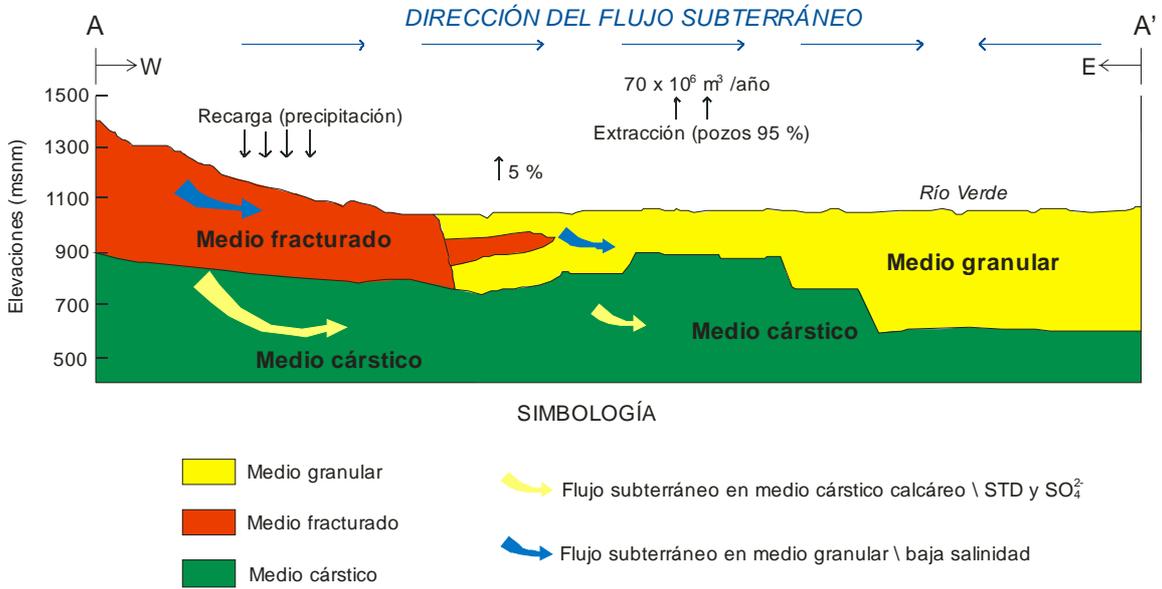


Figura 6 Modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio (modificado de Ballín et al., 2004)

3. METODOLOGÍA

La operación de tomar muestras y medición de parámetros de campo de una sustancia con el propósito de analizarla, resulta compleja, puesto que, la validez de los resultados que se obtengan en las operaciones posteriores, dependerán en buena parte, del protocolo de muestreo realizado.

La muestra debe ser representativa de la masa de agua que se quiere estudiar, o dicho de otra manera, la muestra tomada debe representar, con precisión, la pequeña o gran masa de agua de interés. Igualmente debe de ser del volumen adecuado para permitir realizar los análisis deseados. Además, la composición de la misma no debe variar en el intervalo que va desde que se ha tomado hasta el momento de realizar el análisis, ya que la muestra puede alterar su composición en este periodo de tiempo. Lo anterior debido a que el sistema físico-químico inicial sea inestable por sí, o por la influencia de factores externos, como el cambio de presión, temperatura, acción del oxígeno del aire, etc (Catalán, 1981).

Los parámetros hidrogeoquímicos requeridos en una investigación deberán ser dictados por los objetivos del estudio. El número potencial puede ser vasto; sin embargo, un consenso razonable puede y debe ser hecho de aquellos parámetros que realmente son de valor en la interpretación del sistema bajo estudio (Lloyd et al., 1985).

3.3. Trabajo de campo

El programa de muestreo fue adaptado al fin que se persigue en este estudio, por lo tanto se proyectó de tal modo que permitió, con los medios disponibles, realizar la descripción del fenómeno que se deseaba estudiar lo más aproximadamente posible con la realidad.

Con el análisis de los datos obtenidos de los trabajos realizados por HIDROTEC (1972), PROYESCO (1980) y Ballín (2003), con la ubicación y distribución de pozos, norias y manantiales en el área de estudio, se elaboró un mapa el que sirvió de guía en los recorridos de campo.

Desde un punto de vista general, es posible establecer que existen al menos tres métodos para la selección de los sitios en donde tomar las muestras:

- 1) criterio personal,
- 2) sistemáticamente,
- 3) en forma aleatoria.

La selección de los sitios en donde se tomaron las muestras para este estudio, se realizó por medio del criterio personal considerando la información recopilada a partir de estudios previos, de tal modo que fue posible obtener una mayor cantidad de datos aplicables a la investigación.

Una vez que se seleccionaron los aprovechamientos donde era posible tomar la muestra, se incluyó una componente aleatoria. Lo anterior debido a que los pozos y norias seleccionados que cumplían los requisitos propuestos (equipo de bombeo instalado y en funcionamiento, ver figura 7) para ser considerados candidatos para tomar la muestra no cubrían la cantidad de muestras consideradas, por lo que se procedió a seleccionar en forma aleatoria los puntos faltantes.

De este modo, se realizó una primera campaña de muestreo en el mes de Diciembre del año 2004, en la cual se obtuvieron 54 muestras y una segunda campaña en el mes de Enero del 2005, en la que se obtuvieron 55 muestras para dar un total de 109 distribuidas lo más homogéneamente posible en el área de estudio.



Figura 7 Pozo en condiciones óptimas para la toma de muestras y medición de parámetros físicos y químicos del agua subterránea

Se procedió a actualizar las características físicas de los aprovechamientos seleccionados con el objetivo de recabar la máxima información posible acerca de cada uno de los sitios muestreados, para lo cual se utilizó una hoja de campo que ayudo a la descripción lo más amplia posible del sitio donde se tomo la muestra y se midieron parámetros físicos y químicos (figura 8). Este formato incluye datos generales, parámetros medidos en campo e información de la muestra. Durante este recorrido la falta de información se generó por causas ajenas ya que en algunas ocasiones no se encontraba la persona que podía proporcionar la información completa, trayendo como consecuencia que los datos fueran tomados de manera parcial. En el anexo 1, se presentan las 109 hojas de campo generadas en este trabajo.

3.3.1 Medición de parámetros de campo

La medición de ciertos parámetros químicos y físicos en la descarga del pozo tiene por objeto obtener información de la muestra de agua subterránea en condiciones similares a las que se encuentra en el acuífero. Esto es, que debido al tiempo que pasa entre la toma de la muestra y su análisis en el laboratorio, diversos cambios pueden ocurrir. Por lo que es muy importante la medición de parámetros de campo en forma paralela a la toma de muestras.

**DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
COLECTADAS EN LA REGIÓN DE RIOVERDE-CIUDAD FERNÁNDEZ**

DATOS GENERALES										
Clave del Aprovechamiento	POTRERO (26RV)				Tipo de Aprovechamiento	Pozo	Noria	Manantial	Canal	
Coordenadas:	388894	X	2431805	Y	Uso del Agua	Estanque	Arroyo	Presa	Papalote	
Elevación (msnm)	1022	Altura del Brocal (m)			Tipo de Bomba	Potable	Agrícola	Pecuario	Doméstico	
Municipio	Cd. Fernández					Agropecuario	Servicios	Industrial	Sin uso	
Localidad	Ojo de Agua de Salmo				No. de Muestra	26	Profundidad			
Fecha	06-Dic-04				Hora de Inicio (hrs.)	04:05	Diámetro de Descarga	6"		
Litología Predominante					Temperatura Ambiente (°C)	30	Tiempo de Bombeo	35 min		
PROF. NIVEL ESTÁTICO/DINÁMICO	30.43		31		MEDIDOR CFE	6A5N33				
Lugar de Toma de Muestra	Llave en Brocal	Muestreador	Canal	Estanque/Lago	Duración del Muestreo	30 min	Gasto de Extracción	lps		

PARAMETROS MEDIDOS EN CAMPO							
Tiempo (min.)	1	3	5	7	9	11	13
T (°C)	28.6	28.6	28.6	28.6	28	27.9	28.2
pH	6.82	6.72	6.71	6.74	6.75	6.76	6.75
E campo (mV)	98	108	116	117	118	120	121
CE (µmhos/cm)	1019	1033	1017	1019	1013	1014	1019
O.D. %	39	42	48	44	42	42	42
O.D. mg/l	3.2	3.5	4	3.6	3.4	3.4	3.4

N ácido: 0.016±0.0008 V muestra (alcal.): 15 ml STD calculado: 713 mg/l
 Volumen de la muestra: 15 ml Volumen de agua tridestilada: - ml Factor de Dilución: -

H ₂ SO ₄ vueltas	200	370	375	379	383	387	391
pH	5.92	4.43	4.2	3.98	3.78	3.62	3.47
MI (#v÷800)							

Alcalinidad Total = 249.49 mg/l CaCO₃

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Número de Muestra: 26RV

MUESTRA PARA:	TIPO DE ENVASE	CANTIDAD	CAPACIDAD:	CONSERVADOR:	FILTRADA?
ANIONES	POLIETILENO	1	500 ml	NO	NO
CATIONES	POLIETILENO	1	125 ml	HNO ₃	SI
NITRATO	POLIETILENO	1	125 ml	H ₂ SO ₄	SI
¹⁸ O Y ² H	POLIETILENO	1	60 ml	NO	NO

Observaciones: Después de 35 min de bombeo no se abatió

Registrado por: _____

Figura 8 Hoja de campo utilizada para recabar información durante el trabajo de campo

Cuando el agua subterránea es bombeada a la superficie, esta queda expuesta a condiciones físico-químicas diferentes a las que se encontraba dentro del acuífero. Appello et al.,(1996) mencionan como ejemplo que, un decremento de CO₂ puede ocurrir causando cambios en el pH y la alcalinidad, lo cual puede propiciar la precipitación de carbonato. Es por esto, que se recomienda el uso de una celda de aislamiento para evitar que el agua que fluye del pozo tenga el mínimo contacto con la atmósfera y tratar de reducir al máximo los cambios que se explicaron anteriormente, teniendo como objetivo que los parámetros que se tomen reflejen las características físicas y químicas que tenía el agua dentro del acuífero.

Debido a esto, las mediciones de parámetros de campo (a excepción de la alcalinidad) se realizaron en una celda de aislamiento la cual se conectó a la descarga del pozo mediante una manguera. Dicha celda cuenta con orificios laterales en la tapa superior por los cuales se introdujo la manguera en uno de los orificios del lado derecho, permitiendo la salida continua y lenta del agua por los orificios del otro lado. Los orificios en la tapa permitieron introducir electrodos y soluciones para calibrar con el objetivo de que estas adquirieran la temperatura del agua en circulación y llevar a cabo una calibración adecuada. En dicha celda se determinó la conductividad eléctrica, temperatura, pH, Eh y oxígeno disuelto (figura 9).



Figura 9 Celda de aislamiento empleada para la medición de parámetros de campo

Cabe mencionar que otra ventaja de la utilización de este dispositivo es que se consigue una estabilidad en las mediciones favoreciendo el registro de los parámetros hidrogeoquímicos señalados previamente.

En el caso de manantiales, se inspeccionó el lugar y se localizaba la descarga natural de este, realizando las lecturas en este sitio, adaptando en la medida de las posibilidades la celda de aislamiento (figura 10).



Figura 10 Medición de parámetros de campo en la descarga natural de un manantial

A continuación se describen los parámetros medidos in situ en cada uno los aprovechamientos seleccionados; así como, también una fotografía donde se muestra el equipo portátil utilizado en las mediciones (figura 11).



Figura 11 Equipo portátil utilizado en mediciones de campo y celda de aislamiento debidamente instalada con los electrodos en su interior; así como, soluciones de calibración

3.3.1.1. Temperatura

Es el potencial calorífico referido a un cierto origen, por ejemplo la temperatura de fusión del hielo. La temperatura en las aguas subterráneas es muy poco variable, y responde a una media anual de las temperaturas atmosféricas de cada lugar, incrementado en el producto de la profundidad por el gradiente geotérmico. Debe medirse lo antes posible para evitar calentamientos o enfriamientos.

La medición de este parámetro en la descarga del pozo es de primordial importancia para cálculos termodinámicos relacionados a la química del agua (Lloyd et al., 1985).

La determinación de pH, temperatura y conductividad eléctrica se realizó con un aparato digital portátil modelo PC18, serie 3971, marca Conductronic, medidos de pH- μ S- $^{\circ}$ C, calibrado por Conductronic, S.A. La medición de la temperatura se llevo a cabo utilizando un termómetro marca Alla France, rango -8 $^{\circ}$ C a 32 $^{\circ}$ C, precisión 0.1 $^{\circ}$ C, certificación ASTM E1 595.063EU.

3.3.1.2. Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica es la capacidad de un agua para conducir electricidad; se mide como la conductividad que existe entre dos electrodos paralelos de 1 cm² de superficie cada uno y separados 1 cm situados en el seno del agua a medir de forma que el medio se pueda considerar infinito.

Los valores son usualmente reportados como; microsiemens por centímetro (μ S/cm) o micromhos por centímetro (μ mhos/cm). La conductividad crece con la temperatura y es preciso tomar una temperatura de referencia; que suele ser normalmente 25 $^{\circ}$ C. La conductividad crece con el contenido en iones disueltos (Custodio, 1983) y permite identificar de manera indirecta la salinidad de la solución.

La conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos (STD) se registraron por medio de un conductivímetro portátil que utiliza ajuste por temperatura. Los STD se estimaron con el mismo aparato en el que se registró la conductividad eléctrica.

3.3.1.3. pH

El pH de una solución es el logaritmo negativo de la actividad del ión hidrógeno en moles por litro. Cuando el agua subterránea es removida de un acuífero los controles físicos que gobiernan la actividad del ión hidrógeno cambian y entonces el pH también (Lloyd et al., 1985).

La medición de la actividad de los iones hidrógeno en el agua subterránea se efectuó por medio de un potenciómetro utilizando la técnica de calibración en dos puntos, en este caso especificados a partir de soluciones buffer de pH conocido. En esta técnica, el pH a registrar debe ubicarse entre dichos extremos. Para ello se utilizaron soluciones de 7.0 y 10.0 unidades de pH marca MLLKY-J.T.Baker, lote No Y32C14, A1804, fecha de caducidad 04/06 certificación NIST SRMI85g colocadas en frascos inmersos en la celda de aislamiento. Este procedimiento permitió que la temperatura de las soluciones buffer fuera la misma que la del agua subterránea extraída del pozo, limitando la posibilidad de error en la medición (el valor del pH es dependiente de la temperatura) al mantener todo el equipo a la temperatura de interés. Se registraron lecturas continuas (cada 2 minutos) hasta que el valor registrado no variaba, generalmente después de 10 o 15 minutos.

3.3.1.4. Potencial de oxidación reducción (Eh)

El potencial de oxidación reducción es una medida cualitativa pero puede ser de valor si se mide paralelamente el pH del agua subterránea. Lo anterior debido a que se tiene una herramienta adicional para la caracterización de las

condiciones físicas y químicas del agua subterránea, ya que algunas reacciones dependen del pH o del Eh por separado; sin embargo, algunas otras son función de ambos parámetros.

El potencial redox se determinó con un electrodo de tipo combinado, que consiste de filamento de platino y un electrodo de referencia (plata-cloruro de plata). El elemento sensible donde se realiza la transferencia de electrones es el filamento de platino por lo que se utilizaron electrodos nuevos recién verificados y pulidos periódicamente para evitar lecturas erróneas.

Para las mediciones se utilizó un equipo ESD (Engineered Systems & Design) modelo 64 realizándose verificaciones del sensor utilizando una solución ORP, 200-275 mV a 25 °C con valor promedio de 234 ± 2 mV para electrodos de oro y platino Hanna Instruments con fecha de caducidad 07/09.

La medición del potencial redox y los restantes parámetros de campo se realizó cada dos minutos hasta que las lecturas consecutivas se mantenían relativamente constantes. Es preciso realizar una conversión del valor medido en campo (E_o) mediante la siguiente fórmula; $E_h = E_o + 221.79 - 0.9286 * \text{Temp } ^\circ\text{C}$.

3.3.1.5. Oxígeno disuelto (OD)

La presencia de oxígeno disuelto en el agua subterránea normalmente indica exposición reciente de ésta a la influencia atmosférica pudiéndose interpretar como recarga. Una vez que la muestra es tomada, la reoxigenación puede ocurrir rápidamente que, como en el caso del Eh, las lecturas registradas pueden ser confiables solamente si las mediciones se llevan a cabo dentro de una celda de aislamiento (Lloyd et al., 1985).

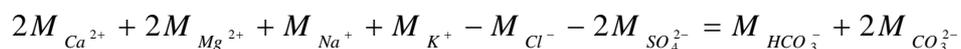
Se utilizó un aparato digital portátil modelo Ox25, serie 213, medidor de oxígeno disuelto/°C (mg/L, ppm y porcentaje(%)) marca Conductronic. El

sensor de oxígeno disuelto incorporado en el electrodo utilizado para las mediciones es polarográfico de tipo "Clark" con sensor y compensación integrada por temperatura. Una vez polarizado el electrodo, la calibración consistió en sumergir el electrodo en una solución libre de oxígeno (2 gramos de sulfito de sodio en 100 ml de agua destilada) ajustando la lectura a cero mg/L de oxígeno disuelto.

Posteriormente y una vez seco el electrodo, se calibró al aire manteniendo el sensor 1 centímetro arriba de la superficie de agua ajustando la lectura (calibración al aire) al valor correspondiente de acuerdo con la elevación sobre el nivel mar del sitio. Esta calibración se llevó a cabo diariamente al inicio de las operaciones durante la toma de la primera muestra del día, calibraciones subsiguientes se realizaron con calibración al aire únicamente. Una vez calibrado el sensor se introdujo en la celda de aislamiento efectuando diversas lecturas hasta que se identificó que los valores se estabilizaron en mediciones continuas realizadas cada dos minutos.

3.3.1.6. Alcalinidad

La alcalinidad de una muestra de agua es la suma de equivalentes de bases titulables con un ácido fuerte. La determinación de la alcalinidad es un importante procedimiento analítico para las muestras de agua subterránea. La ecuación de balance de cargas para un agua subterránea cercana a la neutralidad puede ser escrita como sigue:



En donde las especies conservativas y las no conservativas están agrupadas juntas. Los iones hidrogeno e hidroxilo han sido omitidos de la ecuación porque en el agua subterránea, sus molaridades son insignificantes comparadas a las otras especies iónicas. Otra especie que puede ser omitida es el CO_3^{2-} pues su concentración es despreciable también en aguas subterráneas cercanas a la

neutralidad. Por lo que la alcalinidad total es igual al lado derecho de la ecuación o a la molaridad del ión bicarbonato. Se considera el lado izquierdo de la ecuación como una cantidad conservativa puesto que la concentración de las especies iónicas no cambia con el pH (Kehew, 2001).

El método más exacto para la determinación de la alcalinidad es el llamado Titulación de Gran. El principio de este método es que pasado el punto donde todo el HCO_3^- ha sido convertido a H_2CO_3 ($\text{pH}=4.3$) la concentración de H^+ se incrementa linealmente con la cantidad de H^+ añadido. En la práctica, el volumen del ácido fuerte, en este caso H_2SO_4 , es graficado contra la función de Gran $F=(V+V_0)*10^{-\text{pH}}$ donde V es el volumen de ácido añadido y V_0 es el volumen de la alícuota.

El punto de equivalencia ($\text{pH}=4.3$) se obtiene extrapolando hasta el eje de las abscisas (figura 12). Las ventajas de este método son varias; primero, el punto de equivalencia no es necesario que sea determinado exactamente durante la titulación ya que es determinado por regresión lineal (Appelo y Postma 1996).

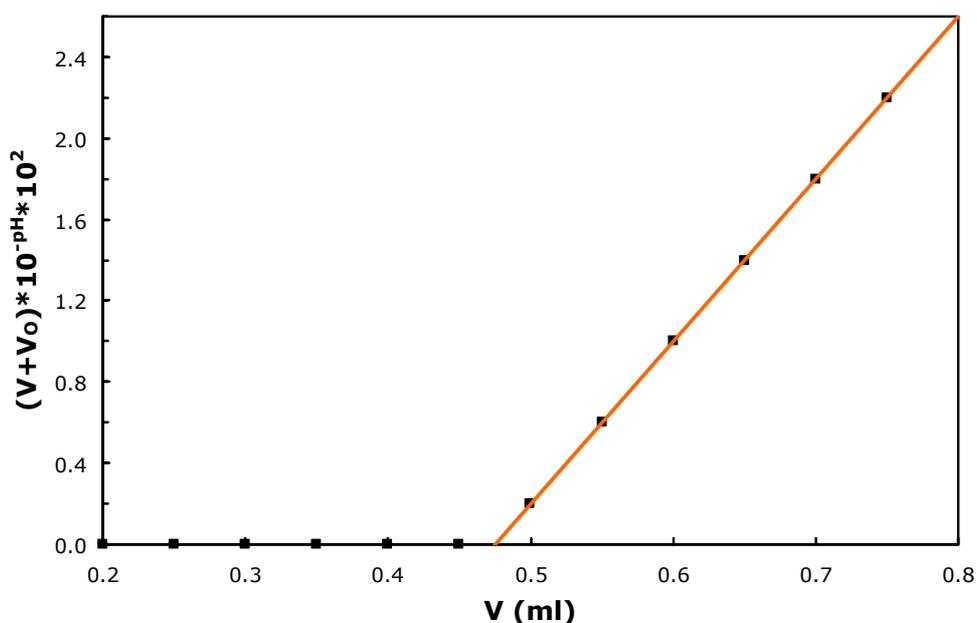


Figura 12 Gráfico del método de la titulación de Gran para la determinación de la alcalinidad (modificada de Appelo y Postma 1996)

Para la determinación de la alcalinidad se utilizó un titulador marca Hach modelo AL-DT con rango de medición de 10 a 4,000 mg/l, el cual consiste en una pistola graduada y ampolletas de H₂SO₄ 0.16 N. Se agregaron diferentes cantidades de ácido a una alícuota de 15 ml midiéndose inmediatamente el pH con el potenciómetro debidamente calibrado (figura 13). Obteniéndose de este modo lecturas de pH para diferentes cantidades de ácido añadidas (mínimo 3), para ser estos datos procesados y graficados en una hoja de cálculo EXCEL y así obtener el valor de la alcalinidad para cada muestra (figura 14).



Figura 13 Determinación de alcalinidad en campo por el método de Gran

PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD
POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

MUESTRA No. 104

ml(No de v/800)	0.1875	0.2888	0.2938	0.3000	0.3063	0.3125	0.3188
H ₂ SO ₄ vueltas	150	231	235	240	245	250	255
pH	5.82	4.36	4.2	4.01	3.86	3.76	3.69

pH	V H ₂ SO ₄ añadido	Función de Gran
5.82	0.1875	0.00230
4.36	0.2888	0.06674
4.2	0.2938	0.09650
4.01	0.3000	0.14952
3.86	0.3063	0.21129
3.76	0.3125	0.26610
3.69	0.3188	0.31277

V muestra= 15 ml
Normalidad H₂SO₄ = 0.1608 N
P. Equivalencia= 0.2827 ml
Alcalinidad Tot.= 151.51 mg/l CaCO₃
HCO₃⁻ = 184.84 mg/l

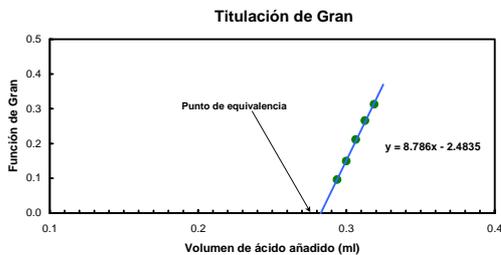


Figura 14 Procedimiento utilizado para la determinación de la alcalinidad por medio de la Titulación de Gran

Para realizar el procedimiento ilustrado se aplicaron las fórmulas siguientes;

Función de Gran;

$$F = (V + V_0) \cdot 10^{-\text{pH}}$$

V=volumen de muestra

V₀=volumen de ácido añadido

Y la alcalinidad total;

$$\text{Alcalinidad total} = [(\text{ml de ácido} \cdot N \text{ ácido}) \cdot 50\,000] / \text{Volumen de muestra}$$

En algunas ocasiones fue posible llegar al punto de equivalencia cuando se estaba titulando en campo (pH=4.3), por lo que no fue necesaria realizar la extrapolación. En el anexo 2, se presentan los procedimientos para el cálculo de la alcalinidad en los 109 aprovechamientos muestreados.

3.3.1.7. Nivel estático

La presión a la que está sujeta el agua subterránea dentro de un acuífero es mayor que la atmosférica debido al peso de la columna de agua sobre el sitio de referencia. Conforme se acerca a la superficie, la presión del fluido decrece puesto que la columna del fluido que se tiene encima también decrece. En algunas profundidades, que varían de un lugar a otro, la presión del fluido en los poros es igual a la presión atmosférica. La línea imaginaria en la cual la presión de poro es igual a la presión atmosférica se le llama nivel freático en los acuíferos libres (Fetter, 2001).

Si el agua subterránea se encuentra en una formación geológica cubierta por un estrato impermeable, el agua también se encuentra sometida a una presión mayor que la atmosférica. Si un pozo llega a penetrar la capa confinante, el agua subirá hasta alcanzar el nivel piezométrico y si ese nivel se encuentra por encima de la superficie del terreno, el pozo descargará como un pozo surgente. El nivel estático es la profundidad a partir del nivel del terreno a la que se encuentra la superficie del agua subterránea en un aprovechamiento que no

tiene la influencia de extracción de agua en él mismo o de otro cercano. Para su medición se requirió que el pozo no estuviera en operación por lo menos 2 horas antes de medirlo (figura 15). La sonda eléctrica utilizada fue marca Geosistemas SA, modelo GS-SPL8, que utiliza cable eléctrico del No 18, la sonda fue calibrada todos los días antes de la medición.



Figura 15 Medición del nivel estático en un aprovechamiento del área de estudio

3.3.2 Toma de muestras

La metodología utilizada en la toma de muestras de agua subterránea fue la establecida por Armienta et al., (1987). Se definió en primer lugar el volumen de muestra mínimo necesario para el análisis de las especies químicas, para lo cual se tuvo que consultar a las personas responsables de cada uno de los laboratorios a los cuales se mandaron analizar las muestras. El tipo de envase utilizado para el almacenamiento de las muestras fue de polietileno con tapa y contratapa.

Con la finalidad de evitar la contaminación de las muestras por sustancias alojadas en el interior de los envases, estos fueron lavados cada uno de ellos con jabón EXTRAN libre de fosfatos, enjuagándolos tres veces con agua corriente y luego fueron llenados con una solución de ácido clorhídrico al 10 % y fueron dejados de 10 a 12 horas. Después se enjuagaron 3 veces con agua

destilada, empleando aproximadamente 1/3 del volumen de la botella y antes de tomar la muestra, el envase fue enjuagado 3 veces con agua del aprovechamiento a muestrear.

Los volúmenes requeridos fueron de 500 ml para aniones; 125 ml para la determinación de cationes haciendo pasar la muestra por una membrana de celulosa con aberturas de diámetro nominal de 0.45 μ micras (figura 16) con el objetivo de remover la mayoría de las bacterias, partículas suspendidas y una buena porción de hidróxidos de hierro y magnesio coloidales utilizándose HNO_3 como conservador, cuyo objetivo es evitar la precipitación de metales disminuyendo el pH a menos de 2 unidades. En una botella de 125 ml de capacidad, se tomó la muestra para la determinación de nitrato filtrándose igual que la anterior y utilizando como agente conservador H_2SO_4 con la finalidad de limitar la acción bacteriana en el interior del frasco, ambos ácido eran ultra puros (figura 17); la muestra para la cuantificación de ^{18}O y ^2H se tomó en un recipiente de 60 ml, en estos últimos dos no se requirió filtrado ni uso de conservador. La información de la muestra es resumida en la tabla 11. Cabe mencionar que los recipientes fueron llenados completamente evitando la permanencia de burbujas en el interior.



Figura 16 Proceso de filtrado en campo (izquierda), equipo de filtración utilizado (derecha-abajo) y filtro utilizado (derecha-arriba)



Figura 17 Adición de HNO_3 como conservador a la muestra (izquierda) y conservadores utilizados (derecha)

Tabla 11 Información del tipo de conservador utilizado para las muestras colectadas en el área de estudio

MUESTRA PARA	TIPO DE ENVASE	CANTIDAD	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA
Aniones	Polietileno	1	500 ml	No	No
Cationes	Polietileno	1	125 ml	HNO_3	Si
Nitrato	Polietileno	1	125 ml	H_2SO_4	Si
^{18}O y ^2H	Polietileno	1	60 ml	No	No

Todas las muestras fueron debidamente etiquetadas con el número y clave de estación, fecha, hora, tratamiento (si lo tenía) y el nombre de los análisis para las que fueron tomadas (figura 18).

Una vez que se tomaban las muestras fueron llevadas lo más rápidamente posible a los respectivos laboratorios para su análisis (2 días como máximo), de este modo se buscó limitar los cambios que pudieran presentarse en la muestra. Antes de ser transportadas al laboratorio, las muestras se mantuvieron en un lugar oscuro, con temperatura controlada a 4 °C para inhibir la actividad bacteriana en el seno del líquido.



Figura 18 Muestras tomadas en cada uno de los aprovechamientos

3.4. Análisis de laboratorio

Diversas especies químicas fueron cuantificadas para poder cubrir los objetivos de este estudio. A continuación se menciona la técnica y el lugar en el cual fueron realizados los diversos análisis de las muestras colectadas.

Los metales mayoritarios (Na, Ca, K y Mg) y los metales traza (Li, Sr, Fe y Mn) fueron analizados en un espectrofotómetro de absorción atómica (NMX-AA-051-SCFI-2001) Perkin-Elmer AA-5100 utilizando material de referencia certificado para cada uno de los elementos que se determinaron marca Fisher Chemical, realizado en el laboratorio de Industrial Minera México.

En la espectrometría de absorción atómica se dirige un rayo luminoso a través de una llama a un monocromador y sobre un detector que mide la cantidad de luz absorbida por el elemento atomizado en la llama. La cantidad de energía absorbida en la llama a una longitud de onda característica es proporcional a la concentración del elemento en la muestra, en un intervalo de concentraciones limitado. El espectrómetro utilizado consiste en una fuente luminosa que emite el espectro de líneas de un elemento (lámpara de cátodo hueco), un dispositivo para vaporizar la muestra (normalmente una llama), medio de aislamiento de

la línea de absorción (monocromador y rejilla ajustable) y un detector fotoeléctrico de amplificación y medida asociado. Como cada metal tiene su propia longitud de onda de adsorción característica se utiliza como fuente luminosa una lámpara del mismo elemento; esto proporciona un método relativamente libre de interferencias espectrales o de radiación.

El V, Mn, Co, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Sb y Pb fueron analizados en el Laboratorio ICP-MS. Instituto de Geofísica. UNAM, con un Espectrómetro de Masas modelo PQ3 de marca VGEElemental, utilizando los estándares internacionales SLRS-4 y NIST 1640. Técnicamente, una fuente de plasma de acoplamiento inductivo consiste en una corriente de flujo de gas argón ionizado por aplicación de un campo de radiofrecuencia típicamente oscilantes a 27.1 MHz. Este campo esta acoplado inductivamente al gas ionizado por una bobina refrigerada con agua que rodea a una lámpara de cuarzo que soporta y confina el plasma. En un apropiado nebulizador y cámara de pulverización se genera un aerosol de la muestra que se lleva al plasma a través de un tubo inyector colocado dentro de la lámpara. El aerosol de la muestra se inyecta directamente en el plasma de acoplamiento inductivo, que somete a los átomos que lo componen a temperaturas de aproximadamente 6,000 y 8,000 °K. Debido a ello, tiene lugar una disociación de moléculas casi completa, consiguiéndose una reducción significativa de interferencias químicas.

La eficaz excitación proporcionada por el plasma de acoplamiento inductivo da lugar a bajos límites de detección para muchos elementos (tabla 12). Esto, unido al extenso recorrido dinámico, permite una determinación multielemental eficaz de metales. La luz emitida por el plasma de acoplamiento inductivo se enfoca sobre la rejilla de entrada de un monocromador o policromador que efectúa la dispersión. Se utiliza una rejilla de salida alineada con precisión para aislar una parte del espectro de emisión, para medida de la intensidad empleando un tubo fotomultiplicador.

Tabla 12 Límites de detección de los elementos analizados en el Espectrómetro de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo

Elemento	Límite de detección (µg/L)
V	0.1
Mn	0.1
Co	0.005
Cu	0.2
Zn	0.5
As	0.03
Se	0.2
Mo	0.1
Cd	0.01
Sb	0.01
Pb	0.01

En el laboratorio de Análisis de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería perteneciente a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, se llevaron a cabo los siguientes análisis químicos:

El ión cloruro fue determinado por el método Argentométrico (NMX-AA-073-SCFI-2001) el cual se basa en una valoración con nitrato de plata utilizando como indicador cromato de potasio. La plata reacciona con los cloruros para formar un precipitado de cloruro de plata de color blanco. En las inmediaciones del punto de equivalencia al agotarse el ión cloruro, empieza la precipitación del cromato. La formación de cromato de plata puede identificarse por el cambio de color de la disolución a anaranjado-rojizo así como en la forma del precipitado. En este momento se da por terminada la valoración.

El fluoruro se cuantificó por el método Espectrofotométrico (NMX-AA-077-SCFI-2001) cuyo principio se basa en la reacción entre los iones fluoruro y el complejo colorido de Zirconilo-SPADNS. Este método cubre la determinación de fluoruros en un intervalo de 0 a 1.4 mg F-/L. El fluoruro reacciona con el Zirconilo del complejo Zr-SPANDS formando otro anión complejo incoloro (ZrF6²⁻). Al aumentar el contenido de fluoruro, la intensidad del color disminuye. Siendo por lo tanto la absorbancia inversamente proporcional a la

concentración de fluoruros. La reacción se lleva a cabo en medio ácido. La selección del colorante para este método rápido está regida en gran parte por la tolerancia a esos iones.

El contenido de sulfato fue determinado mediante el método Turbidimétrico (NMX-AA-074-1981) cuyo principio es que el ión sulfato precipita con cloruro de bario, en un medio ácido (HCl), formando cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme. La absorción espectral de la suspensión del sulfato de bario se mide con un nefelómetro o fotómetro de transmisión. La concentración de ión sulfato se determina por comparación de la lectura con una curva patrón.

El concentración del ión nitrato fue cuantificado mediante el método de Sulfato de Brucina (NMX-AA-079-1986) la cual es un complejo que reacciona con los nitratos bajo condiciones ácidas y temperatura elevada para producir un complejo de color amarillo. Generalmente las muestras deben ser diluidas para obtener una concentración de nitrógeno de nitratos en el intervalo de concentraciones de 0.1 a 1.0 mg/L. La intensidad del color desarrollado es función del tiempo y la temperatura; ambos factores deben ser cuidadosamente controlados.

Los sólidos totales disueltos se determinaron de acuerdo a la NMX-AA-034-SCFI-2001 mediante el método Gravimétrico y cuyo principio esta basado en la medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas; así como, la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales y residuales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no, en su caso, a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de éstos.

La alcalinidad se determinó mediante el método Volumétrico basado en Alcalinidad y Acidez NMX-AA-036-SCFI-2001 y está basado en la medición de la acidez o alcalinidad en el agua por medio de una valoración de la muestra empleando como disolución valorante un álcali o un ácido según sea el caso de concentración perfectamente conocida.

Un elemento químico tiene uno o varios isótopos, de los cuales, todos, algunos o ninguno puede ser estable. Con estable se hace referencia que no decaen con el tiempo. En hidrogeología, los isótopos estables del agua (^2H y ^{18}O) son de interés como trazadores naturales del origen del agua subterránea entre muchos otros procesos. El equipo utilizado para la cuantificación de isótopos estables tiene como principio básico el desarrollado por Alfred Nier en 1940, siendo él quien inventó el primer espectrómetro de masas con doble entrada, colector doble y una fuente de gas. El colector doble permite la medición simultánea de dos isótopos y la doble entrada permite la medición de una muestra y un estándar alternadamente en las entradas. La espectrometría de masas de gas helio se ha convertido en la técnica de cuantificación preferida para la determinación de relaciones isotópicas de la mayoría de los elementos ligeros (C, H, O, N y S) debido a su relativa simplicidad y al uso de estándares internacionales que permiten la comparación de bases de datos de diferentes laboratorios.

Un quemador de iridio recubierto de tungsteno dentro de la cavidad ioniza a un flujo laminar de gas que entra a la fuente de vacío. Las moléculas de gas son despojadas de un electrón produciendo iones positivos por ejemplo CO_2 los cuales son entonces acelerados a través de un gradiente de voltaje y dirigidos dentro de la trayectoria de un tubo en la salida superior de la fuente. La eficiencia de la ionización varía entre 0.01 y 0.1% para diferentes instrumentos. El haz de iones se dirige conforme pasa a través de un campo magnético instalado a lo largo del tubo. Aquí el haz se separa en un espectro de masas de acuerdo a los isótopos presentes. Cada haz de masa continúa su recorrido a los detectores iónicos donde los colectores Faraday preestablecidos miden cada corriente de iones. Mediante la colecta simultánea de dos o tres haces de iones las corrientes de iones pueden ser expresadas como relación de masas por ejemplo el CO_2 contribuiría con tres picos principales masa 44 ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$), masa 45 ($^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ o $^{12}\text{C}^{17}\text{O}^{16}\text{O}$) y masa 46 ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$). Un sistema de doble entrada permite al espectrómetro de masas medir proporciones alternadamente en la muestra y un estándar de laboratorio.

En este caso los isótopos que se cuantificaron fueron el $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, los cuales fueron medidos en un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas (Finnigan Delta S) en el Laboratorio de Geoquímica de la Universidad de Arizona. Para el hidrógeno, las muestras fueron reaccionadas a 750 °C con metal cromo usando un dispositivo Finnigan H acoplado al espectrómetro de masa. Para oxígeno, las muestras fueron equilibradas con gas CO_2 a aproximadamente 15 °C en un dispositivo equilibrador automático acoplado al espectrómetro de masas. La estandarización esta basada en los materiales de referencia VSMOW y SLAP.

La precisión para el $\delta^2\text{H}$ es de 0.9 ‰ o menor y de 0.08 ‰ o menor para el $\delta^{18}\text{O}$ en base a las repeticiones de estándares internos.

3.5. Trabajo de gabinete

Dentro de la elaboración de este trabajo de tesis se utilizó una gran variedad de programas de computación para el manejo de bases de datos, elaboración de mapas, gráficas y figuras, cálculo de parámetros estadísticos, químicos, etc. A continuación se hace una breve descripción de cada uno de ellos;

- Autocad 2006. Este programa permitió la elaboración de un mapa base, fisiografía, hidrología y geología del área de estudio. Todos los mapas generados fueron georeferenciados con este mismo programa.
- Microsoft Office Excel 2003. Se utilizó para aplicaciones numéricas que son apropiadas para el análisis orientado a renglón y columna; así como, para la relación con otras hojas de cálculo. Otra ventaja que permitió la hoja de cálculo fue el uso de fórmulas para realizar cálculos, la elaboración de gráficas, mejor presentación de la información y la creación de bases de datos utilizadas como de entrada para otros programas de cómputo.
- Aquachem 4.0. Fue utilizado para el manejo efectivo y análisis de datos relacionados con la calidad química del agua subterránea y para la

creación de diversas gráficas incluyendo Piper, Durov, Stiff, Wilcox e índices de saturación.

- Surfer V8. Se utilizó para la creación de vectores, reelevamientos sombreados, imágenes y mapas 3D. La creación de todo lo anterior nos permitió modelar los datos e identificar tendencias y patrones.
- Phreeqc Interactive 2.8. Por medio de este programa se realizó la especiación química de las muestras, el cálculo de actividad y coeficientes de actividad, índices de saturación y el modelado geoquímico inverso del área de estudio.
- Statistica 6.0. Se utilizó para todo el análisis estadístico presentado en este trabajo.
- Corel Draw 12. Fue utilizado para mejorar mapas, gráficas y figuras elaboradas en otros programas.

4. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA E IDENTIFICACIÓN DE ZONAS AFECTADAS POR CONTAMINACIÓN (ANTRÓPICA/NATURAL)

Sin duda alguna, el agua es el solvente más abundante y es capaz de incorporar gran cantidad de sustancias al estar en contacto con los terrenos por los cuales circula.

Las aguas subterráneas tienen una mayor oportunidad de disolver materiales por las mayores superficies de contacto, lentas velocidades de circulación, presión y temperatura (mayores) a las que están sometidas y facilidad de disolver CO₂ del suelo no saturado. Por ello, sus concentraciones salinas son superiores a las de las aguas superficiales en general.

La calidad de un agua queda definida por su composición y el conocimiento de los efectos que puede causar cada uno de los elementos que contiene o el conjunto de todos ellos, permite establecer las posibilidades de uso, clasificando así, de acuerdo con límites estudiados, su destino para bebida, usos agrícolas, industriales, etc (Catalán, 1981).

Cabe considerar la calidad natural de un agua y la calidad afectada por actividades humanas (factores antrópicos), que en general lleva a una degradación (polución y contaminación) (Custodio, 1996). El termino contaminación Price (2003) lo describe refiriéndose a un problema de tipo local o que se relaciona con un incidente concreto o específico, y polución a un problema que se encuentra ampliamente distribuido.

Aunque la mayoría de los aprovechamientos donde se recolectaron las muestras de agua subterránea no son utilizados para uso potable (sólo 14 de los 109 muestreados), es importante la evaluación de todos los aprovechamientos para poder tener un parámetro de referencia físico-químico

y así poder determinar zonas apropiadas para el establecimiento de aprovechamientos de agua potable en la región.

La tabla 13 muestra el tipo y el número de aprovechamientos muestreados y la figura 19, la distribución espacial de éstos; así como, también el número de muestra que les corresponde a cada uno.

Tabla 13 Tipo y número de aprovechamientos muestreados

Tipo de aprovechamiento	Cantidad
Pozo	78
Noria	16
Manantial	15
Total	109

Para la mejor comprensión de la distribución espacial de las especies químicas fue necesario identificar la dirección del flujo subterráneo en el área de estudio. Se utilizaron los niveles estáticos medidos en campo durante la campaña de muestreo y la elevación sobre el nivel del mar de cada uno de los aprovechamientos en los cuales fue posible la medición de dicho nivel. La elevación sobre el nivel del mar de cada uno de los aprovechamientos fue determinada con la ayuda de un Grid de la zona de estudio. En el programa Surfer, fueron ubicadas las coordenadas (X y Y) de cada uno de los aprovechamientos y de esta manera se obtuvo la altura (Z) sobre el nivel del mar. La carga hidráulica fue determinada mediante la diferencia de la altura media sobre el nivel del mar y el nivel estático, dichos valores fueron configurados en el programa Surfer para obtenerse de este modo, las direcciones de flujo mostradas en la figura 20. Como plano de referencia fue tomado el nivel del mar. Cabe añadir que para la construcción de las líneas de dirección de flujo, se supuso que éstas son perpendiculares a las líneas equipotenciales.

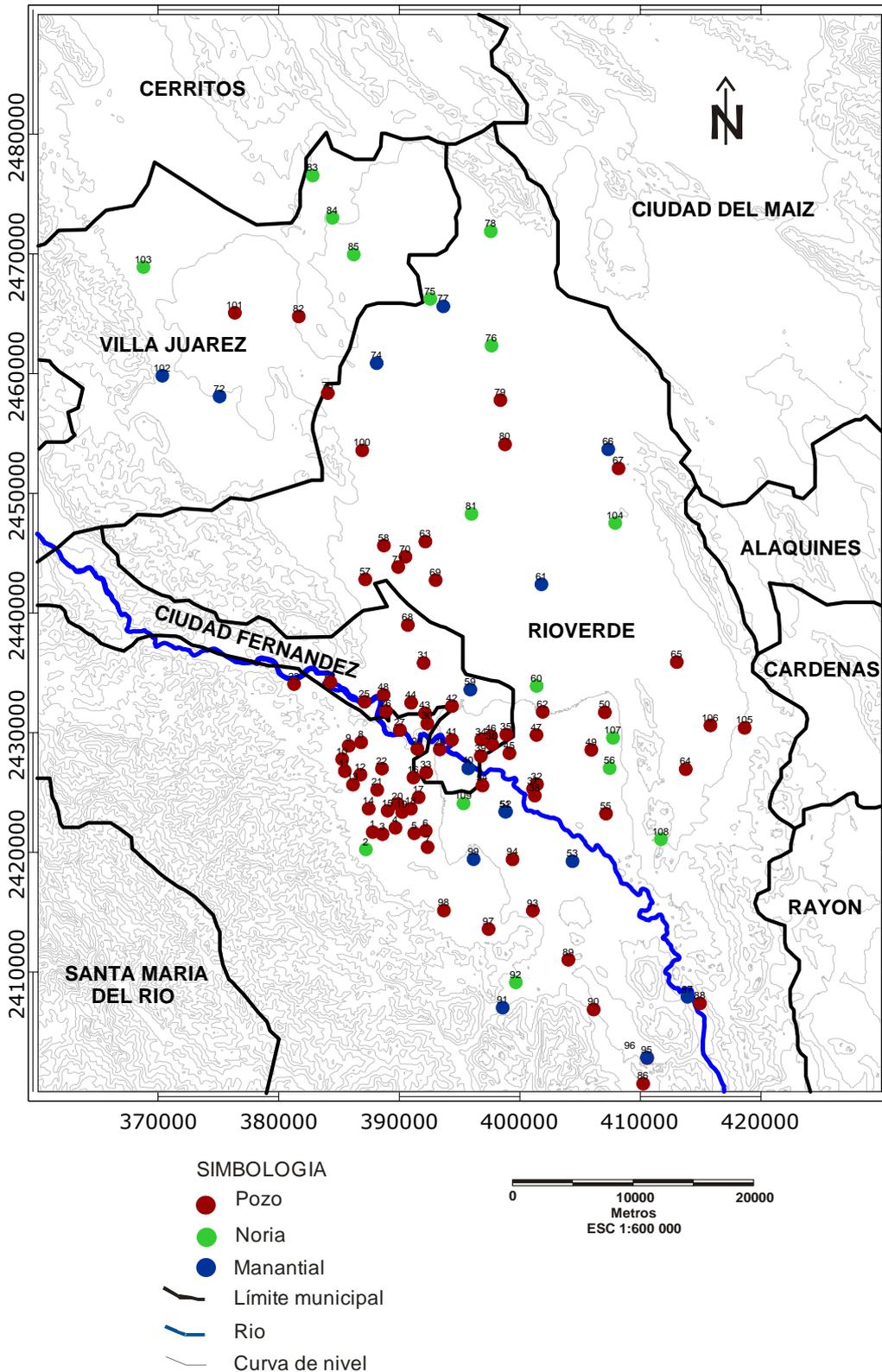


Figura 19 Distribución de aprovechamientos hídricos donde se tomaron muestras de agua subterránea

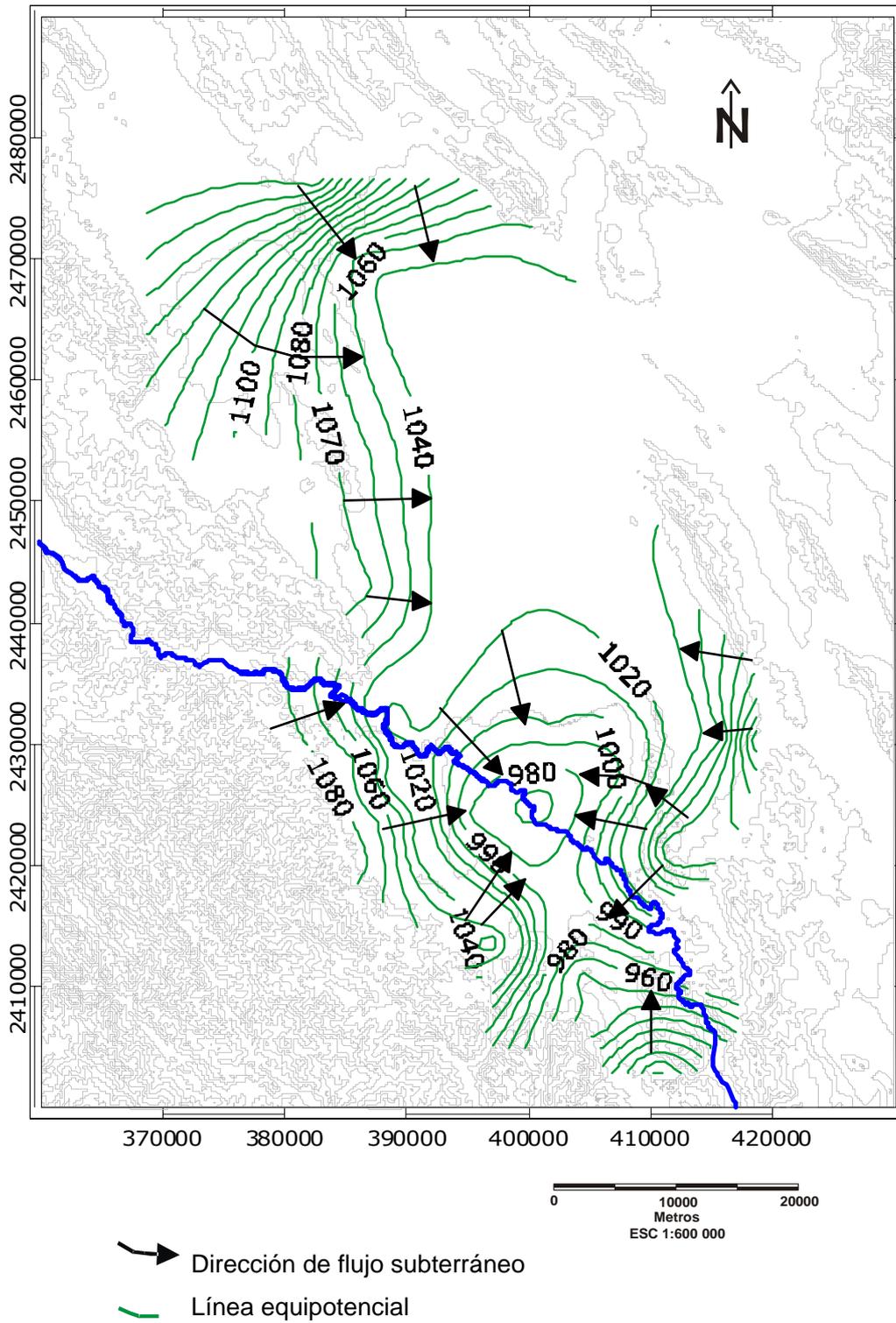


Figura 20 Dirección del flujo del agua subterránea en el área de estudio

4.1 Calidad de agua para uso potable

Agua natural y buena calidad no son sinónimos, ya que en algunos casos el agua puede ser de muy baja calidad, e incluso tóxica (Custodio, 1996).

El estudio de la calidad del agua destinada a ser consumida por el hombre ha sido, y es, de primordial importancia, interviniendo en el mismo muchos factores que pueden afectarla, ya sea de una manera inmediata o diferida.

De modo general, se denomina potable a aquella que puede ser consumida por el hombre sin peligro alguno para su salud. Ello supone tener en cuenta las distintas características del agua, ya sean físicas, químicas, bacteriológicas, etc., definiendo criterios de calidad para cada una de ellas.

Para poder evaluar la potabilidad del agua subterránea en el área de estudio, los resultados de las determinaciones analíticas y parámetros de campo fueron comparados con los límites permisibles establecidos por la Secretaria de Salud en la NOM-127-SSA1-1994 (tabla 14), la cual controla la calidad del agua para consumo y uso humano.

Para mostrar e interpretar la información generada se utilizaron planos de isovalores, lo cual permitió representar los datos de manera espacial. Lo anterior se realizó con ayuda del programa SURFER versión 8.0 utilizando un método de interpolación llamado krigging con un variograma de tipo lineal. El krigging es un método geoestadístico el cual es útil para representar tendencias de acuerdo con la distribución de la información de interés. Cabe señalar que las características químicas mostradas en las configuraciones hechas son una representación de las tendencias generales, es decir, no son útiles para deducir las concentraciones en otros puntos que no sean los aprovechamientos donde se tomaron las muestras.

Tabla 14 Límites permisibles para calidad de uso potable (NOM-127-SSA1-1994)

LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS			
CARACTERÍSTICA		LÍMITE PERMISIBLE	
Organismos coliformes totales		2 NMP/100 ml; 2 UFC/100 ml	
Organismos coliformes fecales		No detectable NMP/100 ml; Cero UFC/100 ml	
Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml (número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 ml (unidades formadoras de colonias por 100 ml), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.			
LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ORGANOLÉPTICAS			
Color		20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto	
Olor y sabor		Agradable	
Turbiedad		5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método	
LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS			
(Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad)			
CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE	CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.2	pH (unidades de pH)	6.5-8.5
Arsénico*	0.05*	Aldrín y dieldrín	0.03 (µg/l)
Bario	0.7	Clordano (total de isómeros)	0.30 (µg/l)
Cadmio	0.005	DDT (total de isómeros)	1.00 (µg/l)
Cianuros (como CN-)	0.07	Gamma-HCH (lindano)	2.00 (µg/l)
Cloro residual libre	0.2-1.50	Hexaclorobenceno	0.01 (µg/l)
Cloruros (como Cl-)	250	Heptacloro y epóxido de	0.03 (µg/l)
Cobre	2	Metoxicloro	20.00 (µg/l)
Cromo total	0.05	2,4 – D	50.00 (µg/l)
Dureza total (como CaCO ₃)	500	Plomo	0.025
Fenoles o compuestos	0.001	Sodio	200
Fierro	0.3	Sólidos disueltos totales	1000
Fluoruros (como F-)	1.5	Sulfatos (como SO ₄ =)	400
Manganeso	0.15	Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.5
Mercurio	0.001	Trihalometanos totales	0.2
Nitratos (como N)	10	Zinc	5
Nitritos (como N)	0.05	Nitrógeno amoniacal (como N)	0.5

* Por modificaciones a la norma, para el año 2005 el límite permisible es 0.025 mg/L

La tabla 15 muestra los parámetros de la NOM-127-SSA1-1994 que son rebasados para cada uno de los aprovechamientos donde se colectaron muestras de agua subterránea.

CAPÍTULO 4. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA E IDENTIFICACIÓN
DE ZONAS AFECTADAS POR CONTAMINACIÓN (ANTRÓPICA/NATURAL)

Tabla 15 Parámetros que rebasan el límite máximo permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994 en cada uno de los aprovechamientos del área de estudio

Clave del aprovechamiento	Parámetros rebasados de la NOM-127-SSA1-1994	Clave del aprovechamiento	Parámetros rebasados de la NOM-127-SSA1-1994
5 RV	SO ₄ ²⁻ , Fe,	62 RV	Dureza total, Fe, SO ₄ ²⁻ , F, STD
12 RV	N-NO ₃	63 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F, STD, Mn
15 RV	N-NO ₃	65 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Na, STD, As, Cl
18 RV	N-NO ₃	66 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD
20 RV	N-NO ₃	67 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻
21 RV	N-NO ₃ , Dureza total,	68 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD
26 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ ,	69 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD
27 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Fe	70 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD
28 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD,	71 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD, Cl
29 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Fe, STD	72 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD
30 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Fe, STD	73 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD
31 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F, STD	74 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD
32 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Na, F, STD	75 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD
33 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ ,	76 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD
34 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD,	77 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD
35 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F, STD	78 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD, As
36 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Na, F, STD	79 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD
37 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Na, F, STD	80 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD
38 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Na, F, STD	81 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD
39 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD,	82 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD
40 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD,	83 RV	Dureza total, N-NO ₃ , SO ₄ ²⁻ , STD, As
41 RV	Dureza total, N-NO ₃ , SO ₄ ²⁻ , F, STD	84 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Na, STD, As
42 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Na, F, STD	85 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD, Mn, As
43 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Na, STD	87 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F
44 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD, Pb	88 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F, STD
45 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Na, STD, Mn	89 RV	Dureza total, Fe, SO ₄ ²⁻ , F, STD
46 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F, STD	90 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻
47 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F, STD	91 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻
48 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD,	92 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F
49 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F, STD	93 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Fe, F, Mn
50 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F, STD	94 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F
51 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD,	95 RV	Fe
52 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , STD,	96 RV	Fe
53 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ ,	97 RV	Fe, N-NO ₃
54 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ ,	98 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F, STD
55 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Na, F, STD, Cl	100 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Fe, F, STD
56 RV	Dureza total, N-NO ₃ , SO ₄ ²⁻ , Na, F, STD, Cl	101 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Fe, F, STD, Mn
57 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F, STD	102 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Cd
58 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F, STD	103 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻
59 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F, STD	104 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , F, STD
60 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Na, F, STD	107 RV	Dureza total, Fe, SO ₄ ²⁻ , F, STD
61 RV	Dureza total, Fe, SO ₄ ²⁻ , F, STD	109 RV	Dureza total, SO ₄ ²⁻ , Na, F, STD, As, Mn

4.1.1 Evaluación en relación a características

químicas

4.1.1.1 Elementos mayores

En base a los parámetros y límites máximos permisibles estipulados en la NOM-127-SSA1-1994, los resultados de las muestras colectadas en el área de estudio (Rioverde, Ciudad Fernández y Villa Juárez) señalan que el límite permisible es rebasado con respecto a los siguientes parámetros químicos:

Cloruro

El origen de los cloruros en las aguas es debido al intercambio con mares actuales o antiguos. Actualmente son causas de salinidad la contaminación de las aguas dulces por agua de mar, el lavado de terrenos salados de origen marino o el llegar a la superficie del suelo sales, por capilaridad, que posteriormente pasan al agua. La disolución de rocas, principalmente evaporíticas, es otra fuente de cloruros.

A veces puede haber un incremento esporádico del contenido de cloruros como consecuencia de poluciones, en particular procedentes de la orina del hombre y de animales, que contiene por término medio 5 gr/L del ión cloruro. El aumento de cloruros puede ser motivado por ciertos desechos industriales y aguas negras (Catalán,1981).

Este elemento rebasa el límite máximo permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994, que es de 250 mg/L, en 4 aprovechamientos dentro del área de estudio las cuales equivalen al 5 % del total. El máximo valor encontrado es de 585.2 mg/L.

La distribución espacial de los aprovechamientos que rebasan este elemento mayor en el área de estudio se muestra en la figura 21. Más específicamente los 4 aprovechamientos que rebasan la concentración de cloruro establecida

por la Secretaría de salud son; 55RV en la localidad del El potrero La Bomba, el 56RV en el Ejido La Boquilla, el 65RV en la localidad denominada San Francisco y el aprovechamiento 71RV ubicado en el Rancho La Concepción, los Cuatro pertenecientes al municipio de Rioverde.

Hasta el momento no se puede establecer claramente la fuente de los cloruros en el área de estudio, puesto que no se reporta en estudios geológicos la presencia de halita en la región. Es más probable que la fuente de este elemento sea debido al aporte de sales al subsuelo.

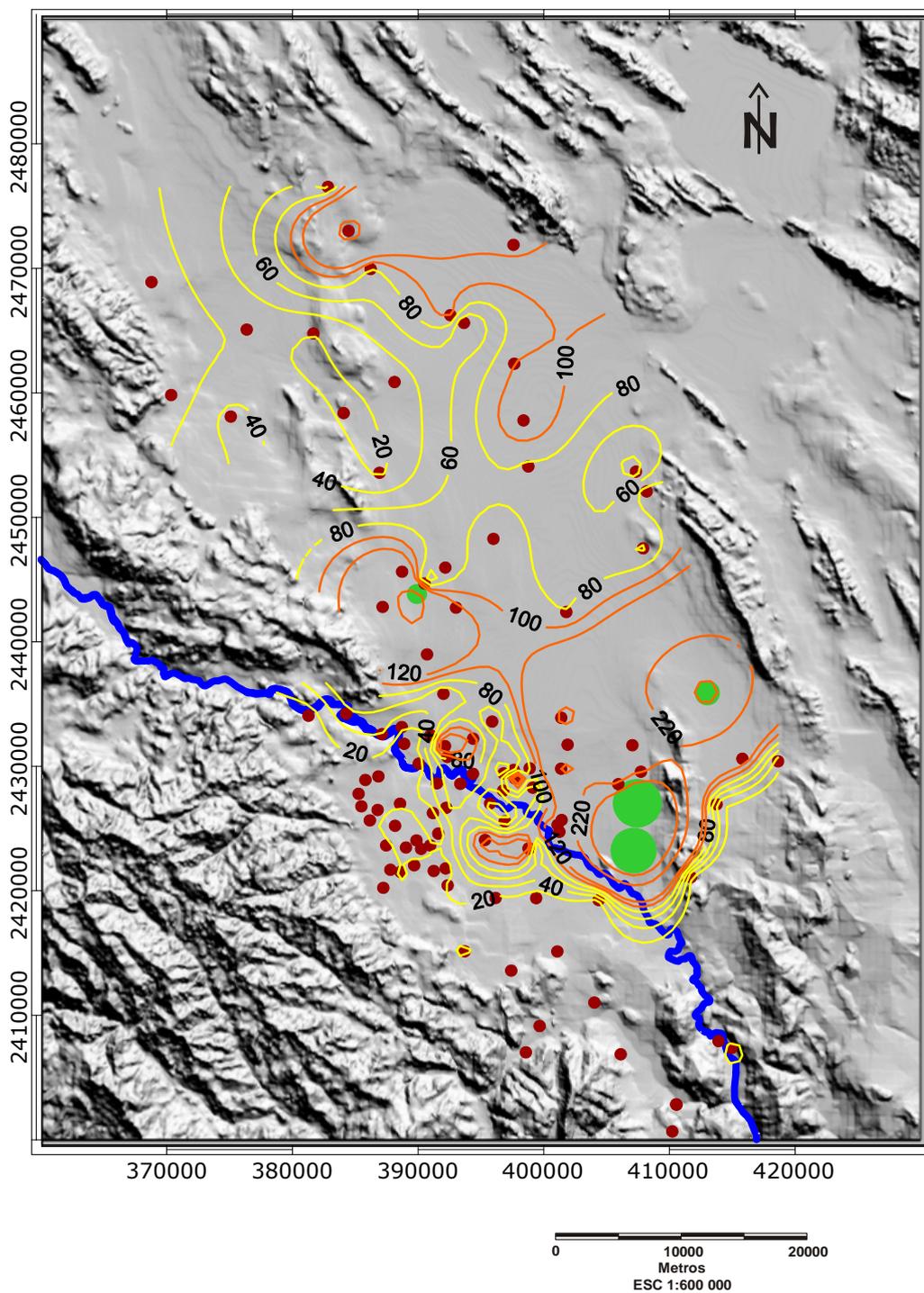
Con respecto a la cantidad de cloruros en el agua destinada a la bebida Catalán (1981) menciona que un agua que contiene unos 400 mg/L de cloruro sódico no tiene gusto salino, manifestándose este a partir de los 500 mg/L. El grave inconveniente que presentan los cloruros es el sabor desagradable que dan al agua.

Dureza total

La dureza total es la suma de los iones que pueden precipitar del agua como partículas duras y se obtiene sumando las concentraciones Ca^{2+} y Mg^{2+} . Este parámetro es expresado como mg/L de CaCO_3 (Appelo y Postma 1996).

El límite permisible para este parámetro establecido en la NOM-127-SSA1-1994 es de 500 mg/L de CaCO_3 . En el área de interés, el 70% de las muestras rebasan este parámetro. El valor máximo encontrado fue de 3,971.1 mg/L de CaCO_3 .

La distribución espacial de la dureza total dentro del área de estudio se muestra en la figura 22. Las muestras que pertenecen al municipio de Villa Juárez rebasan en su totalidad este parámetro en relación con la NOM-127-SSA1-1994; así como, también la mayoría de las muestras localizadas en el margen izquierdo del Río Verde exceptuando las que se encuentran localizadas cerca de la localidad de Santa Rita.



- No rebasan la NOM-127-SSA1-1994
- Rebasan la NOM-127-SSA1-1994
El tamaño de los círculos es proporcional a la concentración

Figura 21 Distribución espacial de muestras que rebasan y que no rebasan el límite permisible en relación al cloruro (en mg/L) en el área de estudio

En el margen derecho del río rebasan este parámetro los aprovechamientos localizados en las inmediaciones de las cabeceras municipales de los municipios de Rioverde y Ciudad Fernández; así como, también en los aprovechamientos cercanos a las localidades de San Marcos y el Carmen pertenecientes al municipio de Rioverde.

Tres aprovechamientos que son utilizados para consumo humano rebasaron este parámetro. Uno de ellos se encuentra en el municipio de Villa Juárez en la localidad llamada Progreso con 1,384 mg/L de CaCO_3 otro en el Ejido San José del Tapanco con 1,218 mg/L de CaCO_3 y el que se encuentra en el Ejido San Sebastián con 1,562 mg/L de CaCO_3 , ambos en el municipio de Rioverde.

Hem (1985) en su libro cita a Durfor y Becker (1964, p.27) quienes clasifican el agua en relación a la dureza de la siguiente manera; de 0-60 mg/L de CaCO_3 es clasificada como blanda, de 61-120 mg/L de CaCO_3 como moderadamente dura, de 121-180 mg/L de CaCO_3 como dura y con concentraciones mayores a 180 mg/L de CaCO_3 es catalogada como agua muy dura. De acuerdo a la clasificación anterior el agua subterránea del área de estudio es clasificada como agua dura a muy dura.

Debido a la dureza excesiva de muchas aguas, diariamente se desperdician en el mundo toneladas de jabón, detergente en las industrias de lavado y agua para usos domésticos.

Se ha demostrado que la dureza del agua tiene un efecto tampón sobre los metales traza, disminuyendo su toxicidad. Igualmente la dureza disminuye el riesgo de las enfermedades cardiovasculares y de otras enfermedades. Su origen se debe a la presencia en una mayor proporción a los carbonatos (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y anhidrita (CaSO_4) (Catalán, 1981).

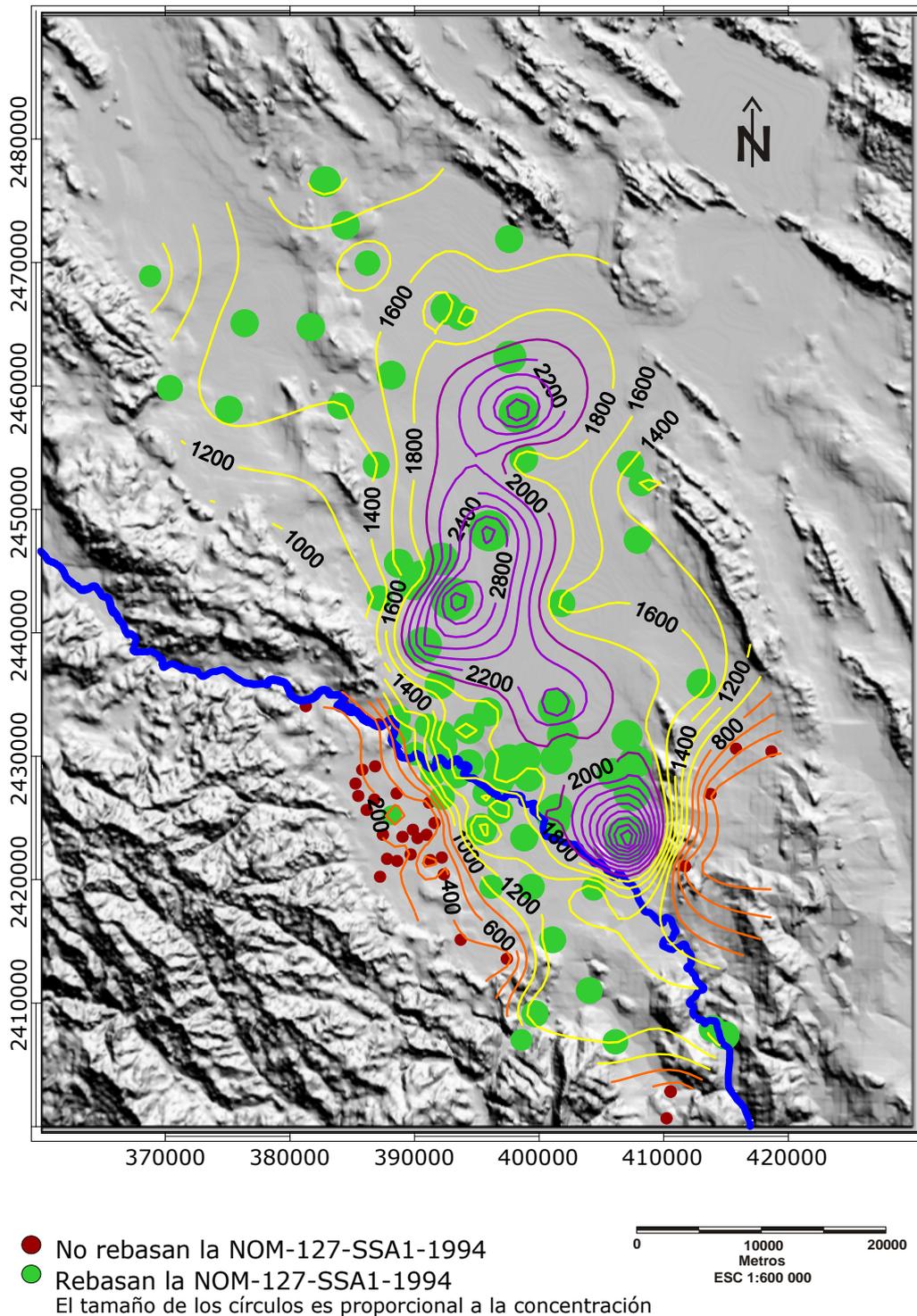


Figura 22 Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación a la dureza total (en mg/L de CaCO_3) en el área de estudio

Sulfato

El ión sulfato es uno de los iones que contribuyen a la salinidad de las aguas, encontrándose en la mayoría de las aguas naturales. El origen de los sulfatos es debido principalmente a la disolución de yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

En el área de estudio la concentración máxima encontrada es de 5,000 mg/L. El 70% de los aprovechamientos muestreados en el área de interés presentan concentraciones por encima del límite permisible establecido por la Secretaría de Salud (400 mg/L). La distribución espacial de las muestras que rebasan este parámetro se muestra en la figura 23. En general los aprovechamientos en los cuales el sulfato es mayor al límite permisible es muy semejante a la distribución que presentó la dureza total en el área de interés. Los tres aprovechamientos utilizados para consumo humano que rebasaron el parámetro anterior también rebasaron el límite máximo permisible de sulfato en el agua, además del ubicado en el Potrero El Canal del municipio de Rioverde.

El origen del ión sulfato en el agua subterránea está asociado con la disolución de yeso y/o anhidrita. La concentración del ión sulfato en las aguas de bebida ha sido motivo de atención debido a su acción catártica, habiéndose encontrado que las aguas que contienen menos de 600 mg/L son buenas, mostrando un efecto laxante las aguas que contienen más de 750 mg/L (Catalán, 1981).

Sólidos totales disueltos (Salinidad)

Los sólidos totales disueltos hacen alusión a materia suspendida o disuelta en el agua (Catalán, 1981).

El valor de los sólidos totales disueltos para realizar la configuración fue el obtenido en las mediciones de campo y la distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible se muestran en la figura 24.

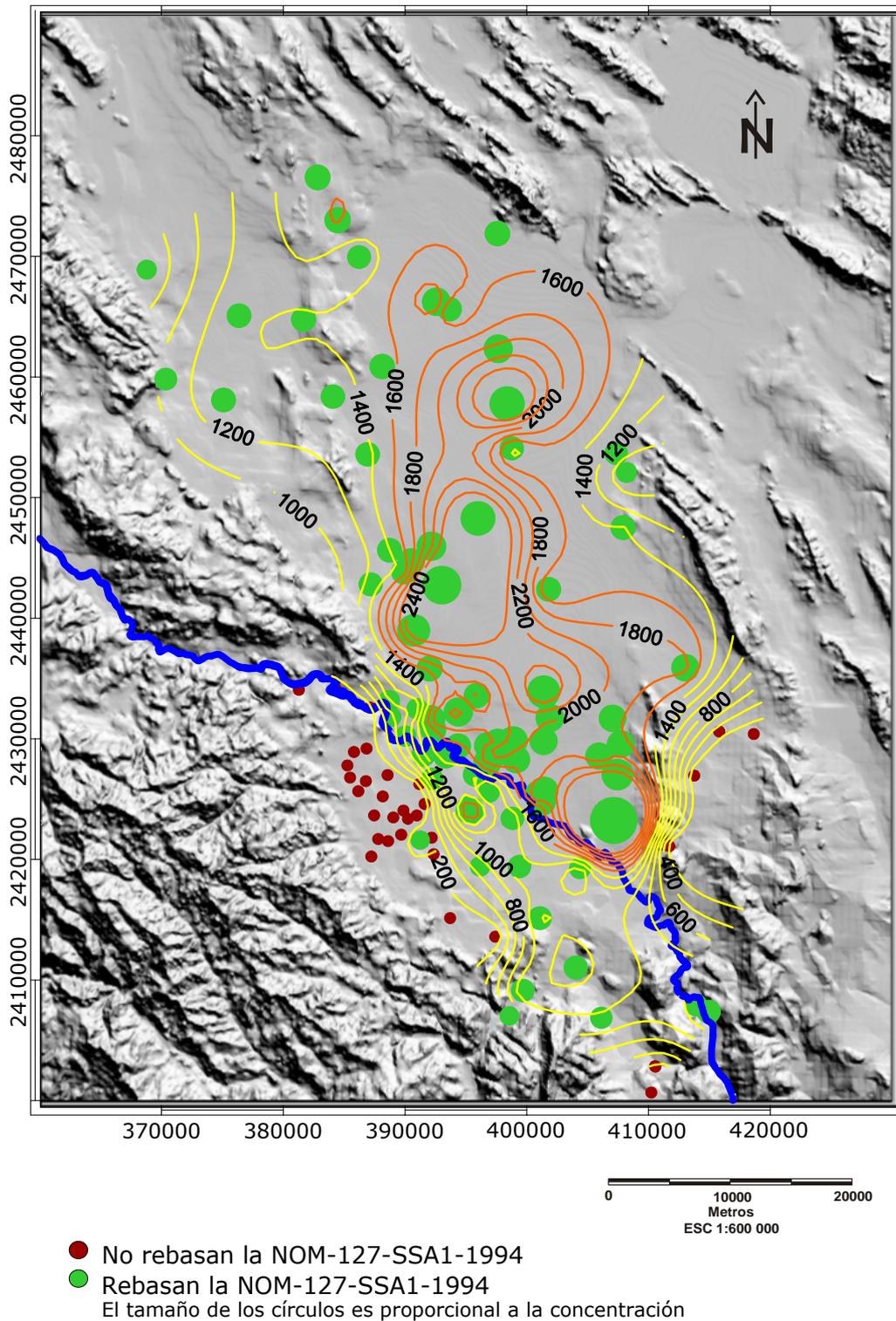


Figura 23 Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al sulfato (en mg/L) en el área de estudio

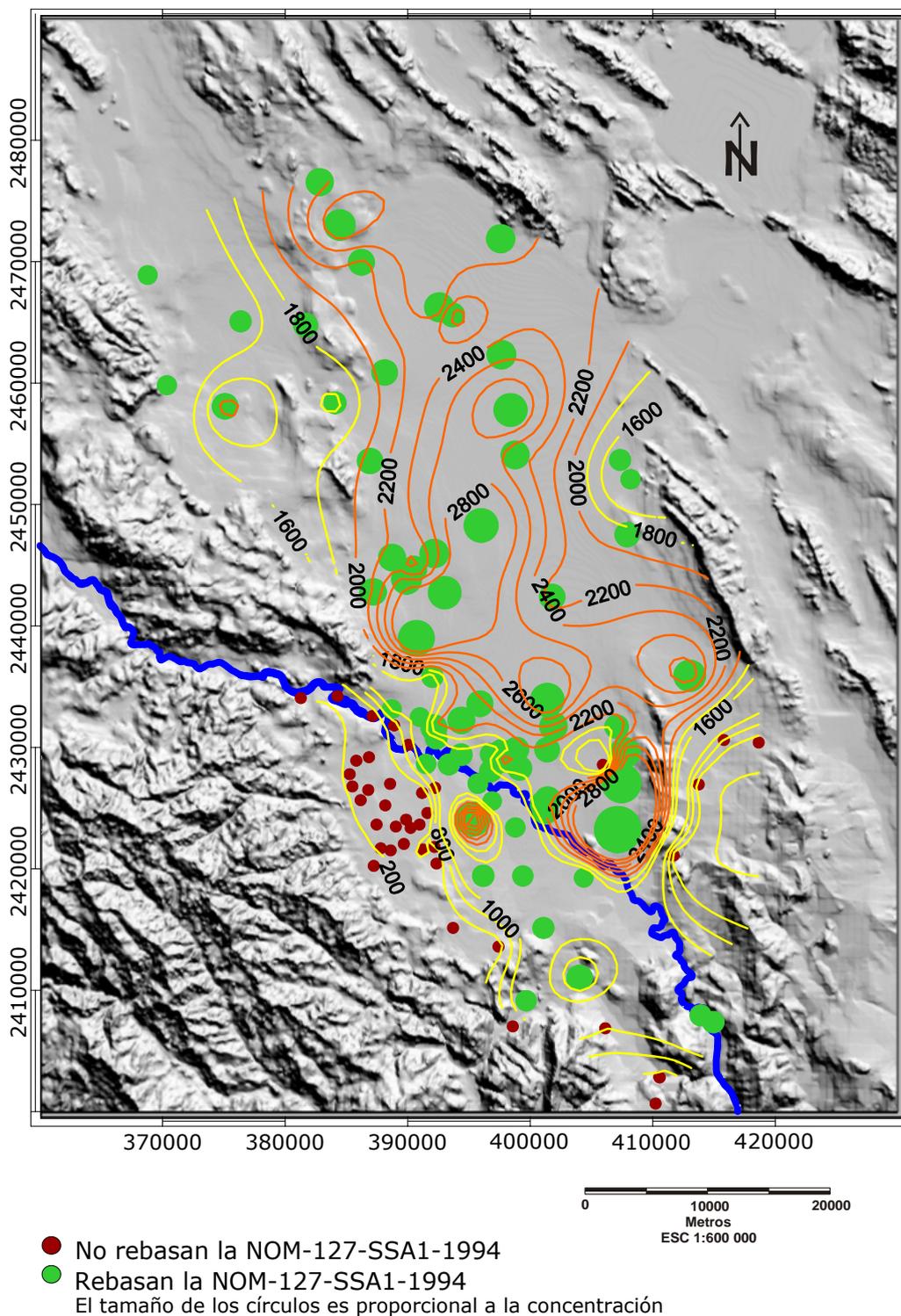


Figura 24 Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación a los sólidos totales disueltos (en mg/L) en el área de estudio

Las muestras que rebasan este parámetro es igual a la distribución espacial que mostró la dureza total y el sulfato en el área de interés. El total de muestras que rebasaron el límite permisible (1,000 mg/L) dentro del área de estudio fue de 62 % (68 aprovechamientos). El valor máximo encontrado fue de 5,194 mg/L y el mínimo de 133 mg/L. Los aprovechamientos utilizados para consumo humano que rebasan el límite máximo permisible para este parámetro y que rebasaron también el de dureza y sulfato fueron: el ubicado en la localidad El Progreso en Villa Juárez y en el Ejido San Sebastián en el municipio de Rioverde.

La preocupación de encontrar concentraciones elevadas de sólidos totales disueltos en aguas para uso y consumo humano, es que un alto contenido de este parámetro es por lo general de mal agrado para el paladar y pueden inducir una reacción fisiológica adversa en el consumidor (Catalán, 1981).

Sodio

En rocas ígneas, el sodio es ligeramente más abundante que el potasio, pero en sedimentos el sodio es mucho menos abundante. El sodio no se encuentra libre en la naturaleza; sin embargo, combinado se encuentran en gran abundancia en rocas constituidas por silicatos complejos (feldespatos, ortosa, etc) y otras. El sodio está siempre en mayor concentración que el potasio, salvo en muy raras excepciones, y es debido a que el potasio es absorbido por la arcilla para transformarse en illita (Hem, 1985).

De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994, el límite permisible para el ión sodio es de 200 mg/L. En el área de estudio, el 12 % de los aprovechamientos rebasan el límite permisible, encontrándose una concentración máxima de 880 mg/L.

La distribución espacial de este elemento químico (figura 25) es principalmente en la zona centro del área de estudio, cerca de los márgenes izquierdo y derecho del Río Verde. A excepción de 3 aprovechamientos que son; el 60RV ubicado en la localidad denominada Ejido Cofradía, el 65RV en la localidad San

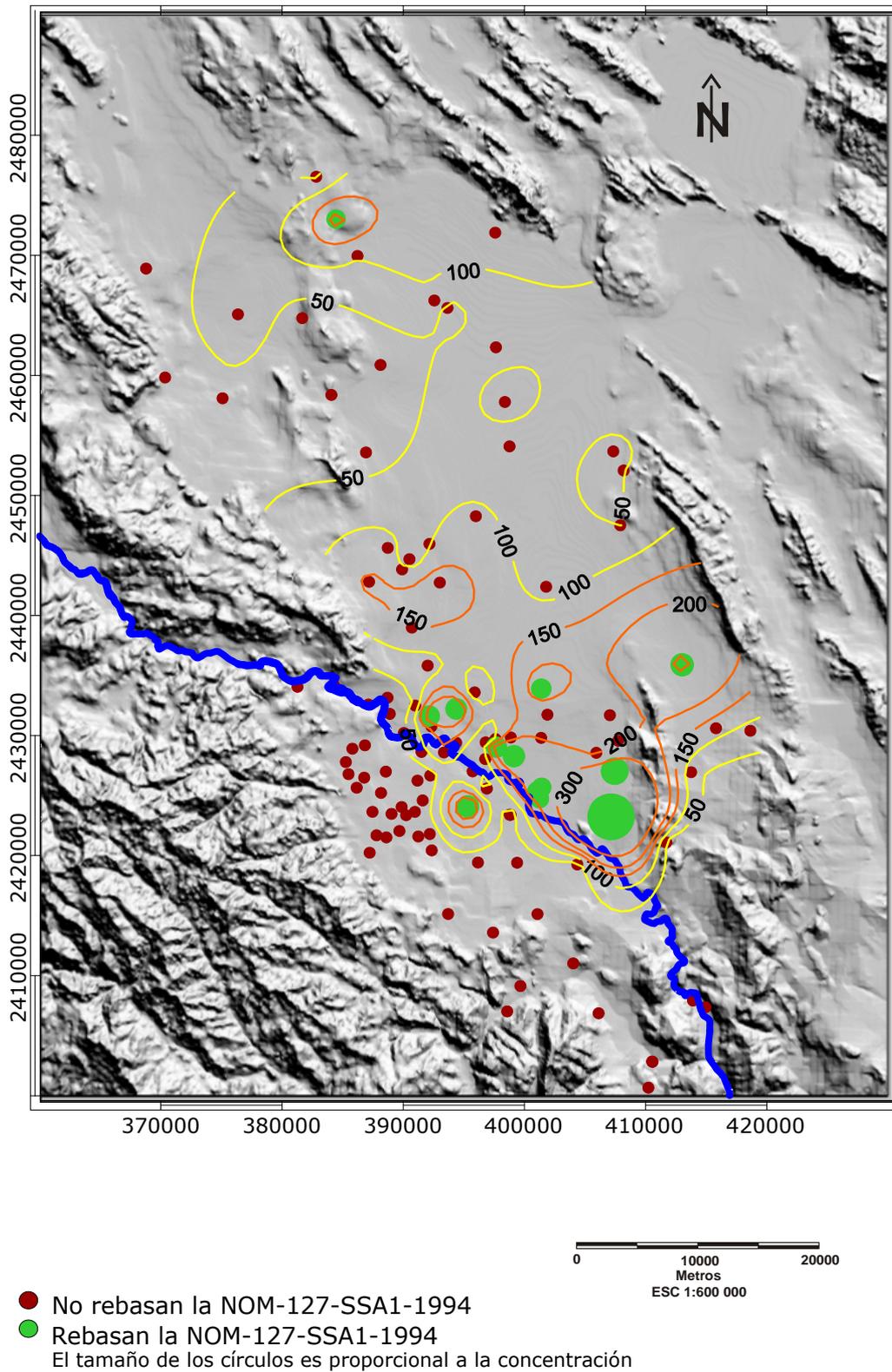


Figura 25 Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al sodio (en mg/L) en el área de estudio

Francisco (ambos pertenecientes al municipio de Rioverde) y el 84RV perteneciente a la localidad Las Enramadas en el municipio de Villa Juárez.

Se han encontrado correlaciones positivas entre la concentración de sodio en el agua y varias enfermedades, entre ellas las que se manifiestan por un fallo del corazón, hipertensión, enfermedades renales, cirrosis hepática, toxemias del embarazo, enfermedad de Menier la cual es una afección del oído interno que causa vértigo y la hipernatremia (elevado nivel de sodio en la sangre) en los niños (Catalán, 1981).

Nitrato

El nitrato es un compuesto que sin lugar a dudas señala la presencia de impacto relacionado con agroquímicos, ya que su origen en las aguas subterráneas generalmente esta asociado a la disolución de fertilizantes que contienen nitrógeno en su composición (Price, 2003). Sin embargo, la infiltración de aguas residuales sin tratamiento también genera un incremento en la concentración de este parámetro.

En la figura 26 se presenta la distribución geográfica de los aprovechamientos donde el agua subterránea presenta valores por encima del límite permisible establecido por la secretaria de salud, el cual es 10 mg/L de N-NO₃. El 8% de los aprovechamientos presentan valores superiores a 10 mg/L de N-NO₃. El aprovechamiento 56RV perteneciente al Ejido La Boquilla en el Municipio de Rioverde, presentó una concentración de 10 mg/L, por lo que fue considerado dentro de las muestras que rebasan el límite permisible de la NOM-127-SSA1-1994.

El valor máximo encontrado de concentración de N-NO₃ fue de 33.6 mg/L y corresponde al aprovechamiento 83RV localizado en La Cardona en el municipio de Villa Juárez al norte del área de estudio; este aprovechamiento manifiesta el impacto local de la infiltración de estiércol acumulado en un corral con ganado bovino que está ubicado muy cerca del aprovechamiento en el que se tomó la muestra.

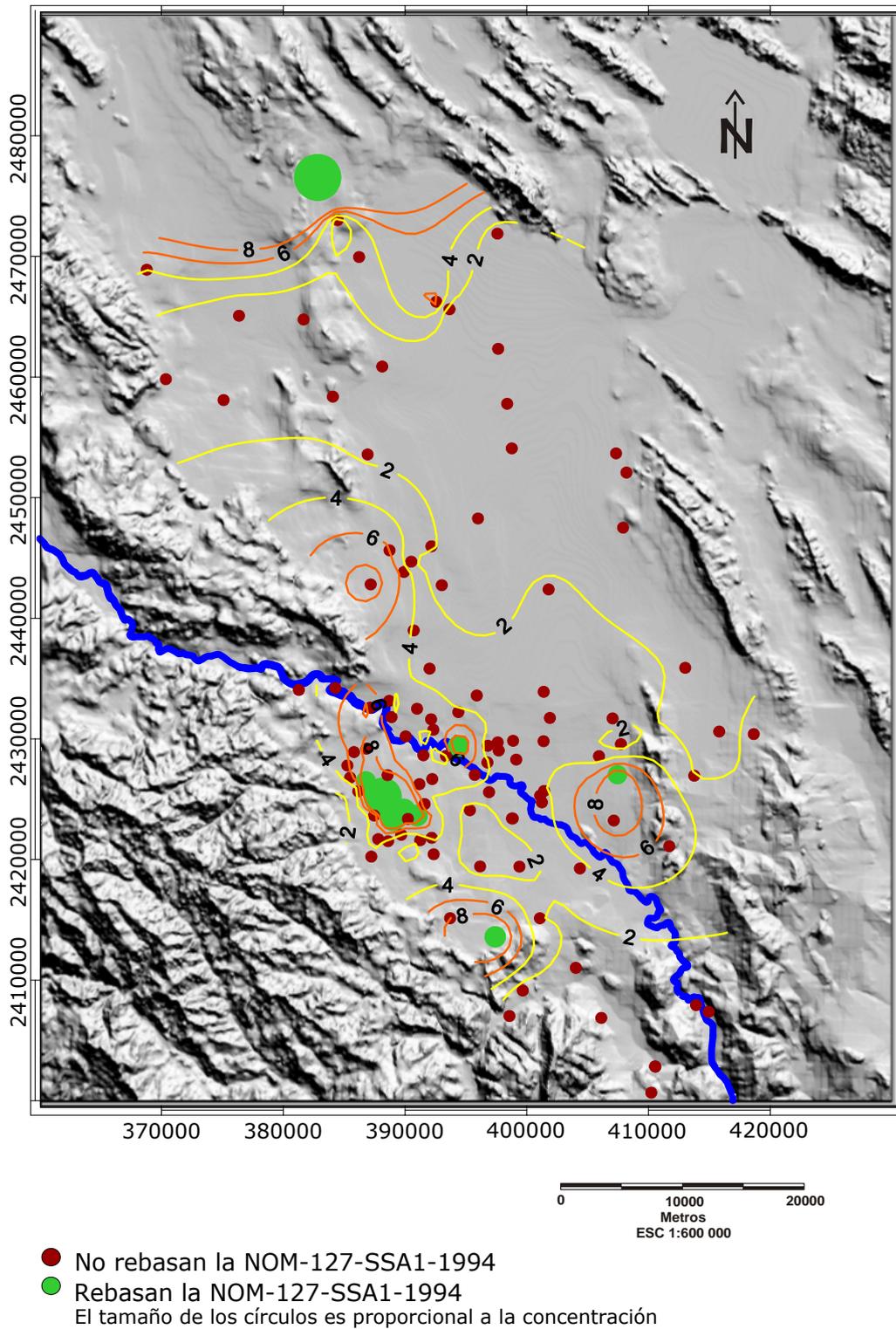


Figura 26 Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al N-NO₃ (en mg/L de N-NO₃) en el área de estudio

El agua del pozo ubicado en el Ejido La Palmita perteneciente al municipio de Rioverde, utilizado para agua potable, mostró una concentración de 11.8 mg/L de N-NO₃, lo anterior debido posiblemente por manejo inadecuado del aprovechamiento, permitiéndose la entrada de sustancias o agua con contenidos de nitrato elevados. En general, se observa que las concentraciones que rebasan el límite permisible se encuentran distribuidas en la región agrícola de Ciudad Fernández denominada El Refugio y sus cercanías; así como, también en el municipio de Rioverde, en la localidad denominada San Diego.

Cuando el nitrato se halla en concentraciones de 10 mg/L de N-NO₃ o superiores, el agua es indeseable para fines domésticos, debido al posible efecto tóxico que puede tener sobre los niños. Este efecto se conoce como cianosis o síndrome del bebe azul. La cianosis hace que el niño se vuelva apático, soñoliento y su piel toma un color azulado. Esta condición puede provenir cuando se usa agua con excesivo nitrato para la preparación de los alimentos del niño. El nitrato en el agua de beber no causa cianosis en los adultos o en los niños mayores. Debe hacerse notar que el nitrato no se puede eliminar mediante ebullición del agua. La única forma de removerlo es mediante la desmineralización del agua o destilando está (Price, 2003).

Tomando en cuenta que en la zona de estudio la principal actividad es la agricultura, se puede considerar a este parámetro como un indicador de que el agua subterránea de algunas porciones del área de estudio esta siendo afectada por actividades humanas. Cardona et al (2008) indican que el nitrato constituye un excelente indicador de contaminación moderna en sistemas de flujo locales e intermedios, ya que en condiciones oxidantes es muy móvil y es muy útil para delimitar la extensión de zonas afectadas por contaminación de origen antrópico.

Las fuentes principales de nitrato se relacionan con el uso de fertilizantes, residuos de granjas y al riego con aguas residuales. En el área de estudio no hay reportes de riego con aguas residuales y se puede comprobar esta

hipótesis en los recorridos de campo, por lo que las fuentes del nitrato en la región se le atribuyen a las dos primeras fuentes antes mencionadas.

4.1.1.2 Elementos traza

En la NOM-127-SSA1-1994 se consideran además de elementos mayores algunos elementos traza. Por eso es conveniente analizar en el área de estudio la distribución de éstos. Los parámetros que rebasan los límites establecidos por la Secretaria de Salud en relación a elementos traza en el área de interés son; arsénico, cadmio, fluoruro, hierro, manganeso y plomo. A continuación se realiza una descripción detallada de cada parámetro.

Arsénico

El arsénico tiene importancia en la química del agua sobre todo desde que modernamente se ha generalizado el uso de pesticidas, ya que estos productos contienen este elemento. El arsénico se encuentra libre en la naturaleza, siendo un sólido de color gris acero, quebradizo. Combinado se encuentra en forma de diversos minerales entre los cuales está el sulfuro arsenioso rojo (As_2S_2), sulfuro arsénico amarillo (As_2S_3) y pirita arsenical $FeAsS$, etc (Catalán, 1981). Elevadas concentraciones de arsénico esta comúnmente asociado con sedimentos parcialmente derivados de rocas volcánicas de composición ácida intermedia (Appelo y Postma 1996).

La necesidad de limitar la concentración del arsénico en las aguas destinadas a la bebida y usos domésticos vienen impuestos como consecuencia de su alta toxicidad. El origen natural del mismo queda minimizado debido al aporte que se hace artificialmente como consecuencia de su utilización como pesticidas (los arsenitos como herbicidas y los arseniatos como insecticidas).

No se conoce que el arsénico sea esencial para la salud de los hombres o de los animales. Sin embargo, si es muy conocido el peligro que encierra el

arsénico para la salud humana, siendo más tóxica la forma trivalente que la pentavalente (Catalán, 1981).

En el área de estudio la máxima concentración encontrada de este elemento traza es de 84.87 $\mu\text{g/L}$ (109RV). El límite permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994 es de 25 $\mu\text{g/L}$ (0.025 mg/L). El número de aprovechamientos que rebasan el límite permisible fue de 6 y se encuentran localizados en principalmente en los municipios de Rioverde y Villa Juárez (figura 27).

Las altas concentraciones encontradas corresponden a los siguientes aprovechamientos; el 65RV ubicado en la localidad llamada San Francisco, el 78RV localizado en El Potrero La Bota y el 109RV ubicado en la localidad llamada Los Salitrillos, estos tres aprovechamientos pertenecen al municipio de Rioverde. Tres aprovechamientos del municipio de Villa Juárez rebasaron el límite permisible y son; el 83RV perteneciente a la localidad La Cardona, el 85RV ubicado en la localidad El Colorado y el 109RV localizado en Los Salitrillos. Cabe señalar que ninguno de los aprovechamientos es utilizado para uso y consumo de la población.

La presencia de este elemento es posible que se deba en mayor parte al aporte puntual de fertilizantes que contienen arsénico en su composición; sin embargo, también puede ser por la disolución de rocas volcánicas que contienen arsénico dentro del área de estudio. La exposición a largo plazo al arsénico vía agua potable en concentraciones de 0.05 mg/L e incluso menores, causa cáncer de piel, de pulmón, vejiga, riñón y alteraciones en la piel como cambios de pigmentación y adelgazamiento de la misma. Los síntomas inmediatos de una intoxicación aguda incluyen vómito, dolor abdominal y diarrea hemorrágica (Reuelta, 2003).

Cadmio

El cadmio en las aguas naturales no se encuentra prácticamente, ya que además del ión Cd y complejos de ácidos húmicos, se pueden encontrar las sales CdCO_3 y Cd(OH)_2 , las cuales son muy insolubles.

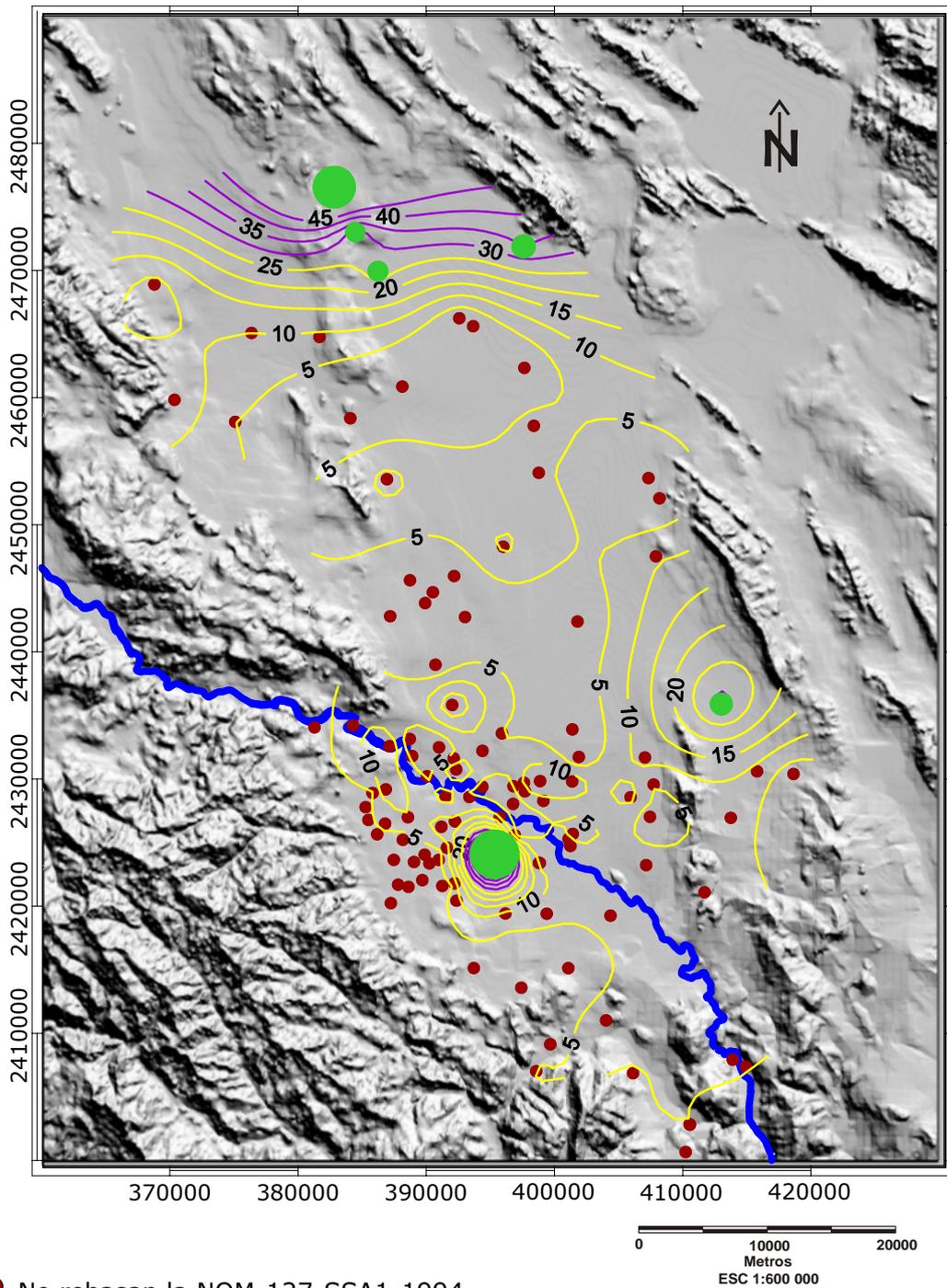


Figura 27 Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al arsénico (en $\mu\text{g/L}$) en el área de estudio

Generalmente el cadmio está presente en menas de zinc. En las aguas contaminadas por cadmio su origen principal es la corrosión de las tuberías empleadas en la distribución de la misma, debido a que el cadmio es un contaminante del hierro y del zinc galvanizados (Catalán, 1981).

El límite permisible para el cadmio establecido por la Secretaria de Salud es de $5\mu\text{g/L}$ (0.005 mg/L). En el área de interés solo el aprovechamiento 102RV presenta una concentración de $5.58\ \mu\text{g/L}$ la cual está por encima del límite permisible. Este aprovechamiento se encuentra localizado en la localidad Puerta del Río en el municipio de Villa Juárez (figura 28). Su fuente probable es de origen externo y no tanto a la disolución de minerales que contengan cadmio en su composición.

El cadmio no se considera, biológicamente, ni beneficioso ni esencial para el hombre, siendo un tóxico comprobado que actúa sobre el riñón y el hígado produciendo náuseas y vómitos. Los envenenamientos de cadmio producen hipertensión arterial y es un carcinógeno comprobado (Catalán, 1981).

Plomo

Se encuentra en la naturaleza en forma de carbonato de plomo PbCO_3 (cerusita), sulfuro de plomo PbS (galena), etc. El límite permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994 es de $25\ \mu\text{g/L}$ (0.025 mg/L). Solamente el aprovechamiento 44RV en el área de estudio rebasa el límite permisible con respecto al plomo con una concentración de $42,17\ \mu\text{g/L}$.

Este aprovechamiento se encuentra ubicado en el municipio de Ciudad Fernández en la localidad llamada Potrero Veinte de Noviembre. En general, observando las isolíneas de la configuración hecha para este parámetro (figura 29), se puede inferir que las concentraciones de este elemento traza en el área de estudio son bajas.

El plomo aparentemente, no tiene efectos beneficiosos sobre la salud humana, siendo, por otra parte, muy tóxicas todas sus sales, produciendo la

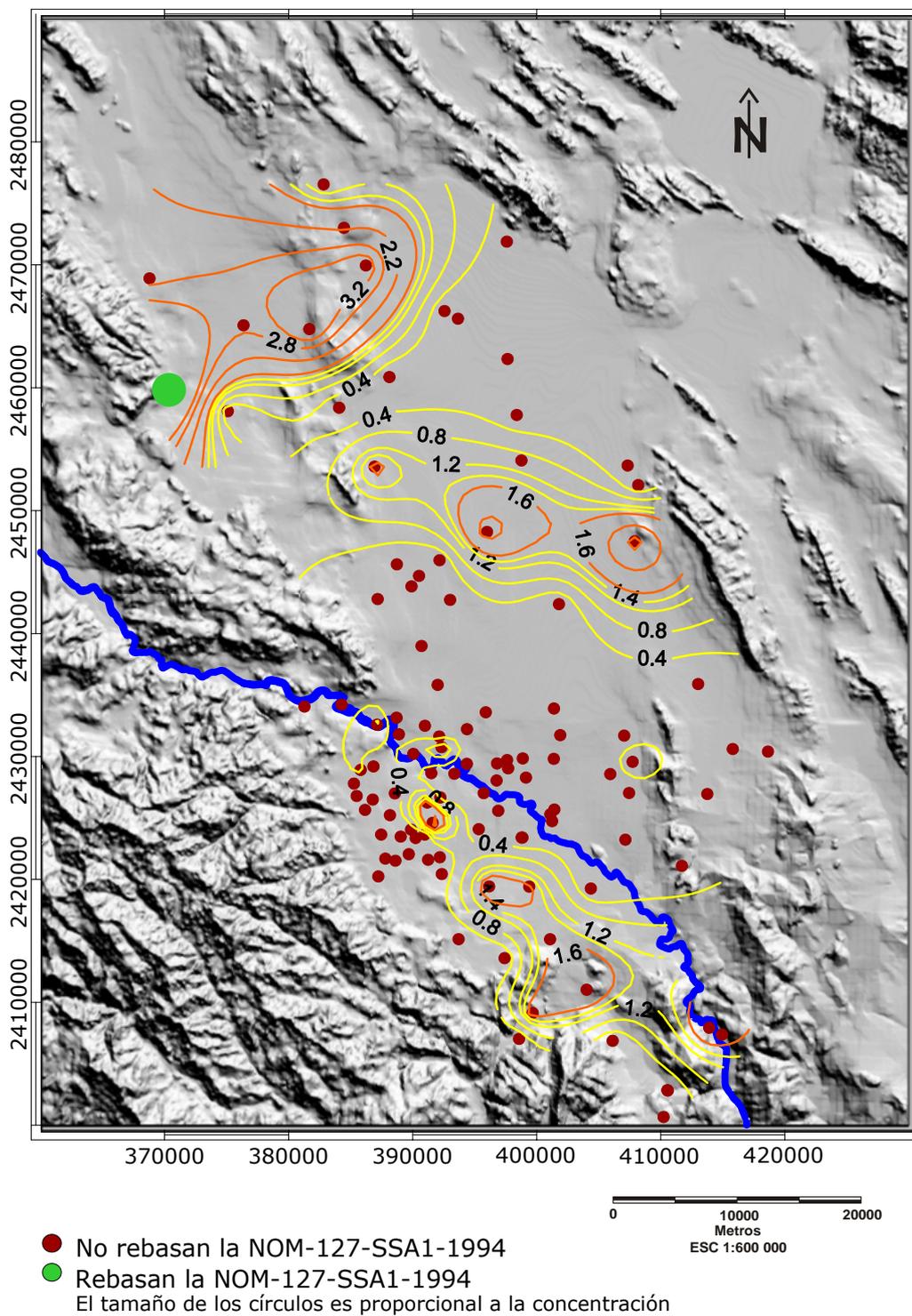


Figura 28 Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al cadmio (en $\mu\text{g/L}$) en el área de estudio

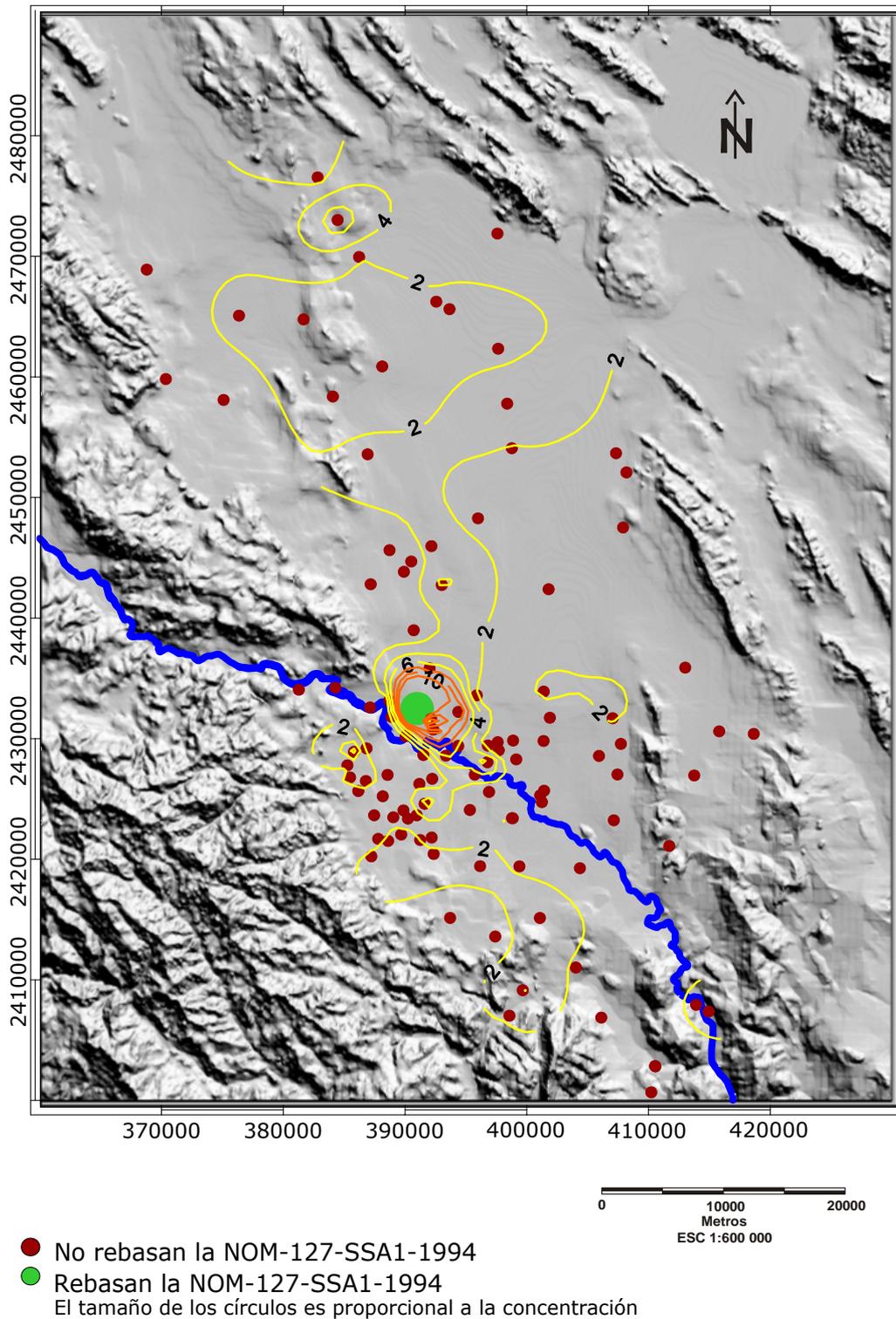


Figura 29 Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al plomo (en $\mu\text{g/L}$) en el área de estudio

enfermedad llamada saturnismo. Su toxicidad es tal que la ingestión diaria mediante el agua de bebida, que contenga una concentración de 1 mg/L y aún menos, puede producir una acumulación crónica debido a que éste se acumula en los tejidos, especialmente en el óseo (Catalán, 1981).

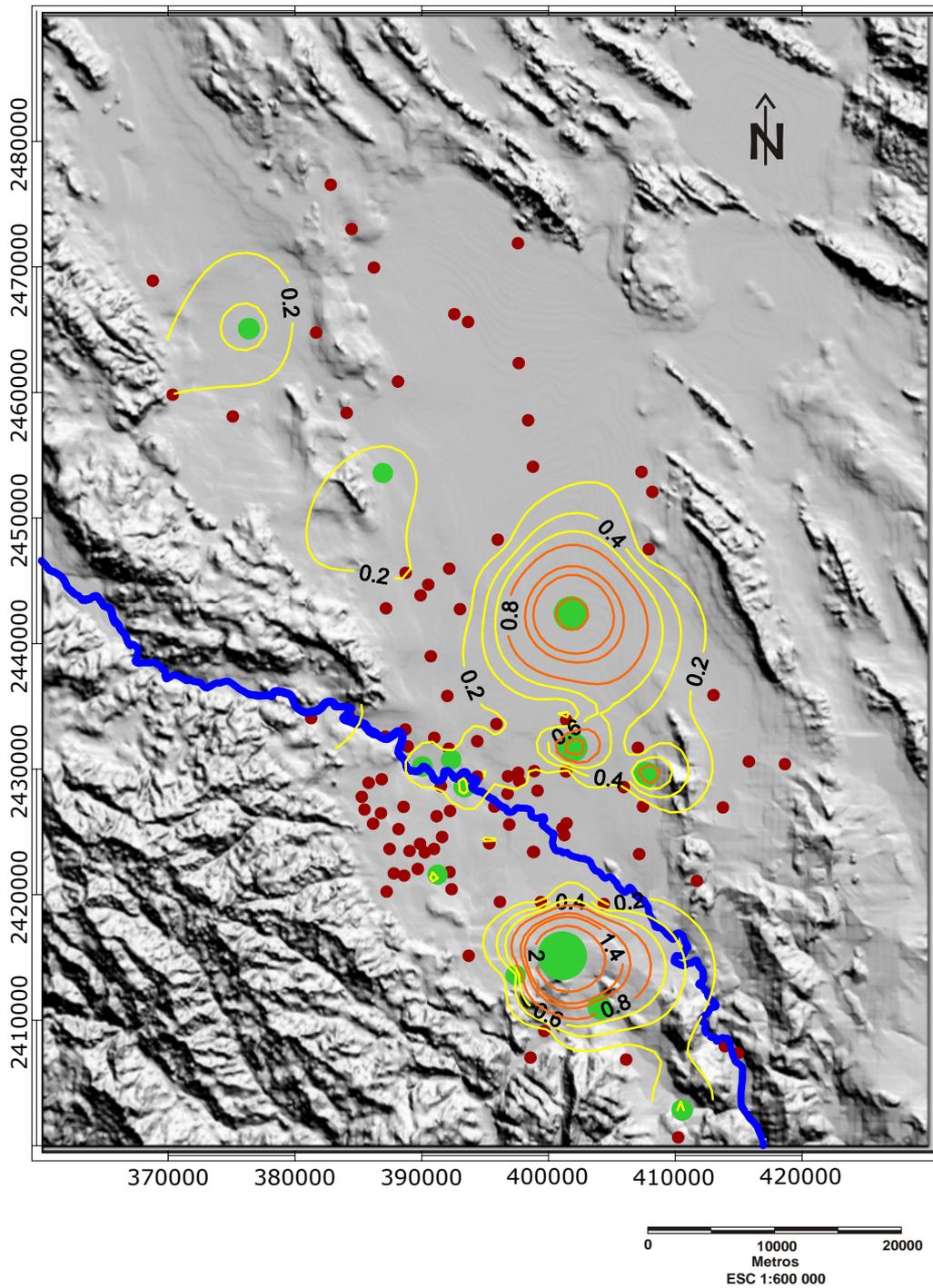
El aprovechamiento en el cual se detecto la máxima concentración, no es utilizado para abastecimiento de la población y se puede inferir una fuente puntual de aporte de este elemento hacia el aprovechamiento.

Hierro

Los minerales de rocas ígneas las cuales contienen hierro es relativamente alto (Hem, 1985). Sus compuestos más importantes son: Hematita Fe_2O_3 ; Limonita ($Fe_2O_3 \cdot n H_2O$); Magnetita Fe_3O_4 ; Siderita $FeCO_3$; Pirita FeS_2 , etc (Catalán, 1981).

En el área de estudio el 13 % de las muestras rebasan el límite permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994 que es de 0.3 mg/L. El valor máximo encontrado de este elemento es de 4.53 mg/L y corresponde al aprovechamiento 93RV ubicado en el ejido Las Magdalenas en el municipio de Rioverde. Se puede apreciar en la figura 30 la distribución geográfica de este elemento. De manera general, las concentraciones en el área de estudio son relativamente bajas, encontrándose a concentraciones mayores en algunos aprovechamientos localizados en el margen izquierdo y derecho del Río Verde (27RV, 29RV y 30RV). Otros aprovechamientos que se encuentran rebasando el límite permisible de la NOM-127-SSA1-1994, son algunos que se localizan cerca de zonas de recarga (zonas topográficamente altas) específicamente los aprovechamientos 89RV, 93RV, 95RV, 97RV y 107RV.

El hierro es un constituyente normal del organismo (forma parte de la hemoglobina) y sus sales no son tóxicas en pequeñas cantidades. Comunica al agua un sabor astringente, aunque este sabor no quiere decir que sea im potable (Catalán, 1981).



- No rebasan la NOM-127-SSA1-1994
- Rebasan la NOM-127-SSA1-1994
El tamaño de los círculos es proporcional a la concentración

Figura 30 Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al hierro (en mg/L) en el área de estudio

Fluoruro

Procede de los minerales fluorados como la fluorita CaF_2 , la criolita Na_3AlF_6 , el fluorapatito $\text{CaF}_2 \cdot 3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, etc (Catalán, 1981). La fluorita es un mineral común que contiene flúor en su composición. Este mineral tiene una solubilidad baja y ocurre en rocas ígneas y sedimentarias (Hem, 1985). El flúor se encuentra naturalmente en las aguas subterráneas, existiendo solo como ión fluoruro (Catalán, 1981).

En el área de estudio el 32% de las muestras colectadas presentan valores por encima del límite permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994 que es de 1.50 mg/L. El valor máximo encontrado (3.9 mg/L) pertenece a la muestra de agua colectada en el aprovechamiento 55RV localizado en la localidad El Potrero de la Bomba en el municipio de Rioverde.

En general la tendencia de la distribución de este parámetro en el área de estudio (figura 31) es variada, los aprovechamientos que rebasan el límite permisible se distribuyen como sigue; En la zona sureste del área de estudio en el margen derecho del Río Verde, al noreste en el margen izquierdo del río y en algunos aprovechamientos localizados al noroeste cercanos a las sierras.

La problemática de la presencia de concentraciones de ión flúor superiores a 1.5 mg/L, es que produce en el esmalte de los dientes unas motas coloreadas de amarillo, marrón o negro (fluorosis), siendo especialmente sensibles a esta lesión los niños pequeños. Además del moteado del esmalte de los dientes se puede producir una fluorosis esquelética, pudiéndose llegar a una mutilación (Catalán, 1981). La mayoría de los aprovechamientos que presentaron concentraciones de fluoruro por encima de la norma no son destinados para uso y consumo humano a excepción del que se encuentra localizado en el Ejido San Sebastián en el municipio de Rioverde (1.76 mg/L).

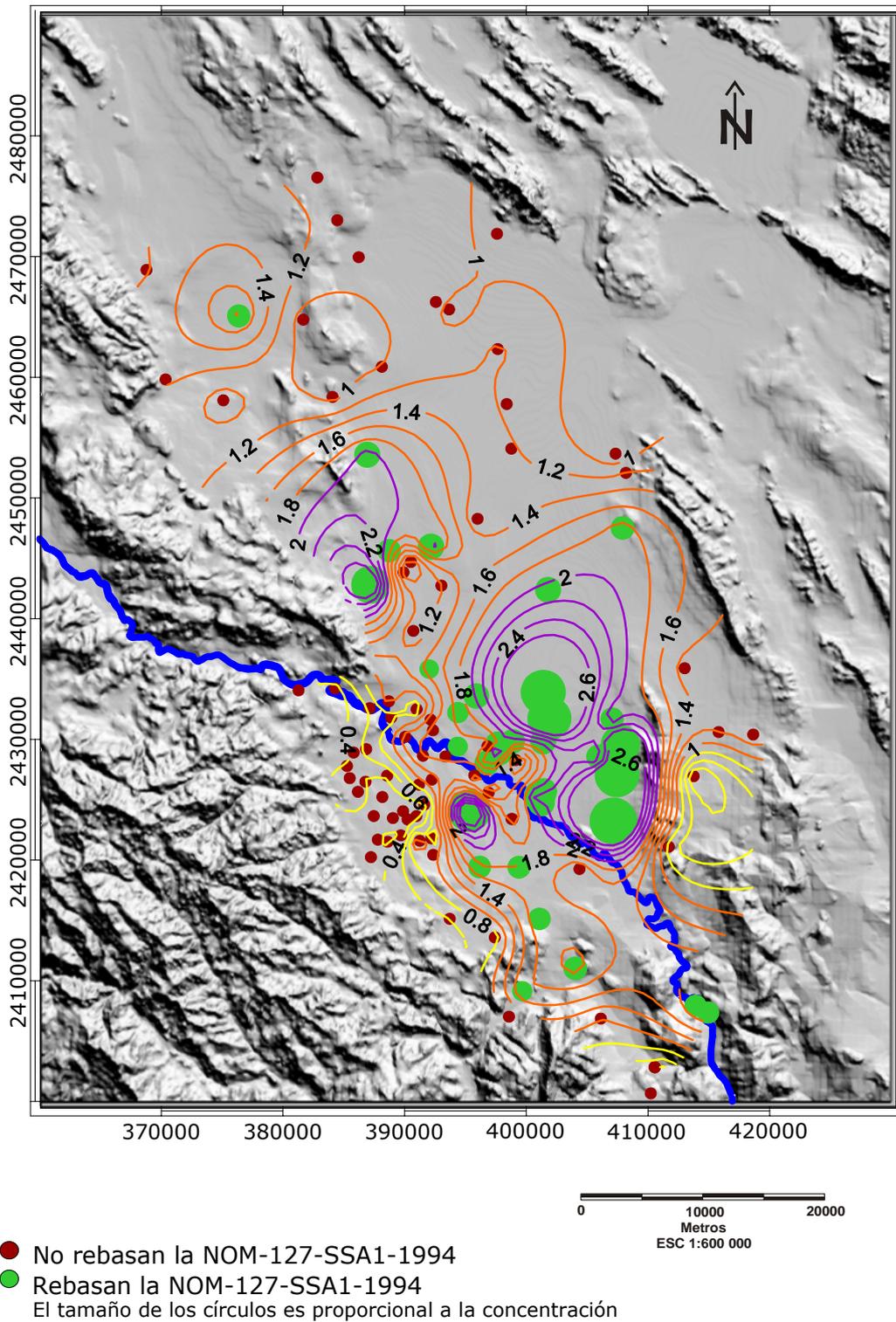


Figura 31 Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al fluoruro (en mg/L) en el área de estudio

Manganeso

Muchos minerales ígneos y metamórficos contienen manganeso divalente como constituyente menor. Es un constituyente significativo del basalto y olivinos y de piroxeno y anfíboles. Pequeñas cantidades están presentes en dolomitas y calizas reemplazando al calcio (Hem, 1985). Siendo la fuente anterior, la principal responsable del aporte de Mn en el área de estudio.

Este elemento se encuentra normalmente en el organismo, siendo un activador de ciertas enzimas. Cuando se ingiere en grandes dosis es un veneno que afecta fundamentalmente al sistema nervioso central. Cuando existe en cantidades apreciables, produce en el agua un sabor desagradable, lo que hace que su presencia sea notada al beber y su acción tóxica más fácilmente evitada (Catalán, 1981).

Solo el 6 % de las muestras de agua colectadas en el área de interés rebasan el límite permisible establecido el cual es de 150 µg/L (0.15 mg/L). El valor máximo de concentración encontrado fue de 607.43 µg/L (0.607 mg/L) y la muestra del aprovechamiento 85RV perteneciente a la localidad denominada El Colorado en el municipio de Villa Juárez. La distribución de las muestras que rebasan el límite permisible se puede observar en la figura 32.

4.2 Clasificación del agua para riego agrícola

No todas las aguas son adecuadas para ser utilizadas con fines de riego, dependiendo si es apta, no sólo de su contenido iónico en calidad y en cantidad, sino de otra serie de factores como son; la permeabilidad del suelo, pH, tipo de cultivo, clima, sistema de riego, sales solubles del suelo, etc.

Catalán (1981) menciona que es imposible dar un criterio de calidad, para las aguas de riego por el solo hecho del examen químico de las mismas debido a los factores antes mencionados. Sin embargo, es muy importante la evaluación desde el punto de vista químico para llegar a adquirir un criterio cierto de la

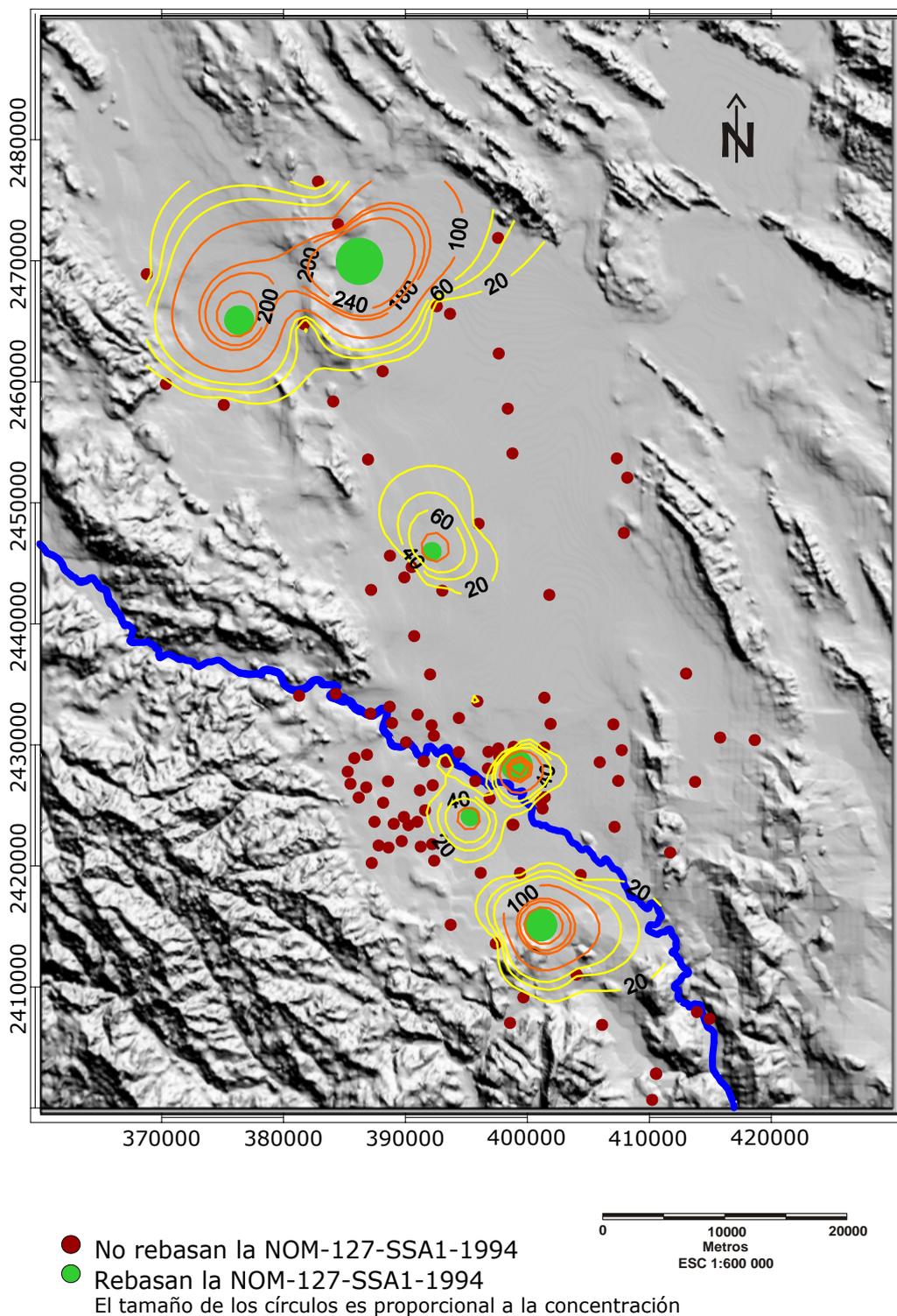


Figura 32 Distribución espacial de las muestras que rebasan y no rebasan el límite permisible en relación al manganeso (en $\mu\text{g/L}$) en el área de estudio

posibilidad de regar un determinado terreno. Por lo que uno de los objetivos en este trabajo es evaluar la calidad de agua para riego agrícola considerando que en el área de estudio, la agricultura es de gran importancia.

4.2.1 Salinidad

La salinidad se manifiesta en la acumulación de sales solubles en las raíces de la planta, impidiendo que las mismas puedan extraer agua suficiente para sus necesidades, produciéndose así, un efecto de escasez de agua. La salinidad depende de las sales que están presentes en el suelo porque hacen de las capas más profundas por difusión, o procedentes de las sales que han sido aportadas por el agua de riego, las cuales permanecen en el suelo cuando la planta toma la misma.

Lloyd y Heathcote (1985), mencionan que los procesos osmóticos es la función vital más importante en las plantas por lo que cualquier cambio en las condiciones osmóticas en la zona donde se encuentran las raíces puede automáticamente cambiar la velocidad del flujo de agua a la planta.

Normalmente los efectos osmóticos son causados por la concentración total de sales y la presión osmótica del agua en el suelo esta relacionada directamente con la conductividad eléctrica. La concentración total de sales es usualmente medida como conductividad eléctrica en trabajos relacionados con la irrigación. La clasificación de acuerdo con su salinidad fue realizada utilizando los criterios establecidos por el US Salinity Laboratory (Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos) donde se utiliza la conductividad eléctrica considerando 4 grupos (tabla 16).

La tabla 17 muestra la clasificación del agua en porcentajes de la zona de estudio de acuerdo con su salinidad.

Tabla 16 Grupos de agua para irrigación basada en la conductividad eléctrica (modificado de Lloyd y Heathcote, 1985)

Grupos de agua para irrigación basada en la conductividad eléctrica	
C1	Agua de baja salinidad. Puede ser usada en la mayor parte de cultivos en casi todos los suelos con muy poco riesgo de que un problema de salinidad se desarrolle. Un poco de lavado es requerido, el cual ocurre bajo prácticas normales de irrigación excepto en suelos de muy baja permeabilidad.
C2	Agua de salinidad media. Puede ser usada si un moderado lavado ocurre. Plantas con moderada tolerancia a sales pueden crecer en muchos casos sin prácticas especiales para el control de la salinidad.
C3	Agua altamente salina. No puede ser usada en suelos con drenaje restringido. Un manejo especial para el control de la salinidad puede ser requerido y plantas con buena tolerancia a la sal deberían ser seleccionadas.
C4	Agua muy altamente salina. No es apropiada para la irrigación bajo condiciones ordinarias, pero puede ser usada ocasionalmente bajo circunstancias muy especiales. El suelo debe ser permeable, con drenaje adecuado, el agua de irrigación debe ser aplicada en exceso para permitir un lavado adecuado y plantas muy tolerantes a las sales deben ser seleccionadas para el cultivo.

Tabla 17 Grupos de agua para irrigación basada en la conductividad eléctrica (modificado de Lloyd y Heathcote, 1985)

Tipo	Porcentaje de muestras	CE $\mu\text{mhos/cm}$
C1	1%	100-250
C2	26%	250-750
C3	32%	750-2250
C4	41%	< 2250

La figura 33 muestra la distribución geográfica de los 4 grupos de agua clasificada de acuerdo al criterio establecido previamente, en general se observa que el agua clasificada como C4 predomina en el zona norte del área de estudio y algunos sitios en la zona sur, sin embargo en esta zona (margen derecho del Río Verde) predomina el agua tipo C2 en primer lugar y en segundo lugar el agua tipo C3. En comparación con los resultados reportados por Ballín (2003), se observa que en el presente estudio se obtuvieron más muestras de tipo C4.

En la porción norte del área de estudio, en las inmediaciones de la localidad llamada Santa Rita, se localiza agua de tipo C2; así como, también de tipo C3.

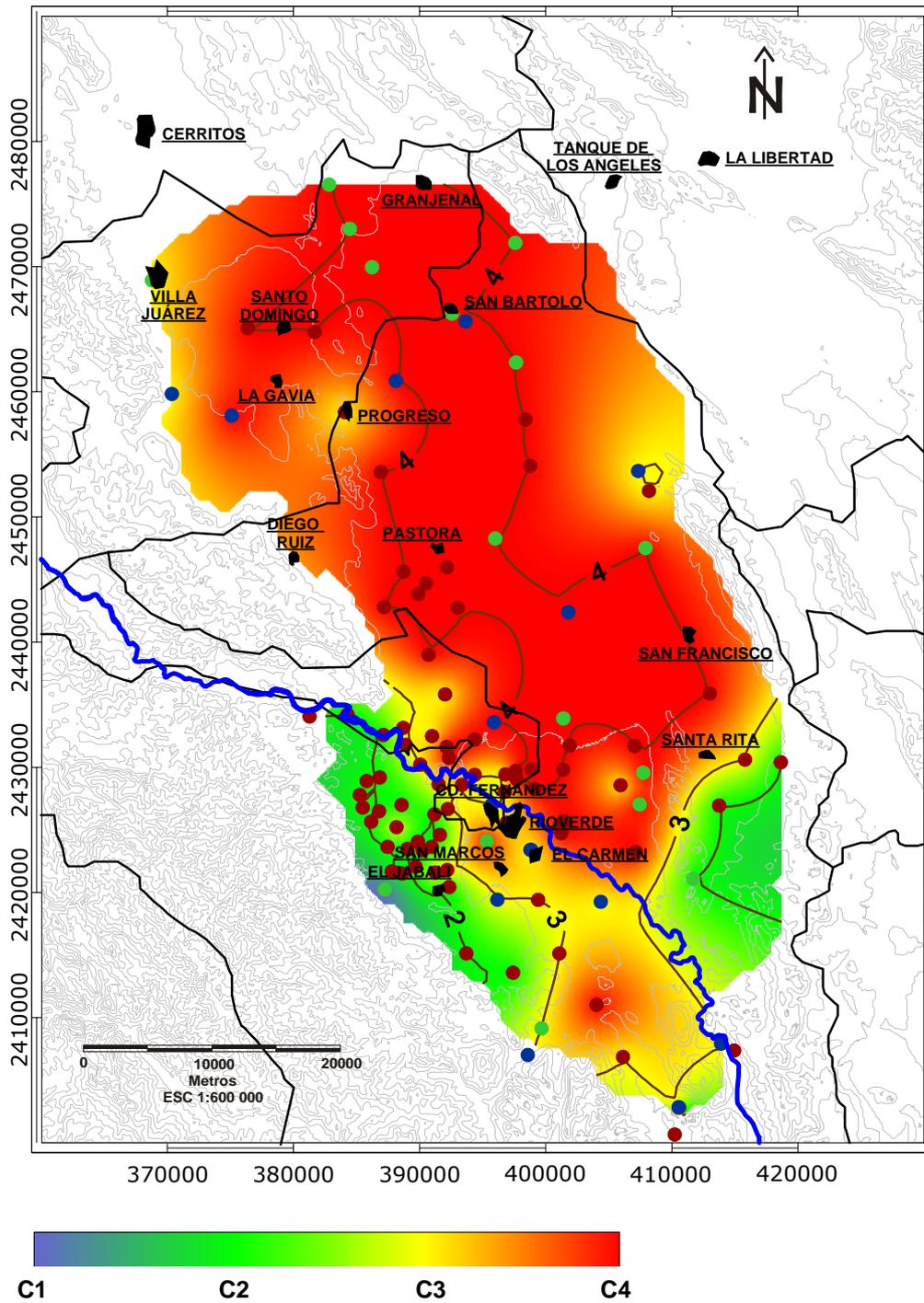


Figura 33 Distribución geográfica del agua subterránea del área de estudio clasificada de acuerdo con la salinidad a partir de la conductividad eléctrica

De acuerdo con la información mostrada en la tabla 16, podemos concluir que, el agua clasificada como C4 (zonas de color rojo en la figura 33), que corresponden al 41% de las muestras colectadas, es agua muy altamente salina y se deben tomar ciertas precauciones y cultivarse plantas que sean muy tolerantes a la salinidad como son: dátil, remolacha, espárrago, espinaca, césped, algodón, cebada.

El agua clasificada como de tipo C2 y C3 (zonas en verde y amarillo respectivamente), corresponden al 63% de las muestras colectadas y son catalogadas como agua de salinidad media y agua altamente salina respectivamente, su distribución espacial corresponde a la región agrícola de Rioverde- Ciudad Fernández y es recomendable que se cultiven plantas como; naranja, pera, manzana, naranja, almendra, ciruela, melocotón, limón, mora, apio, rábano que son poco tolerantes a la salinidad. Así como, también; uva, aceituna, granada, tomate, coliflor, lechuga, maíz, zanahoria, cebolla, chícharos, alfalfa, trigo, centeno, avena, arroz, girasol, higo, papa, que son cultivos tolerantes a la salinidad.

4.2.2 RAS

El sodio ejerce una acción negativa en la permeabilidad, ya que la adsorción del sodio por el suelo produce la dispersión de la fracción arcillosa, disminuyendo la permeabilidad del suelo y conduciendo a la formación de una costra superficial que influye negativamente en la germinación de la semilla y en la salida del tallo (Catalán, 1981).

Es por lo anterior que se debe tener cuidado al utilizar agua para irrigación con alto contenido de sodio, puesto que, cuando los sitios de intercambio en el suelo están llenos de calcio y magnesio las condiciones físicas de éste son apropiadas para el cultivo y desarrollo de las plantas. Pero si los sitios de intercambio se saturan con sodio, las propiedades físicas del suelo cambiarán y

puede que este suelo se vuelva no apto para el cultivo y crecimiento de las plantas.

La tendencia de una agua de reemplazar el calcio y el magnesio adsorbidos en las partículas del suelo por sodio es expresado por el índice denominado Relación de Adsorción de Sodio (SAR por sus siglas en inglés, *sodium adsorption ratio*) y es calculado mediante la siguiente fórmula;

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca + Mg)}{2}}}$$

En la cual los iones Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} representan las concentraciones en miliequivalentes por litro de los iones respectivos.

Para que este índice sea representativo, no deben producirse precipitaciones de sales cálcicas o magnésicas como consecuencia de la evapotranspiración.

En el anexo 3 se encuentran los valores de SAR obtenidos para las muestras de agua subterránea colectadas en el área de estudio y su distribución espacial en la figura 34.

La distribución geográfica del valor obtenido de SAR en el área de interés señala que los valores mas bajos de este índice se localizan en la región sur y noroeste del área de estudio. El valor promedio de este índice es 1, aumentando en la región noreste cerca de la localidad Santa Rita (valor máximo de 6.1).

El Laboratorio de Salinidad de los Estados unidos de América propuso un diagrama, diagrama de Wilcox, para la clasificación del agua para usos agrícolas y se basa en las siguientes características;

- 1) La concentración total de sales solubles expresada mediante la conductividad eléctrica en $\mu\text{mhos/cm}$ a 25°C .
- 2) La concentración relativa del sodio con respecto al calcio y magnesio, es decir el índice de relación de adsorción de sodio.

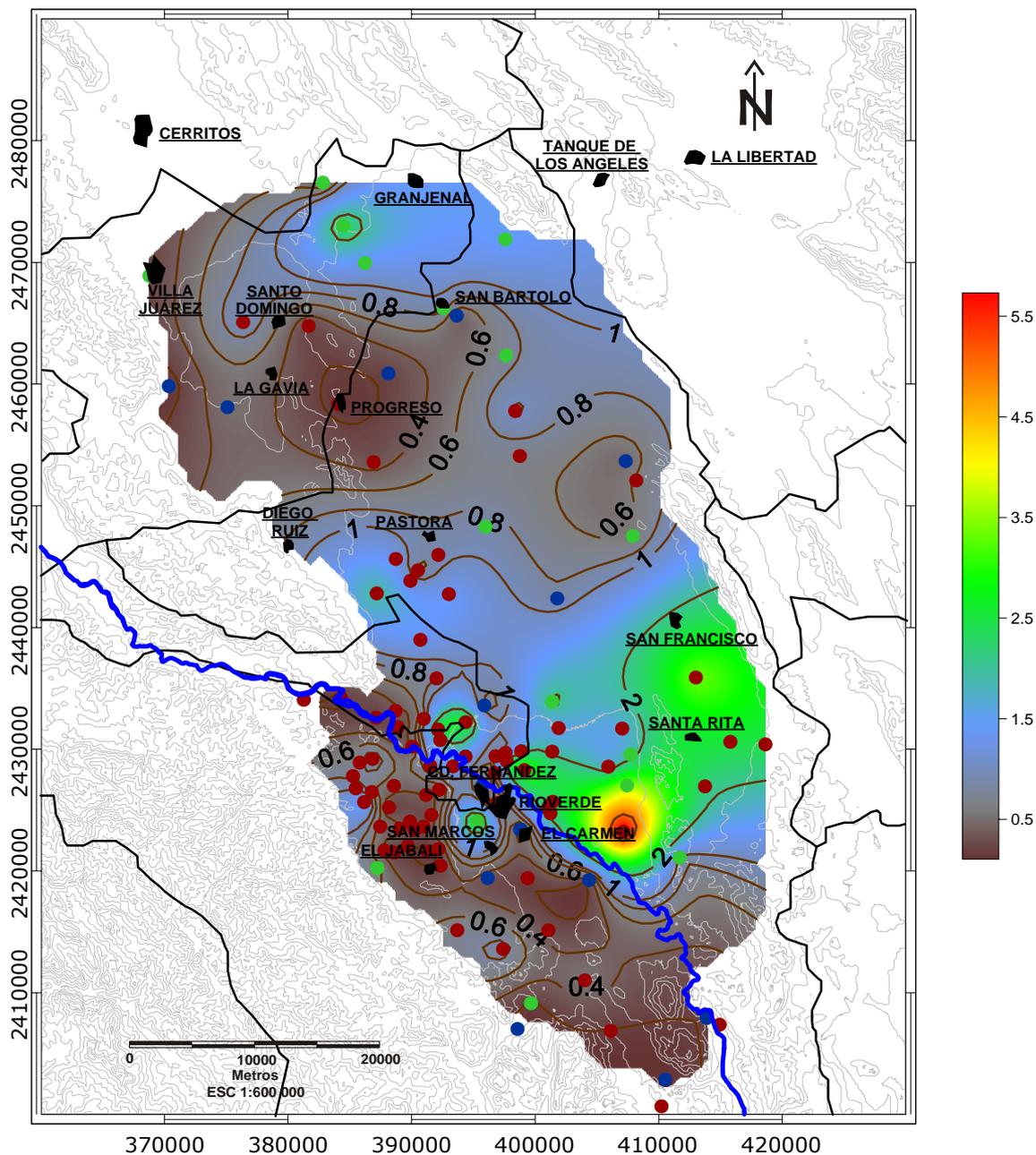


Figura 34 Distribución espacial de la concentración de adsorción de sodio (SAR) en el agua del área de interés

En la figura 35 se puede observar la distribución de las muestras en los diferentes campos de dicho diagrama establecidos al combinar los valores de conductividad eléctrica y el peligro de la salinización del suelo.

De acuerdo con los resultados de la clasificación hecha, el 37% de las muestras se clasificaron como de tipo C4S1, el 32% como tipo C3S1, el 26% como C2S1, el 3% como de tipo C4S2, el 1% como tipo C1S1 y finalmente 1% como de tipo C4S3. En la figura 36, se muestra la distribución porcentual de cada tipo de agua identificado en la zona de estudio.

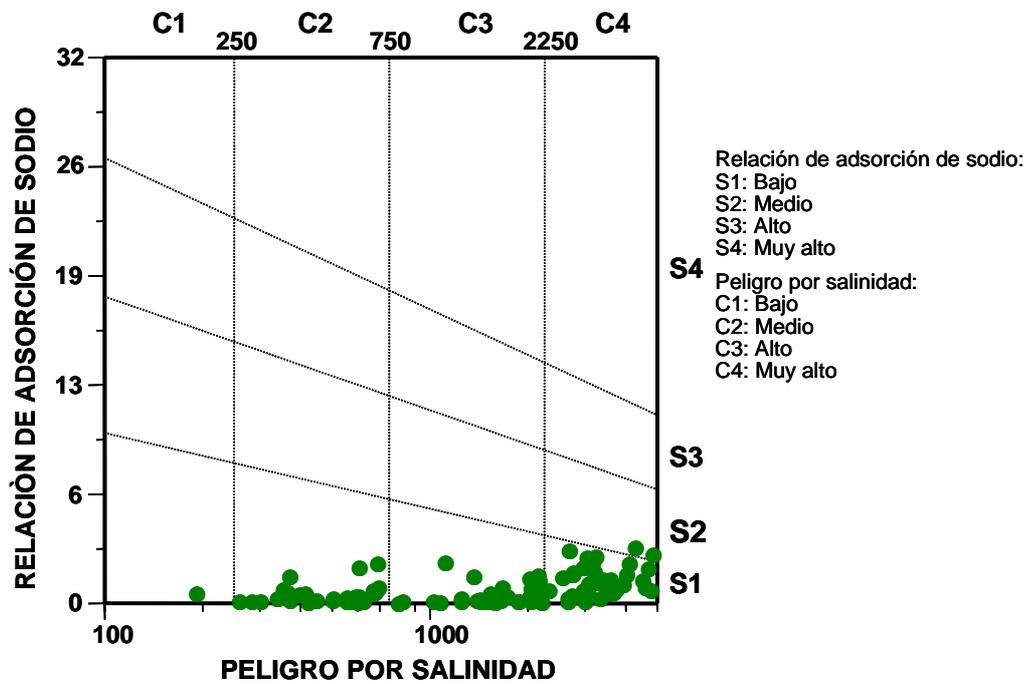


Figura 35 Clasificación de agua para uso agrícola

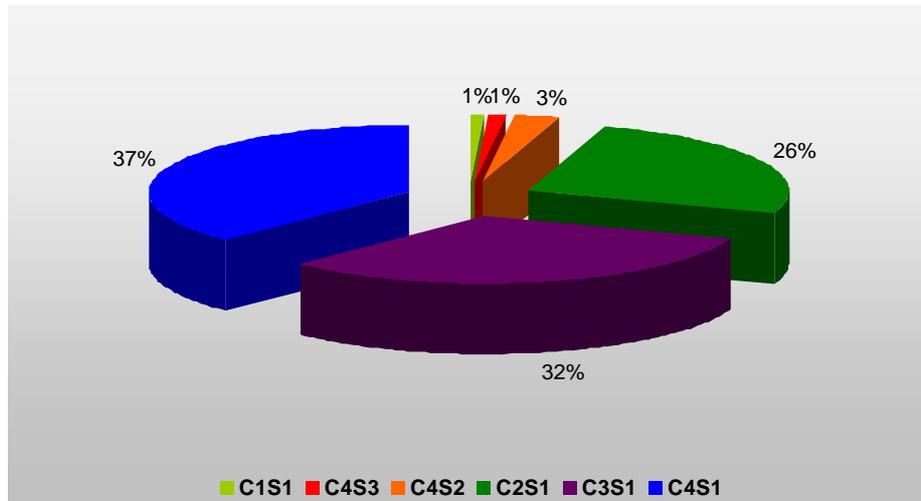


Figura 36 Distribución porcentual de los tipos de agua identificados en el área de estudio de acuerdo con la clasificación de agua para uso agrícola
La distribución geográfica de los tipos de agua clasificados se muestra en la figura 37.

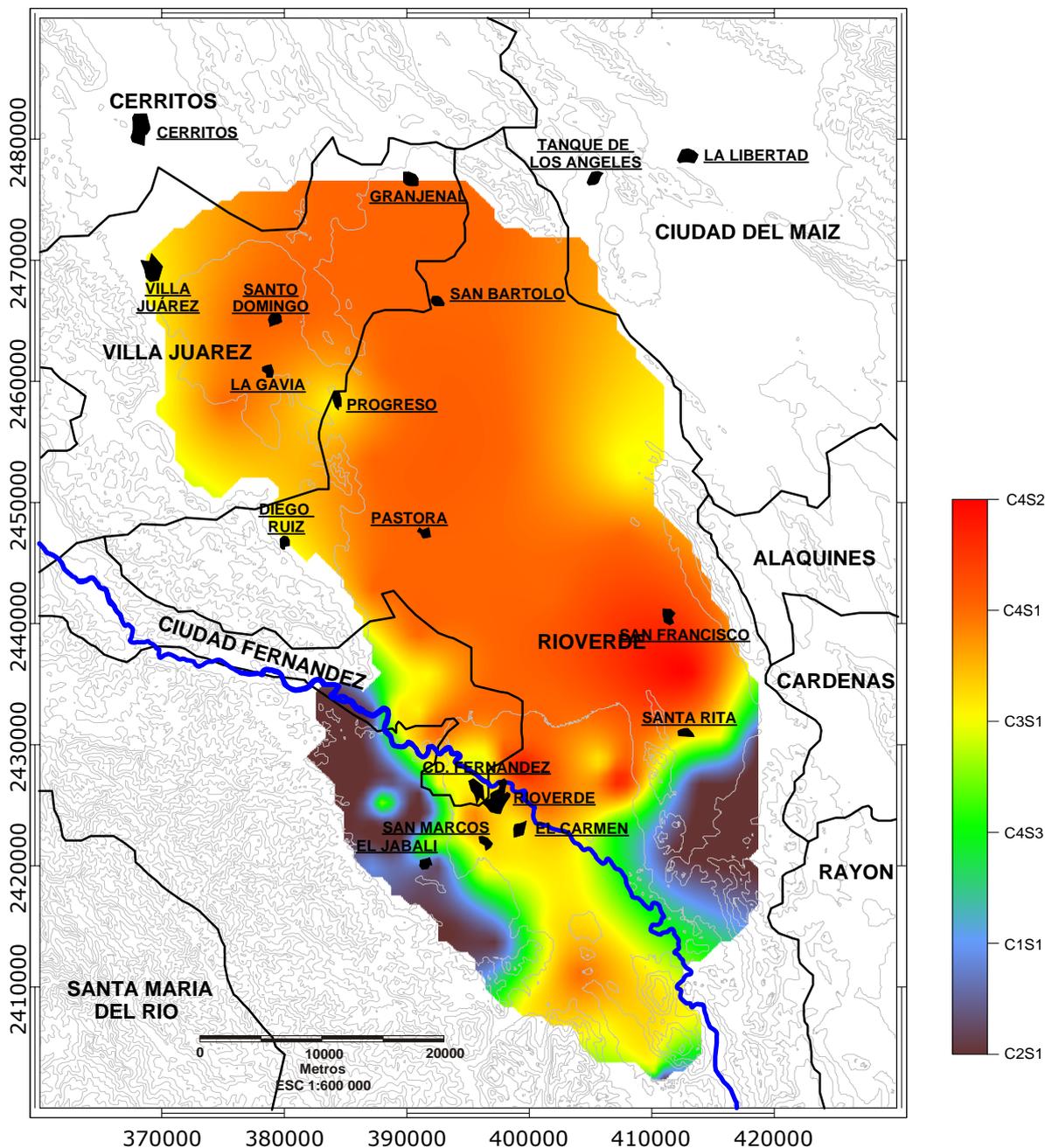


Figura 37 Distribución espacial de los tipos de agua de acuerdo con la clasificación de agua para riego en el área de interés

Se observa que los tipos C4S1 y C4S2 se encuentran ampliamente distribuidos y predominan en la porción centro y norte del área de estudio. Sobre el margen izquierdo del Río Verde, cerca de la localidad llamada Santa Rita, se localiza una zona donde el agua es clasificada como C2S1 y luego conforme se avanza hacia el noroeste se observan zonas donde el agua cambia a tipo C1S1

para luego seguir con el tipo C4S3 y posteriormente al agua C3S1. En la porción sur del área de interés el tipo de agua que predomina es la C2S1 seguida de la C3S2 y C3S1, predominando esta última más al sureste del área de estudio.

De acuerdo con los resultados obtenidos y en base a la información mostrada en la tabla 18, podemos concluir que el 97% de las muestras son clasificadas como agua baja en sodio, el 2% como agua con contenido moderado de sodio y solamente una muestra es clasificada como agua con alto contenido de sodio. En base en lo anterior se puede considerar que en el área de estudio el peligro por sodio es bajo.

Tabla 18 Categorías de agua establecidas en la calidad de agua para riego (modificado de Lloyd y Heathcote, 1985)

Grupos de agua para irrigación basado en el contenido de sodio	
S1	Agua baja en sodio. Puede usarse en la mayoría de los suelos con escasas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de sodio intercambiable.
S2	Agua con contenido moderado de sodio. Presentará peligro importante por sodio en suelos con textura fina que tienen elevada capacidad de intercambio catiónico, especialmente bajo condiciones pobres de lixiviación, situación que se atenúa con presencia de yeso en el suelo.
S3	Agua con alto contenido de sodio. Puede producir niveles peligrosos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos por lo que requerirán manejo y tratamiento especiales (elevada lixiviación, buen drenaje, adición de materia orgánica). Los suelos yesíferos pueden no desarrollar problemas peligrosos de sodio intercambiable.
S4	Agua muy elevado contenido en sodio. Este tipo de agua generalmente no es apropiada para irrigación, excepto cuando tiene niveles muy bajos de salinidad. <u>La utilización de yeso puede hacer factible la utilización de esta agua para la irrigación.</u>

4.2.3 Peligro por Mg

El peligro por presencia de magnesio (MH por sus siglas en inglés *Magnesium hazard*) fue propuesto por Szabolcs y Darab (1964) para el agua utilizada en irrigación y es determinado mediante la siguiente fórmula (Lloyd y Heathcote, 1985);

$$MH = \frac{Mg}{Ca + Mg} * 100$$

Los cationes se expresan en miliequivalentes por litro, y cuando este índice es mayor a 50, el agua representara un peligro para las plantas. Lo anterior debido a que la capacidad de la planta para absorber el agua disminuye a medida que aumenta el contenido de sales, teniendo la planta que realizar un mayor esfuerzo.

De acuerdo a los resultados obtenidos de este índice (resultados en el anexo 4) se puede determinar que el 13 % de las muestras colectadas presentan un valor de peligro por magnesio superior a 50. La distribución espacial es mostrada en la figura 38, se observa claramente que las zonas donde hay peligro por el elemento en cuestión estén principalmente al margen izquierdo del Río Verde, en la porción centro y sureste de la zona norte del área de estudio.

4.2.4 Peligro por elementos traza

Además de los problemas e inconvenientes que ocasiona la excesiva concentración de elementos mayores utilizada en el agua cuyo fin es la irrigación, un análisis en relación a la concentración de elementos traza debe ser hecho. Pues estos elementos aún cuando sus concentraciones sean consideradas bajas, pueden afectar el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

En general, los valores de elementos traza en el área de estudio son bajos. En la tabla 19 se presentan las concentraciones máximas recomendadas de elementos traza en el agua destinada a la irrigación y el número de muestras que sobrepasan el límite recomendado. Los elementos traza que sobrepasan la concentración máxima recomendada es en primer lugar el fluoruro, el molibdeno y el selenio.

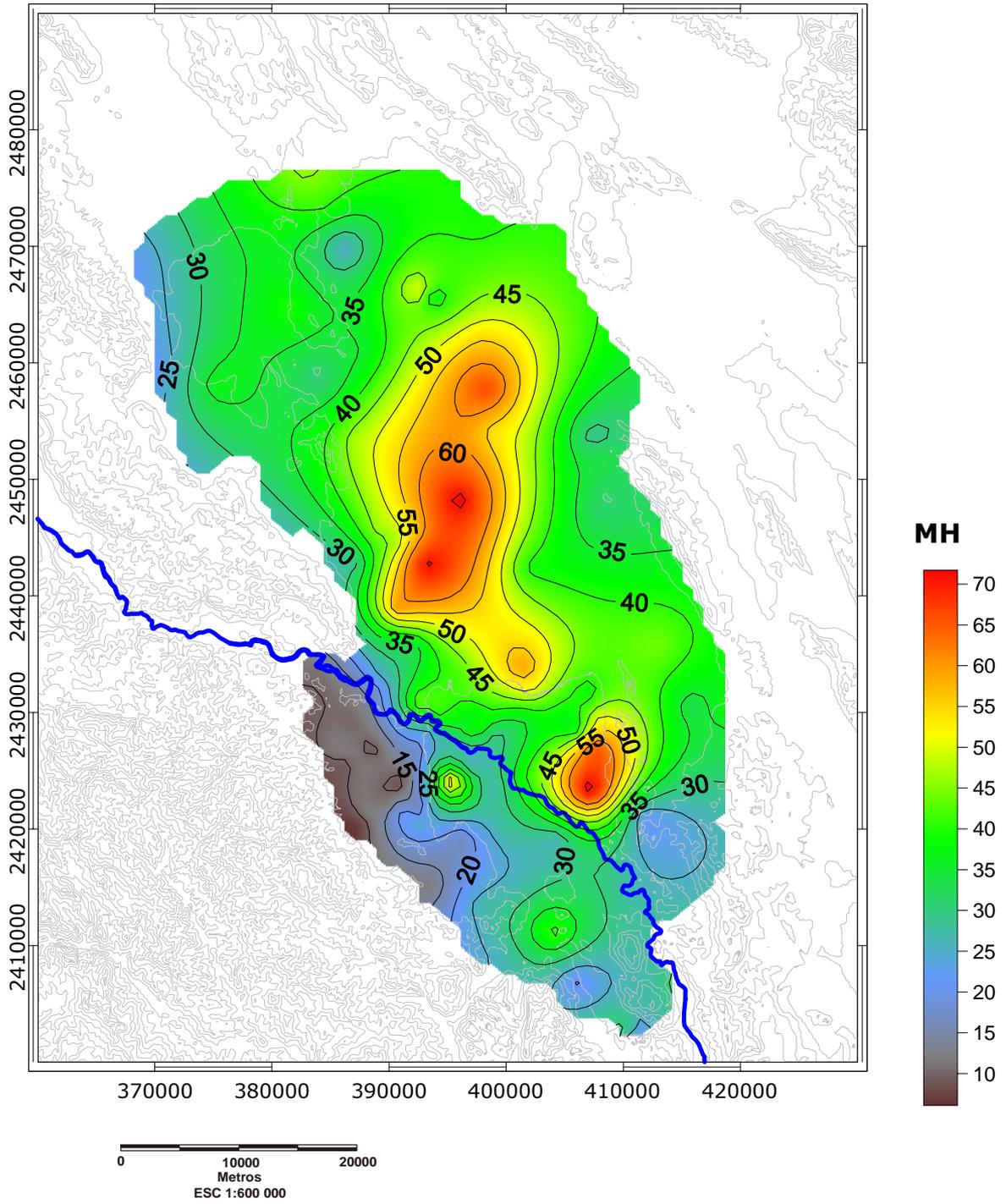


Figura 38 Distribución geográfica de los valores obtenidos para determinar el peligro por Mg en el área de estudio

Tabla 19 Concentraciones máximas recomendadas para diversos elementos traza disueltos en el agua destinada para irrigación (modificada de Lloyd y Heathcote, 1985)

Elemento	Para agua de uso continuo en todo tipo de suelos (mg/L)	N° de muestras	Para hasta 20 años de uso en suelos de textura fina (mg/L)	N° de muestras
Arsénico	0.10	Ninguna	2.0	Ninguna
Cadmio	0.010	1 muestra	0.050	Ninguna
Cobalto	0.050	Ninguna	5.0	Ninguna
Cobre	0.20	Ninguna	5.0	Ninguna
Hierro	5.0	Ninguna	20.0	Ninguna
Plomo	5.0	1 muestra	10.0	Ninguna
Manganeso	0.20	1 muestra	10.0	Ninguna
Molibdeno	0.010	29 muestras	0.050	1 muestra
Selenio	0.020	15 muestras	0.020	15 muestras
Vanadio	0.10	Ninguna	1.0	Ninguna
Fluoruro	1.0	66 muestras	15.0	Ninguna
Zinc	2.0	Ninguna	10.0	Ninguna

5. INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

5.1. Balance iónico

Todas las soluciones deben ser eléctricamente neutras. Es decir, en un volumen dado de agua, la suma de las cargas de todos los cationes debe ser igual a la suma de las cargas de todos los aniones (Fitts, 2002). La exactitud de los análisis para elementos mayores puede ser estimada por medio de la condición de Electroneutralidad (EN) en base a la característica mencionada anteriormente. El error en el balance iónico es expresado por la diferencia de los iones como un porcentaje de la suma y es calculado mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{Error}(\text{Electroneutralidad}) = \frac{(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones})}{(\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})} \cdot 100$$

Donde los cationes y aniones son expresados como meq/L. Las sumas son hechas de los cationes K^+ , Mg^{2+} , Na^+ y Ca^{2+} , y los aniones Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} y NO_3^- (Appelo y Postma 1996).

El método tiene ciertos inconvenientes ya que siempre es posible que dos errores se cancelen y el método es válido solamente si todos los iones mayores son analizados. Por otro lado, si el análisis es dominado por algunos iones, por ejemplo aguas salinas en donde los iones predominantes son el Na^+ y el Cl^- , grandes errores en los otros iones producirá pequeños errores en el balance iónico y por lo tanto no serán detectados (Lloyd y Heathcote, 1985).

Freeze y Cherry (1979) recomiendan que 5% de error es un límite razonable para que los análisis sean válidos; sin embargo, se pueden aceptar hasta errores menores al 10 %.

Se calculó el % de error bajo el criterio de balance de cargas (Electroneutralidad) para las 109 muestras recolectadas para corroborar la exactitud de las concentraciones de elementos mayores (ver anexo 5). Los resultados obtenidos señalan que el 91.7% de las muestras presentan un porcentaje menor al 5 % de error, el 7.3% son mayores a 5% pero menores al 6% de error y solo 1 muestra presento un valor de 6% de error. Debido a los resultados obtenidos, se consideraron validas todas las muestras para su análisis e interpretación. Se presenta de manera grafica en la figura 39 los errores obtenidos en cada una de las muestras analizadas.

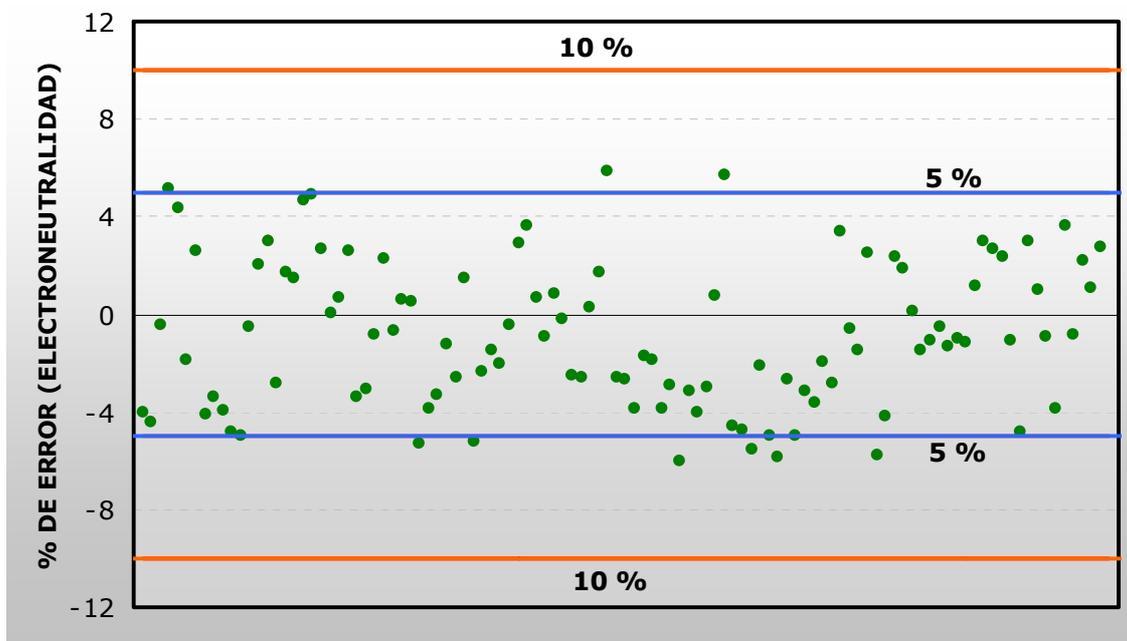


Figura 39 Gráfica de resultados de % de error correspondientes a las 109 muestras recolectadas en el área de estudio

5.2 Diagramas de Stiff

Una labor importante en las investigaciones sobre agua subterránea es la recopilación y presentación de datos químicos de una manera conveniente para la inspección visual. Para este propósito existen algunos métodos gráficos disponibles de uso común (Freeze y Cherry, 1979).

En el procedimiento de representación de datos para la interpretación se recomienda que los datos sean representados de dos formas diferentes, una es en mapas de distribución de los parámetros pertinentes y otra mediante diagramas de relación entre los parámetros relevantes. Se debe poner énfasis en que los dos tipos de representación deberán ser usados paralelamente. Además, mientras la representación es esencial para la interpretación, también es importante para mostrar datos coherentemente y para comunicar la complejidad de la interpretación (Lloyd y Heathcote, 1985).

Los diagramas de Stiff están compuestos por 3 ejes horizontales sobre los que se grafican los cationes en miliequivalentes por litro a la izquierda de un eje vertical y los aniones a la derecha del mismo eje. Cuando los datos son graficados y los puntos son conectados, el resultado es un polígono cuya forma es representativa de un tipo de agua subterránea en particular (Kehew, 2001).

El orden como fueron graficados los cationes del lado izquierdo, de arriba a bajo, fue Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} y del lado derecho correspondiente a los aniones se ubicó al Cl^- , HCO_3^- y SO_4^{2-} (figura 40).

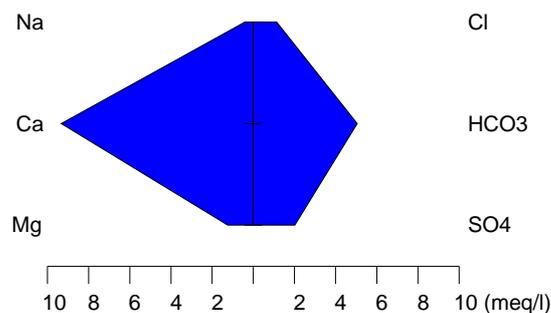


Figura 40 Diagrama de Stiff correspondiente a una muestra del área de estudio

Como se mencionó anteriormente, los diagramas de Stiff permiten establecer agua con características químicas similares. Observando la forma de los diagramas y ubicándolos en un plano de acuerdo con las coordenadas de cada aprovechamiento muestreado del área de estudio, se puede visualizar e identificar los iones predominantes. En primera instancia se aprecia en la figura

41, que existen zonas en donde la composición del agua es bastante homogénea identificándose claramente los iones que están predominando.

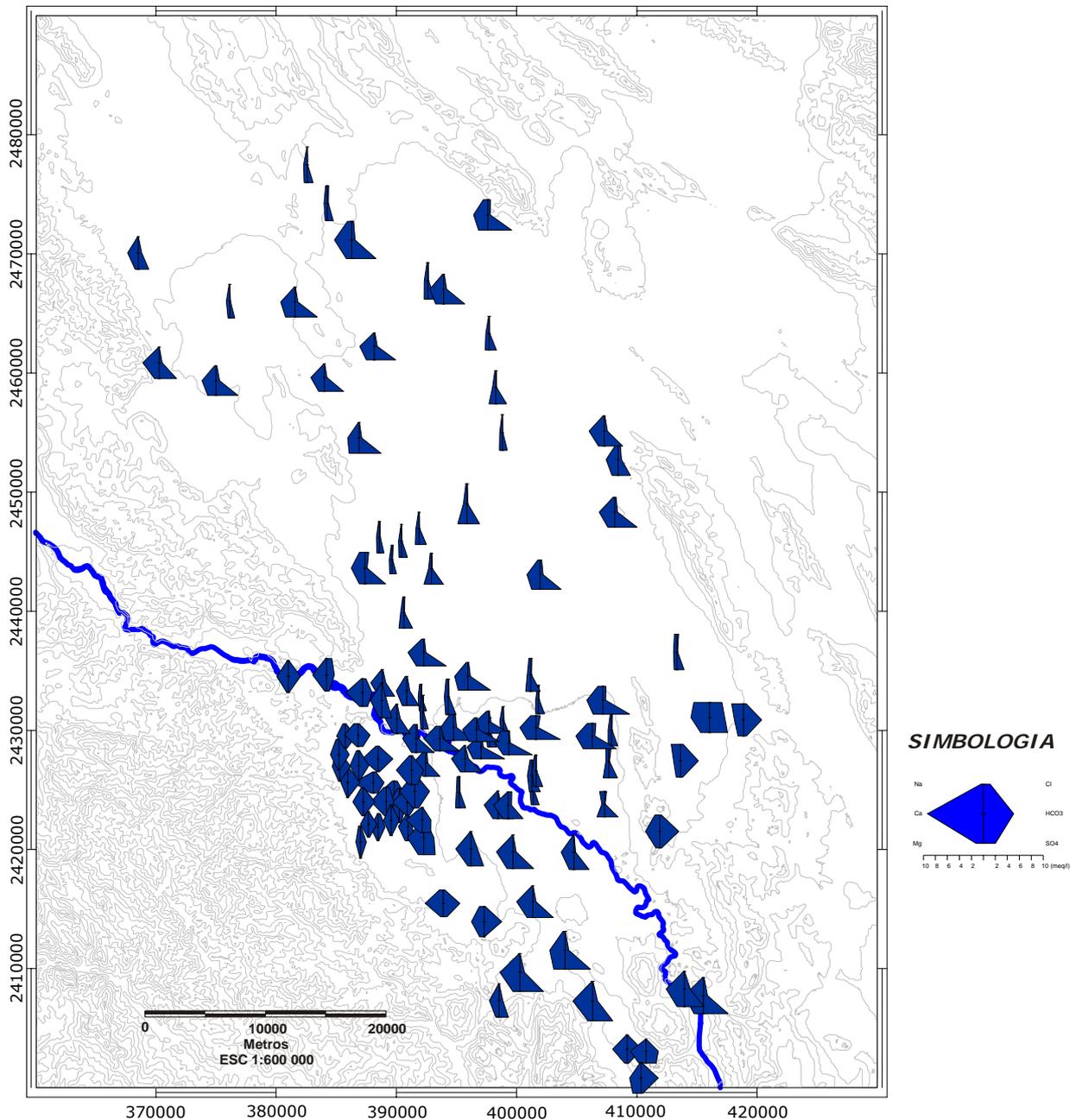


Figura 41 Distribución de Diagramas de Stiff en el área de estudio

Se observa en los diagramas que los iones HCO_3^- y Ca^{2+} predominan en la zona sur y sur-oeste del área de estudio. Los iones SO_4^{2-} y Mg^{2+} se encuentran en más alta concentración en relación a los demás iones presentando un diagrama

alargado y de menor área que los anteriores ubicándose en su mayoría al norte de la zona de estudio y al margen izquierdo del Río Verde. Otro diagrama característico es en el que se observa un dominio de los iones SO_4^{2-} y Ca^{2+} , que al igual que el anterior, se encuentran principalmente distribuidos en la zona norte del área de estudio, en las áreas cercanas a las sierras; así como, también en la parte plana del valle. Es importante mencionar que otra característica importante del agua que nos muestran los diagramas, es la salinidad del agua extraída de los aprovechamientos, puesto que a menor área mayor es la salinidad.

5.3 Familias de Agua por ión dominante

El diagrama triangular de Piper ha sido universalmente usado para ilustrar diferencias, variaciones y tendencias en la química del agua. En este diagrama, a diferencia de las carencias o limitaciones de los diagramas de Stiff, muchas muestras pueden ser graficadas (Kehew, 2001).

Las especies iónicas mayores de las aguas naturales son Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- y SO_4^{2-} . Un diagrama ternario puede mostrar la composición en porcentaje de tres iones. Esto se hace mediante la suma del Na^+ y K^+ para representar a los cationes en un triángulo y sumando CO_3^{2-} y HCO_3^- para mostrar los aniones en otro. Los iones mayores son graficados en dos triángulos ubicados en la base del diagrama como el porcentaje en miliequivalentes por litro de aniones y cationes (Lloyd y Heathcote, 1985). Cada vértice del triángulo representa una concentración del 100% de cada uno de los tres constituyentes (Fetter, 2001).

Diversos aspectos pueden ser inferidos del diagrama triangular de Piper del área de estudio realizado con la ayuda del software AQUACHEM (figura 42). En primer lugar, podemos observar que en el triángulo de los aniones existe un predominio en algunas muestras del ión HCO_3^- , lo cual significa que el agua está circulando por los materiales calcáreos que abundan en la región. Otro

anión de importancia es el SO_4^{2-} , lo que indica que además de que el agua disuelve materiales calcáreos, también está disolviendo otros como son el yeso y/o anhidrita. En relación al triángulo de los cationes, destaca el predominio del Ca^{2+} lo cual ratifica la abundancia de minerales que contienen calcio en su composición. Solo en algunas muestras se observa el predominio del Mg^{2+} o Na^+ , lo cual indica la posibilidad de intercambio catiónico.

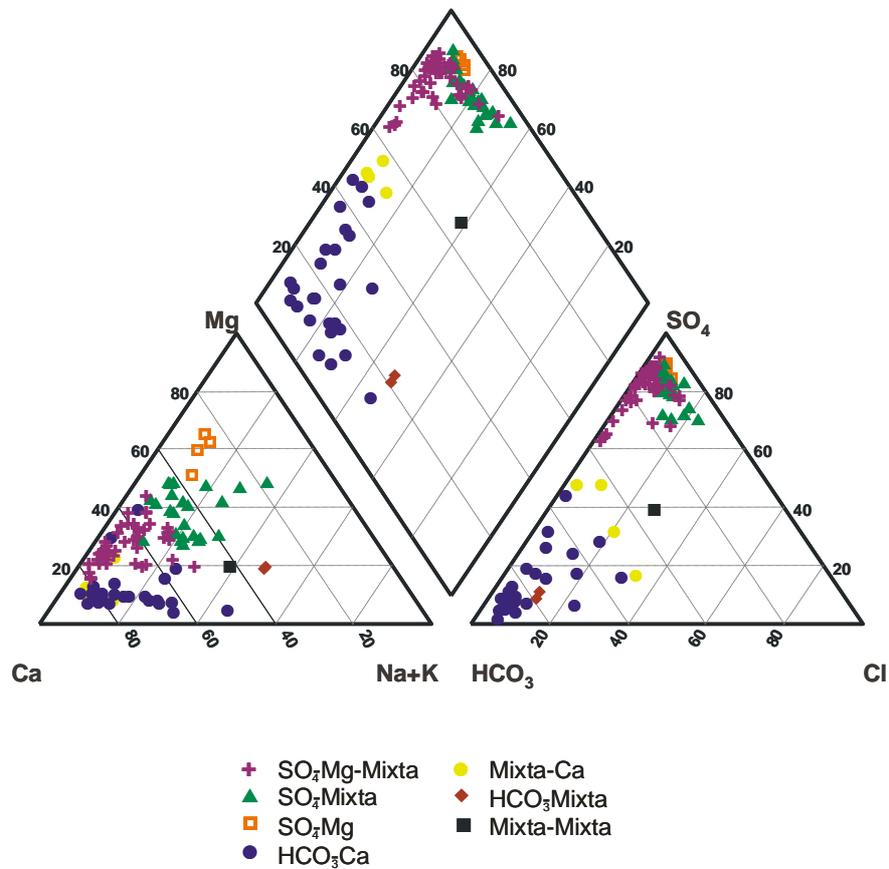


Figura 42 Diagrama triangular de Piper para las muestras de agua subterránea en el área de estudio

Además el diagrama de Piper es utilizado para hacer una clasificación del agua por ión dominante. Realizando esta clasificación se detectaron 7 familias de agua y son; HCO₃-Ca, HCO₃-Mixta, Mixta-Ca, Mixta-Mixta, SO₄-Ca, SO₄-Mg y SO₄-Mixta. La tabla 20 concentra los aprovechamientos en la familia de agua en la que es clasificado y la figura 43 muestra la distribución porcentual de cada familia de agua clasificada por ión dominante.

Tabla 20 Clasificación de los resultados obtenidos en los aprovechamientos en base a la familia de agua a la que pertenecen

FAMILIA DE AGUA	Nº APROVECHAMIENTO
HCO ₃ - Ca	1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 86, 95, 96, 97, 98, 108
HCO ₃ - Mixta	64, 105
Mixta- Ca	6, 7, 15, 24
Mixta - Mixta	106
SO ₄ -Ca	5, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 34, 39, 40, 41, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 57, 59, 61, 66, 67, 72, 73, 74, 77, 78, 82, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 99, 100, 102, 103, 104
SO ₄ - Mg	68, 69, 79, 81
SO ₄ - Mixta	30, 32, 35, 38, 42, 43, 55, 56, 58, 60, 62, 63, 65, 70, 71, 75, 76, 80, 83, 84, 101, 107, 109

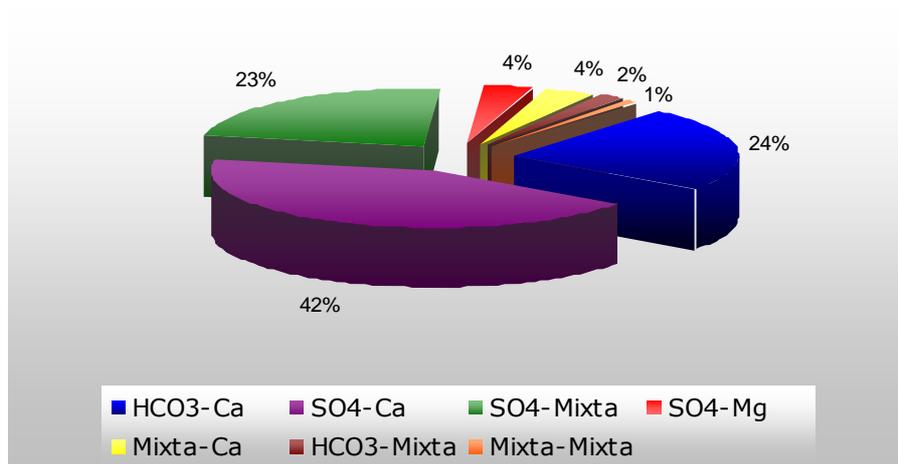


Figura 43 Distribución porcentual de las familias de agua identificadas en el área de interés

En la figura 43 se puede observar que, de acuerdo a la distribución de los porcentajes, solo 3 familias pueden considerarse como principales, ya que abarcan el 89% del total. Debido a esta razón se construyó un nuevo diagrama triangular de Piper (figura 44), donde se agrupa el porcentaje restante dentro de las tres familias de agua principales identificadas de acuerdo a las concentraciones de elementos mayores.

Se incluyó dentro de la familia HCO₃-Ca a las muestras de las familias HCO₃-Mixta, Mixta-Ca y Mixta-Mixta. Para la familia SO₄-Ca quedaron solamente las muestras que se habían clasificado dentro de ésta desde un principio. En la

familia SO_4 -Mg-Mixta quedaron incluidas las familias SO_4 -Mg y SO_4 -Mixta. La figura 45 muestra la distribución porcentual y la tabla 21 las claves de los aprovechamientos que quedaron agrupados dentro de las 3 familias de agua principales en la zona de estudio.

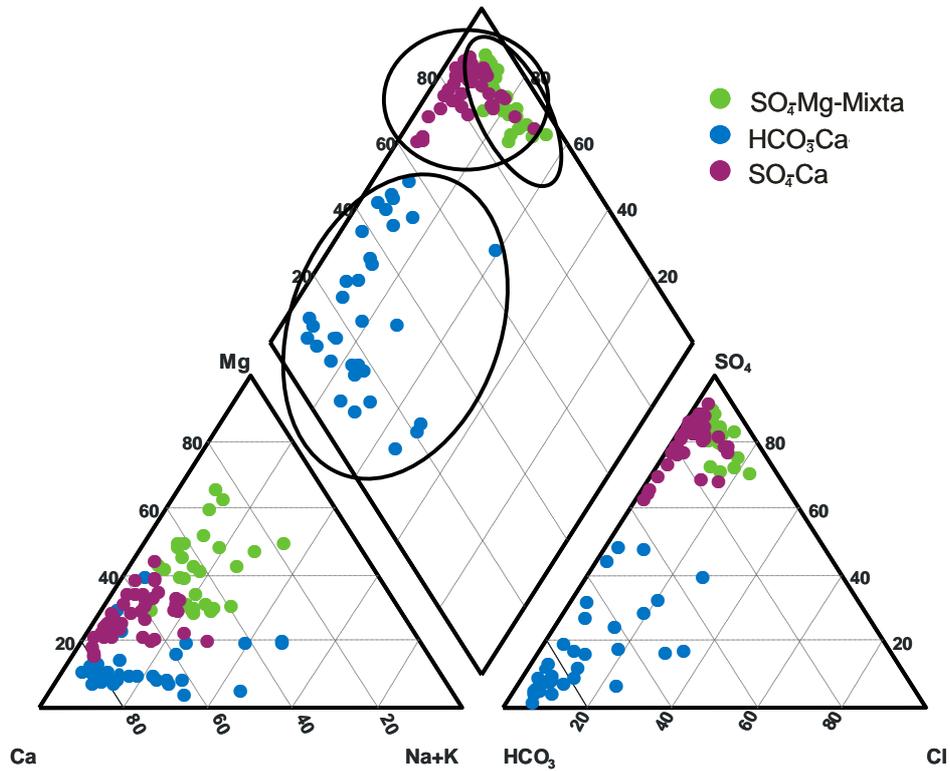


Figura 44 Diagrama triangular de Piper mostrando las 3 familias de agua principales

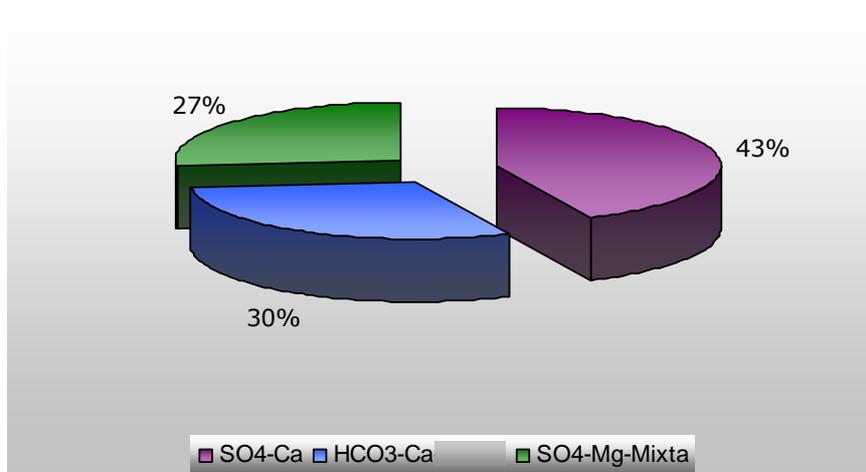


Figura 45 Distribución porcentual de las familias de agua principales del área de estudio

FAMILIA DE AGUA	Nº APROVECHAMIENTO
HCO ₃ -Ca	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 64, 86, 95, 96, 97, 98, 105, 106, 108
SO ₄ -Ca	5, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 34, 39, 40, 41, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 57, 59, 61, 66, 67, 72, 73, 74, 77, 78, 82, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 99, 100, 102, 103, 104
SO ₄ -Mg-Mixta	30, 32, 35, 36, 37, 38, 42, 43, 55, 56, 58, 60, 62, 63, 65, 68, 69, 70, 71, 75, 76, 79, 80, 81, 83, 84, 101, 107, 109

Tabla 21 Clasificación de aprovechamiento de acuerdo a las 3 familias de agua principales

Observando la figura 41 que corresponde a la distribución espacial de los diagramas de Stiff y la figura 46 en donde se muestra la distribución geográfica de las familias de agua clasificadas por ión dominante, se pueden inferir varias características de la química del agua subterránea en el área de estudio.

La familia HCO₃-Ca se encuentra distribuida principalmente en la zona suroeste del área de estudio (al sur del Río Verde y de la Sierra La Noria), en las inmediaciones de localidades como El Jabalí, San Martín, San Diego, El Refugio, Caldera Vieja entre otras y un poco mas al sur en las inmediaciones de la localidad llamada Agua Dulce; así como, también en la zona noreste del área de interés se pueden localizar algunos puntos cercanos a la localidad denominada Santa Rita.

La familia SO₄-Ca se encuentra distribuida en la planicie en localidades como El Refugio, las Alazanas, San José del Tapanco, etc; así como, al sur de la Sierra El Vetado y al norte de El Cordón San Francisco, entre otras. Mientras que la familia SO₄-Mg-Mixta se identificó en diversas localidades como son; San Bartolo, Progreso, Pastora, Angostura, La Gavia en Villa Juárez, entre otras.

Haciendo una diferenciación de cada familia de agua con relación a sus concentraciones (tabla 22), se puede establecer que la familia con menor salinidad es la familia HCO₃-Ca con una conductividad eléctrica promedio de 523 (µmhos/cm) seguida de la familia SO₄-Ca con una conductividad eléctrica promedio de 2,091 (µmhos/cm) y por último la familia con mayor salinidad es

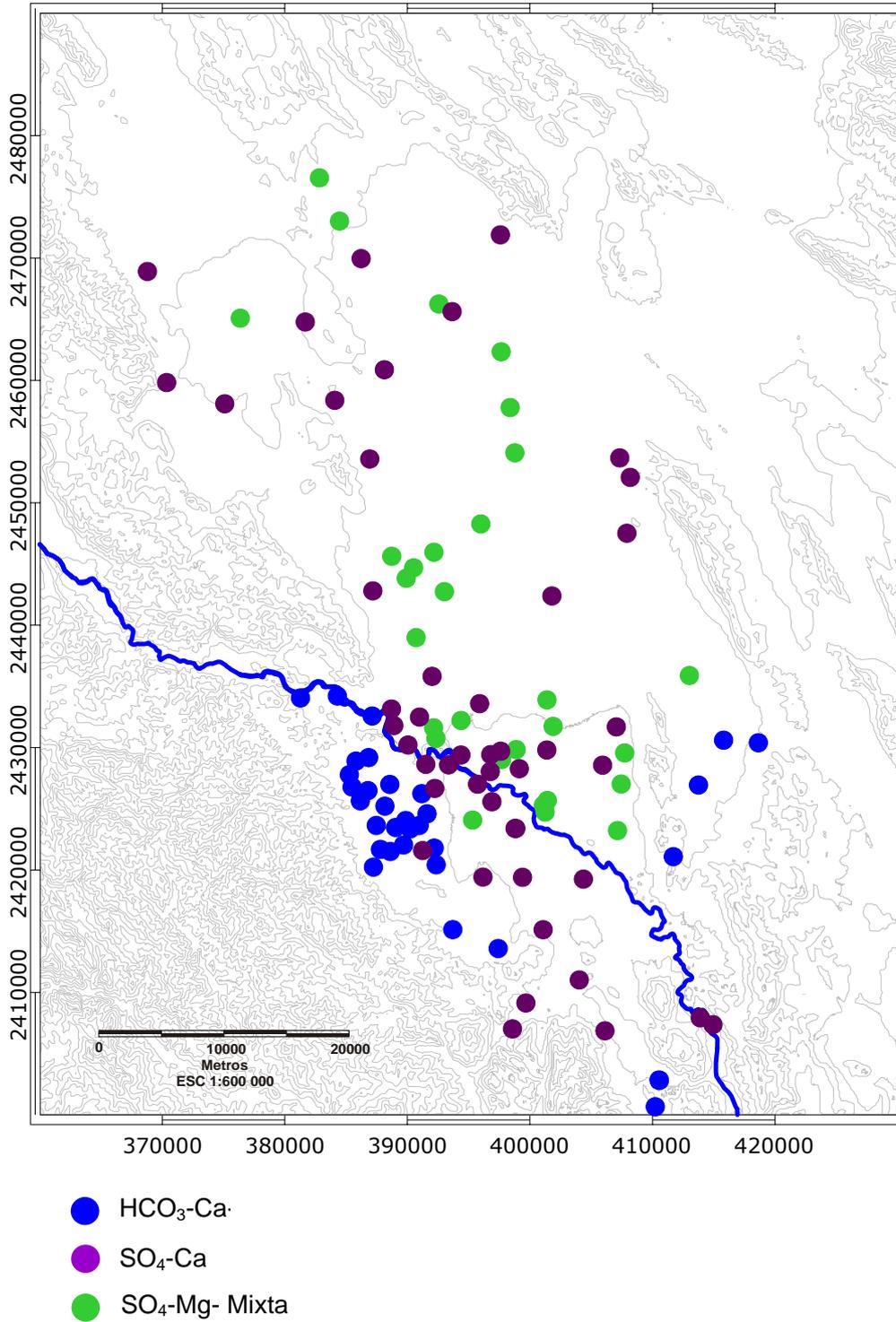


Figura 46 Distribución espacial de las tres principales familias de agua identificadas en el área de estudio

la $\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$ con una conductividad de 3,808 en promedio. En la figura 47 se presenta un mapa de isovalores de conductividad eléctrica y las familias de agua para observar espacialmente la relación descrita anteriormente.

El incremento en la salinidad condiciona la evolución del agua subterránea dentro del medio geológico en el área de estudio, puesto que se observa un incremento no solo en la conductividad sino también en las concentraciones de todos los iones mayores, a excepción del N-NO_3 el cual es más alto en la familia $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ debido a la intensa actividad agrícola desarrollada en esa zona.

Tabla 22 Tabla de concentraciones promedio de parámetros de campo y de laboratorio para las

	PARAMETROS DE CAMPO							PARÁMETROS DE LABORATORIO							
	TEMP °C	pH	Eh (mV)	STD (mg/l)	COND. ELECT. $\mu\text{mhos/cm}$	Ox (mg/l)	ALC. TOT. (mg/lit CaCO_3)	HCO_3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SO_4 (mg/l)	N-NO_3 (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)
$\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$															
Media	22.9	7.03	285	2665	3808	3.4	177.7	260.1	174.1	2177.1	4.2	206.2	23.0	406.8	275.5
Desv Est	2.8	0.24	66	779	1113	1.9	49.0	52.1	131.6	770.9	6.2	158.7	11.0	55.8	145.9
Max	27.1	7.65	396	5194	7420	8.0	322.8	387.4	585.2	5000.0	33.6	880.0	44.0	578.0	712.0
Min	16.3	6.64	134	1421	2030	0.5	82.8	126.5	22.1	1290.0	0.1	40.0	7.3	295.0	125.1
Percentil 75	24.9	7.15	313	3122	4460	4.3	190.3	276.7	199.3	2500.0	4.1	270.0	32.0	425.0	286.0
Percentil 25	21.4	6.83	241	2191	3130	2.3	144.2	237.2	94.9	1725.0	0.8	114.0	12.0	379.0	181.9
n	29	29	29	29	29	29	29	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0
$\text{HCO}_3\text{-Ca}$															
Media	24.7	6.99	375	366	523	4.9	317.7	249.4	22.4	57.7	6.3	23.3	5.7	88.3	11.1
Desv Est	2.0	0.22	100	132	189	1.5	257.3	73.8	26.0	64.0	5.2	25.0	4.0	35.1	9.0
Max	28.8	7.47	868	774	1105	7.2	1105.0	379.5	145.5	287.0	25.8	122.0	18.0	187.0	36.5
Min	18.2	6.61	234	133	190	1.5	69.7	110.7	4.8	5.0	0.6	5.0	2.0	27.7	1.1
Percentil 75	25.6	7.14	389	433	619	5.8	550.0	308.3	28.5	85.0	8.2	25.1	6.0	116.6	13.8
Percentil 25	23.8	6.86	334	258	368	3.9	152.8	205.6	6.4	15.0	3.0	8.4	3.0	59.2	5.2
n	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
$\text{SO}_4\text{-Ca}$															
Media	23.3	6.93	309	1464	2091	3.8	183.7	255.2	49.4	1235.2	2.7	59.6	8.4	385.4	105.0
Desv Est	3.6	0.28	61	453	647	2.2	40.6	58.1	57.9	381.4	2.2	60.7	4.6	68.5	42.4
Max	31.7	7.77	455	2492	3560	10.0	263.0	458.5	240.4	1900.0	11.5	294.0	19.5	520.5	176.3
Min	13.8	6.53	88	713	1019	0.2	99.2	118.6	6.3	500.0	0.1	7.0	3.0	228.6	33.0
Percentil 75	25.4	7.14	343	1852	2645	5.2	209.6	284.6	58.9	1492.5	3.6	74.0	11.2	417.2	142.5
Percentil 25	21.3	6.72	286	1077	1539	2.5	154.2	225.3	9.5	995.0	1.0	19.0	5.0	351.5	71.9
n	47	47	47	47	47	47	44	47	47	47	47	47	47	47	47

familias de agua identificadas en el área de estudio

5.4 Facies hidrogeoquímicas

El diagrama triangular de Piper tiene otra función, clasificar el tipo de agua basada en la localización de los puntos graficados en los triángulos. Las clases de tipos de agua también se conocen como facies hidrogeoquímicas.

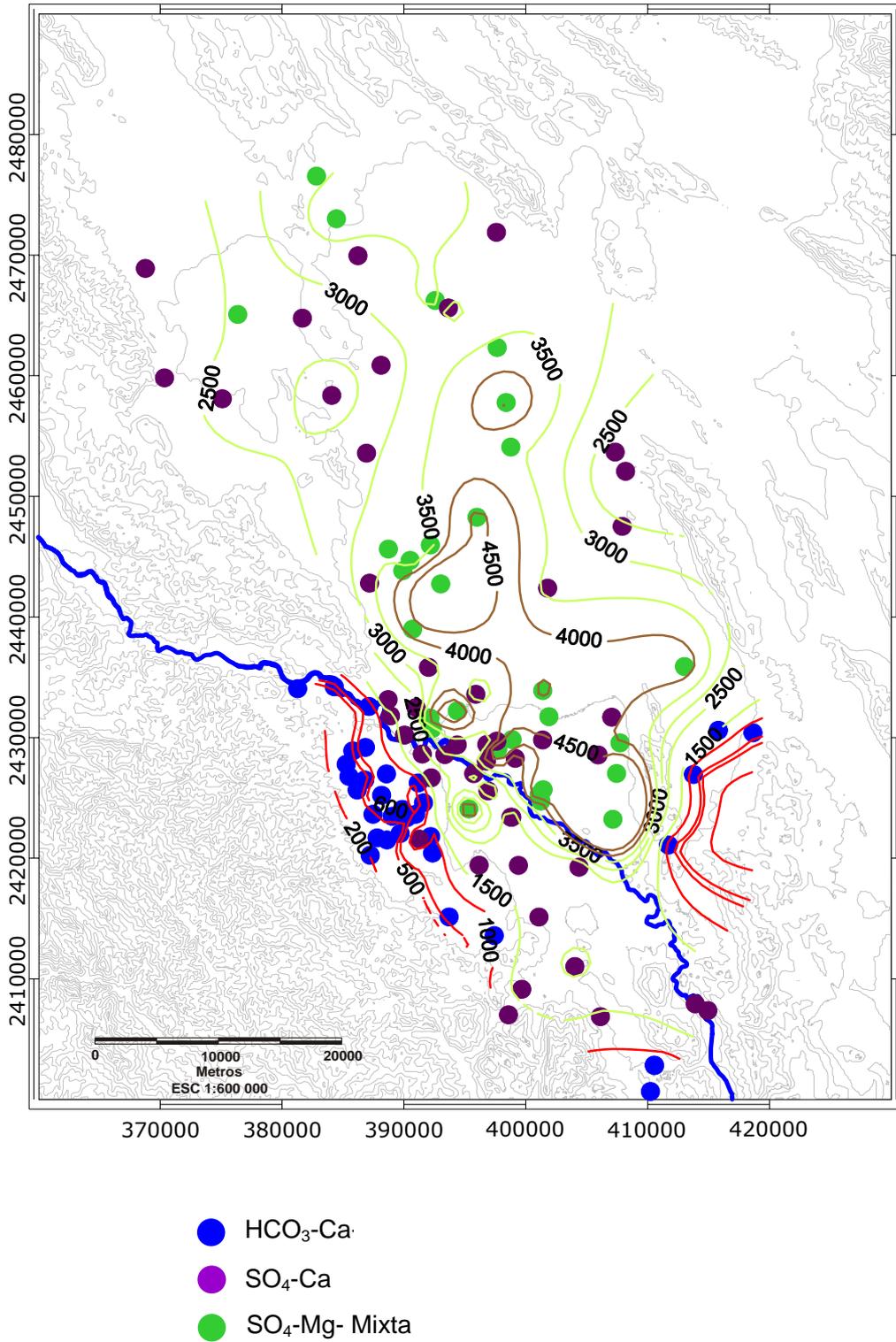


Figura 47 Distribución de valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{mhos/cm}$) en el área de estudio y su relación espacial con las principales familias de agua identificadas

La definición de una categoría de composición está comúnmente basada en subdivisiones del diagrama ternario de Piper sugeridas por Back (1961) y Back and Hanshaw (1965) (Freeze y Cherry, 1979).

Las hipótesis concernientes a la evolución química del agua subterránea son enormemente auxiliadas por estos diagramas debido a que éstos son indicativos de procesos geoquímicos específicos que tienen lugar en los acuíferos (Kehew, 2001). Las facies están en función de la litología, cinética de soluciones y patrones de flujo del acuífero (Back, 1960, 1966 en Fetter, 2001)

En el área de estudio fueron identificadas 21 facies hidrogeoquímicas diferentes y se encuentran resumidas en la tabla 23 (facie hidrogeoquímica y número de aprovechamiento). En la zona de estudio el 37% de las muestras predominan los compuestos en el siguiente orden Ca-Mg-SO₄, confirmándose que existe una relación entre los materiales por los cuales circula el agua, puesto que se sabe de la existencia de minerales que están aportando estos iones a la composición del agua.

Tabla 23 Clasificación de aprovechamientos de acuerdo a las facies hidrogeoquímicas identificadas en el área de estudio

FACIE HIDROGEOQUÍMICA	APROVECHAMIENTO
	28, 29, 30, 31, 34, 35, 37, 39, 40, 41, 44, 46, 47, 49,
Ca-Mg-SO ₄	50, 51, 52, 53, 54, 58, 59, 61, 66, 67, 70, 71, 72, 73, 74, 77, 78, 82, 83, 88, 89, 92, 94, 100, 102, 104,
Ca-HCO ₃	1, 4, 9, 12, 14, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 96, 98
Mg-Ca-SO ₄	60, 62, 63, 68, 69, 75, 76, 79, 80, 81, 107
Ca-Na-HCO ₃	2, 10, 11, 13, 108
Ca-Mg-Na-SO ₄	32, 36, 38, 42, 43, 45, 57, 65, 84
Ca-HCO ₃ -SO ₄	6, 15, 16, 25
Ca-HCO ₃ -Cl	3, 19, 24
Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃	5, 7, 27, 48, 87, 91, 103
Ca-SO ₄	33, 90
Ca-SO ₄ -HCO ₃	26, 99
Ca-Mn-Mg-SO ₄	93, 101
Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄	8, 95
Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃ -Cl	106
Ca-Mg-HCO ₃	86
Ca-Na-Mg-HCO ₃	97
Mg-Ca-Na-SO ₄	109
Mg-Na-SO ₄	55
Mg-Na-Ca-SO ₄ -Cl	56
Mn-Ca-SO ₄	85
Na-Ca-Mg-HCO ₃	105
Na-Ca-HCO ₃	64

En general el comportamiento de las facies hidrogeoquímicas obedece a las familias de agua y diagramas de Stiff identificados en el área de interés tanto en distribución como en composición. Las facies Ca-Mg-SO₄ y Mg-Ca-SO₄ se encuentran distribuidas en norte del área de estudio y al sur, cerca del margen derecho del Río Verde. La facie Ca-HCO₃ se distribuye principalmente al sur del área de estudio. Todas las demás se pueden considerar como muestras intermedias de las tres principales familias de agua identificadas desde el punto de vista de la evolución química del agua subterránea en la región.

5.5 Estadística

Suele suceder y es muy común en la práctica que las concentraciones de algunos elementos sean reportados como no detectables (mayores o menores que el límite de detección). Estos valores están determinados por el límite superior o inferior de detección del instrumento o del método analítico usado.

Como en realidad no existe una concentración que sea cero de ningún elemento que se pueda analizar, el hecho de tener valores, como en nuestro caso, por debajo del límite de detección especialmente en los resultados reportados de metales y traza (Li, Mn, Fe, Pb, Sb, Cd, Mo, Se, As, Zn, Cu, Co, Mn y V) se procedió a utilizar una técnica sugerida por Van Trump and Miesch (1977) (Güler et al., 2002).

Con este método se reemplaza el valor no detectado por $\frac{3}{4}$ el límite de detección del método analítico utilizado para analizar los parámetros químicos. Ya que si no se hiciera esto, los valores no serían apropiados para llevar a cabo un gran número de técnicas estadísticas incluidas las utilizadas en este estudio.

Otro aspecto que se considero para el manejo de datos fue el redondeo de éstos. La técnica utilizada fue la descrita por Verma (2005) y fue aplicada a los datos para la construcción de tablas, gráficas y anexos. Él hace referencia en

su libro a 3 reglas utilizadas para el redondeo de datos y menciona que las dos primeras son ampliamente conocidas y usadas, pero la tercera es especial y muy útil para reducir sesgos que pueden ser introducidos debido al redondeo incorrecto de datos. Las reglas son las siguientes;

Regla 1. Si la fracción excedente es $> \frac{1}{2}$, se incrementa al dígito menos significativo por 1.

Regla 2. Si la fracción excedente es $> \frac{1}{2}$, se deja igual al dígito menos significativo.

Regla 3. Si la fracción excedente es $= \frac{1}{2}$, incrementar al dígito menos significativo por 1 solamente si éste es non. De lo contrario, el dígito menos significativo se queda igual cuando es par.

5.5.1 Parámetros estadísticos .

En la tabla 24 se presenta el resumen estadístico de los análisis de elementos mayores, metales y traza de las muestras de agua colectadas en el área de estudio. En la figura 48 se muestra en forma gráfica la distribución de los valores estadísticos obtenidos. El software utilizado para el análisis estadístico fue STATISTICA 6.0.

5.5.2 Matriz de correlación

Las relaciones entre los componentes del agua subterránea son importantes desde el punto de vista hidrogeoquímico. Para lograr el propósito descrito anteriormente, los datos fueron sometidos a un análisis de correlación simple, el cual permitió medir la fuerza entre dos parámetros para poder observar reacciones químicas que se probablemente están tomando lugar en el área.

Tabla 24 Resumen estadístico de elementos mayores, metales y traza en el área de estudio

Parámetro	Unidades	Media	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Dev. Est
HCO ₃ ⁻	mg/l	254.7	110.7	458.5	221.4	253.0	284.6	61.4
Cl ⁻	mg/l	74.4	4.8	585.2	9.6	31.6	101.2	99.4
SO ₄ ²⁻	mg/l	1129.3	5.0	5000.0	100.0	1200.0	1800.0	931.6
N-NO ₃ ⁻	mg/l	4.2	0.1	33.6	1.3	3.0	5.0	4.8
F	mg/l	1.28	0.15	3.90	0.64	1.17	1.77	0.83
Na ⁺	mg/l	87.6	5.0	880.0	17.0	42.2	122.0	116.9
K ⁺	mg/l	11.5	2.0	44.0	4.2	8.0	15.6	9.7
Ca ²⁺	mg/l	301.2	27.7	578.0	125.0	369.0	410.0	152.0
Mg ²⁺	mg/l	122.0	1.1	712.0	17.8	92.6	174.1	128.5
Sr	mg/l	3.96	0.03	8.98	0.46	3.87	7.05	3.03
Fe	mg/l	0.21	0.01	4.53	0.02	0.07	0.17	0.53
Mn	ug/l	22.37	0.01	607.43	0.01	0.06	4.80	83.94
Li	ug/l	0.064	0.001	0.260	0.020	0.060	0.090	0.051
V	ug/l	6.86	0.01	47.18	2.20	5.27	8.85	6.92
Co	ug/l	0.57	0.01	4.91	0.01	0.01	0.73	1.07
Cu	ug/l	5.97	0.01	79.58	0.05	2.16	6.07	12.23
Zn	ug/l	39.00	0.03	741.66	8.01	21.05	43.64	77.77
As	ug/l	7.66	0.01	84.87	1.79	4.64	8.99	11.74
Se	ug/l	10.42	0.08	117.96	0.16	0.16	10.60	22.83
Mo	ug/l	7.715	0.0008	57.373	1.3980	4.599	10.674	9.1116
Cd	ug/l	0.50	0.01	5.58	0.01	0.01	0.24	1.02
Sb	ug/l	0.20	0.01	2.54	0.01	0.01	0.04	0.42
Pb	ug/l	2.27	0.01	42.17	0.44	1.14	2.48	4.58

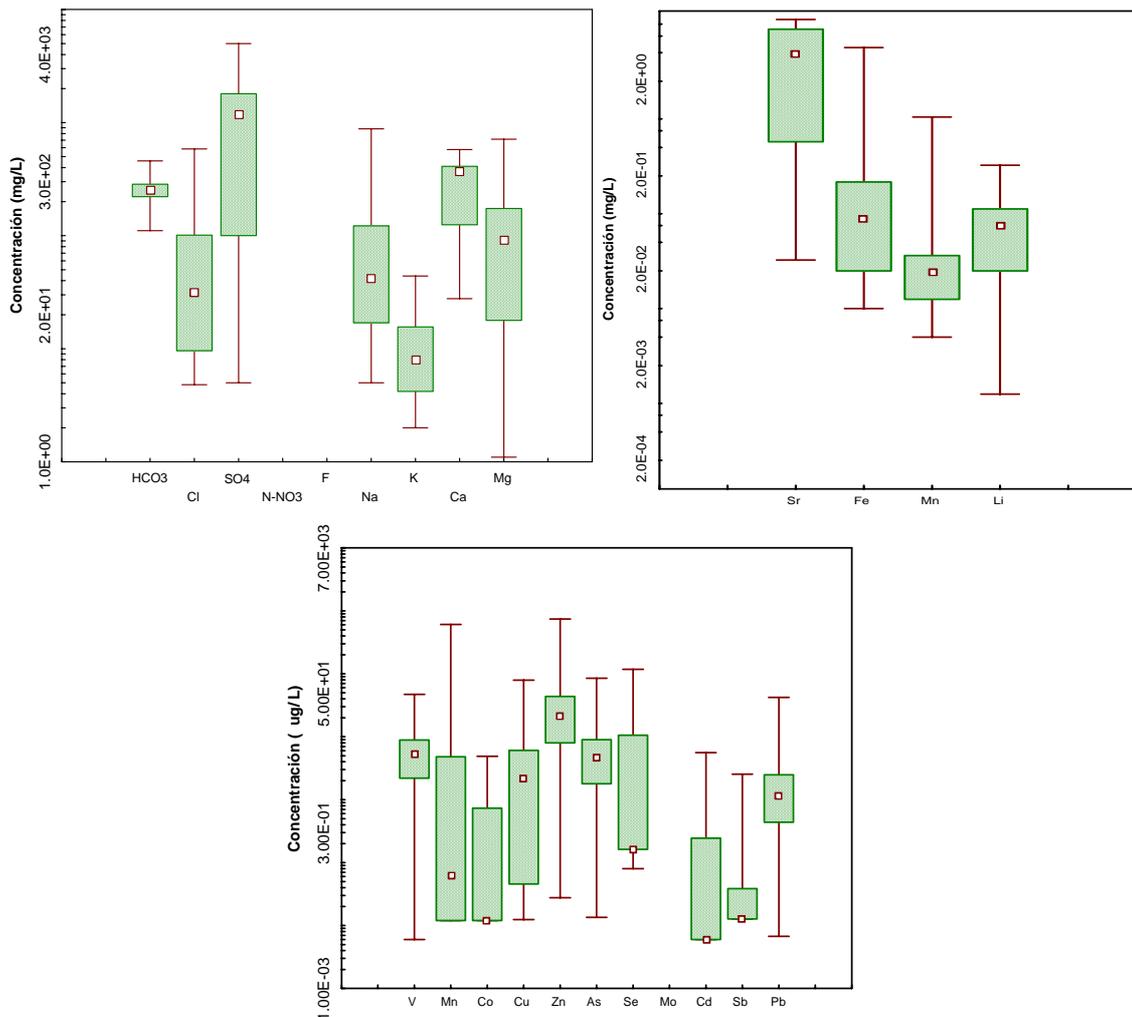


Figura 48 Distribución de valores estadísticos calculados para los resultados de análisis químicos

La matriz de correlación de los análisis químicos realizados en las muestras colectadas en el área de estudio es mostrada en la tabla 25.

Una alta correlación (>0.85) fue encontrada entre Ca^{2+} - SO_4^{2-} (0.96) Mg^{2+} - SO_4^{2-} (0.95), Sr - SO_4^{2-} (0.93), Sr - Mg^{2+} (0.92), Ca^{2+} - Mg^{2+} (0.91), Sr - Ca^{2+} (0.91) y Na^+ - K^+ (0.87).

Se puede concluir de las correlaciones encontradas que está ocurriendo disolución de rocas sedimentarias, principalmente yeso o anhídrita debido a la correlación entre el Ca^{2+} - SO_4^{2-} . La correlación de Ca^{2+} y SO_4^{2-} con el Sr indica la disolución de minerales que contienen estroncio en su composición como la celestina y/o estroncianita asociadas a capas yesíferas.

Se observa también que la ausencia de una correlación del ión HCO_3^- con cualquier otro ión es probable que se deba a que esta existiendo un proceso denominado dedolomitización, el cual es común que ocurra en medios geológicos donde existen carbonatos como la dolomita en combinación con capas yesíferas.

Lo anterior efectivamente ocurre en el área de estudio, todo esto apoyado en las altas correlaciones entre Mg^{2+} - SO_4^{2-} y Ca^{2+} - Mg^{2+} , pues cuando se lleva a cabo el proceso mencionado anteriormente, los iones SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+} se incrementan en el agua subterránea y la alcalinidad disminuye. Lo anterior se puede comprobar observando también los resultados de los valores medios de la alcalinidad en la tabla 22 para cada familia de agua identificada en el área de estudio.

En la familia con menor concentración de los iones SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+} (familia HCO_3 -Ca), el valor medio de la alcalinidad es mayor en comparación a las otras dos familias de agua. El aumento de los tres iones anteriores se ve reflejado en la familia SO_4 -Ca y en consecuencia la alcalinidad es menor que la familia anterior.

	F	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Mn	Li	V	Co	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Sb	Pb	Fe	Sr
F	1.00																						
Cl ⁻	0.58	1.00																					
SO ₄ ²⁻	0.68	0.58	1.00																				
N-NO ₃ ⁻	-0.15	0.02	-0.34	1.00																			
HCO ₃ ⁻	0.19	0.05	0.12	-0.17	1.00																		
Ca ²⁺	0.64	0.52	0.96	-0.29	0.17	1.00																	
K ⁺	0.55	0.71	0.58	-0.02	0.16	0.53	1.00																
Mg ²⁺	0.71	0.64	0.95	-0.36	0.20	0.91	0.67	1.00															
Na ⁺	0.68	0.82	0.63	-0.04	0.15	0.57	0.87	0.70	1.00														
Mn	0.38	0.25	0.42	-0.35	0.05	0.38	0.31	0.45	0.40	1.00													
Li	0.65	0.69	0.67	-0.23	0.10	0.63	0.80	0.73	0.76	0.51	1.00												
V	0.01	0.22	0.03	0.12	0.04	0.005	0.20	0.04	0.19	0.01	0.18	1.00											
Co	0.19	-0.09	0.28	-0.52	0.09	0.28	0.03	0.27	-0.04	0.42	0.26	0.11	1.00										
Cu	0.01	-0.30	-0.03	0.06	0.12	0.03	-0.05	-0.12	-0.10	-0.16	-0.18	0.07	0.13	1.00									
Zn	0.12	0.12	0.26	-0.19	0.002	0.23	0.14	0.26	0.19	0.27	0.16	0.34	0.15	-0.07	1.00								
As	0.03	-0.12	-0.11	0.07	-0.03	-0.09	0.04	-0.17	-0.03	-0.0004	0.14	0.38	0.35	0.37	-0.13	1.00							
Se	0.10	-0.01	0.33	-0.48	0.002	0.33	0.11	0.32	0.02	0.37	0.28	0.22	0.78	0.03	0.28	0.27	1.00						
Mo	0.44	0.40	0.51	-0.21	0.08	0.46	0.31	0.50	0.42	0.32	0.43	0.51	0.28	-0.03	0.56	0.14	0.29	1.00					
Cd	0.002	-0.28	0.00	-0.36	-0.03	-0.04	-0.04	-0.04	-0.16	0.24	0.11	0.19	0.71	0.18	0.12	0.36	0.64	0.15	1.00				
Sb	0.14	-0.20	0.18	-0.39	0.10	0.19	-0.07	0.12	-0.14	0.27	0.11	0.12	0.71	0.23	-0.01	0.30	0.62	0.19	0.73	1.00			
Pb	0.03	-0.08	0.04	-0.18	0.10	-0.01	0.05	0.04	-0.01	0.16	-0.01	0.27	0.26	0.15	0.58	0.02	0.31	0.35	0.34	0.20	1.00		
Fe	0.34	0.01	0.19	0.07	0.09	0.25	0.11	0.18	0.15	0.17	0.07	0.02	0.02	0.35	-0.03	0.05	-0.09	0.02	-0.08	0.11	-0.06	1.00	
Sr	0.70	0.61	0.93	-0.32	0.09	0.91	0.66	0.92	0.72	0.45	0.72	0.05	0.25	-0.08	0.32	-0.12	0.34	0.52	0.01	0.15	0.07	0.20	1.00

Tabla 25 Matriz de correlación de datos químicos para las muestras de la zona de estudio

Por último, la familia $\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$ es la que presenta valores medios más altos de los iones SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+} y el valor medio más bajo en lo que se refiere a la alcalinidad. En base a todo lo anterior se comprueba que este proceso geoquímico está ocurriendo en la zona de estudio.

Las correlaciones entre los iones Sr-SO_4^{2-} , Sr-Mg^{2+} y Sr-Ca^{2+} , indican la probable interacción entre el agua subterránea con las rocas sedimentarias localizadas dentro del área de estudio.

La baja correlación del N-NO_3^- con cualquier otra especie química nos indica que este ión no tiene un origen natural, sino más bien un origen antrópico. Debido a que este compuesto no guarda ninguna relación con el medio geológico.

También existe una correlación a un nivel de $p=0.05$ entre las especies químicas cuyos números están en color rojo, debido a la interacción del agua subterránea con las rocas volcánicas y carbonatos que se encuentran en la región; así como, también de las rocas sedimentarias.

6. MODELO CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOQUÍMICO E ISOTÓPICO

6.1. Índices de saturación con relación a especies minerales seleccionadas

El cálculo de actividades de las especies acuosas e índices de saturación con respecto a una fase mineral específica se llevo acabo utilizando la base de datos introducida en Aquachem y utilizando la interface de Phreeqc para el cálculo rápido de los dos anteriores parámetros. Los datos de entrada que se incluyeron en la base de datos para obtener la especiación fueron; el pH, la temperatura y la concentración de las especies disueltas.

El cálculo de todas las especies disueltas incluyendo complejos se realiza mediante un proceso iterativo utilizando el cambio en la energía libre estándar de Gibbs para el cálculo de la constante de equilibrio de la reacción. El coeficiente de actividad es introducido como una corrección para soluciones no ideales, en las cuales las fuerzas interiónicas de atracción están presentes. El cálculo de este parámetro se realiza mediante la aplicación de la ecuación de Debye-Huckel o Davies dependiendo del resultado de la fuerza iónica obtenida de la solución bajo análisis. Como el valor de K (constante de equilibrio) varia con la temperatura, el cálculo de está se lleva a cabo utilizando la ecuación de Van 't Hoff, la cual permite la determinación de la constante de equilibrio a la temperatura a la cual se encuentra el agua.

Para la determinación del estado de equilibrio del agua con respecto a un mineral específico se utiliza una cantidad denominada IS (índice de saturación). Dicho índice se calcula como el logaritmo del PAI (producto de actividad iónica) entre la constante de equilibrio o producto de solubilidad del mineral. El PAI es calculado mediante la división del producto de las actividades de los productos entre el producto de las actividades de los

reactantes. Posteriormente, el IS se utilizan para verificar si el agua está en equilibrio ($IS= 0$), subsaturada ($IS<0$) o sobresaturada ($IS>0$) con respecto a un determinado mineral.

Para la representación gráfica del estado de equilibrio de las muestras colectadas en el área de estudio, se recurrió a la utilización de un valor que es el 5% del logaritmo del producto de solubilidad de un mineral ($\pm 5\% \times \text{Log K}$) para representar una franja de error, en la cual el agua esta en equilibrio con dicho mineral (Jenne et al., 1980). Las gráficas donde se presentan los controles de solubilidad fueron construidas relacionando el índice de saturación con relación a diferentes minerales y la conductividad eléctrica de las muestras. Permitiendo así, observar la evolución de los índices de saturación con respecto a un indicador indirecto del tiempo de residencia del agua subterránea dentro del medio geológico. En las gráficas, las muestras de agua fueron separadas por zonas y se representan por triángulos para diferenciar las muestras que fueron tomadas en la zona sur del área de estudio (del margen derecho del Río Verde hacia el sur) y por círculos las tomadas en la zona norte del área de estudio (del margen izquierdo del Río Verde hacia el norte).

6.1.1 Geoquímica de carbonatos

Las reacciones que involucran carbonatos son muy importantes en el control de la composición química del agua subterránea. Las rocas formadas de minerales carbonatados y que son analizadas en este apartado de la tesis son; calcita y dolomita. Los principales minerales presentes en estas rocas son los carbonatos de calcio y magnesio los cuales reaccionan fácilmente con el agua subterránea y le dan su carácter de dureza.

Los resultados de la determinación de los índices de saturación para las muestras de agua subterránea señalan que para el caso de la calcita (figura 49) se observan condiciones de subsaturación en aquellos aprovechamientos de la zona sur del área de estudio, todos ellos pozos, los cuales están cerca de

la zona de recarga (familia $\text{HCO}_3\text{-Ca}$) y otro pozo correspondiente a la familia $\text{SO}_4\text{-Ca}$ dentro de la misma área sur de la zona de estudio.

Se observa también que para la mayoría de las muestras se encuentran en estado de equilibrio con respecto a este mineral. Sin embargo, se presentan también condiciones de sobresaturación en pozos y dos manantiales principalmente en aprovechamientos ubicados en la zona norte del área de estudio.

La condición anterior se puede probablemente relacionar con el escape de CO_2 que se produce cuando el agua descarga de manera natural para el caso de los manantiales, además de que el agua que entra en contacto con las sierras circundantes situadas en la zona norte del área de estudio alcanzan la saturación rápidamente, pues las condiciones geológicas así lo permiten.

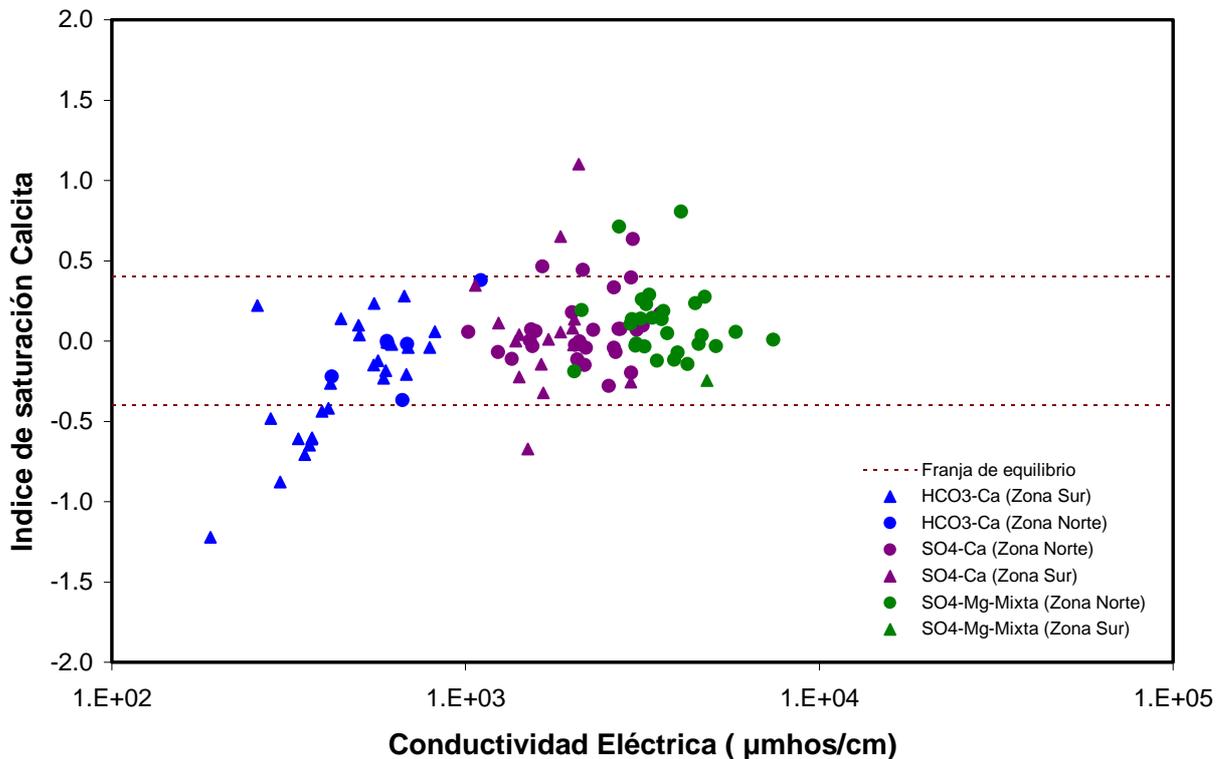


Figura 49 Índice de saturación en relación a la Calcita

En cuanto a la dolomita (figura 50) se presentan condiciones de subsaturación en el agua de menor salinidad especialmente en de la zona sur del área de

estudio, tanto de la familia $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ y $\text{SO}_4\text{-Ca}$. Presentando sobresaturación solo 5 muestras de la porción norte del área de estudio y 1 de la zona sur.

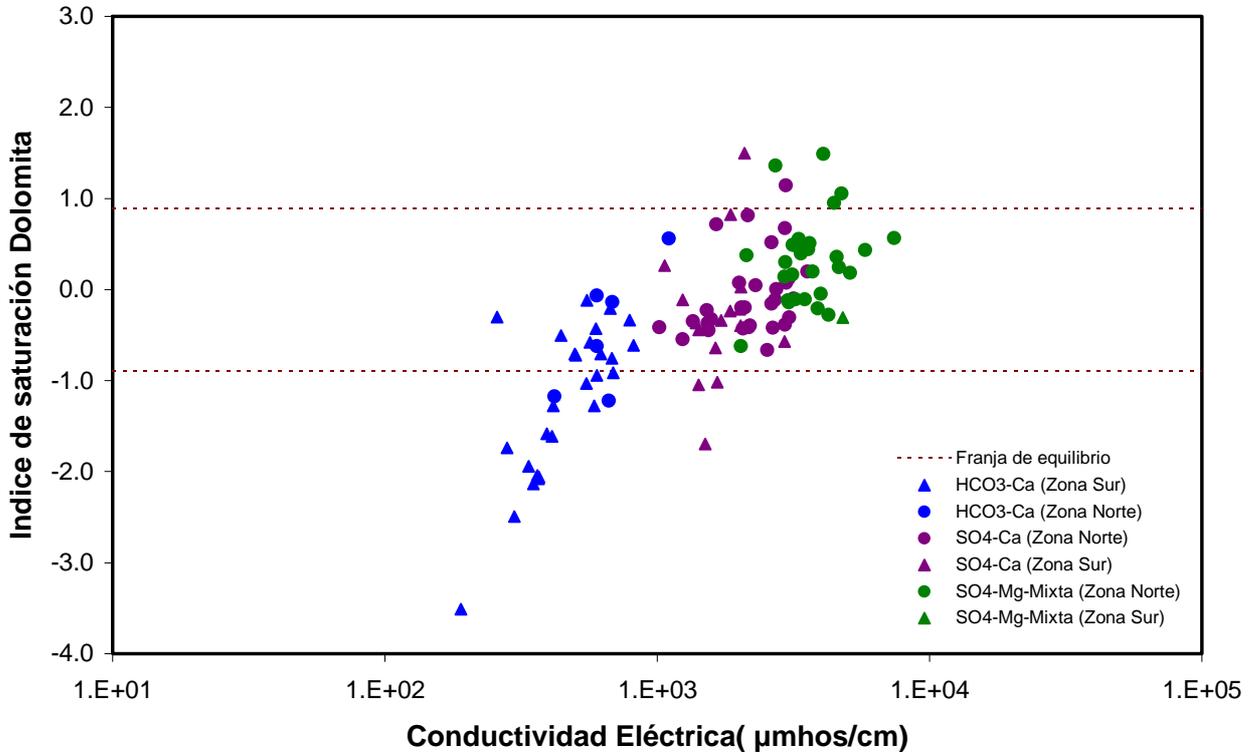


Figura 50 Índice de saturación en relación a la Dolomita

6.1.2 Geoquímica de sulfatos

Los sulfatos que se encuentran presentes en el área de estudio son el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y la anhidrita (CaSO_4). Para el caso de la anhidrita (figura 51), con excepción de una muestra de la familia $\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$ ubicada en el área norte de la zona de estudio, las condiciones de subsaturación con el agua subterránea se dan en todo el rango de salinidades en las 3 familias de agua identificadas en el área de estudio.

Con relación al yeso (figura 52), los valores obtenidos de índice de saturación indican que las muestras de agua subterránea pertenecientes a la familia $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, tanto las pertenecientes a la zona norte y sur del área de estudio, presentan condiciones de subsaturación.

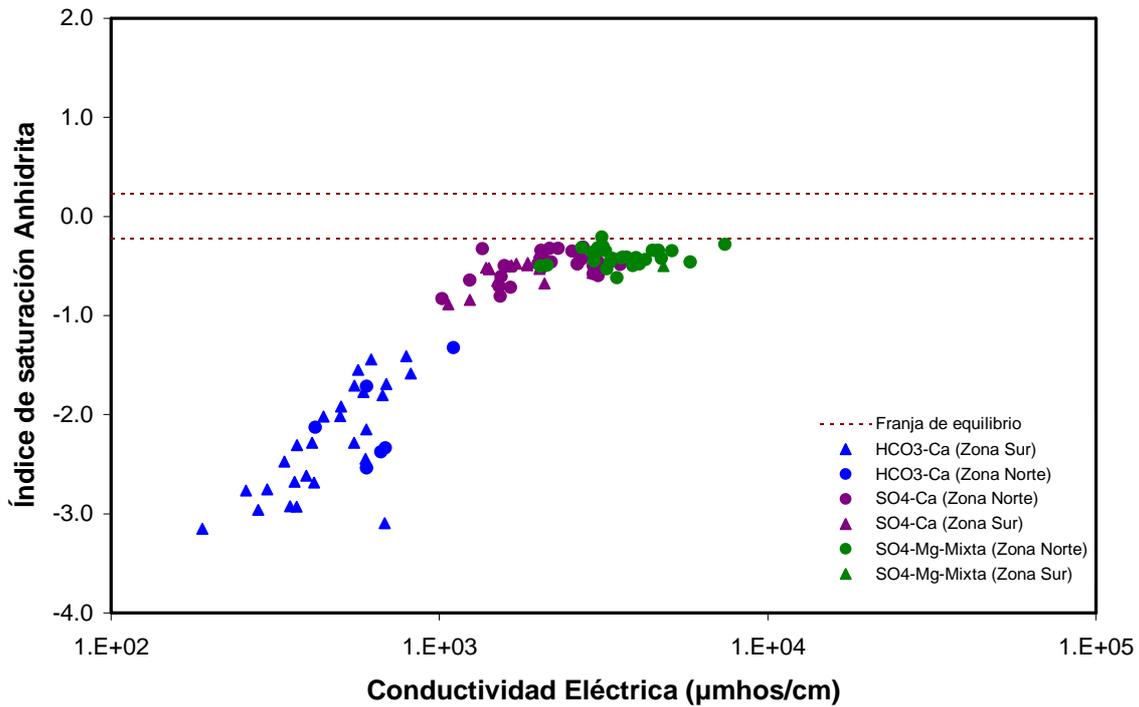


Figura 51 Índice de saturación en relación a la Anhidrita

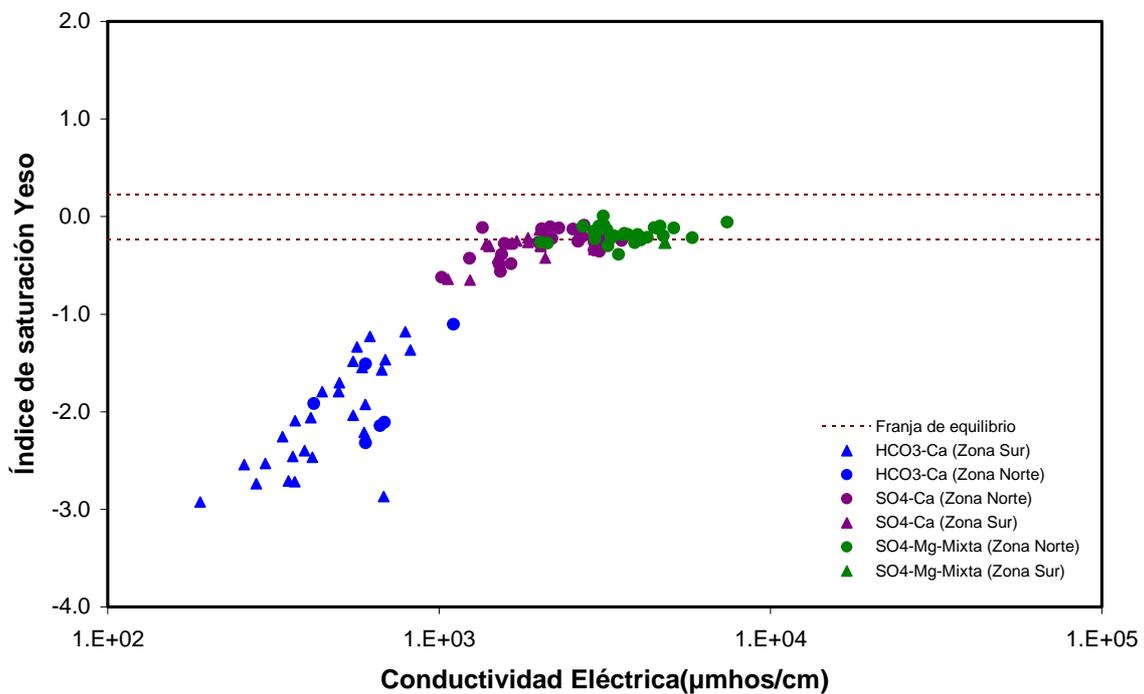


Figura 52 Índice de saturación en relación al Yeso

En cuanto a las muestras de agua pertenecientes a la familia SO₄-Ca y SO₄-Mg-Mixta localizadas en la porción sur del área de estudio, presentan condiciones de subsaturación con respecto al mineral bajo análisis,

presentando condiciones de equilibrio solo una muestra de la familia $\text{SO}_4\text{-Ca}$. Por lo menos la mitad de las familias $\text{SO}_4\text{-Ca}$ y $\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$ ubicadas en la zona norte del área de estudio presentan condiciones de subsaturación con respecto al yeso y las restantes se encuentran en condiciones de saturación con el mineral.

El incremento observado de los valores de índice de saturación con respecto a la conductividad eléctrica condiciona la evolución de la familia desde la $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ pasando de ahí a la $\text{SO}_4\text{-Ca}$ y finalmente a la $\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$. Mostrando claramente la influencia de la disolución de yeso en la composición química del agua subterránea y por lo tanto, en la calidad natural del área de estudio.

6.2. Isótopos estables

Los isótopos de cada átomo tienen el mismo número atómico o de protones, pero diferente número másico (número de neutrones diferente). Los isótopos se dividen en radioactivos y estables, los primeros son aquellos en la que la relación entre protones y neutrones no es la apropiada para lograr una estabilidad nuclear existiendo con el tiempo un decaimiento radioactivo. Los estables son los que, aunque tienen un decaimiento también, este suele llevarse a cabo en periodos muy largos de tiempo incluso comparados con la edad de la Tierra.

La molécula de agua está formada por combinaciones de los isótopos de los átomos que la conforman. El hidrógeno tiene tres isótopos que son: $^1\text{H}_2$, ^2H , ^3H y los del oxígeno son ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O .

En el estudio del agua subterránea los isótopos estables de interés son el ^{18}O y ^2H , estos dos fueron determinados en el agua del área de estudio. Lo anterior debido a que durante las fases de evaporación y condensación del agua las relaciones isotópicas que componen la molécula de agua cambian.

Los isótopos estables se miden como la relación de los dos isótopos más abundantes de un elemento dado (Clark y Fritz, 1997). La concentración se expresa como la diferencia de la relación medida de la muestra de agua y la relación del estándar utilizado para la determinación analítica. Los valores (δ) son expresados en permiles de VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). La ecuación utilizada es la siguiente;

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{muestra}} = \left(\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{muestra}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{referencia}}} \right) \times 1000 \text{ ‰ VSMOW}$$

En general, un valor positivo de δ indica que el agua tiene una concentración mayor que el isótopo pesado de referencia (valor de cero) mientras que un valor negativo indica lo contrario. De esta manera se dice que ha existido un enriquecimiento (entre más positivo) o un decaimiento/empobrecimiento (entre más negativo) de isótopos en el agua.

Durante la precipitación el agua tiene una composición isotópica lineal, y es representada por la siguiente ecuación;

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \text{ ‰}$$

La ecuación anterior permite graficar la Línea Global de Aguas Meteóricas (GMWL de sus siglas en inglés) la cual es utilizada en este trabajo para obtener información sobre posibles procesos del ciclo hidrológico que se están llevando a cabo probablemente en la zona de estudio. Además, por tratarse de la línea de agua meteórica más cercana al área de estudio del presente trabajo también es utilizada la línea local de agua meteórica de San Luis Potosí determinada por Carrillo-Rivera et al, (2007) cuya ecuación es: $\delta^2\text{H} = 8.29\delta^{18}\text{O} + 14.15$. Algunas aguas pertenecientes a la familia $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ y $\text{SO}_4\text{-Ca}$ caen dentro de la línea global de aguas meteóricas y de la local de San Luis Potosí (figura 53 y 54). Lo anterior se asocia a que durante su infiltración no estuvo expuesta a procesos de evaporación representando agua se ha

infiltrado rápidamente moviéndose a través de zonas fracturadas en especial las de la familia $\text{SO}_4\text{-Ca}$.

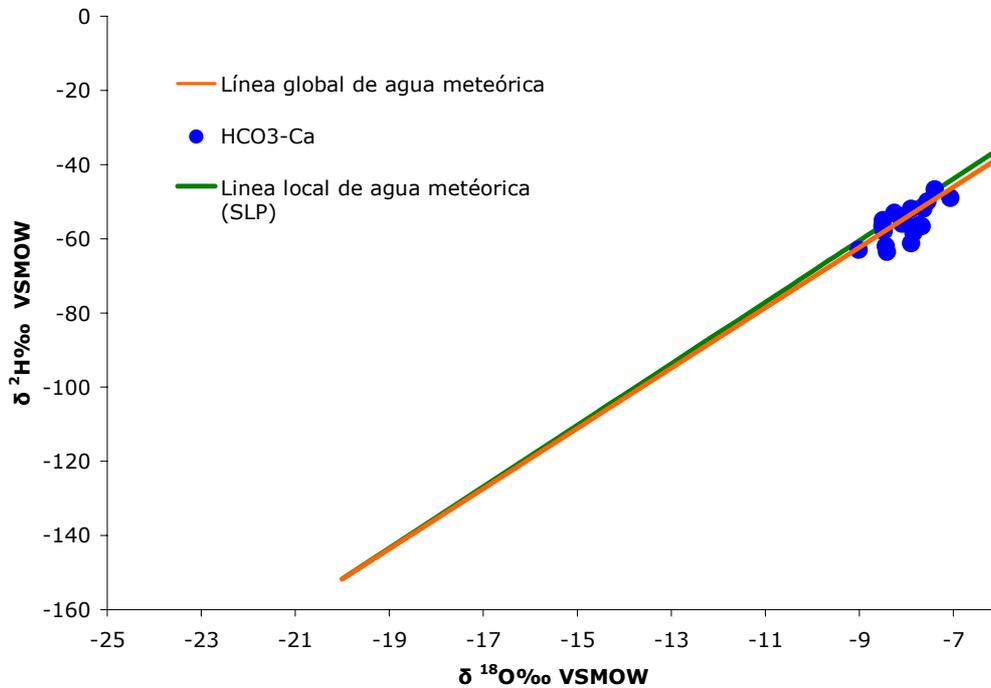


Figura 53 Composición isotópica de ^{18}O y ^2H en agua subterránea tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ del área de estudio

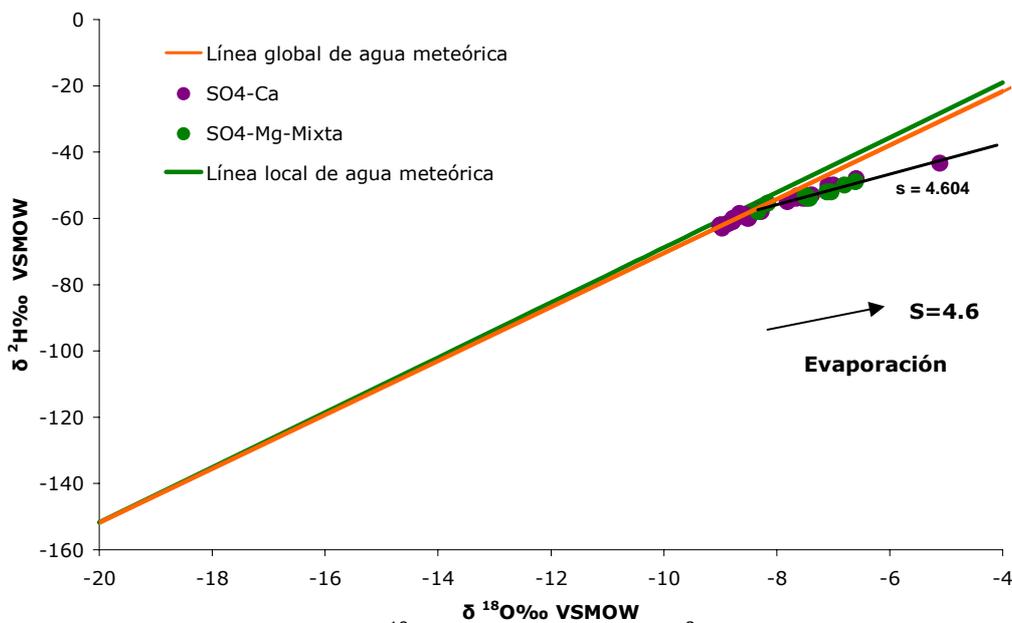


Figura 54 Composición isotópica de ^{18}O y ^2H en agua subterránea tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$ y $\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$ del área de estudio

Por otro lado tomando como referencia la línea global de aguas meteóricas, se observa una clara tendencia que indica procesos de evaporación principalmente en la zona norte del área de estudio. En la configuración de ^{18}O en la figura 55 se ratifica lo anterior, ya que se observa que agua de tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$ en algunas zonas del área norte se encuentran más enriquecidas que el agua de tipo $\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$, lo que se interpreta como que el agua esta siendo afectada por procesos de evaporación y que el aumento de la salinidad es debido en parte al proceso anterior.

Utilizando la fórmula establecida por Cortés y Durazo citada en Pañuela 2007, se puede obtener la altitud del sitio donde ocurrió la recarga de agua subterránea a partir de la composición de ^{18}O en aguas que no fueron afectadas por evaporación.

$$\delta^{18}\text{O}^*(X,Y) = -2.13 Z(X,Y) - 3.2$$

Con la ayuda de la figura 54 y 55, se seleccionaron muestras de agua de la familia $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ y $\text{SO}_4\text{-Ca}$ pertenecientes a la zona sur del área de estudio que no fueron afectadas por procesos de evaporación y determinar así las altitudes a las cuales ocurrió posiblemente la recarga, obteniéndose los siguientes resultados;

Tabla 26 Resultados del cálculo de la altitud de la precipitación

$d^{18}\text{O}$				
	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$	$\text{SO}_4\text{-Ca}$	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$	$\text{SO}_4\text{-Ca}$
	-8.1	-8.6	2,277	2,535
	-7.6	-8.3	2,042	2,394
	-7.6	-8.5	2,066	2,488
	-8.1	-8.8	2,291	2,629
	-8.4	-9.0	2,441	2,723
		-8.7		2,582
		-9.0		2,723
		-8.7		2,582
Promedio (msnm)			2,223	2,582

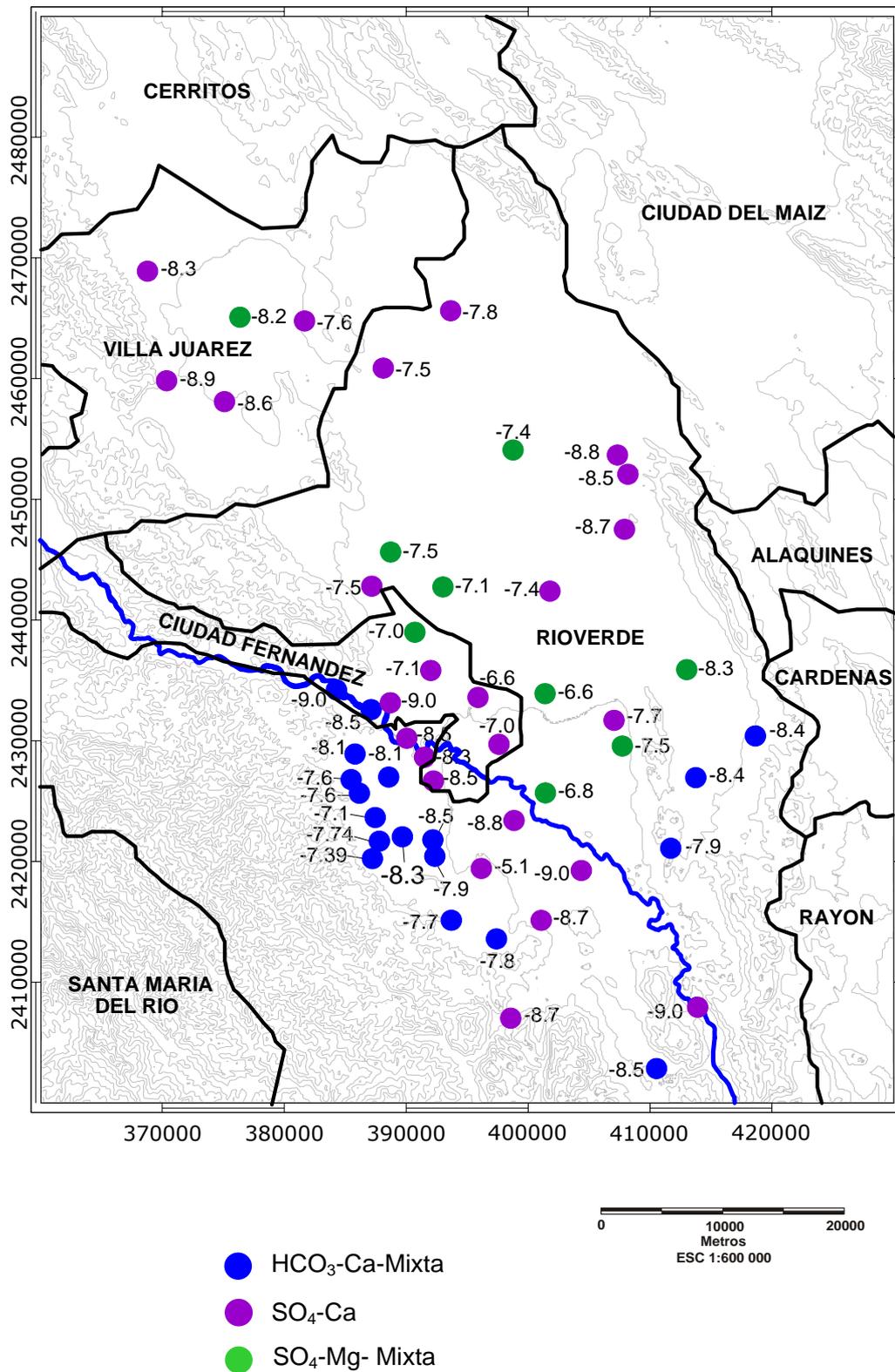


Figura 55 Contenido de ^{18}O en el área de estudio expresado como $\delta^{18}\text{O}$ vs. VSMOW (‰)

Los resultados muestran que el agua subterránea de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ tiene un área de recarga mas baja topograficamente hablando que las de la familia $\text{SO}_4\text{-Ca}$ de la zona sur del área de estudio. Tomando en cuenta que en esa porción del área de estudio la sierra con mayor elevación es de 2,000 msnm (El Camarón), se puede inferir que la precipitación se da en esas elevaciones, el agua escurre y se infiltra en la zona de pie de monte, originando la familia de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$. No se recarga a esas elevaciones porque las rocas volcánicas no son adecuadas para ello.

La precipitación que probablemente se infiltra para dar origen al agua de tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$ se lleva a cabo a elevaciones mayores de las que se encuentran las sierras de la porción occidental, probablemente indicando que este tipo de agua recarga en zonas que no se encuentran dentro del área de estudio. Se puede sugerir de lo anterior que existen dos sistemas de flujo, uno recargando en zonas topográficas más bajas y otro en más altas.

La figura 56, muestra la composición isotópica de ^{18}O contra el sulfato de las familias de agua tanto de la zona norte como la zona sur del área de estudio. Se observa un ligero agrupamiento de la familia $\text{HCO}_3\text{-Ca}$. Lo anterior podría evidenciar efectivamente, la existencia de dos sistemas de flujo; uno por donde circula la familia $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ y otro por donde circulan las familias $\text{SO}_4\text{-Ca}$ y $\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$. Lo cual está basado en las profundidades a la cual se encuentran las formaciones que contienen yeso en su composición se deduce que el agua subterránea de tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$ y $\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$ circulan a mayor profundidad que las del tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$.

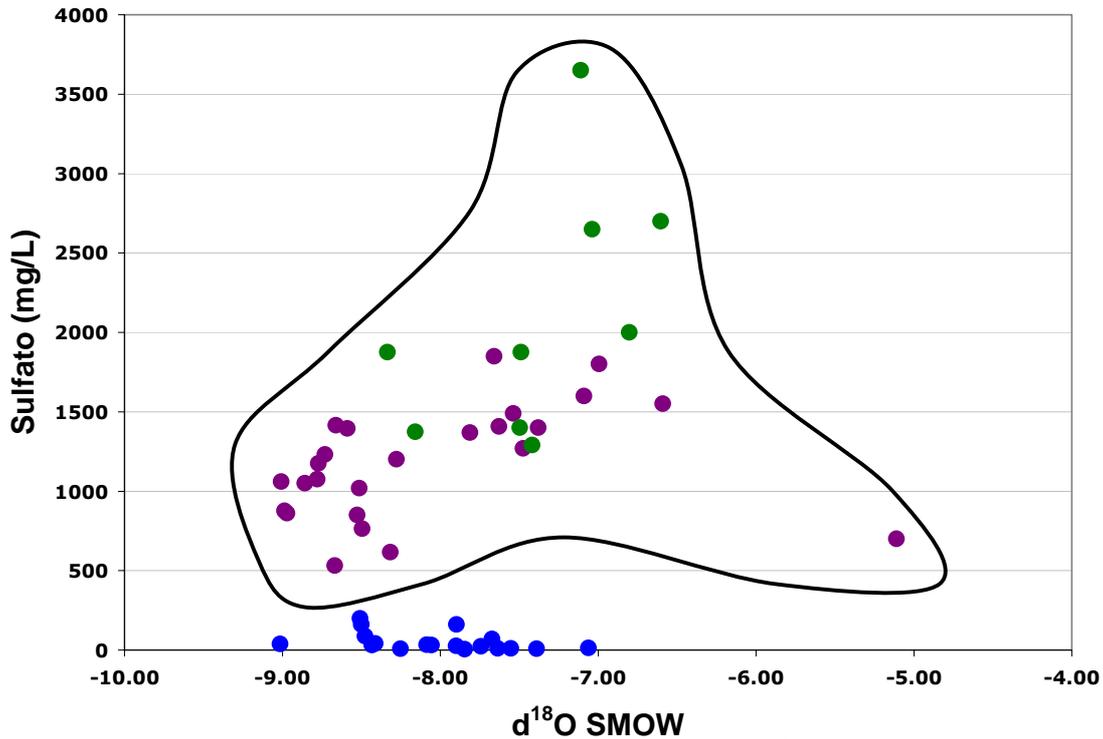


Figura 56 Correlación entre sulfato y $\delta^{18}\text{O}$

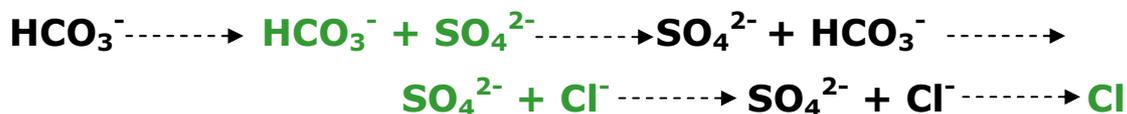
6.3. Modelación hidrogeoquímica inversa

Los procesos y reacciones químicas que ocurren en el medio geológico del área de estudio han sido examinados en el capítulo anterior de este trabajo de investigación. El objetivo del presente es plantear los procesos anteriores bajo el contexto de sistemas de flujo de agua subterránea.

Chebotarev (1955) propuso una secuencia que lleva su nombre y en la que establece que el agua subterránea tiende a evolucionar químicamente a lo largo de los sistemas de flujo hacia una solución más concentrada similar a la composición de agua de mar (Freeze y Cherry, 1979).

Dicha secuencia evolutiva es representada por los aniones, puesto que la composición de cationes es más variable debido a procesos como son el intercambio iónico, la precipitación entre otros. La secuencia solo puede

evolucionar siempre y cuando los minerales necesarios para que lo anterior suceda estén presentes dentro del medio geológico y es la siguiente;



La composición química del agua subterránea además de estar en función de la mineralogía del medio y la profundidad, la velocidad a la cual circula juega también un rol muy importante. Por lo general, los sistemas de flujo locales presentan un flujo más o menos vigoroso que circulan sobre sales minerales solubles durante periodos de tiempo relativamente cortos. Como resultado se obtiene agua de tipo bicarbonatada.

La velocidad del flujo es progresivamente más lento con la profundidad así pues, los sistemas de flujo intermedio y regional son más probables a evolucionar a la facie sulfatada dependiendo de la disponibilidad de minerales de tipo evaporítico. De este modo, conforme el agua se mueve a lo largo de los patrones de flujo se observará un incremento de los sólidos totales disueltos y la mayoría de los iones mayores.

Cada sistema de flujo sin tener en cuenta su posición, tiene un área de origen o recarga y uno de terminación o descarga. En las áreas de recarga, las cargas hidráulicas, que representan la energía mecánica del agua, son relativamente altas y disminuyen con la profundidad; el agua fluye de forma descendente y divergente. En las áreas de descarga, la energía y condiciones de flujo son al revés, las cargas hidráulicas son inferiores y el flujo es ascendente (Tóth, 1999). En la figura 57 se muestra a grandes rasgos lo anteriormente mencionado; así como, la secuencia evolutiva de aniones, condiciones oxidantes en el área de descarga y condiciones reductoras en áreas cercanas a las de descarga, decremento de CO₂ a lo largo de los patrones de flujo, etc.

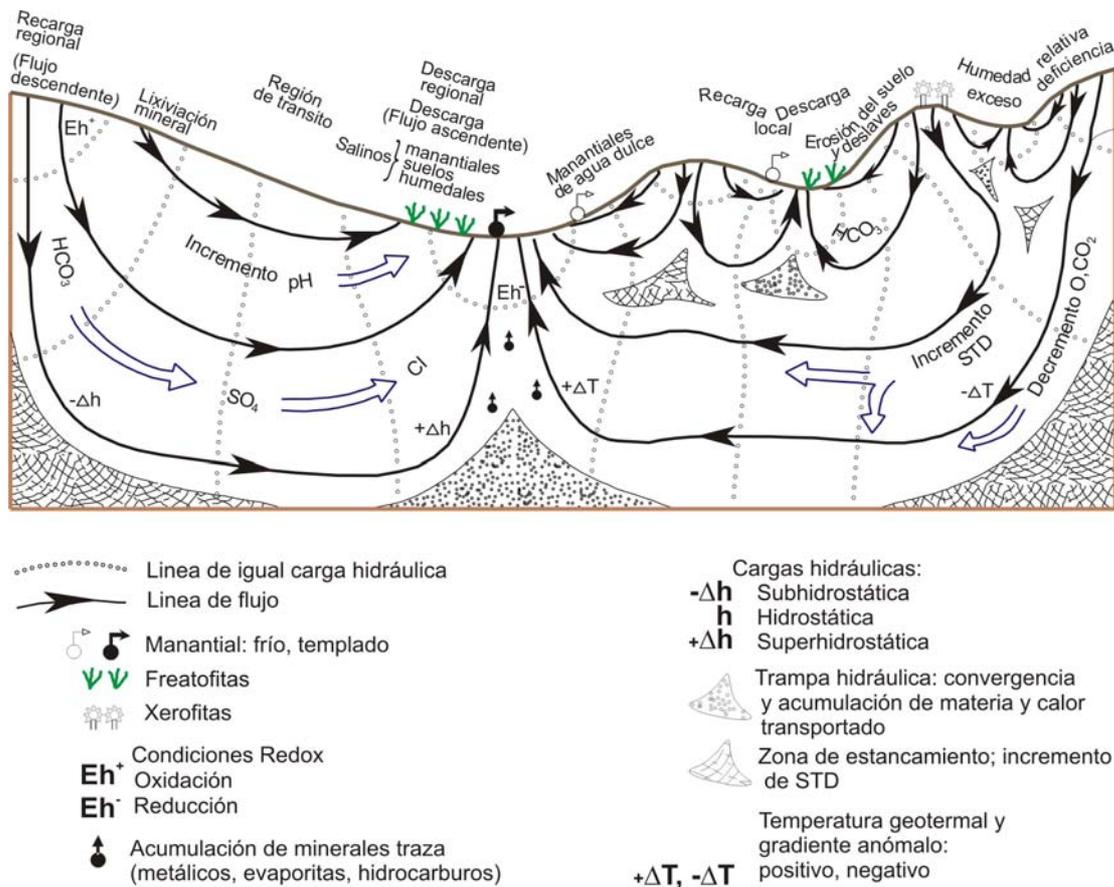


Figura 57 Efectos y manifestaciones de la circulación de flujo de agua subterránea en una cuenca regional (modificado de Tóth, 1999)

6.3.1 Fundamentos teóricos

Con ayuda de la teoría termodinámica es posible realizar predicciones acerca de las reacciones que están probablemente sucediendo dentro de un sistema, es decir, el estado final (estado de equilibrio) una vez finalizadas éstas. Actualmente existen dos tipos de modelos que permiten describir reacciones hidrogeoquímicas: modelos directos y modelos inversos.

Para aplicar los modelos directos es necesario conocer la composición química inicial de una solución y establecer las reacciones hidrogeoquímicas que se creen tendrán lugar en el sistema, obteniéndose como resultado la composición de una solución final la cual es el producto de las reacciones

especificadas. Este tipo de modelos son útiles bajo situaciones con un alto grado de incertidumbre respecto a las características reales del medio geológico.

Los modelos inversos, también llamados de balance, son aquellos en los que, conociendo la composición inicial y final de una solución a lo largo de la trayectoria de flujo subterráneo, así como también los minerales presentes en el medio geológico, se calculan mediante el balance de masas las reacciones que probablemente pueden explicar los cambios en la composición química entre los dos puntos extremos y la magnitud a la cual pueden ocurrir, es decir, la transferencia de masa entre las distintas fases. Para realizar lo anterior se tiene que partir además de un modelo hidrogeoquímico conceptual el cual ayuda a plantear varias reacciones posibles a lo largo de la línea de flujo de agua subterránea, obteniéndose así la cantidad neta de masa transferida entre las distintas fases del medio para cada una de las reacciones especificadas.

En la década de los 70's se empezó a difundir la utilización de modelos hidrogeoquímicos gracias a la aparición de los primeros programas de computación los cuales simplifican los cálculos de equilibrio. Más de una década después de la aparición de uno de los códigos de modelación hidrogeoquímica más difundidos y utilizados, el PHREEQE, surgieron los modelos que incorporan la posibilidad de simular el transporte unidimensional de solutos en agua subterránea, en primer término con el código PHREEQM, seguido por la primera versión del PHREEQC en 1995, y que a partir de su versión 2.0 ha incorporado todos los términos del transporte en conjunto con las posibilidades de simulación hidrogeoquímica originales de PHREEQE (Martínez et al., 2000).

Diversos trabajos a nivel mundial han sido desarrollados para conocer la evolución geoquímica del agua subterránea. Entre ellos por citar algunos están Thomas et al (1989), Parnachev et al., (1999), Song et al., (1999), Fryar et al., (2001), Sracek et al., (2002), Mählknecht et al., (2004), Naqa et al., (2004) y Bajjali (2006). Los fundamentos teóricos empleados en dichos

trabajos de investigación son los descritos anteriormente y hacen uso de algún código numérico para realizar las simulaciones y calcular índices de saturación.

En este trabajo de investigación el código numérico utilizado para llevar a cabo la modelación hidrogeoquímica inversa en el área de estudio fue PHREEQC versión 2.0 (Parkhurst y Appelo, 1999). Ya que en este programa se puede incluir un factor de incertidumbre en los datos de la composición química del agua subterránea permitiendo así obtener modelos inversos que satisfagan un balance molar de cargas.

En la modelación inversa, una solución acuosa es supuesta para mezclar con otras soluciones acuosas y reaccionar con minerales y gases para producir la composición observada de una segunda solución acuosa. El esquema de procedimiento del cálculo efectuado por el programa de simulación es el mostrado en la figura 58.

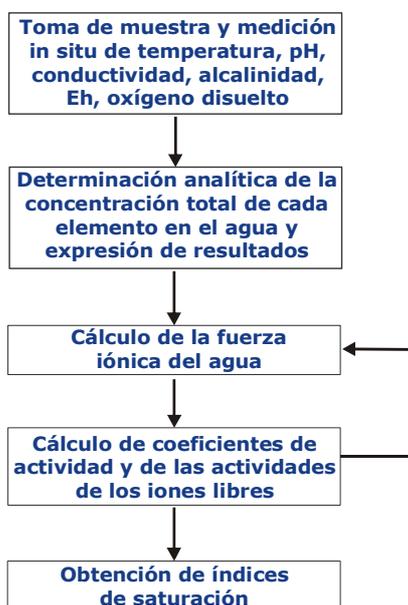


Figura 58 Procedimiento de cálculo efectuado por el programa PHREEQC

En PHREEQC es necesario definir la composición de las soluciones acuosas mediante los comandos **SOLUTION**, **SOLUTION_SPREAD**, o **SAVE**. Los identificadores en el **INVERSE_MODELING** son; para la selección de soluciones acuosas (**-solutions**), límites de incertidumbre (**-uncertainties**

and **-balances**), para definir reacciones de disociación y datos termodinámicos para minerales y gases (**-phases**), ecuaciones balance molar (**-balances**), rango de los cálculos y modelos mínimos (**-minimal**) y por último el comando **END** el cual es necesario para indicar el fin de una simulación.

Para lograr lo anterior fue necesario la creación de un marco conceptual utilizando diagramas mostrados en el capítulo de interpretación hidrogeoquímica, a grandes rasgos el procedimiento utilizado para cada uno de los aprovechamientos que eran factibles para la modelación y que se encontraban en la misma dirección de flujo subterráneo fue el siguiente;

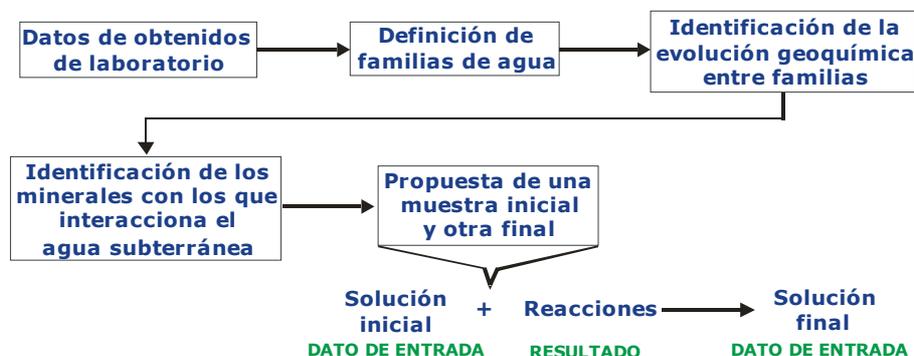


Figura 59 Procedimiento empleado para realizar la modelación inversa en las muestras de agua subterránea del área de estudio

De acuerdo al análisis hidrogeoquímico al cual fueron sometidos los resultados de los análisis químicos hechos en el laboratorio del agua subterránea en el área de estudio, 3 familias principales fueron identificadas las cuales fueron; $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ con una salinidad del orden de 366 mg/L, de lo cual se puede inferir que el agua que ha circulado durante periodos relativamente cortos de tiempo y a profundidades no tan grandes. Además se atribuye esta evolución a que el agua circula a través de rocas volcánicas fracturadas y sedimentos derivados de éstas. (medio fracturado y medio granular). Este tipo de familia esta principalmente localizada en la zona sur del área de estudio, al margen derecho del Río Verde.

Las otras dos familias de agua identificadas en el área de estudio fueron $\text{SO}_4\text{-Ca}$ (1,464 mg/L en promedio) y $\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$ (2,665 mg/L en promedio),

éstas están principalmente localizadas en la zona norte del área de estudio. La composición del agua evoluciona de la primera a la segunda familia mencionadas anteriormente debido a que por características del medio geológico al momento de que el agua alcanza el nivel freático, ya se ha saturado con respecto a la calcita y dolomita continuando su circulación por rocas sedimentarias calcáreas. Las cuales son la Formación el Abra que son rocas calizas y por la Formación Guaxcamá que es una potente secuencia evaporítica constituida principalmente de yeso y anhidrita con intercalaciones de caliza y dolomita. Es probable que la distribución de estas familias sea de tipo regional y circulan a profundidades mayores que el agua de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ e incluso es posible que en algunos casos, el agua esté recargando fuera del polígono que ha sido delimitado como el acuífero de Rioverde.

Con base en el conocimiento del medio geológico del área de estudio, se procedió a simular la evolución natural del agua subterránea. Se determinó el balance de masa bajo el contexto de disolución y precipitación de minerales presentes en la zona estudiada. En el caso de la zona sur del área de estudio se realizó la simulación de agua de tipo $\text{SO}_4\text{-Ca}$ de baja salinidad a otra de la misma familia pero con aumento en los sólidos totales disueltos. En la zona norte del área de estudio se modeló el agua que evoluciona naturalmente de la familia $\text{SO}_4\text{-Ca}$ a la $\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$. En ambas zonas se cuidó el hecho de que los aprovechamientos deben seguir el patrón de flujo de agua subterránea.

Se hizo uso de los índices de saturación calculados también mediante la opción de especiación con la que cuenta el programa PHREEQC, para determinar si los aprovechamientos seleccionados estaban subsaturados, en equilibrio o sobresaturados con respecto a alguna fase mineral. Lo anterior fue utilizado durante la modelación inversa para permitir que si se encuentra el agua en equilibrio o sobresaturada con respecto a la fase mineral especificada se obligaron a precipitar, mientras que si el agua estaba subsaturada se obligaba a disolver.

Así pues la estequiometría de las reacciones probables dentro del área de estudio fueron determinadas. Si bien el programa PHREEQC da como resultado una cantidad variable de modelos válidos, se escogieron aquellos que, de acuerdo con las fases minerales presentes y tomando en cuenta también la factibilidad desde el punto de vista termodinámico, permitieran ilustrar los procesos que podrían controlar la evolución química del agua dentro de la zona de interés. Las muestras utilizadas para la modelación están representadas por las líneas rojas en la figura 60.

6.3.2 Modelación hidrogeoquímica inversa en el área sur de la zona de estudio.

- **Evolución del agua subterránea de tipo SO₄-Ca de baja salinidad a mayor salinidad.**

El agua de lluvia posee cierta composición química, la cual se ve modificada por la interacción de ésta con los minerales existentes en el material geológico. Lo más probable es que el agua de reciente infiltración sea de tipo HCO₃-Ca.

Como no se tienen datos de la composición química del agua de lluvia en la zona de estudio se procedió a iniciar la modelación de la evolución natural del agua subterránea entre los aprovechamientos 91RV al 92RV, la salinidad aumenta de 746 a 1,301 mg/L de STD conforme el agua se mueve a lo largo de la dirección de flujo la cual es sensiblemente hacia el noroeste.

El SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, y la alcalinidad, aumentan su concentración a lo largo de la trayectoria del flujo. Los procesos identificados como responsables de la composición química del agua subterránea en este tramo son; el intercambio catiónico (Ca²⁺ por Na⁺ y K⁺) la disolución de dolomita, de yeso y la precipitación de calcita, debido a procesos de dedolomitización.

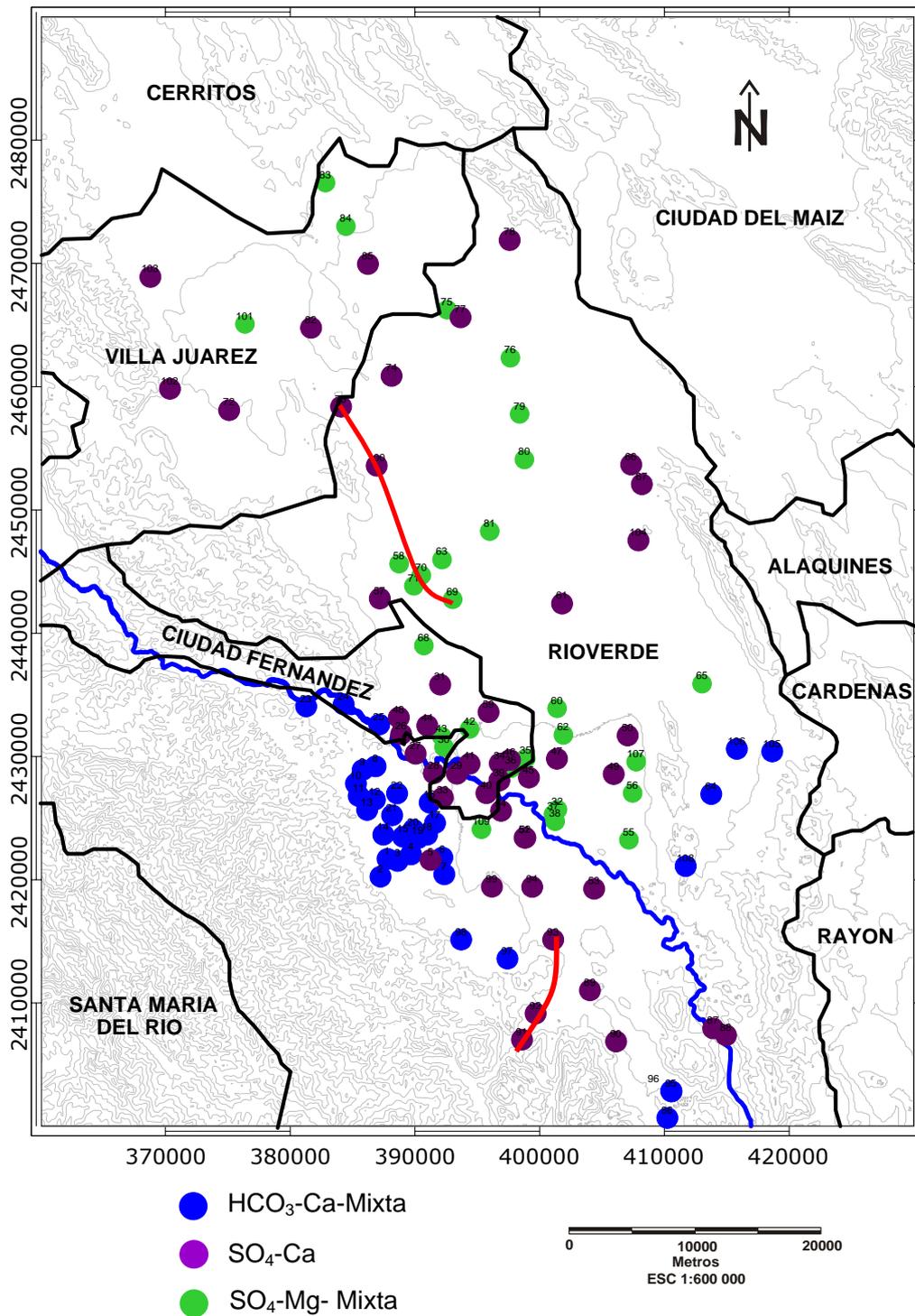
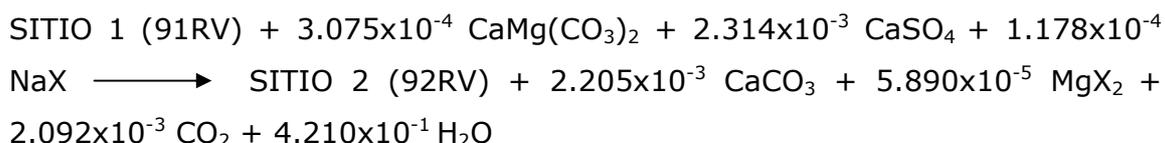


Figura 60 Aprovechamientos utilizados en la modelación hidrogeoquímica inversa del área de estudio

La dedolomitización puede ocurrir en acuíferos que contienen calcita, dolomita en combinación con capas yesíferas. El proceso global es, que como resultado de la disolución de yeso o anhidrita, la dolomita disuelve y la calcita precipita. El incremento en la concentración de Ca^{2+} debido a la disolución de yeso causa que la calcita precipite. La concentración CO_3^{2-} decrece puesto que la calcita precipita provocando la disolución de dolomita y el incremento en la concentración de Mg^{2+} .

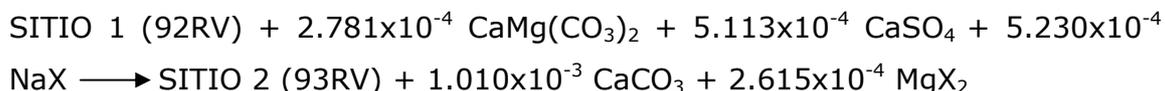
El resultado neto por lo tanto es que la disolución de yeso induce la transformación de dolomita a calcita en la roca y produce agua con incrementos en las concentraciones de Mg^{2+} , Ca^{2+} y SO_4^{2-} aunado a un decremento en la alcalinidad y en el pH. (Appelo y Postma, 1996). El modelo más congruente es el siguiente;



Ahora se analiza la evolución química entre los aprovechamientos 92RV y 93 RV, la salinidad aumenta de 1,301 a 1,414 mg/L conforme el agua se mueve a lo largo de la trayectoria de flujo subterráneo.

De acuerdo a los índices de saturación el agua esta sobresaturada con respecto a la calcita y con la dolomita subsaturada, esto propicia el proceso llamado dedolomitización. Lo anterior controla que el calcio disminuya además debido también a procesos de intercambio catiónico al intercambiarse éste por el Na^+ , reflejándose en la concentración entre un sitio a otro de los dos iones. Así pues el calcio disminuye de 415 a 408 mg /L y el Na aumenta de 15.0 a 27.0 mg/L. El proceso anterior también controla la disminución de la alcalinidad de 292.5 a 237.2 mg/L expresada como HCO_3^- .

El magnesio aumenta de manera insignificante debido a la disolución de dolomita y el SO_4^{2-} aumenta de 1180 a 1230 mg/L debido a la disolución de yeso. El modelo inverso más congruente con lo anterior fue el siguiente;

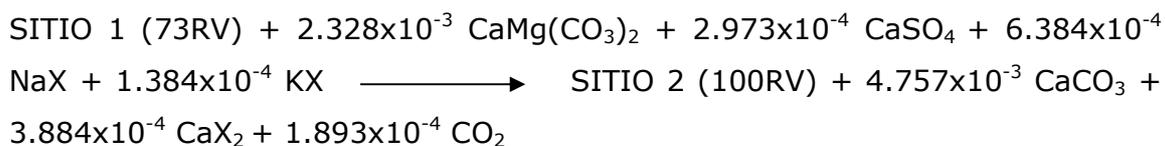


6.3.3 Modelación hidrogeoquímica inversa en el área norte de la zona de estudio.

En la zona norte del área de estudio los aprovechamientos seleccionados para la modelación inversa fueron; 73RV-100RV-70RV y 69RV, la dirección del flujo es ligeramente hacia el sureste. El agua de los dos primeros aprovechamientos es de tipo SO_4 -Ca y los otros pertenecen a la familia SO_4 -Mg-Mixta. La familia HCO_3 -Ca no se encuentra presente en esta zona del área de estudio, debido a que el agua de recarga se sobresatura con respecto a la calcita rápidamente antes de llegar a la zona vadosa, es decir, que la disolución de calcita y dolomita se está llevando bajo condiciones de sistema abierto.

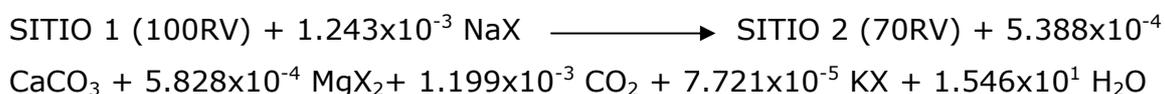
- **Evolución del agua subterránea de tipo SO_4 -Ca de baja salinidad a mayor salinidad.**

La salinidad entre los aprovechamientos 73RV y 100RV va de 1,533 a 2,058 mg/L, los procesos probables que se llevan a cabo y que son responsables de la composición química del agua subterránea son la disolución de yeso, la disolución de dolomita y precipitación de calcita (dedolomitización); así como, también el intercambio catiónico. Algo que se observa como resultado del balance de masas es el escape de CO_2 probablemente debido al contacto del agua con la atmósfera al momento de la descarga. El modelo inverso más congruente fue el siguiente fue el siguiente;



- **Evolución del agua subterránea de tipo SO₄-Ca de mayor salinidad a la tipo SO₄-Mg-Mixta**

Esta evolución fue simulada entre los aprovechamientos 100RV al 70RV, la salinidad del primero es de 2,058 mg/L y la del segundo de 2,072 mg /L. Se obligo a que la calcita, dolomita, yeso, CO₂ y H₂O precipitaran para simular el proceso de evaporación que tiene lugar en esta parte de la zona de estudio. Lo anterior se comprobó mediante los resultados de isótopos estables mostrados anteriormente. Para obtener 1 Kg de agua de la solución 2 (70RV) se necesitó evaporar 1.278 Kg de agua de la solución 1 (100 RV) El proceso de intercambio catiónico se mantuvo como en las modelaciones anteriores dando como resultado la siguiente reacción;

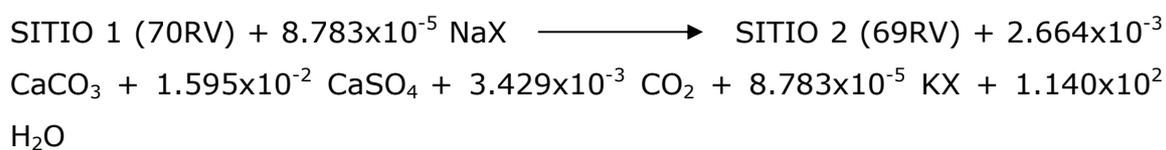


- **Evolución del agua subterránea de tipo SO₄-Mg-Mixta conforme se incrementa la salinidad**

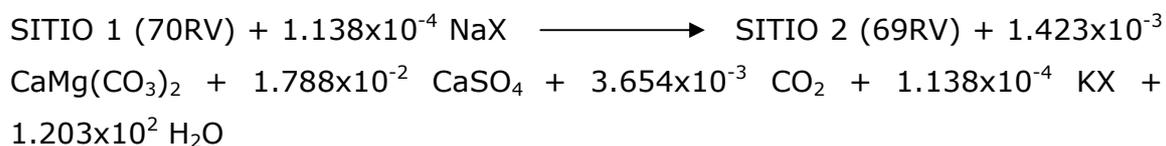
La salinidad entre el aprovechamiento 70RV al 69RV va de 2,072 a 3,122 mg/L. El proceso responsable del incremento de la salinidad se le atribuye a la evaporación que existe en el área, se siguió la misma mecánica de obligar a que la calcita, dolomita, yeso, CO₂ y H₂O precipitarán. Se obtuvieron dos modelos inversos que podrían justificar de forma congruente la evolución química del agua subterránea. En el modelo 1 se requirió evaporar 3.054 Kg de la solución 1 (70RV) para obtener 1 Kg de agua de la solución 2 (69RV). Para

el modelo 2 se necesitó evaporar 3.167 Kg de la solución 1 (70RV) para obtener 1 Kg de la solución 2 (69RV).

Modelo 1



Modelo 2



CONCLUSIONES

El agua subterránea es uno de los recursos naturales más importantes principalmente en zonas áridas y semiáridas, ya que es la fuente de abasteciendo para la población y el sustento de actividades como la agricultura y la industria. Siendo el área de estudio un lugar en potencial crecimiento, tanto del número de habitantes como de las áreas de cultivo, el conocimiento de la calidad del agua dentro de dicha zona es primordial para que el crecimiento se lleve a cabo de una manera sustentable. El tener conocimiento de los sistemas de flujo de una región y de la calidad del agua se hace cada vez más necesario para que la salud humana y la producción agrícola no se vean mermadas. Además, la toma de decisiones importantes en cuanto números de pozos a perforar, establecimiento de estos dependiendo del uso destinado, entre muchas otras cuestiones, deben de ser tomadas en función de la calidad del agua subterránea para permitir que el suplemento se realice a largo plazo sin ocasionar efectos ambientales y de salud adversos.

Debido a lo anterior se realizó en este trabajo de investigación la evaluación de la calidad del agua subterránea en función de los usos a que se le destina, es decir, tanto para uso y consumo humano como para riego agrícola.

De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994, la cual establece los límites máximos permisibles en agua para uso y consumo de la población, se establece que el agua subterránea del área de estudio presenta condiciones de mala calidad natural principalmente en la zona norte del área de estudio con valores altos en la concentración de STD. En la zona Sur del área de estudio se encuentra agua de mejor calidad. El 62% de los aprovechamientos rebasan el límite máximo permisible respecto al parámetro anterior y dos aprovechamientos son utilizados para uso y consumo humano. Dichos aprovechamientos de encuentran en la localidad El Progreso en Villa Juárez y en el Ejido San Sebastián en el municipio de Rioverde.

El 70 % de los aprovechamientos muestreados rebasan el límite máximo permisible de la dureza. Tres aprovechamientos que son utilizados para consumo humano rebasan éste parámetro. Uno se encuentra en el municipio de Villa Juárez en la localidad llamada Progreso con 1384 mg/L de CaCO_3 otro en el Ejido San José del Tapanco con 1218 mg/L de CaCO_3 y el que se encuentra en el Ejido San Sebastián con 1562 mg/L de CaCO_3 , los dos últimos pertenecen a Rioverde.

El 70 % de los aprovechamientos rebasan el límite permisible para el sulfato. En general los aprovechamientos en los cuales el sulfato es mayor al límite permisible es muy semejante a la distribución que presento la dureza total en el área de interés. Los tres aprovechamientos utilizados para consumo humano que rebasan el límite máximo permisible para dureza también rebasan el límite máximo permisible de sulfato en el agua, además del ubicado en el Potrero El Canal del municipio de Rioverde.

El sulfato, la dureza total y los STD, pueden ser considerados indicadores de impacto ambiental para evaluar la mala calidad natural del agua subterránea. Puesto que son los parámetros que se encuentran rebasando una gran parte de los aprovechamientos y que se considera que son aportados al agua debido al transito de esta a través del material geológico. Se deben prestar atención a los aprovechamientos que rebasan el límite máximo permisible de los 3 parámetros anteriores y que son utilizados por la población debido a las consecuencias adversas a la salud humana. Otro aspecto a considerar, es que debido a la dureza del agua, se desperdician grandes cantidades de jabón, afectando de este modo la economía de la población y pudiendo repercutir en otro tipo de contaminación, ya sea al suelo o al agua.

Puede ser considerado el nitrato como indicador de impacto debido a actividades humanas ya que se encuentran niveles de este elemento por encima del límite máximo permisible en el 8 % de los aprovechamientos. Lo anterior se confirma con la baja correlación del N-NO_3 con los demás elementos analizados, sugiriendo que no existe una fuente de origen

relacionada con el medio geológico. Uno de los aprovechamientos que rebasan el límite máximo permisible es utilizado para abastecimiento de la población y tiene una concentración de 11.8 mg/L de N-NO₃. Se debe tener cuidado al utilizar agua para consumo humano de este pozo por los problemas de salud que ocasiona este elemento. Dicho aprovechamiento está ubicado en el Ejido La palmita en el municipio de Rioverde. Los demás que no son utilizados para abastecer de agua potable a la población se encuentran principalmente en la localidad del refugio en Cd Fernández y en el municipio de Rioverde en la localidad denominada San Diego. Las fuentes principales de aportación de este elemento al agua están probablemente relacionadas al uso de fertilizantes que contienen nitrógeno en su composición y al desecho de granjas de una manera puntual. Es de suma importancia tomar consideraciones que prevengan el aumento de las concentraciones en el agua subterránea.

En cuanto a los elementos traza analizados en este estudio, el límite máximo permisible para el fluoruro fue rebasado por el 32 % de los aprovechamientos, la distribución es variada. La mayoría de los aprovechamientos que presentan concentraciones de fluoruro por encima de la norma no son destinados para uso y consumo humano a excepción del que se encuentra localizado en el Ejido San Sebastián en el municipio de Rioverde (1.76 mg/L). Los demás son utilizados para fines de riego y se encuentran distribuidos en la zona sureste del área de estudio en el margen derecho del Río Verde, al noreste en el margen izquierdo del río y en algunos aprovechamientos localizados al noroeste cercanos a las sierras. Se debe tomar en cuenta las regiones que presentan concentraciones mayores al límite máximo permisible al momento de planear perforaciones de aprovechamientos, pues se conocen los efectos a la salud humana que provoca este elemento.

En el caso del hierro, el 13% de los aprovechamientos rebasan la norma, las concentraciones más altas se localizan en algunos aprovechamientos ubicados en el margen izquierdo y derecho del Río Verde. El 6 % de los aprovechamientos rebasan el límite máximo permisible en relación al manganeso. El límite máximo permisible para el arsénico es rebasado por 6

aprovechamientos de los municipios de Rioverde y Villa Juárez, cabe señalar que ningún pozo utilizado para uso y consumo humano, rebasa el límite permisible para éste parámetro. La concentración más elevada encontrada es de 84.87 $\mu\text{g/L}$ (109RV) en el aprovechamiento ubicado en la localidad Los Salitrillos en el municipio de Rioverde.

En cuanto a la calidad del agua para riego en base a la salinidad se identifica que el 1% de las muestras se clasificó tipo C1 (agua de baja salinidad), el 26% como tipo C2 (agua de salinidad media), el 32% como tipo C3 (Agua altamente salina) predominando en la zona sur éstas dos principalmente y el 41% como C4 (como agua muy altamente salina), predominando en la zona norte del área de estudio. Se deben tomar precauciones al utilizar agua para riego de tipo C2, C3 y C4 porque podría ocasionar salinización de los suelos y por tanto cambios en los patrones de agricultura de la zona pudiendo poner en riesgo la sustentabilidad del lugar. Se recomienda el uso de equipo de riego por goteo en vez de por gravedad principalmente en las zonas donde existe agua altamente salina y muy altamente salina para así hacer más eficiente el uso del agua y la prevención de la salinización del suelo.

Con respecto a la Relación de Absorción de Sodio (RAS) se identifica que el agua de todos los aprovechamientos muestreados se clasifica como de tipo S1, por lo que no representa ningún peligro su uso. El peligro por la presencia de magnesio es principalmente al margen izquierdo del Río Verde y en el centro y sureste de la zona norte del área bajo análisis.

La distribución de los diagramas de Stiff en el área de estudio manifiesta el predominio de los iones HCO_3^- y Ca^{2+} en la zona sur y suroeste. Las concentraciones más altas de los iones SO_4^{2-} y Mg^{2+} se ubican principalmente en la zona norte del área de estudio y al margen izquierdo del Río Verde.

Se identifican en total 7 familias de agua clasificadas por ión dominante; HCO_3^- -Ca, HCO_3^- -Mixta, Mixta-Ca, Mixta-Mixta, SO_4 -Ca, SO_4 -Mg y SO_4 -Mixta. Pero éstas son agrupadas dentro de 3 principales familias y son;

1. $\text{HCO}_3\text{-Ca}$. Se encuentra distribuida principalmente en la zona suroeste del área de estudio (al sur del Río Verde y de la Sierra La Noria), así como también en la zona noreste del área de estudio.
2. $\text{SO}_4\text{-Ca}$. Se encuentra distribuida en la región plana topográficamente hablando así como al sur de la Sierra El Vetado y al norte de El Cordón San Francisco,
3. $\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$. Se localiza en diversas localidades como son; San Bartolo, Progreso, Pastora, Angostura, La Gavia en Villa Juárez, entre otras.

Las direcciones de flujo en el área de estudio son de manera convergente hacia el Río Verde. A su paso el agua va disolviendo minerales que van aportando los iones que caracterizan a cada una de las familias de agua localizadas. En el área sur los procesos geoquímicos que se dan principalmente son la disolución de calcita, dolomita y yeso así como también, el intercambio catiónico en las aguas pertenecientes a la familia $\text{SO}_4\text{-Ca}$ de acuerdo a la modelación hidrogeoquímica inversa realizada en esta zona del área de estudio.

Como resultado de la modelación hidrogeoquímica inversa en el área zona Norte del área de estudio se establece que, los procesos dominantes llevados a cabo son; la disolución de calcita hasta la saturación bajo condiciones de sistema abierto y disolución de dolomita, conforme el agua subterránea avanza va disolviendo yeso y el exceso de calcio aportado por este proceso provoca que la calcita precipite. La dolomita continua disolviendo pero incongruentemente, lo que da lugar al proceso llamado dedolomitización en algunas zonas del área norte del sistema estudiado.

Sin embargo también por medio de la interpretación de isótopos estables se establece que en la zona norte del área de estudio existe evidencia de procesos de evaporación, por lo tanto, cuando las muestras alcanzan el equilibrio con respecto al yeso, el aumento del ión sulfato se debe al proceso descrito anteriormente. El intercambio catiónico en esta región del área de estudio

también es importante y responsable del incremento de algunas especies (K, Mg y Na).

Se pueden reconocer dos sistemas de flujo diferentes en base al análisis de isótopos ambientales. Se puede deducir que el agua de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ circula a menor profundidad que la de las familias $\text{SO}_4\text{-Ca}$ y $\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$ en base a los resultados obtenidos de la altitud de la recarga y de la comparación de la composición isotópica con el elemento que es representativo del tránsito del agua subterránea por formaciones que contienen alta cantidad de SO_4 en su composición y las cuales se encuentran a mayor profundidad que las que aportan los minerales para dar lugar al agua de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$. Es posible incluso que el área de recarga de las familias $\text{SO}_4\text{-Ca}$ y $\text{SO}_4\text{-Mg-Mixta}$ se encuentre fuera del área que ha sido delimitada para este trabajo de investigación. Puesto que en el análisis de altitudes de los sitios de recarga en la zona Sur del área de estudio, no se encuentran sierras dentro del área delimitada para este trabajo de investigación con esas altitudes.

BIBLIOGRAFIA

Alvarado, O. A. R. (1973). Estudio geohidrológico de la cuenca de Rioverde estado de San Luis Potosí. Area de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería. San Luis Potosí, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí: 39.

APHA-AWWA-WPCF (1992). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid.

Appelo, C. A. J., y Postma D. (1996). Geochemistry, groundwater and pollution. Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema.

Armienta, M.A., Zamora, V. y Juárez, F. (1987). Manual para el análisis químico de aguas naturales, en campo y laboratorio. Comunicaciones técnicas, Serie Docencia y Divulgación, No.4, Instituto de Geofísica, UNAM, México. 86 pp.

Bajjali, W. (2006). "Recharge mechanism and hydrochemistry evaluation of groundwater in the Nuaimh area, Jordan, using environmental isotope techniques." *Hydrogeology Journal* 14: 180-191.

Ballín, C. J. R. (2003). Caracterización y manejo del hidrosistema de la región agrícola de Rioverde. CIEP. Facultad de Ingeniería. Tesis de Maestría. San Luis Potosí, S.L.P, Universidad Autónoma de San Luis Potosí: 161.

Ballín, C. J. R., A. Cardona y Cisneros, A.R. (2004). "Evaluación del impacto agrícola sobre el agua subterránea de la zona de Rioverde, S.L.P." Instituto de Investigación de Zonas Desérticas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.: 20.

Berger, R. A. (1997). Assesing rapid environmental changes in earth systems. *Environmental Geology* 32(1): 36-44.

Canter, W. L. (1998). Manual de evaluación de impacto ambiental: técnicas para la elaboración de estudios de impacto. Madrid.

Cardona, B. A., R. Carrillo, J. J., y Armienta, H.M.A. (1993). Elemento traza: contaminación y valores de fondo en aguas subterráneas de San Luis Potosí, SLP, México. *Geofísica internacional* 32(2): 277-286.

Cardona, A., Carrillo-Rivera, J.J., Castro-Larragoitia, J., y Graniel-Castro, E.H. (2008). Combined use of indicators to evaluate waste-water contamination to local flow systems in semi-arid regions: San Luis Potosí, Mexico. *Groundwater Flow understanding: from local to regional scale*, J. Joel Carrillo R. y M. Adrián Ortega G. Editores, Taylor and Francis Group, London, UK, 85-104.

Carrillo, B. J. (1971). La plataforma Valles-San Luis Potosí, Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros: Vol. XXIII- No 1-6.

Carrillo-Rivera, J. J. (2000). Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin, and vertical flow in two semi-arid drainage basins, Mexico. *Hydrogeology Journal* 8: 503-520.

Carrillo-Rivera, J. J., Cardona A., y Edmunds, W.M. (2002). Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí basin, Mexico. *Journal of Hydrogeology* 261: 24-47.

Carrillo-Rivera, J. J. (2003). Lack of a conceptual system view of groundwater resource in Mexico. *Hydrogeology Journal* 11: 519-520.

Carrillo-Rivera, J. J., Varsányi, I. Kovács, L.Ó., y Cardona, A. (2007). Tracing groundwater flow systems with hydrogeochemistry in contrasting geological environments. *Water Air Soil Pollution* 184: 77-103.

Catalán, L. J. G. (1981). *Química del agua*. Madrid, España, Fuenlabrada.

Charcas, S. H., Olivares S. E., y Aguirre, R.J.R. (2002). Agua de riego en la región de Rioverde, San Luis Potosí, México. *Ingeniería Hidráulica en México* XVII(4): 37-56.

Charcas, S. H. (2002). *Procesos de conformación y caracterización actual de la región agrícola de Rioverde, San Luis Potosí, México*. Facultad de Agronomía, Subdirección de estudios de Posgrado. Tesis de Doctorado. Nuevo León, Universidad Autónoma de Nuevo León: 200.

Clark, I., y Fritz, P. (1997). *Environmental isotopes in Hydrogeology*. New York, Lewis Publishers.

CNA (2002). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de Río Verde, estado de San Luis Potosí, México, D.F., Comisión Nacional de Agua. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica*: 25.

CNA (2007-a). *Estadísticas del Agua en México*. ISBN 978-968-817-852-2 Segunda reimpresión: 263.

CNA (2007-b). *Estudio de Actualización Geohidrológica en el Acuífero Rioverde, en el Estado de San Luis Potosí*. Comisión Nacional del Agua. Gerencia Estatal en San Luis Potosí. Subgerencia Técnica. Contrato No. SGT-GN-SLP-06-043-RF-LP.

Custodio, E. (1996). *Hidrología subterránea*. Barcelona.

Custodio, G. E. (1998). Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. *Boletín Geológico y Minero* 109(4): 329-346.

Environmental Protection Agency, E. (1990). *Groundwater and contamination*. 1: 1-144.

Faure, G. (1998). *Principles and applications of Geochemistry*. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall.

Fetter, W. C. (2001). *Applied Hydrogeology*. EE.UU, Prentice Hall.

Fitts, C. R. (2002). *Groundwater science*. San Diego California, Academic Press.

Freeze, A. R. y Cherry, A. J. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.

Fryar, E. A., Mullican III, F. W., y Macko, A.S. (2001). Groundwater recharge and chemical evolution in the southern High Plains of Texas, USA. *Hydrogeology Journal* 9: 522-542.

Gascoyne, M. (1997). Evolution of redox conditions and groundwater composition in recharge-discharge environments on the Canadian shield. *Hydrogeology Journal* 5(3): 4-18.

Graniel, C. E., Morris, L. B., y Carrillo-Rivera .J.J. (1999). Effects of urbanization on groundwater resources of Merida, Yucatan, Mexico. *Environmental Geology* 37(4): 303-312.

Guendouz, A., Moulla A. S., Edmunds, W.M., Zouari, K., Shand, P., y Mamou, A. (2003). Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the Complexe Terminal aquifer in the Algerian Sahara. *Hydrogeology Journal* 11: 483-495.

Güler, C., Thyne G. D., McGray, J.E., y Turner, A.K. (2002). Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal* 10: 455-474.

Hem, D. J. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. Estados Unidos.

HIDROTEC (1972). *Informe del estudio geohidrológico preliminar en la zona de Rioverde, S.L.P.* San Luis Potosí, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos: Tomos I a IV.

INEGI (1995). *Censos de población y vivienda*. San Luis Potosí.

INEGI (2002). *Síntesis de información geográfica del Estado de San Luis Potosí*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

INEGI (2005). Censos de población y vivienda. San Luis Potosí.

Jalali, M. (2005). Major ion chemistry of groundwaters in the Bahar area, Hamadan, western Iran. *Environmental Geology*.

Jenne, E.A., Ball, J.W., Vivit, D.V., y Barks, J.H. 1980. Geochemical modelling apparent solubility controls on Ba, Zn, Cd, Pb, and F in waters of the Missouri Tri-State mining area. In Hemphill, D.D. (Editor), Trace substances in environmental health. XIV. University of Missouri, Columbia, pp. 353-361.

Katz, B. G. (2004). Sources of nitrate contamination and age of water in large karstic springs of Florida. *Environmental Geology* 46(6-7): 689-706.

Kehew, E. A. (2001). Applied chemical hydrogeology. N.J., Prentice Hall.

Labarthé, H.G., Tristán, G. M., Aguillón, R. A., y Jiménez, L. L. S., et al. (1989). Cartografía geológica 1:50,000 de la hoja el Refugio y Mineral el Realito, Estados de San Luis Potosí y Guanajuato. San Luis Potosí, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología. Folleto Técnico, 112, 1-85.

Lloyd, J. W., y Heathcote J. A. (1985). Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater: an introduction. New York, Clarendon Press.

Mahlknecht, J., Schneider, J.F., Merkel, B.J., Navarro de León, I., y Bernasconi, S.M. (2004). Groundwater recharge in a sedimentary basin in semi-arid Mexico. *Hydrogeology Journal* 12: 511-530.

Maimone, M. (2004). Defining and managing sustainable yield. *Ground Water* 42(6): 809-814.

Martínez, D. E., Bocanegra, E.M., y Manzano, M. (2000). La modelación hidrogeológica como herramienta en estudios hidrogeológicos. *Boletín Geológico y Minero* 111-4: 83-98.

NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de sólidos y sales disueltas totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- método de prueba.

NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- método de prueba.

NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- método de prueba.

NMX-AA-074-1981. Análisis de agua- Determinación del ión sulfato.

NMX-AA-077-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de fluoruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas- método de prueba.

NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Montañez, C. S. (1992). Hidrogeoquímica del municipio de Rioverde, San Luis Potosí. Área de ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería. San Luis Potosí, SLP., Universidad Autónoma de San Luis Potosí: 91.

Naqa, E. A., y Kuisi, A. M. (2004). Hydrogeochemical modeling of the water seepages through Tannur Dam, southern Jordan. *Environmental Geology* 45(8): 1087-1100.

Nativ, R. (2004). "Can the desert bloom? lessons learned from the Israeli case." *Ground Water* 42(5): 651-657.

Parnachev, V. P., Banks, D., Berezovsky, A.Y., y Garbe-Schönberg, D. (1999). "Hydrochemical evolution of Na-SO₄-Cl groundwaters in a cold, semi-arid region of southern Siberia." *Hydrogeology Journal* 7: 546-560.

Parkhurst, D.L., y Appelo, C.A.J. User's guide to phreeqc (version 2)—a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. US Geol. Surv. Water Resour. Invest. Rep. 99-4529.

Peñuela, A. L. A. (2007). Proceso de recarga-descarga de agua subterránea en zonas receptoras de pago por servicio ambiental hidrológico, Sierras Nevada y Las Cruces-México. Instituto de Geofísica. Tesis de Maestría. México, D.F, Universidad Nacional Autónoma de México.

Petrides, B., y Cartwright, I. (2006). "The hydrogeology and hydrogeochemistry of the Barwon Downs Graben aquifer, southwestern Victoria, Australia." *Hydrogeology Journal* 14(5): 809-826.

Planer-Friedrich, B. (1999). Hydrogeological and hydrochemical investigations in the Rioverde basin, Mexico. Institute of geology. Alemania, University of mining and technology Freiberg: 151.

Price, M. (2003). Agua subterránea. México, Editorial Limusa.

PROYESCO (1980). Trabajos complementarios del estudio geohidrológico de la zona de Rioverde, S.L.P. San Luis Potosí: Tomos I a II.

Rajmohan, N., y Elango, L. (2004). Identification and evolution of hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India. *Environmental Geology* 46: 47-61.

Revuelta, C. C., Benedí, J. Á., Benítez, M.A., Diez, P.M., y Rodríguez, S.B. (2003). "Contaminación por arsénico en aguas subterráneas en la provincia de Valladolid: variaciones estacionales." *Estudios de la zona no saturada del suelo VI*: 91-98.

Song, X., Kayane, I., Tanaka, T., y Shimada, J. I. (1999). Conceptual model of the evolution of groundwater quality at the west zone in Sri Lanka. *Environmental Geology* 39(2): 149-164.

Sophocleous, M. (2005). Groundwater recharge and sustainability in the high plains aquifer in Kansas, USA. *Hydrogeology Journal* 13: 351-365.

Spacek, O., y Hirata, R. (2002). Geochemical and stable isotopic evolution of the Guarani Aquifer System in the state Sao Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal* 10: 643-655.

Stamatis, G., Voudouris, K., y Karefilakis, F. (2001). Groundwater pollution by heavy metals in historical mining area of Lavrio, Attica, Greece. *Water, Air and Soil Pollution* 128: 61-83.

Stuyfzand, P. J. (1999). "Patterns in groundwater chemistry resulting from groundwater flow." *Hydrogeology Journal* 7: 15-27.

Thomas, J. M., Welch, H.A., y Preissler, M.A. (1989). Geochemical evolution of ground water in Smith Creek Valley -a hydrologically closed basin in central Nevada, U.S.A. *Applied Geochemistry* 4: 493-510.

Tóth, J. (1995). Hydraulic continuity in large sedimentary basins. *Hydrogeology Journal* 3(4): 4-16.

Tóth, J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal* 7: 1-14.

UASLP (2004). Estudio para la determinación de proyectos prioritarios para la recarga del acuífero Rioverde- Cd Fernández y región hidrológica Pánuco. San Luis Potosí, S.L.P, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería: 189.

Verma, S. P. (2005). Estadística básica para el manejo de datos experimentales: aplicación en la Geoquímica (Geoquimiometría). México, D.F., UNAM.

Winter, T. C. (1999). Relation of streams, lakes and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal* 7: 28-45.

Winter, T. C. (1999). Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal* 7: 28-45.