

IPICYT

**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN CIENCIAS APLICADAS

**“Caracterización Hidrogeoquímica del Acuífero
del Valle de Villa Hidalgo, San Luis Potosí,
México”**

uras)

Tesis que presenta

Ingrid Árcega Santillán

Para obtener el grado de

Maestra en Ciencias Aplicadas

En la opción de

Ciencias Ambientales

Directora de la Tesis:

Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas

San Luis Potosí, S.L.P., diciembre de 2010



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Caracterización Hidrogeoquímica del Acuífero del Valle de Villa Hidalgo, San Luis Potosí, México**” presentada para obtener el Grado de Maestra en Ciencias Aplicadas en la opción de Ciencias Ambientales fue elaborada por **Ingrid Árcega Santillán** y aprobada el **16 de diciembre de 2010** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas
(Directora de Tesis)

Dr. José Alfredo Ramos Leal
(Asesor de Tesis)

Dr. Roberto Briones Gallardo
(Asesor de Tesis)



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Hidrogeoquímica, de la División de Geociencias Aplicadas bajo la dirección de la Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas y del Dr. José Alfredo Ramos Leal.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología 221792 y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



IPICYT

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 043 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Ciencias Aplicadas en la opción de Ciencias Ambientales está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 16 días del mes de diciembre del año 2010, se reunió a las 10:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. Roberto Briones Gallardo	Presidente	UASLP
Dr. José Alfredo Ramos Leal	Secretario	IPICYT
Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS APLICADAS
EN LA OPCION DE CIENCIAS AMBIENTALES**

sustentó la C.

Ingrid Árcega Santillán

sobre la Tesis intitulada:

Caracterización Hidrogeoquímica del Acuífero del Valle de Villa Hidalgo, San Luis Potosí, México

que se desarrolló bajo la dirección de

Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas

El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLA

Dándose por terminado el acto a las 11:35 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 16 días del mes de diciembre de 2010.


Dr. Marcial Borilla Marín
Secretario Académico





Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento de Asuntos Escolares

Dedicatorias

A mis padres y hermanos por todo su apoyo y amor, recuerden que son lo más importante en mi vida y que somos una gran familia los amo.

Y a ti en especial papá sé que estás pasando por un momento difícil pero tú eres mi ejemplo, mi inspiración, te admiro y te amo con todo mi corazón, échale muchas ganas.

Agradecimientos

A la doctora Nadia por su confianza, comentarios, sugerencias y consejos para la realización de esta tesis.

De la misma manera quiero agradecer al doctor Alfredo Ramos Leal por su apoyo, dedicación, tiempo y el material didáctico que me facilitó no sólo durante la realización de esta tesis sino a lo largo de toda la maestría.

También agradezco a Janete Morán por enseñarme a utilizar el equipo para medir los parámetros físicoquímicos y el colorímetro, pero principalmente por ayudarme a resolver algunas de mis dudas, gracias por tu tiempo.

A Fred por enseñarme a utilizar algunos programas, por todos tus consejos y apoyo, pero principalmente por tu paciencia.

A toda mi familia y amigos por todo su confianza y amor.

Agradezco a las personas que amablemente nos permitieron tener acceso en sus propiedades para la toma de muestras y a las personas encargadas del funcionamiento de los pozos de las comunidades visitadas.

Al IPICYT por haber contribuido en una etapa más de mi formación académica y al CONACyT por la beca otorgada.

Parte de esta investigación se realizó con la ayuda del Proyecto CONACYT-90901 "Caracterización hidrogeoquímica de la descarga subterránea en la Zona de la Huasteca, San Luis Potosí." aportando los recursos económicos para el análisis de datos en el laboratorio de Geociencias de la UNAM.

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos institucionales	iii
Acta de examen	iv
Dedicatorias	v
Agradecimientos	vi
Contenido	vii
Lista de tablas	viii
Lista de figuras	ix
Lista de Anexos	xi
Resumen	xii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Objetivo	4
1.2 Geología	4
1.3 Hidrología e Hidrogeología	10
1.4 Hidrogeoquímica	10
1.4.1 Parámetros Hidrogeoquímicos	11
1.4.2 Análisis de datos Hidrogeoquímicos	15
1.4.3 Calidad del agua	18
Capítulo 2. Metodología	
2.1 Localización de los puntos de muestreo	19
2.2 Parámetros fisicoquímicos	22
2.3 Balance iónico	23
Capítulo 3. Resultados y Discusión	
3.1 Resultados de los parámetros fisicoquímicos	25
3.2 Cationes, aniones y balance iónico	28
3.3 Clasificación de las familias de agua	32
3.4 Calidad del agua	35
3.5 Procesos Hidrogeoquímicos	36
Conclusión	47
Referencias	48
Anexos	50

Lista de tablas

Tabla 1.1 Máximos permisibles de las características químicas establecidas en la NOM-127-SSA1-1994.	18
Tabla 2.2 Datos geográficos de las muestras y tipos de aprovechamiento.	21
Tabla 2.3 Equipo utilizado para realizar la medición de los parámetros físicoquímicos en campo.	24
Tabla. 3.1 Valores de los parámetros físicoquímicos.	46

Lista de figuras

Figura 1.1 Ubicación del área de estudio.	2
Figura 1.2 Sección Geológica de Villa Hidalgo W-E, mostrando el acuífero somero y profundo.	3
Figura 1.3 Mapa Geológico del área de estudio.	8
Figura 1.4 Sección Geológica X-X ¹ .	9
Figura 1.5 Diagrama de Piper.	16
Figura 1.6 Diagrama de Stiff.	16
Figura 1.7 Diagrama de Schoeller.	17
Figura 1.8 Diagramas de Gibbs	17
Figura 2.1 Localización de los puntos de muestreo, límite de cuenca, sección A-B y grupos de datos.	20
Figura 3.1 Temperatura, pH, oxígeno disuelto, potencial redox, alcalinidad y sólidos totales disueltos de muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.	27
Figura 3.2 Concentraciones de calcio, magnesio, sodio, potasio y dureza de muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.	30
Figura 3.3 Concentraciones de bicarbonato, cloruro, sulfato, nitrato y fluoruro de muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.	31
Figura 3.4 Diagrama de Scholler de las muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.	32
Figura 3.5 Diagrama de Piper de las muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.	33
Figura 3.6 Diagramas de Stiff de las muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.	34
Figura 3.7 Sólidos totales disueltos, oxígeno disuelto y potencial redox contra pH en muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.	38
Figura 3.8 Sólidos totales disueltos contra calcio, sodio, potasio y	39

magnesio de muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.

Figura 3.9 Sólidos totales disueltos contra bicarbonato, cloruro, sulfato y nitrato de muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna. 40

Figura 3.10 Sólidos totales disueltos, sodio, sulfato, cloruro y magnesio contra distancia en muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo y Villa de Arista. 42

Figura 3.11 Diagramas de Gibbs para sodio, sulfato, cloruro, potasio y magnesio de muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna. 43

Figura 3.12 Bicarbonato, nitrato, calcio y potasio contra distancia en muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo y Villa de Arista. 44

Figura 3.13 Temperatura, pH, oxígeno disuelto, potencial redox y alcalinidad contra distancia de muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo y Villa de Arista. 45

Figura A1. Gráficas de caja para aniones. 50

Figura A2. Gráficas de caja para cationes. 51

Figura A3. Potencial redox contra oxígeno disuelto 52

Figura A4. Balance iónico de las muestras recolectadas en Villa Hidalgo, Villa Arista y Joya de Luna. 53

Figura A5. Enriquecimiento de cloruro y sodio de las muestras recolectadas en Villa Hidalgo, Villa Arista y Joya de Luna. 54

Anexos

Anexo A. Gráficas auxiliares	51
Anexo B. Reportes Hidrogeoquímicos de las muestras recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y Joya de Luna.	55

Caracterización Hidrogeoquímica del Acuífero del Valle de Villa Hidalgo, San Luis Potosí, México

por
Ingrid Árcega Santillán

Resumen

En este estudio se determinó la calidad del agua del valle de Villa Hidalgo de acuerdo a la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 que establece las características químicas para agua de uso y consumo humano a través de la medición de temperatura, pH, oxígeno disuelto, potencial rédox, alcalinidad, sólidos totales disueltos, cationes y aniones mayores (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y F^-) en muestras de agua de Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna. Además se caracterizó espacial e hidrogeoquímicamente el agua del valle mediante diagramas de dispersión, Schoeller, Piper, Stiff y Gibbs .

Los resultados obtenidos indican que el agua del acuífero somero del valle de Villa Hidalgo no es apta para consumo humano toda vez que excede los límites permisibles para nitratos. Debido a que no hay pozos que alcancen el acuífero profundo de la Formación El Abra no fue posible determinar su calidad. Sin embargo, la contaminación de las muestras de La Joya de Luna con fluoruro y nitratos abren la posibilidad de que el acuífero profundo de Villa Hidalgo exceda el límite permisible de fluoruro y nitratos en el agua, conjeturas que únicamente podrían ser corroboradas a través de la perforación de un pozo profundo en la Formación El Abra en el valle de Villa Hidalgo y realizar su análisis hidrogeoquímico.

Las muestras de la Formación El Abra de La Joya de Luna presentan una composición homogénea característica de aguas bicarbonatadas de reciente infiltración o menos evolucionadas. Las muestras de Villa de Arista tienen firmas características de evaporitas con mayor grado de evolución debido a una interacción agua-roca con yesos y halita. Las muestras de Villa Hidalgo permanecen en un intervalo intermedio entre las aguas bicarbonatadas de La Joya de Luna y las aguas sulfatadas de Villa de Arista. Especialmente, las aguas menos evolucionadas se encuentran en el sur del valle mientras que las más evolucionadas se encuentran en el norte del valle.

Esta tesis aporta información sobre la calidad del agua del acuífero somero de Villa Hidalgo y permite hacer inferencias sobre la calidad del acuífero profundo

de la Formación El Abra. Además, sienta las bases hidrogeoquímicas sobre la caracterización del acuífero profundo de Villa Hidalgo con potencial hídrico favorable para su aprovechamiento por la capital del estado, misma que actualmente requiere de compensar un déficit de 42.5 millones de metros cúbicos anuales. La perforación de pozos profundos de prueba en la Formación El Abra permitirían concluir la caracterización del acuífero profundo de Villa Hidalgo.

PALABRAS CLAVE: hidrogeoquímica, Villa Hidalgo, acuífero profundo, calidad del agua, Formación El Abra, fluoruro, nitratos, evolución del agua.

Capítulo 1. Introducción

La capital del estado de San Luis Potosí ha tenido en los últimos 40 años un aumento en su población. En el año de 1970 tenía 301,896 habitantes mientras que para el año de 2010 un total de 775,782 (INEGI, 2010) cuyo abastecimiento de agua potable se satisface del acuífero profundo. Datos de la CNA del 2002 informan que del acuífero del valle de San Luis Potosí se extraen 125.6 millones de metros cúbicos por año, de los cuales 5 se extraen del acuífero superior y los restantes 120.6 millones del acuífero profundo. Para ese mismo año se estimó una recarga de 78.1 millones de metros cúbicos incluyendo la recarga natural, artificial y flujo subterráneo lo que genera un déficit de 42.5 millones de metros cúbicos al año (CNA, 2002). Por otro lado, el agua del acuífero profundo tiene un tiempo de residencia de más de 1,000 años. Dado este déficit y la creciente demanda del recurso hoy en día es imperante explorar la calidad de agua de acuíferos circunvecinos que pudieran satisfacer la demanda del vital recurso. Cerca de la capital del estado, en el municipio de Villa Hidalgo (Figura 1.1) existen dos acuíferos, uno somero y uno profundo, con un potencial hídrico favorable para abastecer a la capital del estado en caso de ser necesario (Figuera 2010). El acuífero somero se encuentra en el material de relleno del valle de Villa Hidalgo entre 30 y 60 metros de profundidad aproximadamente. El acuífero profundo se localiza debajo de un grupo de rocas de tipo conglomerado a 300-600 metros de profundidad en roca caliza fracturada de la Formación El Abra (Figura 1.2) Debido al espesor, porosidad, permeabilidad, fracturamiento (Davis, *et al.* 1971) y conductividad de este tipo de rocas (Figuera, 2010) el acuífero profundo se considera con potencial hídrico favorable por lo que es deseable analizar la calidad del agua del acuífero profundo y el somero de Villa Hidalgo mediante técnicas hidrogeoquímicas.

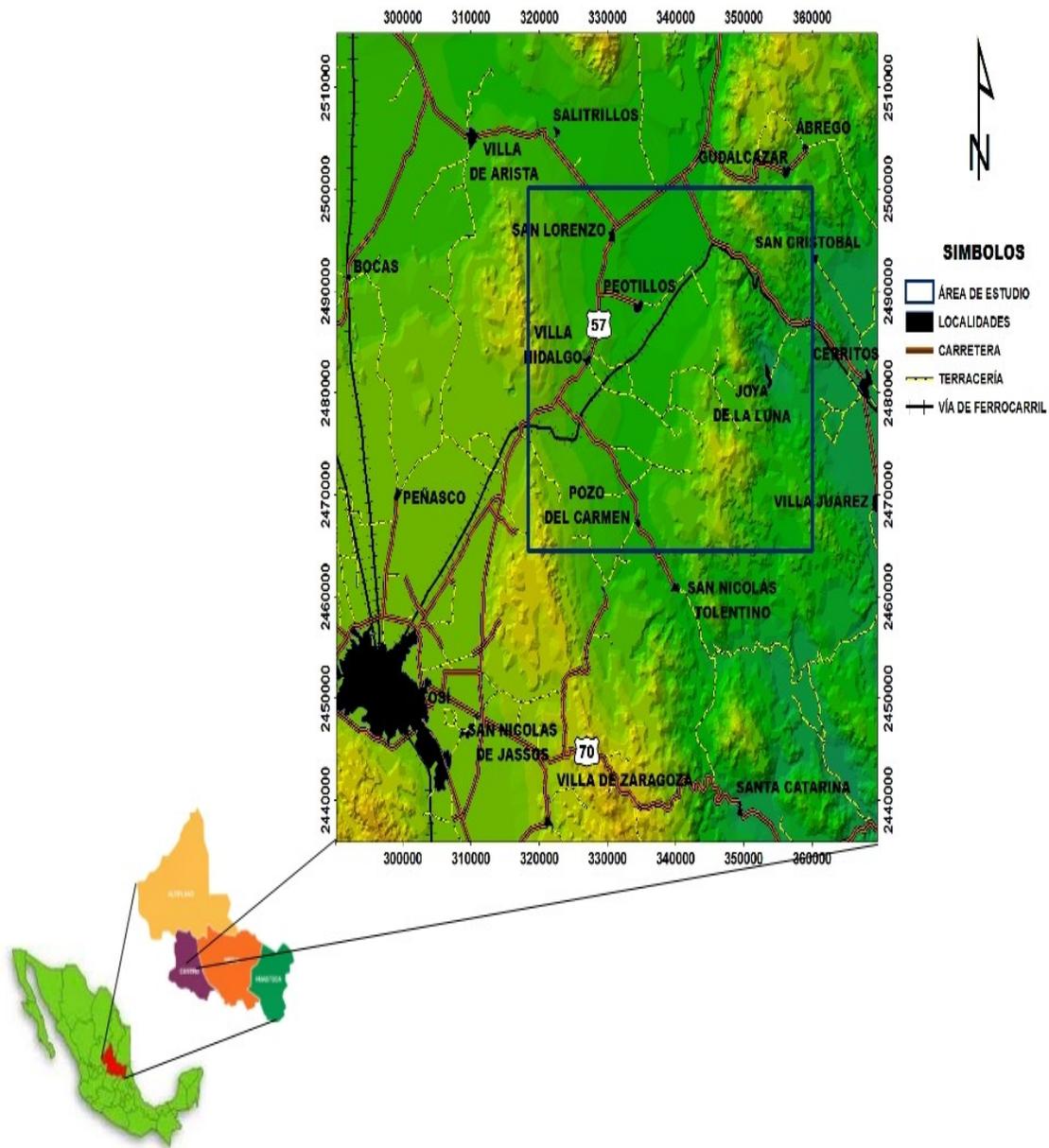


Figura 1.1 Ubicación del área de estudio.

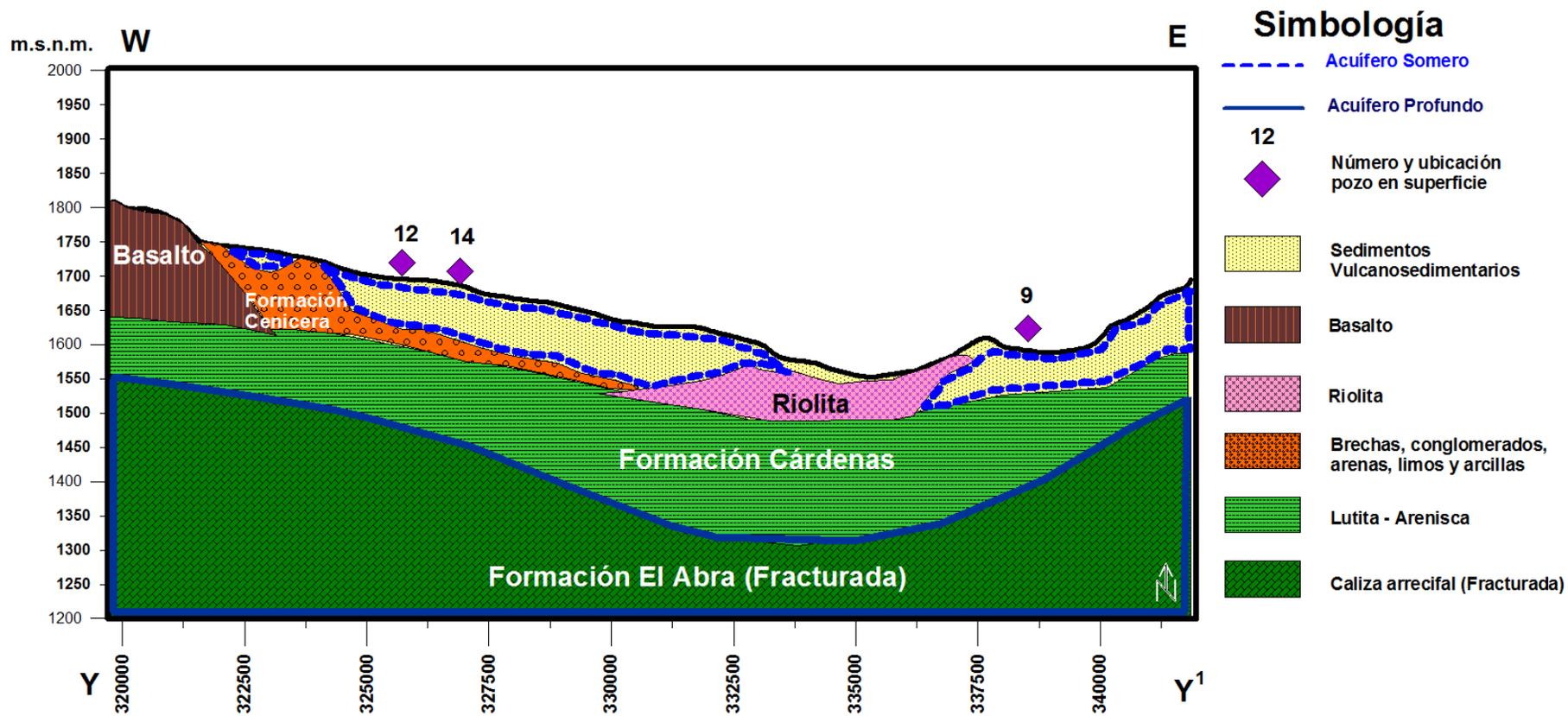


Figura 1.2 Sección Geológica de Villa Hidalgo W-E (Sección Y-Y¹), mostrando el acuífero somero y profundo.

1.1 Objetivo

El objetivo de este estudio es caracterizar hidrogeoquímicamente el agua de los acuíferos somero y profundo del valle de Villa Hidalgo para determinar su calidad para consumo humano.

1.2 Geología

Villa Hidalgo se localiza en el margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí (PVSLP), la cual es una estructura calcárea que se desarrolló en el Cretácico Medio, cuenta con diversos cambios de facies: ambientes de plataforma, margen de plataforma, talud y arrefice, posteriormente surgió un evento volcánico depositando diversas rocas ígneas en la región (Figura 1.3) (López-Doncel, 2003).

El basamento está conformado por rocas sedimentarias del Cretácico Medio que corresponden a la Formación El Abra, subyaciendo se encuentra la Formación Soyatal y Cárdenas, posteriormente hubo un evento tectónico extensional el cual originó dos fosas tectónicas, la primera con dirección sur-norte llamado “Graben de Peotillos- San Juan – Concordia - Pozo del Carmen”, con una longitud de 5 kilómetros y 30 kilómetros de ancho, la segunda fosa se llama “Graben de Corcovada - Presita de la Cruz” de 3 kilómetros de ancho por 10 kilómetros de largo, éstas formaciones están cubiertas por depósitos continentales terciarios, los cuales subyacen a rocas rióliticas, dacitas e ingnimbritas; así como, derrames de basaltos de 8 a 15 metros de espesor que ya pertenecen al Cuaternario, para finalizar en el valle con una depositación de sedimentos de tipo aluvión de formación reciente.

ERA MESOZOICA

Formación Guaxcamá

Cretácico Inferior

Esta constituida por una secuencia de anhidritas y yesos formadas probablemente porque la PVSLP sufrió un levantamiento y por lo tanto se

modificó la topografía de la zona y se formaron algunas barreras provocando que se formaran lagunas iniciando un proceso de precipitación de sale y evaporación del agua, debido a su posición estratigráfica se correlaciona con las formaciones Tamaulipas Superior e Inferior que se formaron en un ambiente de cuenca (COREMI, 1992).

Formación El Abra

Cretácico Superior

Son facies de caliza masiva bien estratificadas, que alcanzan hasta 400 metros de espesor, se encuentran distribuidas ampliamente en la PVSLP (López-Doncel, 2003), se depositaron en un ambiente de plataforma con facies arrecifales, en ocasiones se encuentra subyaciendo o de forma discordante con las formaciones Soyatal y Cárdenas. La base de esta formación está constituida por caliza biógena formada en su mayoría por corales, caprínidos, toucacias y radiolítidos, esta roca es compacta y maciza de color gris claro y estratos gruesos. Los sedimentos de esta formación se consideran que son depósitos de aguas claras y someras en un medio ambiente con condiciones favorables para el desarrollo de fauna, debido a lo grueso de los estratos se podría suponer que existió una lenta y progresiva subsidencia en el fondo marino, con algunas transgresiones y debido a su contenido de fauna se le asigna una edad Albino Cenomaniano del Cretácico Inferior.

Formación Soyatal

Cretácico Superior

En el área de estudio se encuentra entre las formaciones El Abra y Cárdenas, Zárate Muñoz en 1977 la dividió en dos unidades litológicas.

Unidad Inferior: compuesta por calizas arcillosas y limolitas de color gris oscuro a negro, estratos delgados e intercalada en algunas zonas con lutitas físciles de tono rojo, contiene vetillas de calcita.

Unidad Superior: es una intercalación de lutitas físciles de color gris oscuro con calizas arcillosas y calcarenitas, al intererizarse estas unidades presentan un color amarillo ocre.

Esta formación por sus características faunísticas y litológicas se puede

considerar que se formó en aguas poco profundas influenciadas por un evento de transgresión (Zapata y Pérez, 1979).

Formación Cárdenas

Cretácico Superior

En la zona de estudio está en concordancia transicional con la Formación Soyatal y discordante a la Formación El Abra, es una alternancia rítmica de lutitas y areniscas, las cuales a su vez subyacen a los derrames ígneos.

ERA CENOZOICA

El vulcanismo en San Luis Potosí indica un régimen dominado por procesos de subducción, el valle de Villa Hidalgo está formado por domos y derrames de lava de composición dacítica-andecítica, emplazados durante el Oligoceno, éstas lavas formaron domos (dacita Jacavaquero), posteriormente se depositaron piroclastos (ignimbrita Santa María) los cuales están intercalados con la andesita de Villa Hidalgo (Tristan *et al* 2009).

Formación Cenicera

Terciario

Paleoceno-Eoceno

Es una secuencia de brechas, conglomerados con matriz areno-limo-arcillosa semiconsolidados, areniscas, limos y arcillas, sus espesor puede ser muy variado debido a su depositación en la cuenca, de acuerdo a sus características litológicas este tipo de depósito se formó en un medio ambiente continental.

Dacita Jacavaquero

Terciario

Oligoceno

Dacita de colos gris claro, con fenocristales de sanidino, plagioclasa, hornblenda y biotita, en una matriz desvitrificada (Tristan *et al* 2009).

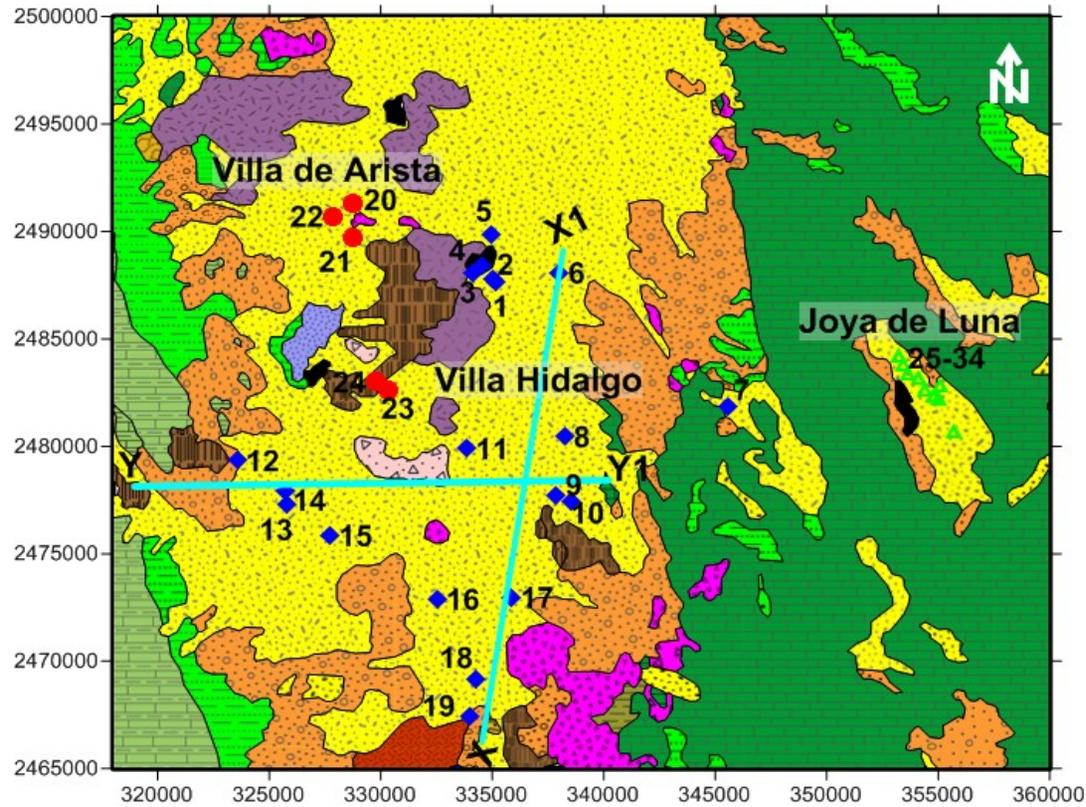
Ignimbrita Santa María

Terciario

Mioceno

Es un depósito de flujo de ceniza soldado de composición riolítica, es de color gris-café, de textura porfirítica (Tristan *et al* 2009).

Los últimos eventos volcánicos están representados por un vulcanismo bimodal de la riolita Panalillo que consiste de pómez y ceniza totalmente soldada, y de derrames de basaltos de características alcalinas ambos eventos durante el Plioceno. Por último en el Pleistoceno se presentaron los últimos derrames de basaltos formando algunas mesetas, para concluir en el Holoceno con la depositación de sedimentos vulcanoclásticos como material de relleno del valle (Tristan *et al* 2009).



Leyenda

ERA	PERIODO	PISO	GEOLOGÍA EN VILLA HIDALGO		
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	ALUVIÓN		
		PLEISTOCENO	DERRAMES DE BASALTOS		
	TERCIARIO	NEOCENO	PLIOCENO	RIOLITA PANALILLO	
				BASALTO	
		MIOCENO		ANDESITA VILLA HIDALGO	
				IGNIMBRITA SANTA MARÍA	
		PALEOCENO	OLIGOCENO	DACITA JACAQUERO	
			EOCENO	Fm. CENICERA	
			PALEOCENO		Fm. CÁRDENAS
					Fm. SOYATAL
MESOZOICO	CRETÁCICO	SUPERIOR	Fm. EL ABRA		
		TURONIANO	Fm. GUAXCAMÁ		
		CENOMANIANO			
		ALBIANO			
		INF.			

Figura 1.3 Mapa Geológico del área de estudio y secciones X-X1 y Y-Y1.

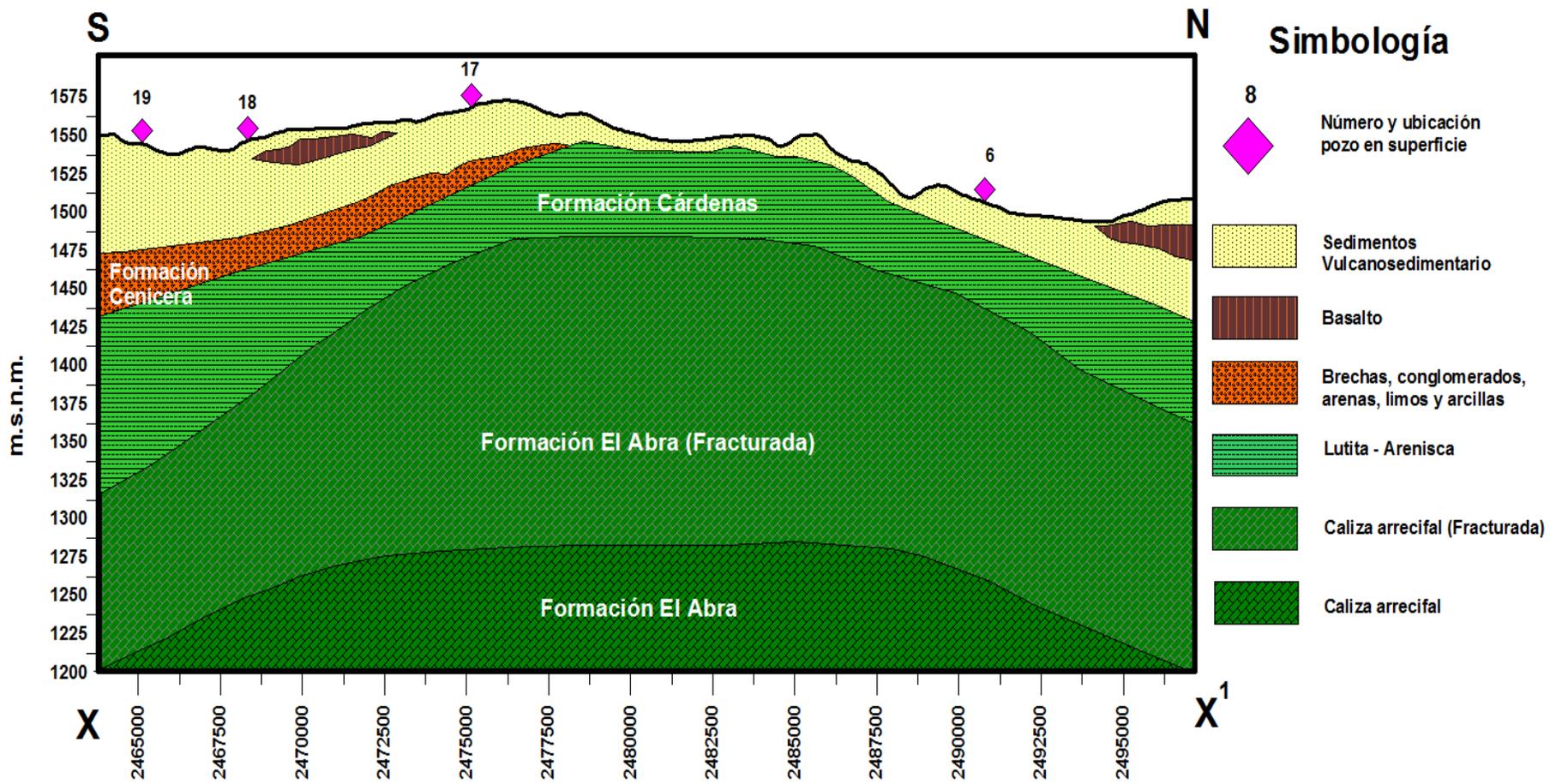


Figura 1.4 Sección Geológica X-X'.

1.3 Hidrología e Hidrogeología

El valle de Villa Hidalgo se encuentra dentro de la cuenca hidrológica de El Salado RH37, perteneciente a las Cuencas Centrales del Norte (CNA, 2010). El Salado es una cuenca que cubre la porción noroccidente del estado de San Luis Potosí, y se distingue por tener una topografía regular. Carece de grandes corrientes superficiales (Medina 1996) y a su vez está conformada por una serie de cuencas cerradas por sus características orográficas. El municipio de Villa Hidalgo se localiza dentro de la subcuenca Presa San José la cual cubre la parte sureste de la cuenca RH37, colinda al norte con la cuenca de Matehuala, al este con la cuenca Sierra Madre y al sur y sureste con la cuenca de Pánuco. La temperatura media anual es de 18°C y la precipitación de 300 mm al año, con un rango de escurrimiento de 10 mm.

Dentro del valle se localizan pequeños abrevaderos, norias y pozos. El acuífero que actualmente se está explotando es el somero que se localiza en el material de relleno, siendo de tipo libre, contenido en sedimentos lacustres, conglomerados y aluviones, así como en algunos derrames de basaltos fracturados (Martínez-Ruiz, 1989). La zona de recarga de este acuífero se encuentra en la periferia del valle. En el centro se localizan una serie de fallas que sirven para recargar el acuífero que se encuentra dentro de las rocas calizas y que propician un flujo subterráneo (Figuera, 2010).

1.4 Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica es una rama de la Geología encargada de estudiar la química del agua superficial y subterránea, así como las reacciones más importantes que suceden en ella para entender la interacción agua/roca en diferentes condiciones geológicas.

Las aguas subterráneas tienden a evolucionar a lo largo del tiempo y el espacio desde aguas bicarbonatadas (debido a la interacción de la lluvia con dióxido de carbono) hacia aguas cloruradas (debido a su interacción con rocas del subsuelo). Mientras las aguas bicarbonatadas se consideran de reciente infiltración o

poco evolucionadas, las aguas cloruradas se consideran más evolucionadas debido a un mayor tiempo de residencia en un determinado trayecto o acuífero. Según la secuencia de Chebotarev (Lillo, 2005), un agua joven de reciente infiltración presentaría la siguiente secuencia de concentraciones relativas de iones: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ y $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$. En el caso de un agua de mayor tiempo de residencia o más evolucionada la secuencia de concentraciones relativas tiende a invertirse: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ y $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$. Por ejemplo un agua de lluvia infiltrada localmente tendría una alta concentración de iones calcio y bicarbonato, mientras que si ésta misma entra en contacto con yesos y halita durante su trayecto por el subsuelo se enriquecería en sulfatos, cloruros y sodio.

La litología, las secuencias estratigráficas, la tectónica de la región, agrietamientos, textura y porosidad de las rocas, determinan generalmente las características hidroquímicas del agua, como una consecuencia del contacto entre el agua y la roca a lo largo de su recorrido y tiempo de residencia.

1.4.1 Parámetros Hidrogeoquímicos

Parámetros como la temperatura, pH, sólidos totales disueltos, potencial redox, oxígeno disuelto, alcalinidad, conductividad eléctrica, cationes, aniones y elementos traza, permiten comprender mejor la evolución, origen, distribución, calidad y procesos que ocurren dentro de un sistema acuífero, se deben de medir *in situ* para no alterar sus valores reales.

Temperatura

La temperatura del agua es un parámetro físico que varía de acuerdo al gradiente geotérmico ($\sim 3^\circ\text{C}/100\text{m}$), la longitud y profundidad de la cuenca, la zona de recarga y descarga y por lo tanto sirve como indicativo de distintos procesos químicos que puedan ocurrir dentro del sistema. La temperatura a su vez puede afectar procesos de solubilidad y precipitación. En general la temperatura de las aguas subterráneas es estable por lo que valores bajos se asocian a zonas de recarga y valores altos a zona de descarga (Dim *et al*, 2002).

pH

El pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno. En general los valores de pH dentro de un acuífero varían entre 6 y 8. El pH es una variable que controla infinidad de procesos entre los que se encuentran procesos de precipitación y disolución, procesos de adsorción, biogeoquímicos y redox.

Oxígeno disuelto

El oxígeno proviene de la atmósfera o de la generación de oxígeno en el agua por la actividad de microorganismos. La cantidad de oxígeno determina las características oxidantes o reductoras del agua, además es importante en los procesos de solubilidad de minerales y descomposición de materia orgánica.

Potencial Redox

Es una medida de la actividad de los electrones que determina la disponibilidad de éstos en el agua, permite inferir sobre la distribución de ciertas especies de minerales a lo largo del acuífero y se mide en mV.

Alcalinidad

La alcalinidad es la capacidad que tiene un agua para neutralizar ácidos. En la mayoría de los sistemas acuíferos son los iones carbonato y bicarbonato los que amortiguan la acidez, por lo que ésta se expresa como mgCaCO_3/L . Los valores más comunes de alcalinidad dentro de un acuífero varían entre 100 y 300 mgCaCO_3/L .

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es una propiedad que tiene el agua para conducir corriente eléctrica dada por la cantidad de sólidos totales disueltos inorgánicos conductores de la electricidad como los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) y aniones (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- y NO_3^-) mayores. En aguas subterráneas los valores pueden variar de 100 y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Sólidos totales disueltos

Es la suma de los minerales, sales, iones mayoritarios y elementos traza que se encuentran disueltos en el agua. Mide el peso de todas las sustancias

disueltas en el agua incluyendo las sustancias volátiles. El origen de los sólidos disueltos puede ser múltiple, orgánico e inorgánico, tanto en aguas superficiales como subterráneas. Esta relacionada con la conductividad eléctrica mediante la fórmula $TDS = C.E. (mS/cm) \times 700$ y se mide en ppm.

Cationes Mayoritarios

Calcio (Ca^{2+}): suele ser el catión mayoritario en las aguas subterráneas debido a su abundancia en las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Su concentración en el agua subterráneas está controlada por los procesos de precipitación-disolución en un sistema carbonatado y bicarbonatado, y también por intercambio catiónico. La concentración de calcio en un sistema acuífero se encuentra entre 10 y 250 mg/L.

Magnesio (Mg^{2+}): puede proceder de la disolución de rocas carbonatadas (ej: dolomías o calizas magnésicas), evaporitas, silicatos ferromagnesianos alterados o de agua marina. El proceso de intercambio iónico influye en su concentración en el agua subterránea debido a que el ion magnesio es generalmente retenido por el ion calcio. Su concentración en aguas subterráneas no suele sobrepasar los 40 mg/L, pero en terrenos calcáreos puede alcanzar valores mayores a 100 mg/L y en ambientes evaporíticos mayores a 1000 mg/L.

Sodio (Na^+): proviene de la meteorización de silicatos y disolución de rocas sedimentarias, principalmente sales muy solubles por lo que tienden a permanecer disueltas en el agua. Los procesos de intercambio catiónico son los principales en los que intervienen al ser adsorbidos por arcillas.

Potasio (K^+): proviene de la meteorización de feldespatos y de la disolución de evaporitas. Tiende a ser fijado a arcillas y a ser adsorbido a minerales con alta capacidad de intercambio iónico. En aguas subterráneas no suele sobrepasar los 20 mg/L.

Aniones Mayoritarios

Bicarbonato (HCO_3^-): deriva de la disolución de calizas, dolomías y CO_2 en

el agua. En las aguas subterráneas el ion bicarbonato suele variar entre 50 y 400 mg/L pero puede llegar a alcanzar valores de hasta 800 mg/L.

Cloruro (Cl⁻): generalmente la mayoría de las rocas presentan concentraciones bajas de cloruros, son sales solubles y pasan rápidamente a fases acuosas pudiendo alcanzar concentraciones altas de cloruro. El ion cloruro no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce, no es absorbido significativamente y tampoco forma parte de procesos bioquímicos en aguas naturales por lo que, se considera un trazador. Su concentración en el agua subterránea no suele sobre pasar los 150 mg/L y cuando llega a alcanzar valores superiores a los 300 mg/L produce un sabor salado al agua.

Sulfato (SO₄²⁻): la disolución de yeso y anhidrita aporta la mayor cantidad de este ion al agua subterránea. Aunque también puede proceder de la oxidación de sulfuros y de la descomposición de materia orgánica. Suele formar iones complejos con sodio y calcio. Su concentración en aguas subterráneas varía entre 2 y 150 mg/L.

Nitrato (NO₃⁻): 78% del nitrógeno aparece en forma gaseosa en la atmósfera (N₂), en forma oxidada constituye una fracción en suelos y sustancias orgánicas, en las rocas es un elemento minoritario, por lo que se puede encontrar como gas disuelto, combinaciones inorgánicas y combinaciones orgánicas. El nitrógeno puede aparecer en forma de amonio (NH₄⁺), nitrito (NO₂⁻), y mediante procesos de oxidación transformarse en nitrógeno (N₂) en concentraciones traza y finalmente en nitrato (NO₃⁻) la cual es la forma más estable en la que se encuentra en las aguas subterráneas (Pacheco *et al*, 2002), su concentración varía entre 0.1 y 10 mg/L .

Flúor (F⁻): es un constituyente minoritario que suele relacionarse con la alteración de rocas plutónicas o con la disolución de fluorita y apatito.

Dureza

Comúnmente se refiere al contenido de calcio y magnesio disueltos en el agua mismos que producen incrustaciones en las tuberías le dan un sabor indeseable al

agua potable. La mayoría de los suministros de agua potable tienen un promedio de 250 mg/l de dureza (Lillo, 20025).

1.4.2 Análisis de datos hidrogeoquímicos

Comúnmente, los datos de campo y laboratorio se interpretan con la ayuda de diagramas de dispersión y diagramas Piper, Stiff, Schoreller y Gibbs.

Diagrama de Piper: Es un sistema de referencia ternario compuesto de dos triángulos a los costados y un diamante al centro en donde se grafican las concentraciones de cationes y aniones mayoritarios en meq/L. Este diagrama permite representar la composición química del agua y comparar muestras así como agrupar las aguas por familias hidrogeoquímicas (y establecer relaciones entre ellas. Empíricamente, se pueden sugerir algunos procesos o reacciones químicas que llevan a cabo en el agua.

Las principales familias de agua son las siguientes:

- Sulfatada cálcica
- Sulfatada magnésica
- Sulfatada sódica
- Clorurada cálcica
- Clorurada magnésica
- Clorurada sódica
- Bicarbonatada sódica
- Bicarbonatada cálcica
- Bicarbonatada magnésica

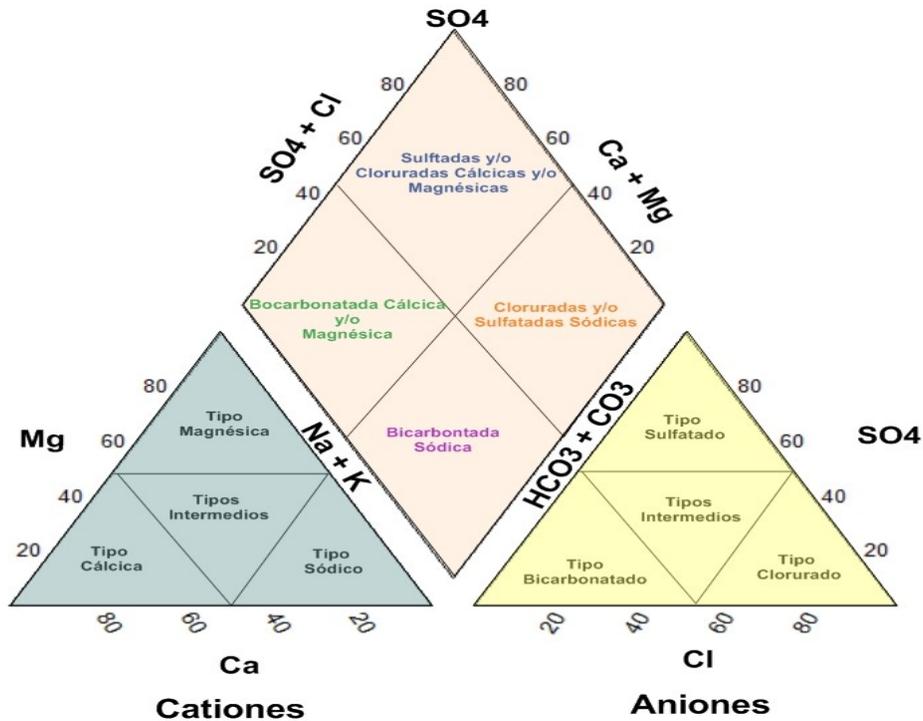


Figura 1.6 Diagrama de Piper

Diagrama de Stiff: Consiste en un sistema de referencia formado por tres rectas horizontales cortadas perpendicularmente por una cuarta que da origen a seis escalas en donde se grafican las concentraciones de Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} de un lado y Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- del otro (Figura 1.7). Los extremos de los segmentos se unen dibujando un polígono cuya forma puede asociarse a un determinado tipo de agua. Este tipo de diagrama comúnmente se sobrepone a un mapa para observar variaciones espaciales.

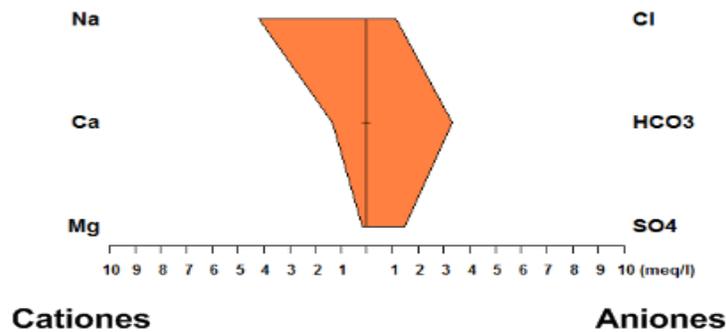


Figura 1.7 Diagrama de Stiff.

Diagrama de Schoeller: Es un eje cartesiano semicuantitativo donde se

representan los iones (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) y la concentración de cada uno de ellos (Figura 1.8). Este tipo de diagramas permite visualizar rápida y fácilmente máximos y mínimos de uno u otro ion.

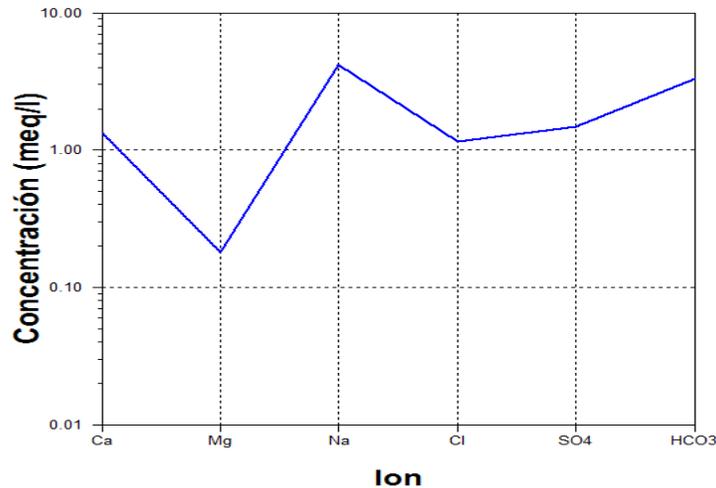


Figura 1.8 Diagrama de Schoeller.

Diagramas de Gibbs: son diagramas de dispersión semilogarítmica que permiten observar el efecto del enriquecimiento de Na^+ y Ca^+ en los sólidos totales disueltos (Figura 1.9) y permite establecer conjeturas respecto a posibles interacciones o procesos químicos que se están llevando a cabo en el acuífero (Langmuir, 1997).

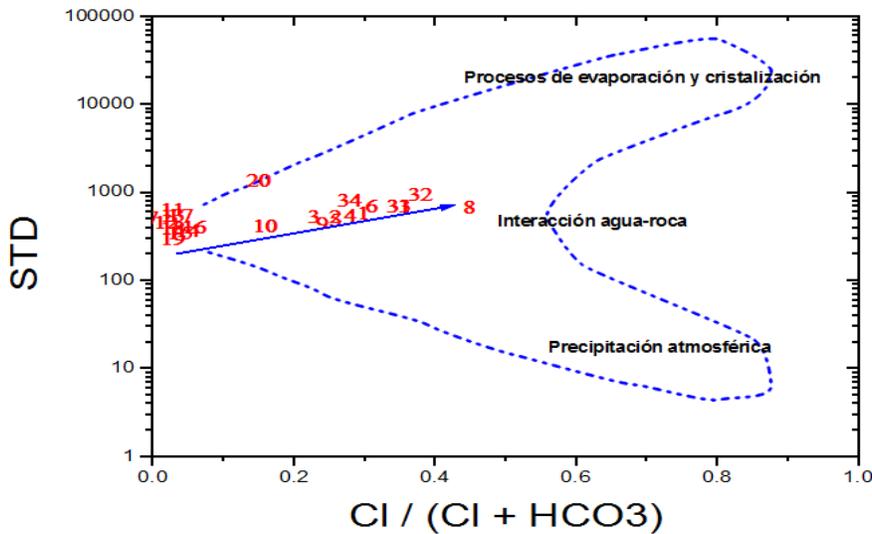


Figura 1.9 Diagramas de Gibbs.

1.4.3 Calidad del agua

Las aguas subterráneas contienen concentraciones de ciertos elementos de manera natural (Langmuir, 1997). El término de calidad del agua se refiere a las características que debe de tener un agua para ser utilizada con un fin determinado, ya sea industrial, para la agricultura, consumo humano, o para ganado, principalmente. En México, para el caso del agua para consumo humano se rige por la NOM127-SSA1-1994 la cual establece los límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radioactivas. Para el caso de este estudio sólo se tomaron en cuenta dureza, fluoruros, nitratos, pH, sodio, sólidos totales disueltos y sulfato indicados con un asterisco en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Máximos permisibles de las características químicas establecidas en la NOM-127-SSA1-1994.

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE (mg/L)	CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE (mg/L)
Aluminio	0.20	Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
Arsénico	0.05	* pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Bario	0.70	Plaguicidas en microgramos/l: Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Cadmio	0.005	Clordano (total de isómeros)	0.30
Cianuros (como CN-)	0.07	DDT (total de isómeros)	1.00
Cloro residual libre	0.2-1.50	Gamma-HCH (lindano)	2.00
Cloruros (como Cl-)	250.00	Hexaclorobenceno	0.01
Cobre	2.00	Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Cromo total	0.05	Metoxicloro	20.00
* Dureza total (como CaCO ₃)	500.00	2,4 - D	50.00
Fenoles	0.001	Plomo	0.025
Hierro	0.30	* Sodio	200.00
* Fluoruros (como F-)	1.50	* Sólidos disueltos totales	1000.00
Manganeso	0.15	* Sulfatos (como SO ₄ =)	400.00
Mercurio	0.001	Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
* Nitratos	10.00	Trihalometanos totales	0.20
Nitritos	0.05	Zinc	5.00

Capítulo 2. Metodología

2.1 Localización de los puntos de muestreo

Para esta tesis se realizó una campaña de muestreo en abril del 2010 que constó de la recolección de 34 muestras de agua en tres zonas denominadas, para efectos prácticos de análisis de la información, Cuenca de Villa Hidalgo (Muestra 1-19), Cuenca de Villa Arista (Muestra 20-24) y Cuenca de Joya de Luna (Muestra 25-34) (Figura 2.1). La Tabla 2.1 muestra el número de muestra, la localidad de donde fue tomada, el tipo de aprovechamiento, el material de donde fue extraída y sus coordenadas. Las muestras de agua provenientes de pozos fueron tomadas directamente de la tubería de descarga después de 5 minutos de haber prendido el pozo. Las muestras de agua provenientes de norias fueron tomadas con ayuda de un bote de plástico de 5 L amarrado a un malacate. Mientras que las muestras de las norias de la Joya de Luna ciertamente se extrajeron de calizas de la Formación el Abra, el resto de las muestras se extrajo del material de relleno del valle de Villa Hidalgo y Villa de Arista.

Para determinar una posible variación espacial de los distintos parámetros, las muestras de Villa Hidalgo y Villa Arista, los puntos de muestreo se proyectaron en un transecto recto de 25 km con dirección sur-norte (Sección A-B) comenzando en el punto 19 de Pozo del Carmen y terminando en el punto 20 de La Estación (Figura 2.1).

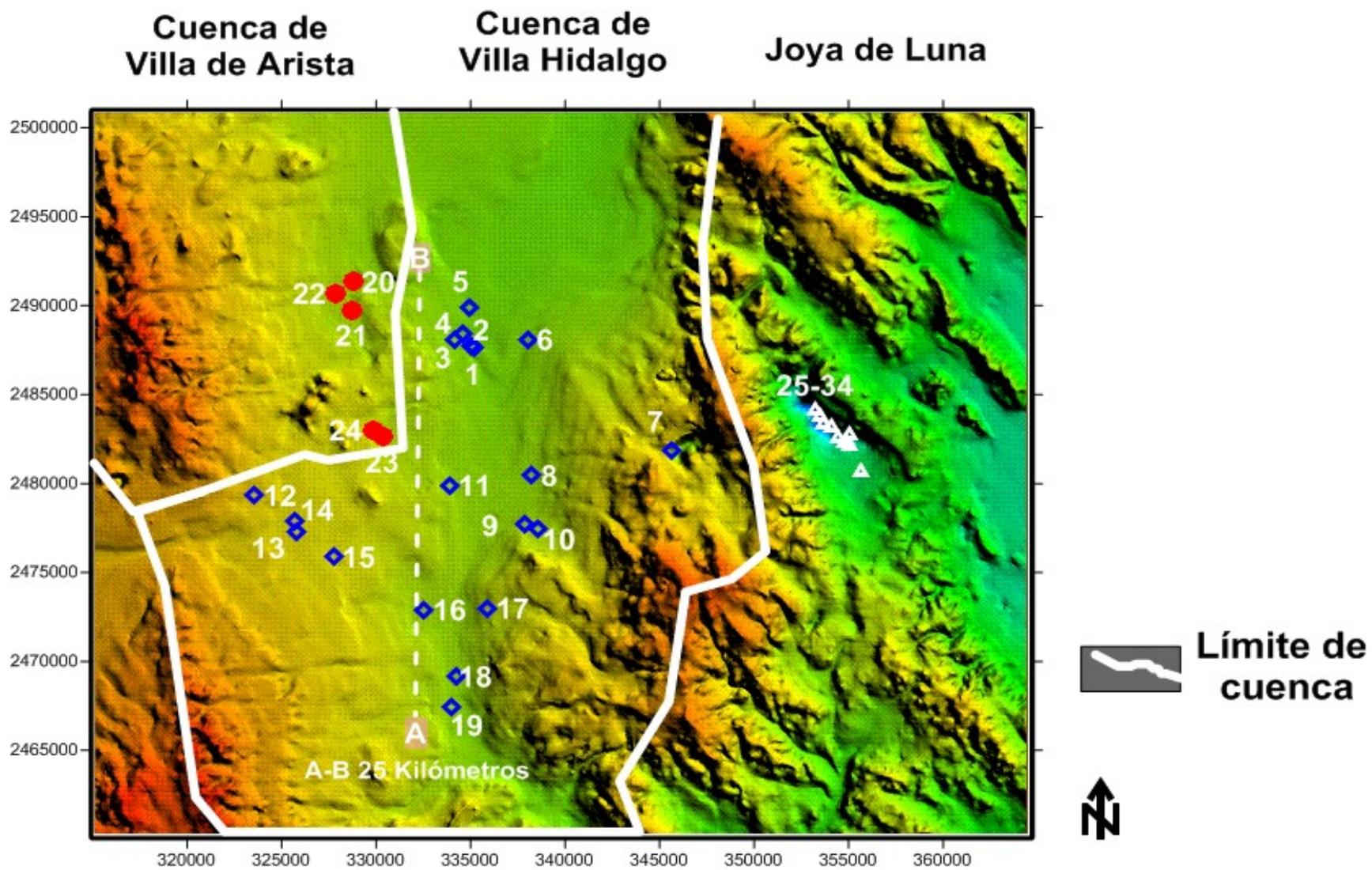


Figura 2.1. Localización de los puntos de muestreo, límite de cuenca, sección A-B y grupos de datos.

Tabla 2.2 Datos geográficos de las muestras y tipos de aprovechamiento.

Muestra	Localización	Coordenadas			Geología	Nivel Estático (m)	Tipo de Aprovechamiento	Temperatura Ambiente (°C)	
		x	y	Z					
Villa Hidalgo	1	Rancho de Elías Serrato, Peotillos	335160	2487619	Sin Medir	Relleno	10.70	Pozo	23.00
	2	Rancho de Genaro Pérez, Peotillos	335032	2487756	1514	Relleno	10.90	Pozo	33.00
	3	El Potrerito, Peotillos	334162	2488081	1521	Relleno	10.12	Pozo	30.00
	4	El Pílon, Peotillos	334571	2488391	1510	Relleno	3.75	Pozo	32.00
	5	Rancho de Don Roberto, Peotillos	334943	2489864	1509	Relleno	Sin Medir	Pozo	28.00
	6	Las Liebres, San Ignacio	338023	2488083	1535	Relleno	29.50	Pozo	30.40
	7	El Nogalito, Cerro Grande	345598	2481874	1699	Caliza	9.35	Noría	26.00
	8	Sequedad	338259	2480448	1567	Relleno	3.77	Pozo	34.00
	9	Valle de San Juan	337851	2477733	1587	Relleno	25.60	Pozo	32.00
	10	Rancho Nuevo, Paso Blanco	338530	2477460	1593	Basalto	Sin Medir	Pozo	35.00
	11	Camino a Valle de San Juan	333875	2479889	1588	Relleno	39.60	Noría	32.00
	12	Tanquito de San Francisco	323567	2479330	1759	Relleno	Sin Medir	Pozo	26.00
	13	Corcovada	325705	2477900	1694	Relleno	75.00	Pozo	24.00
	14	La Estación, Corcovada	325817	2477306	1698	Relleno	60.00	Pozo	26.00
	15	Tanque de Luna	327731	2475858	1673	Relleno	Sin Medir	Pozo	26.00
	16	Presita de la Cruz	332542	2472885	1596	Relleno	78.00	Pozo	37.00
	17	La Concordia	335879	2472978	1625	Relleno	Sin Medir	Pozo	31.00
	18	Pozo del Carmen	334277	2469120	1599	Relleno	Sin Medir	Pozo	32.00
	19	Pozo del Carmen	333991	2467447	1566	Relleno	Sin Medir	Noría	32.00
Media								29.97	
Desv. Estándar								3.90	
Mínimo								23.00	
Máximo								37.00	
Villa de Arista	20	La Estación	328772	2491323	1573	Relleno	Sin Medir	Pozo	21.00
	21	El Leoncito	328753	2489732	1583	Relleno	39.10	Pozo	36.00
	22	Plaza principal, El Leoncito	327894	2490693	1584	Relleno	Sin Medir	Pozo	36.00
	23	La Redonda	330361	2482598	1606	Relleno	Sin Medir	Pozo	35.00
	24	Noría de Francisco Castillo, La Redonda	329816	2482988	1618	Relleno	2.60	Noría	32.00
Media								32.00	
Desv. Estándar								6.36	
Mínimo								21.00	
Máximo								36.00	
Joya de Luna	25	La Joya de Luna Noria 1	354425	2482570	1244	Caliza	5.50	Noría	32.00
	26	La Joya de Luna Noria 2	354840	2482265	1246	Caliza	5.15	Noría	32.00
	27	La Joya de Luna Noria 3	354816	2482248	1247	Caliza	5.15	Noría	32.00
	28	La Joya de Luna Noria 4	355078	2482735	1246	Caliza	9.60	Noría	27.00
	29	La Joya de Luna Noria 5	355006	2482121	1249	Caliza	4.65	Noría	35.00
	30	La Joya de Luna Noria 6	355686	2480611	1264	Caliza	14.60	Noría	33.00
	31	La Joya de Luna Noria 7	354114	2483111	1251	Caliza	6.05	Noría	35.00
	32	La Joya de Luna Noria 8	353666	2483286	1251	Caliza	7.55	Noría	38.00
	33	La Joya de Luna Noria 9	353461	2483734	1251	Caliza	8.55	Noría	39.00
	34	La Joya de Luna Noria 10	353254	2484117	1250	Caliza	6.50	Noría	38.00
Media								34.10	
Desv. Estándar								3.67	
Mínimo								27.00	
Máximo								39.00	
Total Muestras	Media								30.01
	Desv. Estándar								8.68
	Mínimo								21.00
	Máximo								39.00

2.2 Parámetros físicoquímicos

En campo se midieron temperatura, pH, oxígeno disuelto, potencial redox, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y alcalinidad (Tabla 2.2). En el laboratorio se midieron cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) y aniones (HCO_3^- , SO_4^{2-} , F^- , Cl^- y NO_3^-). La determinación de aniones se llevo a cabo con un colorímetro LaMotte modelo Smart2. La determinación de cationes se llevó a cabo en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental, del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México usando un Espectrómetro de Absorción Atómica Perkin Elmer Analyst 300. Todas las muestras para la determinación de cationes fueron recolectadas en botes de plástico lavados con ácido y enjuagados con agua deionizada. Todas las muestras para la determinación de aniones fueron recolectadas en botes de plástico lavados únicamente con agua deionizada. Las muestras para la determinación de cationes fueron acidificadas ($\text{pH} < 2$) con ácido nítrico ultrapuro. Todas las muestras fueron filtradas antes de ser almacenadas en sus respectivos contenedores con membranas de esteres mezclados de celulosa de $0.45 \mu\text{m}$ y se mantuvieron a 4°C hasta el momento de su análisis. Durante la recolección de muestras y la medición de parámetros de campo se usaron guantes de látex. Todo el equipo fue lavado con agua destilada antes y después de cada medición. Los instrumentos de campo fueron, en su caso, calibrados con soluciones estándar antes de las mediciones. La calibración fue verificada a lo largo de todo el proceso de muestreo. Los datos estadísticos de los parámetros de cationes y aniones se reportan en la Tabla 3.1 y en las gráficas de Anexo A. Los reportes hidrogeoquímicos de las muestras pueden ser revisados en el Anexo B.

2.3 Balance Iónico

Con los datos obtenidos en laboratorio se realizó el balance iónico para valorar los análisis químicos del agua subterránea, este procedimiento se lleva a cabo para conocer la validez de los resultados (<10%) y para realizar las interpretaciones correspondientes, los datos se convirtieron a meq/L y se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Balance iónico} = \frac{\Sigma \text{ cationes} + \Sigma \text{ aniones}}{\Sigma \text{ cationes} - \Sigma \text{ aniones}} \times 100$$

Tabla 2.3 Equipo utilizado para realizar la medición de los parámetros fisicoquímicos en campo.

Parámetro	Nombre del equipo	Figura
pH Sólidos Totales Disueltos Conductividad Eléctrica	Equipo portátil HI 9813 de Hanna Instruments	
Temperatura	Equipo portátil HI 9043 de Hanna Instruments	
Oxígeno Disuelto	Equipo portátil HI 9143 de Hanna Instruments	
Potencial Redox	LaMotte Tracer	
Alcalinidad	Alkalinity Test Kit de HACH y Alcalinidad Hach 5-400mg/L Modelo AI-AP Mg-L	

Capítulo 3. Resultados y Discusión

3.1 Resultados de los Parámetros físicoquímicos

Las muestras presentan temperaturas entre 17 y 38 °C con la mayoría de ellas entre 20 y 25 °C (Figura 3.1a). La temperatura más alta (38°C) corresponde a la muestra 10 de Paso Blanco, muy probablemente debido a una anomalía termal en la zona y su cercanía con las rocas volcánicas. El pH varía entre 6.6 y 8.1 (Figura 3.1b). El valor de pH más alto corresponde a la muestra 19 de Pozo del Carmen (Figura 1b). Los valores de oxígeno disuelto están entre 4 y 85%, la mayoría de las muestras contienen entre 36 y 75% (Figura 3.1c). El valor más alto de oxígeno (85%) corresponde a la muestra 2 de Peotillos, probablemente debido a aereación artificial y oxidación durante la toma de la muestra. Los valores mas bajos de oxígeno (4-15%) se observaron en norias, tanto de Villa Hidalgo (muestras 7 y 11) como de Joya de Luna (muestras 28-31) y se atribuyeron a la cantidad de materia orgánica que había dentro de la noria en Villa Hidalgo y Joya de Luna. El potencial redox varía entre 121 y 223 mV (Figura 3.1d). El potencial redox y el oxígeno disuelto presentan una correlación positiva en las muestras de Villa Hidalgo y Joya de Luna pero una correlación negativa en las muestras de Villa de Arista (Ver Figura A1 en Apéndice A). La alcalinidad varía entre 66 y 357 mgCaCO₃/L con valores ligeramente más altos en las muestras de Villa Hidalgo, seguidas de las muestras de Villa de Arista y por último de las muestras de Joya de Luna (Tabla 3.1 y Figura 3.1e). Al igual que para la temperatura, la muestra 10 también presenta el valor más alto de alcalinidad (Figuras 3.1a y e) debido a una respuesta positiva a la prueba de la fenoftaleína, la alcalinidad de la muestra 10 corresponde a alcalinidad de carbonatos, esto a pesar de no tener un pH mayor a 10.3. Ninguna otra muestra dio positivo a la prueba de fenoftaleína por lo que, a excepción de la muestra 10, la alcalinidad reportada en la Figura 3.1e corresponde a alcalinidad de bicarbonato. Los valores de alcalinidad altos de las muestras 7 y 11 de Cerro Grande y del camino a Valle de San Juan, respectivamente, contrastan con los valores bajos de oxígeno de estas mismas muestras (Figuras 3.1c y e) y podrían ser el resultado de un proceso de actividad microbiana. Los sólidos totales disueltos varían entre 305 y 1391 mg/L (Figura 3.1f) con valores

promedio de 505.95, 923.80 y 388.80 mg/L para las muestras de Villa Hidalgo, Villa de Arista y Joya de Luna, respectivamente (Tabla 3.1). El valor más alto de sólidos totales disueltos corresponde a la muestra 20 de La Estación, mientras el valor más bajo corresponde a la muestra 19 de Pozo del Carmen. Es interesante observar que la muestra 19 también presentó el pH más alto (Figuras 3.1b y f).

En promedio, las muestras de Joya de Luna, contenidas en calizas de la Formación El Abra, presentan valores mas bajos de pH, alcalinidad, oxígeno disuelto y sólidos totales disueltos (Tabla 3.1 y Figura 3.1). Como se mencionó anteriormente, los sólidos totales disueltos son una medida de la cantidad de iones disueltos que hay en el agua, tanto de cationes como de aniones.

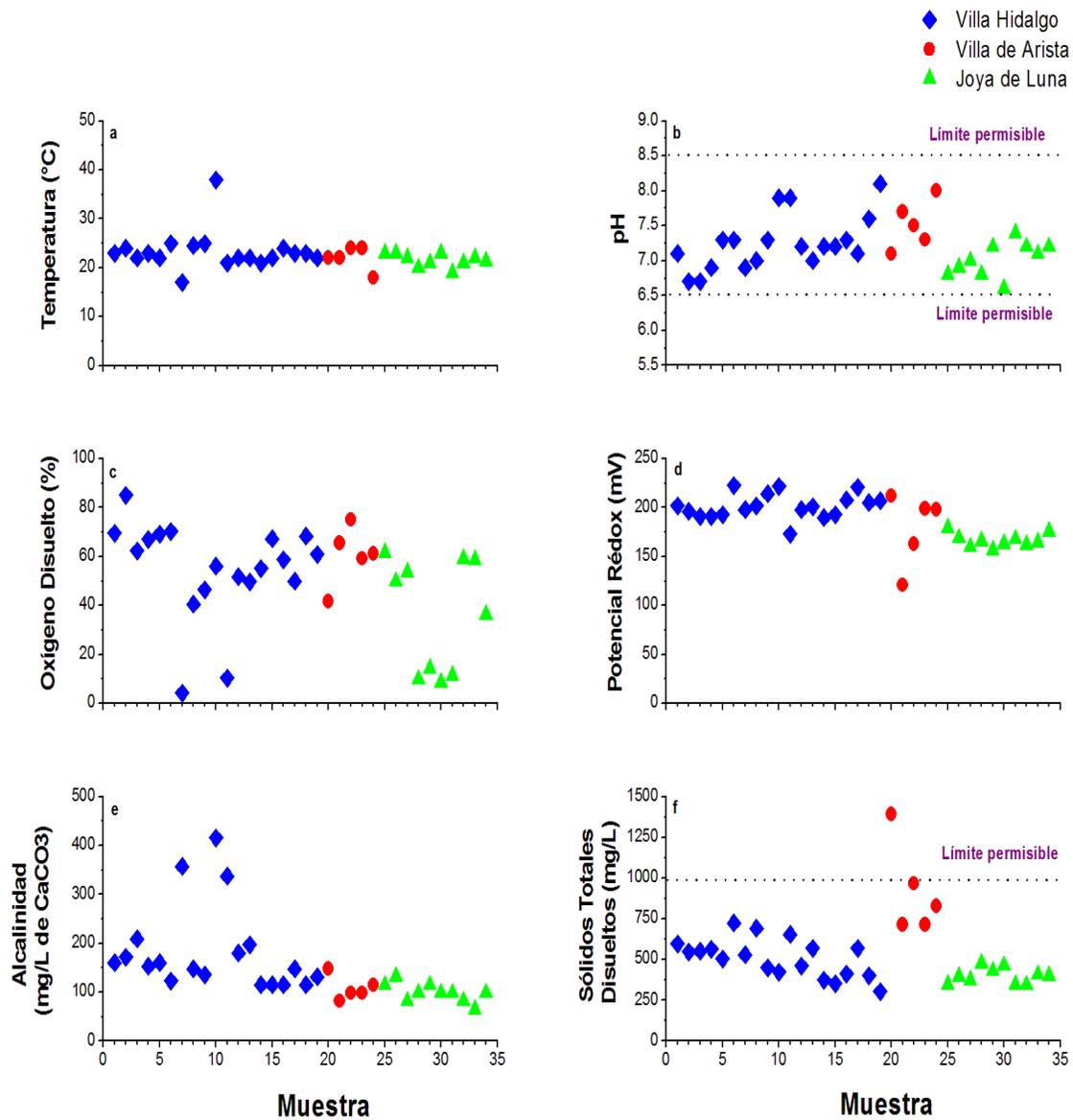


Figura 3.1 Temperatura, pH, oxígeno disuelto, potencial redox, alcalinidad y sólidos totales disueltos de muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.

3.2 Cationes, aniones y balance iónico

La concentración de calcio se encuentra entre 27 y 143 mg/L, la de magnesio entre 0.8 y 52 mg/L, la de sodio entre 9 y 221 mg/L y la de potasio es menor a 25 mg/L (Figuras 3.2a y d). La dureza presenta valores entre 73 y 571 mgCaCO₃/L, presentando su valor máximo en la muestra 20 de La Estación y el mínimo en la muestra 10 de Paso Blanco (Figura 3.2). Las muestras de Joya de Luna consistentemente presentaron valores altos de calcio y bajos de magnesio, sodio y potasio (Tabla 3.1 y Figuras 3.2a-d). Por otro lado, las muestras de Villa de Arista presentaron rangos amplios de calcio, magnesio, potasio y concentraciones altas de sodio que también fluctúan en un amplio rango (Tabla 3.1 y Figuras 3.2a-d). Las muestras de Villa Hidalgo presentaron valores (promedio) intermedios de calcio, magnesio, sodio y potasio (Tabla 3.1 y Figuras 3.2a-d). En congruencia con los sólidos totales disueltos, la muestra 20 de La Estación presenta los valores más altos de calcio, magnesio, sodio y dureza y un valor bajo de potasio (Tabla 3.1 y Figuras 3.1f, 3.2). El bicarbonato tiene un rango entre 0 y 435 mg/L (Figura 3.3a). En promedio, los valores de bicarbonato de Villa Hidalgo son mayores que los de Villa de Arista y Joya de Luna. El cloruro es menor a 148 mg/L, siendo, al igual que el sodio, consistentemente alto en las muestras de Villa de Arista, bajo en las muestras de Joya de Luna y presentando valores intermedios en las muestras de Villa Hidalgo (Tabla 3.1 y Figura 3.3b). El sulfato es menor a 100 mg/L en las muestras de Villa Hidalgo y Joya de Luna y varía entre 150 y 397 mg/L en las muestras de Villa de Arista (Figura 3.3c). El nitrato presenta valores entre 8 y 60 mg/L (Figura 3.3d y Tabla 3.1). El fluoruro, a diferencia del bicarbonato, cloruro, sulfato y nitrato, varía en un rango muy pequeño a lo largo y ancho del área de muestreo presentando un valor promedio de 1.37 ± 0.27 mg/L (Figura 3e). Los valores de cationes y aniones reportados en esta tesis pueden ser considerados como razonables toda vez que el balance iónico resultó $< |10\%|$ en al menos el 80% de las muestras (Figura A4 del Anexo A y Tabla 3.1). Con la finalidad de verificar los resultados obtenidos, tanto los aniones como los cationes fueron medidos nuevamente en muestras desbalanceadas obteniendo resultados

similares por lo que los valores aquí reportados se consideran como reales. Se presentan desbalances iónicos $> |10\%|$ en las norias de Joya de Luna lo cual podría ser el resultando de la actividad agrícola que se desarrolla en el valle debido a que el uso de fertilizantes altera la composición del suelo y del manto freático. Descartando las muestra de Joya de Luna, el balance iónico de las muestras de Villa Hidalgo y Villa de Arista mejora considerablemente pues resulta $< |7\%|$ en al menos el 85% de las muestras (Figura A4 del AnexoA y Tabla 3.1).

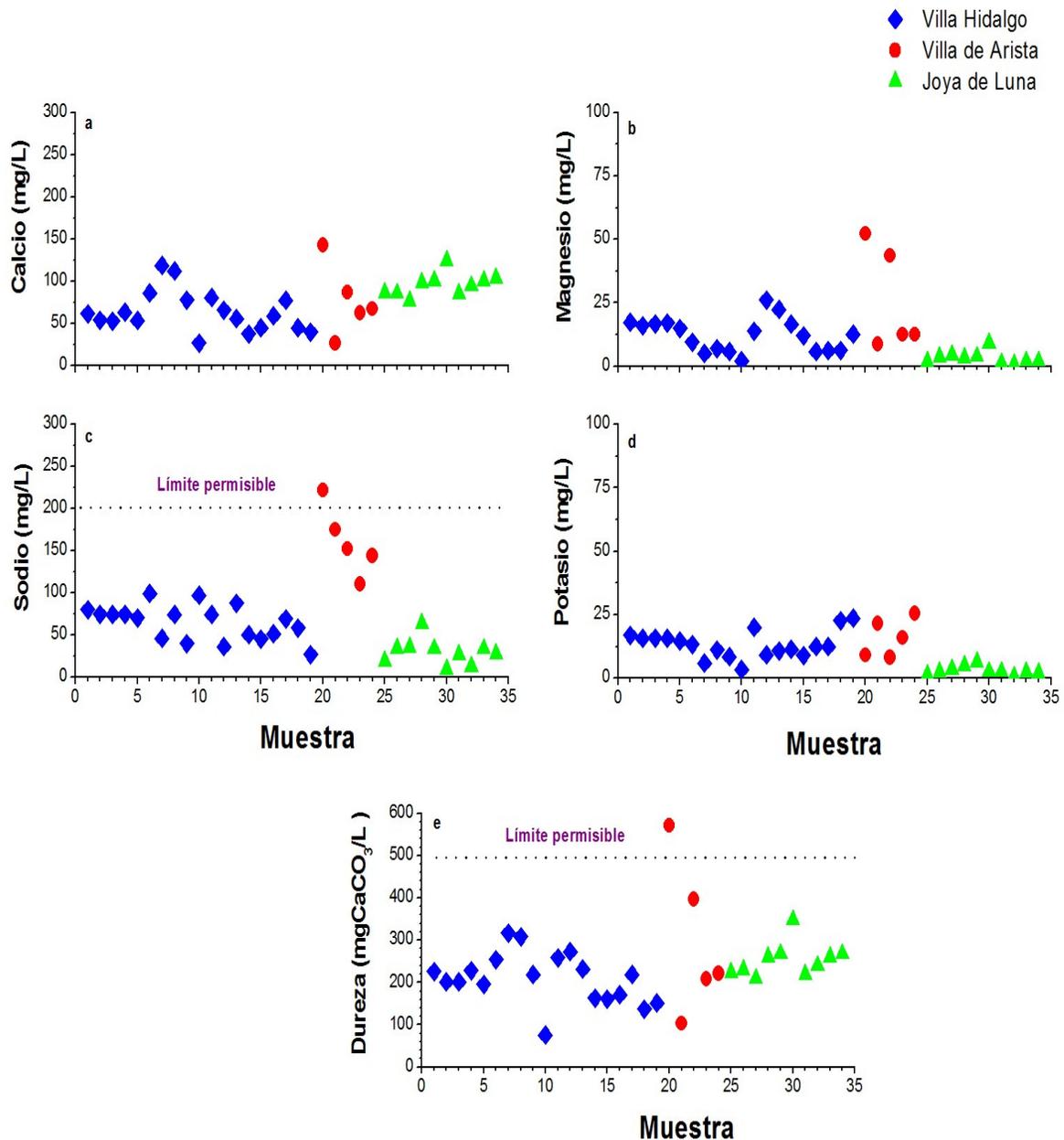


Figura 3.2 Concentraciones de calcio, magnesio, sodio, potasio y dureza de muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.

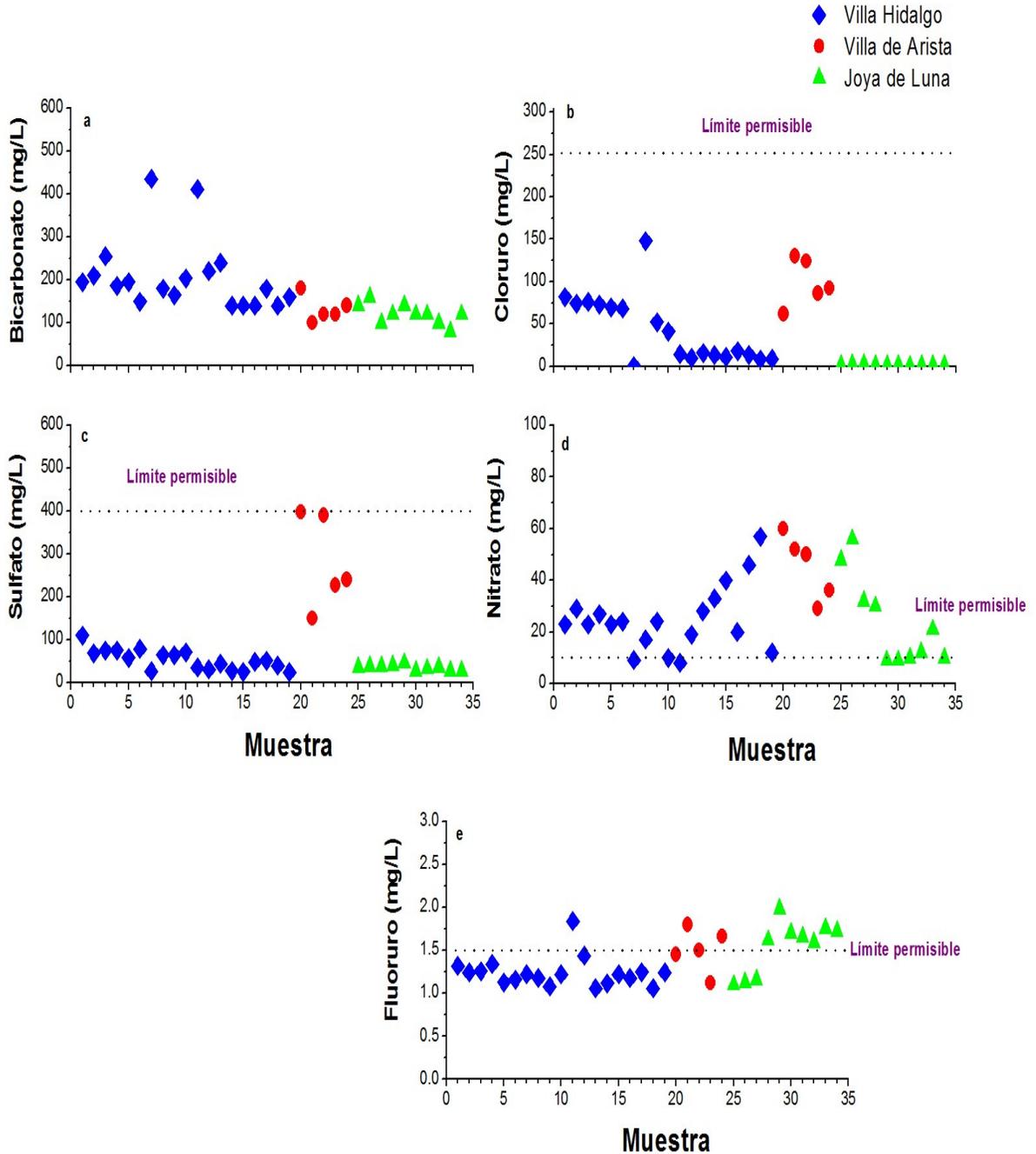


Figura 3.3 Concentraciones de bicarbonato, cloruro, sulfato, nitrato y fluoruro de muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.

3.3 Clasificación de las familias de agua

Las variaciones, diferencias y/o similitudes que presentan los cationes y aniones (Figuras 3.2 y 3.3) en los distintos puntos de muestreo son observadas con mayor claridad en el Diagrama de Schoeller de la Figura 3.4. Las muestras de Joya de Luna, contenidas en un acuífero carbonatado, presentan concentraciones de calcio promedio de 235.91 ± 87.09 mg/L y bicarbonato promedio de 164.76 ± 81.47 mg/L características de agua en contacto con roca caliza (Tabla 3.1 y Figura 3.4) (Lillo, 2007). Congruentemente, por estar en contacto con calizas y no con rocas ígneas que contengan cantidades significativas de magnesio, sodio, y cloruro, las muestras de Joya de Luna también presentan las concentraciones más bajas de magnesio, sodio y cloruro (Figura 3.4). Por el contrario, las muestras de agua de Villa de Arista presentan las concentraciones más altas de magnesio, sodio y sulfato (Figura 3.4) e indican la presencia de aguas más evolucionadas. En general, las muestras de Villa Hidalgo se encuentran entre las de Joya de Luna y Villa de Arista (Figura 3.4).

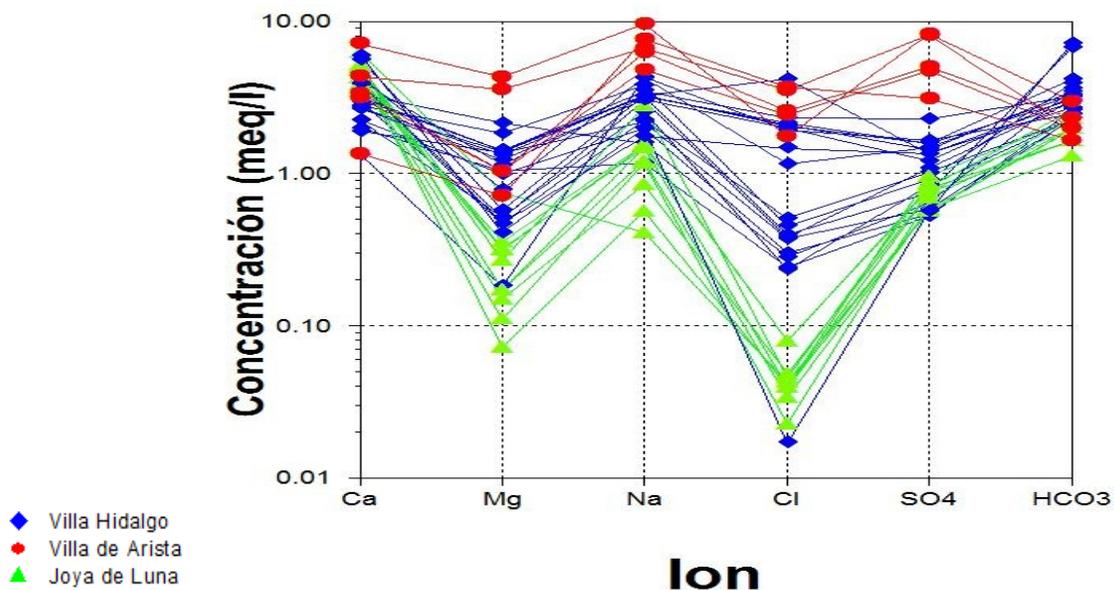


Figura 3.4 Diagrama de Scholler de las muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.

En términos de las contribuciones relativas de los distintos iones a la composición del agua y de acuerdo al Diagrama de Piper, en el área de estudio se encuentran varias familias de agua (Figura 3.5). Las muestra de Joya de Luna se pueden clasificar como bicarbonatadas-cálcicas (Muestras 25,30,32) y bicarbonatadas-cálcicas-sódicas (Muestras 26-29, 31, 33-34) (Tabla 3.1 y Figura 3.5). Las de Villa de Arista van desde la sulfatada-sódica-cálcica-magnésica (Muestra 20) hasta la clorurada-sulfatada-sódica (Muestra 21) pasando por algunas sulfatadas-cloruradas-bicarbonatadas-sódicas-cálcicas (Muestra 23 y 24) (Tabla 3.1 y Figura 3.5). Finalmente, las muestras de Villa Hidalgo varían desde las bicarbonatadas-cálcicas-sódicas (Muestras 7, 11 y 17), similares a las de Joya de Luna, hasta las bicarbonatadas-cloruradas-sulfatadas-sódicas-cálcicas (Muestras 1,4 y 6). Estas últimas cercanas a las de Villa de Arista. Entrás las muestras de Villa Hidalgo también se encuentran aguas cloruradas-bicarbonatadas-cálcicas-sódicas (Muestra 8) (Tabla 3.1 y Figura 3.5).

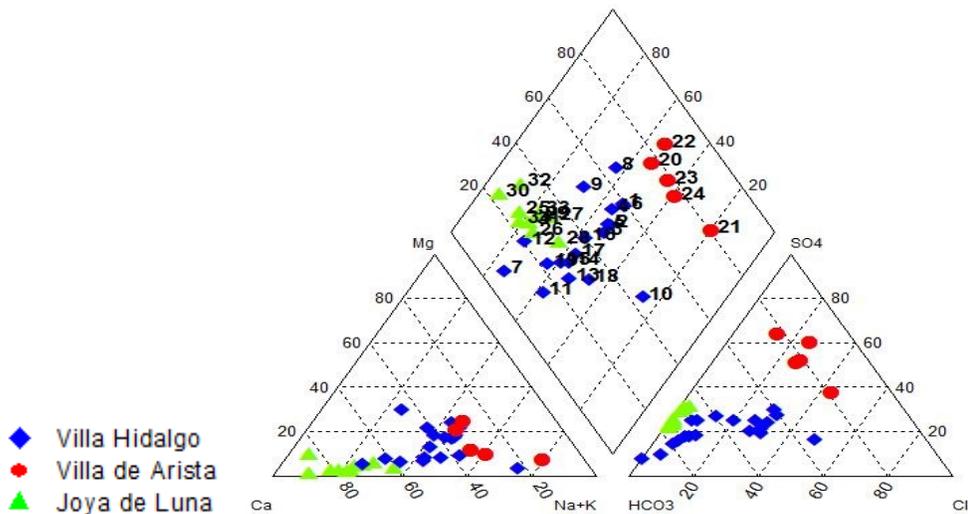


Figura 3.5 Diagrama de Piper de las muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.

La distribución espacial de las distintas familias de agua se encuentra en la Figura 3.6. Las muestras de las norias de Joya de Luna se encuentran a una profundidad entre 5 y 15 metros, en el conglomerado calcáreo que cubre la Formación El Abra y presentan una composición homogénea característica de

aguas bicarbonatadas, muy distinta de la composición de las aguas de Villa de Arista (Figura 3.6). En Villa Hidalgo la familias de agua son predominantemente carbonatadas pero con mayor variedad en la cantidad de cationes y finalmente en Villa de Arista son sulfatadas. En el centro del valle se observa una diversidad de familias de agua (ver muestras 7, 8, 9, 10 y 16 en Figura 3.6).

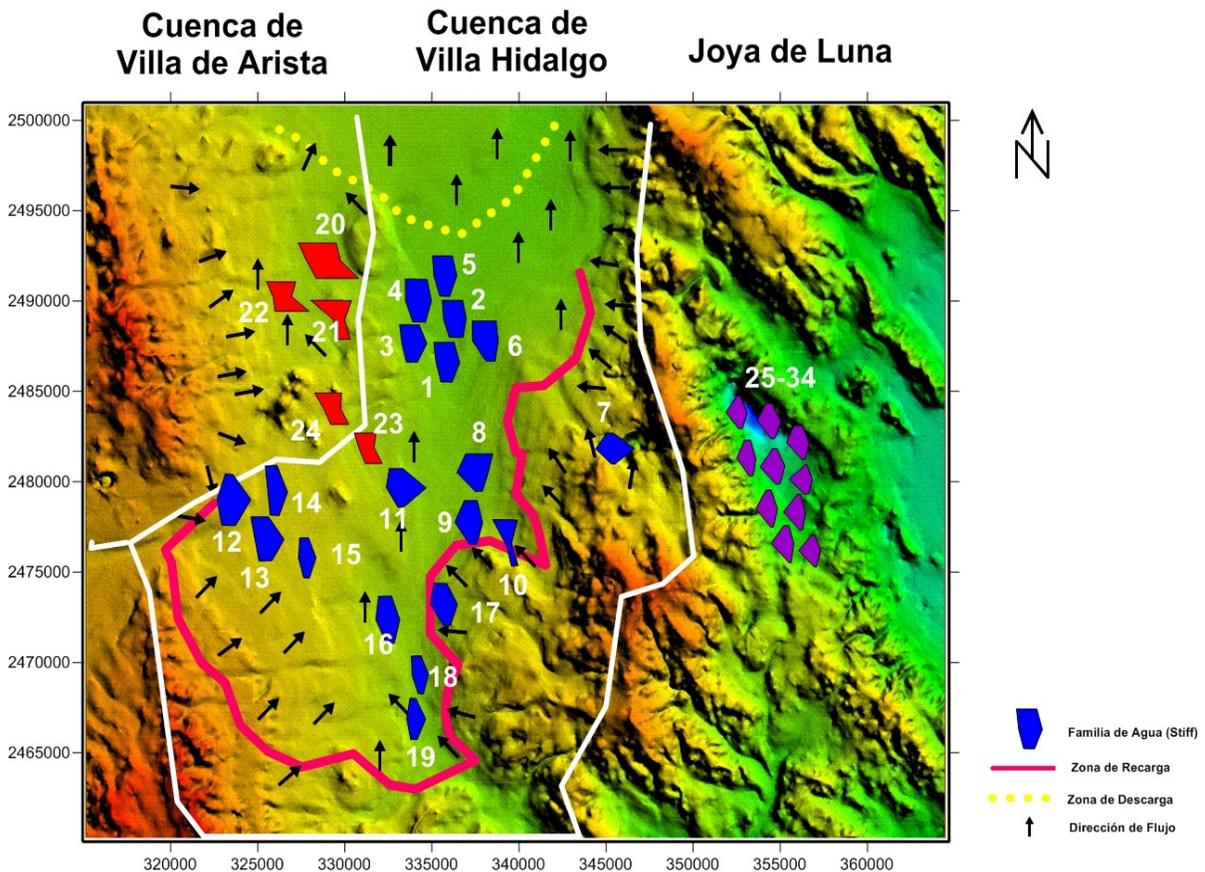


Figura 3.6. Diagrama de Stiff de las muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.

Los resultados aquí presentados muestran que ni las aguas de Villa Hidalgo y ni Villa de Arista son similares a las de Joya de Luna contenidas dentro de roca caliza por lo que podemos afirmar que, en la actualidad, el acuífero profundo de Villa Hidalgo no está siendo explotado tal y como lo mencionó Figuera-Martínez, 2010.

3.4 Calidad del Agua

De acuerdo a los parámetros medidos en este estudio y los límites permisibles de características químicas establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (DOF-1994) todas las muestras cumplen con el pH (6.5-8.5), cloruros (250 mg/L como Cl⁻) y sulfatos (400 mg/L como SO₄²⁻) establecidos (Figuras 3.1b, 3.3b y c). A excepción de la muestra 20 de La Estación, todas las muestras además cumplen con el rango de los límites permisibles de: sólidos totales disueltos (<1000 mg/L), sodio (<200 mg/L) y dureza total (<500mg/L como CaCO₃) (Figuras 3.1f, 3.2c y e). En varias muestras, sin embargo se excede el límite permisible de la NOM-127-SSA1-1994 (DOF,1994) para nitrato (<10 mg/L como N) y fluoruro (<1.5 mg/L como F⁻) (Figuras 3.3d y e). Los valores altos de nitrato podrían estar relacionados a contaminación antropogénica del acuífero somero mientras que el fluoruro se debe a un un enriquecimiento natural debido interacción con fluorita. En San Luis Potosí, por ejemplo, el 61.5% de los pozos también sobrepasan los límites permisibles de flúor.

De acuerdo a los datos obtenidos, y a reserva de determinar las características bacteriológicas, radioactivas, físicas y organolépticas, el agua de los puntos muestreados no es apta para consumo humano toda vez que excede los límites permisibles para nitrato y fluoruros.

Aunque es de esperar que el acuífero profundo presente características similares a las muestras de La Joya de Luna por encontrarse en la Formación el Abra estas muestras podrían estar contaminadas debido a su proximidad con la superficie y por lo tanto no reflejar las características químicas del acuífero a mayor profundidad. Se recomienda realizar al menos una perforación en el valle de Villa de Hidalgo para muestrear el agua del acuífero profundo y determinar con certeza si ésta tiene calidad para agua potable o no.

3.5 Procesos Hidrogeoquímicos

Para la identificación de miembros extremos se realizaron diversos diagramas de dispersión contra pH, variable maestra que controla e influye en un sinnúmero de procesos hidrogeoquímicos. Al graficar los sólidos totales disueltos contra pH se observan tres miembros extremos que corresponden a las muestras 2, 19 y 20 (Figura 3.7). La noria de Pozo del Carmen (muestra 19), presenta tanto el pH más alto como los sólidos totales más bajos (Figura 3.7a). A diferencia de la noria de Pozo del Carmen (muestra 19), La Estación (muestra 20) presenta la mayor cantidad de sólidos totales disueltos y un pH intermedio (Figura 3.7a) mientras que la muestra 2 de Peutillos presenta el pH más bajo con una cantidad de sólidos totales disueltos intermedia (Figura 3.7a).

Estos puntos de muestreo (2, 19 y 20) también aparecen como miembros terminales en gráficas de oxígeno disuelto y potencial redox contra pH (Figuras 3.7b y c) y son representativos de las tres familias de agua predominantes en el área de interés (Figura 3.4, 3.5 y 3.6).

Para discernir qué iones contribuyen más significativamente a los sólidos totales disueltos y establecer el tipo de procesos que están determinando la composición de las aguas muestreadas en el valle de Villa Hidalgo se realizaron diagramas de sólidos totales disueltos contra aniones y cationes mayores (Figuras 3.8 y 3.9). En general, se observa que tanto sulfato como sodio, y en alguna medida magnesio y cloruro, contribuyen directa y significativamente a la cantidad de sólidos totales disueltos (Figuras 3.8 y 3.9). A mayor sodio y sulfato, mayores sólidos totales disueltos (Figuras 3.8b y 3.9c). En contraste, calcio, bicarbonato y nitrato tienen un impacto menor (Figuras 3.8a, 3.9a y d). A mayor calcio, bicarbonato, cloruro o nitrato, no necesariamente mayores sólidos totales disueltos (ver por ejemplo muestra 20 en Figuras 3.8 y 3.9). El potasio incluso, podría correlacionarse inversamente con los sólidos totales disueltos. Este efecto se observa claramente en los miembros terminales, ya que a mayor potasio en la

muestra 19, menores sólidos totales disueltos y en la muestra 20, a menor potasio, mayores sólidos totales disueltos (Figura 3.8c). Por otro lado, es interesante observar que tanto las muestras de Villa Hidalgo como las de Villa de Arista se encuentran separadas, en mayor o menor grado de las de Joya de Luna (Figuras 3.8 y 3.9) soportando que las muestras del valle en estudio son extraídas de un acuífero distinto al de Joya de Luna. Estos resultados de hecho sugieren que el agua del valle interacciona con evaporitas (yesos y halita) ocasionando la disolución de yesos (CaSO_4) y halita (NaCl). Dicha disolución se refleja entonces en un incremento de sólidos totales disueltos que le confiere al agua firmas características de evaporitas con distintos grados de evolución (Figuras 3.4b, 3.8 y 3.9). Además se observa que el agua de Joya de Luna es la menos evolucionada y la más evolucionada es la de Villa de Arista y Villa Hidalgo permaneciendo en un intervalo intermedio entre estas dos cuencas (Figura 3.5).

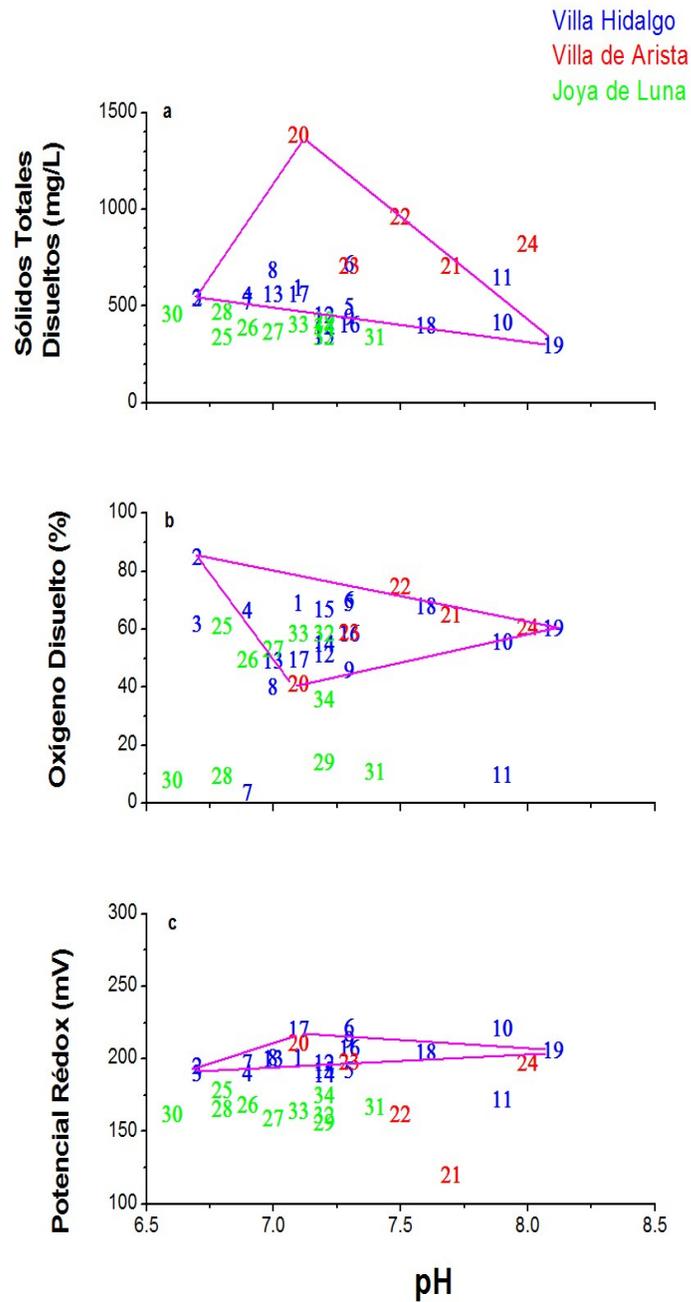


Figura 3.7 Sólidos totales disueltos, oxígeno disuelto y potencial redox contra pH en muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.

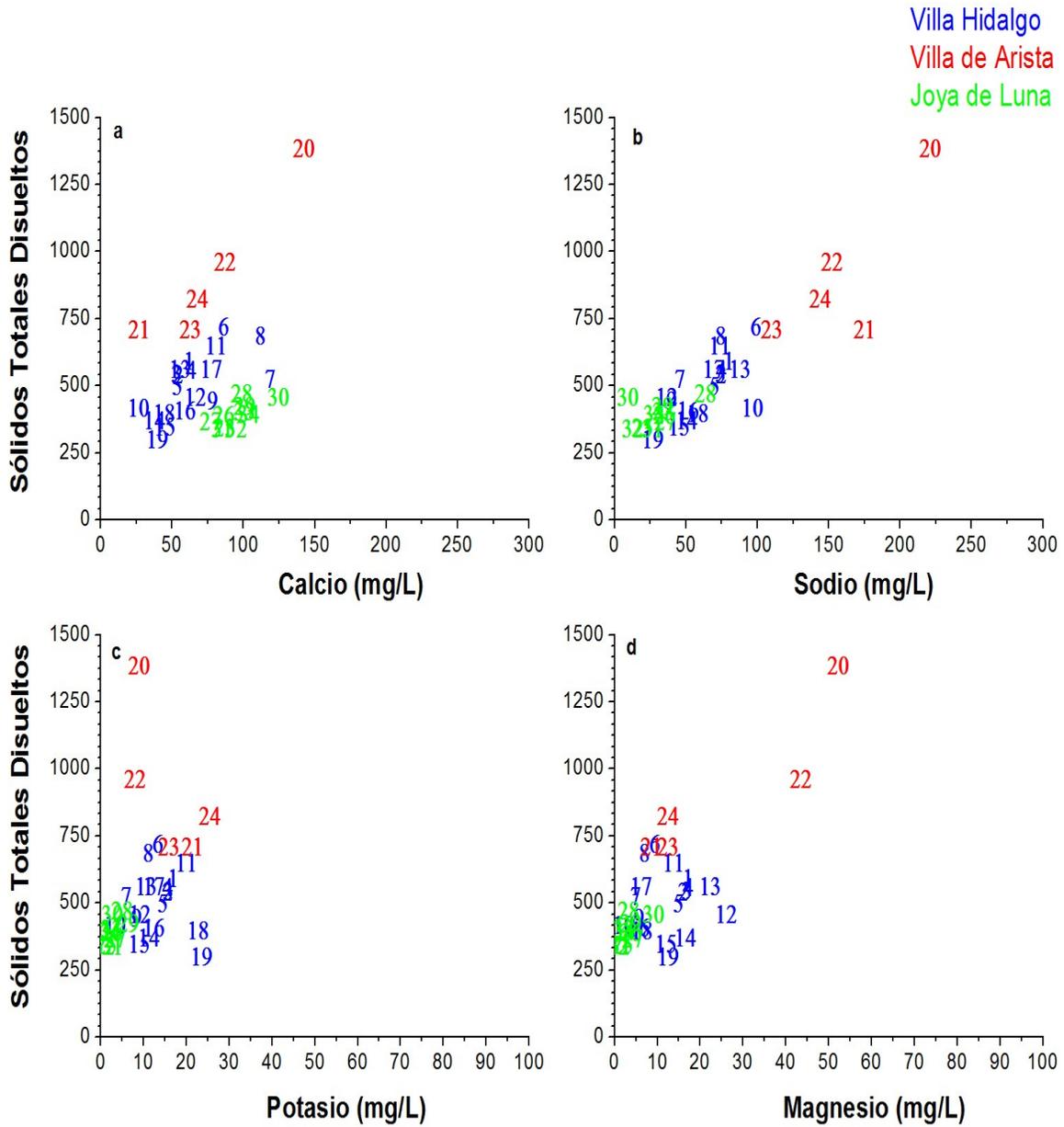


Figura 3.8 Sólidos totales disueltos contra calcio, sodio, potasio y magnesio de muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.

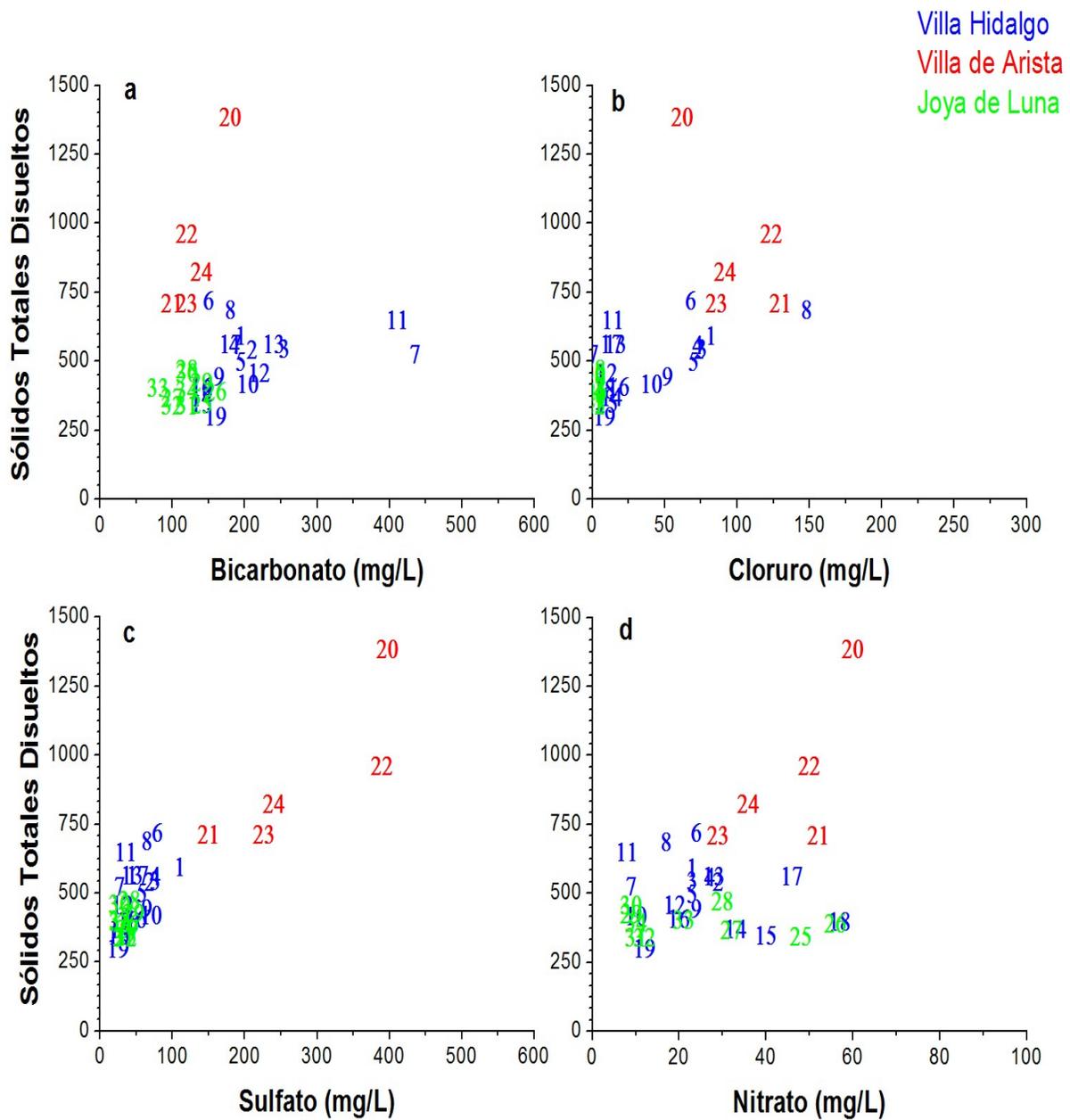


Figura 3.9. Sólidos totales disueltos contra bicarbonato, cloruro, sulfato y nitrato de muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.

En términos de ubicación espacial, la muestra de Pozo del Carmen (muestra 19) además de ser un miembro terminal por presentar valor máximo de pH y el mínimo de sólidos totales disueltos (Figuras 3.1b, 3.1f y 3.7a) también se localiza al extremo sur del área de estudio (Figura 2.1). La Estación (muestra 20), además de ser un miembro terminal por presentar la concentración más alta de sólidos totales disueltos y un pH intermedio, se localiza en el extremo norte del área de estudio (Figuras 3.1b, 3.1f y 3.7a y Figura 2.1). La muestra 2 de Peotillos, miembro terminal por presentar el pH mas bajo, se localiza en medio del valle de Villa Hidalgo (Figuras 3.1b, 3.1f y 3.7a y Figura 2.1). Las características hidrogeoquímicas de las muestras y su localización sugiere la presencia de aguas de más reciente infiltración o más jóvenes en el sur del valle y de aguas más evolucionadas en el norte, pasando por aguas de composición intermedia al centro del valle (Figuras 3.6c).

La proyección de los distintos puntos de muestreo sobre un transecto con dirección sur-norte (Figura 2.1) indica que los sólidos totales disueltos aumentan con la distancia (Figura 3.10a), como se mencionó anteriormente, debido a la disolución de sodio y sulfato (Figura 3.10b y c). Estos resultados se observan más claramente en los diagramas de Gibbs de la Figura 3.11 donde las muestras de Villa de Arista están enriquecidas en cloruro, sulfato (Figura A5 del Anexo A) y sodio debido a procesos de interacción agua-roca (Perea y Rodríguez-Rodríguez, 2008), pero además existe un proceso de evaporación durante su infiltración, debido a las condiciones climáticas de Villa Hidalgo y Villa de Arista. Los diagramas de Gibbs permiten esclarecer con mayor claridad el enriquecimiento de cloruro en las muestras, efecto que no era del todo evidente en la Figura 3.9b.

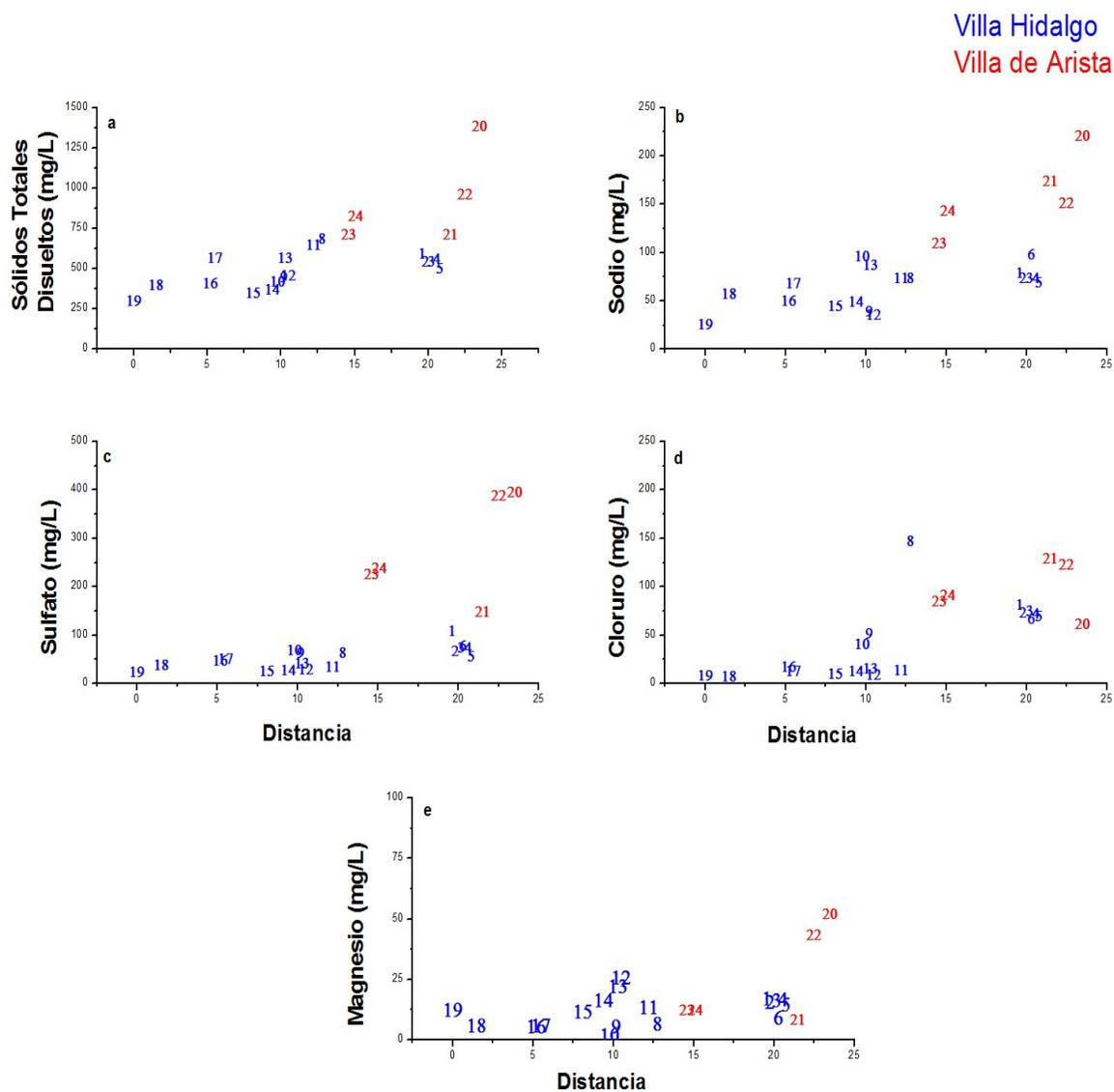


Figura 3.10 Sólidos totales disueltos, sodio, sulfato, cloruro y magnesio contra distancia en muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo y Villa de Arista.

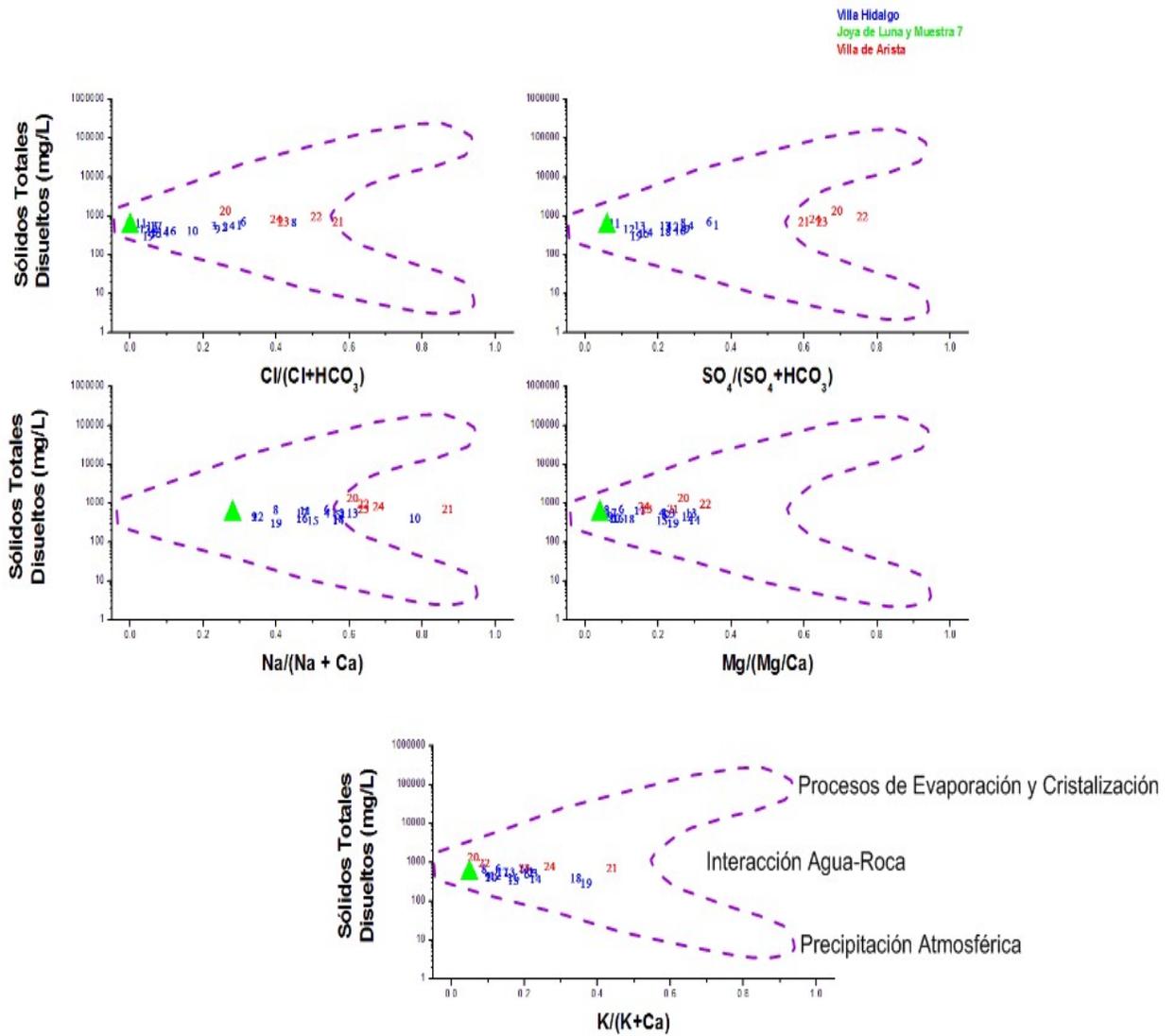


Figura 3.11 Diagramas de Gibbs para sodio, sulfato, cloruro, potasio y magnesio de muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.

A diferencia del sodio, sulfato, cloruro y magnesio, el bicarbonato, nitrato, potasio y calcio no presentan tendencias claras a lo largo de la distancia en la dirección del flujo de agua (Figura 3.12).

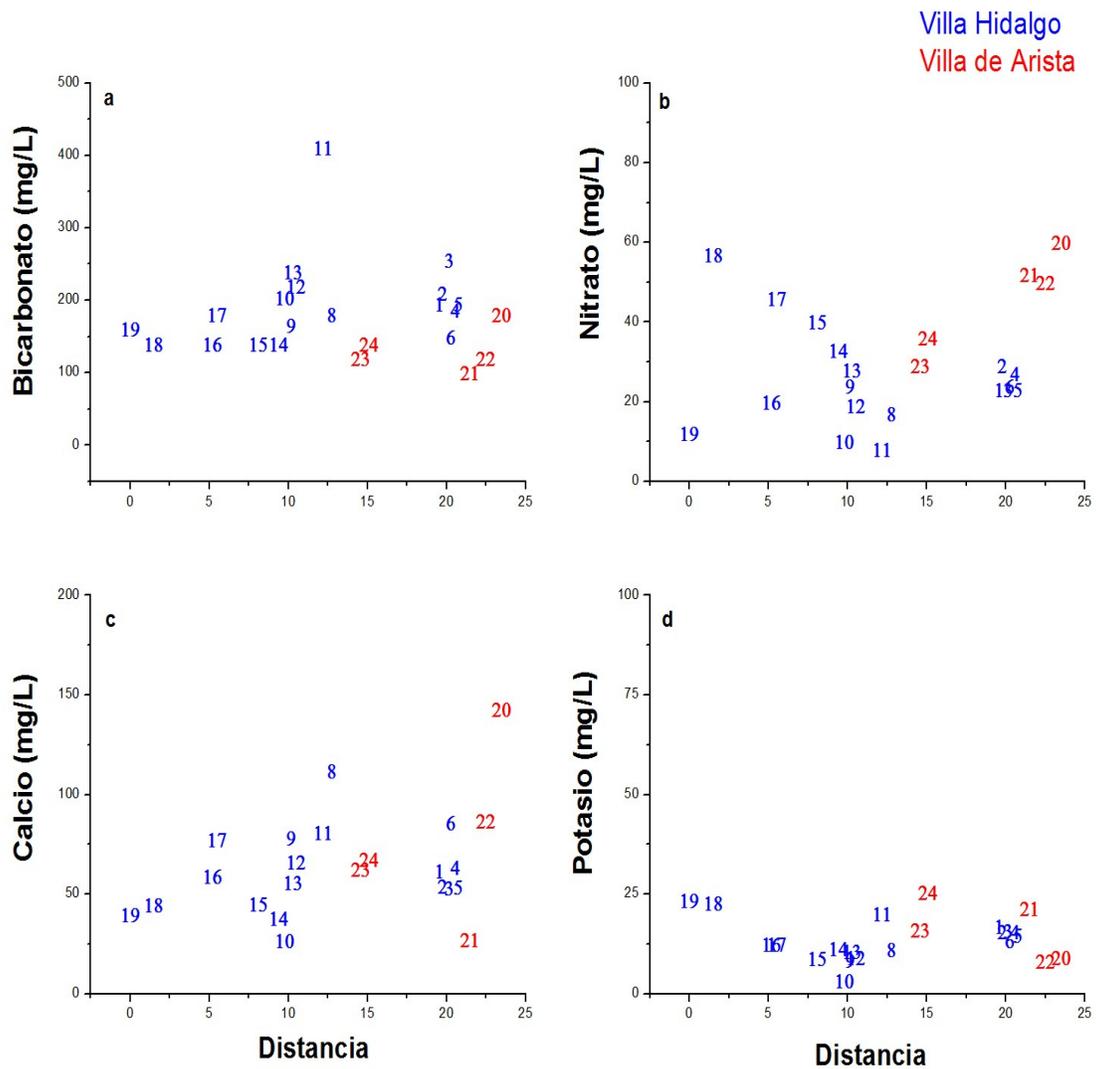


Figura 3.12 Bicarbonato, nitrato, calcio y potasio contra distancia en muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo y Villa de Arista.

Por otro lado la representación de los parámetros físico-químicos contra la distancia permiten establecer que la temperatura de las muestras es homogénea en dirección sur-norte, el pH disminuye, el oxígeno disuelto es de 61% en el sur y varía entre 42 y 85% hacía el norte del valle, el potencial redox varía entre 173 y 223, y la alcalinidad aumenta ligeramente (Figura 3.13).

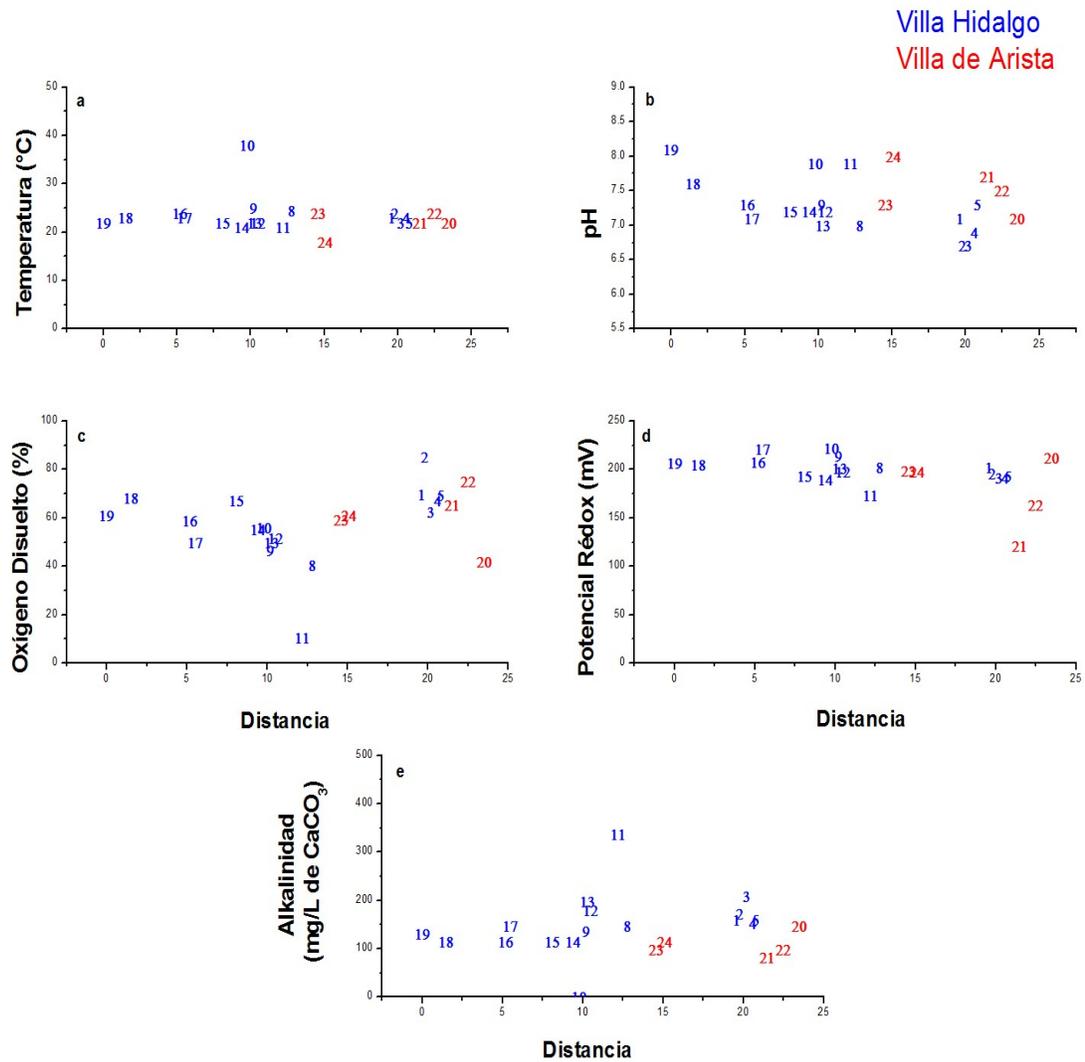


Figura 3.13 Temperatura, pH, oxígeno disuelto, potencial redox y alcalinidad contra distancia de muestras de agua recolectadas en Villa Hidalgo y Villa de Arista a.

Tabla 3.1 Valores de los parámetros físicoquímicos.

Muestra	Localización	Tipo de Aprovechamiento	Temperatura de la Muestra (°C)	pH	Oxígeno Disuelto (%)	Potencial Rédox (mV)	Alcalinidad * (mg/L de CaCO ₃)	Conductividad Eléctrica (mS/L)	Sólidos Totales Disueltos (mg/L)	Dureza (mg de CaCO ₃ /L)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ¹⁻	Cl ¹⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ¹⁻	F ¹⁻	Balance Iónico (meq/L %)	Familia de Agua		
Villa Hidalgo	1	Rancho de Elias Serrato, Peotillos	Pozo	17.00	7.30	153.00	109.57	450.00	950.00	170.37	11.00	19.11	11.30	17.50	0.00	150.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-HCO ₃ -Cl-SO ₄	
	2	Rancho de Genaro Pérez, Peotillos	Pozo	16.00	7.30	140.00	153.00	177.00	970.00	170.00	10.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-HCO ₃ -Cl	
	3	El Poterito, Peotillos	Pozo	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	980.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-HCO ₃ -Cl	
	4	El Pilon, Peotillos	Pozo	17.00	7.30	137.00	153.00	167.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-HCO ₃ -Cl-SO ₄	
	5	Rancho de Don Roberto, Peotillos	Pozo	17.00	7.30	137.00	153.00	167.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-HCO ₃ -Cl	
	6	Las Liebres, San Ignacio	Pozo	16.00	7.30	137.00	153.00	177.00	170.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-HCO ₃ -Cl-SO ₄	
	7	El Nogalito, Cerro Grande	Noria	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Na-HCO ₃	
	8	Sesquedad	Pozo	16.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Na-HCO ₃ -Cl-SO ₄	
	9	Valle de San Juan	Pozo	16.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Na-HCO ₃ -Cl-SO ₄	
	10	Rancho Nuevo, Paso Blanco	Pozo	18.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-HCO ₃	
	11	Camino a Valle de San Juan	Noria	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Na-HCO ₃	
	12	Tanquito de San Francisco	Pozo	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Mg-Na-HCO ₃	
	13	Corcovada	Pozo	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-Mg-HCO ₃	
	14	La Estación, Corcovada	Pozo	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-Mg-HCO ₃	
	15	Tanque de Luna	Pozo	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-Mg-HCO ₃	
	16	Presita de la Cruz	Pozo	16.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄	
	17	La Concordia	Pozo	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Na-HCO ₃	
	18	Pozo del Carmen	Pozo	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-HCO ₃	
19	Pozo del Carmen	Noria	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Na-Mg-HCO ₃		
			Media	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00		
			Desv. Estándar	0.50	0.20	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	
			Mínimo	16.00	7.10	127.00	143.00	160.00	950.00	160.00	10.10	16.00	10.00	15.00	0.00	130.00	9.00	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00	0.00	
			Máximo	18.00	7.50	147.00	163.00	180.00	990.00	180.00	12.10	18.00	12.00	17.00	0.00	150.00	11.00	12.00	12.00	12.00	12.00	2.00	2.00	
Villa Arista	20	La Estación	Pozo	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-Mg-SO ₄	
	21	El Leoncito	Pozo	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-CO ₃	
	22	Plaza principal, El Leoncito	Pozo	16.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-Mg-SO ₄ -Cl	
	23	La Redonda	Pozo	16.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-SO ₄ -Cl-HCO ₃	
	24	oria de Francisco Castillo, La Redonda	Noria	18.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Na-Ca-SO ₄ -Cl-HCO ₃	
				Media	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	
			Desv. Estándar	0.50	0.20	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	
			Mínimo	16.00	7.10	127.00	143.00	160.00	950.00	160.00	10.10	16.00	10.00	15.00	0.00	130.00	9.00	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00	0.00	
			Máximo	18.00	7.50	147.00	163.00	180.00	990.00	180.00	12.10	18.00	12.00	17.00	0.00	150.00	11.00	12.00	12.00	12.00	12.00	2.00	2.00	
Joya de Luna	25	La Joya de Luna Noria 1	Noria	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-HCO ₃	
	26	La Joya de Luna Noria 2	Noria	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Na-HCO ₃	
	27	La Joya de Luna Noria 3	Noria	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Na-HCO ₃	
	28	La Joya de Luna Noria 4	Noria	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Na-HCO ₃	
	29	La Joya de Luna Noria 5	Noria	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Na-HCO ₃	
	30	La Joya de Luna Noria 6	Noria	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-HCO ₃	
	31	La Joya de Luna Noria 7	Noria	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Na-HCO ₃	
	32	La Joya de Luna Noria 8	Noria	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-HCO ₃	
	33	La Joya de Luna Noria 9	Noria	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Na-HCO ₃	
	34	La Joya de Luna Noria 10	Noria	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00	Ca-Na-HCO ₃	
			Media	17.00	7.30	137.00	153.00	170.00	970.00	170.00	11.10	17.00	11.00	16.00	0.00	140.00	10.00	11.00	11.00	11.00	1.00	1.00		
			Desv. Estándar	0.50	0.20	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	
			Mínimo	16.00	7.10	127.00	143.00	160.00	950.00	160.00	10.10	16.00	10.00	15.00	0.00	130.00	9.00	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00	0.00	
			Máximo	18.00	7.50	147.00	163.00	180.00	990.00	180.00	12.10	18.00	12.00	17.00</										

Conclusiones

Los estudios realizados en este trabajo de tesis permitieron conocer las características hidrogeoquímicas del acuífero somero de Villa Hidalgo. Sin embargo, no las del acuífero profundo debido a que no hay pozos que alcancen la Formación El Abra en el área de estudio. No obstante, dado que las muestras de La Joya de Luna también se encuentran en la Formación El Abra, sus características hidrogeoquímicas nos permitieron tener una aproximación de los parámetros hidrogeoquímicos del acuífero profundo de Villa Hidalgo.

De acuerdo a los datos obtenidos, y a reserva de determinar las características bacteriológicas, radioactivas, físicas y organolépticas, el agua del acuífero somero no es apta para consumo humano toda vez que excede los límites permisibles para nitratos.

Aunque la calidad de las características químicas del acuífero profundo podrían inferirse por las de las muestras de La Joya de Luna existe la posibilidad de que el acuífero profundo no haya recibido el impacto antropogénico superficial que se observa en las muestras de La Joya de Luna y por lo tanto que no esté contaminado. De cualquier manera, se recomienda realizar al menos una perforación en el valle de Villa de Hidalgo para muestrear el agua del acuífero profundo y determinar con certeza si ésta tiene calidad para agua potable o no.

En términos hidrogeoquímicos, las muestras de Joya de Luna presentan valores promedio más bajos de temperatura, potencial redox, pH, alcalinidad, oxígeno disuelto y sólidos totales disueltos que las de Villa Hidalgo y Villa de Arista. Se encuentran a una profundidad entre 5 y 15 metros en el conglomerado calcáreo que cubre la Formación El Abra y presentan una composición homogénea característica de aguas bicarbonatadas de reciente infiltración o poco evolucionadas. Las muestras de Villa de Arista presentan los valores promedio más altos de pH y sólidos totales disueltos debido a la disolución de yesos y halita durante su interacción agua-roca. Dicha interacción le confiere al agua de Villa de Arista firmas características de evaporitas con un mayor grado de evolución. Las muestras de Villa Hidalgo presentan una diversidad de familias en el centro del valle sin embargo permanecen en un intervalo intermedio entre las aguas bicarbonatadas de La Joya de Luna y las aguas sulfatadas de Villa de Arista.

En términos espaciales, el grado de evolución del agua incrementa en el sentido del flujo subterráneo. Las aguas menos evolucionadas se localizan al sur del valle y las más evolucionadas hacia el norte, pasando por aguas de composición intermedia en el centro.

Referencias

Contreras, S. y M.G. Galindo (2008) Abasto futuro de agua potable, análisis espacial y vulnerabilidad de la ciudad de San Luis Potosí, México. *Revista Colombiana de Geografía* 17. pp. 127-137.

Comisión Nacional del Agua (2002) Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero San Luis Potosí, estado de San Luis Potosí, México.

COREMI (1992) Monografía Geológico-Minera del estado de San Luis Potosí pp. 20-28.

Davis, S. (1971) Hidrogeología. Ediciones Ariel pp. 436-441.

Diario Oficial de la Federación (1994) 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.

Dim J.R., Saura, Y., Fukami, H. and A. Miyakoshi (2002) Spatial characteristics of groundwater temperature in the Ishikari Lowland, Hokkaido, northern Japan: analytical and numerical applications. *Hydrogeology Journal* 10 (2) pp. 296-306.

Fagundo, J.R. (1990) Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales, estudio mediante simulación química del efecto de la litología. *Revista Voluntad Hidráulica* 82 pp. 28-37.

Figuera, M. (2010) Métodos geofísicos aplicados en la exploración del agua subterránea: caso acuífero de Villa Hidalgo, S.L.P. Tesis de Maestría IPICYT.

INEGI (2010) XIII Censo de Población y Vivienda, Estado de San Luis Potosí, México.

Langmuir D. (1997) *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice Hall, pp. 297-298.

Lillo, J. (2005) Técnicas Hidrogeoquímicas. Material de Curso de Máster Oficial en Hidrogeología y Gestión de Recursos Hídricos. Universidad Rey Juan Carlos.

López-Doncel R. (2003) La Formación Tamabra del Cretácico medio en la porción central del margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, centro-noreste de México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 20(1) pp 1-19.

Martínez, V.J. (1989) Estudio Geohidrológico del Valle de Villa Hidalgo, Estado de San Luis Potosí. Folleto Técnico Num. 11. Instituto de Geología Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Medina, F. (1965) Carta Hidrológica de Villa Hidalgo, S.L.P. Folleto Técnico Num. 7. Instituto de Geología y Metalurgia Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Pacheco, J., Canul, R. y A. Cabrera (2002) Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. Revista Ingeniería 6-3 pp. 73-81.

Perea, R. Y M. Rodríguez-Rodríguez (2009) Water quality for different uses in the main groundwater bodies of the Guadalquivir River Watershed, Atlantic Basin, Spain. Environmental Earth Sciences. Springer Verlag 2009.

Tristán, M., Aguillón, A., Barboza, J.R., Bellon, H., López-Doncel, R., Rodríguez, R. y G. Labarthe-Hernández (2009) Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 61 (3) pp. 287-303.

Zapata., J.L. y J.A. Pérez (1979) Cartografía Geológica Hoja Peutilos, S.L.P. Folleto Técnico Num. 63. Instituto de Geología y Metalurgia Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Anexo A. Gráficas auxiliares

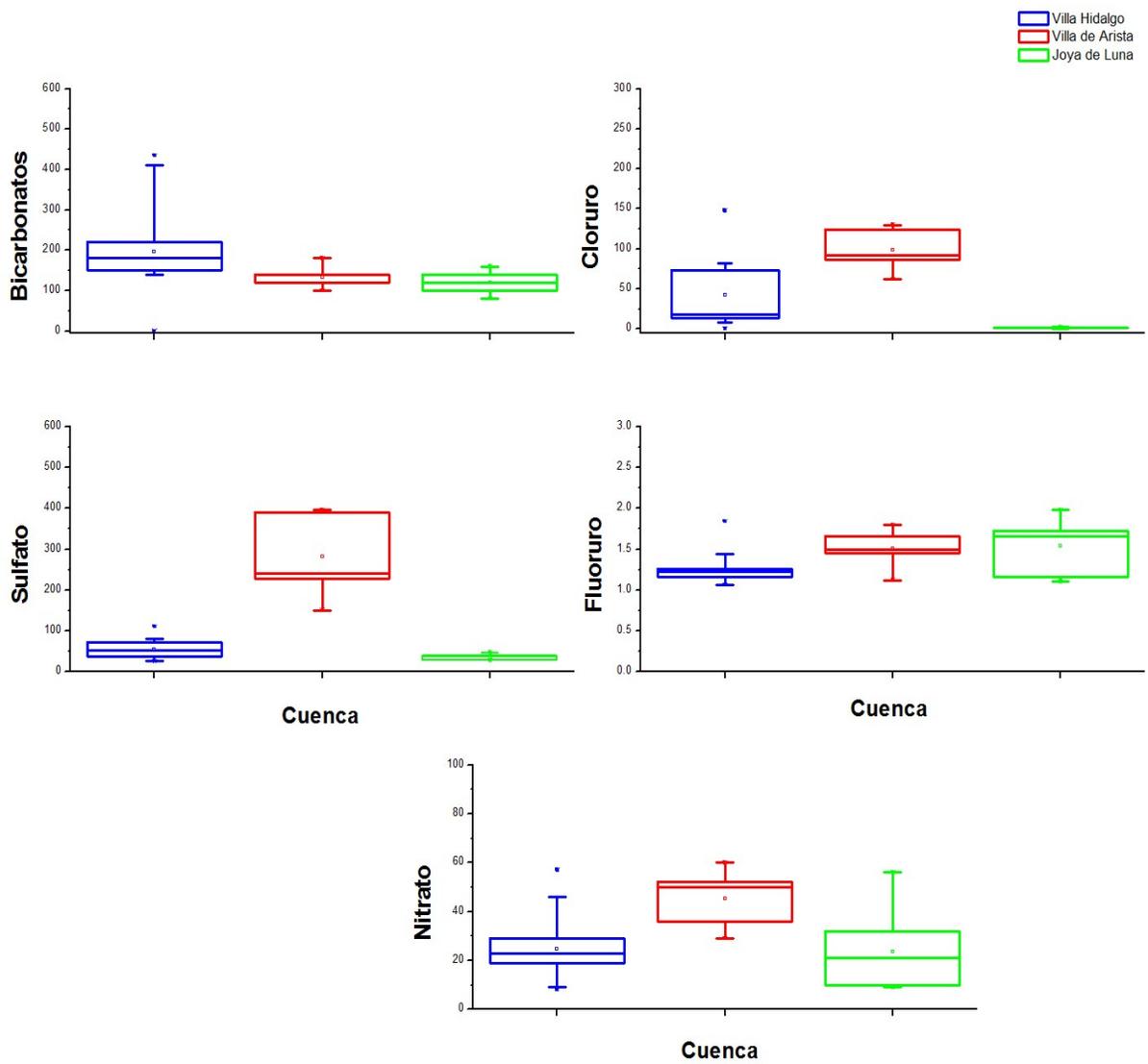


Figura A1. Gráficas de caja para aniones.

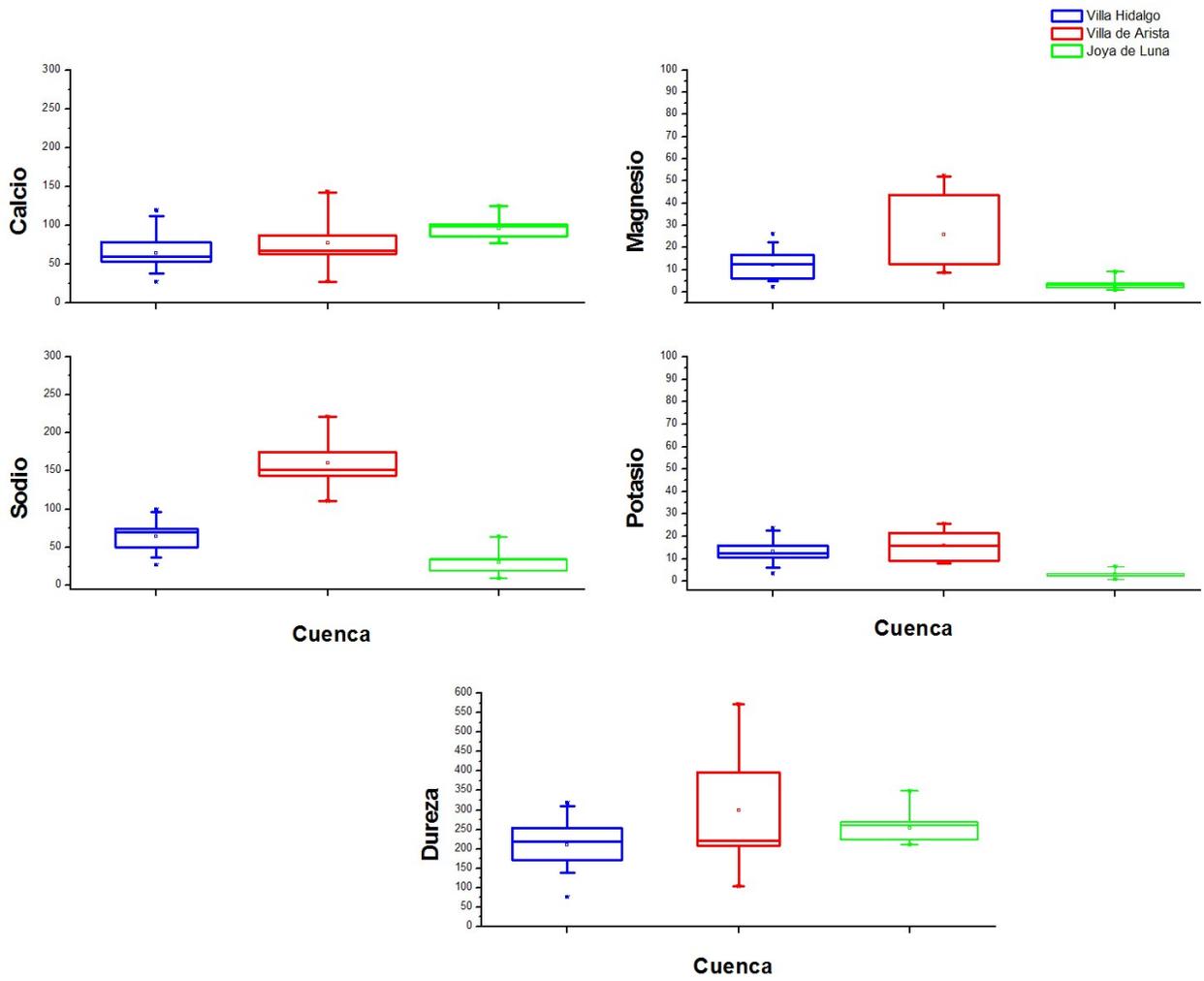


Figura A2. Gráficas de caja para cationes.

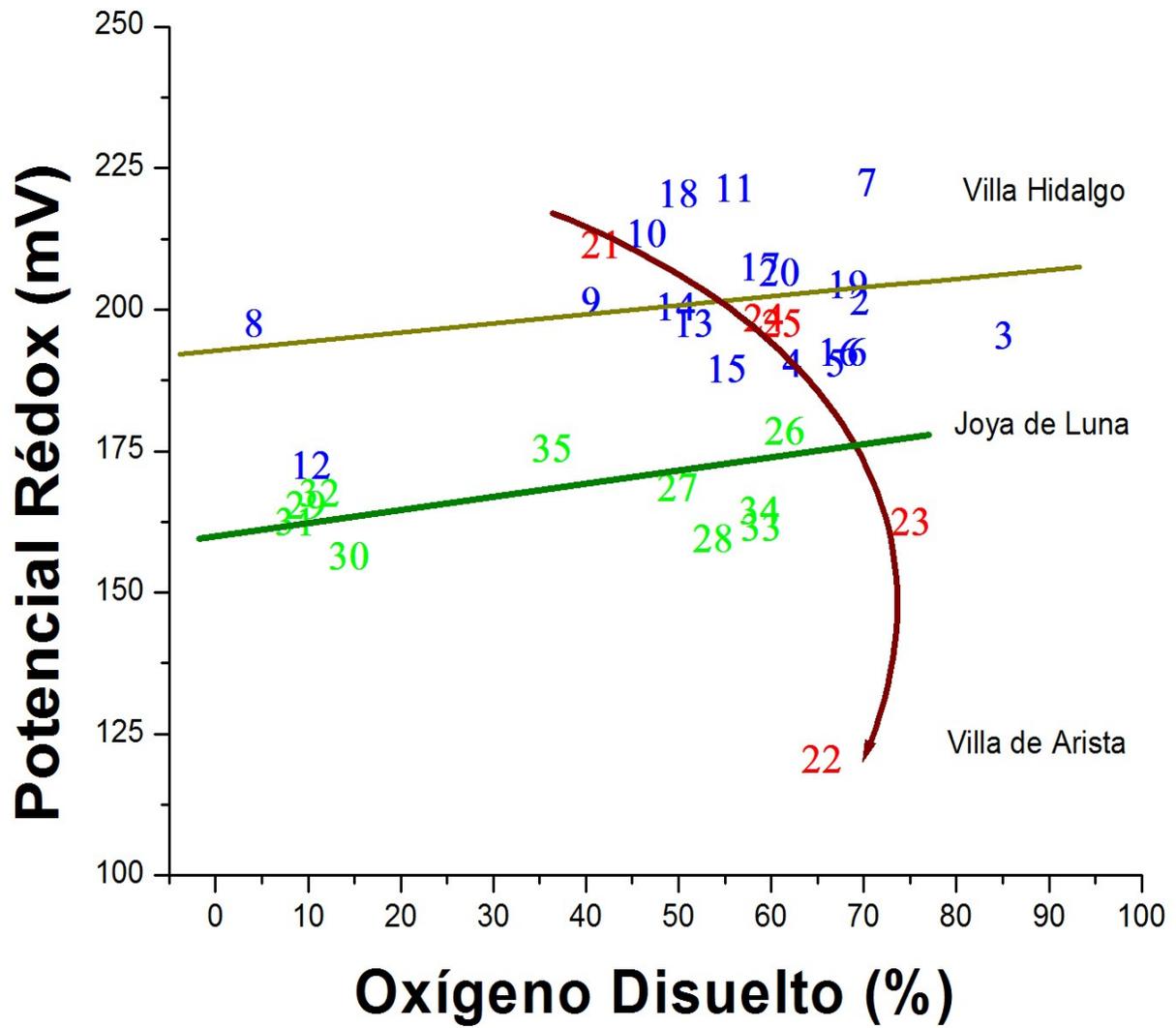


Figura A3. Potencial redox contra oxígeno disuelto.

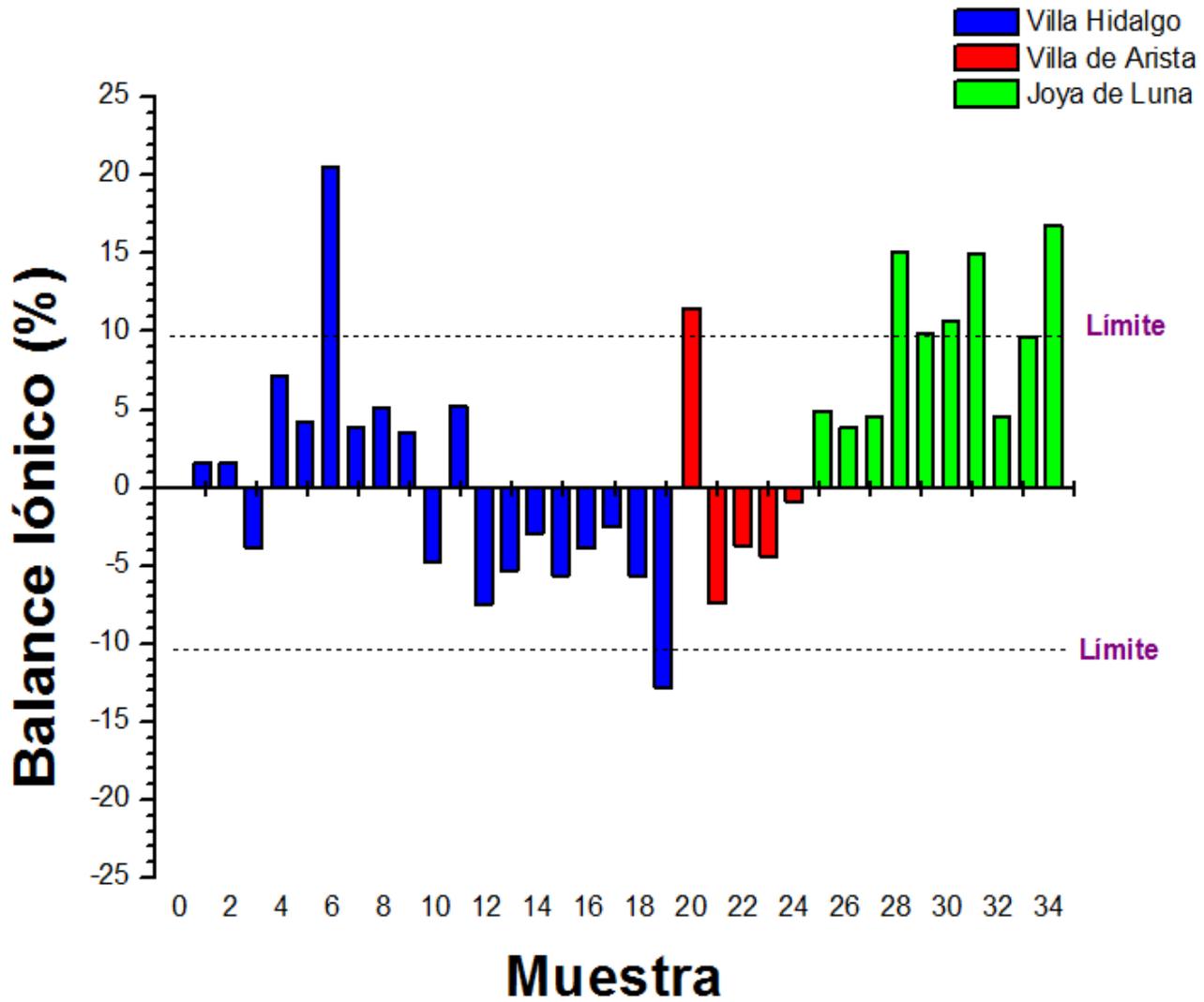


Figura A4. Balance iónico de las muestras recolectadas en Villa Hidalgo, Villa Arista y Joya de Luna.

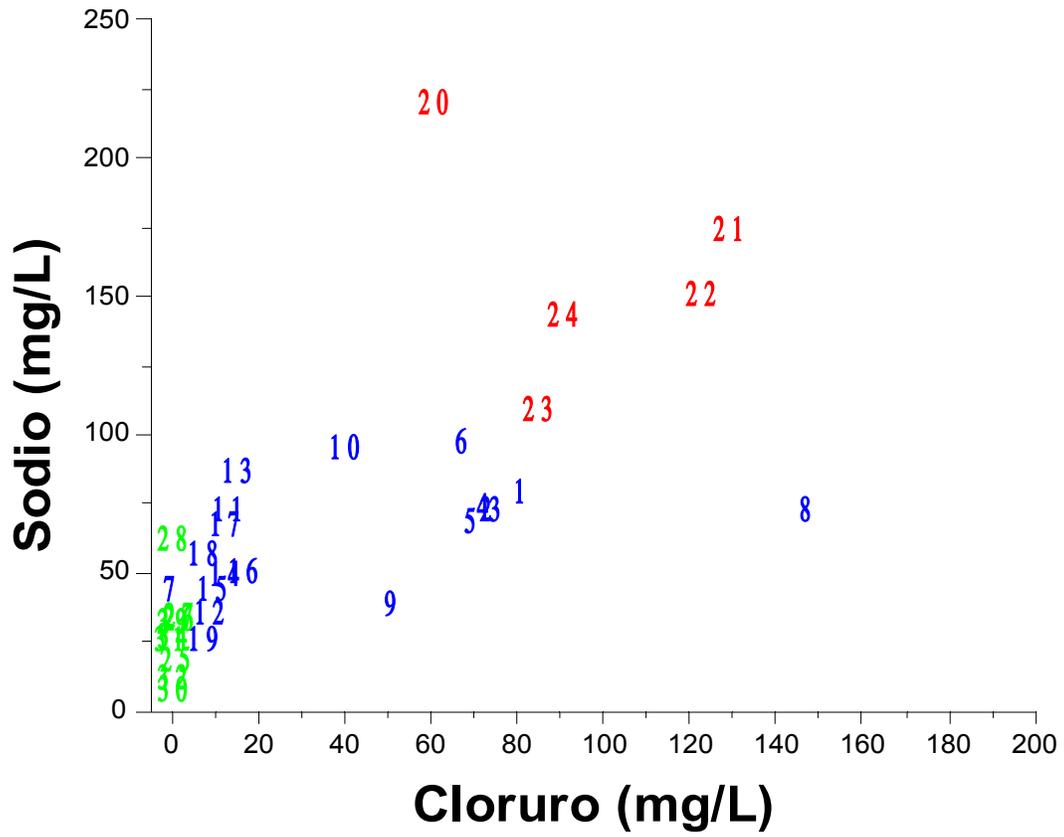


Figura A5. Enriquecimiento de cloruro y sodio de las muestras recolectadas en Villa Hidalgo, Villa Arista y Joya de Luna.

**Anexo B. Reportes Hidrogeoquímicos de las muestras recolectadas de
Villa Hidalgo, Villa de Arista y La Joya de Luna.**