



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

**NIVELES DE CROMO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONA
COSTERA ASOCIADA A ACTIVIDAD MINERA Y AGRÍCOLA EN
SAN JUAN DE LOS PLANES, B.C.S., MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS
(QUÍMICA ACUÁTICA)

PRESENTA:
IBQ. RAQUEL MARÍA GUTIÉRREZ TIRADO

TUTOR PRINCIPAL:
DR. CARLOS RENÉ GREEN RUIZ
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNIDAD ACADÉMICA
MAZATLÁN

COMITÉ TUTOR:
DR. MARTÍN FEDERICO SOTO JIMÉNEZ
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, U. A. MAZATLÁN
DRA. RUTH ESTHER VILLANUEVA ESTRADA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, CIUDAD DE MÉXICO
DRA. FLOR ELISA DEL ROSARIO ÁRCEGA CABRERA
FACULTAD DE QUÍMICA, UNIDAD DE QUÍMICA EN SISAL
DR. JOBST WURL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA SUR

CIUDAD DE MÉXICO, ENERO, 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



*Posgrado en
Ciencias del Mar
y Limnología*



**NIVELES DE CROMO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ZONA
COSTERA ASOCIADA A ACTIVIDAD MINERA Y AGRÍCOLA EN
SAN JUAN DE LOS PLANES, B.C.S., MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS
(QUÍMICA ACUÁTICA)

PRESENTA:
IBQ. RAQUEL MARÍA GUTIÉRREZ TIRADO

TUTOR PRINCIPAL:
DR. CARLOS RENÉ GREEN RUIZ
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNIDAD ACADÉMICA
MAZATLÁN

COMITÉ TUTOR:
DR. MARTÍN FEDERICO SOTO JIMÉNEZ
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, U. A. MAZATLÁN
DRA. RUTH ESTHER VILLANUEVA ESTRADA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, CIUDAD DE MÉXICO
DRA. FLOR ELISA DEL ROSARIO ÁRCEGA CABRERA
FACULTAD DE QUÍMICA, UNIDAD DE QUÍMICA EN SISAL
DR. JOBST WURL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA SUR

CIUDAD DE MÉXICO, ENERO, 2020



El presente trabajo fue realizado bajo la dirección del Dr. Carlos René Green Ruiz dentro de las instalaciones de la Unidad Académica Mazatlán del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, en donde se llevaron a cabo los análisis en los laboratorios de “Geomicrobiología y Sedimentología” e “Isótopos estables”, asimismo, parte de los análisis se efectuaron en el Instituto de Geofísica en la Unidad de Geoquímica de Fluidos Geotérmicos ubicado en la CDMX, bajo la tutela de la Dra. Ruth Esther Villanueva Estrada y la Técnica IBQ Xóchitl Felipe Martínez.

El financiamiento se obtuvo por medio del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), con el proyecto IN110716: “Geoquímica de elementos potencialmente tóxicos en zonas de actividades antropogénicas asociadas a descargas submarinas de aguas subterráneas hidrotermales en Baja California Sur”; además, se contó con apoyos parciales por parte del Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

La información contenida en esta tesis se empleará únicamente con fines académicos y/o de divulgación científica; dicha información deberá ser citada de la siguiente manera:

Gutiérrez-Tirado R. M. (2019). Niveles de cromo en aguas subterráneas de una zona costera asociada a actividad minera y agrícola en San Juan de los Planes, B.C.S., México. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. ICMYL-UNAM, México.

Agradecimientos Académicos

Agradezco al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología por permitirme formar parte de su comunidad de estudiantes y continuar mi desarrollo académico, por el apoyo económico para realizar estancias y la disposición de su personal para dar solución a diversas situaciones. Particularmente agradezco a la Unidad Académica Mazatlán por facilitarme sus instalaciones para llevar acabo mis análisis, además de poder haber asistido a clases y cursos.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) por el financiamiento otorgado al proyecto IN110716: "Geoquímica de elementos potencialmente tóxicos en zonas de actividades antropogénicas asociadas a descargas submarinas de aguas subterráneas hidrotermales en Baja California Sur", e INFRA-CONACYT 230061 "Fortalecimiento del Grupo de Investigación en Geoquímica y Contaminación Marina (GEMA) mediante la adquisición de un espectrómetro de masas de alta resolución".

Asimismo, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante mi periodo de estudios de posgrado y al apoyo parcial por parte del Programa de Mejoramiento del Profesorado de la Secretaría de Educación Pública.

El más grande agradecimiento para mí director de tesis, el Dr. Carlos René Green Ruiz, quién me brindó siempre su apoyo y comprensión acompañados de una sonrisa. Gracias por su calidez como persona y por compartirme sus conocimientos tanto para mi vida académica como personal; pero sobretodo, gracias por darme la oportunidad de formar parte de su equipo de laboratorio.

A la Dra. Ruth Esther Villanueva Estrada, por permitirme realizar parte de los análisis en sus instalaciones, por brindarme su tiempo y compartirme sus conocimientos sobre el análisis e interpretación de iones mayoritarios que han venido a enriquecer este trabajo.

Al Dr. Martín Federico Soto Jiménez, por permitirme hacer uso de su laboratorio y brindarme sus enseñanzas relacionadas al manejo del HR-ICP-MS.

Al Dr. Jobst Wurl, por su gran apoyo en las salidas a campo y el ambiente de confianza que su trato propiciaba; por sus consejos y las observaciones tan acertadas durante el desarrollo de la tesis.

A la Dra. Flor Árcega Cabrera, por sus atinados comentarios y sugerencias que contribuyeron de gran manera a mejorar este trabajo.

A la M.C. Cynthia Jacobi Aguilar, por su disposición y apoyo en los análisis de las muestras en el HR-ICP-MS.

A la Técnica IBQ Xóchitl Felipe Martínez, por los conocimientos brindados en el manejo del Cromatógrafo Iónico y la interpretación de datos.

Al M. en C. Pablo Hernández Morales, por el apoyo durante las salidas a campo y enseñarme sobre el manejo de sistemas de información geográfica.

Al Dr. José Roberto Rivera Hernández, por ayudarme en el análisis de muestras y guiarme en la redacción de la tesis.

Al M. en C. Omar Alejandro Rubio Hernández, por su ayuda durante las salidas a campo y asesorarme en temas académicos.

A la M. en C. Daniela Alvarado Zambrano, por apoyarme en las salidas a campo, con el análisis de algunas muestras, y enseñarme sobre el manejo de softwares estadísticos.

A la Lic. Margarita Cordero, por guiarme dentro de los diversos procesos administrativos necesarios.

Al Mat. Germán Ramírez Reséndiz, por resolver mis dudas sobre cuestiones estadísticas.

Al Biol. Luis Javier Álvarez Bajo, por su enorme disposición y apoyo durante las salidas a campo.

Agradecimientos Personales

A mi familia, por sus consejos que me ayudan a avanzar con rectitud en la vida, y por ayudarme a concluir una etapa más.

A las amistades que forjé dentro de la maestría:

A Julieta, Ale, Ani, Odette, Yosa y Cinthya, por todos los momentos tan gratos y memorables que pasé con ustedes.

En particular a Alejandra, por el apoyo y los ánimos que siempre me diste, y a Odette, por haber hecho de mi estancia en CDMX un tiempo muy grato y enseñarme un poco más de esa ciudad.

Agradezco además, a Julio, por los buenos momentos y la amistad que me otorgaste, y que permitió que mi estancia en el laboratorio de la CDMX fuera más amena.

A mis amigos dentro y fuera del laboratorio: Roberto, Dani, Omar, Ani y al nuevo integrante Isao, por haber hecho de esta experiencia algo maravilloso. Me llevo conmigo tantos momentos alegres, tantas risas y abrazos, y sus amistades que espero perduren por muchos años.

He conocido sin duda, gente muy valiosa durante todo el proceso y espero poder haber aportado a cada uno de ustedes un poco de lo mucho que siempre me brindaron.

Finalmente agradezco a mis amigos que me han acompañado desde etapas anteriores, y que se han vuelto familia. Por inyectarme de alegría y fortaleza cuando hicieron falta. A Brianda, Carlos, Diego, Magui, Majo, Manuel†, Martha, Meni y Pato. Los llevo siempre conmigo.

A todos, ¡¡Gracias!!

*A Dios,
Por iluminar siempre mí camino.*

*A mis padres,
Por su apoyo incondicional, y por todas sus
enseñanzas.*

*A mis hermanos,
Por ser mis cómplices en todo y brindarme
alegría, porque a pesar de la distancia los
siento siempre cerca.*

Índice General

Contenido	Página
Índice de figuras	i
Índice de tablas	iv
Índice de anexos	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Aguas Subterráneas	1
1.2 Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)	4
1.3 Cromo	5
1.4 Cr (III) y Cr (VI): especies más estables	7
1.5 Iones Mayoritarios	9
2. ANTECEDENTES	13
2.1 Contaminación por cromo en aguas subterráneas	13
2.3 Estudios de cromo en México	14
3. JUSTIFICACIÓN	17
4. HIPÓTESIS	18
5. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	19
6. OBJETIVOS	20
6.1 Objetivo general	20
6.2 Objetivos específicos	20
7. ÁREA DE ESTUDIO	21
7.1 Ubicación	21
7.2 Agroquímicos empleados en San Juan de los Planes	23
7.3 Climatología y precipitaciones	25
7.4 Geología	25
7.4.1 Litología	26
7.4.2 Mineralogía	27
7.5 Hidrogeología	27

8. MÉTODOS	29
8.1 Recolección de muestras	29
8.2 Análisis de agua	33
8.2.1 Cromo total y especies más estables	33
8.2.2 Iones Mayoritarios	35
8.3 Control de calidad.....	36
8.3.1 En campo	36
8.3.2 En laboratorio.....	36
8.3.3 Análisis de Cr en ICP-MS.....	36
8.3.4 Análisis de Cr (VI) en Espectrofotómetro UV-Visible	37
8.3.5 Análisis de iones mayoritarios en Cromatógrafo Iónico	37
8.4 Creación de mapas geográficos	38
8.5 Análisis estadísticos	39
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
9.1 Variables fisicoquímicas	40
9.1.1 Temperatura	40
9.1.2 Conductividad eléctrica (CE)	43
9.1.3 pH.....	46
9.1.4 Iones Mayoritarios	47
9.2 Cromo.....	49
9.2.1 Concentraciones de Cr _T	49
9.2.2 Límite permisible: NOM-127-SSA1-1994	54
9.2.3 Coeficiente de partición.....	55
9.2.4 Especiación	56
9.3 Comportamiento de las variables y sus relaciones con el Cr	58
10. CONCLUSIONES	62
11. BIBLIOGRAFÍA CITADA	64
12. ANEXOS	71

Índice de figuras

Contenido	Página
Figura 1.1 Corte transversal de acuíferos y sus barreras naturales (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2008).	2
Figura 1.2 Distribución del agua en el subsuelo (Manahan, 2011).	3
Figura 1.3 Diagrama Eh-pH para las especies de cromo en un sistema acuoso (Palmer y Wittbrodt, 1991).	8
Figura 1.4 Diagrama de Piper (Pulido, 2014).	10
Figura 1.5 Diagrama de Stiff (Pulido, 2014).	11
Figura 1.6 Diagrama Schoeller-Berkaloff (Fernández, 2008).	11
Figura 7.1 Acuífero Los Planes y acuíferos aledaños. Modificado de: Del Rosal (2003) y Comisión Nacional del Agua (2015).	23
Figura 7.2 Envases de agroquímicos utilizados en los campos agrícolas de SJP.	24
Figura 7.3 Gráfica de precipitación y evaporación promedio mensuales del periodo de 1971-2010 dentro de la cuenca (Servicio Meteorológico Nacional, 2010).	25
Figura 7.4 Fallas y litología en el área de estudio y alrededores. Modificado de: Consejo de Recursos Minerales (1999) y Del Rosal (2003).	26
Figura 7.5 Distribución del nivel estático (msnm) con dirección del flujo subterráneo para el año 2003. Modificado de: Comisión Nacional del Agua (2003).	28
Figura 8.1 Ubicación geográfica de sitios de muestreo, señalando las fallas geológicas y el perímetro del acuífero Los Planes.	29
Figura 8.2 Toma de muestras de aguas subterráneas por medio de bomba y muestreador Bailer	30
Figura 8.3 Esquema mostrando el proceso de obtención de las variables que serán analizadas: Cr total, Cr (VI) total, fases particulada y disuelta, y iones mayoritarios.	31
Figura 8.4 Procedimientos en campo para evitar contaminación externa.	32
Figura 8.5 Toma de parámetros fisicoquímicos por medio de sonda multiparamétrica.	32
Figura 8.6 Procesamiento de filtros por digestión con ácidos.	33
Figura 8.7 a) Microtitulador para método volumétrico b) Muestra por triplicado	35

señalando la presencia de bicarbonatos

Figura 9.1 Temperaturas (°C) en la zona de estudio (valle y sierra) durante la temporada de secas (abril/2016).	40
Figura 9.2 Temperaturas (°C) en la zona de estudio (valle y sierra) durante la temporada de lluvias cálidas (octubre/2016).	41
Figura 9.3 Temperaturas (°C) en la zona de estudio (valle y sierra) durante la temporada de lluvias frías (febrero/2017).	42
Figura 9.4 CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en la zona de estudio durante la temporada de secas (abril/2016).	43
Figura 9.5 CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en la zona de estudio durante la temporada de lluvias cálidas (octubre/2016).	44
Figura 9.6 CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en la zona de estudio durante la temporada de lluvias frías (febrero/2017).	44
Figura 9.7 Evolución en la distribución de la salinidad. A: 1977, B: 1994, C: 1197, D: 2003. Tomado de Comisión Nacional del Agua (2003).	45
Figura 9.8 pH en la zona de estudio durante la temporada de secas (abril/2016).	46
Figura 9.9 pH en la zona de estudio durante la temporada de lluvias frías (febrero/2017).	47
Figura 9.10 Diagrama Piper con las tres temporadas. Tipo de agua: cloruradas sódicas	48
Figura 9.11 Distribución geográfica de las concentraciones de Cr_T ($\mu\text{g}/\text{L}$), durante la temporada de secas (abril/2016).	50
Figura 9.12 Distribución geográfica de las concentraciones de Cr_T ($\mu\text{g}/\text{L}$) durante la temporada de lluvias cálidas (octubre/2016).	50
Figura 9.13 Distribución geográfica de las concentraciones de Cr_T ($\mu\text{g}/\text{L}$) durante la temporada de lluvias frías (febrero/2017).	51
Figura 9.14 Diagramas de caja y bigote para concentraciones de Cr_T en las tres temporadas, señalando en círculos negros las concentraciones anómalas en dos sitios: V8 - 206.36 $\mu\text{g}/\text{L}$ (secas) y V3 - 281.33 $\mu\text{g}/\text{L}$ (lluvias frías).	52
Figura 9.15 Promedios de las concentraciones de Cr_T , mostrando el aporte de cada especie ($\text{Cr}(\text{VI})_T$ y $\text{Cr}(\text{III})_T$) durante las tres temporadas. Se indican LMP de la NOM-	

127-SSA1-1994 (—) y US EPA (- -). ≡ Cr (VI) ∴ Cr (III).	54
Figura 9.16 Porcentaje de especiación durante las tres temporadas. Cr (III): ≡, Cr (VI): ∴	58
Figura 9.17 Gráfico de 3 dimensiones, señalando cada factor en un eje	60
Figura 9.18 Gráfico en 2 dimensiones, señalando en el eje X el Factor 1 y en el eje Y el Factor 2.	61
Figura 9.19 Gráfico en 2 dimensiones, señalando en el eje X el Factor 2 y en el eje Y el Factor 3.	61

Índice de tablas

Contenido	Página
Tabla 1.1 Límites máximos permisibles ($\mu\text{g/L}$) para cromo en diferentes organizaciones.	7
Tabla 1.2 Iones mayoritarios dominantes en las aguas naturales.	12
Tabla 7.1 Información sobre la zona agrícola ubicada en el valle de SJP, B.C.S.	21
Tabla 7.2 Coordenadas que delimitan el perímetro del acuífero Los Planes (clave 0323).	22
Tabla 7.3 Información sobre los plaguicidas aplicados en San Juan de los Planes, B.C.S.	23
Tabla 7.4 Información sobre algunos de los fertilizantes aplicados en San Juan de los Planes, B.C.S.	24
Tabla 8.1 Especies de Cr y fases de las cuales se obtuvieron sus concentraciones.	34
Tabla 8.2 Información obtenida a partir de estándares y límites de detección y cuantificación de los iones mayoritarios.	38
Tabla 9.1 Comparación en las variables fisicoquímicas del sitio El Bajío (V21), entre Briseño (2014) y el estudio actual.	53
Tabla 9.2 Información sobre los 3 factores obtenidos en el análisis estadístico	59
Tabla 9.3 Valores de carga para cada factor, señalando en negritas los valores de carga superiores a 0.60.	59

Índice de anexos

Contenido	Página
Anexo 1. Información obtenida por la Comisión Nacional del Agua (2003), sobre la red de pozos en la cuenca de San Juan de los Planes.	72
Anexo 2. Claves de las estaciones de muestreo con sus coordenadas geográficas	73
Anexo 3. Temperaturas (°C) en las estaciones ubicadas en el valle de SJP y las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.	74
Anexo 4. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en las estaciones ubicadas en el valle de SJP y las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.	75
Anexo 5. Valores de pH en las estaciones ubicadas en el valle de SJP y las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.	76
Anexo 6. Concentraciones (mg/L) de iones mayoritarios y sus balances iónicos (BI en %) en las aguas subterráneas del valle de SJP y las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.	77
Anexo 7. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{L}$) de Cr_D y Cr_P en las estaciones del valle de SJP y de las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.	79
Anexo 8. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{L}$) de Cr_T en las estaciones del valle de SJP y de las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.	80
Anexo 9. Coeficientes de partición de Cr_T en las estaciones del valle de SJP y de las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.	81
Anexo 10. Porcentajes (%) de $\text{Cr}(\text{VI})_\text{T}$ con respecto al Cr_T en las estaciones del valle de SJP y de las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.	82
Anexo 11. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{L}$) de $\text{Cr}(\text{VI})_\text{T}$ y $\text{Cr}(\text{VI})_\text{D}$. en las estaciones del valle de SJP y de las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.	83
Anexo 12. Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{L}$) de $\text{Cr}(\text{III})_\text{T}$ en las estaciones del valle de SJP y de las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.	84

RESUMEN

San Juan de los Planes, B.C.S., representa una comunidad agrícola y minera ubicada en el valle del acuífero Los Planes, en donde las aguas subterráneas son su principal fuente de abastecimiento para uso y consumo humano. Debido a sus actividades, la contaminación por Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) es latente; por esta razón, se decidió determinar las concentraciones y distribución espacial y temporal de Cr en las aguas subterráneas de la región, así como de sus especies más estables (III y VI) y compararlas con el límite máximo permitido establecido en la regulación mexicana (NOM-127-SSA1-1994).

Se realizaron tres muestreos de aguas subterráneas en abril/2016 (temporada de secas), octubre/2016 (lluvias cálidas) y febrero/2017 (lluvias frías). Se registraron valores *in situ* de parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH y conductividad), además de recolectar muestras de agua subterránea para determinar iones mayoritarios, Cr total (Cr_T) y sus especies químicas Cr (III) y Cr (VI). Las temperaturas promedio fueron de 33, 33 y 31 °C respectivamente para cada temporada, con máximos (38 °C) en sitios cercanos a la Falla El Sargento.

Por su parte, la conductividad presentó valores de 556 a 18,800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, destacándose el sitio Agua Amarga por elevadas conductividades (16,450 a 18,800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) que evidencian una intrusión salina provocada por la sobreexplotación del acuífero. Además, los valores de pH variaron de 6.9 a 8.7; y, de acuerdo con el diagrama de Piper, el tipo de agua en la zona es clorurada sódica, lo cual está relacionada a la intrusión salina existente. El Cr_T presentó un valor promedio sin diferencias significativas de 83.7 ± 45.2 , 71.9 ± 38.4 y 78.5 ± 53.6 $\mu\text{g}/\text{L}$, respectivamente para las temporadas de secas, lluvias cálidas y lluvias frías. Los coeficientes de partición (K_D) de Cr variaron de 2.07 a 387.49 con mayor proporción de Cr en la fase particulada. En términos de especiación, el Cr (III) fue en especie dominante en las muestras (68 a 99%). El Cr (VI) presentó una relación inversa con Cr_T ; lo que indica que las condiciones ambientales favorecen que al incrementarse el aporte de Cr_T a las aguas subterráneas, el Cr trivalente sea cada vez más dominante, incrementando el porcentaje de Cr (III) y disminuyendo el de Cr (VI).

Finalmente, en el 72% de las muestras analizadas, las concentraciones de Cr_T superaron el límite máximo permisible (50 $\mu\text{g}/\text{L}$); no obstante, la especie dominante fue el Cr (III) y los valores de Cr (VI), especie más tóxica, no superaron dicho límite. Por lo tanto, las concentraciones de cromo obtenidas podrían no representar un peligro para la salud humana; sin embargo, debe considerarse

que el agua potable se encuentra en contacto con el oxígeno, lo que propicia un ambiente oxidante en donde las concentraciones de Cr (VI) podrían aumentar.

ABSTRACT

San Juan de los Planes, B.C.S., is an agricultural and mining community located in Los Planes Aquifer valley, a place where groundwater is the main water source for human consume. Because of its activities, there is a risk of metal pollution in the zone; for this reason, it was decided to quantify the contamination and to determine the spatial and temporal distribution of chromium and its most important species (III and VI), in the regional groundwater, as well as, to compare them with the maximum limit allowed in the Mexican regulation (NOM-127-SSA1-1994).

Groundwater was sampled on April/2016 (dry season), October/2016 (warm rainy season) and February/2017 (cold rainy season). The physicochemical parameters (temperature, pH and conductivity) were recorded *in situ*, besides, water samples for metals and major ions analysis were taken. The average groundwater temperature values were 33, 33 and 31 °C for each season, and the highest value (38 °C approximately) was found close to El Sargento fault.

The electrical conductivity showed values of 556 to 18800 $\mu\text{S}/\text{cm}$; with the exception of the "Agua Amarga" site (16450 to 18800 $\mu\text{S}/\text{cm}$), where the saline intrusion caused by the overexploitation of the aquifer generates an increment in the conductivity values. We found pH values of 6.9 to 8.7 in the zone and, according to the Piper diagram, the water corresponds to the sodium chloride type, which could be as result of the saline intrusion on the zone. The means of total chromium concentrations (Cr_T) were 83.7 ± 45.2 , 71.9 ± 38.4 y 78.5 ± 53.6 $\mu\text{g}/\text{L}$ for dry, warm rainy and cold rainy season, respectively, with no statistically significant differences among them. Partitioning coefficients of Cr (K_D) were determined (2.07 a 387.49) showing Cr is mainly linked to the particulate phase. In terms of speciation, Cr (III) was the dominant specie (68 a 99%). The Cr (VI) is inversely correlated to Cr_T , which means that the environment conditions favor that when an increase of Cr_T happen, the Cr (III) dominance will enhance, increasing Cr (III) percent and decreasing Cr (VI) percent.

Finally, 72% of analyzed samples were above the maximum contaminant level (MCL) of 50 $\mu\text{g}/\text{L}$ for total chromium. The dominant specie was Cr (III), and the Cr (VI) concentrations (most toxic specie), were below the MCL. Therefore, chromium concentrations in San Juan de los Planes might not represent a hazard to human health, however, should be consider that the contact of drinking water with oxygen could create an oxidant environment where Cr (VI) values can increase.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Aguas Subterráneas

Las aguas subterráneas representan una de las fuentes principales de abastecimiento en diferentes partes del mundo; en particular, en comunidades con climas desérticos donde dependiendo del propósito con que se utilice, representarán gastos menores al emplearse en actividades domésticas o gastos mayores al ser necesitados en diferentes industrias. (Pérez *et al.*, 2016). En el caso particular de la industria agrícola, el uso excesivo de agroquímicos propicia la contaminación de aguas subterráneas; aunque, algunos de los compuestos agroquímicos tienden a ser retenidos en los suelos.

Esta retención depende de las características de los agroquímicos (solubilidad, volatilidad, composición química), el flujo del agua dentro de la zona no saturada, que está regido por fuerzas de adhesión-atracción (Tindall y Kunkel, 1999; Candela, 2003), y a la capacidad de sorción-desorción del suelo. Respecto a esto Calvet (1989) señala que los constituyentes con mayor capacidad de sorción son la materia orgánica y los compuestos minerales. De igual forma, las raíces de algunos sembradíos son capaces de ralentizar la infiltración de estos agroquímicos hacia las aguas subterráneas (Zayed *et al.*, 1998).

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2017), en México se reciben anualmente alrededor de 1 449 471 millones de metros cúbicos de agua como precipitaciones, del cual 72.2% se evapotranspira, 21.5% escurre por ríos y/o arroyos y el 6.3% se infiltra al subsuelo para formar parte de las aguas subterráneas.

La presencia de aguas subterráneas es posible gracias a las formaciones geológicas con capacidad de almacenar cantidades importantes de agua y que se denominan acuíferos, que pueden encontrarse seccionados por barreras con diferente composición litológica conocidas como acuitardos y acuicludos.

Los acuitardos se refieren a formaciones poco permeables que transmiten el agua subterránea muy lentamente hacia niveles inferiores, por el contrario, los acuicludos no permiten el flujo del agua contenida en ellos (Harter, 2003). Esta permeabilidad, así como las diferentes presiones a las que se

ven sometidos los acuíferos, nos brindan las bases para clasificarlos como acuíferos libres, confinados y semiconfinados (Sánchez, 2017).

En la figura 1.1 se puede apreciar que un acuífero libre mantiene una superficie en contacto con el aire además de encontrarse a presión atmosférica, mientras que los acuíferos confinados y semiconfinados presentan presiones superiores a 1 atm.

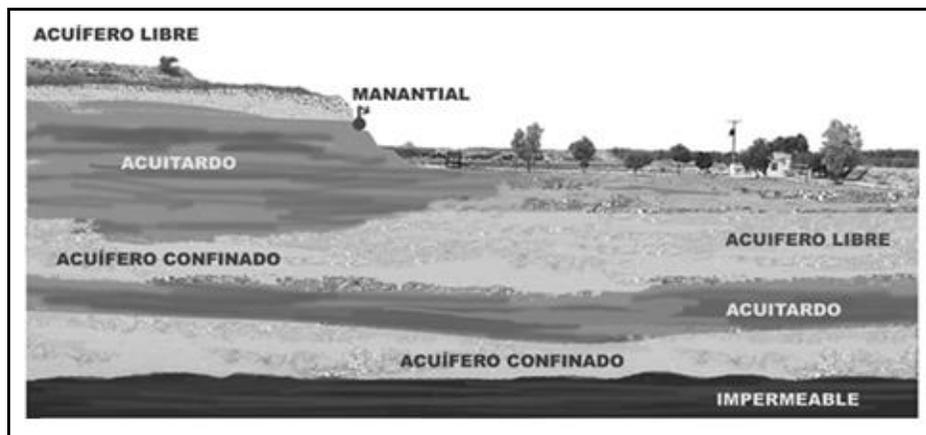


Figura 1.1 Corte transversal de acuíferos y sus barreras naturales (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2008).

La recarga de los acuíferos, y en particular de los acuíferos libres, se origina por agua proveniente de las precipitaciones, en donde el volumen de agua almacenada en los acuíferos dependerá del porcentaje que no se perdió durante los procesos de evaporación, transpiración y escorrentía (Del Valle y García, 2005; Mollema y Antonellini, 2013).

Al presentarse las precipitaciones sobre un terreno seco, el agua es retenida en la superficie y en los espacios intersticiales del suelo, formando un cinturón de humedad (Fig. 1.2). En el siguiente nivel inferior, las partículas del suelo se cubren con películas de agua, pero el aire aún está presente en los grandes poros vacíos del suelo, por lo que a esta región se le conoce como zona insaturada o zona de aeración y al agua presente como agua vadosa. A mayores profundidades, todos los vacíos se llenan para producir una zona de saturación en el que al nivel superior se le denomina nivel freático y al agua como agua subterránea (Winter *et al.*, 1999; Manahan, 2011).

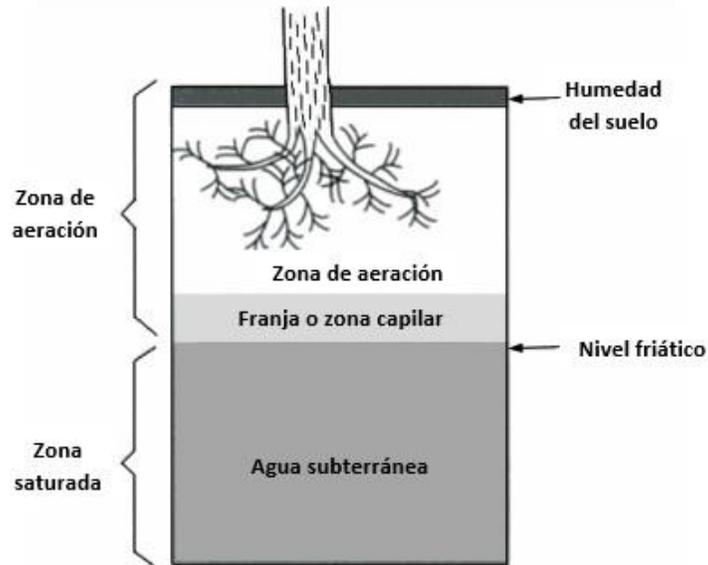


Figura 1.2 Distribución del agua en el subsuelo (Manahan, 2011).

Los diferentes procesos geoquímicos y la composición hidroquímica de las aguas subterráneas dependen del comportamiento que presenten, existiendo desde aquellos con velocidad lenta en sus flujos y largo tiempo de residencia, hasta los de velocidad elevada y escaso tiempo de residencia, en el que se incluyen algunos tipos de acuíferos kársticos (Kiryaly *et al.*, 1995; Motyka, 1998; Mook, 2002).

La calidad del agua subterránea puede ser afectada por diversas actividades humanas, entre ellas la explotación y recuperación de metales con interés económico, en donde puede llevarse a cabo la liberación de elementos con un alto potencial de toxicidad; asimismo, pueden encontrarse en el medio concentraciones elevadas de estos elementos por procesos naturales de disolución en las rocas circundantes (Posada-Ayala, 2011).

Algunas de las principales fuentes antropogénicas de metales son resultado de procesos industriales, como la minería, la metalurgia y la agricultura, y de los desechos domésticos (Delgado-Rodríguez, 2012; Herrera *et al.*, 2013). Además, la condición fisicoquímica en que se encuentren estos elementos en el ambiente dependerá de las variables ambientales por las que sean afectados, como las condiciones redox, el pH, la temperatura y la conductividad.

En las aguas subterráneas, la disponibilidad de metales depende en gran parte de la composición geológica del acuífero; respecto a esto López et al. (2001) señala que en acuíferos constituidos principalmente por arenas finas y limos un gran porcentaje de metales serán adsorbidos y su disponibilidad en el agua subterránea será menor, al igual que ocurre en presencia de ácidos húmicos y arcillas orgánicas.

1.2 Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)

Los elementos pueden clasificarse como esenciales y no esenciales, dependiendo si son requeridos o no para el buen funcionamiento de los seres vivos; ambas clases, a elevadas concentraciones llegan a ser tóxicas en los organismos.

Los elementos metálicos con gran potencial en causar efectos negativos en los organismos de cualquier ecosistema se agrupan en el término: elementos potencialmente tóxicos (EPT); referente a esto, Martínez-Colón *et al.* (2009) señala que el término “metales pesados” es también ampliamente empleado para referirse a dichos elementos, sin embargo, excluye otros como los metaloides. Por esta razón en el presente estudio nos referiremos como EPT.

La fuente natural más importante de EPT es el vulcanismo (representa el 80 %), que aporta estos elementos directamente hacia la atmósfera o por corrientes de lava que posteriormente forman las rocas y suelos de la corteza continental; estos elementos metálicos se encuentran dentro de las estructuras cristalinas de muchos minerales donde procesos como el intemperismo y la erosión pueden liberarlos en forma disuelta o particulada hacia el medio ambiente. El 20% restante se refiere a los incendios forestales y las fuentes biogénicas (Nriagu, 1990), no obstante, una gran parte de la presencia de elementos potencialmente tóxicos en el agua subterránea es antropogénica como se explicará a continuación.

Al término de la Segunda Guerra Mundial, la mayoría de los países industrializados tuvieron un desarrollo económico acelerado estimulado por la población en crecimiento, la avanzada tecnología y el rápido incremento en el consumo de energía, con lo cual se vio aumentada de forma significativa la generación de residuos provocando la introducción excesiva de compuestos químicos xenobióticos, así como la reubicación masiva de ellos en los diferentes ecosistemas. Estos

acontecimientos, de acuerdo con Casares (2012), con frecuencia pueden abatir la resiliencia de los cuerpos receptores y generar la acumulación de contaminantes a niveles problemáticos.

Dentro de los contaminantes, los EPT adquirieron mayor importancia en los últimos 50 años debido a que presentan características preocupantes como su prolongada persistencia en el medio ambiente y el no ser biodegradables, por lo que resultan de gran relevancia en los sectores económicos y de salud pública (Sabath y Ludivina, 2012).

Muchos de los EPT son esenciales para los seres vivos. Sin embargo, también pueden presentar efectos tóxicos sobre las células, entre los que destacan la alteración o desnaturalización de las proteínas (Cañizares, 2000). De acuerdo con Vullo (2003), para que estos contaminantes puedan ejercer su toxicidad sobre un ser vivo deben encontrarse biodisponibles, lo cual se encuentra íntimamente relacionado con las condiciones fisicoquímicas de su entorno que determinan su especiación.

Algunos de los mecanismos moleculares que permiten determinar la toxicidad de los EPT son: i) el desplazamiento de iones metálicos esenciales de biomoléculas, ii) el bloqueo de sus grupos funcionales y iii) la modificación de la conformación activa de biomoléculas como las enzimas y los polinucleótidos (Cañizares, 2000).

Tchounwou *et al.* (2012) señalaron que existe un grupo de EPT prioritarios que representan un riesgo para la salud pública al ser capaces de inducir múltiples daños a los órganos inclusive a niveles bajos de exposición, entre ellos se incluyen al cromo, arsénico, cadmio, plomo y mercurio. Como tema principal de este trabajo, se enfocará exclusivamente al cromo como elemento potencialmente tóxico.

1.3 Cromo

El cromo, es un EPT que se encuentra distribuido en el medio ambiente en animales, plantas, suelos, polvos volcánicos y gases (Chávez, 2010). Este elemento pertenece a la primera serie de metales de transición, lo que le otorga la característica de presentar varios estados de oxidación: -2, 0, +2, +3 y +6, teniendo como especies más estables al cromo trivalente (Cr III) y cromo hexavalente (Cr VI) (Albert, 2002). En general, la movilidad, y por lo tanto, la distribución del cromo en el medio ambiente es controlada por reacciones de: oxidación-reducción, precipitación-disolución y absorción-

desorción. Debido a esto resulta más común su presencia en suelos, sedimentos y cuerpos acuáticos que en la atmósfera (Shanker *et al.*, 2005).

El cromo se presenta en concentraciones mayores en las rocas básicas, de donde es extraído para su empleo en diversas actividades industriales (Chávez, 2010). De acuerdo con Saracino y Phipps (2008), la abundancia promedio de cromo de origen natural es de aproximadamente 20 µg/g en rocas ígneas graníticas, 120 µg/g en esquistos y arcillas y 1 800 µg/g en rocas ígneas ultramáficas, con una concentración media en la corteza continental de 125 µg/g.

En el caso particular de las aguas naturales, los niveles de pH neutro que las caracterizan impiden la presencia de grandes concentraciones de Cr (III) ya que tiende a precipitarse como hidróxidos (Cr (OH)₃). Por el contrario, es común que predomine el Cr (VI) en aguas superficiales debido a sus condiciones oxidantes (Matteoda *et al.*, 2009).

En nuestro país, la concentración permitida de Cr total en las aguas para uso y consumo humano es de 50 µg/L según la NOM-127-SSA1-1994. Dentro de dicha norma no se señala una diferencia entre las diferentes especies del cromo debido a que este elemento puede modificarse de una especie química a otra a lo largo de un trayecto en que se presenten diversas características fisicoquímicas que alteren su especiación química; por lo que se prefiere prevenir el peor de los escenarios y asumir que el total del cromo presente se encuentra en su forma hexavalente.

En la tabla 1.1 se muestran los límites máximos permisibles (LMP) para cromo total establecidos por distintas organizaciones alrededor del mundo, en donde se aprecia que la mayoría concuerda en un valor de 50 µg/L para evitar riesgos en la salud humana, con excepción de la Environmental Protection Agency (2018) en E.U.A. que señala 100 µg/L, no obstante, el estado de California estableció un límite para la especie hexavalente de Cr de 10 µg/L, debido a la preocupación por ser carcinogénico (California Water Boards, 2019).

Tabla 1.1 Límites máximos permisibles ($\mu\text{g/L}$) para cromo en diferentes organizaciones.

País	Norma/Organización	LMP	
		Cr Total	Cr (VI)
México	NMX-127-SSA1-1994	50	NE
Mundial	WHO (2011)	50	NE
Estados Unidos de América	US EPA (2018)	100	NE
California, EUA	California Water Boards (2019)	50	10
India	Indian Standards (2012)	50	NE

Nota: NE= No Establecido

1.4 Cr (III) y Cr (VI): especies más estables

El cromo hexavalente o Cr (VI), es el segundo estado de oxidación más estable de este elemento, siendo el Cr (III) el primero. El Cr (VI) representa la forma más tóxica por ser mutagénico y carcinogénico (IARC, 2012), además de generar otros problemas en la salud como úlceras, anemia, daños en el sistema reproductivo masculino y necrosis (ATSDR, 2012). Azario *et al.* (2010) señalan que en presencia de materia orgánica el cromo hexavalente puede ser reducido a su especie trivalente, la cual es una forma menos tóxica; sin embargo, niveles elevados de Cr (VI) pueden superar la capacidad reductora del ambiente y persistir como contaminante.

Asimismo, es posible encontrar en solución al Cr (VI) en sus diferentes formas: hidrocromato, cromato y dicromato, lo que dependerá del pH en que se encuentre. En pH básico y neutro, predomina el cromato; en un intervalo de pH de 6 a 6.2 se encuentra el hidrocromato y en pH más ácidos, se presenta el dicromato (Environmental Protection Agency, 1998).

El cromo trivalente, por el contrario, es un nutriente esencial para los humanos que participa como cofactor en la iniciación de la acción periférica de la insulina, ayudando a metabolizar la glucosa; además de desempeñar un papel importante en diferentes reacciones enzimáticas (Langard y Norseth, 1979). De igual manera, este elemento colabora en el crecimiento y reproducción de otros seres vivos, particularmente los mamíferos; no obstante, el exceso en su ingesta puede causar problemas en la salud como erupciones cutáneas (Roig, 2006).

Tchounwou *et al.* (2012) indican que una posible razón por la que el Cr (VI) resulta más dañino, es debido a su fácil acceso a través de las membranas celulares, en contraste con el Cr (III), que difícilmente es absorbido por cualquier ruta metabólica.

Ambas especies presentan diferentes solubilidades. Por una parte, el Cr (III) desarrolla compuestos de baja solubilidad en el agua y, por el contrario, el Cr (VI) puede llegar a formar compuestos muy solubles. Sin embargo, en ambientes reductores, así como en presencia de materia orgánica o agentes reductores como el Fe (II) regresa a su especie trivalente (Gohua *et al.*, 2001).

El comportamiento del cromo dentro de las aguas subterráneas puede comprenderse por medio de un diagrama de Pourbaix también conocido como diagrama Eh-pH (Fig. 1.3), en el que se aprecia que el Cr (VI) predomina bajo ambientes oxidantes, mientras que el Cr (III) predomina bajo ambientes reductores. Por lo general, se presentan condiciones oxidantes en acuíferos poco profundos, donde el oxígeno puede ser constantemente remplazado por el que se presenta en la atmósfera; en contraste, a los acuíferos de mayor profundidad que al encontrarse aislados de la atmósfera, no les es posible la renovación del oxígeno, generándose así ambientes reductores (Nriagu y Nieboer, 1988).

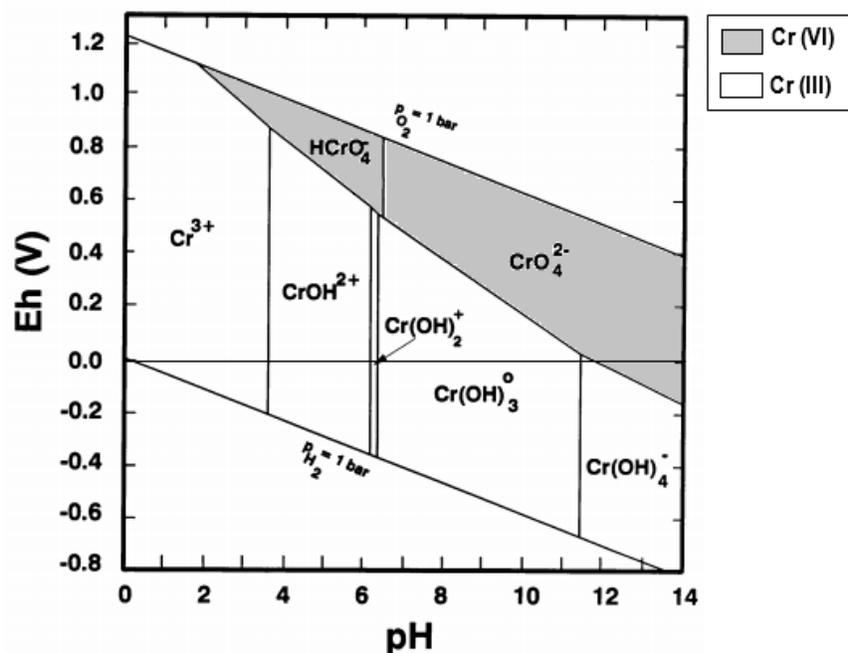


Figura 1.3 Diagrama Eh-pH para las especies de cromo en un sistema acuoso (Palmer y Wittbrodt, 1991).

Asimismo, dentro de los ambientes acuáticos los metales como el cromo pueden encontrarse a su vez, formando parte de material particulado o en completa disolución, a esto se le conoce como

fase particulada y disuelta, respectivamente, y son relevantes debido a la información que nos otorgan sobre el comportamiento y efecto de estos elementos. De acuerdo con Grassi *et al.* (2000) uno de los mecanismos que determinan las concentraciones de metales disponibles en el acuífero es la adsorción; por otra parte, la especie dominante depende de los niveles de pH así como las condiciones oxidantes o reductoras (Eh) que se presenten (Manahan, 2011).

De acuerdo con Grassi *et al.* (2000), los mecanismos que controlan las concentraciones presentes en ambas fases son la precipitación, el intercambio iónico y la adsorción.

1.5 Iones Mayoritarios

Dentro de las aguas subterráneas podemos encontrar diversos constituyentes, por ejemplo, la presencia de iones mayoritarios, debido en gran parte a su elevado poder como disolvente en el que la interacción con el suelo, la zona no saturada y las características particulares del acuífero definirán su contenido de sustancias disueltas, esencialmente en forma iónica (Morell & Hernández, 2000).

Según López (2000), estos iones disueltos pueden clasificarse con base en su abundancia, existiendo iones mayoritarios, minoritarios y traza. Los mayoritarios nos permiten conocer las principales propiedades químicas de las aguas, así como una primera noción de su calidad; mientras que los minoritarios y trazas nos ayudan, por ejemplo, a identificar posibles contaminaciones en las zonas. En este apartado nos enfocaremos en los iones mayoritarios.

Los iones mayoritarios están constituidos por iones con carga positiva (cationes) y carga negativa (aniones), los cuales son: Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} y NO_3^- . Estos son analizados por técnicas analíticas convencionales (p. ej., volumetría) o por el empleo de la cromatografía para obtener sus respectivas concentraciones (Appelo y Postma, 2005).

Después de haberse obtenido las concentraciones, una representación gráfica de los resultados nos permite sintetizar la información obtenida y generar clasificaciones que faciliten la comprensión de las aguas subterráneas, además de señalar posibles anomalías que podrían pasar desapercibidas de otra forma (Martínez y Ruano, 1998).

En este sentido, Pulido (2014) señala que existen cuatro grandes grupos de diagramas que pueden utilizarse: diagramas columnares y verticales, circulares, radiales y poligonales. Dentro de estos grupos, los más empleados en la práctica son los diagramas poligonales de Piper y Stiff y el diagrama vertical de Schoeller-Berkaloff.

En el caso particular del diagrama de Piper, el cual nos muestra porcentajes de meq/L, sin tener las concentraciones absolutas de los iones, Casas *et al.* (2017) nos explican que consta de dos triángulos separados, en donde, el izquierdo representa los cationes y el derecho los aniones de cada muestra, los cuales se representan por puntos que son proyectados en un rombo superior permitiéndonos conocer el tipo de agua al que pertenecen las muestras (Fig. 1.4).

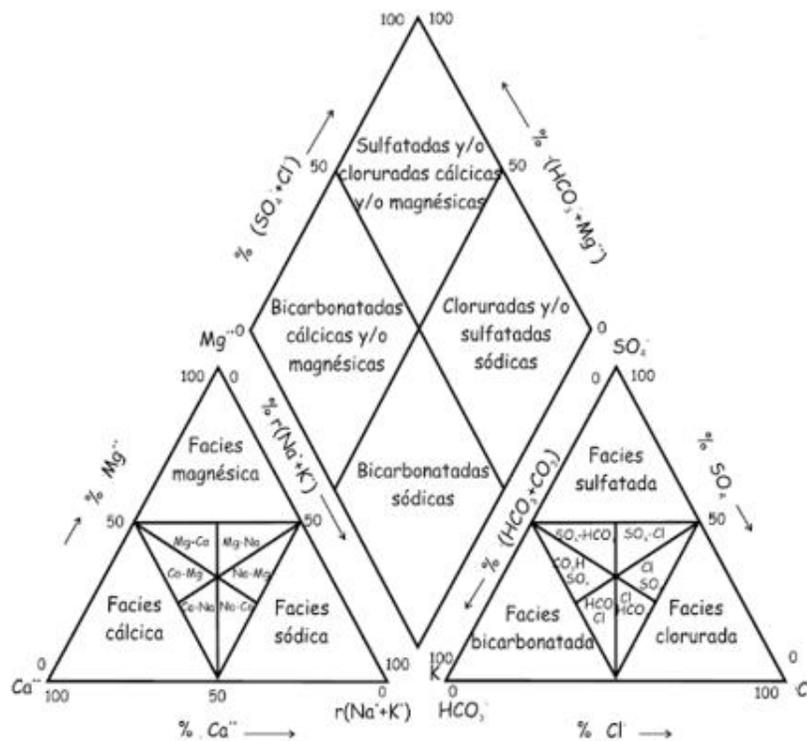


Figura 1.4 Diagrama de Piper (Pulido, 2014).

En contraste, el diagrama de Stiff (Fig. 1.5) se refiere a cuatro líneas paralelas cortadas entre sí por una línea vertical, dividiéndolas en dos áreas en el que la parte izquierda se reserva para los cationes y la derecha para los aniones. Además, sobre cada recta se indican las concentraciones en meq/L, las cuales son unidas por un poligonal (Fernández, 2008).

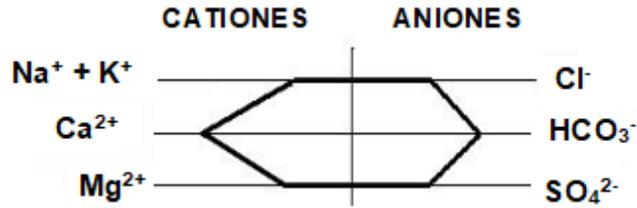


Figura 1.5 Diagrama de Stiff (Pulido, 2014).

Por último, el diagrama de Schoeller-Berkaloff es descrito por Fernández (2008) como un diagrama semilogarítmico, en donde el eje de abscisas muestra de forma sucesiva los iones y el eje de ordenadas señala según una escala logarítmica la cantidad de mg/L de cada ion y su equivalencia en meq/L, representada a ambos márgenes del diagrama. Los puntos obtenidos son unidos por líneas y nos permiten visualizar concentraciones exactas, así como la relación entre dos elementos por la inclinación de las rectas (Fig. 1.6).

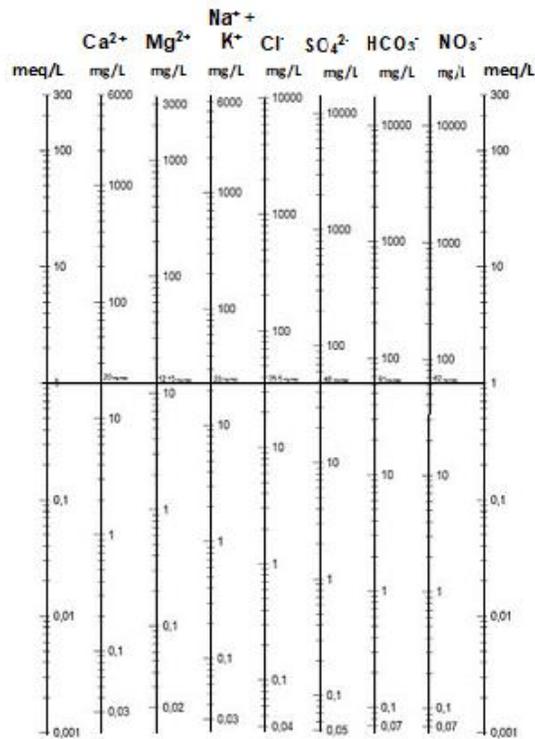


Figura 1.6 Diagrama Schoeller-Berkaloff (Fernández, 2008).

Al obtener la representación gráfica de los resultados, la forma adecuada para nombrar el tipo de agua representativa comienza con el nombre del anión que sobrepasa el 50% del total de aniones y a continuación se menciona al catión que sobrepase el 50%; en el caso de no superarse dicho porcentaje en alguno de estos, se nombra a los dos iones más abundantes (Martínez y Ruano, 1998). Con lo anterior, es posible clasificar a las aguas con base a la composición de iones mayoritarios, tal como se muestra en el rombo del diagrama Piper en la figura 1.4.

El tipo de agua en una zona dependerá entre otras cosas de las características fisicoquímicas particulares que se presenten; no obstante, de manera general es posible establecer los iones dominantes dentro de las diferentes aguas naturales, lo cual se muestra en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Iones mayoritarios dominantes en las aguas naturales.

Aguas Naturales	Cationes	Aniones
Mar	$\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$
Subterránea	$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$
Fluvial	$\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$
Lacustre	$\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$

(Doménech, 2000; Orozco *et al.*, 2003).

2. ANTECEDENTES

2.1 Contaminación por cromo en aguas subterráneas

La calidad del agua para consumo humano se encuentra en un monitoreo constante del agua subterránea con la finalidad de conservar el bienestar en las comunidades. Moore (2010) señaló que la revisión de la calidad del agua debe extenderse más allá de los factores biológicos y parámetros fisicoquímicos, e incluir su contenido de elementos potencialmente tóxicos (EPT). En este sentido, se han realizado diversas investigaciones referentes al contenido de Cr total y/o Cr (VI) alrededor del mundo. Ejemplos de ello se presentan a continuación:

Robertson (1975) realizó un análisis enfocado en el aporte geogénico de cromo hexavalente para el Valle Paraíso ubicado en Arizona. La cuenca en que se ubica el valle está conformada por rocas metamórficas, ígneas, sedimentarias y depósitos aluviales. El método colorimétrico con difenilcarbazida utilizado, dio a conocer que las concentraciones de Cr (VI) eran superiores al límite permisible, con concentración máxima de 220 µg/L, y que los mayores niveles de esta especie se encontraban en los depósitos aluviales.

Kumar y Riyazuddin (2010) determinaron las concentraciones de Cr total y sus especies más estables (Cr (III) y Cr (VI)) en aguas subterráneas contaminadas por desechos de una fábrica de curtiembre en Chennai, Tamil Nadu, India. Los resultados para Cr total, obtenidos de 15 pozos, fueron superiores al límite permisible de 50 µg/L (WHO, 2011); respecto a su especiación, la concentración fue Cr (VI) > Cr (III), presentándose con un intervalo de 32.50 a 200.30 µg/L para Cr (VI) y un intervalo de 2.00 y 90.20 µg/L para Cr (III).

Por su parte, Sutton (2010), analizó en 35 ciudades de los Estados Unidos de América la presencia o ausencia de cromo hexavalente en los hogares, debido a sus características carcinogénicas y mutagénicas, concluyendo que 31 ciudades contenían el contaminante, aunque los valores no excedían el límite permisible.

La investigación realizada en Ghaziabad, India por Singh *et al.* (2013), tuvo como objetivo conocer el grado de contaminación en aguas subterráneas provocado por Cr (VI) en un área conformada por un gran número de industrias, entre las principales, el cromado de metales. Para su desarrollo

se escogieron 20 estaciones de muestreo en donde se empleó el método establecido por el Estándar Indio IS 3025 (Part 52): 2003, el cuál emplea un espectrofotómetro UV-Visible para la lectura de las absorbancias leídas a 540 nm. Los resultados obtenidos señalaron que existían concentraciones superiores en el noroeste del área de estudio, con una concentración máxima de 1,300 µg/L, superando el límite permisible de 50 µg/L señalado por la IS 10500 (2012).

Por otro lado, Mishra y Bhusan (2013) determinaron las concentraciones de cromo hexavalente en aguas superficiales y aguas subterráneas del valle de Sukinda, Odisha, India; en el que la actividad principal de la zona es la obtención de cromita por medio de la minería. Los resultados superaron el límite permisible de 50 µg/L en ambos casos, señalando niveles de 3,400 µg/L y 600 µg/L, respectivamente.

La presencia del cromo hexavalente en los acuíferos puede deberse a aportes geogénicos o antropogénicos; con referencia a esto Dermatas *et al.* (2017) realizaron un estudio en dos acuíferos ofiolíticos ubicados en las comunidades de Vergina e Inofyta, ubicadas al norte y centro de Grecia, respectivamente. La localidad de Vergina se caracteriza por presentar concentraciones geogénicas elevadas en cromo, mientras que Inofyta se destaca por ser una zona industrial grande. Los resultados mostraron concentraciones máximas de Cr (VI) de 64 µg/L para Vergina y de 10, 000 µg/L para Inofyta.

Kazakis *et al.* (2017) analizaron las concentraciones de Cr total y Cr (VI) en aguas subterráneas de la cuenca Sarigkiol en Kozani, Grecia, en donde se presentaban dos posibles fuentes de cromo, las rocas ofiolíticas y los residuos de una planta de energía abastecida por lignito. Los resultados mostraron un promedio de 59.9 µg/L para Cr total y de 56.4 µg/L para Cr (VI), con mínimos de 4 µg/L y 2.9 µg/L respectivamente; presentándose un máximo de 120 µg/L para Cr total, siendo en su totalidad de la especie hexavalente.

2.3 Estudios de cromo en México

En nuestro país, se han presentado también algunos casos de contaminación por cromo en aguas subterráneas. Un ejemplo de esto fue el trabajo realizado por Armienta *et al.* (1993), en donde se determinó la concentración de Cr total y Cr (VI) en aguas subterráneas ubicadas en el Valle de León, León, Guanajuato. Al sureste del área de estudio se ubica la empresa Química Central de

México S. A. de C.V. en donde el cromo y sus derivados se producen, y por el noreste se observan afloramientos de rocas ultramáficas. Los resultados mostraron que en la zona sureste existían concentraciones superiores al límite permisible de 50 µg/L (NOM-127-SSA1-1994), presentándose una concentración máxima de 50,000 µg/L de Cr total, en el cual el 100% se encontraba en su especie Cr (VI). Por el contrario, en la zona noreste y centro los resultados no superaron la norma al tener una concentración máxima de 40 µg/L de Cr (VI) en su totalidad.

Asimismo, Cruz (2009) investigó los niveles de Cr total y Cr (VI) en pozos cercanos a la empresa Cromatos de México S.A. de C.V. ubicada en Tultitlán, Estado de México, en donde durante 10 años se desarrollaron diversos compuestos de cromo para su venta comercial. El estudio incluyó un muestreo piloto y dos dirigidos. Las concentraciones de Cr (VI), determinadas con el método de colorimétrico usando difenilcarbazida, acorde con lo establecido en la NMX-AA-044-SCFI-2014, resultaron por debajo del límite de detección por lo que se optó por determinar Cr total, sin hacer distinción en sus diferentes especies, empleando la técnica de espectrofotometría de absorción atómica; con el análisis se concluyó que las concentraciones en la zona presentaban niveles inferiores al límite permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994, es decir, inferiores a 50 µg/L.

Dentro de San Juan de los Planes, B.C.S., Briseño (2014) realizó un estudio sobre la hidrogeoquímica de la zona, incluyendo muestras de la sierra San Antonio, así como del valle de Los Planes. Se determinaron in situ los parámetros de pH, temperatura, oxígeno disuelto, STD, profundidad y conductividad eléctrica; además, se analizaron las concentraciones de diversos EPT incluyendo el cromo, así como las concentraciones de iones mayoritarios. Las concentraciones para Cr total en el valle mostraron un mínimo de 739 µg/L y un máximo de 1,689 µg/L, por otro lado, en la sierra las concentraciones tuvieron un intervalo de 685 a 1,213 µg/L. Los resultados mostraron que 6 de 29 muestras colectadas superaron el límite máximo permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994, y las demás muestras se encontraron por debajo del límite de detección.

Por otro lado, la Comisión Nacional del Agua (2003) determinó las concentraciones de algunos EPT, incluyendo el Cr dentro del acuífero Los Planes, lugar donde se localiza San Juan de los Planes, incluyéndose sitios de muestreo ubicados en sierras y el valle del acuífero. Los resultados mostraron que las concentraciones de Cr fluctuaron de 0.89 a 50 µg/L. Además, se midieron las

variables fisicoquímicas de temperatura, pH, Eh, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, oxígeno disuelto, así como los iones mayoritarios. Por último, en dicho trabajo se destacó la presencia de áreas con intrusión salina en el acuífero.

3. JUSTIFICACIÓN

La contaminación derivada de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) ha sido el tema principal de diversos estudios debido a la capacidad de bioacumularse y biomagnificarse que presentan, así como a su persistencia en el medio ambiente. Una de las preocupaciones principales reside en los niveles de estos contaminantes en el agua para consumo humano, por esta razón, se han establecido límites permisibles que son constantemente monitoreados para verificar su cumplimiento.

Dependiendo de la especie presente en el ambiente (tri- o hexavalente), el cromo puede representar un riesgo a la salud humana y ambiental. La cantidad de investigaciones sobre la presencia de cromo y su especiación, en aguas subterráneas es inferior en comparación a los estudios enfocados en otros EPT. Dentro de la cuenca ubicada en el poblado de San Juan de los Planes se desarrollan actividades agrícolas, las cuales se abastecen de agua por medio de pozos. Esta zona se encuentra rodeada por sierras conformadas por esquistos y rocas graníticas, en las que diversos autores confirman la presencia de cromo en ellas (Saracino y Phipps, 2008; Dermatás *et al.*, 2016). Por tal motivo, se ha propuesto el presente estudio para conocer las concentraciones de Cr total, así como sus especies más estables (Cr III y Cr VI) en aguas subterráneas ubicadas en la zona costera de San Juan de los Planes, B.C.S., México, cercano a actividades agrícolas y mineras.

4. HIPÓTESIS

1. Considerando los altos niveles de solubilidad que caracterizan al cromo, principalmente en su especie hexavalente, que permite una mayor disponibilidad de este dentro del flujo de las aguas subterráneas, la existencia de agroquímicos conteniendo cromo y la presencia de rocas enriquecidas en este elemento dentro de la Cuenca Los Planes; se encontrarán las especies más estables (trivalente y hexavalente) de este elemento dentro de la zona de estudio.
2. La presencia de una especie dominante de cromo puede ser afectada por diferentes variables ambientales como el pH, que propicia que en un medio ácido sea más probable encontrar Cr (III) y en un medio de neutro a básico encontrar Cr (VI). Por lo anterior se sugiere que, dadas las características generales de las aguas subterráneas, habrá mayor concentración de Cr (VI).
3. Debido a los mayores arrastres de materiales provenientes de las sierras hacia el valle en San Juan de los Planes, así como un mayor volumen de infiltración en la zona durante la época de lluvias, se espera encontrar concentraciones de Cr total mayores en esta temporada que en la época de secas.

5. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Las preguntas de investigación que se esperan responder con el presente estudio son las siguientes:

- ¿Cuál es la distribución de Cr total en el agua subterránea de la zona costera asociada a actividad minera y agrícola en San Juan de los Planes, B. C. S.?
- ¿La mayor concentración de Cr total se encuentra en la fracción disuelta o la particulada?
- ¿La mayor concentración de Cr (VI) total se encuentra en la fracción disuelta o la particulada?
- ¿Cuál es la especie dominante (Cr III o Cr VI) dentro del área de estudio?
- ¿En qué época climática es mayor la concentración de Cr total y Cr (VI) total, así como las fracciones de cada uno?
- Además del pH, ¿Cuáles variables fisicoquímicas tienen mayor influencia en los niveles y distribución del Cr total y sus especies (III y VI) en el agua subterránea del área de estudio?
- ¿Los resultados obtenidos superan el límite permisible señalado por la NOM-127-SSA1-1994?

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo general

Determinar la distribución geográfica del Cr total, así como su comportamiento y el de sus especies III y VI en las aguas subterráneas ubicadas en la región costera del valle de San Juan de los Planes, B.C.S., México.

6.2 Objetivos específicos

- Analizar e identificar los pozos en que se presenten anomalías en el rango de concentraciones de Cr total.
- Determinar el coeficiente de partición de Cr total y el porcentaje de Cr (VI) total
- Calcular las concentraciones de Cr (III) por diferencia entre Cr y Cr (VI), y determinar la especie dominante.
- Analizar e identificar en que época climática se presentan las mayores concentraciones de Cr total y su especie Cr (VI) total, incluyendo sus fases.
- Identificar las variables fisicoquímicas que más afecten los niveles y especiación del cromo en las aguas subterráneas.
- Señalar si los resultados superan los límites permisibles establecidos por NOM-127-SSA1-1994.

7. ÁREA DE ESTUDIO

7.1 Ubicación

San Juan de los Planes (SJP), se localiza en Baja California Sur, 45 km al sureste de La Paz y sus coordenadas corresponden a los 24° 10' y 23° 40' Latitud Norte, con 109° 50.5' y 110° 07.5' Longitud Oeste (Flores y Del Rosal, 2002). Colinda con la Bahía de la Ventana y cuenta con 2,018 ha de superficie en las que es posible el desarrollo de actividades agrícolas, representando una importante contribución al abastecimiento de alimentos principalmente de La Paz, B.C.S (Gobierno del Estado de B.C.S., 2013).

La agricultura se ha llevado a cabo por más de cinco décadas en SJP, cosechando principalmente hortalizas. En la tabla 7.1 se muestra información obtenida durante las salidas a campo así como en documentos oficiales de gobierno, relacionada al desarrollo agrícola en San Juan de los Planes.

Tabla 7.1 Información sobre la zona agrícola ubicada en el valle de SJP, B.C.S.

Modalidad hídrica	Ciclos de producción	Cultivos agrícolas
Riego	Primavera- Verano Otoño-Invierno	Cebolla Maíz criollo Calabacita Pasto tapete

(Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2018).

De acuerdo con Del Rosal (2003), la cuenca tiene una superficie de 936.4 km² que ha permitido el desarrollo de la agricultura, sin embargo, el uso inadecuado del acuífero en la zona lo ha llevado actualmente a clasificarse como sobreexplotado, una disminución en los niveles estáticos en los pozos, la contaminación de las aguas subterráneas por los químicos empleados y la intrusión salina cercana al área costera.

El acuífero Los Planes (clave 0323), se ubica dentro de dicha cuenca y las coordenadas que definen su perímetro se aprecian en la tabla 7.2 Fue clasificado por la Comisión Nacional del Agua (2003) como tipo libre, encontrándose constituido principalmente por arenas no consolidadas de origen aluvial (Fig. 7.1). De igual forma, se destacó que su relleno sedimentario granular rebasa

en algunas partes los 200 m de espesor y que rocas sedimentarias marinas del Pleistoceno conforman su base, las cuales afloran en su parte noreste.

Tabla 7.2 Coordenadas que delimitan el perímetro del acuífero Los Planes (clave 0323).

Vértices	Longitud Oeste			Latitud Norte		
	Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos
1	109	53	51.3	24	2	10.4
2	109	53	26.7	24	0	16.4
3	109	51	41	23	58	58
4	109	51	43.2	23	56	7.5
5	109	51	17.1	23	50	35.5
6	109	52	10.9	23	49	14.4
7	109	50	47.6	23	47	17
8	109	55	48.2	23	45	33.4
9	109	56	5.9	23	43	39.7
10	109	57	3.7	23	43	5.1
11	109	56	56.4	23	41	57.3
12	109	59	49.5	23	39	54.8
13	110	2	1.7	23	42	45.9
14	110	3	44	23	44	47.1
15	110	5	53.4	23	52	57.9
16	110	7	50.9	24	2	13.8
17	110	5	15.1	24	3	40.9
18	110	5	3.3	24	5	8
19	110	7	40.1	24	5	41.7
20	110	8	12.3	24	9	44.9
21*	110	6	4.6	24	13	0.2
1*	109	53	51.3	24	2	10.4

Nota: 21* a 1* por línea de bajamar a lo largo de la costa. (Comisión Nacional del Agua, 2018).

Otra actividad en la zona que generó ingresos para los pobladores a partir de 1748 hasta 1993 fue la minería, la cual inició con la formación del distrito minero El Triunfo-San Antonio. Ambas sierras, San Antonio y El Triunfo, se localizan al sureste del valle de San Juan de los Planes, en donde se explotó principalmente oro, plata y platino. Actualmente se encuentran detenidas todas las operaciones relacionadas a dicha actividad; sin embargo, existen varios proyectos que buscan la reactivación de la minería en la zona (Servicio Geológico Mexicano, 2016).

Además de las sierras mencionadas, existen otras que definen la cuenca, como la Sierra La Gata localizada al este y la Sierra La Trinchera ubicada al oeste, las cuales forman parte del presente estudio junto con el valle de San Juan de los Planes.

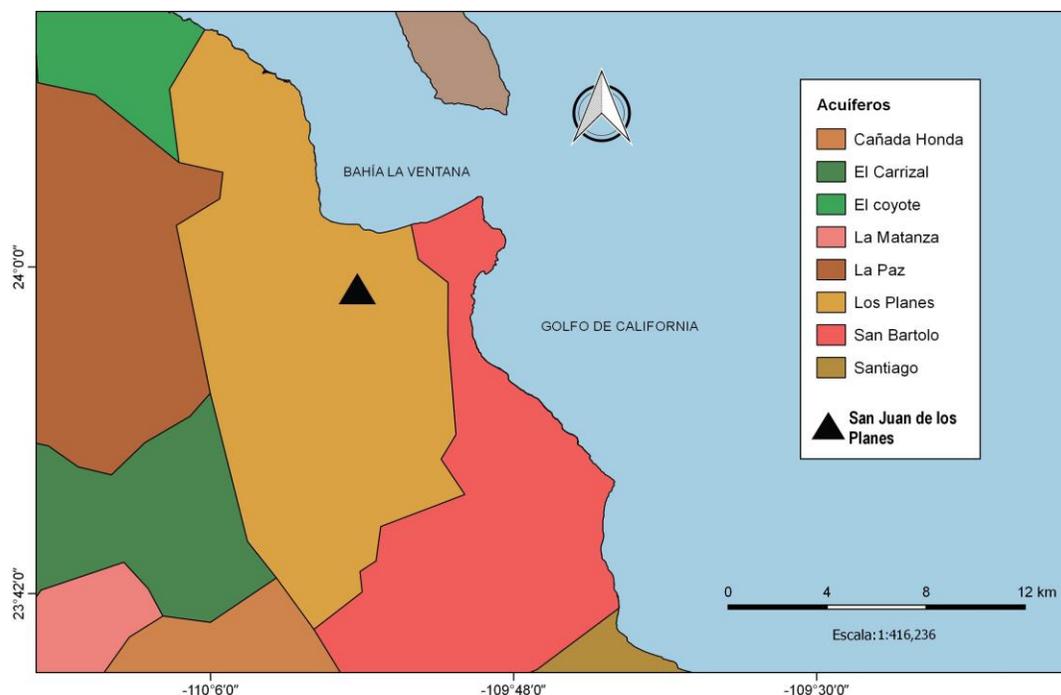


Figura 7.1 Acuífero Los Planes y acuíferos aledaños. Modificado de: Del Rosal (2003) y Comisión Nacional del Agua (2015).

7.2 Agroquímicos empleados en San Juan de los Planes

De acuerdo con la información recolectada de los trabajadores en los campos agrícolas, algunos de los plaguicidas y fertilizantes comúnmente empleados en la zona de estudio se muestran, junto con información sobre estos, en las tablas 7.3 y 7.4, respectivamente.

Tabla 7.3 Información sobre los plaguicidas aplicados en San Juan de los Planes, B.C.S.

Nombre común	Nombre comercial	Tipo	Clasificación química
Setoxidim	Poast	Herbicida	Ciclohexadiona
Acefate	Unifate Ultra 97 DF	Insecticida	Organofosforado
Fomesafen	Flex Técnico	Herbicida	Nitrobenzamida

(Diario Oficial de la Federación, 2014).

Tabla 7.4 Información sobre algunos de los fertilizantes aplicados en San Juan de los Planes, B.C.S.

Nombre comercial	Composición	Cantidad	Unidades
Triple 15	Fósforo	15	%
	Potasio	15	%
	Nitrógeno	15	%
	Cobre	230 a 300	ppm
	Hierro	975 a 1000	ppm
	Magnesio	300 a 320	ppm
	Zinc	700 a 710	ppm
	Boro	140 a 150	ppm
Urea	Nitrógeno	46	%
Triple17	Fósforo	17	%
	Potasio	17	%
	Nitrógeno	17	%
	Cobre	270 a 300	ppm
	Hierro	975 a 1000	ppm
	Magnesio	150 a 155	ppm
	Zinc	360 a 370	ppm
	Boro	140 a 150	ppm

(Fertilizantes GL, 2018).



Figura 7.2 Envases de agroquímicos utilizados en los campos agrícolas de SJP.

7.3 Climatología y precipitaciones

El clima dominante en la cuenca de San Juan de los Planes es del tipo: muy seco con lluvias escasas todo el año (Comisión Nacional del Agua, 2009). En la figura 7.3 se observa como los meses más lluviosos abarcan de julio a octubre (los cuales se caracterizan por lluvias torrenciales y frecuentes tormentas eléctricas), seguido de un segundo periodo de lluvias de menor intensidad en los meses de noviembre a febrero.

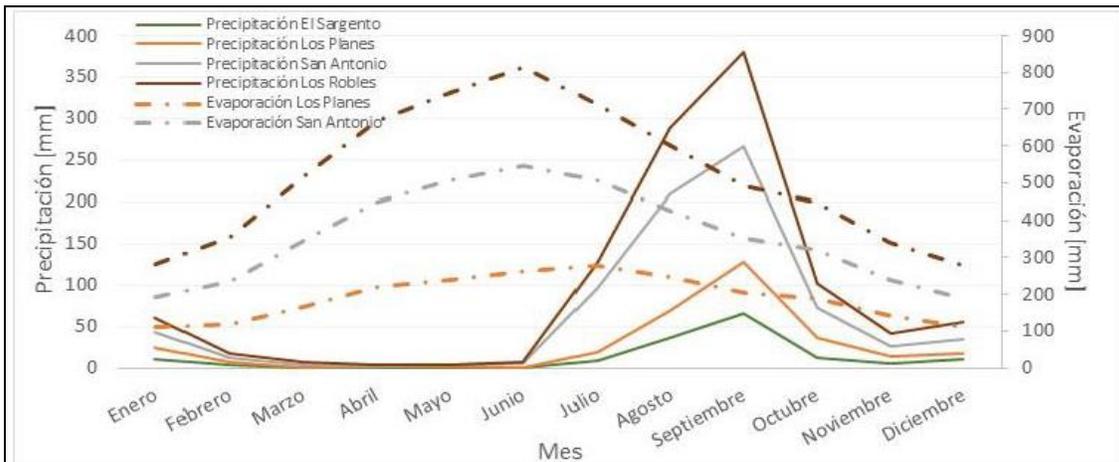


Figura 7.3 Gráfica de precipitación y evaporación promedio mensuales del periodo de 1971-2010 dentro de la cuenca (Servicio Meteorológico Nacional, 2010).

7.4 Geología

La cuenca se encuentra rodeada por diferentes sierras: La Salecita y San Antonio al suroeste, Las Cruces al noroeste, La Trinchera al oeste y La Gata al este. Ubicado en la Sierra de San Antonio se encuentra el distrito minero de San Antonio-El Triunfo, el cual comenzó sus actividades desde finales del siglo XVIII, obteniéndose principalmente oro, plata y platino (Carrillo y Drever, 1998; Servicio Geológico Minero, 2018).

La Cuenca de San Juan de los Planes (CSJP) es el resultado de la evolución tectónica y corresponde a una depresión alargada la cual es a su vez una consecuencia del proceso de apertura del Golfo de California. Dentro de la CSJP en la zona oeste, se localiza la Falla San Juan

de los Planes, con una longitud de 40 km; existen además otras fallas en la cuenca: Falla El Sargento (FES), Falla Agua Caliente (FAC), Falla El Tecuán (FET) y el Sistema de Fallas Escalonadas La Gata (FSLG), las cuales se pueden apreciar en la figura 7.4. (Flores y Del Rosal, 2002).

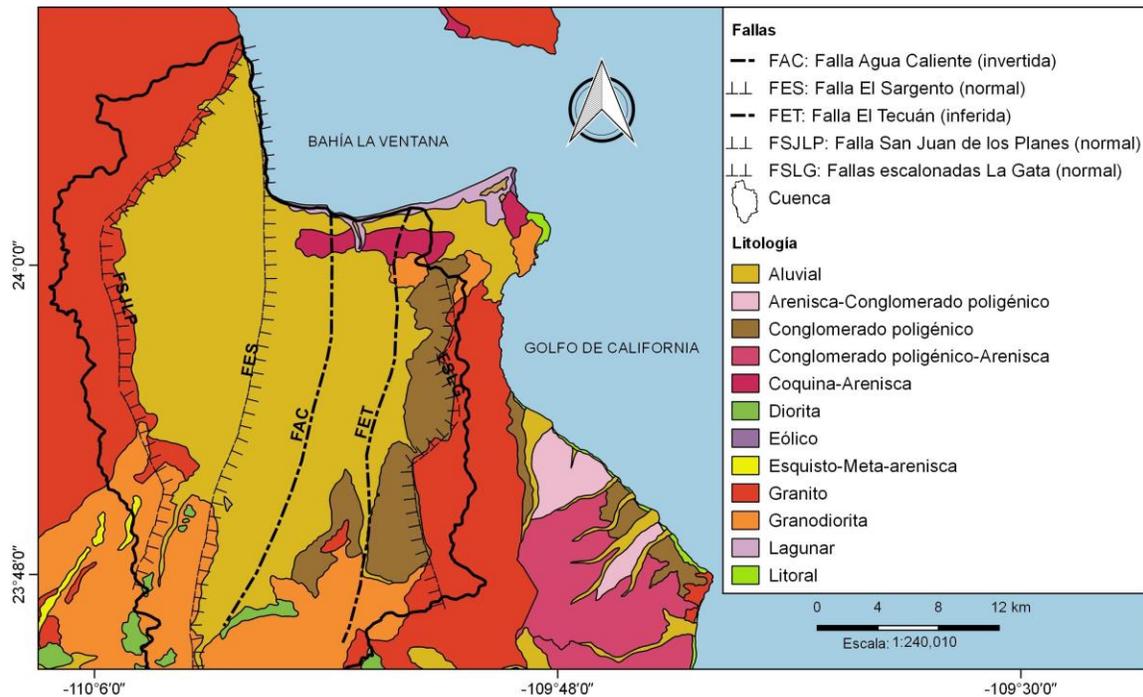


Figura 7.4 Fallas y litología en el área de estudio y alrededores. Modificado de: Consejo de Recursos Minerales (1999) y Del Rosal (2003).

7.4.1 Litología

San Juan de los Planes pertenece a la provincia geológica del Bloque de los Cabos, el cual se compone de un macizo batolítico de granito y granodiorita del cretácico que intrusionan rocas metamórficas del Mesozoico (Schaaf *et al.*, 2000). La zona de planicie está conformada por la acumulación de sedimentos que tienen su origen en la erosión de las sierras que lo rodean: Las Cruces, La Trinchera, La Gata, San Antonio y La Salecita.

Las sierras de Las Cruces y La Trinchera se encuentran conformadas por rocas intrusivas graníticas y granodioríticas del cretácico, además, se presentan gneises cuarzofeldespáticos como resultado

del metamorfismo de rocas ígneas intrusivas. Por otra parte, la sierra La Salecita es una asociación de granodiorota-tonalita, los cuales también se encuentran presentes en la sierra San Antonio en donde se presentan granodioritas, granitos y metasedimentos, así como diques de tonalita, cuarzdiorita, cuarzomonzonita, gabro, andesita y riolitas. Finalmente, en la sierra La Gata se observan metasedimentos provenientes de lutitas, areniscas y calizas impuras, al igual que dioritas, granodioritas y tonalitas del cretácico (Pérez-Briceño, 2009; Posada-Ayala, 2011).

7.4.2 Mineralogía

En el área suroccidental de la cuenca se encuentran tres sistemas de vetas mineralizadas principales que se han explotado desde finales del siglo XVIII: El Triunfo, conformado por 13 vetas mayores y diversos sistemas secundarios en diorita, esquisto y gneis; Reforma-Testera con 14 vetas en diorita, granodiorita, cuarzdiorita, esquisto y gneis, y finalmente en San Antonio se presentan 10 vetas con rocas metamórficas y en contactos de rocas metamórficas e ígneas. Por otra parte, en la sierra La Trinchera, ubicada al suroeste de la cuenca, se puede encontrar principalmente oro libre, pirita y arsenopirita (Servicio Geológico Mexicano, 1996).

7.5 Hidrogeología

La recarga natural del acuífero Los Planes se debe principalmente a la infiltración del agua de lluvia en la zona del valle y los depósitos aluviales de pie de monte, así como a los escurrimientos superficiales y un flujo subterráneo horizontal en la zona de pie de monte. Según la Comisión Nacional del Agua (2003), el flujo de agua subterránea dentro del acuífero presenta una tendencia de suroeste a noreste, con dirección hacia la Bahía La Ventana; no obstante, la sobre-explotación del acuífero por el empleo de pozos ha ocasionado una inversión en el gradiente hidráulico en la zona, permitiendo la intrusión de agua de mar en el acuífero.

Lo anterior se puede ver representado en el mapa de la figura 7.5, en donde las líneas isopiezométricas en color verde señalan los niveles estáticos menores al nivel del mar y en color rojo las que se encuentran por encima del nivel del mar. Además, se observa que la zona con mayor inversión en el gradiente hidráulico se presenta en el noreste, así como una desviación del flujo subterráneo hacia el interior de San Juan de los Planes, en lugar de descargar hacia el mar en Bahía de la Ventana.

Por otra parte, Pérez-Briseño (2009) ha destacado que existen tres zonas permeables dentro de la cuenca con diferente grado de permeabilidad entre estas. La zona de permeabilidad alta se localiza en los depósitos al pie de las sierras, la zona de permeabilidad media a media-alta se encuentra en la parte central de la cuenca y finalmente en las sierras se presenta una permeabilidad baja.

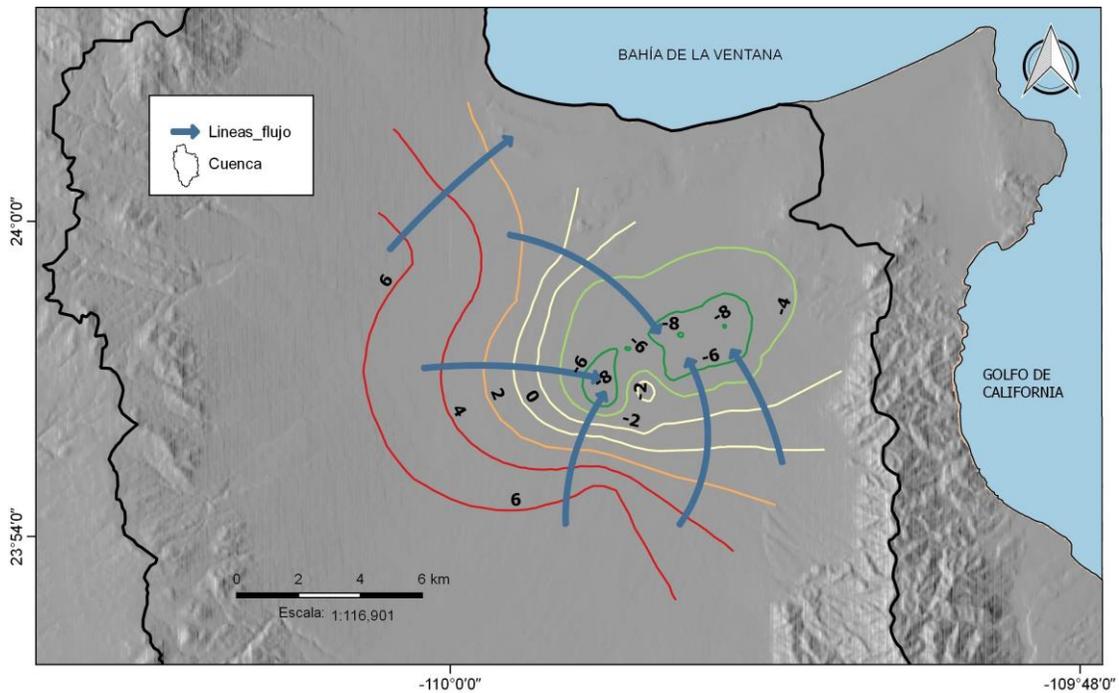


Figura 7.5 Distribución del nivel estático (msnm) con dirección del flujo subterráneo para el año 2003. Modificado de: Comisión Nacional del Agua (2003).

8. MÉTODOS

8.1 Recolección de muestras

Para determinar el número y ubicación de los sitios de muestreo, se realizó un análisis de la información otorgada por la Comisión Nacional del Agua (2003) acerca de la red de pozos del área, la cual se muestra en el anexo 1, e incluye información sobre sus características fisicoquímicas.

Asimismo, se tomó en cuenta la información recibida por parte de los ejidatarios, como la accesibilidad a los pozos y la factibilidad de toma de muestra. Como resultado se establecieron 25 estaciones (valle: 22 y sierra: 3) durante el primer muestreo, aumentando a 28 estaciones (valle: 24 y sierra: 4) para el segundo y tercer muestreo. En la figura 8.1 se señalan las estaciones de muestreo identificadas por claves y dentro del anexo 2 se puede conocer a que estación pertenece cada clave.

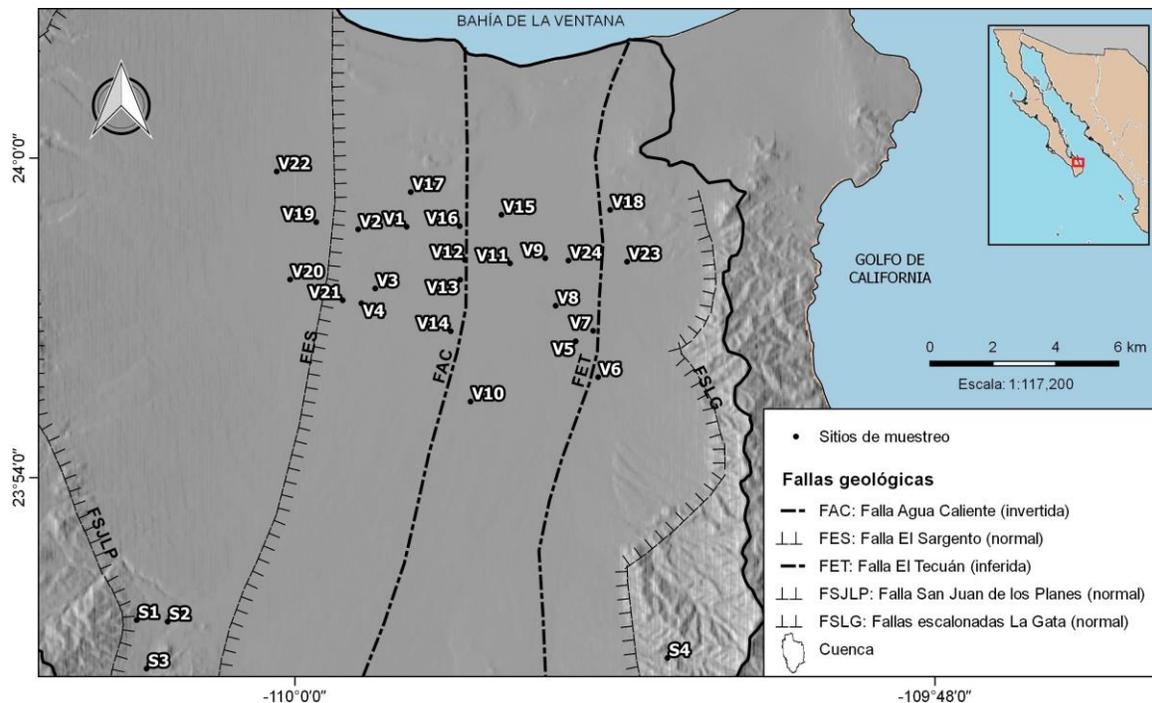


Figura 8.1 Ubicación geográfica de sitios de muestreo, señalando las fallas geológicas y el perímetro del acuífero Los Planes.

Se establecieron estaciones de muestreo ubicadas en las sierras de la cuenca Los Planes con la finalidad de tener un marco de referencia de sitios en donde la actividad agrícola no hubiese provocado un posible aumento en las concentraciones en la zona del valle.

Los muestreos se llevaron a cabo en los meses de abril y octubre de 2016 y febrero 2017 con el propósito de abarcar los diferentes climas a lo largo del año (secas, lluvias cálidas y lluvias frías) y conocer la relevancia del cromo movilizado por las precipitaciones. La mayoría de las muestras colectadas en pozos de agua subterránea fueron obtenidas por medio de las bombas centrífugas instaladas permanentemente en cada pozo, dejando fluir un volumen considerado de agua antes de la recolección, y en menor porción mediante el uso de un muestreador Bailer, haciendo varias extracciones previas al muestreo (Fig. 8.2).



Figura 8.2 Toma de muestras de aguas subterráneas por medio de bomba y muestreador Bailer

Para la colecta de muestras se emplearon botellas de polietileno de baja densidad, previamente lavadas con ácidos, primero en HCl (6 M) y después con HNO₃ (6 M) evitando así la presencia de cualquier EPT en estos recipientes, siguiendo el protocolo de limpieza empleado por Flegal *et al.* (1991). En cada estación fueron colectadas dos muestras con el propósito de: (1) filtrar una muestra para obtener las concentraciones de Cr y Cr (VI) en su fracción disuelta, así como las concentraciones de iones mayoritarios, y (2) la otra muestra sin filtrar, se empleó para determinar el contenido de Cr (VI) total, es decir, la suma de la fracción disuelta y la fracción particulada. Por otra parte, la fracción particulada de Cr (VI) se determinó mediante la diferencia de la

concentración total menos la concentración disuelta; por último, la fracción particulada del Cr se obtuvo por medio de la digestión de los filtros. Lo anterior se explica mediante el esquema siguiente (Fig. 8.3).

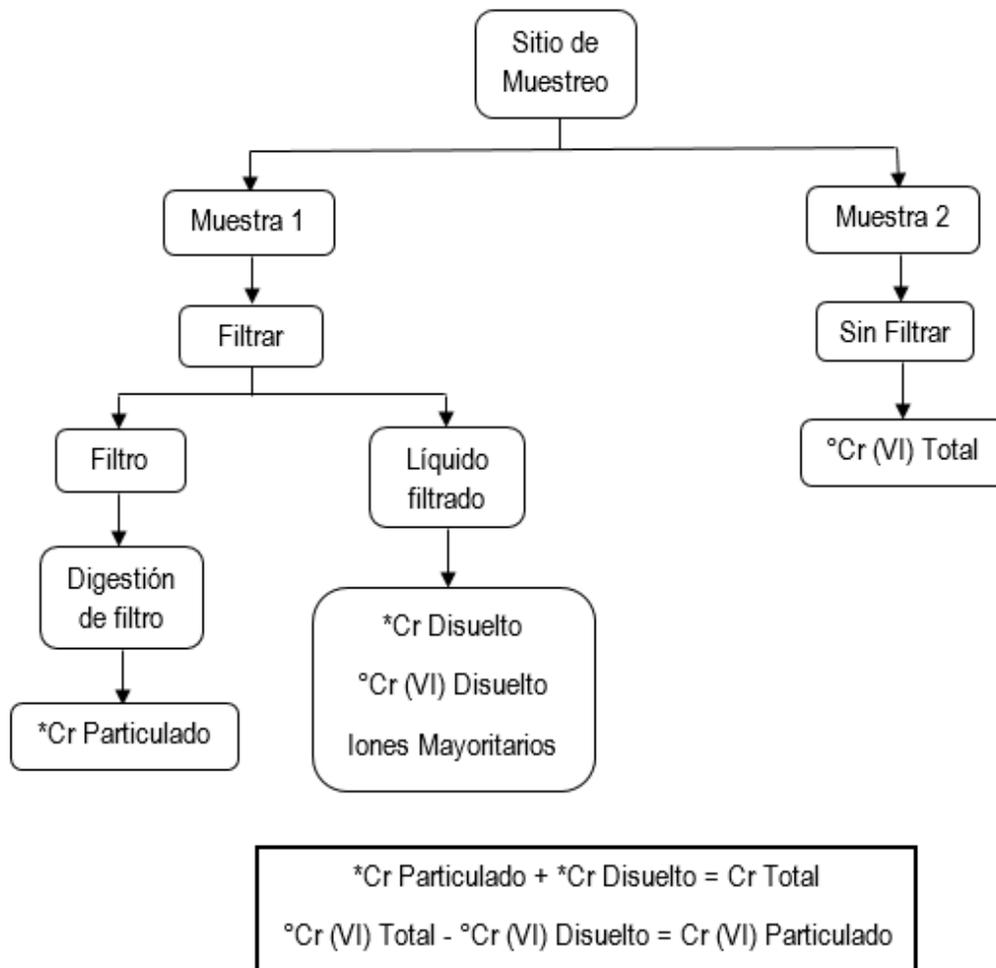


Figura 8.3 Esquema mostrando el proceso de obtención de las variables que serán analizadas: Cr total, Cr (VI) total, fases particulada y disuelta, y iones mayoritarios.

Después, las botellas con las muestras fueron colocadas en bolsas herméticas individuales tipo “zip-lock”, que a su vez, se introdujeron dentro de otras dos bolsas de mayor tamaño para evitar una posible contaminación externa, tal como lo sugiere Flegal *et al.*, (1991) (Fig. 8.4). Las bolsas con muestras fueron almacenadas en hieleras a una temperatura de 4°C hasta su posterior análisis de laboratorio.



Figura 8.4 Procedimientos en campo para evitar contaminación externa.

A la par de la recolección de muestras de agua subterránea, se registraron parámetros fisicoquímicos *in situ*: pH, conductividad y temperatura, se registraron además, valores de Eh, no obstante, el empleo de bombas para obtener las muestras puede evitar que reflejen los valores dentro del sitio, por lo que se decidió no emplear los resultados de Eh obtenidos.

El registro de los parámetros fisicoquímicos se realizó durante los tres muestreos en cada estación por medio de una sonda multiparamétrica U-50 Multiparameter Water Quality Meter marca HORIBA, la cual, previo a las mediciones fue calibrada con soluciones estándar. Se introdujo dentro de los pozos cuando fue posible o en recipientes con agua extraída de las bombas, dependiendo de las condiciones en cada estación (Fig. 8.5).



Figura 8.5 Toma de parámetros fisicoquímicos por medio de sonda multiparamétrica.

8.2 Análisis de agua

8.2.1 Cromo total y especies más estables

Dentro del Laboratorio de Geomicrobiología y Sedimentología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), unidad académica Mazatlán, se realizó el filtrado de las muestras destinadas al análisis de la fracción disuelta, en el que se emplearon filtros de membrana de nitrocelulosa con tamaño de poro de $0.22\ \mu\text{m}$, marca Millipore.

Los filtros empleados fueron almacenados y después digeridos con ácidos para obtener la fracción particulada de cromo (Fig. 8.6). Este procedimiento consistió en agregar a cada filtro, colocado en bombas de teflón marca Savillex, 3 mL de HNO_3 , 1.5 mL de HF y 1.5 mL de HCl, para después calentarse durante 35 minutos a $210\ ^\circ\text{C}$; después de transcurrido este tiempo, se retiraron las tapas de las bombas para llevar casi a sequedad durante 2 horas y 15 minutos (aproximadamente) a $150\ ^\circ\text{C}$. Posteriormente, se le agregaron 1.5 mL de HNO_3 y fueron llevados casi a sequedad, repitiendo este paso una segunda vez, y finalmente se le adicionó 1 mL de HNO_3 , para después ser aforado el contenido de cada bomba a 10 mL con agua ultrapura tipo 1 Milli-Q ($18.2\ \mu\text{ohms}$, $25\ ^\circ\text{C}$).

Para el análisis de cromo disuelto, una porción de las muestras filtradas fueron acidificadas con $100\ \mu\text{L}$ de HNO_3 por cada 50 mL de muestra y analizadas mediante un Espectrómetro de Masas de Alta Resolución Inductivamente Acoplado a Plasma (HR-ICP-MS por sus siglas en inglés), en el Laboratorio de Isótopos Estables del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), de la Unidad Académica Mazatlán. De igual forma, las soluciones obtenidas de la digestión de los filtros fueron analizadas por medio de este equipo.

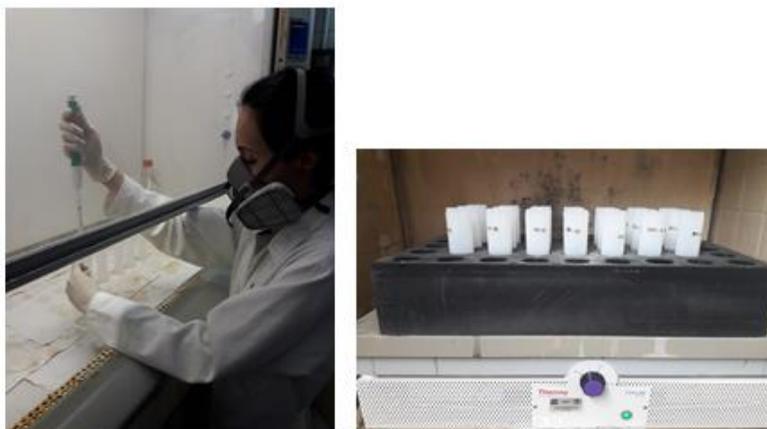


Figura 8.6 Procesamiento de filtros por digestión con ácidos.

Además de realizarse los análisis para determinar el cromo total se efectuó otro análisis para conocer las concentraciones de Cr (VI) total y su fracción disuelta, debido a que representa la especie más tóxica. La técnica empleada fue la descrita en la NMX-AA-044-SCFI-2014, la cual concuerda con lo establecido en el Método 7196A. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Public Health Association, 1999), así como la IS 3025-52 Methods of Sampling and Test for Water and Wastewater (Environmental Protection and Waste Management Sectional Committee, 2003).

La determinación cuantitativa ocurre por la formación de un complejo colorido: el cromo hexavalente reaccionó con el compuesto difenilcarbazida agregado a las muestras previamente acidificadas con H₂SO₄ al 10%. La reacción se efectuó en ausencia de luz durante 10 minutos en el que se generó la coloración rojo-violeta que caracteriza la presencia de Cr (VI), en mayor o menor intensidad.

Posteriormente las absorbancias se midieron por medio de un Espectrofotómetro UV-Visible, marca GENESYS 10S, a una longitud de onda de 540 nm con las que se determinaron las concentraciones mediante curva de calibración; y finalmente, el Cr (VI) particulado se determinó por la diferencia entre las concentraciones del Cr (VI) total y el Cr (VI) particulado. Empleando los resultados de cromo total y su especie hexavalente, en sus fases disuelta y particulada, es posible obtener, por diferencia, las concentraciones para la segunda especie más estable; es decir, el cromo trivalente (Cr (III)); lo anterior se puede visualizar en la tabla 8.1.

Tabla 8.1 Especies de Cr y fases de las cuales se obtuvieron sus concentraciones.

Cromo y especies más estables	Fases	Método aritmético de obtención	Representación
Cr	Cr total	$Cr_D + Cr_P$	Cr_T
	Cr total - disuelto		$Cr_{T D}$
	Cr total - particulado		$Cr_{T P}$
Cr (VI)	Cr (VI) total		$Cr(VI)_T$
	Cr (VI) disuelto		$Cr(VI)_D$
	Cr (VI) particulado	$Cr(VI)_T - Cr(VI)_D$	$Cr(VI)_P$
Cr (III)	Cr (III) total	$Cr_T - Cr(VI)_T$	$Cr(III)_T$
	Cr (III) disuelto	$Cr_D - Cr(VI)_D$	$Cr(III)_D$
	Cr (III) particulado	$Cr_P - Cr(VI)_P$	$Cr(III)_P$

8.2.2 Iones Mayoritarios

Como se ha mencionado antes, el objetivo principal del proyecto se refiere al comportamiento del cromo en aguas subterráneas cercanas a una zona costera; no obstante, se consideró prudente realizar otros análisis con la finalidad de tener una mejor comprensión de los procesos geoquímicos que ocurren dentro de la zona de estudio y caracterizar las aguas subterráneas.

Por esta razón, se decidió analizar la composición química en relación a los iones mayoritarios empleando un Cromatógrafo Iónico ICS-5000+ marca Dionex con un detector de conductividad; dicho equipo se ubica en el Laboratorio de la Unidad de Geoquímica de Fluidos Geotérmicos del Instituto de Geofísica, UNAM, CDMX, empleando una porción de las muestras filtradas previamente almacenadas a una temperatura de 4 °C.

Para el análisis de aniones se preparó una solución de NaOH a una concentración de 30 mmol/L, la cual se empleó como la fase móvil; asimismo, se preparó otra solución de $\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$ a una concentración de 20 mmol/L como fase móvil para el análisis de cationes.

En la determinación de bicarbonatos se empleó un método volumétrico, en el que debido al volumen pequeño de muestra con que se contaba se optó por realizar una microtitulación, haciendo uso de una microbureta de acuerdo con lo descrito por Baeza (2003), empleando HCl durante el proceso. El indicador utilizado fue la fenolftaleína y verde de bromocresol, el cual dio un viraje de incoloro a violeta ante la presencia de bicarbonatos (Fig. 8.7).

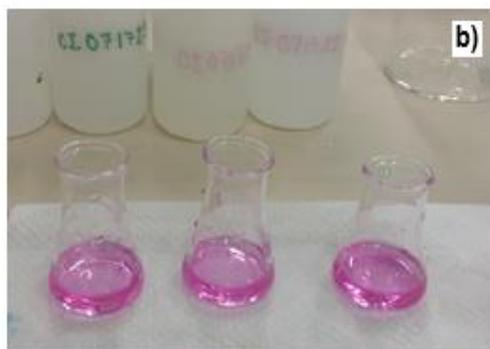


Figura 8.7 a) Microtitulador para método volumétrico b) Muestra por triplicado señalando la presencia de bicarbonatos

8.3 Control de calidad

8.3.1 En campo

Se tomaron blancos de campo para verificar que las muestras no se encontraran contaminadas por cromo presente en el entorno durante el procedimiento de recolección y almacenamiento de las muestras.

8.3.2 En laboratorio

Todo el material empleado durante el muestreo, almacenamiento y posterior análisis fueron previamente lavados con el siguiente procedimiento: (1) Agua con jabón libre de fosfatos, (2) triple enjuague con agua tipo 1 (Milli Q), (3) HCl al 2M, (4) triple enjuague con agua tipo 1 (Milli Q), (5) HNO₃ al 2M y (6) triple enjuague con agua tipo 1 (Milli Q). Asimismo, los reactivos empleados fueron de grado ultrapuro.

8.3.3 Análisis de Cr en HR-ICP-MS

Con el propósito de verificar la exactitud de los análisis de Cr_{T D} y Cr_{T P} se empleó el Material Certificado de Referencia (MCR) para aguas naturales NIST 1640a durante la lectura de la fracción disuelta y el MCR para sedimentos PACS-2 en la lectura de la fracción particulada. Ambos MCR fueron analizados en el equipo de manera periódica después de dar lectura a 10 muestras; asimismo, se hizo uso de un trazador interno de In, el cuál fue agregado a cada muestra a una concentración de 1 µg/L para revisar que la señal brindada por el HR-ICP-MS se mantuviera en su nivel.

Para el análisis por HR-ICP-MS de la fracción disuelta, se obtuvo un límite de detección de 0.0005 µg/L y un límite de cuantificación de 0.0018 µg/L. Para conocer si son aceptables el porcentaje de recuperación del 98% y el coeficiente de variación (CV) del 8 %, se recurrió a los criterios descritos por la CCAYAC (2011), la cual indica que para concentraciones de analito de 10 a 100 µg/L, los intervalos de aceptación son de 70 – 120% (porcentaje de recuperación) y ≤ 20 % (CV).

Por otra parte, para el análisis de la fracción particulada se determinó un límite de detección de 0.280 µg/L y un límite de cuantificación de 0.935 µg/L. El intervalo de la concentración de analito

para la fracción particulada fue de 100 a 1000 $\mu\text{g/L}$, por lo que el porcentaje de recuperación de 114 % representa un buen porcentaje al superar ligeramente el intervalo de 85 -110 % (CCAYAC, 2011); además, el coeficiente de variación de 7 % resultó aceptable al ser ≤ 10 %.

Se realizaron, además, curvas de calibración en un intervalo de 0.1 a 10 $\mu\text{g/L}$ por medio de un estándar obtenido a partir de una solución madre con concentraciones conocidas de una serie de elementos. Una alícuota diluida del NIST 1640a (1:10) fue leída cada 10 muestras junto con uno de los estándares empleados en la curva de calibración cada 15 muestras, con el fin de verificar la precisión del análisis.

8.3.4 Análisis de Cr (VI) en Espectrofotómetro UV-Visible

Se realizó el análisis de blancos de laboratorio empleando agua clasificada como Tipo I, de acuerdo con la ASTM (2001) con el que se obtuvo el límite de detección del equipo para ambas fases, el cual fue de 3.06 $\mu\text{g/L}$ con una desviación estándar de 1.02 y un límite de cuantificación de 10.20 $\mu\text{g/L}$. Se realizaron además, curvas de calibración en un intervalo de 0 a 50 $\mu\text{g/L}$ empleando el estándar de High Purity Standards con concentración de 1,000 $\mu\text{g/mL}$ de cromo hexavalente acreditado por la guía 34 ISO/TEC 17025, para cerciorarse que se haya efectuado un correcto tratamiento a las muestras del área de estudio.

8.3.5 Análisis de iones mayoritarios en Cromatógrafo Iónico

Antes de introducir las muestras se realizaron curvas de calibración para los cationes y aniones por medio de los estándares de High Purity Standards en donde el intervalo de las concentraciones varió dependiendo de cada ion, presentándose como mínima concentración 0.47 mg/L en el calcio y como máxima 1000 mg/L en los cloruros. Los límites de detección y cuantificación, así como las concentraciones de cada estándar y el resultado de su regresión lineal para cada ion se muestran en la tabla 8.2.

Debido a que el área de estudio se localiza cercano a la Bahía La Ventana, las muestras fueron diluidas 1:9 para prevenir la posible presencia de muestras con concentraciones altas en sales; además, previo a su inyección en el equipo, las muestras fueron desgasificadas para evitar la presencia de CO_2 en el cromatógrafo iónico. Estas fueron inyectadas por triplicado, pasando primero a través de un filtro Millipore (0.45 μm) de nitrocelulosa.

Tabla 8.2 Información obtenida a partir de estándares y límites de detección y cuantificación de los iones mayoritarios.

Ion	Concentración de estándares (mg/L)	Linealidad (r ²)	LD	LC
Na ⁺	10000	0.998	0.01	0.03
K ⁺	1000	0.999	0.01	0.04
Mg ²⁺	1000	0.997	0.01	0.01
Ca ²⁺	1000	0.992	0.01	0.02
Li ⁺	1000	1.000	0.00	0.00
F ⁻	1000	0.997	0.01	0.03
SO ₄ ²⁻	10000	0.999	0.02	0.06
PO ₄ ³⁻	1000	0.998	0.05	0.16
Br ⁻	10000	0.994	0.05	0.16
Cl ⁻	10000	0.997	0.01	0.04
NO ₂ ⁻	1000	0.999	0.02	0.07
NO ₃ ⁻	1000	0.998	0.03	0.08

Por último, tomando en consideración la condición de electroneutralidad que presentan las aguas, es decir, que la cantidad de cationes es igual a la cantidad de aniones representados en miliequivalentes (meq/L), para verificar la calidad en los resultados de las concentraciones de iones mayoritarios se realizó un balance iónico aplicando la fórmula siguiente (APHA, 1999), con un porcentaje de error aceptado de ± 10 :

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

8.4 Creación de mapas geográficos

Para una mejor comprensión de la distribución espacial en los resultados (variables fisicoquímicas y concentraciones de Cr) y las características geológicas y litológicas del área de estudio, se realizaron mapas geográficos por medio de un Sistema de Información Geográfica libre y de código abierto conocido como QGIS.

Se emplearon isolíneas para la representación de los resultados, las cuales se obtuvieron por medio del método de interpolación de Distancia Inversa Ponderada (IDW: Inverse Distance

Weighting); este método matemático se basa en la existencia de correlaciones espaciales entre las variables, en el que una variable representada cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra (Environmental Systems Research Institute, 2016). Además, los intervalos entre los diferentes resultados fueron obtenidos utilizando la regla de Sturges (Zar, 1996), en donde, “k” representa el número óptimo de clases o intervalos y “n” el número de datos.

$$k = 1 + \log_2 (n)$$

8.5 Análisis estadísticos

Con la finalidad de tener una interpretación clara sobre el comportamiento de los valores entre las tres épocas climáticas, así como entre las zonas del valle y sierra, se determinó si la distribución que presentaban los datos era normal; con base en lo cual, se efectuaron pruebas paramétricas (ANOVA y t de Student) y pruebas no paramétricas (Kruskal-Wallis); además se realizaron gráficos de caja y bigotes para visualizar los valores atípicos presentes.

Asimismo, se efectuó un análisis factorial por medio del método de componentes principales para determinar las relaciones existentes entre las variables, en el que se empleó el tipo de rotación Varimax y los valores relevantes dentro de cada factor fueron considerados al ser mayores o iguales a 0.60, de acuerdo con lo descrito en otros estudios (Sadeghi *et al.*, 2000; Praveena *et al.*, 2012; Granato *et al.*, 2018).

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1 Variables fisicoquímicas

9.1.1 Temperatura

Los resultados de temperatura durante la temporada de secas (abril/2016), señalaron en la zona del valle de San Juan de los Planes, un mínimo de 28 °C en la estación V16 (El Pino) y un máximo de 42.7 °C en la estación V19 (La Alambrada), con promedio de 32.6 °C. En la figura 9.1 se aprecia que el sitio V19 se encuentra cercano a la Falla El Sargento (FES), lo cual nos permite suponer que su temperatura elevada podría deberse al contacto de las aguas subterráneas con esta falla.

Por otra parte, en las estaciones ubicadas en la sierra, empleadas como sitios de control por su lejanía del valle, se presentó un promedio menor al del valle de 28.3 °C, con temperaturas fluctuando de 27.7 °C a 29.3 °C. Todos los resultados de temperatura durante los tres muestreos se pueden ver en el anexo 3.

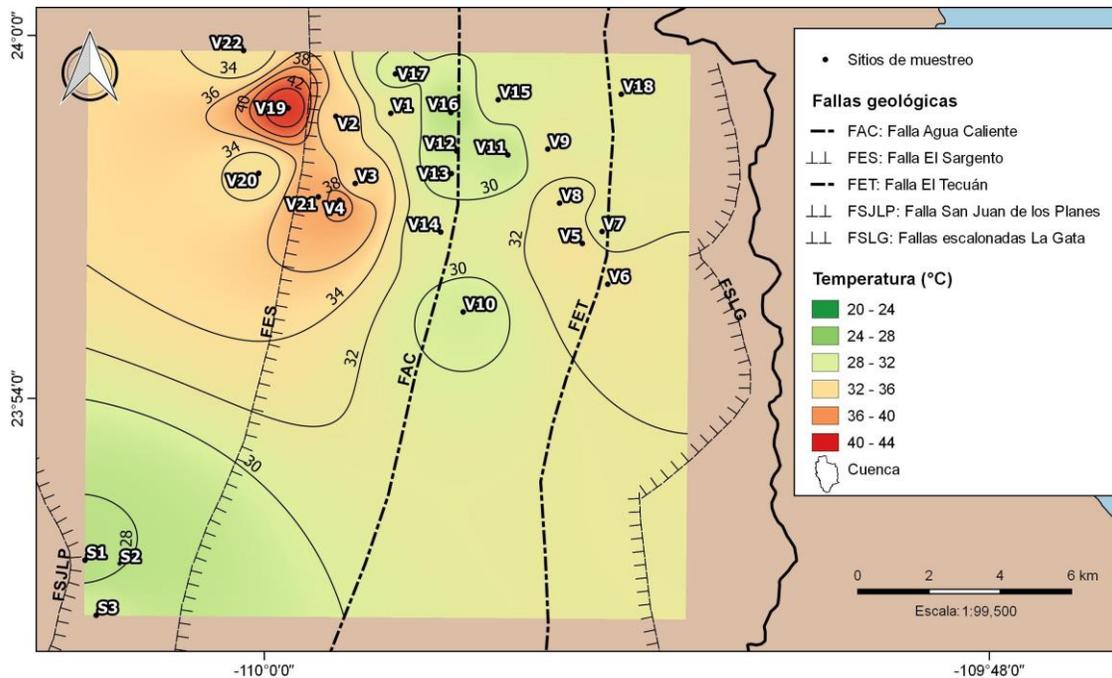


Figura 9.1 Temperaturas (°C) en la zona de estudio (valle y sierra) durante la temporada de secas (abril/2016).

Durante la temporada de lluvias cálidas (octubre/2016) el valor máximo aumentó numéricamente a 44.2 °C en la estación V19 (La Alambrada) del valle, contando con un mínimo de 29.2 °C en la estación V12 (El Milagro) y un promedio de 32.9 °C. Para las estaciones de la sierra se obtuvo un mínimo de 25.7 °C, un máximo de 30.1 °C y un promedio de 28.6 °C (Fig.9.2).

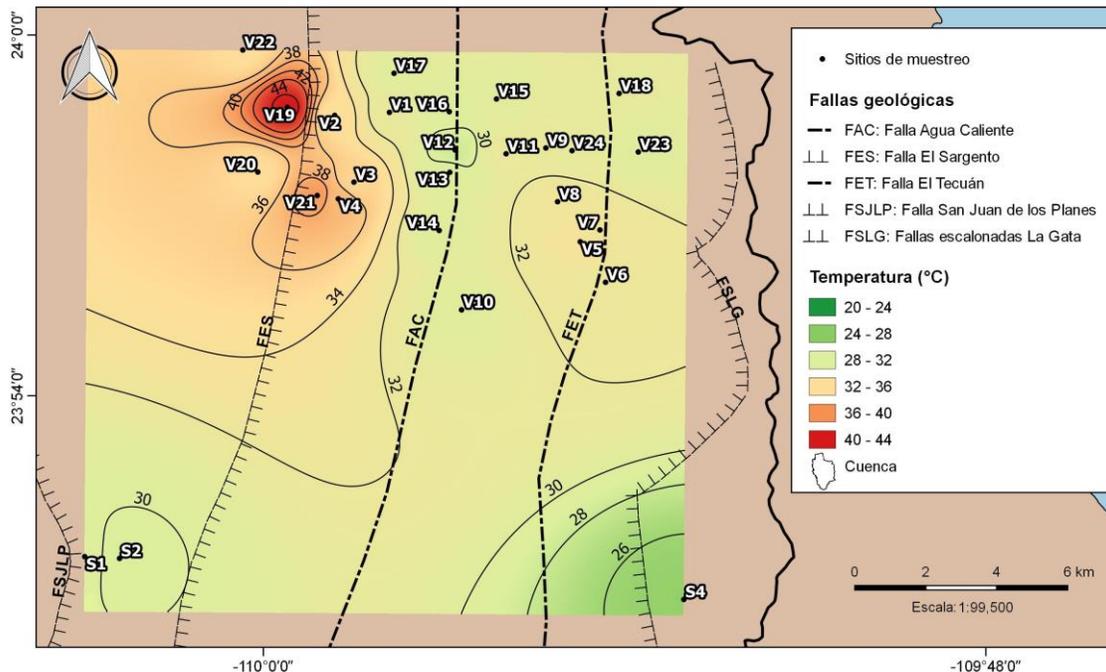


Figura 9.2 Temperaturas (°C) en la zona de estudio (valle y sierra) durante la temporada de lluvias cálidas (octubre/2016).

Finalmente, en la temporada de lluvias frías (febrero/2017) dentro del valle se encontró un mínimo de 26.3 °C en la estación V12 (El Milagro) y un máximo de 38.2 °C en la estación V21 (El Bajío), con un promedio de 30.9 °C, mientras que en los sitios de las sierras se obtuvo un intervalo de 25.2 °C (mínimo) a 26.8 °C (máximo), con un promedio 25.7 °C. Después de realizarse la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis a las estaciones del valle durante las tres temporadas, se determinó que estadísticamente no existen diferencias significativas entre estas; sin embargo, numéricamente se observó un aumento de la temperatura máxima alcanzada en la temporada de lluvias cálidas. Por otra parte, tomando en cuenta los sitios ubicados en la sierra, se efectuó una prueba t de Student con el fin de comparar las medias entre las zonas de sierra y del valle, en donde se confirmó que las muestras de la sierra presentaron temperaturas significativamente menores.

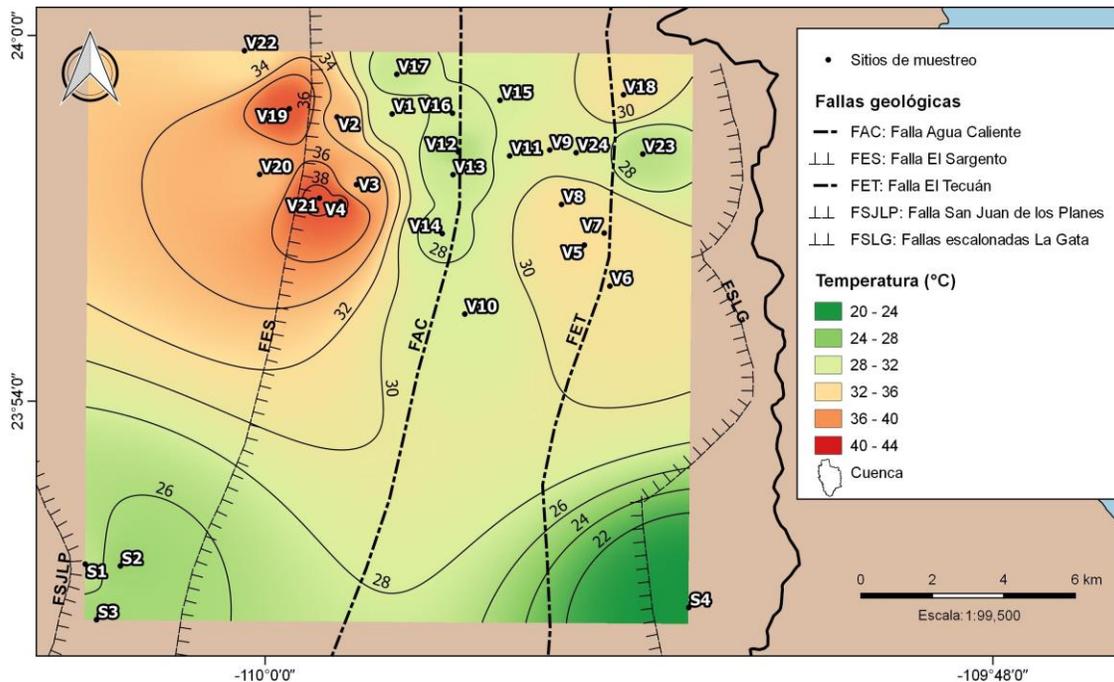


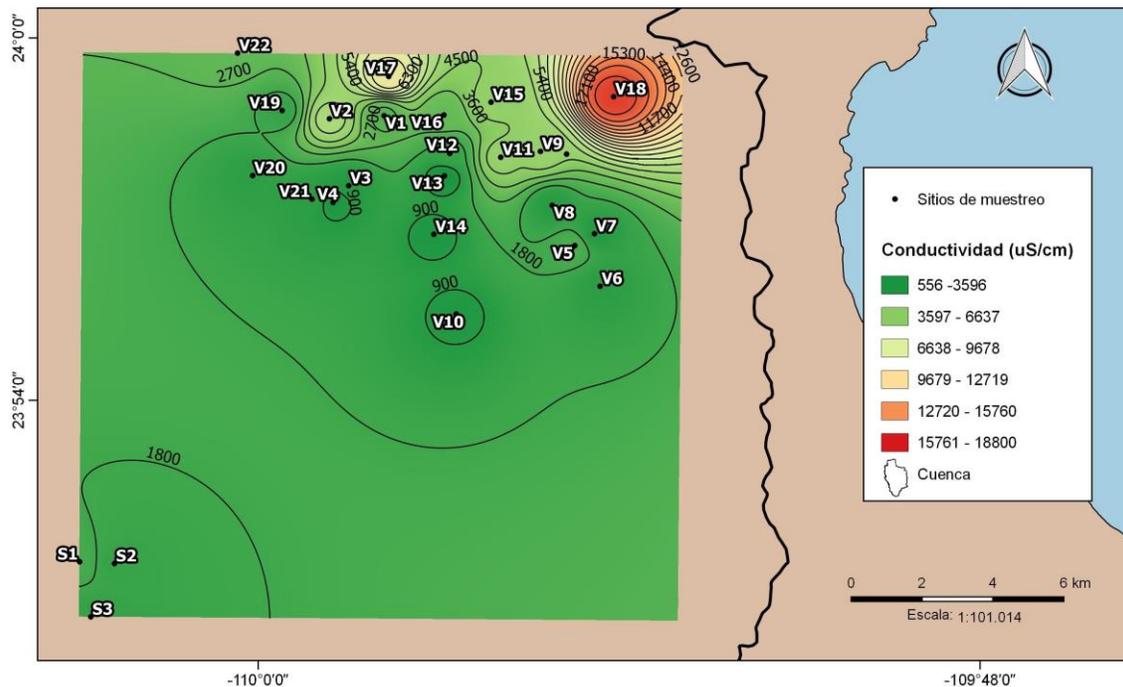
Figura 9.3 Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) en la zona de estudio (valle y sierra) durante la temporada de lluvias frías (febrero/2017).

Durante los tres muestreos se aprecia que en el área occidental se presentan las mayores temperaturas ($> 34^{\circ}\text{C}$), lo cual concuerda con el estudio realizado por la Comisión Nacional del Agua (1997) en el que se destaca un pozo con temperatura del orden $45\text{--}50^{\circ}\text{C}$ en esa zona. De igual manera, CONAGUA en 2003 señaló un pozo con 38°C dentro de la misma región occidental. Lo anterior destaca la notable influencia de la FES en el hidrotermalismo del flujo de agua subterránea.

En contraste, en el presente estudio se observa que el área central presenta las temperaturas más bajas, coincidiendo con lo descrito en investigaciones anteriores por la Comisión Nacional del Agua (1997; 2003). Dentro de la zona central se encuentra la Falla Agua Caliente (FAC); sin embargo, a diferencia de la FES ubicada en el área occidental, la FAC no parece afectar los niveles de temperatura (hidrotermalismo).

9.1.2 Conductividad eléctrica (CE)

Los valores de conductividad eléctrica durante la temporada de secas para las estaciones, tanto en el valle como en la sierra, pertenecieron al intervalo más bajo de 556 a 3,396 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que se muestra en la figura 9.4, con excepción de Agua Amarga (V18; en color rojo) con una conductividad de 17,044 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que corresponde a agua salina (15,000 a 50,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; Rocha *et al.*, 2015). Lo anterior nos indica que predomina la presencia de agua dulce ($<2,500 \mu\text{S}/\text{cm}$) y salobre (2,500 a 15,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) dentro del área de estudio.



En las temporadas de lluvias cálidas y lluvias frías se observó el mismo comportamiento, imperando en las estaciones los valores ubicados en los intervalos más bajos de conductividad (Anexo 4), destacando solamente la estación V18 con 18,800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ durante las lluvias cálidas (Fig. 9.5) y con 16,450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ durante las lluvias frías (Fig. 9.6). Con la finalidad de corroborar lo anterior, y después de determinar que las variables no seguían una distribución normal, se realizó la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis en la que se comprobó que no existen diferencias significativas entre las temporadas.

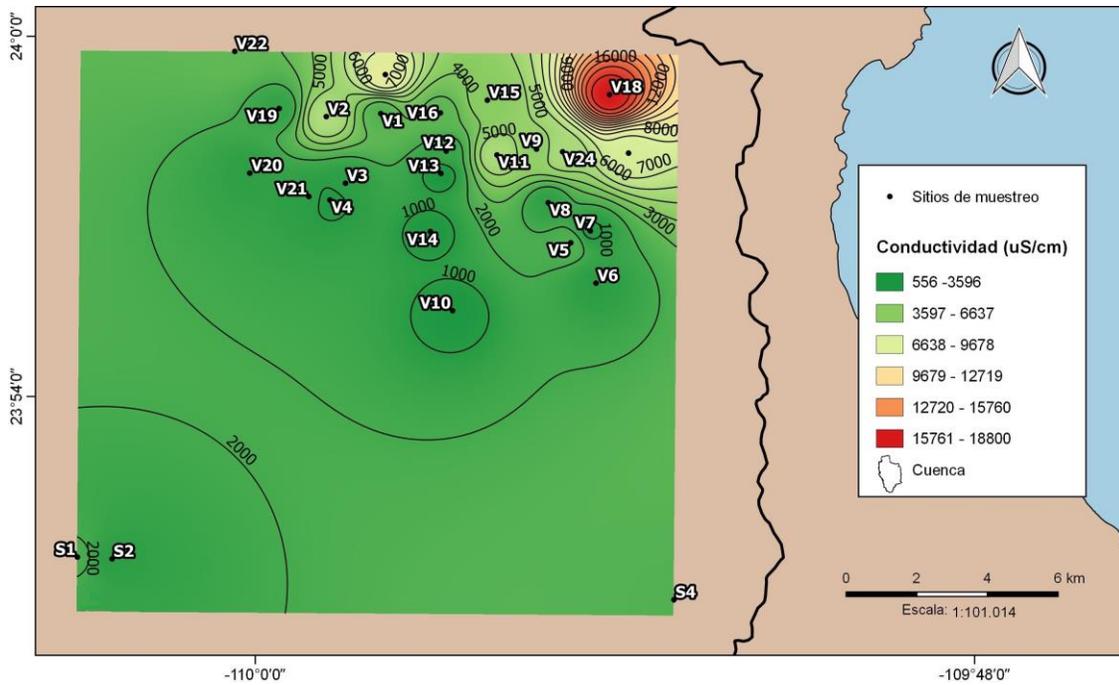


Figura 9.5 CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en la zona de estudio durante la temporada de lluvias cálidas (octubre/2016).

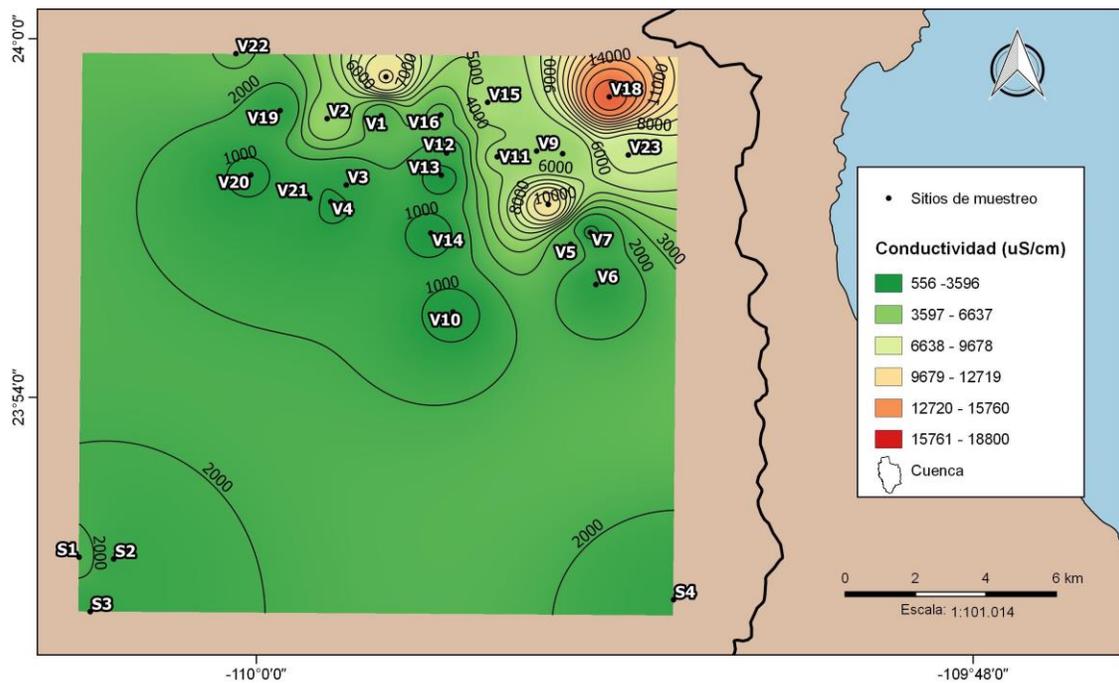


Figura 9.6 CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en la zona de estudio durante la temporada de lluvias frías (febrero/2017).

En la figura 7.5 de la sección de área de estudio, se observa en color azul una zona de inversión en el gradiente hidráulico ubicado cercano a la Bahía de la Ventana, ocasionado por el cono de abatimiento que genera el empleo de bombas por la comunidad, factor que propicia la intrusión

salina. La estación V18 (Agua Amarga) se localiza dentro de esta zona de inversión, por lo que se puede asumir que los valores elevados de conductividad en este sitio obedecen a ese tipo de flujo. De acuerdo con la Comisión Nacional de Agua (2017), esta intrusión salina en la parte cercana al litoral va en aumento año con año, avanzando hacia tierra adentro. Lo anterior puede apreciarse en la figura 9.7, en la que se muestran las distribuciones de salinidad durante el periodo de 1977 a 2003, donde se señalan en color rojo las salinidades más altas y en azul las salinidades más bajas.

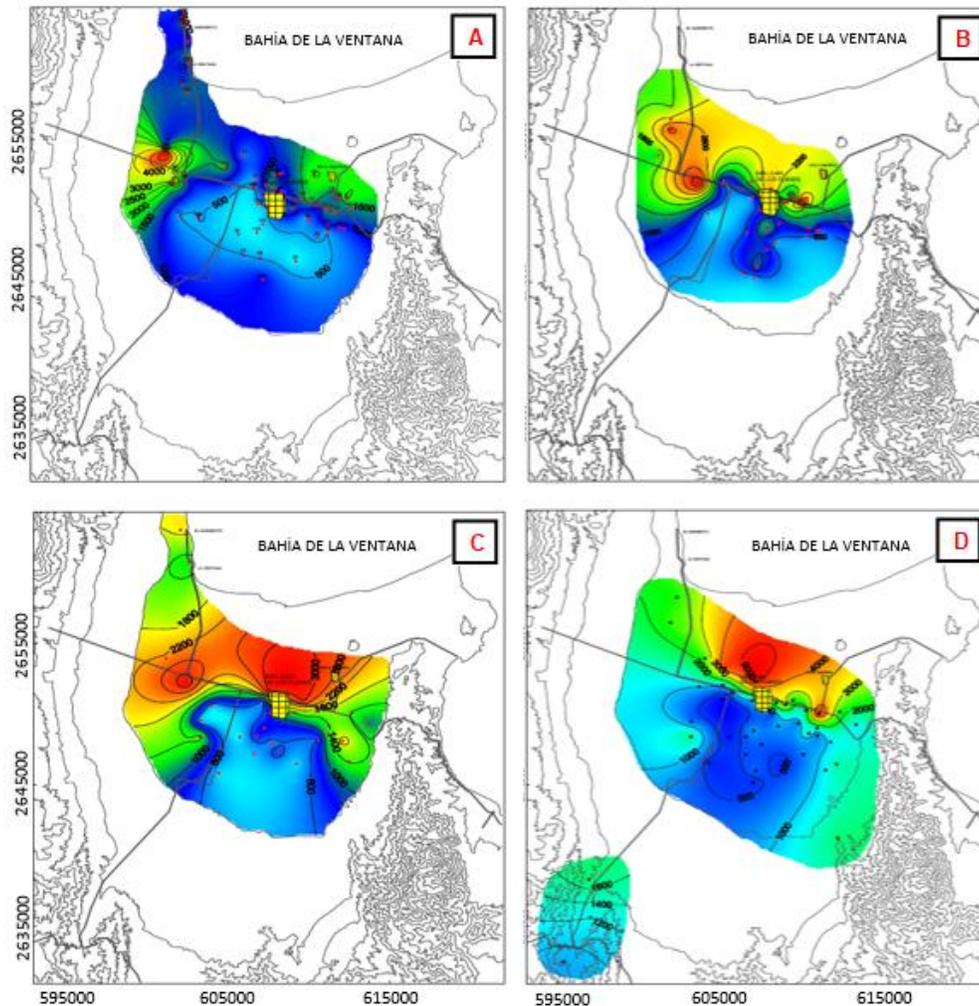


Figura 9.7 Evolución en la distribución de la salinidad. **A:** 1977, **B:** 1994, **C:** 1197, **D:** 2003. Tomado de Comisión Nacional del Agua (2003).

Por otro lado, en la margen occidental se presentan valores de conductividad mayores que en la porción central, lo cual puede deberse a que la mayor temperatura de las aguas subterráneas en la

zona occidental facilitan la lixiviación de las rocas, y por lo tanto el enriquecimiento de sólidos totales disueltos.

9.1.3 pH

Los valores de pH para la época de secas (Fig. 9.8) y lluvias frías (Fig. 9.9) se muestran en el anexo 5. El promedio durante la temporada de secas en el valle fue de 8.1, con un intervalo de 7.1 (mínimo) a 8.7 (máximo) y en la temporada de lluvias frías se obtuvo un promedio de 7.6 fluctuando del 6.9 (mínimo) al 8.0 (máximo).

Mediante la prueba t de Student se determinó que existen diferencias significativas entre ambas épocas climáticas, esta variación en el pH podría deberse al flujo de agua marina proveniente de la bahía La Ventana, la cual permite un pH mayor en temporada de secas; así como, a una mayor influencia por las precipitaciones que disminuye el pH en la temporada de lluvias frías. Por su parte, en los sitios de las sierras el promedio de la época de secas y de lluvias frías fue de 7.8 y 7.2, respectivamente.

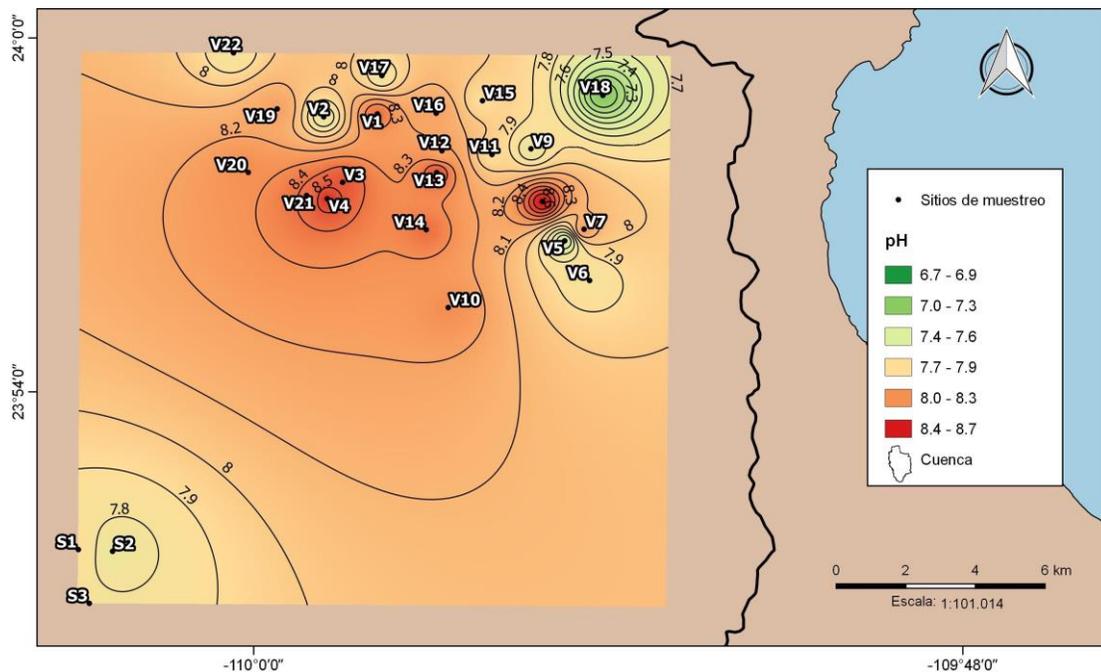


Figura 9.8 pH en la zona de estudio durante la temporada de secas (abril/2016).

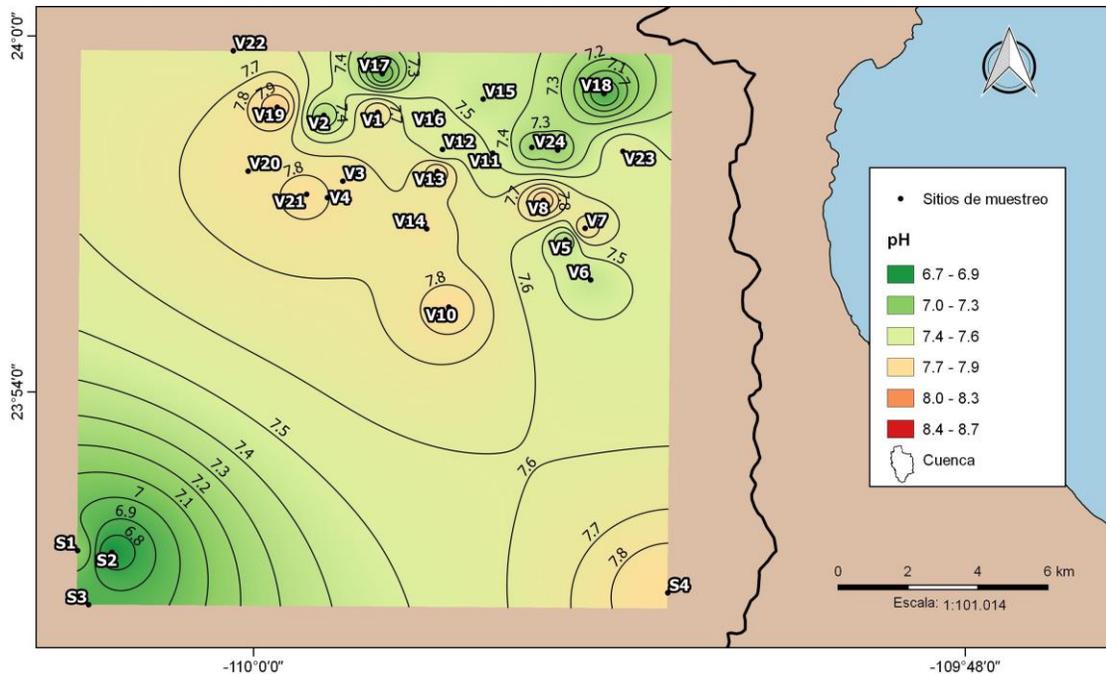


Figura 9.9 pH en la zona de estudio durante la temporada de lluvias frías (febrero/2017).

9.1.4 Iones Mayoritarios

Las concentraciones obtenidas, así como los balances iónicos para cada muestra se encuentran en el anexo 6. Con la finalidad de visualizar con claridad el comportamiento de los iones mayoritarios en el área de estudio, se realizó un diagrama Piper empleando los sitios con error en los balances iónicos de $\pm 10\%$ (-10.4 a 10.4 %), incluyéndose los tres muestreos: secas, lluvias cálidas y lluvias frías (Fig. 9.10).

En el diagrama Piper se aprecia que las muestras de agua subterránea dentro de los cationes (triángulo izquierdo), presentaron una dominancia por las facies sódicas aunque algunos sitios se ubicaron en la zona de mezcla durante las temporadas de secas (Ojo de agua, Agua amarga, Técnica 8, Las 3 palmas y El milagro), lluvias cálidas (Texcalama) y lluvias frías (Ojo de agua, Agua amarga y Texcalama).

Por otra parte, los aniones (triángulo derecho) se encontraron dominados por los cloruros, con excepción de algunos sitios presentes en la zona de mezcla durante la temporada de secas (El gordo y Ojo de agua), lluvias cálidas (Las 3 palmas, El gordo y La fortuna) y lluvias frías (La fortuna, La pimientilla y Ojo de agua). Finalmente, al proyectar ambos triángulos en el rombo superior se

obtuvo que el tipo de agua presente en las muestras de San Juan de los Planes son del tipo: clorurada sódica. El resultado obtenido, se debe a la intrusión salina ocasionada por la cercanía a la Bahía de la Ventana y la sobre-explotación del acuífero, principalmente por las actividades agrícolas en la zona. Aunado a esto, los estudios de Briseño (2014) y la Comisión Nacional del Agua (2003) concuerdan también con el tipo de agua que rige en la zona.

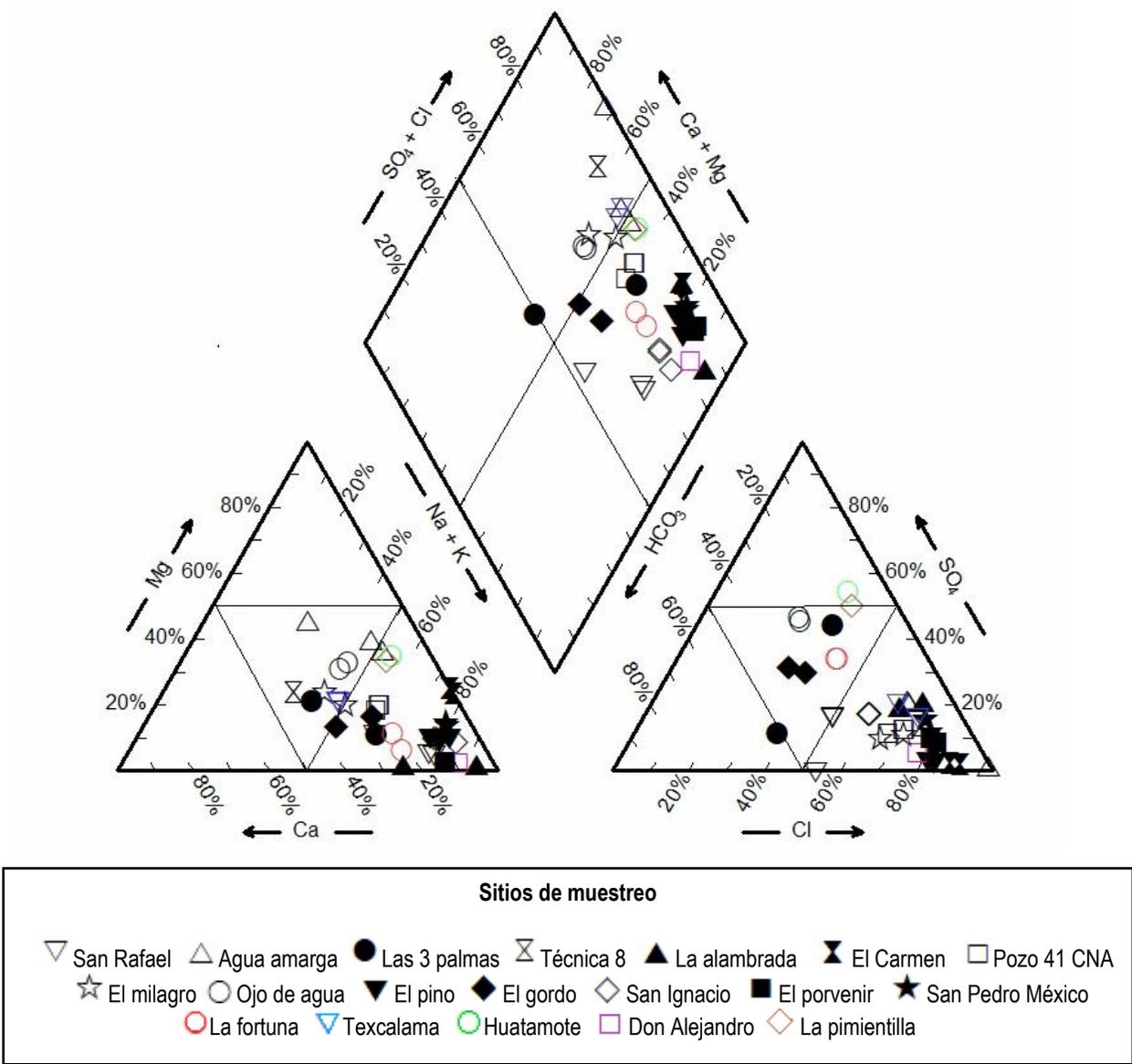


Figura 9.10 Diagrama Piper con las tres temporadas. Tipo de agua: clorurada sódica

Como se mencionó anteriormente, algunos sitios se encontraron dentro del área de mezcla de facies en los cationes y aniones, lo cual podría tener relación con su ubicación geográfica al estar más alejados de la zona de la bahía; en particular los sitios Texcalama, Ojo de agua y Huatamote, que se localizan en la sierra San Antonio.

Con relación a esto, Briseño (2014) calculó los índices de saturación para varios minerales en la cuenca de San Juan de los Planes, entre ellos, la calcita, dolomita, fluorita, yeso y anhidrita, y afirmó que estos estaban siendo disueltos, lo cual podría propiciar la presencia de calcio y magnesio en las aguas subterráneas. Además, Nava-Sánchez (1992) ha indicado la presencia de rocas sedimentarias marinas dentro de la cuenca, conformada por arenisca calcárea con alto contenido de fósiles, principalmente conchas y corales.

9.2 Cromo

9.2.1 Concentraciones de C_{T}

Los resultados obtenidos de la fase disuelta ($C_{T D}$) y particulada ($C_{T P}$) de cromo fueron sumados para obtener las concentraciones de cromo total (C_{T}) en las tres temporadas. Durante el análisis de $C_{T D}$ algunas de las estaciones tuvieron concentraciones por debajo del límite de detección de 0.0005 $\mu\text{g/L}$, por este motivo y con fines estadísticos, se decidió asignarles a esas estaciones el valor medio del límite de detección, es decir, 0.0003 $\mu\text{g/L}$, y así poder realizar la suma de ambas fases. La información sobre ambos análisis ($C_{T D}$ y $C_{T P}$) se encuentra en el anexo 7.

En la temporada de secas (Fig.9.11) se obtuvo un promedio de 83.7 $\mu\text{g/L}$, con un mínimo de 26.9 $\mu\text{g/L}$ y un máximo de 206.4 $\mu\text{g/L}$; sin embargo, el promedio de C_{T} disminuyó numéricamente en la temporada de lluvias cálidas a 71.9 $\mu\text{g/L}$, con un mínimo de 16.7 $\mu\text{g/L}$ y un máximo de 160.2 $\mu\text{g/L}$ (Fig. 9.12); finalmente, se observó que durante la época de lluvias frías las concentraciones fluctuaron de 21.9 $\mu\text{g/L}$ (mínimo) a 281.3 $\mu\text{g/L}$ (máximo), con un promedio de 78.5 $\mu\text{g/L}$ (Fig. 9.13). Estas concentraciones se muestran en el anexo 8.

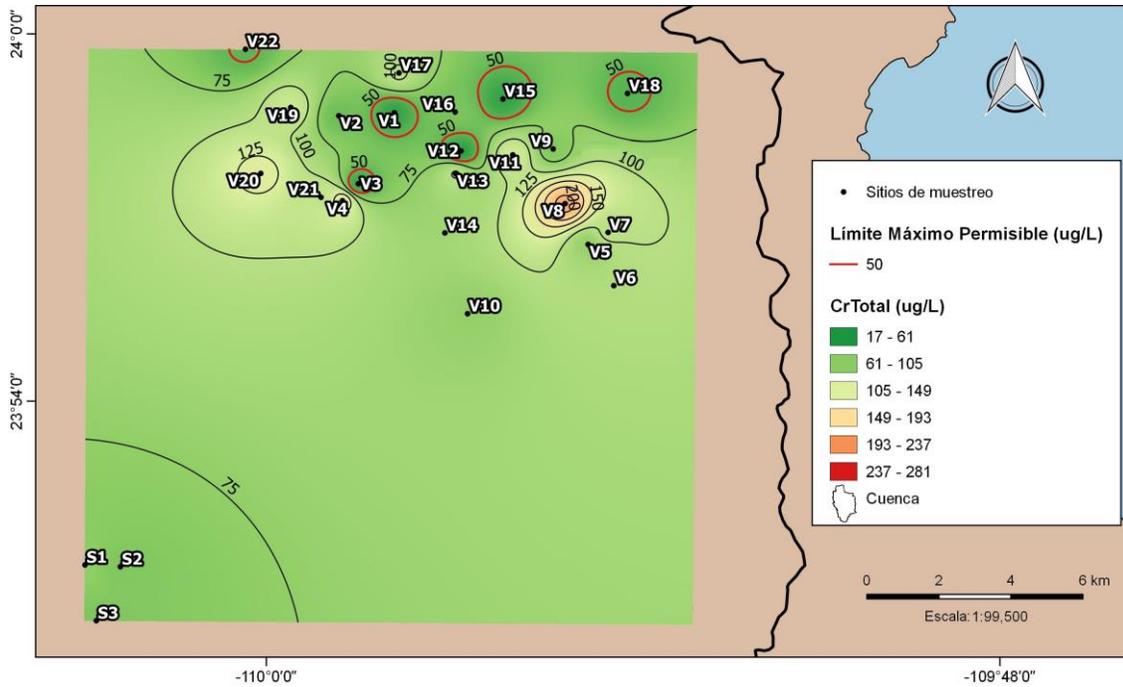


Figura 9.11 Distribución geográfica de las concentraciones de Cr_T ($\mu\text{g/L}$), durante la temporada de secas (abril/2016).

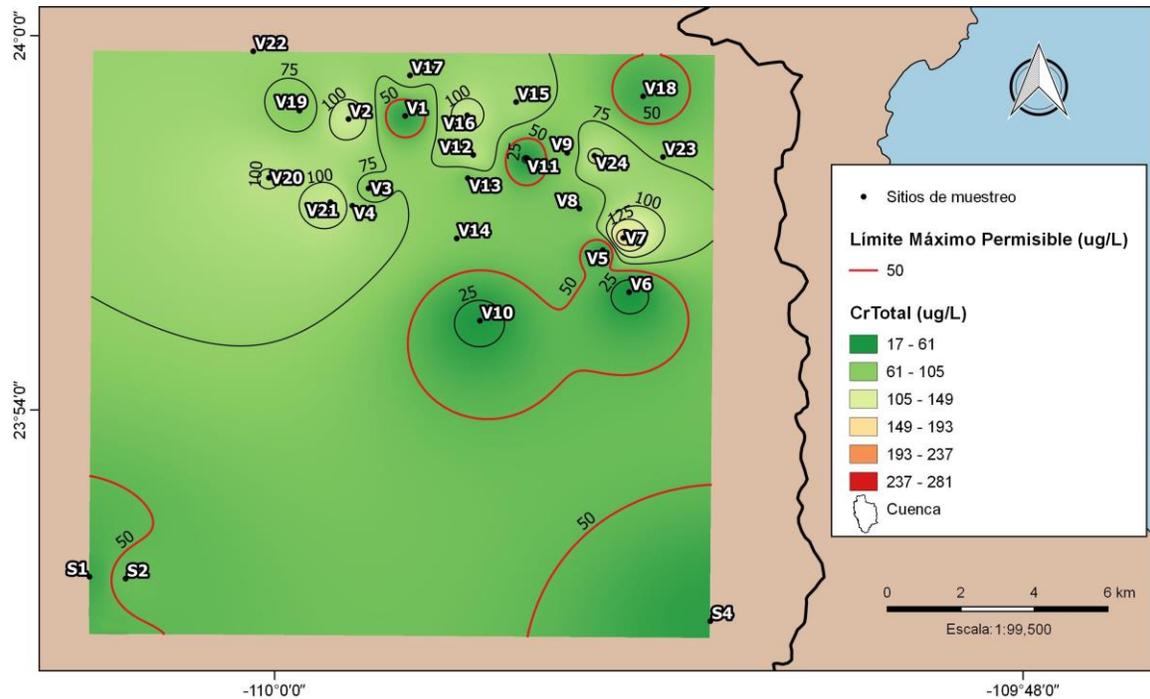


Figura 9.12 Distribución geográfica de las concentraciones de Cr_T ($\mu\text{g/L}$) durante la temporada de lluvias cálidas (octubre/2016).

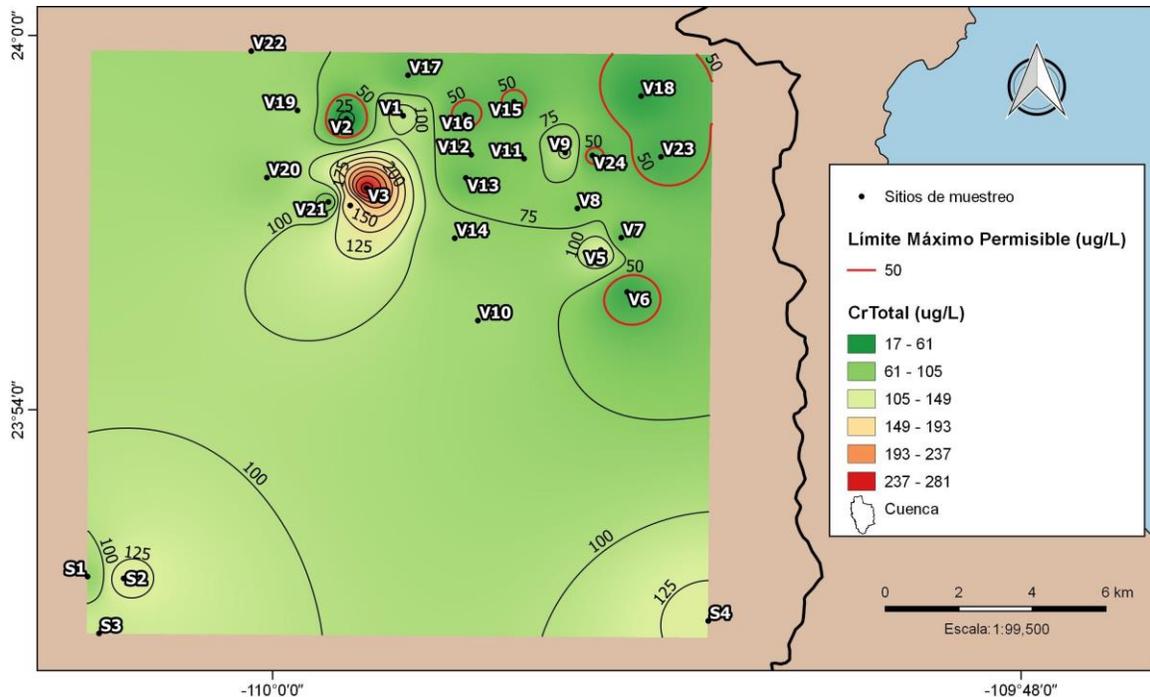


Figura 9.13 Distribución geográfica de las concentraciones de Cr_T ($\mu\text{g/L}$) durante la temporada de lluvias frías (febrero/2017).

Al realizarse un ANOVA se determinó que no existen diferencias significativas entre las concentraciones de los tres muestreos; no obstante, numéricamente el promedio obtenido en la temporada de secas fue mayor que los promedios de lluvias cálidas y lluvias frías; esto nos permite suponer que las concentraciones de Cr_T presentes durante la época de secas fueron después diluidas debido a las precipitaciones de las temporadas siguientes. Por otra parte, se observaron dos anomalías en los sitios V8 (San Vicente) con $206.4 \mu\text{g/L}$ y V3 (Las 400) con $281.3 \mu\text{g/L}$ en las temporadas de secas y lluvias frías respectivamente (Fig. 9.14), las cuales coinciden con los alineamientos de las fallas El Sargento y El Tecuán, mostrando mayores temperaturas que al centro y sur de la zona de estudio.

Un estudio realizado por Briseño (2014), en el cual se recolectaron muestras de aguas subterráneas en San Juan de los Planes en marzo del 2013, determinó la presencia de Cr_T con una concentración máxima de $1,689 \mu\text{g/L}$ en las coordenadas $23^\circ 55' 40.15'' \text{ N}$ y $109^\circ 55' 36.50'' \text{ O}$, y una mínima de $739 \mu\text{g/L}$, en las coordenadas $23^\circ 57' 19.80'' \text{ N}$ y $109^\circ 59' 06.42'' \text{ O}$ (sitio El Bajío), lo que nos

corroborar que el Cr se encuentra presente en el área a concentraciones superiores al límite permisible señalado por la NOM-127-SSA1-1994.

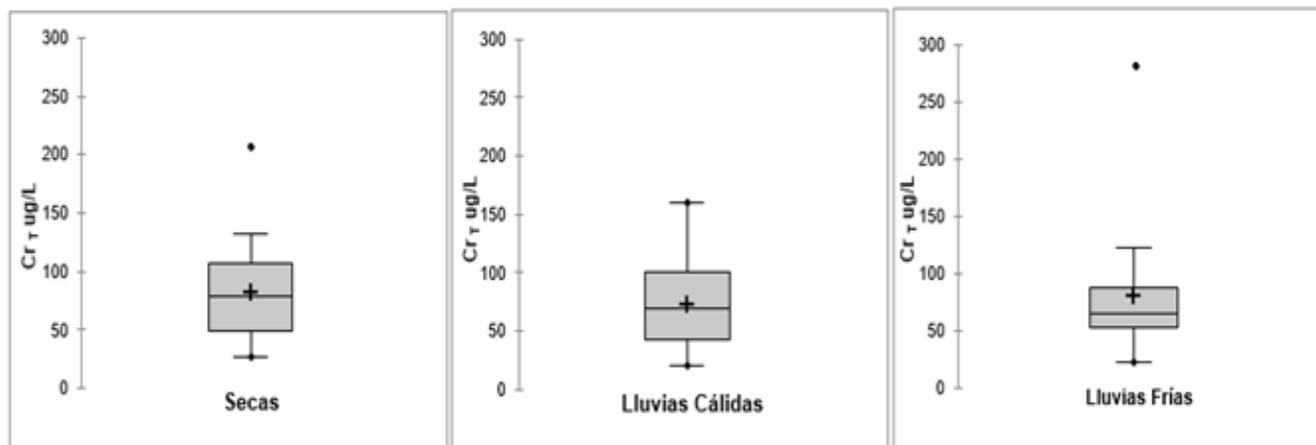


Figura 9.14 Diagramas de caja y bigote para concentraciones de Cr_T en las tres temporadas, señalando en círculos negros las concentraciones anómalas en dos sitios: V8 - 206.4 $\mu\text{g/L}$ (secas) y V3 - 281.3 $\mu\text{g/L}$ (lluvias frías).

Como se mencionó anteriormente, Briseño (2014) reportó que en “El Bajío” se presentó el valor mínimo de Cr_T (739 $\mu\text{g/L}$) en marzo de 2013. Este valor es aproximadamente 7 veces mayor a las concentraciones obtenidas en dicho sitio de muestreo en el presente estudio para los muestreos de abril y octubre de 2016 (107.6 y 108.8 $\mu\text{g/L}$, respectivamente) y febrero de 2017 (62.7 $\mu\text{g/L}$). En la tabla 9.1 se muestran las variables fisicoquímicas de ambos estudios, en la que no se presentan diferencias significativas entre ellos que pudieran darnos explicación de la notable disminución en las concentraciones de Cr_T con el paso del tiempo; sin embargo, pudiera obedecer a otros procesos como la dilución de la concentración de cromo debido a las lluvias o a la formación de precipitados de Cr.

Como se ha mencionado anteriormente, el origen de esas concentraciones podría ser geogénico debido a los aportes de los minerales en la zona o antropogénico como consecuencia de las actividades del ser humano; un posible aporte antropogénico de Cr podría estar relacionado con los agroquímicos empleados en los campos agrícolas de San Juan de los Planes (SJP).

De acuerdo con Defarge *et al.* (2018), el cromo al igual que otros elementos potencialmente tóxicos (EPT) podría encontrarse presente tanto como componente activo o como coadyuvante en los agroquímicos, señala además, que a diferencia de los componentes activos que cuentan con normas que delimitan su ingesta diaria, no existen normas que regulen las concentraciones o las clases de coadyuvantes, los cuales suelen ser mostrados en las etiquetas como porcentaje de coadyuvante sin desglosar los elementos que lo componen.

Dentro de la información recolectada sobre agroquímicos empleados en los campos agrícolas de SJP, el Cr no se encontró dentro de sus ingredientes activos. Sin embargo, debe tomarse en consideración el estudio de Defarge *et al.* (2018), y no descartar la presencia de cromo dentro de los coadyuvantes. De igual manera, debe considerarse que los agroquímicos señalados en las tablas 7.3 y 7.4 solo representan una porción de los químicos empleados y que otros trabajadores podrían estar empleando otros productos que no han sido mencionados en el presente estudio.

Tabla 9.1 Comparación en las variables fisicoquímicas del sitio El Bajío (V21), entre Briseño (2014) y el estudio actual.

Estudio	Fecha de muestreo	Temperatura (°C)	Conductividad (μS/cm)	pH
Briseño (2014)	marzo (2013)	38.0	1072	7
Presente estudio	abril (2016)	37.8	1160	8.4
	octubre (2016)	38.6	1180	-
	febrero (2017)	38.2	1220	7.9

Por otro lado, en San Juan de los Planes (SJP) se destaca la presencia de rocas graníticas, así como sistemas de vetas en esquistos y gneis en sus alrededores, específicamente en la sierra El Triunfo, en la que diversos autores (Garver *et al.*, 1996; Saracino y Phipps, 2008; Dermatas *et al.*, 2017) han confirmado que el cromo se encuentra presente en estos minerales. La sierra El Triunfo, se ubica cercana a la sierra San Antonio y ambas formaron durante muchos años el complejo minero El Triunfo-San Antonio el cual actualmente no se encuentra en operación; no obstante, es probable que los residuos mineros expuestos a la intemperie den origen a ambientes más ácidos, por ejemplo, con la oxidación de sulfuros, propiciado la disolución de los minerales y liberando cromo hacia las aguas subterráneas en SJP.

9.2.2 Límite permisible: NOM-127-SSA1-1994

Todos los promedios de las concentraciones de Cr_T obtenidos en cada temporada se encontraron por encima del límite máximo permisible (LMP) de $50 \mu\text{g/L}$ establecido en la modificación a la norma NOM-127-SSA1-1994 (Diario Oficial de la Federación, 2000) de nuestro país. De acuerdo con la norma, la especie relevante debido a su toxicidad es la hexavalente y durante su estadía en las aguas naturales puede variar de su especie hexavalente a trivalente dependiendo de las características fisicoquímicas del trayecto en que se encuentre.

Por tal motivo y con el fin de abarcar el mayor riesgo posible no se marca una diferencia entre ambas especies dentro de la norma. Tomando en consideración lo anterior, podemos observar en la figura 9.15 que, aunque los promedios de cromo son superiores al LMP ($50 \mu\text{g/L}$), los promedios de su especie hexavalente son inferiores a dicho límite.

El LMP de Cr en agua para uso y consumo humano señalado en nuestro país coincide con el valor establecido por otras organizaciones (WHO, 2011; Indian Standard, 2012); pero existen también otras como la US EPA (2016) que indican una concentración aún mayor, de $100 \mu\text{g/L}$, la cual rige a todos los estados de E.U.A. con excepción del estado de California, en donde el valor límite permanece en $50 \mu\text{g/L}$ (California Water Boards, 2018).

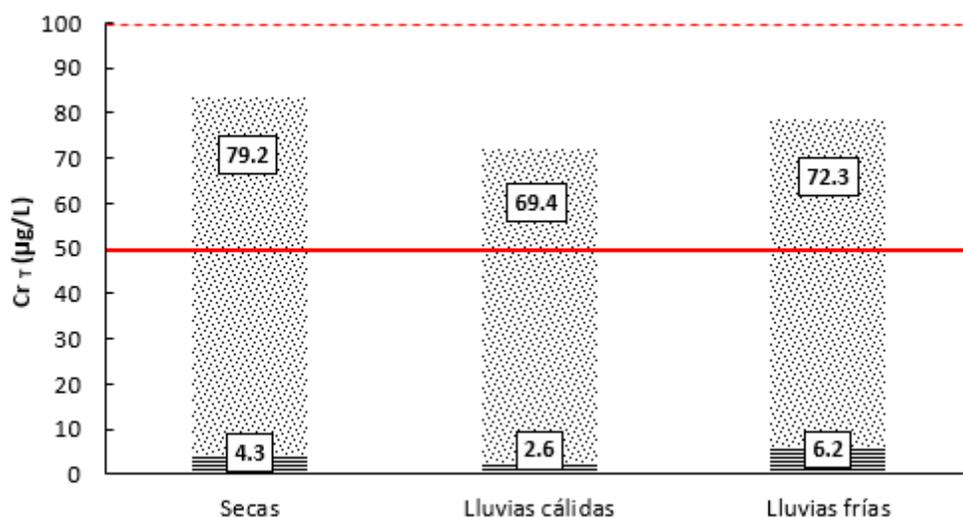


Figura 9.15 Promedios de las concentraciones de Cr_T , mostrando el aporte de cada especie ($Cr(VI)_T$ y $Cr(III)_T$) durante las tres temporadas. Se indican LMP de la NOM-127-SSA1-1994 (—) y US EPA (- -). $\equiv Cr(VI)$ $\cdot\cdot\cdot Cr(III)$.

9.2.3 Coeficiente de partición

El cromo presente en las aguas subterráneas, al igual que otros metales, puede presentarse en forma particulada o disuelta, y esto puede ser definido por medio del coeficiente de partición (K_D) el cual ha sido citado por diversos autores (Balls, 1989; Chiffolleau *et al.*, 1994; Zwolsman *et al.*, 1997; Guéguen y Dominik, 2003) con la siguiente ecuación:

$$K_D = \frac{C_P}{C_D}$$

Donde:

C_P = concentración de fase particulada

C_D = concentración de fase disuelta

Los resultados de coeficientes de partición para las concentraciones de Cr_T durante las tres temporadas: secas, lluvias cálidas, y lluvias frías (Anexo 9), tuvieron valores elevados, lo que nos indica que tiene un coeficiente de disolución muy bajo. Esto puede deberse al intercambio iónico, el cual es un proceso en el que los iones disueltos presentes en el agua subterránea son atraídos por iones de carga opuesta ubicados en las superficies de sólidos, en este caso, del material particulado (Deutsch, 1997; Fetter, 2001; Appelo y Postma, 2005).

Existen también, otros procesos geoquímicos que pueden contribuir a esto como las interacciones con los compuestos orgánicos, en donde se forman complejos, normalmente de quelatos (Manahan, 2011); por otro lado, Greenaway y Rankine (1992) mencionan que, ante la presencia de sulfuros y cationes metálicos, pueden formarse sulfuros metálicos que se caracterizan por una baja solubilidad, favoreciendo la precipitación. Además, algunos EPT tienden a ser adsorbidos ante la presencia de carbonatos (Dekov *et al.*, 1998; Galán y Romero, 2008).

Town y Filella (2002) observaron que bajo condiciones de pH ácido los metales se presentan en mayores concentraciones en la fase disuelta y a valores de pH neutro y básico la concentración es mayor en la fase particulada.

En el presente estudio, las aguas subterráneas muestran valores de pH de neutros a básicos, lo cual también podría responder a la disminución en el coeficiente de disolución; no obstante, Shiller (1997)

indicó que la correlación entre el pH y las fases dependerá de diversas condiciones fisicoquímicas presentes dentro del sistema acuático. De igual manera, diversos autores (Vázquez *et al.*, 2008; Amaringo y Anaguano, 2013) señalan que dependerá también del punto de carga cero (ZPC, siglas en inglés), el cual nos permite conocer la capacidad que un medio sólido tiene para retener contaminantes iónicos, como los EPT.

Con la finalidad de conocer el comportamiento de los valores de K_D durante las tres épocas y después de determinar que los datos no presentaban una distribución normal, se efectuó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis en la que se indicó que existían diferencias significativas entre los K_D de cada temporada, por tal motivo se realizó una prueba de comparación múltiple de Dunn en donde la temporada de secas destacó al presentar una media significativamente inferior a las medias de las temporadas de lluvias cálidas y lluvias frías. Esta disminución durante la época de secas pudiera estar relacionada a una mayor competencia por parte de otros iones presentes en el agua para unirse a la superficie del material particulado.

9.2.4 Especiación

En la introducción, se mencionó que los estados de oxidación más estables en el cromo son el III (trivalente) y VI (hexavalente), siendo esta última más soluble y tóxica; debido a esto, nos interesó determinar la especie dominante en el presente estudio, para lo cual se calculó el porcentaje de $Cr(VI)_T$ con respecto al Cr_T utilizando la ecuación:

$$\% Cr(VI)_T = \left(\frac{Cr(VI)_T}{Cr_T} \right) (100)$$

Los promedios de los porcentajes de $Cr(VI)_T$ durante las temporadas de secas, lluvias cálidas y lluvias frías fueron 7, 5 y 10 %, respectivamente (Anexo 10). En el histograma de la figura 9.16 se visualiza lo anterior, destacándose una dominancia por parte de la especie trivalente durante las tres épocas climáticas; lo cual podría obedecer a que el cromo en las aguas subterráneas de SJP se encuentra preferentemente en forma particulada que por la disuelta, lo cual concuerda con lo informado por Pazos (2008) y EPA (2010), que mencionan que la especie trivalente se encuentra generalmente en el material particulado, en contraste con la especie hexavalente que tiene una alta solubilidad.

Por medio de los porcentajes obtenidos, se aprecia que existe una mayor concentración de $\text{Cr (VI)}_{\text{T}}$ en la época de lluvias frías. Para corroborar las diferencias entre las tres temporadas, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis, debido a que los datos no presentaron una distribución normal. Los resultados comprobaron que existían diferencias significativas entre ellas y la prueba de comparación múltiple de Dunn determinó que en lluvias cálidas (media=2.7 $\mu\text{g/L}$) presentó una media significativamente menor que lluvias frías (media=5.8 $\mu\text{g/L}$).

Por otra parte, las concentraciones de $\text{Cr (VI)}_{\text{D}}$ mostraron un 64% de estaciones con valores por debajo del límite de detección (Anexo 11); a causa de esto, se decidió que no se contaba con una cantidad de observaciones adecuadas para determinar las concentraciones de $\text{Cr (VI)}_{\text{P}}$, a partir de una diferencia entre el Cr (VI) y el $\text{Cr (VI)}_{\text{D}}$. Asimismo, al ser necesarias las concentraciones de ambas fases del $\text{Cr (VI)}_{\text{T}}$ para determinar los valores de dichas fases en $\text{Cr (III)}_{\text{T}}$, no fue posible disponer de esos resultados (Anexo 12).

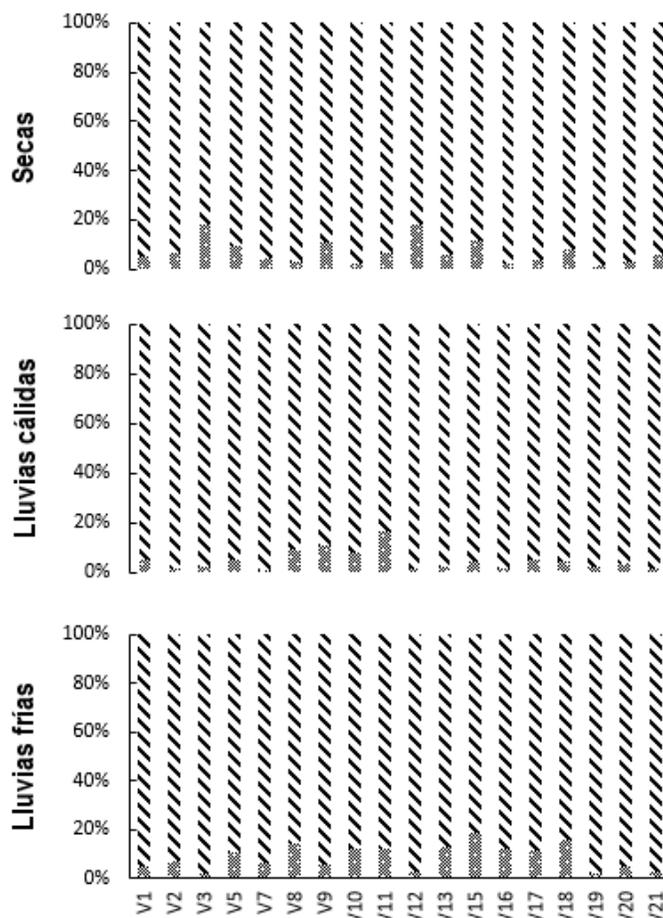


Figura 9.16 Porcentaje de especiación durante las tres temporadas. Cr (III) : , Cr (VI) : 

9.3 Comportamiento de las variables y sus relaciones con el Cr

Para comprender el tipo de relaciones existentes entre las variables que previamente se han analizado por separado (temperatura, conductividad eléctrica, pH, iones mayoritarios, Cr_T , K_D y % Cr (VI)_T), se realizó un análisis factorial utilizando el método de extracción de componentes principales, empleando los datos obtenidos durante las tres temporadas (secas, lluvias cálidas y lluvias frías). Esto dio como resultado tres factores principales, que en conjunto explican el comportamiento de las variables con una varianza acumulada de 76 % (Tabla 9.2).

Tabla 9.2 Información sobre los 3 factores obtenidos en el análisis estadístico

Factor	Valor Eigen	% varianza	% de varianza acumulada
1	6.0	46	46
2	2.3	18	64
3	1.6	12	76

En la tabla 9.3 se muestran las cargas resultantes para cada uno de los tres factores. El primer factor presenta un 46% de la varianza en los datos, y está influenciado principalmente por la conductividad eléctrica (CE), Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y Cl^- , de una manera positiva, y en forma negativa por el pH. Esto demuestra que, a su vez, la CE está gobernada por los iones mayoritarios mencionados, presentando una congruencia con el tipo de agua clorurada sódica que, de acuerdo a nuestros resultados, rige en la zona de estudio. Adicionalmente, Briseño (2014) señala que minerales como la calcita, dolomita, fluorita, yeso y anhidrita están siendo disueltos en San Juan de los Planes, permitiendo la presencia de los iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} .

El segundo factor explica en un 18% el comportamiento entre las variables, indicando que los iones K^+ , HCO_3^- y K_D juegan un papel importante en este factor y se asocian de manera positiva entre sí.

Finalmente, el tercer factor presenta un porcentaje de varianza de 12%, y en este se influyen, con valores de carga negativos, el Cr_T y la temperatura, lo que indica que al presentarse un aumento en la temperatura las concentraciones de Cr_T incrementaran. Contrariamente, el % Cr (VI)_T, tiene una influencia positiva en este factor; esto quiere decir, que los procesos que producen un aumento en

las concentraciones de Cr_T favorecen el aporte de la especie trivalente, o aquellos que conllevan a la disminución del nivel de Cr_T , permiten su mayor retención.

Tabla 9.3 Valores de carga para cada factor, señalando en negritas los valores de carga superiores a 0.60.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Cr_T	-0.27	-0.18	-0.68
Temperatura	0.01	0.04	-0.71
CE	0.93	0.27	0.16
pH	-0.63	-0.48	-0.38
%Cr(VI) _T	0.09	0.13	0.86
K_D	0.04	0.89	-0.17
Ca^{2+}	0.93	-0.11	-0.13
Mg^{2+}	0.96	-0.15	0.05
Na^+	0.82	0.42	0.22
K^+	0.04	0.77	0.23
HCO_3^-	0.25	0.86	0.26
SO_4^{2-}	0.36	0.40	0.30
Cl^-	0.89	0.30	0.11

Nota: Número de datos analizados: 22

Para una mejor comprensión de lo anterior, se efectuó un gráfico de 3 dimensiones (Fig. 9.17), en donde se observa el agrupamiento de las variables en diferentes zonas. Asimismo, se realizaron diagramas en 2 dimensiones confrontando el Factor 1 vs Factor 2 y el Factor 2 vs Factor 3 (Fig. 9.18 y 9.19, respectivamente).

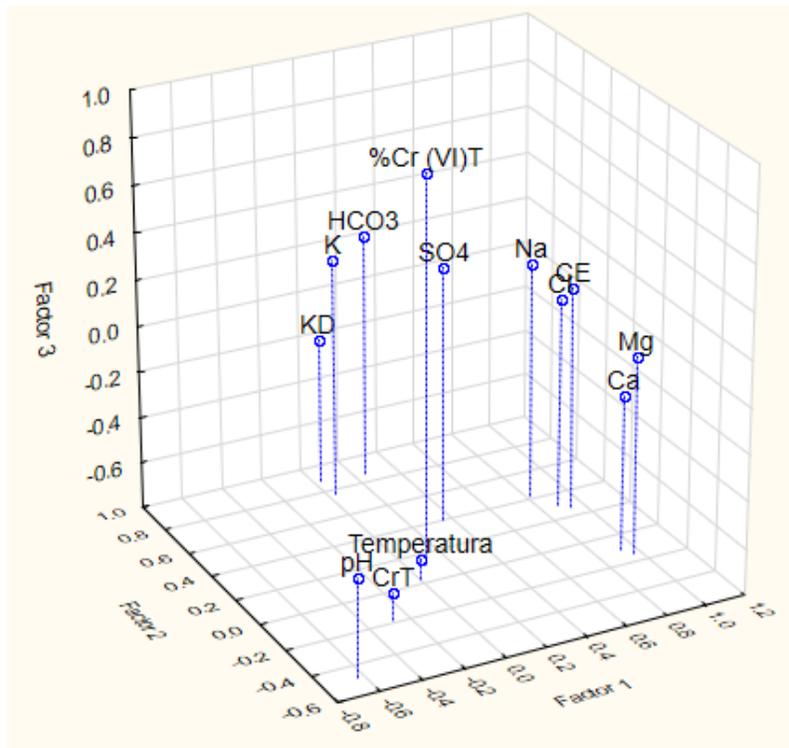


Figura 9.17 Gráfico de 3 dimensiones, señalando cada factor en un eje

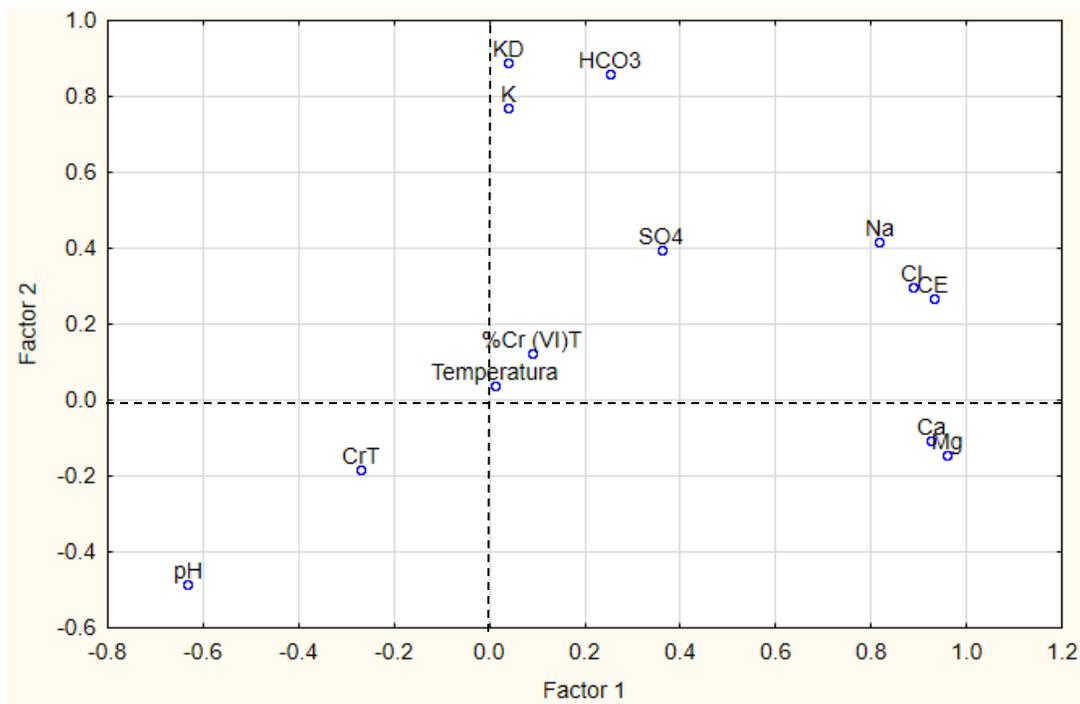


Figura 9.18 Gráfico en 2 dimensiones, señalando en el eje X el Factor 1 y en el eje Y el Factor 2.

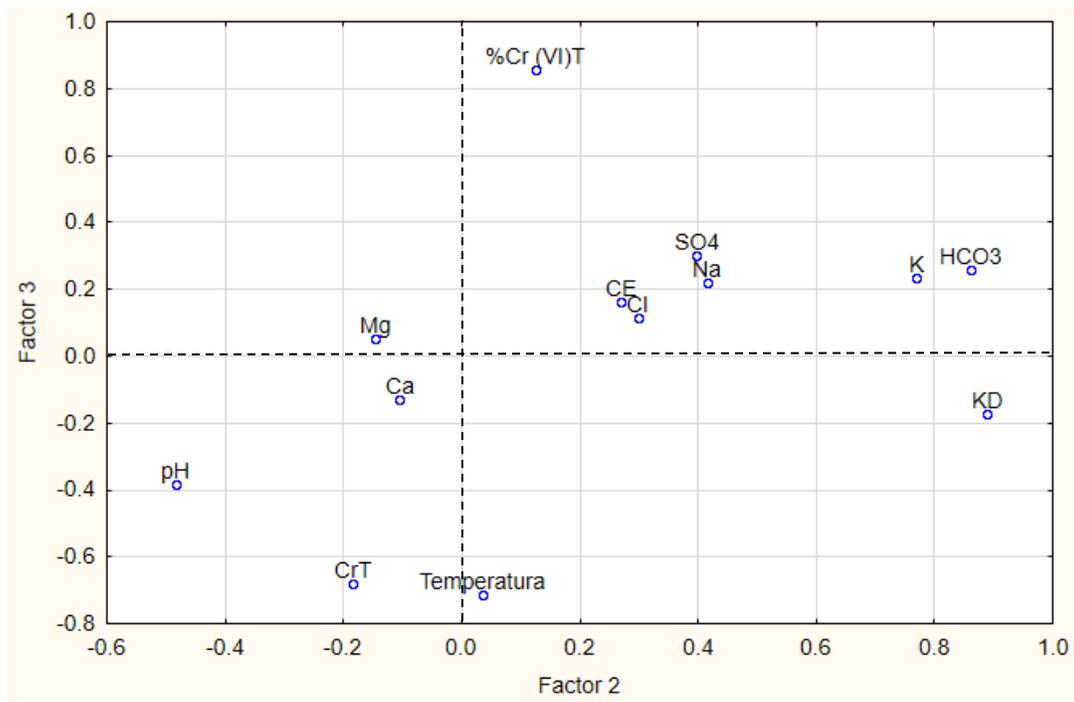


Figura 9.19 Gráfico en 2 dimensiones, señalando en el eje X el Factor 2 y en el eje Y el Factor 3.

10. CONCLUSIONES

La temperatura de las aguas subterráneas de San Juan de los Planes tuvo promedios superiores a los 30°C durante los tres muestreos, con el mayor promedio en la temporada de lluvias cálidas de 32.9°C. Las estaciones con temperaturas más altas fueron La Alambrada y El Bajío, las cuales se ubican cerca de la Falla El Sargento (FES). Por otro lado, los sitios cercanos a la falla el Tecuán muestran también temperaturas altas, sin embargo, no son superiores a los valores encontrados cercanos a la FES, lo que nos permite asumir la presencia de hidrotermalismo en la zona de estudio. Las menores temperaturas en San Juan de los Planes (SJP) se encontraron en la falla Agua Caliente, ubicada al centro del área.

La conductividad eléctrica presentó valores característicos de acuíferos costeros presentando una distribución de agua dulce, salobre y salina, destacando el sitio Agua Amarga (V8). En este sitio se observó una clara intrusión salina debido a que se localiza en una zona de inversión del gradiente hidráulico, el cual es ocasionado por el cono de abatimiento que genera el empleo de bombas en San Juan de los Planes.

El pH mostró valores neutros y básicos, los cuales concuerdan con los valores típicos en aguas subterráneas. El tipo de agua en el valle de SJP es clorurada sódica, concordando con lo descrito en estudios anteriores y resaltando la influencia de la intrusión salina en la zona a causa de su cercanía a la Bahía de la Ventana y los conos de abatimiento.

Se encontró la presencia de cromo dentro del área de estudio, mostrando una distribución geográficamente heterogénea en sus concentraciones de C_{Cr} , con valores promedio de 83.7 ± 45.2 , 71.9 ± 38.4 y 78.5 ± 53.6 $\mu\text{g/L}$ (secas, lluvias cálidas y lluvias frías, respectivamente); además, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de C_{Cr} en las 3 temporadas. Destacó la presencia de dos valores anómalos en los sitios San Vicente (secas) y Las 400 (lluvias frías), las cuales coinciden con los alineamientos de las fallas El Sargento y El Tecuán, donde se presentaron mayores temperaturas que al centro y sur de la zona de estudio.

Las concentraciones de C_{Cr} resultaron superiores al límite máximo permisible establecido en la norma NOM-127-SSA1-1994 de nuestro país (50 $\mu\text{g/L}$). De acuerdo con los valores bajos obtenidos

en el % Cr (VI)_T, la especie trivalente predomina en las muestras, la cual representa un peligro menor en comparación con la especie hexavalente; sin embargo, debe considerarse que el agua potable se encuentra en contacto con un ambiente oxidante en donde las concentraciones de Cr(VI) podrían aumentar.

Por otra parte, los valores elevados de K_D indican que las muestras tienen un coeficiente de disolución muy bajo, y por ende, existe una mayor concentración de Cr dentro de la fase particulada.

Las concentraciones de Cr (VI) en la fase disuelta se encontraron por debajo del límite de detección en un 64% de las muestras, por lo que se consideró que no eran observaciones suficientes para calcular por diferencia las concentraciones en su fase particulada. Al no contar con ambas fases del Cr (VI), no fue posible determinar la fase dominante, pero considerando la alta solubilidad que distingue al Cr (VI), nos hace suponer que existirían mayores niveles en la fase disuelta.

El análisis estadístico señaló que al ocurrir un aumento en la temperatura de los sitios, las concentraciones de Cr_T incrementarán. Indicó además, que un aumento en las concentraciones de Cr_T favorece el aporte de la especie trivalente, o aquellos que conllevan a la disminución del nivel de Cr_T, permiten su mayor retención.

A pesar de lo citado en otros estudios sobre la dominancia de la especie hexavalente en zonas con pH neutro y básico, esto no se vio reflejado en el presente estudio, lo cual podría deberse por un lado, a una mayor influencia de la temperatura, y por el otro, a que dentro de las aguas subterráneas se presenta un ambiente reductor, permitiendo una mayor presencia de la especie trivalente.

11. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. ATSD. (2012).** Toxicological Profile for Chromium. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services.
- Albert, L. (2002).** Curso básico de toxicología ambiental. CDMX: Limusa.
- Amaringo, F., & Anaguano, A. (2013).** Determinación del punto de carga cero y punto isoeléctrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 27-36.
- American Public Health Association. APHA. (1999).** Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, D.C.: American Public Health Association.
- American Society for Testing and Materials. ASTM. (2001).** Standard Specification for Reagent Water. Standard D1193. Annual Book of Standard.
- Appelo, C. A., & Postma, D. (2005).** Geochemistry, groundwater and pollution. Amsterdam: A. A. Balkema Publishers.
- Armienta, M., Rodríguez, R., Queré, A., Juárez, F., Cenicerros, N., & Aguayo, A. (1993).** Groundwater pollution with chromium in Leon Valley, México. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-13.
- Azario, R., Salarezza, S. I., & García, M. (2010).** Eefcto del cromo hexavalente y trivalente sobre el crecimiento de EScherichia coli ATCC 35218. *Revista Información Tecnológica*, 51-56.
- Baeza, A. (2003).** Mrocbureta a microescala total para titulometría. *Revista Chilena de Educación Científica*, 4-7.
- Balls, P. W. (1989).** The partition of trace metals between dissolved and particulate phases in european coastal waters: a compilation of field data and comparison with laboratory studies. *Netherlands Journal of Sea Research*, 7-14.
- Briseño, Á. (2014).** Evaluación de la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea en la Cuenca de San Juan de los Planes, Baja California Sur. CDMX: Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- California Water Boards.State Water Resources Control Board. (2019).** Chromium-6 Drinking Water MCL. Recuperado el 08/05/19 de https://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/Chromium6.html
- California Water Borads. State water resources control board. (2018).** MCL for total chromium. Recuperado el 03/11/18 de https://www.waterboards.ca.gov/drinking_water/certlic/drinkingwater/Chromium6.html
- Calvet, R. (1989).** Adsorption of organic chemicals in soils. *Environmental Health Perspectives*, 145-177.
- Candela, L. (2003).** El transporte de los plaguicidas a las aguas subterráneas. *Boletín Geológico y MInero*, 409-417.
- Cañizares, R. (2000).** Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 131-143.

- Carillo, A., & Drever, J. (1998).** Adsorption of arsenic by natural aquifer material in the San Antonio-El Triunfo mining area, Baja California, México. *Environmental Geology*, 251-257.
- Casares, M. (2012).** Biodisponibilidad y toxicidad de metales pesados en aguas naturales con características físico-químicas extremas: Bases para su monitoreo y remediación. Buenos Aires: Tesis Doctoral. Facultad de ciencias exactas y naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Casas, J., López, M., Salinas, M., Gisbert, J., Giménez, E., García, F., Moyano, F. (2017).** Guía para la realización de un estudio ambiental: el caso de la cuenca del río Adra. Almería: Universidad de Almería.
- Chávez, Á. (2010).** Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtumbre y de las posibles formas de removerlo. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*.
- Chiffolleau, J.-F., Cossa, D., Auger, D., & Truquet, I. (1994).** Trace metal distribution, partition and fluxes in the Seine estuary (France) in low discharge regime. *Marine Chemistry*, 145-158.
- Comisión Nacional del Agua. (1997).** Estudio hidrogeológico y simulación hidrodinámica del acuífero del valle de San Juan de los Planes. B.C.S. Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Comisión Nacional del Agua. (2003).** Estudio de caracterización de la intrusión salina en el acuífero de los planes B.C.S. Gerencia regional de la península de Baja California. Gerencia estatal en Baja California Sur.
- Comisión Nacional del Agua. (2009).** Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Los Planes (0323), Estado de Baja California Sur, La Paz. *Diario Oficial de la Federación*.
- Comisión Nacional del Agua. (2017).** Estadísticas del agua en México. CDMX: Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 21/08/18 de http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf
- Comisión Nacional del Agua. (2018).** Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Los Planes (0323), Estado de Baja California Sur. CDMX: *Diario Oficial de la Federación*.
- Consejo de Recursos Minerales (México). (1999).** Monografía geológico-minera del estado de Baja California Sur. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Coordinación de Minería.
- Cruz, V. (2009).** Contaminación de agua potable por cromo hexavalente. caso de estudio: Colonia Lechería, municipio de Tultitlán, Estado de México. D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Defarge, N., Spiroux de Vendomois, J., & Séralini, G. E. (2018).** Toxicity of formulants and heavy metals in glyphosate-based herbicides and other pesticides. *Toxicology Reports*, 156-163.
- Del Rosal, A. (2003).** Recarga natural en la cuenca de San Juan de los Planes, Baja California Sur, México. La Paz: Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Del Valle, M., & García, N. (2005).** Impacto de las sequías en la recarga natural al acuífero libre. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos-RBRH*, 49-60.
- Delgado-Rodríguez, J. (2012).** Estudio de la contaminación por metales pesados en la Cuenca Baja del Río Guadiana. Huelva: Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Huelva.

- Dermatas, D., Panagiotakis, I., Mpouras, T., & Tettas, K. (2017).** The origin of hexavalent chromium as a critical parameter for remediation of contaminated aquifers. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 331-337.
- Deutsch, W. (1997).** Groundwater chemistry. Fundamentals and applications to contamination. Washington, D.C.: Lewis Publishers.
- Diario Oficial de la Federación. DOF. (2014).** Acuerdo que establece la clasificación y codificación de mercancías cuya importación y exportación está sujeta a regulación por parte de las dependencias que integran la Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertiliza. CDMX. Recuperado el 15/03/18 de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/22697/A481.pdf>
- Doménech, X. (2000).** Química ambiental: el impacto ambiental de los residuos. Madrid: Miraguano.
- Environment Protection and Waste Management Sectional Committee. (2003).** IS 3025-52 (2003). Methods of Sampling and Test (Physical and Chemical) for Water and Wastewater. Part 52: Chromium. New Delhi: Bureau of Indian Standards .
- Environmental Protection Agency. (1998).** Toxicological review of hexavalent chromium. Washington D.C.: United States Environmental Protection Agency.
- Environmental Protection Agency. (2018).** Drinking Water Contaminants. Recuperado el 11/08/2018 de <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>.
- Environmental Systems Research Institute. (2016).** ArcGIS for desktop. Recuperado el 22/07/19 de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-idw-works.htm>
- Fernández, E. (2008).** Los hidrogramas y otros sistemas de representación del quimismo de las aguas. Madrid: Grafinat.
- Fertilizantes GL. (2018).** Fertilizantes GL, S.A. de C.V. Recuperado el 09/03/19 de <http://www.fertilizantesgl.com/FERTILIZANTESGL/fichatriple15.pdf>
- Fetter, C. W. (2001).** Applied hidrogeology. New Jersey: Prentice Hall.
- Flegal, A. R., Smith, G. J., Gill, G. A., & Sañudo-Wilhelmy, S. y. (1991).** Dissolved trace element cycles in the San Francisco Bay estuary. *Marine Chemistry*, 329-363.
- Flores, E., & Del Rosal, A. (2002).** Estudio integral para el control de avenidas y recarga artificial del sistema acuífero de la cuenca de San Juan de los Planes. La Paz: Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Galán, E., & Romero, A. (2008).** Contaminación de suelos por metales pesados. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, 48-60.
- Garver, J. I., Royce, P. R., & Smick, T. A. (1996).** Chromium and nickel in shale of the Taconic foreland: a case of study for the provenance of fine-grained sediments with an ultramafic source. *Journal of Sedimentary Research*, 100-106.
- Gobierno del Estado de Baja California Sur. (2013).** Datos básicos de Baja California Sur. La Paz: Secretaría de Promoción y Desarrollo Económico. Dirección de Informática y Estadística. Recuperado el 20 de Junio de 2015

- Gohua, H., Saiers, E., Brooks, S., Jardine, P., & Jayachandran, K. (2001).** Chromium transport, oxidation and adsorption in manganese-coated sand. *Journal of Contaminant Hydrology*, 311-334.
- González, A., Fernández, S., Delgado, J., Falcón, I., Barrientos, V., Juncosa, R., Martín, P. (2008).** Determinación del punto isoelectrico de residuos de grano fino y su potencial uso en la neutralización de aguas ácidas. *Revista de la Sociedad Española de Minerología*, 255-256.
- Granato, D., Santos, J., Escher, G., Ferreira, B., & Maggio, R. (2018).** Use of principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) for multivariate association between bioactive compounds and functional properties in foods: a critical perspective. *Trends in Food Science & Technology*, 83-90.
- Grassi, M., Shi, B., & Allen, H. (2000).** Partition of copper between dissolved and particulate phases using aluminum oxide as an aquatic model phase: effects of pH, solids and organic matter. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 516-524.
- Greenaway, A. M., & Rankine, J. (1992).** Elemental concentrations in coastal sediments from Hellshire, Jamaica. *Marine Pollution Bulletin*, 390-397.
- Guéguen, C., & Dominik, J. (2003).** Partitioning of trace metals between particulate, colloidal and truly dissolved fractions in a polluted river: the Upper Vistula River (Poland). *Applied Geochemistry*, 457-470.
- Harter, T. (2003).** Basic concepts of groundwater hydrology. Oakland: University of California, Division of Agriculture and Natural Resources. Obtenido de <http://groundwater.ucdavis.edu/files/156562.pdf>
- Indian Standards. (2012).** IS 10500:2012. Drinking water-specification. New Delhi: Bureau of Indian Standards.
- International Agency for Research on Cancer. (2012).** Chromium (VI) compounds. En *Arsenic, metals, fibres and dusts. Volume 100C: a review of human carcinogens* (págs. 147-167). World Health Organization.
- Kazakis, N., Kantiranis, N., Klaitzidou, K., Kaprara, E., Mitrakas, M., Frei, R., Filippidis, A. (2017).** Origin of hexavalent chromium in groundwater: Te example of Sarigkiol Basin, Northern Greece. *Science of the Total Environment*, 552-566.
- Kiraly, L. (1995).** Numerical simulation in "National Report from Switzerland". *Karts Groundwater Protection*, 279-304.
- Kumar, A. R., & Riyazuddin, P. (2010).** Chromium speciation in a contaminated groundwater: redox processes and temporal variability. *Environmental Monitoring and Assessment*, 647-662.
- Langard, S., & Norseth, T. (1979).** Cancer in the gastrointestinal tract in chromate pigment workers. *Arhiv za higijenu rada I toksikologiju*, 301-304.
- López, F. (2000).** Avances en estudios de recursos hídricos: métodos geoquímico-isotópicos. En *Jornadas técnicas sobre aguas subterráneas y abastecimiento urbano* (págs. 257-266). Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.
- López, J. G. (2001).** Técnicas de biorrecuperación in situ en acuíferos contaminados por metales pesados. *Investigación, Gestión y Recuperación de Acuíferos Contaminados.*, 233-243.

- Manahan, S. (2011).** Introducción a la química ambiental. D.F.: Editorial Reverté.
- Martínez-Colón, M., Hallock, P., & Green-Ruiz, C. (2009).** Strategies for using shallow-water benthic foraminifers as bioindicators of potentially toxic elements: a review. *Journal of Foraminiferal Research*, 278-299.
- Matteoda, E., Blarasin, M., Damilano, G., Cabrera, A., & Giuliano, A. (2009).** Cromo en aguas subterráneas y superficiales en el entorno de una curtiembre, relación con valores de fondo natural. Elena, Córdoba. Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 617-630.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2008).** Libro Digital del Agua. Recuperado el 03/05/18 de https://servicio.mapama.gob.es/sia/visualizacion/lda/fisico/hidrogeologia_acuiferos.jsp
- Mishra, H., & Bhusan, H. (2013).** Environmental scenario of chromite mining at Sukinda Valley. *International Journal of Environmental Engineering and Management*, 287-292.
- Mollema, P., & Antonellini, M. (2013).** Seasonal variation in natural recharge of coastal aquifers. *Hidrogeology Journal*, 787-797.
- Mook, W. (2002).** Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico: principios y aplicaciones. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, Serie: Guías y Manuales.
- Moore, W. (2010).** The effect of submarine groundwater discharge on the ocean. *Annual Review of Marine Science*, vol.2, 59-88.
- Morell, I., & Hernández, F. (2000).** El agua en castellón: un reto para el siglo XXI. Castellón de la Plana: Universidad de Jaume I.
- Motyka, J. (1998).** A conceptual model of hydraulic networks in carbonate rocks, illustrated by examples from Poland. *Hydrogeology Journal*, 469-482.
- Nava-Sánchez, E. H. (1992).** Sedimentología de la cuenca San Juan de los Planes, Baja California Sur, México. La Paz: Tesis Doctoral. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas.CICIMAR-IPN.
- Nriagu, J. (1990).** Global metal pollution: poisoning the biosphere? *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 7-33.
- Nriagu, J., & Nieboer, E. (1988).** Chromium in the natural and human environments. Ontario: Wiley.
- Núñez, J., Rodríguez, J., Coto, J., Salgado, V., & Borbón, H. (2013).** Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro. *Tecnología en Marcha*, 27-36.
- Orozco, C., Pérez, A., González, N., Rodríguez, F., & Alfayate, J. (2003).** Contaminación ambiental: una visión desde la química. España: Thomson.
- Palmer, C., & Wittbrodt, P. (1991).** Processes affecting the remediation of chromium-contaminated sites. *Environmental Health Perspectives*, 25-40.
- Pazos, P. (2008).** Biodisponibilidad de cromo en sedimentos marinos de la Ría de Arousa. Santiago de Compostela: Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.USC.
- Pérez, C., Echeverri-Sánchez, A., & Urrutia-Cobo, N. (2016).** Aproximación de la recarga de agua subterránea en el norte del Departamento del Cauca, Colombia. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 51-57.

- Pérez-Briceño, A. (2009).** Elaboración de un modelo hidrogeológico de la cuenca de San Juan de los Planes, B.C.S., mediante el uso de un sistema de información geográfica (SIG) y un modelo digital de elevación (MDE). Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Pimienta, J. (1980).** La captación de aguas subterráneas. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S. A.
- Posada-Ayala, I. (2011).** Geoquímica ambiental del distrito minero San Antonio, sedimentos de los arroyos de la cuenca de San Juan de los Planes y plataforma continental de Bahía La Ventana, B.C.S, México. La Paz: Tesis de maestría.
- Praveena, S., Kwan, O., & Aris, A. (2012).** Effect of data pre-treatment procedures on principal component analysis: a case study for mangrove surface sediment datasets. *Environmental monitoring and assessment.*, 6855-6868.
- Pulido, A. (2014).** Nociones de hidrogeología para ambientólogos. Almería: Editorial Universidad de Almería.
- Robertson, F. (1975).** Hexavalent chromium in the groundwater in Paradise Valley, Arizona. *Groundwater*, 516-527.
- Roig, B. (2006).** Evaluación de las tecnologías de tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con Cromo. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Sabath, E., & Ludivina, O. (2012).** Medio ambiente y riñón: nefrotoxicidad por metales pesados. *Revista Nefrología*, 279-286.
- Sadeghi, H., Prince, F., Sadeghi, S., & Labelle, H. (2000).** Principal component analysis of the power developed in the flexion/extension muscles of the hio in able-bodied gait. *Medical Engineering & Physics*, 703-710.
- Sánchez, F. (2017).** Hidrología Superficial y Subterránea. Salamanca: Createspace Independent Publishing Platform.
- Saracino, A., & Phipps, H. (2008).** Groundwater contaminants and contaminant sources. En T. Harter, & L. Rollins, *Watersheds, groundwater and drinking water: a practical guide* (págs. 73-82). Oakland: University of California.
- Schaaf, P., Bohnel, H., & Pérez-Venzor, J. (2000).** Pre-Miocene palaeogeography of the Los Cabos Block, Baja California Sur: geochronological and paleomagnetic constraints. *Tectonophysics*, 53-69.
- Secretaría de Economía. (2014).** NMX-AA-044-SCFI-2014. Análisis de aguas-Medición de cromo hexavalente en aguas naturales, salinas, residuales y residuales tratadas-Método de prueba. CDMX: Secretaría de Economía.
- Secretaría de Salud. (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. CDMX: Diario Oficial de la Federación.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2018).** Recuperado el 14/09/19 http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos_a.php
- Servicio Geológico Mexicano. (1996).** Carta Geológico-Minera San Antonio F12-B13. Secretaría de Economía.

- Servicio Geológico Mexicano. (2016).** Panorama minero del estado de Baja California Sur. Secretaría de Economía.
- Servicio Geológico Minero. (2018).** Panorama minero del estado de Baja California Sur. CDMX: Secretaría de Economía.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2010).** Información Climatológica . Recuperado el 26/10/16 de http://smn.cna.gob.mx/es/?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75
- Shanker, A., Cervantes, C., Loza-Tavera, H., & Avudainayagam, S. (2005).** Chromium toxicity in plants. *Environment International*, vol. 31, 739-753.
- Shiller, A. (1997).** Dissolved trace elements in the Mississippi River: seasonal, interannual, and decadal variability. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4321-4330.
- Singh, S., Mahmood, G., & Chinche, D. (2013).** Impact assessment of industrial waste on groundwater and its remediation: a case study of hexavalent chromium contamination of Lohiya Nagar, Ghaziabad. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 1841-1854.
- Sráček, O., & Zeman, J. (2004).** Introduction to environmental hydrogeochemistry. Masaryk University.
- Sutton, R. (2010).** Chromium-6 in United States tap water. Environmental Working Group.
- Tchounwou, P., Yedjou, C., Patlolla, A., & Sutton, D. (2012).** Heavy metals toxicity and the environment. *National Institute of Health*, 133-164.
- Tindall, J. A., & Kunkel, J. R. (1999).** Unsaturated zona hidrology for scientist and engineers. New Jersey: Prentice Hall.
- Town, R., & Filella, M. (2002).** Size fractionation of trace metal species in freshwaters: implications for understanding their behaviour and fate. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 277-297.
- Vullo, D. (2003).** Microorganismos y metales pesados: una interacción en beneficio del medio ambiente. *Revista Química Viva*, 93-104.
- World Health Organization. (2011).** Guidelines for drinking- water quality. World Health Organization.
- Winter, T., Harvey, J., Lehn, O., & Alley, W. (1999).** Groundwater and surface water: a single resource. Denver: U.S. Geological Survey.
- Zar, J. (1996).** Biostatistical Analysis. New Jersey: Prentice-Hall.
- Zayed, A., Mel, C., Qian, J.-H., & Terry, N. (1998).** Chromium accumulation, translocation and chemical speciation in vegetable crops. *Planta. An International Journal of Plant Biology.*, 293-299.
- Zwolsman, J., Van Eck, B., & Van Der Weijden, C. (1997).** Geochemistry of dissolved trace metals (cadmium, copper, zinc) in the Scheldt estuary, southwestern Netherlands: impact of seasonal variability. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1635-1652.

12. ANEXOS

Anexo 1. Información obtenida por la Comisión Nacional del Agua (2003), sobre la red de pozos en la cuenca de San Juan de los Planes. NR= No reportado.

Nombres	Coordenadas		Temp. (°C)	pH	Eh (V)	C. E. μS/cm	S.T.D.
	Lat N	Long O					
La Ventana	24° 1' 59.0"	109° 59' 34.1"	32.3	7.1	NR	3600	2340
Ejido El Sargento	24° 1' 1"	109° 59' 48.9"	32.6	7.2	NR	3260	2119
Rancho San Ignacio	23° 59' 38.1"	109° 58' 32.6"	33.4	7.1	NR	3230	2100
Ejido Juan Domínguez Cota	23° 59' 15.6"	109° 57' 47.6"	30.2	7.1	0.3	1620	1053
Rancho Sr. Antonio Ma. Lucero	23° 58' 44.6"	109° 56' 40.5"	29.3	7.3	0.3	7020	4563
Pozo 104R - Juan Domínguez Cota	23° 58' 36.3"	109° 57' 52.8"	30.5	7.9	0.3	1345	874
Pozo 123R-San Juan de los Planes	23° 58' 4.4"	109° 57' 51"	31.1	8.2	0.3	465	302
Rancho El Milagro	23° 58' 0.1"	109° 56' 47.9"	29.1	7.4	NR	1421	924
Pozo 64-San Juan de los Planes	23° 57' 54.8"	109° 55' 54.1"	30.2	7.5	0.3	3520	2288
Rancho El Mezquital	23° 57' 51.2"	109° 55' 32.8"	29.6	7.1	0.4	4540	2951
Rancho de Nataly	23° 57' 48.9"	109° 54' 47.7"	31	7.3	0.4	1988	1292
Pavo Reales	23° 57' 33.8"	109° 53' 31.9"	30.2	7.1	0.3	2810	1827
Rancho Hermanos Gaume	23° 57' 31.4"	109° 55' 59.9"	29.6	8.0	0.3	757	492
Rancho de Isaac Geraldo	23° 57' 29.3"	109° 54' 18.6"	29.3	7.0	0.4	6910	4492
Rancho El Bajío	23° 57' 13.6"	109° 59' 3.7"	38.6	7.7	NR	874	568
San Vicente de los Planes	23° 57' 7.4"	109° 55' 5"	32.6	8.0	0.3	954	620
Rancho San Angel	23° 57' 4.2"	109° 52' 55.4"	34.5	8.2	0.3	1718	1117
Rancho Elpidia Polanco Olguin	23° 57' 1.7"	109° 55' 50"	30.2	7.3	0.4	1275	829
3 Palmas	23° 56' 51.8"	109° 56' 44.8"	29.4	7.8	0.3	1179	766
Rancho La Fortuna	23° 56' 39.6"	109° 54' 22.5"	32.2	7.5	0.4	929	604
Rancho el Pirul	23° 56' 39.1"	109° 59' 5.1"	31.6	7.2	NR	2350	1528
San Marcos-La Yuquita	23° 56' 37.0"	109° 57' 39.2"	30	7.9	0.3	489	318
Rancho Rodolfo Cota Araujo	23° 55' 56.2"	109° 54' 54"	32.2	7.5	0.4	968	629
San Fernando	23° 55' 40.3"	109° 53' 40.2"	31.1	6.9	0.3	2100	1365
Rancho El Retiro	23° 55' 38.5"	109° 58' 25.8"	30.7	7.6	0.3	567	369
Rancho San Luis	23° 55' 33.8"	109° 55' 34.7"	32.6	7.7	0.4	517	336
San Martín	23° 55' 20.2"	109° 54' 4.8"	31.9	7.3	0.4	1634	1062
Rancho La Pimientilla	23° 55' 20.3"	109° 56' 40.5"	30.3	7.4	0.3	893	580
Pozo 115-Ejido San Luis	23° 54' 52.5"	109° 56' 46.7"	30.9	7.4	0.4	563	366
Rancho Santa Martha	23° 52' 44.2"	109° 53' 40"	31.5	6.7	0.3	2410	1567
El Huatamote	23° 51' 13.4"	110° 2' 55.8"	28.1	6.9	0.4	2280	1482
Rancho Texcalama	23° 51' 5.5"	110° 2' 19.1"	28.8	7.3	0.3	1901	1236
San Antonio, Tiro San José	23° 48' 4.9"	110° 3' 52.4"	30.8	7.0	0.1	1277	830

Anexo 2. Claves de las estaciones de muestreo con sus coordenadas geográficas

Zona	Estaciones	Clave	Coordenadas	
			Lat N	Long O
Valle	Pozo 1	V1	23° 58' 42.8"	109° 57' 54.4"
	El Porvenir	V2	23° 58' 39.8"	109° 58' 48.9"
	Las 400	V3	23° 57' 33.2"	109° 58' 29.7"
	San Miguel	V4	23° 57' 16.5"	109° 58' 45.3"
	El Aparejo	V5	23° 56' 33.7"	109° 54' 44.2"
	El Gordo	V6	23° 55' 53.3"	109° 54' 19"
	La Fortuna	V7	23° 56' 45.5"	109° 54' 24.6"
	San Vicente	V8	23° 57' 13.7"	109° 55' 6.8"
	Pozo 41 CNA	V9	23° 58' 7.3"	109° 55' 18.5"
	La Pimientilla	V10	23° 55' 25.8"	109° 56' 42.5"
	Técnica 8	V11	23° 58' 1.5"	109° 55' 58.1"
	El Milagro	V12	23° 58' 5.3"	109° 56' 48.9"
	San Rafael	V13	23° 57' 43"	109° 56' 54.2"
	Las 3 Palmas	V14	23° 56' 45"	109° 57' 4.8"
	El Carmen	V15	23° 58' 56.2"	109° 56' 7.7"
	El Pino	V16	23° 58' 43.5"	109° 56' 54.7"
	Don Alejandro	V17	23° 59' 21.8"	109° 57' 49.8"
	Agua Amarga	V18	23° 59' 1.7"	109° 57' 4.8"
	La Alambrada	V19	23° 58' 47.9"	109° 59' 36.1"
	El Mezquital	V20	23° 57' 43.3"	110° 0' 5.5"
	El Bajío	V21	23° 57' 43.3"	109° 59' 6.3"
	San Ignacio	V22	23° 59' 45"	110° 0' 20.5"
	San Pedro México	V23	23° 58' 3.3"	109° 53' 46.4"
	Sergas de Sta. María	V24	23° 58' 4.6"	109° 54' 52.4"
Sierra	Huatamote	S1	23° 51' 19.6"	110° 2' 58"
	Texcalama	S2	23° 51' 17.8"	110° 2' 23.3"
	Ojo de agua	S3	23° 50' 24.9"	110° 2' 46.9"
	El Paraje	S4	23° 50' 36.9"	109° 53' 1"

Anexo 3. Temperaturas (°C) en las estaciones ubicadas en el valle de SJP y las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.

Estaciones	Claves	Temporadas		
		Secas	Lluvias cálidas	Lluvias frías
Pozo 1	V1	31.9	31.5	28.5
El Porvenir	V2	35.1	34.4	33.9
Las 400	V3	35	35.1	34.2
San Miguel	V4	38.5	36.8	38.1
El Aparejo	V5	33.4	33.3	32
El Gordo	V6	32.7	32.1	31
La Fortuna	V7	31.3	32.7	31.5
San Vicente	V8	32.3	32.8	31.7
Pozo 41 CNA	V9	31.9	31.6	29.7
La Pimientilla	V10	29.4	30.7	28.3
Técnica 8	V11	28.8	31.8	28.1
El Milagro	V12	28.9	29.2	26.3
San Rafael	V13	29.6	30.3	27.5
Las 3 Palmas	V14	31.1	30.7	27.7
El Carmen	V15	30.5	30.8	28
El Pino	V16	28	30.2	27.9
Don Alejandro	V17	29.8	30.6	27.3
Agua Amarga	V18	31.2	31.3	31.3
La Alambrada	V19	42.7	44.2	38
El Mezquital	V20	33.58	34.6	34.1
El Bajío	V21	37.8	38.6	38.2
San Ignacio	V22	33.3	34.6	32
San Pedro México	V23		30.5	26.5
Sergas de Sta. María	V24		31.3	29
Huatamote	S1	27.7	30.1	26.8
Texcalama	S2	28	29.9	25.3
Ojo de Agua	S3	29.3	sd	25.5
El Paraje	S4		25.7	20.2

Nota: 1) sd=sin dato

Anexo 4. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en las estaciones ubicadas en el valle de SJP y las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.

Estaciones	Claves	Temporadas		
		Secas	Lluvias cálidas	Lluvias frías
Pozo 1	V1	2530	2490	2500
El Porvenir	V2	5740	5900	4750
Las 400	V3	943	1200	1230
San Miguel	V4	764	819	780
El Aparejo	V5	2220	2400	2310
El Gordo	V6	1150	1150	1180
La Fortuna	V7	926	903	930
San Vicente	V8	1020	1310	10500
Pozo 41 CNA	V9	4900	4570	5030
La Pimientilla	V10	802	715	830
Técnica 8	V11	4810	5740	5150
El Milagro	V12	1540	1610	1640
San Rafael	V13	556	698	630
Las 3 Palmas	V14	739	763	770
El Carmen	V15	4740	4290	5610
El Pino	V16	3080	2780	2910
Don Alejandro	V17	9610	8900	10060
Agua Amarga	V18	17600	18800	16450
La Alambrada	V19	1520	1460	1310
El Mezquital	V20	1200	1230	900
El Bajío	V21	1160	1180	1220
San Ignacio	V22	2900	2890	3020
San Pedro México	V23		7580	7110
Sergas de Sta. María	V24		5660	5010
Huatamote	S1	2010	2120	2160
Texcalama	S2	1530	1190	1600
Ojo de Agua	S3	1460	sd	1550
El Paraje	S4		2440	1552

Nota: 1) sd=sin dato.

Anexo 5. Valores de pH en las estaciones ubicadas en el valle de SJP y las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.

Estaciones	Claves	Temporadas	
		Secas	Lluvias frías
Pozo 1	V1	8.4	7.8
El Porvenir	V2	7.7	7.3
Las 400	V3	8.5	7.8
San Miguel	V4	8.6	7.8
El Aparejo	V5	7.5	7.3
El Gordo	V6	7.8	7.4
La Fortuna	V7	8.2	7.8
San Vicente	V8	8.7	8
Pozo 41 CNA	V9	7.7	7.2
La Pimientilla	V10	8.3	7.9
Técnica 8	V11	7.9	7.5
El Milagro	V12	8.2	7.5
San Rafael	V13	8.5	7.9
Las 3 Palmas	V14	8.4	7.8
El Carmen	V15	7.9	7.4
El Pino	V16	8.2	7.5
Don Alejandro	V17	7.8	7
Agua Amarga	V18	7.1	6.9
La Alambrada	V19	8.2	8
El Mezquital	V20	8.3	7.8
El Bajío	V21	8.4	7.9
San Ignacio	V22	7.8	7.6
San Pedro México	V23		7.6
Sergas de Sta. María	V24		7.2
Huatamote	S1	7.9	7.1
Texcalama	S2	7.7	6.7
Ojo de Agua	S3	7.8	6.9
El Paraje	S4		7.9

Anexo 6. Concentraciones (mg/L) de iones mayoritarios y sus balances iónicos (BI en %) en las aguas subterráneas del valle de SJP y las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.

Temporada	Claves	Iones mayoritarios								BI
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	
Secas	V13	23.2	6.1	63.0	0.1	112.0	<ld	74.8	8.3	4.4
	V5	87.7	21.5	150.1	8.5	112.0	<ld	534.6	<ld	-13.5
	V18	917.3	891.3	837.6	409.4	112.0	<ld	5539.8	<ld	2.6
	V14	23.9	7.8	24.2	8.5	112.0	19.4	48.2	<ld	-7.5
	V17	1821.6	521.2	210.6	822.8	750.0	518.9	3392.0	<ld	16.0
	V10	54.4	21.8	59.6	11.4	86.0	2.6	108.3	<ld	28.7
	V11	332.3	113.1	289.8	48.1	240.0	211.7	869.9	<ld	9.4
	V19	12.2	1.1	106.2	277.0	112.0	105.8	283.4	<ld	1.5
	V21	175.5	33.5	108.6	39.4	240.0	211.7	157.9	27.8	14.1
	V4	104.0	5.6	49.1	38.1	112.0	76.8	121.7	<ld	12.1
	V15	<ld	133.5	215.8	1066.2	240.0	39.9	1201.6	<ld	10.4
	V3	118.5	23.5	174.8	38.2	112.0	347.6	425.7	<ld	-12.4
	V8	46.1	25.8	146.4	0.9	112.0	62.9	267.5	<ld	0.6
	V12	129.0	54.7	189.3	0.0	240.0	73.8	372.8	<ld	9.0
	V20	48.1	12.7	207.8	0.0	112.0	70.8	202.7	<ld	16.0
	S3	69.2	60.0	151.9	3.5	240.0	315.8	132.5	<ld	2.8
	V16	35.9	30.4	255.3	351.1	240.0	42.3	746.5	<ld	-3.0
	S1	29.4	61.5	64.7	189.6	112.0	438.3	285.4	<ld	-14.5
V6	56.3	22.0	154.0	<ld	240.0	161.3	145.5	<ld	-0.4	
V22	38.2	29.9	274.0	501.7	480.0	270.2	692.3	<ld	-6.3	
Lluvias cálidas	V20	57.3	19.2	207.1	0.0	112.0	88.2	205.0	<ld	17.4
	V2	144.9	17.3	666.1	803.3	400.0	261.6	1841.4	<ld	-4.7
	V16	57.3	29.0	284.1	350.2	240.0	42.3	849.0	<ld	-4.0
	V17	166.3	39.6	679.7	1904.1	1120.0	287.2	3214.7	<ld	-13.4
	V5	124.3	44.1	150.1	81.7	240.0	211.6	534.6	<ld	-11.9
	S4	139.7	69.4	97.6	8.2	112.0	701.4	273.9	<ld	-17.0
	V14	50.9	12.6	123.1	28.2	112.0	193.8	117.0	<ld	2.5
	V10	61.4	<ld	103.9	<ld	112.0	46.1	108.2	<ld	11.7
	V23	85.2	111.0	557.0	1153.1	480.0	412.0	2096.5	<ld	-5.9
	V24	89.6	47.6	665.0	30.1	280.0	303.7	664.4	<ld	12.4
	V7	28.7	4.8	98.3	15.3	112.0	126.1	116.9	<ld	-8.9
	V6	82.9	18.2	135.7	<Ld	240.0	155.9	114.8	<ld	4.9
V13	18.7	4.1	62.9	101.4	112.0	44.0	96.6	<ld	9.3	

	V18	257.4	449.3	1244.9	17.9	840.0	1047.1	2692.4	<ld	-3.3
	V9	50.1	28.4	162.0	0.8	112.0	63.3	269.9	<ld	5.0
	S2	92.4	38.7	161.0	2.3	112.0	127.6	293.4	<ld	7.6
	V12	133.2	54.4	189.6	<ld	240.0	69.8	336.8	<ld	13.0
	V8	147.3	45.5	453.1	260.8	860.0	417.9	968.9	<ld	-14.5
	V15	0.0	137.9	213.9	1037.0	240.0	39.1	1183.4	<ld	10.6
	S1	30.0	59.6	59.0	202.6	112.0	444.4	213.0	<ld	-9.5
	V22	72.8	36.9	274.9	495.8	480.0	271.3	697.0	<ld	-2.9
Lluvias frías	V8	143.5	42.4	428.5	294.2	860.0	431.7	978.4	<ld	-15.9
	V19	104.0	1.0	49.0	538.5	112.0	211.7	566.9	<ld	-2.4
	V13	20.6	4.5	62.9	103.0	112.0	44.8	96.9	<ld	10.3
	V17	166.3	24.8	707.0	1968.8	1170.0	273.6	3067.2	<ld	-9.8
	V18	313.1	521.5	1216.3	20.1	840.0	1076.4	2654.3	<ld	0.4
	V16	66.6	32.7	262.9	351.1	240.0	42.3	849.0	<ld	-4.2
	V1	160.0	56.6	442.5	1.9	240.0	84.4	686.0	<ld	12.1
	S3	87.4	62.3	166.1	2.5	240.0	306.6	135.2	<ld	8.5
	V2	149.2	14.4	670.5	813.7	400.0	260.8	1600.8	<ld	1.3
	V23	84.7	110.9	552.8	1078.1	480.0	589.1	2118.4	<ld	-10.3
	V15	<ld	171.0	213.9	1290.6	240.0	41.3	1670.8	<ld	4.1
	V20	56.8	19.2	206.9	0.0	112.0	85.9	203.7	<ld	17.7
	V3	104.0	23.4	182.4	35.8	240.0	199.6	434.2	<ld	-12.1
	V24	87.5	47.6	658.4	34.5	280.0	281.7	614.2	<ld	15.3
	V22	69.9	36.2	274.4	498.7	480.0	267.5	689.9	<ld	-2.7
	V11	104.0	45.2	49.0	19.3	240.0	211.7	869.9	<ld	-48.1
	S2	96.3	40.4	164.6	3.0	112.0	127.6	409.9	<ld	-2.2
	V9	42.7	20.9	128.1	0.7	112.0	45.2	200.2	<ld	5.7
	V10	36.8	58.5	59.4	206.6	112.0	373.7	211.3	<ld	-3.5
	S1	104.0	12.5	49.0	<ld	150.0	259.4	15918.0	<ld	-96.4
	V21	104.0	13.4	49.0	15.9	240.0	93.8	281.7	<ld	-22.1
	V12	98.8	39.3	189.5	<ld	150.0	69.3	344.5	<ld	9.3
	V4	104.0	10.3	49.1	37.0	122.0	69.5	121.7	<ld	14.0
	V7	28.3	8.6	90.9	13.9	112.0	124.1	114.8	6.4	10.4

Nota: Los iones Li^+ , F^- , PO_4^{3-} , Br^- y NO_3^- se encontraron por debajo de su límite de detección en todos los sitios durante las 3 temporadas.

Anexo 7. Concentraciones ($\mu\text{g/L}$) de Cr_D y Cr_P en las estaciones del valle de SJP y de las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.

Estaciones	Clave	Cr_P			Cr_D		
		Secas	Lluvias cálidas	Lluvias frías	Secas	Lluvias cálidas	Lluvias frías
Pozo 1	V1	27.95	28.86	105.53	3.34	1.27	1.29
El Porvenir	V2	50.79	112.24	21.62	6.79	<ld	<ld
Las 400	V3	32.79	71.08	279.56	0.88	1.28	1.77
San Miguel	V4	135.62	sd	161.10	<ld	<ld	2.07
El Aparejo	V5	67.85	28.57	120.79	10.96	1.62	2.31
El Gordo	V6	sd	15.67	35.27	9.05	1.01	1.44
La Fortuna	V7	98.52	158.33	50.94	3.25	1.85	2.72
San Vicente	V8	195.38	55.96	65.20	10.98	2.95	2.62
Pozo 41 CNA	V9	58.99	62.69	100.08	8.21	1.29	1.87
La Pimentilla	V10	67.73	19.60	85.32	9.36	<ld	1.64
Técnica 8	V11	108.95	24.09	66.14	7.37	<ld	1.00
El Milagro	V12	18.11	96.38	59.78	8.74	2.07	2.19
San Rafael	V13	97.11	59.36	51.11	3.60	1.99	4.00
Las 3 Palmas	V14	sd	sd	77.61	8.93	1.54	2.13
El Carmen	V15	22.50	84.63	48.01	8.09	0.69	<ld
El Pino	V16	53.51	108.77	43.46	9.13	<ld	1.57
Don Alejandro	V17	95.10	77.80	53.13	6.45	<ld	<ld
Agua Amarga	V18	36.41	36.29	30.04	10.15	<ld	<ld
La Alambrada	V19	101.84	67.36	87.32	9.89	<ld	<ld
El Mezquital	V20	122.28	99.07	76.04	9.16	1.37	1.48
El Bajío	V21	105.96	108.04	60.94	1.64	0.77	1.76
San Ignacio	V22	46.77	sd	83.67	1.36	1.64	1.39
San Pedro México	V23		sd	36.60		<ld	4.15
Sergas de Sta. María	V24		100.33	44.19		2.35	2.73
Huatamote	S1	73.24	34.40	80.06	1.05	<ld	<ld
Texcalama	S2	59.65	54.69	132.44	5.91	<ld	<ld
Ojo de agua	S3	63.25	sd	113.65	0.97	sd	<ld
El Paraje	S4		25.55	127.77		<ld	<ld

Nota: <ld=inferior al límite de detección, sd=sin dato

Anexo 8. Concentraciones ($\mu\text{g/L}$) de Cr_T en las estaciones del valle de SJP y de las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.

Estaciones	Claves	Temporadas		
		Secas	Lluvias cálidas	Lluvias frías
Pozo 1	V1	31.29	30.13	106.82
El Porvenir	V2	57.58	112.59	21.97
Las 400	V3	33.67	72.36	281.33
San Miguel	V4	135.97	sd	163.17
El Aparejo	V5	78.81	30.19	123.1
El Gordo	V6	sd	16.68	36.71
La Fortuna	V7	101.77	160.18	53.66
San Vicente	V8	206.36	58.91	67.82
Pozo 41 CNA	V9	67.2	63.98	101.95
La Pimientilla	V10	77.09	19.95	86.96
Técnica 8	V11	116.32	24.44	67.14
El Milagro	V12	26.85	98.45	61.97
San Rafael	V13	100.71	61.35	55.11
Las 3 Palmas	V14	sd	sd	79.74
El Carmen	V15	30.59	85.32	48.36
El Pino	V16	62.64	109.12	45.03
Don Alejandro	V17	101.55	78.15	53.48
Agua Amarga	V18	46.56	36.64	30.39
La Alambrada	V19	111.73	67.71	87.67
El Mezquital	V20	131.44	100.44	77.52
El Bajío	V21	107.6	108.81	62.7
San Ignacio	V22	48.13	sd	85.06
San Pedro México	V23		sd	40.75
Sergas de Sta. María	V24		102.68	46.92
Huatamote	S1	74.29	34.75	80.41
Texcalama	S2	65.56	55.04	132.79
Ojo de agua	S3	64.22	sd	114
El Paraje	S4		25.9	128.12

Nota: 1) sd=sin dato.

Anexo 9. Coeficientes de partición de C_{rT} en las estaciones del valle de SJP y de las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.

Estaciones	Claves	Temporadas		
		Secas	Lluvias cálidas	Lluvias frías
Pozo 1	V1	8.4	22.7	81.8
El Porvenir	V2	7.5	320.7	61.8
Las 400	V3	37.3	55.5	157.9
San Miguel	V4	387.5	sd	77.8
El Aparejo	V5	6.2	17.6	52.3
El Gordo	V6	sd	15.5	24.5
La Fortuna	V7	30.3	85.6	18.7
San Vicente	V8	17.8	19.0	24.9
Pozo 41 CNA	V9	7.2	48.6	53.5
La Pimientilla	V10	7.2	56.0	52.0
Técnica 8	V11	14.8	68.8	66.1
El Milagro	V12	2.1	46.6	27.3
San Rafael	V13	27.0	29.8	12.8
Las 3 Palmas	V14	sd	sd	36.4
El Carmen	V15	2.8	122.6	137.2
El Pino	V16	5.9	310.8	27.7
Don Alejandro	V17	14.7	222.3	151.8
Agua Amarga	V18	3.6	103.7	85.8
La Alambrada	V19	10.3	192.4	249.5
El Mezquital	V20	13.3	72.3	51.4
El Bajío	V21	64.6	140.3	34.6
San Ignacio	V22	34.4	sd	60.2
San Pedro México	V23			8.8
Sergas de Sta. María	V24		42.7	16.2
Huatamote	S1	69.8	98.3	228.7
Texcalama	S2	10.1	156.3	378.4
Ojo de agua	S3	65.2	sd	324.7
El Paraje	S4		73.0	365.1

Nota: sd=sin dato

Anexo 10. Porcentajes (%) de Cr (VI)_T con respecto al Cr_T en las estaciones del valle de SJP y de las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.

Estaciones	Claves	Temporadas		
		Secas	Lluvias cálidas	Lluvias frías
Pozo 1	V1	4.89	5.08	5.07
El Porvenir	V2	6.30	1.36	6.96
Las 400	V3	18.21	2.11	2.22
San Miguel	V4	3.59	sd	4.34
El Aparejo	V5	9.36	5.07	10.50
El Gordo	V6	sd	9.17	4.17
La Fortuna	V7	4.79	0.96	6.39
San Vicente	V8	2.97	9.22	14.12
Pozo 41 CNA	V9	10.98	10.72	5.32
La Pimientilla	V10	1.98	7.67	12.15
Técnica 8	V11	6.34	16.36	11.80
El Milagro	V12	18.18	1.55	2.47
San Rafael	V13	6.09	2.49	12.85
Las 3 Palmas	V14	sd	sd	9.68
El Carmen	V15	11.87	4.69	18.90
El Pino	V16	2.44	1.40	12.04
Don Alejandro	V17	3.57	5.12	11.69
Agua Amarga	V18	7.80	4.18	15.99
La Alambrada	V19	1.37	2.26	1.75
El Mezquital	V20	2.76	3.98	4.55
El Bajío	V21	5.70	1.41	2.44
San Ignacio	V22	10.14	sd	8.32
San Pedro México	V23		sd	31.71
Sergas de Sta. María	V24		1.49	18.65
Huatamote	S1	2.06	4.40	1.90
Texcalama	S2	5.54	2.78	1.15
Ojo de agua	S3	2.38	sd	2.89
El Paraje	S4		5.91	3.57

Nota: sd=sin dato

Anexo 11. Concentraciones ($\mu\text{g/L}$) de $\text{Cr (VI)}_{\text{T}}$ y $\text{Cr (VI)}_{\text{D}}$ en las estaciones del valle de SJP y de las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.

Estaciones	Clave	$\text{Cr (VI)}_{\text{T}}$			$\text{Cr (VI)}_{\text{D}}$		
		Secas	Lluvias cálidas	Lluvias frías	Secas	Lluvias cálidas	Lluvias frías
Pozo 1	V1	<ld	<ld	5.42	<ld	<ld	<ld
El Porvenir	V2	3.63	<ld	<ld	3.5	<ld	<ld
Las 400	V3	6.13	<ld	6.25	4.88	<ld	<ld
San Miguel	V4	4.88	4	7.08	4.88	<ld	6.29
El Aparejo	V5	7.38	<ld	12.92	6.38	<ld	<ld
El Gordo	V6	<ld	<ld	<ld	<ld	<ld	<ld
La Fortuna	V7	4.88	<ld	3.43	<ld	<ld	3.43
San Vicente	V8	6.13	5.43	9.58	3.63	<ld	7.71
Pozo 41 CNA	V9	7.38	6.86	5.42	7.38	<ld	3.43
La Pimientilla	V10	<ld	<ld	10.57	<ld	<ld	6.25
Técnica 8	V11	7.38	4	7.92	<ld	<ld	<ld
El Milagro	V12	4.88	<ld	<ld	<ld	<ld	<ld
San Rafael	V13	6.13	<ld	7.08	6.13	<ld	4.86
Las 3 Palmas	V14	3.63	5.43	7.72	3.63	<ld	6.25
El Carmen	V15	3.63	4	9.14	3.63	<ld	4.86
El Pino	V16	<ld	<ld	5.42	<ld	<ld	<ld
Don Alejandro	V17	3.63	4	6.25	3.63	<ld	3.43
Agua Amarga	V18	3.63	<ld	4.86	<ld	<ld	<ld
La Alambrada	V19	<ld	<ld	<ld	<ld	<ld	<ld
El Mezquital	V20	3.63	4	3.53	3.63	<ld	3.43
El Bajío	V21	6.13	<ld	<ld	6.13	<ld	<ld
San Ignacio	V22	4.88	<ld	7.08	4	<ld	6.29
San Pedro México	V23		<ld	12.92		<ld	12
Sergas de Sta. María	V24		<ld	8.75		<ld	<ld
Huatamote	S1	<ld	<ld	<ld	<ld	<ld	<ld
Texcalama	S2	3.63	<ld	<ld	<ld	<ld	<ld
Ojo de agua	S3	<ld	sd	3.29	<ld	sd	<ld
El Paraje	S4		<ld	4.58		<ld	<ld

Nota: 1) sd=sin dato. 2) <ld=inferior al límite de detección

Anexo 12. Concentraciones ($\mu\text{g/L}$) de $\text{Cr (III)}_{\text{T}}$ en las estaciones del valle de SJP y de las sierras La Gata y La Trinchera durante las tres temporadas.

Estaciones	Clave	Temporadas		
		Secas	Lluvias cálidas	Lluvias frías
Pozo 1	V1	29.76	28.60	101.40
El Porvenir	V2	53.95	111.06	20.44
Las 400	V3	27.54	70.83	275.08
San Miguel	V4	131.09	sd	156.09
El Aparejo	V5	71.43	28.66	110.18
El Gordo	V6	sd	15.15	35.18
La Fortuna	V7	96.89	158.65	50.23
San Vicente	V8	200.23	53.48	58.24
Pozo 41 CNA	V9	59.82	57.12	96.53
La Pimientilla	V10	75.56	18.42	76.39
Técnica 8	V11	108.94	20.44	59.22
El Milagro	V12	21.97	96.92	60.44
San Rafael	V13	94.58	59.82	48.03
Las 3 Palmas	V14	sd	sd	72.02
El Carmen	V15	26.96	81.32	39.22
El Pino	V16	61.11	107.59	39.61
Don Alejandro	V17	97.92	74.15	47.23
Agua Amarga	V18	42.93	35.11	25.53
La Alambrada	V19	110.20	66.18	86.14
El Mezquital	V20	127.81	96.44	73.99
El Bajío	V21	101.47	107.28	61.17
San Ignacio	V22	43.25	sd	77.98
San Pedro México	V23		sd	27.83
Sergas de Sta. María	V24		101.15	38.17
Huatamote	S1	72.76	33.22	78.88
Texcalama	S2	61.93	53.51	131.26
Ojo de agua	S3	62.69	sd	110.71
El Paraje	S4		24.37	123.54

Nota: 1) sd=sin dato.