



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE VILLA DE LA PAZ, SAN LUIS
POTOSÍ, MÉXICO Y PROPUESTAS DE TRATAMIENTO**

PRESENTA:

CLAUDIA RUIZ RIVERA

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. ANTONIO CARDONA BENAVIDES

Firma manuscrita del Dr. Antonio Cardona Benavides.

ASESORES:

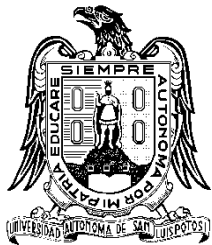
Dr. JAVIER CASTRO LARRAGOITIA

Firma manuscrita del Dr. Javier Castro Larragoitia.

Dr. ISRAEL RODRIGUEZ TORRES

Firma manuscrita del Dr. Israel Rodriguez Torres.

julio de 2015



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA
PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE VILLA DE LA PAZ, SAN LUIS
POTOSÍ, MÉXICO Y PROPUESTAS DE TRATAMIENTO**

PRESENTA:

CLAUDIA RUIZ RIVERA

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. ANTONIO CARDONA BENAVIDES

ASESORES:

Dr. JAVIER CASTRO LARRAGOITIA

Dr. ISRAEL RODRIGUEZ TORRES

Julio de 2015



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA

PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE VILLA DE LA PAZ, SAN LUIS
POTOSÍ, MÉXICO Y PROPUESTAS DE TRATAMIENTO

PRESENTA:

CLAUDIA RUIZ RIVERA

COMITÉ TUTELAR:

DIRECTOR: Dr. ANTONIO CARDONA BENAVIDES

ASESOR: Dr. JAVIER CASTRO LARRAGOITIA

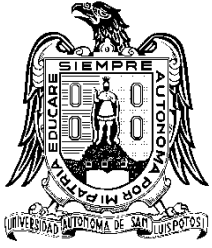
ASESOR: Dr. ISRAEL RODRIGUEZ TORRES

SINODALES:

PRESIDENTE: Dr. ANTONIO CARDONA BENAVIDES

SECRETARIO: Dr. ISRAEL RODRIGUEZ TORRES

VOCAL: Dr. HUMBERTO REYES HERNANDEZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA
PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DE VILLA DE LA PAZ, SAN LUIS
POTOSÍ, MÉXICO Y PROPUESTAS DE TRATAMIENTO

PRESENTA:

CLAUDIA RUIZ RIVERA

COMITÉ TUTELAR:

DIRECTOR: Dr. ANTONIO CARDONA BENAVIDES

ASESOR: Dr. JAVIER CASTRO LARRAGOITIA

ASESOR: Dr. ISRAEL RODRIGUEZ TORRES

SINODALES:

PRESIDENTE: Dr. ANTONIO CARDONA BENAVIDES

SECRETARIO: Dr. ISRAEL RODRIGUEZ TORRES

VOCAL: Dr. HUMBERTO REYES HERNANDEZ

CRÉDITOS INSTITUCIONALES

PROYECTO REALIZADO EN:

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI, FACULTAD DE
INGENIERIA, ÁREA CIENCIAS DE LA TIERRA**

CON FINANCIAMIENTO DE:

**CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
CONACYT**

A TRAVÉS DEL PROYECTO DENOMINADO:

**“ANÁLISIS, DIAGNÓSTICO Y DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA EL APROVECHAMIENTO
SOSTENIBLE DE AGUA Y ENERGÍA EN LA INDUSTRIA MINERA, CON UN ENFOQUE
MULTIDISCIPLINARIO” (CLAVE 190966)**

RESPONSABLE: DRA. MARIA ISABEL LÁZARO BÁEZ

Financiado por

**Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico
Tecnológico y de Innovación (FORDECyT)**

AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS

Becario No. 297716

**LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO ATRAVÉS
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)**

DEDICO ESTE TRABAJO A MI FAMILIA

GRACIAS POR ESTAR SIEMPRE A MI LADO, POR TODO SU APOYO INCONDICIONAL Y SUS
CONSEJOS CUANDO MAS LO HE NECESITADO.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr Antonio Cardona Benavides por su tiempo y disponibilidad, pero sobre todo por el conocimiento que he adquirido gracias a sus recomendaciones y sugerencias durante la realización de este proyecto.

Al Dr. Javier Castro Larragoitia por su aportación académica en la realización del proyecto.

Al Dr Israel Rodríguez Torres por el tiempo dedicado, su apoyo, consejos y todas sus asesorías académicas.

A todos los involucrados para que este proyecto se pudiera llevar a cabo:

Al Ing. Jorge Aceves De Alba encargado del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica del Área Ciencias de la Tierra.

A la doctora María Elena García Arreola, encargada del laboratorio de análisis químicos de la facultad de ingeniería de la UASLP, y a las profesoras laboratoristas QFB Sandra Ramos Castillo e Ing. Ana María Guadalupe López Hernández.

Al Dr Erick Espinosa encargado del laboratorio de geoquímica del instituto de geología de la UASLP.

Al Centro Tecnológico de Manresa por permitirme realizar la estancia, especialmente a la doctora Irene Jubany Güell.

Y a todos mis amigos y compañeros que me apoyaron en las salidas de campo por las malpasadas y desvelos, gracias por sus consejos y apoyo, que sin su ayuda no hubiera terminado en forma y tiempo.

Gracias a mi hermana preferida por escucharme cuando lo necesitaba para poder seguir adelante con el escrito de mi tesis.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ESTUDIOS PREVIOS.....	5
2. JUSTIFICACIÓN	7
3. OBJETIVOS	8
3.1. OBJETIVO GENERAL	8
3.1.1. Objetivos específicos.....	8
4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	9
4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	9
4.2. CLIMA.....	10
4.3. GEOLOGÍA.....	11
4.3.1. Estratigrafía.....	11
4.4. SUELO Y VEGETACIÓN.....	15
4.5. HIDROLOGÍA	17
5. METODOLOGÍA	19
5.1. MUESTREO DE AGUA.....	20
5.1.1. Toma de muestras.....	20
5.2. ANÁLISIS QUÍMICOS.....	25
5.3. PIEZOMETRÍA.....	26
5.4. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	28
6. HIDROGEOLOGÍA	29
6.1. DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO.....	29
7. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA	31
7.1. PUNTOS MUESTREADOS	32
7.1.1. Descripción del sistema de abastecimiento de Villa de la Paz.....	35
7.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	36
7.2.1. Media aritmética.....	38
7.2.2. Correlación de Pearson.....	41
7.3. INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA	44
7.3.1. Familias de agua y diagramas de Stiff.....	44
7.4. MODELACIÓN INVERSA.....	51
7.5. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO.....	58
7.5.1. Sulfatos (SO_4^{2-}).....	64
7.5.2. Sodio (Na^+).....	67

7.5.3. Nitratos (NO_3^-)	69
7.5.4. Coliformes totales y coliformes fecales	73
7.6. CALIDAD DEL AGUA POR EL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO.....	76
8. PROPUESTA DE TRATAMIENTO	81
8.1. EVALUACIÓN DE RIESGOS POR LA MALA CALIDAD DEL AGUA	81
8.2. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO.....	85
8.2.1. Remoción de nitratos	86
8.2.1.1. Intercambio iónico (IX).....	86
8.2.1.2. Osmosis inversa (OR).....	86
8.2.2. Reducción de nitratos	87
8.2.2.1. Desnitrificación biológica.....	87
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
10. BIBLIOGRAFÍA	97
11. ANEXOS	101
ANEXO I. FORMATO DE FICHA DE CAMPO PARA MUESTRAS DE AGUA	101
ANEXO II. FORMATO PARA EL NIVEL PIEZOMÉTRICO	102
ANEXO III. PORCENTAJE DE ERROR, BALANCE DE ELECTRONEUTRALIDAD.	103
ANEXO IV. CLASIFICACIÓN DE LAS FAMILIAS DE AGUA, EN FUNCIÓN DEL ION DOMINANTE (ELEMENTOS MAYORES)	106

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Acuífero administrativo Cedral – Matehuala (Fuente: Conagua, 2010).....	7
Figura 2. Ubicación geográfica del municipio de Villa de la Paz (Fuente: Inegi, 2010).....	9
Figura 3. Estratigrafía y geología de la zona de estudio.....	14
Figura 4. Uso de suelo en la región de estudio. (Fuente; INEGI, 2009)	17
Figura 5. Región hidrológica No 37 El Salado, cuenca Matehuala. (Fuente: INEGI, 2010).....	18
Figura 6. Arroyos intermitentes, microcuencas en zona de estudio. Red hidrológica (Fuente: INEGI, 2010).....	19
Figura 7. Estaciones de colecta de agua de lluvia.....	21
Figura 8. Mediciones en campo en celda cerrada.	23
Figura 9. Titulación de Gran, determinación de alcalinidad total.....	24
Figura 10. Determinación de las cargas hidráulicas del agua subterránea.....	27
Figura 11. Dirección preferencial del agua subterránea. (Fuente: elaboración con datos propios)	31
Figura 12. Aprovechamientos muestreados. (Fuente: elaboración con datos propios).....	33
Figura 13. Representación gráfica del sistema de abastecimiento de agua de la cabecera de Villa de la Paz (Fuente: elaboración con datos propios).....	35
Figura 14. Análisis de correlación entre iones (mg/L) de norias	42
Figura 15. Análisis de correlación entre iones (mg/L) de pozos.....	43
Figura 16. Diagrama de Stiff, familia sulfatada cálcica	45
Figura 17. Diagrama Stiff, tipos de familia de agua, muestreo marzo – junio – octubre. (Fuente: elaboración con datos propios).....	46
Figura 18. Dirección de flujo de agua subterránea y diagramas de Stiff (Octubre2014 – Marzo2015). (Fuente: elaboración con datos propios).....	49
Figura 19. Variación espacial y temporal de sulfatos. (Fuente: elaboración con datos propios)	66
Figura 20. Variación espacial y temporal de sodio. (Fuente: elaboración con datos propios).....	68
Figura 21. Variación espacial y temporal de nitratos. (Fuente: elaboración con datos propios)	71
Figura 22. Variación espacial y temporal de coliformes totales y fecales. (Fuente: elaboración con datos propios).....	75
Figura 23. Representación gráfica, del sistema de abastecimiento de agua de la cabecera municipal Villa de la Paz. Trayectos de agua subterránea para consumo humano. (Fuente: elaboración con datos propios).....	76
Figura 24. Distribución de la población de Villa de la Paz.....	81

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Preservación y volumen de muestras de agua.....	23
Tabla 2. Parámetros y técnicas de laboratorio para el análisis químico de las muestras de agua, Villa de la Paz.	26
Tabla 3. Nivel estático y cargas hidráulicas	30
Tabla 4. Número total de aprovechamientos muestreados a lo largo del año de evaluación.	32
Tabla 5. Aprovechamientos muestreados	34
Tabla 6. Media aritmética de los parámetros químicos; comparación pozos, norias, estanques y agua de lluvia.	39
Tabla 7. Porcentaje de variación de estanques, norias y pozos con respecto al agua de lluvia.....	40
Tabla 8. Familias de agua	45
Tabla 9. Concentraciones de litio y temperatura por muestreo.....	50
Tabla 10. Índices de saturación, evolución geoquímica de agua de lluvia a agua superficial (muestra 27 – muestra 13)	54
Tabla 11. Índices de saturación, evolución geoquímica de agua de lluvia a agua subterránea (muestra 13 – muestra 5).....	55
Tabla 12. Índices de saturación, evolución geoquímica de agua subterránea poco profunda a agua subterránea profunda (muestra 1 – muestra 11).....	56
Tabla 13. Índices de saturación, evolución geoquímica de agua subterránea (muestra 7 – muestra 12).	57
Tabla 14. Evolución geoquímica de muestras de agua subterránea	58
Tabla 15. Parámetros evaluados para la calidad del agua de Villa de la Paz	60
Tabla 16. Aprovechamientos por muestreo del sistema de abastecimiento de Villa de la Paz que rebasan la NOM – 127 – SSA1 – 1994.....	62
Tabla 18. Distribución de la población de Villa de la Paz por localidades	80
Tabla 19. Concentración de cloro residual en el sistema de abastecimiento de agua de Villa de la Paz	83
Tabla 20. Costos de los métodos para el tratamiento de nitratos del agua subterránea	92

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Diagrama ombrotérmico, estación 024040 ubicada en Matehuala, latitud 23°40'50" N, longitud 100°38'40" w, altitud 1,589, periodo 1951 a 2010. (Fuente: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=172:san-luis-potosi&catid=14&Itemid=2).....	10
Gráfica 2. Porcentaje de error de las muestras de agua por muestreo. Balance de electroneutralidad. (Fuente: elaboración con datos propios).....	37
Gráfica 3. Variación de concentración en estanques, norias y pozos con respecto al agua de lluvia	40
Gráfica 4. Litio vs temperatura.....	50
Gráfica 5. Variación temporal de sulfatos.....	67
Gráfica 6. Variación temporal de sodio.	69
Gráfica 7. Variación temporal de nitratos.	73
Gráfica 8. Trayecto agua subterránea (fuente – destino), Pozos del Blanco (10,11) hacia pileta 19 Y 24.....	77
Gráfica 9. Trayecto agua subterránea (fuente – destino), Pozo 8 hacia pileta 18.....	79

1. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea representa el almacenamiento de agua dulce más grande del planeta; asimismo, con frecuencia ofrece la mejor solución para el problema del abastecimiento de agua potable (Price, 2003), sobre todo en aquellas zonas donde no existen ríos o cuerpos de agua superficiales perenes.

En México se cuenta con más del 60% de la superficie definida como árida o semiárida con una elevada evaporación potencial, por lo que concurren áreas donde no existen corrientes permanentes ni ríos (Price, 2003), generando que el subsuelo sea la principal fuente de abastecimiento de agua (CONAGUA, 2012).

El agua subterránea es importante desde el punto de vista de su disponibilidad; su facilidad de ser asequible por medio de pozos que potencialmente se pueden construir muy cerca de la zona de consumo, facilita su conducción, elimina pérdidas y gastos innecesarios de energía; además, es más fácil controlar la entrada de patógenos en comparación con las fuentes superficiales. Sin embargo, la presencia y cercanía de ciertas actividades pueden causar el deterioro progresivo en la calidad del agua subterránea, y en ocasiones la contaminación puede estar estrechamente ligada a los procesos de degradación ambiental, imposibilitando la preservación de su calidad, si el resto de los elementos ambientales está deteriorado o en vías de deterioro (Auge, 2006). Desafortunadamente la contaminación del agua subterránea es difícil de detectar a tiempo, y una vez contaminado el acuífero es difícil o casi imposible de revertir la situación.

Hay actividades que se han generalizado como fuentes de contaminación del agua subterránea, las cuales son:

Disposición de residuos sólidos y líquidos: Los desperdicios enterrados en rellenos sanitarios y vertederos están sujetos a lixiviaciones por percolación de agua derivada de la lluvia. El lixiviado producido puede contener gran número de contaminantes inorgánicos y orgánicos. En situaciones donde los vertederos están localizados sobre materiales permeables, o rocas fracturadas, la migración del lixiviado puede causar contaminación sobre áreas más grandes que la ocupada por el vertedero, pudiendo penetrar varios

cientos de metros a lo largo del trayecto del sistema de flujo del agua subterránea, donde el transporte advectivo expandirá la contaminación. Otra fuente de contaminación son los tanques sépticos y los pozos negros siendo estos los más grandes contribuyentes de aguas residuales.

Actividades agrícolas: El uso de fertilizantes y plaguicidas, así como el almacenamiento o disposición de residuos de ganado o aves de corral sobre la tierra, cuando son utilizados como fertilizantes orgánicos, su infiltración puede causar degradación de la calidad del agua subterránea. Hay tres principales nutrientes requeridos para los cultivos, nitrógeno, fósforo y potasio, los cuales, a través de la infiltración pueden llegar al nivel freático, pudiendo migrar al sistema de flujo de agua subterránea. El nitrógeno en forma de nitratos es una de las especies más estables y que en condiciones aeróbicas tiene mayor movilidad en el sistema de flujo que las especies de fósforo; el intercambio catiónico causa que el potasio tenga baja movilidad en materiales geológicos no fracturados. De este modo el nitrato constituye el contaminante más común identificable en el agua subterránea derivado de las actividades agrícolas. Las concentraciones excesivas de nitratos se han encontrado en varias partes del mundo, tal como Israel, Inglaterra, Alemania, California, México, etc. (Freeze & Cherry, 1979).

Actividades mineras: La contaminación de agua subterránea procedente de actividades mineras puede ocasionar diferentes impactos, pero es difícil de evaluar ya que estas actividades se desarrollan en condiciones geográficas diversas. Los problemas más destacados son los debidos a la generación de drenaje de aguas ácidas y los lixiviados generados por los residuos mineros, ricos en sustancias tóxicas solubles como metales pesados (Ni, Fe, Cu, Zn, Cr). La contaminación se produce a causa de la acumulación de los residuos (presas de jales), sobre la superficie del terreno, que provocan variaciones en las condiciones hidrogeológicas, induciendo contaminantes en la zona de recarga. Otra causa son las reacciones químicas de los diversos contaminantes que modifican el equilibrio geoquímico, generando reacciones de oxidación – reducción, especiación – complejación, disolución – precipitación y adsorción – desorción (Rodríguez, et al, 2000).

La contaminación del agua subterránea también se puede originar por la inyección de residuos líquidos en pozos profundos, esta técnica se usa principalmente en la industria de Norte América. Las empresas petroquímicas, farmacéuticas y químicas, son los

mayores usuarios de este tipo de pozos, con el propósito de aislar sustancias peligrosas a la biosfera. La mayoría de los pozos de inyección están entre 300 y 2000 m de profundidad, y se hacen funcionar a presiones de inyección de menos 7×10^3 kN/m², con tasas de inyección en el rango de 500 – 1400 L/min. Las zonas de inyección generalmente se encuentran en areniscas, rocas carbonatadas y basalto. Debido a que la legislación para la protección de recursos de agua superficiales ha llegado a ser muy exigente, el uso de zonas permeables profundas para la disposición de residuos líquidos constituye una opción para el manejo de los residuos de muchas industrias (Freeze & Cherry, 1979).

Aunado a esto, también se tiene que considerar que el agua natural adquiere su composición química mediante un proceso complejo, donde intervienen varios factores englobados en tres sistemas: atmósfera, zona no saturada y zona saturada. La atmósfera está constituida por gases, polvo atmosférico y aerosoles de diversa procedencia que reaccionan con el agua de lluvia, lo que da lugar a la química del agua infiltrada. El agua de lluvia regularmente presenta una ligera acidez (pH entre 5 y 6) y una baja mineralización (Freeze & Cherry, 1979). La situación geográfica, clima, actividad biológica y tipo de suelo, de igual forma condicionan la composición química del agua de lluvia, que al infiltrarse hacia la zona no saturada sufre modificaciones relacionadas con las condiciones a las que se ve sometida, tales como la concentración por evapotranspiración, la producción de gases y ácidos disponibles asociada a la actividad microbiológica, la microflora del suelo compuesta por bacterias, hongos y protozoos, entre otros. Una vez que llega a la zona saturada, el agua subterránea se incorpora al sistema de flujo del acuífero, que junto con los materiales con los que interacciona, y por donde circula, constituye el tercer sistema de cambio sobre la composición química; en esta zona es donde el agua adquiere una mayor mineralización. La temperatura en el subsuelo, tiempo de residencia y la composición del medio geológico, influyen en la composición y evolución de la química del agua subterránea (Auge, 2006).

Por lo tanto, al analizar la calidad del agua, se deben considerar todos los factores que posiblemente influirán en su modificación, considerando tanto las actividades que se realizan en la región como las actividades cercanas a la zona de estudio.

Asimismo, la evaluación de la calidad del agua debe de tomar en cuenta su trayecto de recarga – descarga, es decir, desde la aportación química de la atmósfera hacia el agua de lluvia, la adquisición química por la evapotranspiración y microflora del suelo, hasta la contribución de los materiales geológicos. Esta evaluación permite identificar las fuentes y factores principales que contribuyen a la composición del agua subterránea, ya sean naturales o antropogénicos.

De esta manera se puede establecer el diagnóstico espacial y temporal de la calidad del agua, que ayuda a generar propuestas de tratamiento cuando sea requerido, y a su vez aportar información que auxilie en la toma de decisiones para la elaboración de programas de gestión de sanidad del recurso hídrico, y de agua segura para la población; particularmente de programas para la población que está expuesta a los riesgos por el consumo de agua de mala calidad.

En San Luis Potosí el 71% de la superficie está constituida por zonas áridas y semiáridas (INEGI, 2012); una de las regiones con estas condiciones es el Altiplano Potosino, localizado al norte del estado, que cuenta con agua subterránea como la única fuente relativamente segura para el abastecimiento de la población. El acuífero administrativo Cedral – Matehuala es uno de los aprovechamientos de agua subterránea de mayor importancia del norte del estado, abarca de forma parcial los municipios de Matehuala, Cedral, Real de Catorce, Guadalupe, y comprende en su totalidad el municipio de Villa de la Paz (Figura 1), (Pérez, 2006). El agua es empleada: i) 67% para actividades agrícolas, ii) 19% para uso público – urbano, iii) 3% para uso pecuario y iv) 11% para actividades industriales (González, 2009), tal como la minería, que es una de las principales actividades económicas que se realiza en la región de Villa de la Paz – Matehuala. Esta región pertenece al distrito minero de Santa María de la Paz, zona destacada a nivel estatal en la producción de cobre, el cual ha sido explotado de forma continua durante los últimos 200 años. Otra actividad que se realiza cerca de la zona es la agricultura, practicándose agricultura temporal y de riego, en Villa de la Paz y Cedral respectivamente. Actualmente el municipio de Cedral cuenta con la presencia de invernaderos originando un aumento en la extracción del agua (González, 2009).

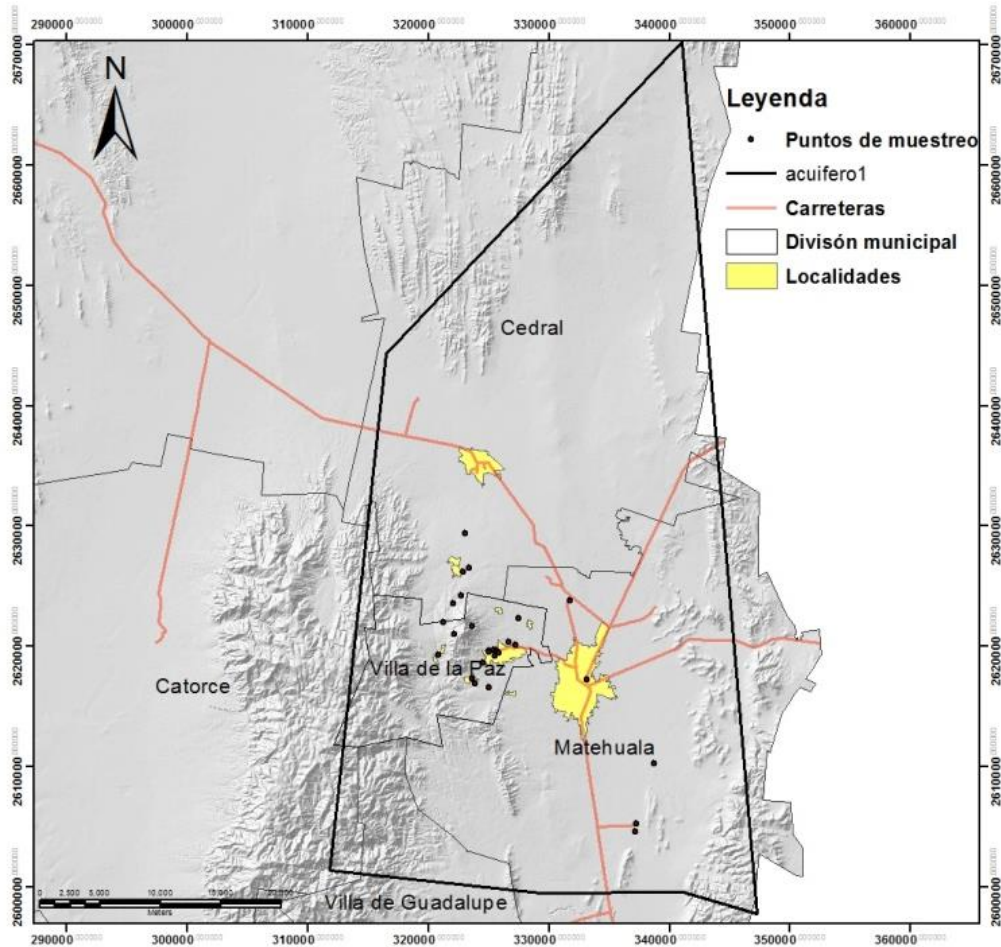


Figura 1. Acuífero administrativo Cedral – Matehuala (Fuente: Conagua, 2010)

1.1. Estudios previos

Para contextualizar este trabajo y contar con un panorama sobre el comportamiento químico y la calidad del agua subterránea de la zona de estudio, se consideraron algunos estudios previos realizados en el acuífero administrativo Cedral – Matehuala, que a continuación se describen:

Pérez (2006) afirma que el agua subterránea se encuentra en un sistema acuífero de tipo libre heterogéneo anisótropo a escala regional. Define la dirección de flujo de agua subterránea, de norte a sur, es decir de Cedral a Matehuala. De la misma manera señala que la parte norte presenta agua de calidad apta para el consumo humano, mientras que la zona sur y sureste presenta agua no apta para consumo humano directo. Y de manera específica, resalta la presencia de puntos con valores altos en nitratos, los cuales se

encuentran dispersos a través de toda el área de estudio, por lo que tal dispersión es un factor de riesgo que hace vulnerable a toda la zona.

Núñez (2007), determinó el índice de vulnerabilidad del agua subterránea, establecido a partir del espesor de la zona no saturada y tomando en cuenta la resistencia hidráulica. Identificó al norte de la ciudad de Matehuala como la zona con mayor grado de vulnerabilidad, debido a la poca profundidad del nivel freático; la zona con vulnerabilidad intermedia ocupa la parte sur y oriental, con un espesor de la zona no saturada entre 10 y 20 m. Y la zona de menor grado de vulnerabilidad abarca toda la parte poniente y centro-norte del área evaluada, donde se localiza el municipio de Cedral, que es una de las zonas que cuenta con un espesor mayor de la zona vadosa. También menciona que existen diferentes zonas dentro del acuífero con concentraciones altas de nitratos, superiores a lo establecido por la NOM-127-SSA1-1994, sin embargo las mayores concentraciones se presentan principalmente en la zona aledaña a la ciudad de Matehuala.

González (2009), determinó una disminución del nivel freático promedio de 45 m del año 1981 a 2007, la parte noroeste de Cedral presentó valores de 65 m; también observó una disminución en el caudal de extracción, sobre todo en el empleado para actividades agrícolas. De igual forma que Pérez (2006), demostró que en la zona norte donde se localiza el municipio de Cedral, el volumen de extracción de agua subterránea es mayor y la calidad del agua es aceptable para consumo humano, mientras que en la zona sur, en Matehuala, los caudales de extracción disminuyen al igual que la calidad del agua. La dirección de flujo la definió en sentido SE desde la parte NW.

Asimismo existen estudios previos realizados en Villa de la Paz sobre el impacto que genera la presencia de la actividad minera en la zona, por citar algunos:

Razo (2002), demostró la existencia de contaminación por arsénico en el área de descarga del acuífero localizada al nororiente de la ciudad de Matehuala, colindando con Villa de la Paz, además de contaminación en suelo y sedimento principalmente por arsénico, cobre, plomo y zinc.

González (2006), afirmó que las concentraciones de metales encontradas en zonas específicas están directamente relacionadas con las actividades mineras, lo que representa que las comunidades vegetales de la zona se encuentren expuestas a metales pesados, tales como cobre, plomo, zinc y arsénico.

Santillana (2009), demostró una ruta de exposición a polvo contaminado proveniente de las actividades mineras con elementos potencialmente tóxicos, influyendo en niveles altos de plomo y arsénico en sangre y orina, respectivamente, en una población de niños menores de 12 años.

De manera regional la dirección de flujo del agua subterránea del acuífero Cedral - Matehuala va de noroeste al sureste, constituyendo el área de recarga la zona de Cedral, presentando una calidad apta para el uso y consumo humano; mientras que Matehuala está cercana a la zona de descarga con una disminución de la calidad del agua, para no ser apta para consumo humano. Aunado a esto, los estudios en Villa de la Paz demuestran contaminación ambiental (suelo y aire) por la presencia de la actividad minera, por lo que se generan las siguientes preguntas de investigación: ¿Villa de la Paz presenta el mismo sistema de flujo?, ¿Qué calidad de agua presenta Villa de la Paz? y ¿Qué factores condicionan la calidad de agua que se emplea para abastecimiento de Villa de la Paz?

2. JUSTIFICACIÓN

La falta de información sobre la calidad del agua usada para abastecer la población del municipio de Villa de la Paz crea incertidumbre sobre las fuentes que posiblemente la condicionen, sobre todo al establecer que en la región de Matehuala se ha identificado que la actividad minera produce impactos negativos en la composición química del agua superficial (Razo, 2002). Además la información sobre los parámetros físicos, químicos y microbiológicos, es necesaria para establecer los posibles riesgos a los que la población, que consume este tipo de agua, está expuesta. Los estudios desarrollados hasta ahora, describen el comportamiento hidrogeológico del agua subterránea de manera regional a escala del acuífero administrativo Cedral – Matehuala; sin embargo, no se cuenta con estudios sobre el comportamiento del agua subterránea de forma local, específicamente en Villa de la Paz.

Es necesario una evaluación de la composición química del agua que se utiliza para el abastecimiento de la población de Villa de la Paz, San Luis Potosí, para definir los factores que condicionan su calidad; naturales o antropogénicos. Esta información ayudará a la toma de decisiones para mejorar la calidad del agua, y tomar medidas preventivas ante la posibilidad de riesgos a la salud. En consecuencia, se estableció un objetivo general de estudio y varios objetivos específicos.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento químico del agua subterránea para entender la variabilidad temporal y espacial de la calidad del agua de abastecimiento de la población de Villa de la Paz.

3.1.1. *Objetivos específicos*

- Definir la caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica del agua subterránea.
- Establecer las reacciones químicas que condicionan la composición química del agua subterránea a través de la modelación inversa.
- Determinar las fuentes naturales y antropogénicas que condicionan la calidad de agua de abastecimiento.
- Proponer alternativas de tratamiento para mejorar la calidad del agua de abastecimiento de la población de Villa de la Paz, SLP.

4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Ubicación geográfica

El municipio de Villa de la Paz se encuentra localizado en la parte norte del estado de San Luis Potosí, en la zona altiplano, con una superficie de 143.93 km², con coordenadas de 100°42' de longitud oeste y 23°41' de latitud norte, con una altitud promedio de 1,800 msnm (metros sobre el nivel del mar). Colinda al norte con el municipio de Cedral, al este con el municipio de Matehuala, al sur con el municipio de Villa de Guadalupe y al oeste con el municipio de Catorce (Figura 2).

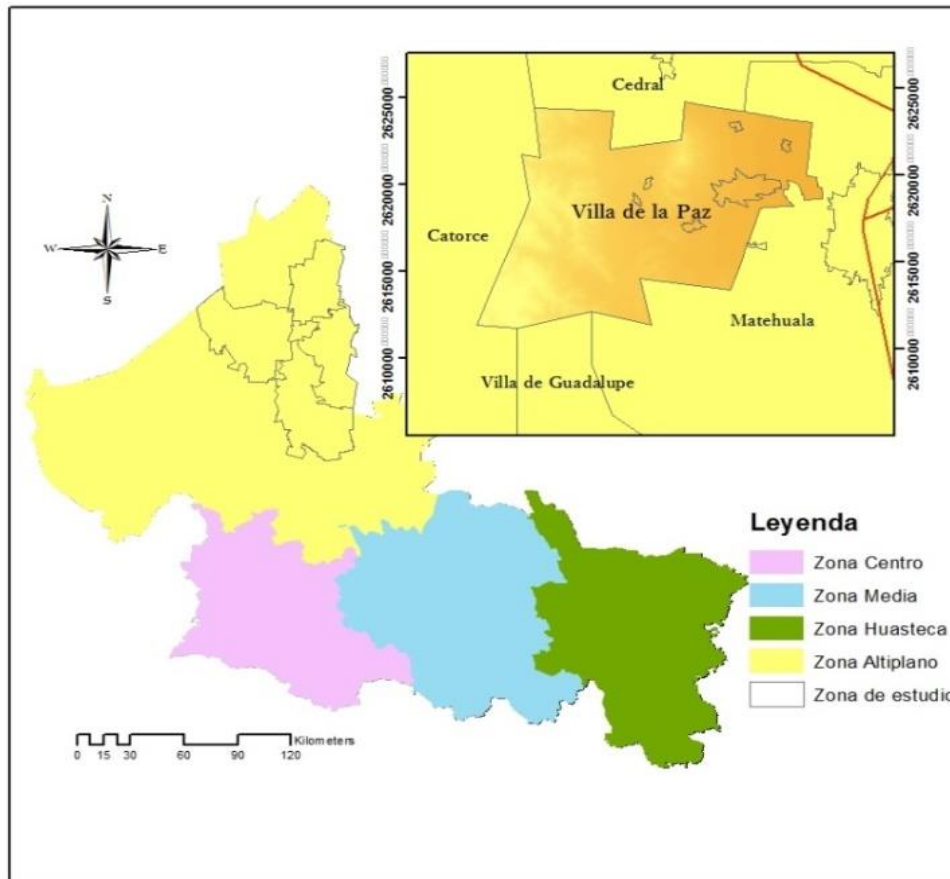


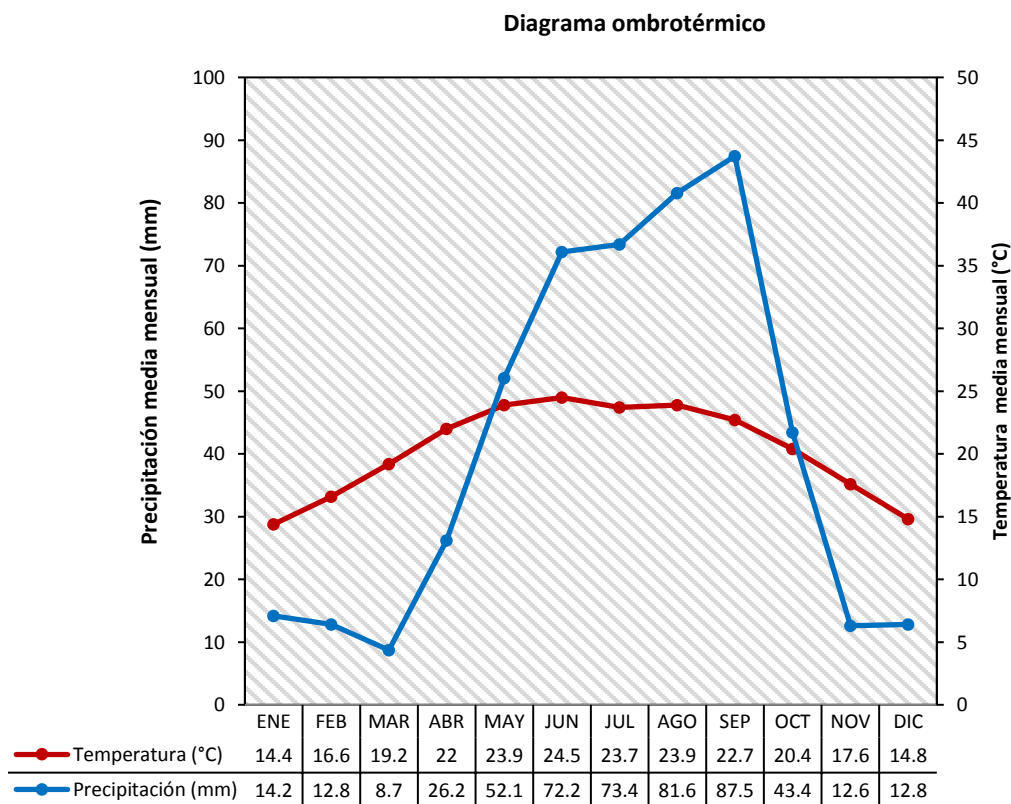
Figura 2. Ubicación geográfica del municipio de Villa de la Paz
(Fuente: Inegi, 2010)

El municipio cuenta con una población total de 5,350 habitantes distribuida en 16 localidades, las cuales dependen directamente de la cabecera del municipio (Villa de la Paz); estas localidades son: Barbechos, La Boca, El Carmen, Jaquis, El Jato, Laureles,

Limones, Los Nazarios, San Antonio de las Trojes, Refugio Soria, Jesús Martínez, Rosalio Noriega, La Luz, María Estrada y San Antonio de Zaragoza (INEGI, 2010).

4.2. Clima

Debido a la topografía que presenta, se identifican tres tipos de climas: seco templado, semiseco templado, y templado subhúmedo con lluvias en verano (INEGI, 2009). De acuerdo al diagrama ombrotérmico (Gráfica 1), se definen dos estaciones, una estación seca que comprende de noviembre a mayo y una estación húmeda de junio a octubre. La temperatura media anual es de 20.3°C, con una temperatura máxima de 28.6°C y una mínima de 12°C, con precipitaciones que oscilan entre 270 a 525 mm/año (González, 2009). En la región los vientos soplan predominantemente en dirección N y SE, y durante periodos menores soplan vientos en dirección NE, E y S (Razo et al., 2004).



Gráfica 1. Diagrama ombrotérmico, estación 024040 ubicada en Matehuala, latitud 23°40'50" N, longitud 100°38'40" W, altitud 1,589, periodo 1951 a 2010. (Fuente: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=172:san-luis-potosi&catid=14&Itemid=2)

4.3. Geología

En la zona de estudio hay unidades geológicas que incluyen rocas sedimentarias marinas y continentales, así como rocas ígneas y metamórficas de contacto. Las rocas sedimentarias constituyen las unidades geológicas de mayor distribución, tanto en la superficie como en el subsuelo. Las de origen marino afloran ampliamente en las elevaciones que se presentan en los flancos oriental y occidental de la zona, dispuestas en estructuras plegadas de orientación preferencial norte – sur. Los materiales sedimentarios de origen continental se presentan en las zonas topográficas de menor elevación, distribuyéndose en zonas de pie de monte y en la planicie central. Existen dos afloramientos importantes de rocas ígneas intrusivas, uno de ellos se encuentra alrededor de Villa de la Paz y el otro en Real de Catorce. Las rocas ígneas extrusivas comprenden basaltos que tiene una extensión limitada. (Pérez, 2006).

4.3.1. Estratigrafía

Las Formaciones geológicas que afloran en la zona de estudio han sido reportadas en diferentes trabajos que se describen a continuación (Figura 3), las cuales son:

Mesozoico:

Formación La Joya (Jsj), se define como una secuencia clástica continental constituida en la base por conglomerados y limonitas, y en la parte superior por arcillas rojas, limonitas y areniscas conglomeráticas. Se encuentra expuesta en la parte central y en el flanco noroeste de la Sierra de Catorce. Consiste de un conglomerado polimíctico, que contiene fragmentos subredondeados de las rocas volcánicas y metasedimentos subyacentes, con diámetros de los clastos que van desde los 3 hasta los 10 cm de areniscas conglomeráticas, areniscas finas de color café rojizo, de limolitas y lutitas de color rojo violáceo a café rojizo en la parte superior, con manchones de color amarillento y verdoso debido a alteraciones hidrotermales posteriores e intemperismo; estas limolitas y lutitas se presentan en capas de 20 a 30 cm con un marcado clivaje pizarroso o en parte masivas.

Formación La Caja (Jsc), está compuesta de calizas delgadas y margas, que afloran en la Sierra de La Caja en el norte de Zacatecas. Su contacto con las calizas gruesas de la

subyacente Formación Zuloaga es de tipo discordante. Consiste de limolitas, limolitas con pedernal y calizas negras recristalizadas con gran cantidad de fósiles (pelecípodos principalmente). Una característica sobresaliente hacia la base de la unidad, es la presencia de un horizonte de pedernal color gris rojizo de 2 a 3 m de espesor. En la porción superior está constituida por limolitas y limolitas con pedernal, con concreciones de caliza oscura y material fosfórico. Su espesor total varía de 30 a 40 m.

Formación Cupido (Kic), consiste en una secuencia de calizas de color gris con estratificación delgada y de 400 a 500 m de espesor calizas. Aflora principalmente en la parte central y en el flanco norte de la Sierra de Catorce, y de forma aislada en su flanco este. En la zona consiste en calizas de color gris a gris claro con capa de 0.5 a 0.6 m de espesor; con concreciones de pirita oxidada y estilolitas. Aisladamente se localizan capas pequeñas de margas y lutitas.

Formación El Abra (Kid), se estudió esta unidad dentro de la plataforma Valles – San Luis que consiste de calizas de ambiente de plataforma de edad Valanginiano – Cenomaniano denominándolas Formación el Abra. La localidad tipo se encuentra al oriente de Ciudad Valles, S.L.P.; en el poblado El Abra. Dentro de la zona de estudio se encuentran en la región oriental y constituyen la denominada Sierra El Azul, también se encuentra en el flanco este de la Sierra de Catorce y en algunos lomeríos dispersos en la planicie (Pérez, 2006).

La Formación Cuesta de Cura (Kcc) aflora en la zona del Cerro Del Membrillo, en el centro de la Sierra del Fraile y en la parte sur de la mina Cobriza. En la zona de estudio está constituida de capas de caliza de color gris intermedio a oscuro en capas delgadas con bandas y lentes delgados de pedernal negro, el cual toma un color claro cuando está en contacto con las zonas de *skarn*, y se observan algunas intercalaciones de materiales terrígenos. El espesor considerado en la Sierra de Catorce es de 100 a 150 m, en tanto que en el Distrito Minero La Paz, se le asigna un espesor de 300 m.

La Formación Indidura (Ksi), consiste en capas alternadas de calizas arcillosas y lutitas de color gris, con tonalidades que van del rojo violáceo al amarillo verdoso en superficie intemperizada. Sus afloramientos se localizan al sur de la Mina Dolores, la parte central

de la Sierra Del Fraile y al norte la de la Mina Cobriza, todo en el flanco oriente de dicha serranía (González, 2013).

Formación Caracol (Ksc), se describen como capas de lutitas calcáreas de color gris pardo en superficie fresca y amarillento en superficie intemperizada y escasas areniscas a diferencia de otros afloramientos descritos hacia el suroeste. Las areniscas son de grano fino y se presentan en capas delgadas con laminación paralela y oblicua curvada. Ocasionalmente pueden ocurrir capas delgadas margosas (Pérez, 2006).

La Formación Tamaulipas Superior (Kts) fue definida como una serie de estratos de caliza compacta, cuyos colores varían de blanco y crema a café claro y café, presentando ocasionalmente intercalaciones de caliza arcillosa, compacta, de color negro; son frecuentes los nódulos y capas de pedernal de colores negro, blanco y gris. En el distrito se localiza en la parte sur, aflorando en el Cerro Del Muerto, Arroyo Dolores y Arroyo El Mármol. Está constituida de capas de caliza de grano grueso, calcarenita, de estratos de medios a gruesos, mostrando estilolitas, con nódulos de pedernal de color negro y que cambian a blanco en las cercanías de las zonas de *skarn*.

Formación Agua Nueva (Kan); los afloramientos se localizan en la zona sur de la mina Dolores, la parte central de la Sierra Del Fraile y al norte de la Mina Cobriza, en el flanco oriente de dicha serranía. Muestra una litología de estratos de caliza arcillosa finamente bandeada, caliza de grano fino a medio de color gris a negro, en capas de espesor delgado a medio que alternan con estratos medianos a gruesos de lutita laminar de color gris a gris oscuro a negro, de intemperismo amarillento, ligeramente rojizo; una de sus características principales es la presencia de lentes o láminas de pedernal negro. En la zona de estudio se le ha asignado un espesor de 200 m (González, 2013)

Cenozoico:

Rocas Intrusivas, en zona como el Cerro del Fraile existen porciones de cuerpos ígneos intrusivos que consisten en rocas de composición félsica a intermedia que afectan a diversas formaciones de rocas sedimentarias, además de que tienen estrecha relación con los yacimientos metálicos que se explotan en la zona. Dentro de la Sierra El Fraile, los sedimentos calcáreos del Mesozoico son fracturados por el emplazamiento de un

Plutón granodiorítico de edad Mioceno que se supone es el origen de la mineralización en el distrito minero de Santa María de la Paz (Pérez, 2006).

Conglomerado polimíctico (Qcgp), es un material formado por fragmentos constituidos de rocas sedimentarias (Hernández, 2008).

Coluvión (Qhoal), está formado por arcillas y se encuentra en la mayoría de la superficie del terreno como producto de la erosión a la que se encuentran sometidas las rocas y sedimentos del área.

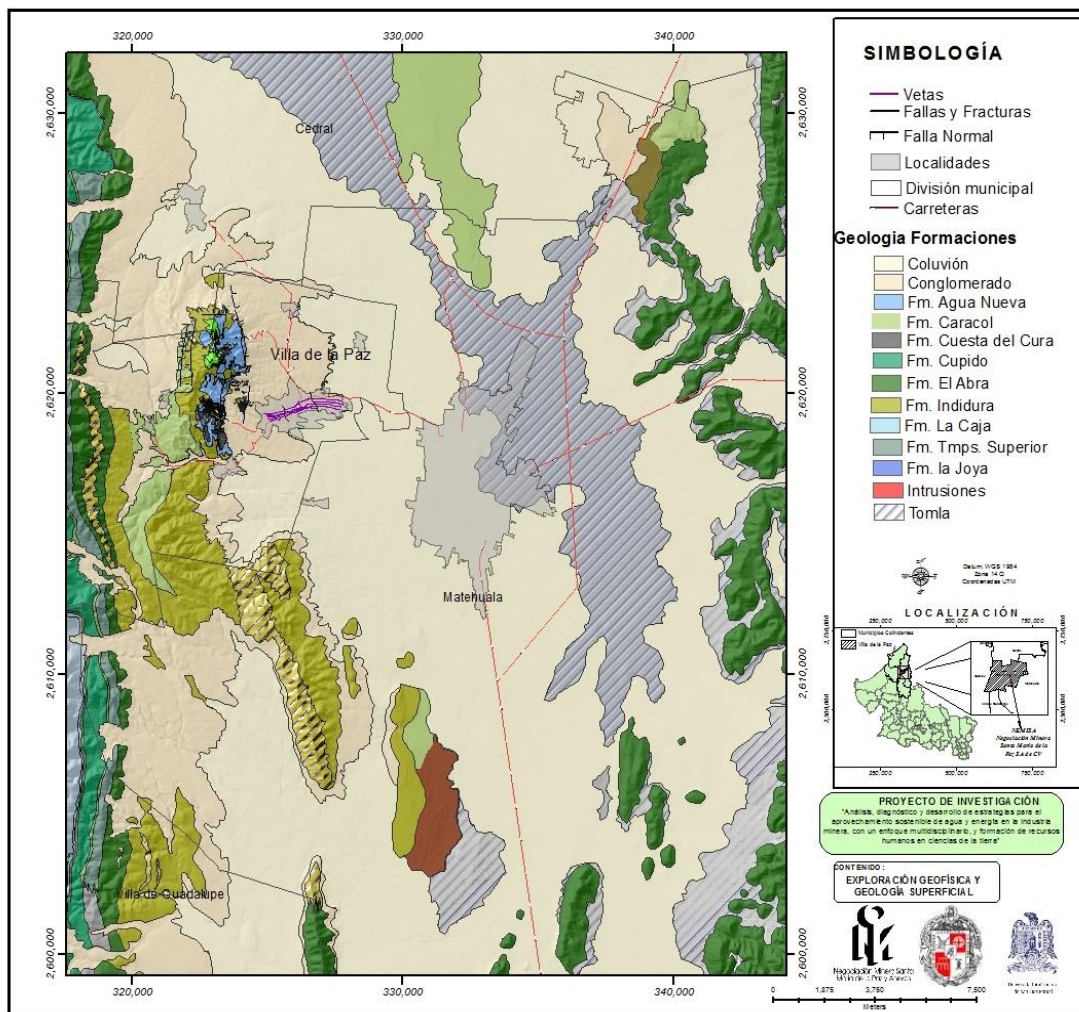


Figura 3. Estratigrafía y geología de la zona de estudio.
(Fuente: INEGI, 2010; SGM, 1999; González, 2013)

4.4. Suelo y vegetación

Los suelos del área de estudio pueden clasificarse como neutros a ligeramente alcalinos (valores de pH de 6.4 a 8.5 en agua destilada y de 6.5 a 8.3 en CaCl_2 0.1 M). Estos valores de pH pueden ser directamente relacionados a los tipos de suelo litosol y xerosol (Razo, 2002).

El uso de suelo de la zona de estudio, de acuerdo a sus afinidades y similitud de usos, se clasifica en: Agrícola – Pecuario – Forestal y Ecológica – Florística – Fisonómica (Figura 4).

Agrícola – Pecuario – Forestal: Incluyen los diferentes sistemas manejados por el hombre y que constituyen propiamente una cubierta de usos de suelo:

- Agrícola: corresponden a áreas de producción de cultivos obtenidos para consumo humano, ya sea como alimentos, forrajes, ornamental o industrial. Esta a su vez se divide de acuerdo con el suministro de agua:
 - Temporal: cuando el agua necesaria para su desarrollo vegetativo es suministrada por la lluvia. Es lo que se observa principalmente en la zona de estudio.
 - Riego: cuando el suministro de agua utilizado para su desarrollo es por fuentes externas (pozo). La agricultura de riego se extiende en el municipio de Cedral y Matehuala, donde el maíz blanco es el principal cultivo en la zona.
- Pecuario: lugares donde se realiza la explotación ganadera de manera intensiva o extensiva para la obtención de diferentes productos. Cedral y Matehuala son municipios donde crían ganado porcino, ovino y caprino.
- Forestal: Se refiere a la utilización de especies forestales cultivadas ex profeso o bien manejadas para la obtención de diferentes productos (madera, aceites, leña, hojas, etc). En la zona de estudio no se encuentran áreas destinadas para este uso de suelo.

Ecológica – Florística – Fisonómica: Dentro de este sistema las clases están organizadas en base a las características de los tipos de vegetación con afinidad ecológica y fisonómica.

- Pastizal. Son ecosistemas constituidos por comunidades herbáceas donde predominan las gramíneas y las graminoides, en algunos casos son de origen natural, pero en otros obedece a condiciones de perturbación por sobrepastoreo.
- Matorral desértico micrófilo. Se conforma por elementos arbustivos propios de zonas áridas que se caracterizan por tener hojas de tamaño reducido. Se establece preferentemente en terrenos planos y en las porciones inferiores de los cerros en altitudes entre 1,000 y 2,300 msnm, en clima semiseco, seco y muy seco templado. El matorral está formado por individuos arbustivos cuyas alturas van de los 0.5 a los 2.5 m, entre ellos destacan: Gobernadora (*Larrea tridentata*), duraznillo (*Opuntia leucotricha*), huizache (*Acacia sp*) y nopal (*Opuntia sp*).
- Matorral desértico rosetófilo. Este tipo de vegetación debe su nombre a especies arbustivas a sub – arbustivas de hojas alargadas y estrechas, agrupadas a manera de rosetas, se les puede encontrar en lugares de poca inclinación siempre que el suelo contenga abundante grava con fragmentos de roca caliza (Cedral, Vanegas y Matehuala). Las especies más comunes son: lechuguilla (*Agave lechuguilla*), sotol, palma Samandoca (*Yucca carnosana*), Candelilla (*Euphorbia antisiphilita*) y palma China (*Yucca filifera*), ocotillo, mezquite y variedades diversas de cactáceas (INEGI, 2012).

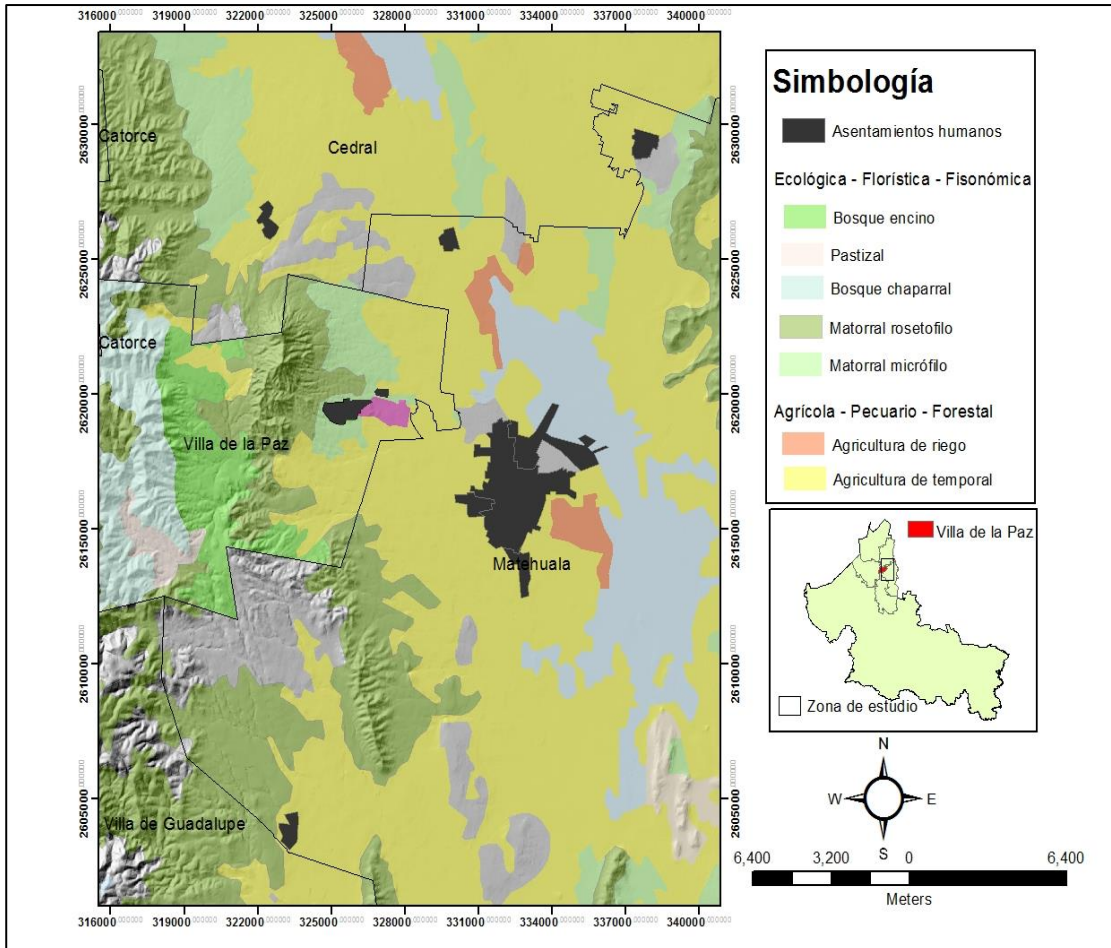


Figura 4. Uso de suelo en la región de estudio. (Fuente; INEGI, 2009)

4.5. Hidrología

El municipio de Villa de la Paz, se encuentra localizado en la región hidrológica No 37 llamada El Salado en la cuenca Matehuala, y la subcuenca del mismo nombre (Figura 5). Dentro de esta subcuenca no se cuentan con corrientes superficiales perennes, solo se localizan arroyos de carácter intermitente, los cuales se forman en las sierras y transportan agua únicamente en la época de lluvias, sin ninguna utilización económica. Los escurrimientos principales provienen de las Sierras San Bartolo, Catorce y El Azul, se dirigen hacia zonas más bajas, condicionados por la topografía y la elevación; la salida de dichas corrientes corresponde a los límites de la subcuenca Matehuala, donde colinda el municipio de Matehuala con Villa de Guadalupe.

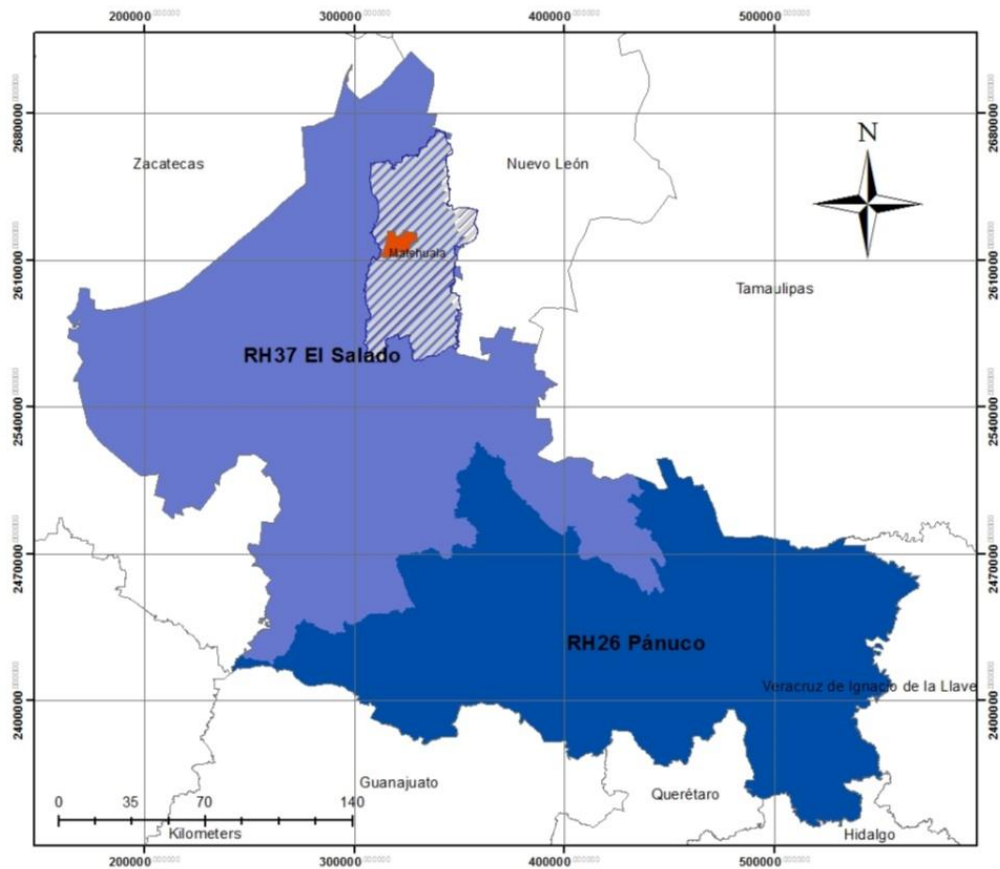


Figura 5. Región hidrológica No 37 El Salado, cuenca Matehuala. (Fuente: INEGI, 2010)

Los arroyos principales que se forman en temporada de lluvias se generan cercanos a la sierra, denominados: Cajón Los Nopales, Arroyo Grande, Las Pilas y Jaquis, estos se forman en la microcuenca 5, 2 y 6, respectivamente (Figura 6), en la parte oeste de Villa de la Paz (INEGI, 2009).

Dentro de la zona de estudio no se cuentan con cuerpos de agua superficial importantes, solo estanques que se utilizan como abrevaderos ubicados en la localidad de La Boca (13) y otro al pie del cerro del Fraile, en Villa de la Paz (4), estos se localizan en la microcuenca número 4.

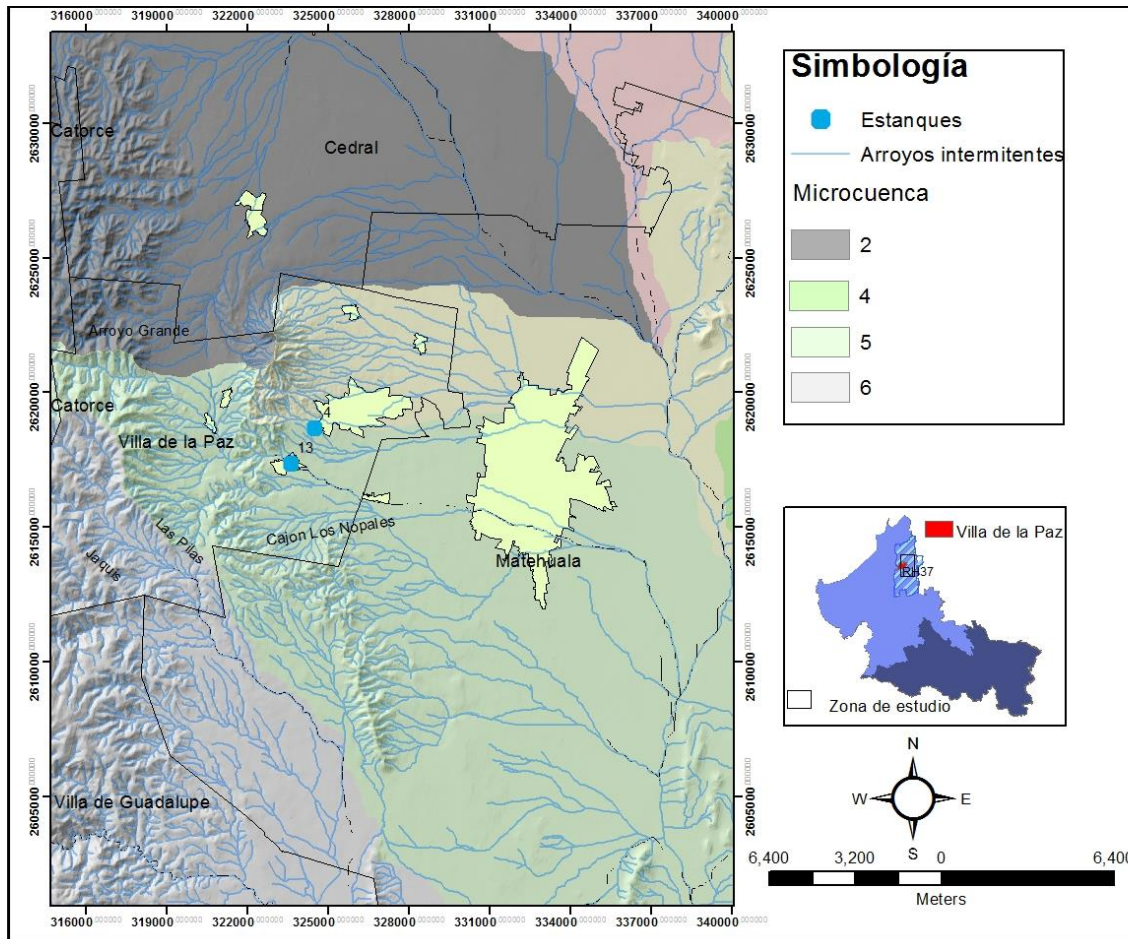


Figura 6. Arroyos intermitentes, microcuencas en zona de estudio. Red hidrológica (Fuente: INEGI, 2010).

5. METODOLOGÍA

La metodología consistió en una etapa de trabajo de campo y una etapa de procesamiento e interpretación de resultados, las cuales se trabajaron en conjunto, conforme se obtenían los datos. El trabajo de campo consistió en la toma de muestras a lo largo de un año, considerando la estación seca y la estación húmeda, determinadas de acuerdo al diagrama ombrotérmico. Además de la medición de los niveles estáticos del agua subterránea. Los meses de muestreo correspondieron a: marzo (estación seca – 2014) – junio (inicio de estación húmeda) – octubre (fin de estación húmeda) – marzo (estación seca – 2015).

5.1. Muestreo de agua

Las muestras se tomaron de diferentes fuentes: agua de lluvia, superficial y subterránea. Dado que se evaluó la calidad del agua de Villa de la Paz, los puntos de muestreo de agua subterránea se definieron tomando en cuenta los aprovechamientos del sistema de abastecimiento de Villa de la Paz. El sistema de abastecimiento de Villa de la Paz incluye 4 pozos, los cuales están ubicados en las localidades de La Boca, Barbechos, y El Blanco, pertenecientes al municipio de Villa de la Paz y Cedral respectivamente, y 6 piletas que se emplean para el almacenamiento de agua previo a su distribución, de las cuales son tres las que están conectadas directamente a la red.

Las muestras corresponden a agua empleada para consumo humano del municipio de Villa de la Paz; sin embargo, debido a la dinámica del agua subterránea, no es posible aislar solo el estudio a los límites establecidos por la división política del municipio, por lo que además se muestrearon pozos de la ciudad de Matehuala, Cedral y de la mina Santa María de la Paz y Anexas, S.A. de C.V.; aunque estos últimos no son parte del sistema de distribución del municipio, ayudan a conocer el comportamiento hidrogeológico del agua subterránea, lo que permite entender la variabilidad de la calidad del agua. Debido a la ausencia de cuerpos de agua superficial de carácter importante, el muestreo de agua superficial consistió en la toma de muestra de dos estanques ubicados en el municipio, utilizados como abrevadero para animales. Los puntos de muestreo que corresponden al agua de lluvia se definieron tomando en cuenta la diferencia de altitudes que presenta la región; las estaciones de colecta de agua de lluvia se colocaron en Santa Lucía (1,457 msnm), Matehuala (1,620 msnm) y en el municipio Villa de la Paz (2,209 msnm), abarcando la misma zona de muestreo del agua subterránea.

5.1.1. Toma de muestras

Las muestras de agua de lluvia se colectaron en recipientes de 20 L, acondicionados para evitar la incidencia de los rayos de sol (Figura 7), a los cuales se les agregó 100 mL de aceite mineral 55 N.F., para evitar la pérdida de agua a través de la evaporación. Las muestras que se colectaron corresponden al mes de enero, junio, agosto y diciembre del 2014.



Figura 7. Estaciones de colecta de agua de lluvia.

Posterior a la recolección del agua de lluvia, las muestras se filtraron para eliminar el aceite mineral y cualquier partícula extraña contenida dentro de la muestra. La muestra filtrada se separó en frascos pequeños de polietileno para medir la concentración de cationes, metales y metaloides traza (100 mL) y aniones (500 mL).

Los aprovechamientos que forman parte del sistema de abastecimiento se muestrearon para realizar análisis bacteriológicos, metales y metaloides traza, y elementos mayores; mientras que, para los aprovechamientos que no forman parte del sistema de abastecimiento de agua, solo se tomaron muestras para analizar metales y metaloides, nitratos y elementos mayores.

Durante la toma de la muestra en campo se llenó la ficha de campo con los datos y observaciones por punto de muestreo (Anexo I), esto para llevar un registro de las condiciones físicas y de campo de cada aprovechamiento muestreado.

El muestreo debe considerar aspectos para la preservación y conservación de las muestras, con el propósito de evitar alteraciones químicas previas a los análisis químicos, por lo que se consideraron los siguientes puntos:

Filtrado: las muestras de agua pueden contener sólidos o coloides en suspensión que necesitan ser removidos durante el muestreo, para lo cual se hacen pasar a través de filtros de membrana de 0.45 μm . Jeringas y cartuchos de filtro son frecuentemente útiles

para la manipulación de la muestra. Durante el procedimiento se usaron jeringas de 60 mL y cartuchos de filtros para mantener a la muestra fuera de contacto con la atmósfera.

Preservación: la preservación se logra por medio de la acidificación. Con la finalidad de evitar el crecimiento de la mayoría de bacterias, la adsorción en el recipiente o precipitación de metales y metaloides, se adicionó ácido nítrico y ácido sulfúrico concentrado a las muestras, para después analizar la concentración de metales y nitratos respectivamente.

Conservación: la refrigeración a una temperatura de 4°C ayuda a la conservación de las muestras así como su almacenamiento previo a los análisis. El almacenamiento y refrigeración se realizó en campo con la ayuda de recipientes de aislación térmica y adición de hielo.

Esterilización: para la toma de muestras del análisis bacteriológico se debe crear una zona estéril, y así disminuir el riesgo de contaminación externa a la matriz. La zona estéril se generó con una lámpara de alcohol, la cual se mantuvo encendida 30 s previos a la toma de muestra y durante la toma de muestra, además del uso de guantes de latex estériles desechables.

Eliminación de burbujas de aire: Durante el llenado de los recipientes se eliminan las burbujas de aire, para evitar disolución de CO₂ proveniente de la atmósfera, el cual modifica el pH y provoca la generación de diversas reacciones que modifican principalmente el sistema de carbonatos.

En la tabla 1 se indica el agente preservador y el volumen tomado de las muestras en función de los análisis químicos realizados.

Además de estas consideraciones, hay mediciones que se recomienda realizar en campo, ya que la composición química del agua está controlada por equilibrios químicos de los carbonatos y de otros minerales que varían en función del tiempo y de las condiciones originales en las que se encuentra el agua subterránea. Los parámetros de medición *in situ*, corresponden a: pH, temperatura, conductividad eléctrica, potencial redox, concentración de oxígeno disuelto y alcalinidad.

Parámetro	Preservador	Recipiente
Cationes, metales y metaloides traza	HNO ₃ concentrado (0.7 mL / 100 mL) Refrigeración a 4°C	Polietileno (100 mL)
Alcalinidad total, sulfato, cloruro, fluoruro	Refrigeración a 4°C	Polietileno (500 mL)
Nitrato	H ₂ SO ₄ concentrado (0.7 mL / 100 mL) Refrigeración a 4°C	Polietileno (100 mL)
Microbiológico	Refrigeración 4°C	Bolsa estéril (100 mL)

Tabla 1. Preservación y volumen de muestras de agua.

Las mediciones de temperatura, pH y conductividad eléctrica se realizaron con un equipo digital portátil modelo pC18, para potencial redox se utilizó un equipo modelo pH15 y para el oxígeno disuelto un equipo digital modelo Ox25, todos marca conductronic; estos parámetros se midieron en una celda cerrada, lo más cercano a la fuente de extracción para evitar que el agua entre en contacto con la atmosfera y que se modifiquen sus condiciones originales (Figura 8).



Figura 8. Mediciones en campo en celda cerrada.

La alcalinidad se determinó mediante la Titulación de Gran, la cual consiste en la adición de un volumen de HCl necesario para que el pH de la muestra llegue al punto de equivalencia ($\text{pH} = 4.3$), lo que indica que el HCO_3^- se ha convertido en H_2CO_3 ; a partir de estos valores se construye una gráfica, donde se calcula la alcalinidad total de la muestra (Ec 1) (Figura 9).

$$\text{Alcalinidad} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{CaCO}_3 \right) = \frac{[(\text{Punto equivalencia})(N_{\text{HCl}})] \times (50) \times (1000)}{\text{Volumen de la muestra (mL)}} \quad (\text{Ec } 1)$$

Donde :

N_{HCl} = Normalidad del ácido clorhídrico

50 es el factor para convertir los eq/L a mg/L de CaCO_3

1000 es el factor para convertir mL a L.

PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA ALCALINIDAD

POR MEDIO DE LA TITULACIÓN DE GRAN

CLAVE DE LA MUESTRA, LABORATORIO Y CAMPO

"VP-AS-C78"

pH	Vol HCl (mL) añadido	Función de Gran
7.23	0.000	0.00015
7.0	0.013	0.00025
6.78	0.031	0.00042
6.24	0.050	0.00144
5.8	0.069	0.00397
5.35	0.081	0.01120
4.71	0.088	0.04892
3.74	0.094	0.45663
3.31	0.100	1.22934
3.05	0.106	2.23757

Vol muestra=	25 mL
Normalidad HCl=	1.6 N
P. Equivalencia=	0.091 mL
AlcalinidadTot.=	289.60 mg/LCaCO ₃
HCO ₃ =	353.31 mg/L

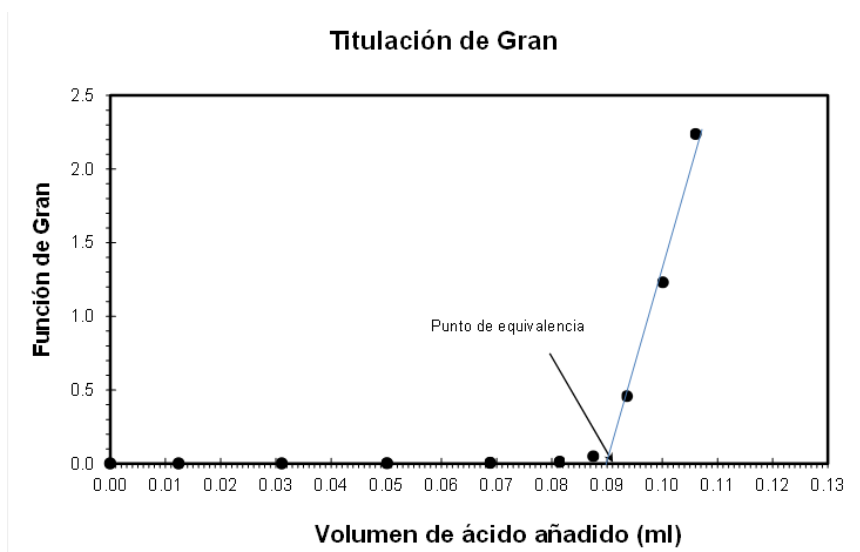


Figura 9. Titulación de Gran, determinación de alcalinidad total.

5.2. Análisis químicos

Los análisis químicos se definieron con base a lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994 y tomando en cuenta la clasificación para la composición química del agua subterránea. La composición del agua subterránea varía considerablemente en función de la unidad geológica que constituye el acuífero; sin embargo, se han generalizado solutos inorgánicos que se encuentran en el agua subterránea de manera natural. Estos solutos se han clasificado de acuerdo a las concentraciones en las que se suelen encontrarse en la naturaleza. Los iones que se encuentran en concentraciones mayores a 5 mg/L son llamados elementos mayores: HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ . Los elementos menores corresponden aquellos que se encuentran entre 0.01 a 10 mg/L en la naturaleza: CO_3^{2-} , F^- , B , Fe , NO_3^- , K^+ , Sr . Y los elementos traza se encuentran regularmente menor a 0.1 mg/L: Al , Sb , As , Ba , Be , Bi , Br , Cd , Ce , Cs , Cr , Co , Cu , Ga , Li , Mn , V , Ag , Se , Mo , Ni , P , Pt , Ag , Zn , V , U , etc ((Kehew, 2000).

Consecuentemente los análisis químicos que se determinaron para conocer la composición química del agua subterránea, además de los parámetros de campo, corresponden a los elementos mayores: HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y a los elementos menores: CO_3^{2-} , F^- , NO_3^- , K^+ , Sr . Y con respecto a la norma NOM – 127 – SSA1 – 1994, se analizaron los constituyentes químicos: Al , As , Ba , Cd , Cu , Cr , Fe , Mn , Hg , Pb , Zn y los elementos bacteriológicos: organismos coliformes totales y organismos coliformes fecales, para complementar el análisis de calidad del agua con respecto al uso y consumo humano.

Las determinaciones de los elementos mayores, los elementos menores y los análisis bacteriológicos de las aguas subterráneas y superficiales se llevaron a cabo en el laboratorio de análisis químicos de la Facultad de Ingeniería de la UASLP. Estos análisis se hicieron bajo las técnicas definidas por las normas mexicanas respectivas para cada elemento (Tabla 2). Las muestras de agua de lluvia se analizaron en el laboratorio de geoquímica del instituto de geología de la UASLP. La determinación de los aniones (NO_3^- , F^- , Cl^- , Br^- y SO_4^{2-}) se hicieron a través de un cromatógrafo de iones, Dionex ICS – 5000+SP, y para los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) se determinaron por medio del ICP-OES, Icap7400 Duo. Los metales pesados (Al , As , Ba , Cd , Cu , Cr , Fe , Mn , Hg , Pb , Zn) se

analizaron por medio del ICP - MS, XSeries 2, tanto para muestras de agua superficial como subterránea.

Parámetro	Técnica	Norma
pH	Potenciométrica	NMX – AA – 008 – SCFI – 2011
Sólidos Totales Disueltos	Conductimétrica	---
Alcalinidad total	Volumétrica/Naranja de metilo/Fenolftaleína	NMX – AA – 036 – SCFI - 2001
Dureza total, de calcio y magnesio	Volumétrica/EDTA	NMX – AA – 072 – SCFI – 2001
Cloruros	Volumétrica/Argentométrico	NMX – AA – 073 – SCFI – 2001
Sulfatos	Turbidimétrica/Cloruro de Bario	NMX – AA – 074 – SCFI - 1981
Nitrógeno de Nitratos	Turbidimétrica/Reducción de cadmio	NMX – AA – 079 – SCFI - 2001
Fluoruros	Espectrofotométrica/SPADNS	NMX – AA – 077 – SCFI – 2001
Sodio, potasio	Espectroscópica/Absorción Atómica (AA)	NMX – AA – 051 – SCFI – 2001
Aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, hierro, manganeso, mercurio, plomo, zinc	Espectroscópica/Absorción Atómica (AA)/ICP-OES/ICP-MS	NMX – 051 – SCFI – 2001 (para AA)
Organismos coliformes totales y Organismos coliformes fecales	Microbiológica/Número más probable (NMP)	NMX – AA – 42 – 1987

Tabla 2. Parámetros y técnicas de laboratorio para el análisis químico de las muestras de agua, Villa de la Paz.

5.3. Piezometría

Para determinar la dirección del flujo preferencial del agua subterránea se definió la carga hidráulica, la cual se obtuvo a partir de la piezometría. La carga hidráulica es la energía que permite que el agua subterránea se mueva hacia una dirección específica, la cual está en función de una componente que se deriva de la elevación (energía potencial), una relacionada con la presión y una vinculada con la velocidad (energía cinética) (Ec 2)

$$h = \frac{P}{\rho g} + z + \frac{v^2}{2g} \quad (Ec2)$$

Dónde:

h = carga hidráulica (m)

g = constante gravitacional (9.81 m/s²)

ρ = densidad del agua

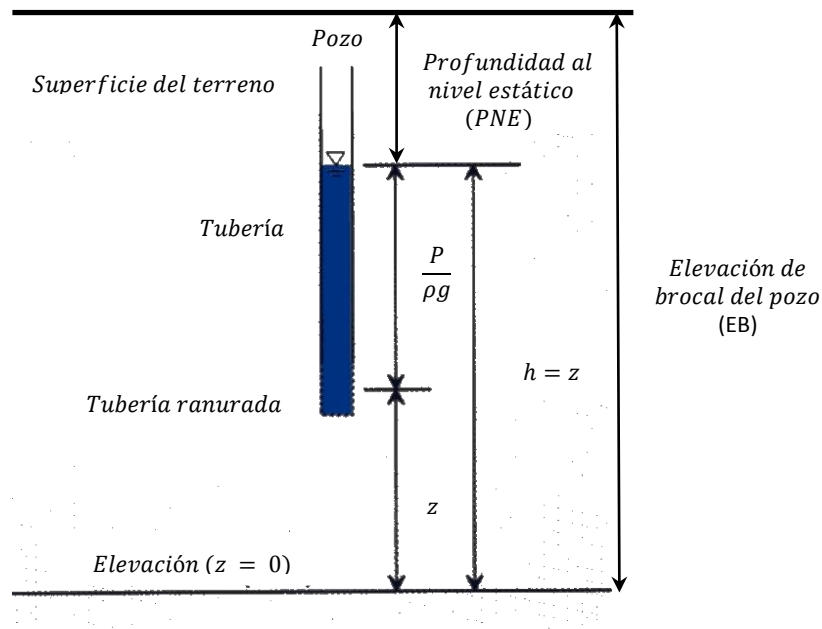
P = presión del agua

z = altura de la columna del agua

v = velocidad del flujo

De este modo, la carga hidráulica (h) se reduce a términos de carga de presión, carga de elevación y carga de velocidad. No obstante, el flujo del agua subterránea presenta velocidades tan lentas que su energía cinética generalmente es despreciable. Por lo tanto, la carga hidráulica queda en función de la energía potencial y de la presión (Ec 3) (Figura

10) (Price, 2003). Es importante tener un plano de referencia para definir la energía potencial, generalmente el nivel del mar se toma como plano de referencia.



$$h = \frac{P}{\rho g} + z = EB - PNE \quad (Ec 3)$$

Figura 10. Determinación de las cargas hidráulicas del agua subterránea

Para el cálculo de la carga hidráulica se midió la profundidad del nivel estático (*PNE*), con una sonda de longitud de 250 m y se registró la altura y la elevación del brocal obtenida a través de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) tipo navegador, la cual después se confirmó con el modelo digital de elevación para disminuir el error de medición, ya que el GPS tiene una incertidumbre de ± 3 m. Esta información se registró en campo en el formato de piezometría (ANEXO II), el cual permitió tener un control de los aprovechamientos medidos.

El trazo de las líneas equipotenciales (igual carga hidráulica) se lleva a cabo mediante un proceso de interpolación (utilizando kriging) a partir de los puntos en donde se registró la carga hidráulica. La dirección del flujo subterráneo se presenta en la dirección de disminución de la carga hidráulica y perpendicular a las líneas equipotenciales (se supone un medio homogéneo e isótropo), es decir, la dirección del agua subterránea se presenta de zonas de mayor a menor carga hidráulica.

5.4. Procesamiento de datos

Una vez obtenidos los datos de la composición química de las muestras de agua se procedió a la caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica. Para lo cual se usaron diferentes programas:

AquaChem, versión 222014.1: Es un programa desarrollado para el modelado de datos de la calidad del agua, usando métodos numéricos. Con este programa se determinó la condición de electroneutralidad, los tipos de familias de agua, y los diagramas de Stiff, además del análisis estadístico y la calidad del agua con respecto a la NOM – 127 – SSA1 - 1994.

Surfer, versión 11.0.642: Es un programa gráfico para representar espacialmente los datos obtenidos. Se usó para representar los diagramas de stiff en los diferentes mapas de resultados. De igual manera se elaboró el mapa de la dirección preferencial del flujo del agua subterránea.

Phreeqc for Windows, versión 2.15.06: Está diseñado para llevar a cabo una gran variedad de cálculos geoquímicos. Con este programa se determinaron las reacciones químicas a través del proceso de modelación inversa.

ArcGIS, versión 10.0: Proporciona un marco para la implementación de sistemas de información geográfica, con el que se realizó la representación espacial de las zonas de estudios.

Para la representación de la Topografía de las zonas de estudio y de los resultados, se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) del estado de San Luis Potosí con una resolución de 15 m. La red hidrográfica se trabajó a una escala 1:50,000 considerando puntos de drenaje, líneas de flujo, y unidades de captación de agua superficial (subcuenca, cuenca). La información referente al uso de suelo y vegetación se obtuvo a partir de la capa unión que presenta la información de las áreas agrícolas y la distribución de la cubierta vegetal del estado, información generada durante 2011 y 2012 con una escala de 1:250,000. Esta información se obtuvo de la página web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Para la información de la geología se emplearon las

cartas topográficas Matehuala F14-A25 y la de Real de Catorce F14-A24, obtenidas del Servicio Geológico Mexicano (SGM). La información se procesó en el Sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) región 14N y datum: WGS_84 (World Geodetic System 84).

6. HIDROGEOLOGÍA

Desde el punto de vista de administración del agua, el municipio de Villa de la Paz, se localiza en el acuífero administrativo Cedral – Matehuala, que abarca de forma parcial los municipios de Matehuala, Cedral, Real de Catorce, Guadalupe, y comprende en su totalidad el municipio de Villa de la Paz; es de tipo libre, conformado por arenas y gravas, heterogéneo y anisótropo (Pérez, 2006). Incluye diversas unidades geológicas, con origen y naturaleza variadas que incluyen rocas sedimentarias marinas y continentales, así como rocas ígneas y metamórficas de contacto.

Pérez (2006), determinó que el agua subterránea del acuífero Cedral - Matehuala circula a través de dos medios físicos: medio granular y medio fracturado. El medio granular es la unidad litológica donde se emplazan la mayor parte de los aprovechamientos de agua subterránea. El medio fracturado son rocas de superficie, fuentes potenciales de infiltración del agua meteórica que puede llegar a la zona de saturación; en el subsuelo son una componente fundamental del movimiento del agua subterránea donde son rebasados los materiales sedimentarios continentales. La disposición de los medios granulares y fracturados integran el sistema que controla la ocurrencia del agua subterránea ya que condiciona el tiempo de residencia de los diferentes sistemas de flujo (local, intermedio y regional).

6.1. Dirección del flujo subterráneo

Con la información obtenida de la piezometría se calculó la carga hidráulica de los aprovechamientos, restando la elevación del brocal al nivel estático (Tabla 3).

Clave	Coordenadas		Elevación de brocal	Nivel estático	Carga hidráulica
	X_UTM (m)	Y_UTM (m)	EB (msnm)	PNE (m)	h (msnm)
R09	328497	2630170	1692	65.18	1626.82
R10	331773	2624093	1625	30.82	1594.18
R11	330129	2626219	1639	20.00	1619.00
R12	326347	2616446	1759	94.10	1664.90
R13	320839	2619296	2008	3.70	2004.30
R14	321146	2617633	1943	28.00	1915.00
R15	323673	2616804	1859	80.00	1779.00
R16	323380	2626533	1845	154.80	1690.20
R17	323147	2634298	1697	46.03	1650.97
R21	323888	2616918	1847	191.87	1655.13
R22	327517	2622194	1711	116.22	1594.78
R23	323078	2629419	1783	87.20	1695.80
R24	321199	2622159	2041	3.65	2037.35
R25	322044	2623531	1981	5.40	1975.60
R26	322714	2624199	1912	2.00	1910.00
R33	327807	2631546	1692	42.23	1649.77
R34	327711	2629524	1699	36.02	1662.98
R35	338724	2610275	1478	7.45	1470.55
R36	337134	2604578	1460	7.88	1452.12
IG-79	333144	2617242	1563	16.15	1546.85
IG-70	332276	2609882	1530	45.37	1484.63
IG-62	335236	2607130	1461	19.62	1441.38
PZ-3	332015	2618712	1596	12.15	1583.85
IG-78	339019	2616776	1509	18.61	1490.39
A1	325101	2616208	1798	74.17	1723.83
A2	336539	2622184	1552	8.87	1543.13
A3	336107	2613392	1501	20.07	1480.93

Tabla 3. Nivel estático y cargas hidráulicas

Los aprovechamientos a los que se les midió el nivel estático, corresponden en su mayoría a los que se definieron para la toma de muestra; sin embargo, algunos aprovechamientos no tenían forma de medir el nivel estático, al estar completamente sellados. Por tal motivo, se hizo un recorrido en zonas aledañas a la zona de estudio, y se midieron otros aprovechamientos, ya que entre mayor información disponible más certera será la dirección de flujo del agua subterránea. Para tener más información del nivel estático, la piezometría se complementó con estudios previos realizados en la zona (IG – 79, IG – 70, IG – 62, IG-78, y PZ3, A1, A2, A3) (CNA, 2013) (Pérez, 2006).

A partir de las cargas hidráulicas se obtuvieron las configuraciones de las líneas equipotenciales, con lo que se definió la dirección del flujo de norte a sureste de Cedral a Matehuala, la cual corresponde a la misma dirección definida por Pérez (2006), indicada con flechas azules (Figura 11), la descarga de agua se encuentra en otro valle a un nivel topográfico menor que la zona de recarga, por lo que se está hablando de un flujo intermedio. Además, se determinó la presencia de un segundo sistema de flujo, localizado

en el municipio de Villa de la Paz, partiendo del oeste, desde el Cerro del Fraile, con dirección hacia el norte y sureste de Villa de la Paz, influenciado principalmente por la topografía del cerro (flechas rojas). La diferencia topográfica da lugar a la formación de sistemas de flujo locales. La existencia de ambos sistemas de flujo indican diferentes comportamientos químicos del agua subterránea, dichos resultados se presentan en el siguiente capítulo.

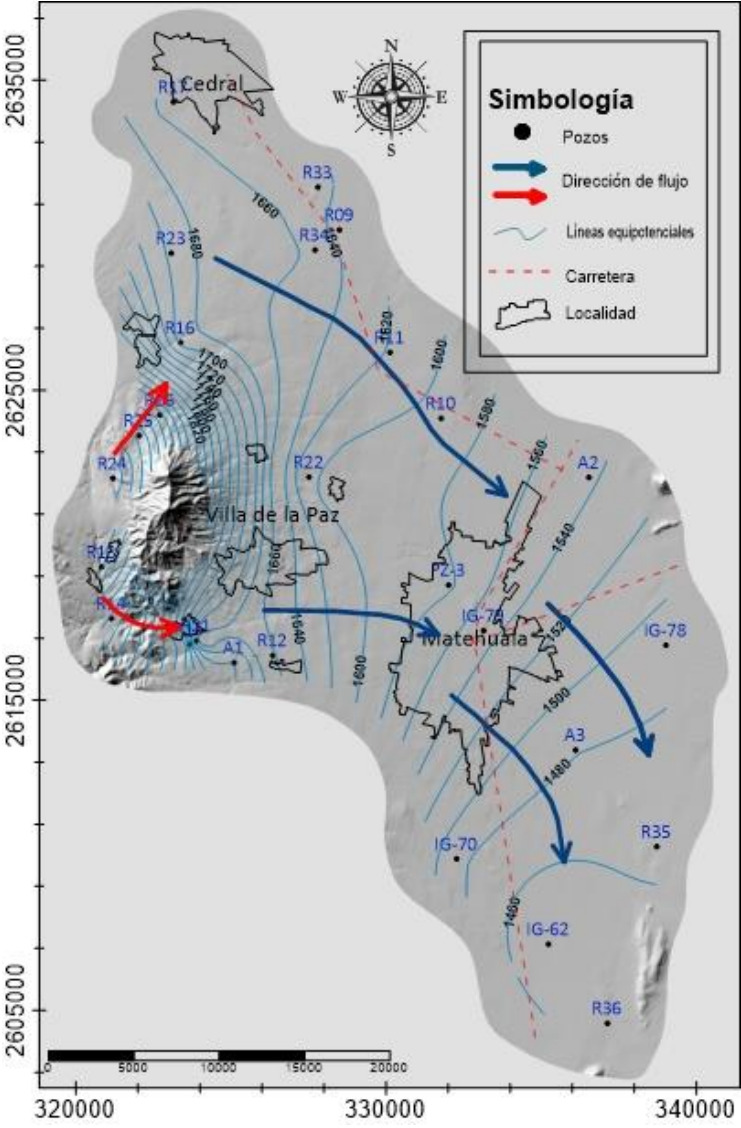


Figura 11. Dirección preferencial del agua subterránea.
(Fuente: elaboración con datos propios)

Las configuraciones se trazaron de manera perpendicular a las líneas equipotenciales, produciendo cargas hidráulicas del orden de 1680 y 2000 msnm, respectivamente.

7. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA

7.1. Puntos muestreados

El total de puntos muestreados son 28 aprovechamientos, de los cuales 3 corresponden a agua de lluvia, 2 a agua superficial, 4 piletas, 3 a casas habitación, y 16 de agua subterránea divididos en: 6 norias, 9 pozos y 1 tiro de mina (Figura 12).

Para llegar a este número de aprovechamientos, a lo largo de los 4 muestreos se fueron localizando aprovechamientos potenciales de interés, ya que a partir del procesamiento de los datos del 1er muestreo (marzo2014), era poca la información obtenida a partir del muestreo para la evaluación de la calidad del agua, por lo que en los muestreos posteriores se buscaron más aprovechamientos. Por tal motivo, los resultados que se presentan para el 1er muestreo (marzo2014) se analizan 18 aprovechamientos, para el 2do muestreo 22, y 24 para el 3er y 4to muestreo (Tabla 4). Fueron cuatro norias más, las que se muestrearon a partir del 2do muestreo y con respecto a los pozos se encontraron 3 más a partir del 3er muestreo.

Tipo aprovechamiento	1er muestreo (marzo2014)	2do muestreo (junio2014)	3er muestreo (octubre2014)	4to muestreo (marzo2015)
Pozos	6	6	9	9
Norias	2	6	6	6
Estanques	2	2	2	2
Piletas	4	4	4	4
Casa	3	3	2	2
Tiro	1	1	1	1
Total	18	22	24	24

Tabla 4. Número total de aprovechamientos muestreados a lo largo del año de evaluación.

Para las muestras de agua de lluvia, aunque se colectaron 3 de cada estación, solo se tomaron en cuenta las muestras recolectadas en el mes de junio 2014, ya que se tuvo problemas con el equipo de cromatografía lo que no permitió el análisis de las muestras posteriores.

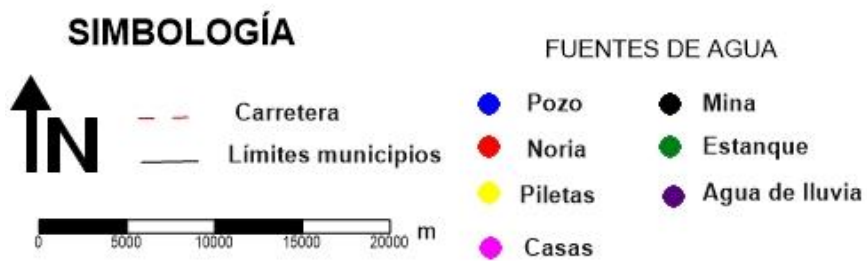
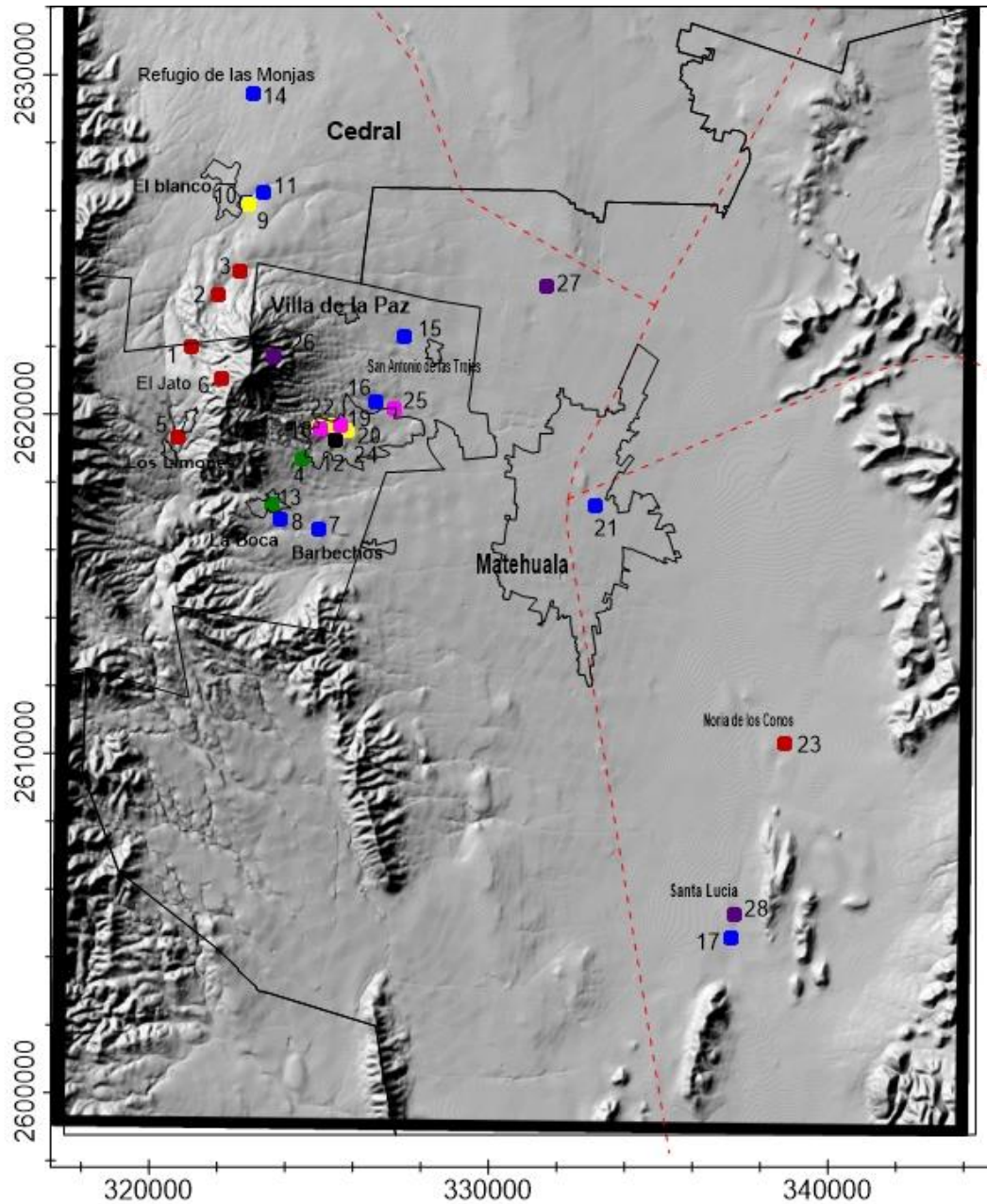


Figura 12. Aprovechamientos muestreados. (Fuente: elaboración con datos propios)

En la tabla 5 se muestran los datos generales de cada aprovechamiento muestreado. Los datos señalados con NA indican que ese tipo de dato no aplica por el tipo de aprovechamiento, y los que presentan -- indica que no se cuenta con información.

Clave	Municipio/Localidad	Aprovechamiento	Coordenada (UTM_Z14_X)	Coordenada (UTM_Z14_Y)	Profundidad total(m)	Nivel Estativo (m)	Caudal (L/s)	Uso
1	Cedral/El Blanco	Noria	321234	2621964	5.82	4.52	0.5	Agrícola y público urbano
2	Cedral/El Blanco	Noria	322044	2623531	9.40	5.20	NA	Agrícola y público urbano
3	Cedral/El Blanco	Noria	322711	2624199	6.10	1.95	NA	Abrevadero y público urbano
4	Villa de la paz	Estanque	324503	2618650	2.00	NA	NA	Abrevadero
5	V. de la Paz/Los Limones	Noria	320840	2619320	5.50	5.20	0.8	Público urbano
6	V. de la Paz/El Jato	Noria	322154	2621027	2.05	0.42	NA	Público urbano
7	V. de la Paz/Barbechos	Pozo	325012	2616617	--	--	6.13	Público urbano
8	V. de la Paz/La Boca	Pozo	323888	2616916	280.00	132.12	7.50	Público urbano
9	Cedral/El Blanco	Pileta	322938	2626190	NA	NA	NA0	Público urbano
10	Cedral/El Blanco	Pozo	322870	2626214	--	--	3.60	Público urbano
11	Cedral/El Blanco	Pozo	323383	2626533	250.00	120	6.25	Público urbano
12	V. de la Paz/Mina	Tiro	325487	2619226	512.00	--	--	Industrial
13	V. de la Paz/La Boca	Estanque	323605	2617339	1.00	NA	NA	Abrevadero
14	Cedral/Refugio de las Monjas	Pozo	323075	2629413	--	--	--	Agrícola y Público urbano
15	V. de la Paz/San Antonio	Pozo	327519	2622293	170.00	--	0.90	Público urbano
16	V. de la Paz/V. de la Paz	Pozo	326683	2620366	200.00	--	--	Agrícola
17	Matehuala/Santa Lucia	Pozo	337138	2604569	25.00	12.0	--	Agropecuario y Público urbano
18	V. de la Paz/V. de la Paz	Pileta	325032	2619584	NA	NA	NA	Público urbano
19	V. de la Paz/V. de la Paz	Pileta	325459	2619667	NA	NA	NA	Público urbano
20	V. de la Paz/V. de la Paz	Casa	325658	2619653	NA	NA	NA	Público urbano
21	Matehuala/Matehuala	Pozo	333143	2617263	25	16.15	2.86	Servicios
22	V./Villa de la Paz	Casa	325037	2619544	NA	NA	NA	Público urbano
23	Matehuala/Noria de los Conos	Noria	338725	2610273	18.35	8.7	--	Agropecuario
24	V./Villa de la Paz	Pileta	325854	2619488	NA	NA	NA	Público urbano
25	V./Villa de la Paz	Casa	327251	2620127	NA	NA	NA	Público urbano
26	Villa de la Paz	Agua de lluvia	323661	2621670	NA	NA	NA	NA
27	Matehuala	Agua de lluvia	331733	2623761	NA	NA	NA	NA
28	Matehuala/Santa Lucia	Agua de lluvia	337230	2605218	NA	NA	NA	NA

Tabla 5. Aprovechamientos muestreados

Los pozos con clave 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15 y 16, se consideran pozos profundos al presentar más de 30 m de profundidad, aunque hay algunos pozos que no se cuenta con datos de profundidad, no se sabe de manera exacta pero se tiene conocimiento que presentan profundidades mayores a los 30 m. Mientras los pozos y norias someros o

pocos profundos son los que presentan menos de 30 m de profundidad: 1, 2, 3, 5, 6, 17, 21, 23.

7.1.1. Descripción del sistema de abastecimiento de Villa de la Paz

El sistema de abastecimiento de Villa de la Paz incluye 4 pozos (7, 8, 10, 11) que se emplean para el suministro de agua de la cabecera municipal y varias comunidades, además de 6 piletas para el almacenamiento y distribución de agua, de las cuales 3 (18, 19, 24) están conectadas a la red, distribuidas a diferentes alturas de la cabecera municipal, lo que hace que cada pileta suministre de manera específica a cierta zona (Figura 13). Adicionalmente existen 5 norias que (1, 2, 3, 5, 6), si bien no están conectadas a la red de distribución se emplean para suministrar agua a diferentes comunidades del municipio, como a la comunidad de Limones, El Jato, El Blanco, Calero, entre otras.

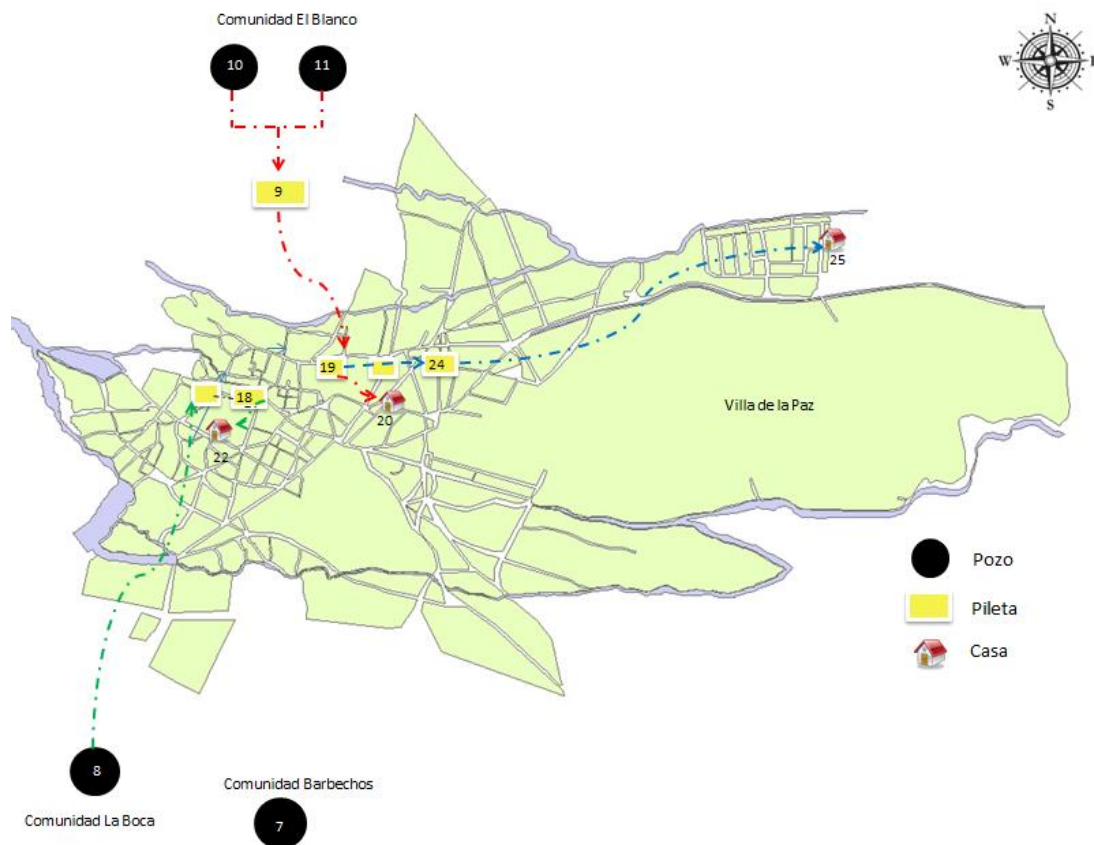


Figura 13. Representación gráfica del sistema de abastecimiento de agua de la cabecera de Villa de la Paz (Fuente: elaboración con datos propios)

En El Blanco, comunidad del municipio de Cedral, se ubican los pozos con clave 10 y 11 estos dirigen el agua hacia la pileta 9 donde se mezcla el agua de estos dos pozos, la cual se envía a la cabecera municipal de Villa de la Paz, donde es almacenada por la pileta 1, que a su vez se usa para llenar la pileta 24. La pileta 19 distribuye el agua a la parte media de la cabecera, mientras que la pileta 24 distribuye el agua hacia la parte baja.

En La Boca, comunidad de Villa de la Paz, se localiza un pozo (8) conocido por los habitantes de la zona como El Barrabas, que abastece de igual forma a la cabecera municipal, el cual manda el agua a la pileta (18), y distribuye el agua hacia la parte alta de la cabecera del municipio.

En Barbechos, comunidad de Villa de la Paz, se localiza el pozo 7 conocido con el mismo nombre de la comunidad, el cual aún no está conectado a la red y solo es utilizado para llenar pipas para distribuir a la comunidad de Caleros y a la cabecera municipal cuando es necesario.

San Antonio es otra comunidad que cuenta con un pozo (15), el cual solo se emplea para su propio abastecimiento de agua. Los Limones, El Jato, y El Blanco son comunidades que cuentan con norias (5, 6, 1) para satisfacer sus propias necesidades de agua.

En la cabecera municipal se localiza un sexto pozo propiedad de la empresa minera Santa María de la Paz y Anexas, conocido como el pozo de La Luz (16), cuyo uso es de riego de un invernadero ubicado en el mismo punto, además la empresa cuenta con una perforación de extracción de agua subterránea o tiro (12), cuya única función es abastecer de agua al interior de la mina para uso exclusivo de esta actividad.

Los tres aprovechamientos muestreados (17, 21, 23), ubicados en el municipio de Matehuala, dos de ellos (17 y 23) se emplean para riego y uno (21) para servicios tales como riego, lavandería, sanitarios, etc.

Las 3 casas habitación (20, 22, 25) que se muestrearon, corresponden a propiedades ubicadas en las zonas de la cabecera municipal, y representan el agua distribuida a partir de cada una de las piletas.

7.2. Análisis estadístico

Antes de proceder a la interpretación de los datos, se verificó su confiabilidad con la ecuación de balance de electroneutralidad (Ec 4), la cual considera la propiedad que tiene el agua de ser eléctricamente neutra y por lo tanto las cargas totales de los cationes y los

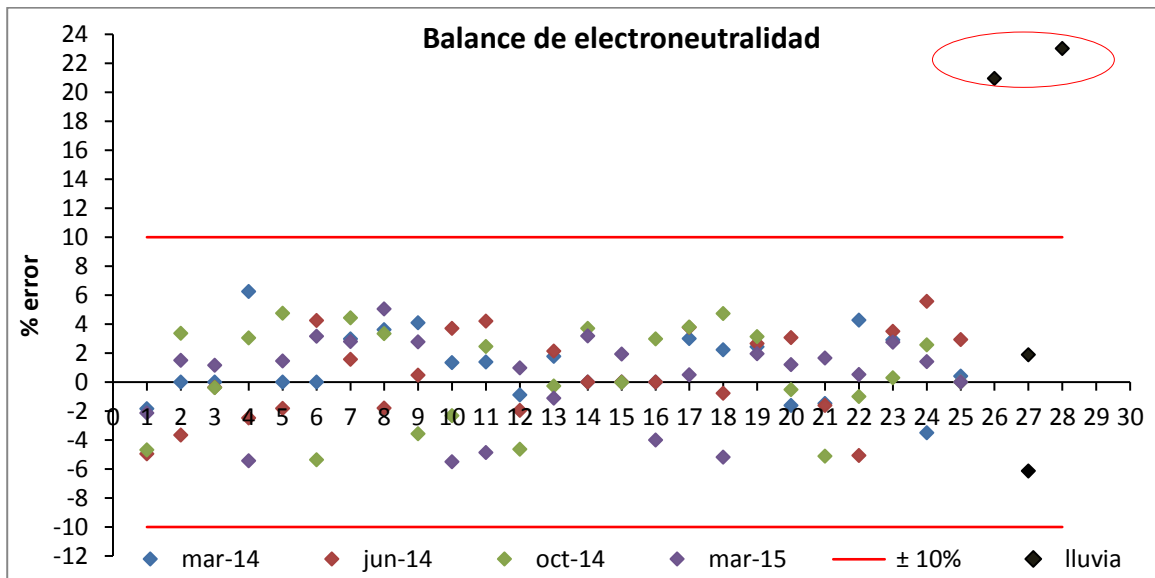
aniones reportados en los análisis debe de ser igual. El total de cargas positivas y cargas negativas son obtenidas por la suma de los miliequivalentes de cationes y aniones respectivamente (Lloyd & Heathcote, 1985).

El porcentaje de error del balance de electroneutralidad para aceptar los resultados de los análisis químicos no debe de ser mayor a $\pm 10\%$ (Fagundo & González, 2005).

$$\%error = \frac{\sum Cationes(\frac{meq}{L}) - \sum Aniones(\frac{meq}{L})}{\sum Cationes(\frac{meq}{L}) + \sum Aniones(\frac{meq}{L})} * 1 \quad (Ec 4)$$

En la gráfica 2 se representan los porcentajes de error obtenidos de los análisis químicos de las muestras, representadas por muestreo. Como se observa, solo dos muestras quedaron fuera del intervalo de aceptación (encerradas en el círculo rojo), las cuales corresponden al agua de lluvia de la estación de Villa de la Paz y Santa Lucia, por lo que fueron excluidas del procesamiento de datos. Por lo tanto, solo se consideraron las muestras de agua de lluvia que corresponden a la estación de colecta de Matehuala del mes de enero y junio del 2014, mientras que las muestras que corresponden al agua subterránea y superficial quedaron todas dentro del criterio de aceptación, lo que indica que los resultados son confiables para su procesamiento.

Los resultados de los análisis químicos que se emplearon para el cálculo del porcentaje de error de las muestras se encuentran en el anexo III.



Gráfica 2. Porcentaje de error de las muestras de agua por muestreo. Balance de electroneutralidad. (Fuente: elaboración con datos propios)

7.2.1. Media aritmética.

Con los datos correspondientes a los aprovechamientos (pozos, norias, estanques y agua de lluvia) se realizó un análisis estadístico; para este análisis se excluyeron los puntos de muestreo que corresponden a piletas y casas, con el propósito de evaluar solo los cambios provenientes de las fuentes de agua (Tabla 6). Para realizar la comparación entre pozos, solo se consideraron los que se midieron en todos los muestreos (7 pozos), de igual forma para las norias (6 norias), y como en el mes de marzo solo se muestrearon dos norias, se decidió excluir este muestreo.

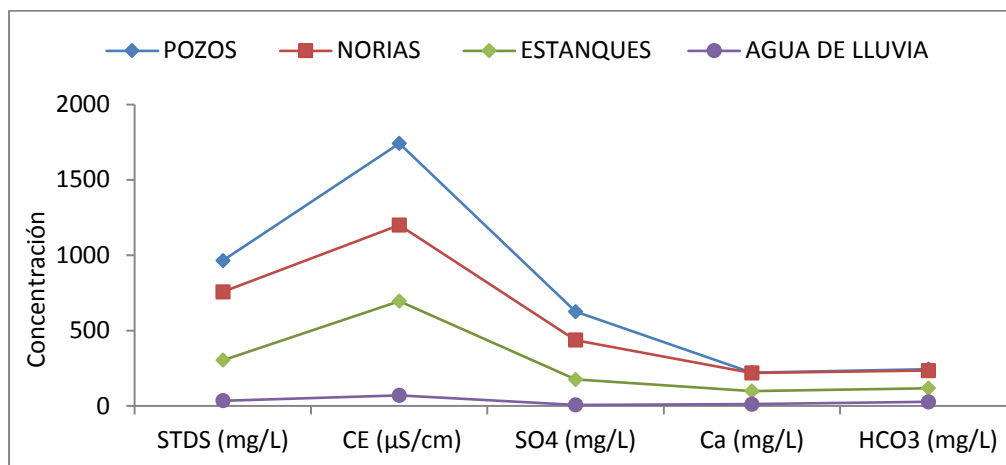
La baja mineralización del agua de lluvia complica el análisis, sobre todo de aquellos elementos que se encuentran en bajas concentraciones, por lo tanto solo se determinaron elementos mayores y menores, con la finalidad de general información hidrogeológica. El símbolo (- -) indica que no se cuenta con la información (Tabla 6).

El agua de lluvia es ligeramente ácida con un pH natural de aproximadamente 5.6, debido a la disolución del CO₂ atmosférico en el agua (Vásquez, et al, 2012). Por lo tanto el pH medido en las muestras de agua de lluvia (7.53 y 7.63) (Tabla 6) indica que se han llevado a cabo reacciones químicas con las partículas suspendidas que se encuentran en el aire durante la lluvia y/o con la depositación seca que cae dentro de la estación de colecta de agua de lluvia (porrones 20 L) durante el periodo de captación (probablemente carbonatos). Los iones Ca²⁺, SO₄²⁻ y HCO₃⁻, son los iones dominantes en el agua de lluvia, esto se debe probablemente a la mineralización de la zona. Núñez (2007), identificó a la calcita, el yeso y el cuarzo como principales especies presentes en la porción superior de la zona no saturada de la región. Siendo el agua de lluvia de la temporada de junio (cuando predominan vientos), la que presenta mayor contenido de STD, lo cual, sea consecuencia de que durante el período de colecta, los vientos promuevan la interacción entre polvo de mineral – agua de lluvia.

La composición química que presenta el agua subterránea se va adquiriendo desde el agua de lluvia. El movimiento vertical del agua da lugar al aumento en su mineralización, en la gráfica 3 se observa el aumento de concentración del agua conforme va aumentando su profundidad con respecto a STD, CE, SO₄²⁻, Ca²⁺, HCO₃⁻.

Parámetro	Unidades	POZOS				NORIAS			ESTANQUES				AGUA DE LLUVIA	
		mar-14	jun-14	oct-14	mar-15	jun-14	oct-14	mar-15	mar-14	jun-14	oct-14	mar-15	ene-04	jun-14
		<i>Media aritmética</i>				<i>Media aritmética</i>			<i>Media aritmética</i>				<i>Media aritmética</i>	
pH (campo)		7.02	7.06	7.13	7.15	7.28	7.31	7.4	8.33	8.2	8.9	8.61	--	--
pH (laboratorio)		7.23	7.52	7.14	8.39	7.64	7.35	8.09	7.93	7.9	8.1	8.05	7.59	7.63
Potencial Redox (Eh)	mV	312	303.4	312	311.6	369.7	330.57	372.8	384	310	300.5	421.6	---	---
Sólidos Totales Disueltos (STD)	mg/L	737.2	827.4	1432.8	857.2	585.3	1074.57	608.6	136	383.5	377	316.5	12.0	56.0
Conductividad eléctrica (CE)	μS/cm	1620.2	1744.8	1824.6	1777.4	1239	1210.9	1150.2	844	839.5	558.6	535.8	24.85	114.6
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/L	1.86	2.16	2.98	2.94	3.66	3.1	4.04	6.2	3.7	7	7.12	---	---
Alcalinidad total (CaCO ₃)	mg/L	195.5	188.2	209.4	178.4	190.17	235.09	161.8	76.8	57.6	145.8	92.04	---	---
Magnesio (Mg ²⁺)	mg/L	26.45	21.4	40.7	14.6	16.17	39.34	12.1	9.37	7.8	5.4	11.87	0.07	0.68
Potasio (K ⁺)	mg/L	5.0	4.6	3.9	4.7	6.8	3.31	4.39	6.4	6.5	4.6	4.34	0.59	0.0
Calcio (Ca²⁺)	mg/L	226.08	220.7	229.38	204.64	261.6	184.69	207.9	123.6	120.4	73.6	75.95	3.76	19.51
Sodio (Na ⁺)	mg/L	139.82	151.8	139.8	158.4	35.57	30.43	44.4	42.55	40.5	25.5	45	0.0	0.0
Cloruro (Cl ⁻)	mg/L	75.15	97.9	70.68	103.6	31.73	16.31	54.2	40.95	57.6	25.8	116.14	4.49	1.21
Bicarbonatos (HCO₃⁻)	mg/L	252.98	251.7	255.5	217.67	235.39	286.8	182.1	110.29	70.3	177.9	112.29	5.71	47.58
Carbonatos (CO₃²⁻)	mg/L	0	0.76	0	0	4.97	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
Sulfatos (SO₄²⁻)	mg/L	624.95	574.5	724.6	577.4	502.5	391.71	416.9	238.5	288.3	67	107	4.27	10.2
Nitratos (NO₃⁻)	mg/L	73.02	88.93	44.9	38.2	44.7	24.31	18.5	18.56	29.4	17	13.73	--	--
Fluoruro (F ⁻)	mg/L	1	0.83	0.53	0.81	0.85	0.7	0.89	1.68	0.5	0.4	0.61	0.0	0.08
Fierro (Fe)	mg/L	0.15	0.07	0.07	0.03	0.05	0.02	0.01	0.1	0.1	0	0.04	--	--
Litio (Li)	mg/L	0.07	0.05	0.09	0.08	0.02	0.03	0.03	0	0.012	0.014	0.016	--	--
Manganeso (Mn)	mg/L	8.54	5.7	0.01	4	2.57	0	2.06	0.015	0.024	0	0.025	--	--
Estroncio (Sr)	mg/L	7.42	5.03	1.56	6.4	2.98	1.46	5.01	1.29	1	1.3	1.3	0.0	0.15
Dureza total (CaCO₃)	mg/L	654	220.7	741.12	809.4	261.62	623.54	420.7	356	120.4	206.4	238.7	--	--

Tabla 6. Media aritmética de los parámetros químicos; comparación pozos, norias, estanques y agua de lluvia.



Gráfica 3. Variación de concentración en estanques, norias y pozos con respecto al agua de lluvia

La composición química del agua de lluvia que se infiltra, va adquiriendo mayor mineralización debido a la evapotranspiración y a la disolución de minerales. El agua de lluvia aporta en menor concentración al ion SO_4^{2-} , este se incrementa conforme aumenta la profundidad. Mientras que el HCO_3^- , que es el ion que el agua de lluvia aporta en mayor proporción (sobre todo para agua superficiales), conforme la profundidad aumenta esta proporción disminuye (Tabla 7).

	Unidades	promedio				Porcentaje de la concentración total, derivado de la evapotranspiración y reacciones de interacción agua/acuífero		
		estanques	norias	pozos	agua de lluvia	estanques	norias	pozos
Sólidos totales disueltos (STD)	mg/L	303.25	756.16	963.65	34.00	87.4	95.3	96.3
Conductividad Eléctrica (CE)	µS/cm	694.48	1200.03	1741.75	69.73	88.8	93.8	95.8
Sulfatos (SO_4^{2-})	mg/L	175.20	437.04	625.36	7.24	95.7	98.3	98.8
Calcio (Ca^{2+})	mg/L	98.39	218.06	220.20	11.64	86.6	94.4	94.4
Bicarbonatos (HCO_3^-)	mg/L	117.70	234.76	244.46	26.65	70.7	87.2	87.8

Tabla 7. Porcentaje de variación de estanques, norias y pozos con respecto al agua de lluvia

La concentración de los STD aumenta considerablemente al final de la temporada de lluvia (octubre). Este incremento se debe al arrastre de las partículas solubles presentes en el aire, por medio del agua de lluvia, y dado que octubre es el final de la temporada de lluvia, es la temporada donde se observa la mayor variación; su concentración es mayor con respecto a los otros muestreos. Este comportamiento se observa tanto en las norias

como en los pozos. En las norias se presentan valores de 1,074 mg/L, que es el doble del valor de los otros muestreos, mientras que en los pozos presenta una concentración de 1,432 mg/L, aproximadamente una tercera parte más que los otros muestreos (Tabla 6).

El nivel de los iones HCO_3^- permanece estable en pozos, mientras que en las norias crece considerablemente al final de la temporada de lluvias. Este comportamiento en las norias se debe probablemente a la disolución de la calcita que produce HCO_3^- , potenciada por el aporte de CO_2 presente en el suelo y en menor grado de la atmósfera, el cual difunde durante la infiltración del agua de lluvia, aumentando así el valor de este ion al final de la temporada. Por otro lado, la presencia de los CO_3^{2-} se detecta a inicios de la temporada húmeda, probablemente es un efecto relacionado con el desarrollo de reacciones de disolución de CO_3^{2-} en condiciones de sistema cerrado (zona saturada); variabilidad observada en las norias (Tabla 6).

Los iones SO_4^{2-} es otro parámetro que varía temporalmente tanto en pozos como en norias, con comportamientos opuestos. En las norias, durante el final de la temporada húmeda, su concentración disminuye, mientras que en los pozos aumenta. El proceso que rige el comportamiento de los SO_4^{2-} en las aguas subterráneas es la disolución de yeso, mientras que en agua someras, el agua de lluvia genera una dilución lo que provoca una disminución en la concentración de SO_4^{2-} (Tabla 6).

La dureza total es otro parámetro que varía con respecto a la estación muestreada. Tanto en las norias como en los pozos, la concentración aumenta al final de la temporada de lluvias, debido a la disolución de yeso, calcita y dolomita (Tabla 6).

La variación de las concentraciones de NO_3^- se debe a las fuentes de contaminación existentes en las inmediaciones del pozo, comportamiento relacionado con las características constructivas del pozo, lo que genera que el agua de lluvia ayude a la dispersión de este ion hacia profundidades mayores (Tabla 6).

7.2.2. Correlación de Pearson

Para completar el análisis estadístico se realizó un análisis de correlación de Pearson, el cual se refiere al grado de variación conjunta existente entre dos o más variables. El

análisis se hizo entre los elementos mayores (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , F^- , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+}) del agua subterránea. Para este análisis se hizo la comparación por muestreos entre pozos y norias. Se excluyeron los estanques, agua de lluvia, piletas y casas. El análisis de correlación de Pearson es el más utilizado para estudiar el grado de relación lineal existente entre dos variables cuantitativas; es decir, un coeficiente de correlación alto no siempre implica causalidad, ya que dos variables pueden estar relacionadas sin que una sea causa de la otra. El criterio empleado para determinar la relación de parámetros es un coeficiente de correlación mayor a ± 0.8 .

La figura 14, muestra la matriz de correlación entre los iones de las norias.

2do muestreo junio2014 (Inicio de estación húmeda) n=6											3er muestreo octubre2014 (Fin de estación húmeda) n=6											
	pH	Ca	Cl	SO ₄	Mg	Na	K	HCO ₃	F	NO ₃		pH	Ca	Cl	SO ₄	Mg	Na	K	HCO ₃	F	NO ₃	
pH	1.00	-0.54	-0.65	-0.54	-0.50	-0.78	-0.51	-0.91	-0.52	0.43	pH	1.00	-0.71	-0.64	-0.67	-0.60	-0.70	-0.68	-0.16	-0.88	-0.42	
Ca		1.00	0.81	0.99	0.65	0.81	0.99	0.69	0.88	0.18	Ca		1.00	0.59	0.99	0.97	0.95	0.94	-0.27	0.72	0.47	
Cl			1.00	0.80	0.40	0.74	0.80	0.55	0.72	0.28	Cl			1.00	0.55	0.59	0.80	0.76	0.35	0.98	0.86	
SO ₄				1.00	0.69	0.83	0.98	0.69	0.90	0.14	SO ₄				1.00	0.98	0.91	0.99	-0.35	0.68	0.44	
Mg					1.00	0.79	0.56	0.60	0.67	-0.31	Mg					1.00	0.71	0.93	-0.31	0.68	0.56	
Na						1.00	0.76	0.81	0.92	-0.34	Na						1.00	0.88	0.94	0.92	0.56	
K							1.00	0.68	0.86	0.20	K							1.00	0.77	0.88	0.73	
HCO ₃								1.00	0.65	-0.47	HCO ₃								1.00	0.29	0.27	
F									1.00	-0.12	F									1.00	0.88	
NO ₃										1.00	NO ₃											1.00

4to muestreo marzo2015 (Estación seca) n=6										
	pH	Ca	Cl	SO ₄	Mg	Na	K	HCO ₃	F	NO ₃
pH	1.00	-0.86	-0.62	-0.64	-0.84	-0.58	-0.42	-0.81	-0.62	-0.69
Ca		1.00	0.53	0.87	0.89	0.61	0.22	0.99	0.91	0.78
Cl			1.00	0.26	0.84	0.20	0.14	0.54	0.57	0.26
SO ₄				1.00	0.65	0.54	0.01	0.90	0.84	0.67
Mg					1.00	0.42	0.11	0.89	0.84	0.61
Na						1.00	0.33	0.51	0.36	0.92
K							1.00	0.08	0.08	0.13
HCO ₃								1.00	0.93	0.72
F									1.00	0.53
NO ₃										1.00

Figura 14. Análisis de correlación entre iones (mg/L) de norias

La relación predominante entre iones durante los tres muestreos (2do, 3er y 4to muestreo) corresponde al $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ con un coeficiente de correlación de 0.99 en el 2do y 3er muestreo y con un 0.87 en el 4to muestreo. $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, muestran relación en el 3er y 4to muestreo con 0.97 y 0.89 respectivamente. $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ y $\text{SO}_4^{2-}/\text{K}^+$ tienen una correlación de 0.99 y 0.98 en el 2do, 0.94 y 0.99 en el 3er muestreo, respectivamente. $\text{Ca}^{2+}/\text{F}^-$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{F}^-$ presentan una correlación en el 2do muestreo con 0.88, 0.90, y en el 4to muestreo de 0.91 y 0.84, con el ion Na^+ presentó correlación en el 2do y 3er muestreo de 0.92 al igual que con el K^+ con un valor de 0.86 y 0.88. Y por último la relación pH/HCO_3^- se presentó en el 2do y 4to muestreo con -0.91 y -0.81 respectivamente. Como se observa todas las relaciones para los iones son positivas, lo que indica que al aumentar la concentración de

un ion aumenta el otro, contrario pasa con el pH/HCO₃⁻, el cual presenta una relación negativa, es decir, si aumenta el pH disminuye el HCO₃⁻ y viceversa.

El análisis de correlación de Pearson entre pozos, se muestra en la figura 15.

1er muestreo marzo2014 (Estación seca) n=6											2do muestreo junio2014 (Inicio de estación húmeda) n=6										
	pH	Ca	Cl	SO ₄	Mg	Na	K	HCO ₃	F	NO ₃		pH	Ca	Cl	SO ₄	Mg	Na	K	HCO ₃	F	NO ₃
pH	1.00	-0.92	0.32	-0.87	-0.10	0.60	-0.68	0.18	-0.83	0.64	pH	1.00	-0.84	0.40	-0.79	0.14	0.37	-0.64	-0.62	-0.77	-0.07
Ca		1.00	-0.27	0.98	0.26	-0.51	0.88	-0.39	0.95	-0.70	Ca		1.00	-0.16	0.97	0.22	-0.20	0.94	0.29	0.93	-0.27
Cl			1.00	-0.13	0.52	0.85	-0.18	-0.39	-0.26	0.36	Cl			1.00	0.03	0.68	0.95	-0.13	-0.90	0.02	-0.17
SO ₄				1.00	0.39	-0.32	0.85	-0.45	0.98	-0.65	SO ₄				1.00	0.28	0.02	0.88	0.11	0.98	-0.39
Mg					1.00	0.42	0.47	-0.31	0.35	-0.15	Mg					1.00	0.47	0.41	-0.51	0.13	-0.02
Na						1.00	-0.44	-0.24	-0.36	0.53	Na						1.00	-0.24	-0.91	0.07	-0.32
K							1.00	-0.47	0.82	-0.63	K							1.00	0.21	0.80	-0.30
HCO ₃								1.00	-0.37	-0.26	HCO ₃								1.00	0.07	0.45
F									1.00	-0.65	F									1.00	-0.50
NO ₃										1.00	NO ₃										1.00

3er muestreo octubre2014 (Fin de estación húmeda) n=6											4to muestreo marzo2015 (Estación seca) n=6										
	pH	Ca	Cl	SO ₄	Mg	Na	K	HCO ₃	F	NO ₃		pH	Ca	Cl	SO ₄	Mg	Na	K	HCO ₃	F	NO ₃
pH	1.00	-0.78	-0.35	-0.59	-0.61	0.64	0.50	0.11	-0.17	0.02	pH	1.00	-0.77	-0.61	0.34	-0.17	-0.24	0.16	-0.69	-0.22	-0.35
Ca		1.00	0.57	0.96	0.94	-0.19	-0.04	-0.49	0.66	-0.40	Ca		1.00	0.87	-0.50	0.43	-0.19	0.06	0.94	0.75	-0.24
Cl			1.00	0.61	0.63	0.31	0.01	-0.63	0.38	0.13	Cl			1.00	-0.46	0.70	-0.28	0.19	0.84	0.69	-0.21
SO ₄				1.00	0.94	0.07	0.15	-0.64	0.75	-0.51	SO ₄				1.00	-0.16	0.75	-0.50	-0.19	-0.18	0.20
Mg					1.00	-0.10	0.14	-0.41	0.81	-0.34	Mg					1.00	-0.20	-0.17	0.50	0.58	-0.35
Na						1.00	0.53	-0.65	0.13	-0.29	Na						1.00	-0.64	0.03	-0.28	0.62
K							1.00	-0.04	0.30	-0.20	K							1.00	-0.10	-0.08	-0.24
HCO ₃								1.00	-0.37	0.50	HCO ₃								1.00	0.82	-0.28
F									1.00	-0.43	F									1.00	-0.66
NO ₃										1.00	NO ₃										1.00

Figura 15. Análisis de correlación entre iones (mg/L) de pozos.

Ca²⁺/SO₄²⁻ mostró relación en el 1er, 2do y 3er muestreo con valor de 0.98, 0.97 y 0.94 respectivamente; al igual que en las norias, son los iones que presentan relación en la mayoría de los muestreos. Ca²⁺/K⁺ se presentó en el 1er y 2do muestreo con 0.88, 0.93, de la misma manera SO₄²⁻/K⁺ se presentó en el 1er y 2do muestreo con un coeficiente de 0.85 y 0.88, respectivamente. Na⁺/Cl⁻ exhibe una relación de 0.85 en el 1er muestreo y 0.95 en el segundo muestreo. Ca²⁺/F⁻, en el 1er y 2do muestreo con valor de 0.95 y 0.93, SO₄²⁻/F⁻ con 0.98 en 1er y 2do muestreo, K⁺/F⁻, presentan relación en el 1er muestreo con valores de 0.95, 0.98, 0.98, 0.82, respectivamente y en el 2do muestreo con 0.93, 0.98 y 0.80, respectivamente.

Las relaciones que presentan los iones reflejan las diferentes propiedades de interacción con el medio geológico (Fagundo & González, 2005), la mayoría siendo de origen natural, sin embargo, las fuentes antropogénicas también dan lugar a ciertas correlaciones entre iones:

La correlación entre $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, indica la presencia de calcita y dolomita en el agua subterránea.

La correlación entre $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ indica la presencia de yeso; frecuentemente la disolución de este mineral en el agua subterránea es la aportación cuantitativa más significativa de estos iones.

Na^+/Cl^- , su relación se establece a través de la presencia de rocas sedimentarias de origen marino a través de la disolución de la halita (NaCl).

pH/HCO_3^- , esta relación al observarse solo en las norias, se le atribuye a la entrada y salida de CO_2 .

$\text{K}^+/\text{SO}_4^{2-}$, su relación se debe al uso de K_2SO_4 , el cual suele usarse como fertilizante inorgánico para los cultivos, al presentarse principalmente durante la estación de inicio de lluvias, temporada en la cual fertilizan los cultivos, al igual que la presencia de K^+/Cl^- .

7.3. Interpretación hidrogeoquímica

Para evaluar la variabilidad de la composición química del agua subterránea tanto espacial como temporal, es importante tener en cuenta que el agua subterránea procede mayoritariamente de las lluvias (Price, 2003). Asimismo, a medida que aumenta la distancia que recorre en el subsuelo, el tiempo de contacto agua – acuífero aumenta; en consecuencia, la salinidad del agua va cambiando (Díaz, et al, 1998). Conforme el agua recorre distancias, desde la zona de recarga, aumenta la probabilidad de que los minerales sean disueltos; entre mayor sea la distancia desde la zona del afloramiento y mayor la profundidad, se presenta una evolución en la composición química del agua (Price, 2003).

7.3.1. Familias de agua y diagramas de Stiff

Con los resultados de los análisis químicos se determinaron las familias de agua, en función del ion dominante, la clasificación tomó en cuenta los elementos mayores. El análisis se llevó a cabo con datos que corresponden a los aprovechamientos (pozo, noria, estanques), con el objetivo de evaluar la composición química directa de la fuente del agua sin influencia del sistema de abastecimiento, por lo que se excluyeron los datos de las piletas y casas.

Las familias de agua se representaron con los diagramas Stiff, el cual emplea un sistema de 3 ejes horizontales paralelos y un eje vertical. En cada uno de los ejes horizontales se indica la concentración en miliequivalentes por litro (meq/L) de los elementos mayores, a la izquierda se ubican los cationes y a la derecha los aniones: Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} ; Cl^- , HCO_3^- y SO_4^{2-} . Los iones se unen por aristas para formar un polígono cuya forma es representativa de un tipo de agua (Figura 16). Este diagrama se realiza para cada muestra que se desea representar y se coloca sobre un mapa base de la zona de estudio. Este método permite identificar de manera rápida las diferentes familias de agua. Las muestras de agua con diagramas de Stiff similares indican características químicas afines.

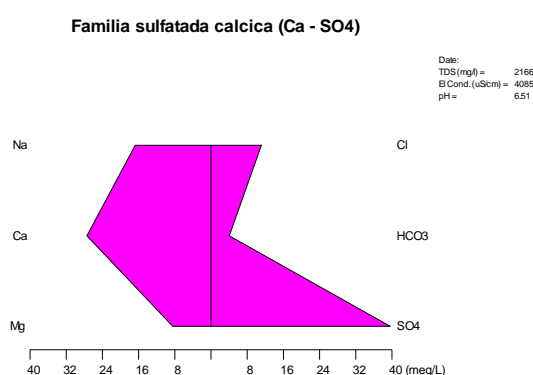


Figura 16. Diagrama de Stiff, familia sulfatada cálcica

Con los resultados de los elementos mayores (Anexo IV) se definieron los tipos de familia de agua de las muestras que corresponden a norias, pozos y estanques; esto se hizo por muestreo. En la tabla 7 se indican las familias encontradas por cada muestreo, las cuales se representaron a través del diagrama de Stiff y se ubicaron en el mapa de la zona de estudio (Figura 17); las claves para identificar el punto de aprovechamiento corresponden a las de la tabla 5.

Tipo de familia	Marzo 2014 (estación seca)	Junio (inicio estación húmeda)	Octubre (Fin de estación húmeda)	Marzo 2015 (estación seca)
Mx – HCO₃		X		
Ca – HCO₃	X	X	X	X
Ca – Mx	X	X	X	X
Ca – SO₄	X	X	X	X
Mx – SO₄	X	X	X	
Na – SO₄	X	X	X	X

Tabla 8. Familias de agua

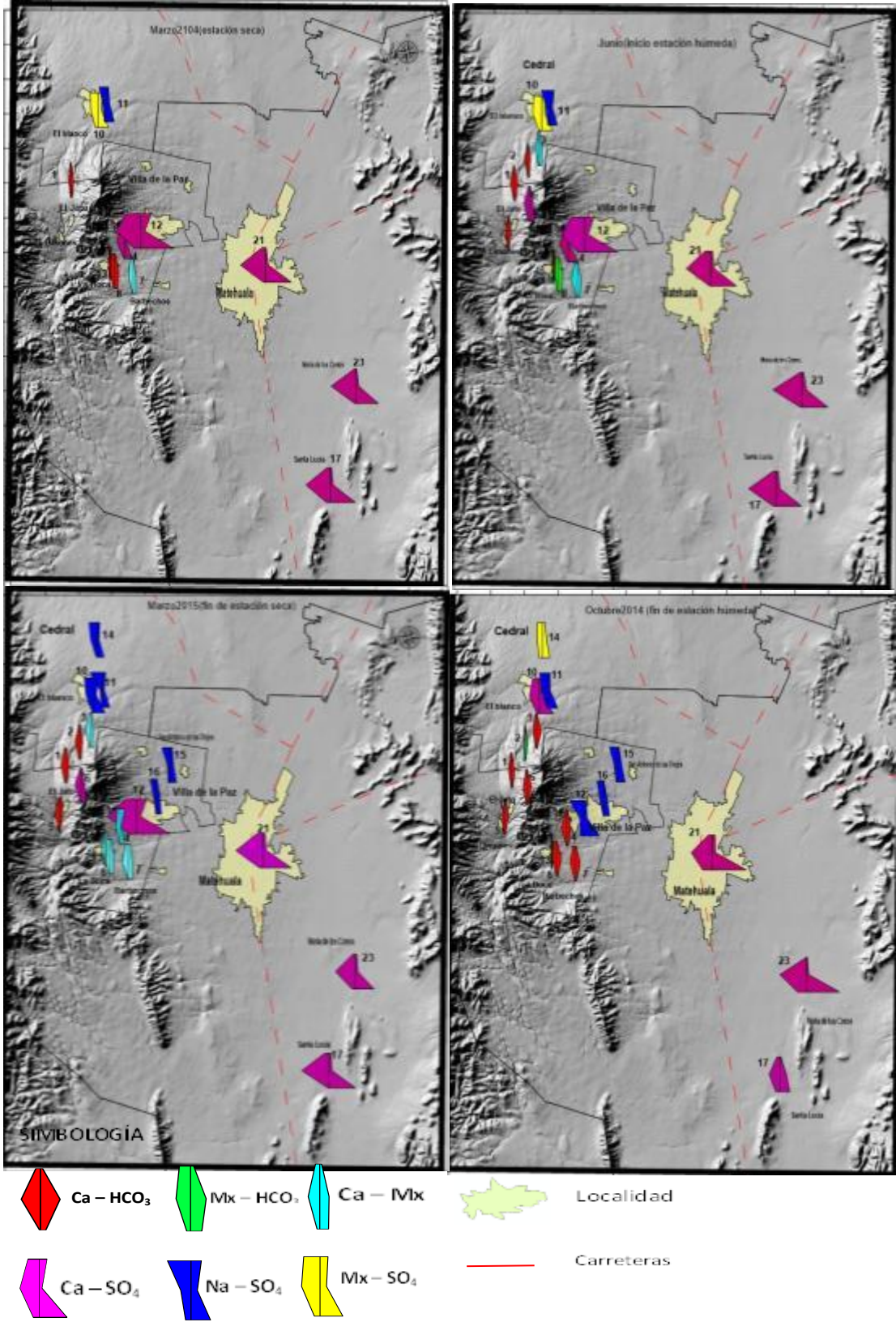


Figura 17. Diagrama Stiff, tipos de familia de agua, muestreo marzo – junio – octubre. (Fuente: elaboración con datos propios)

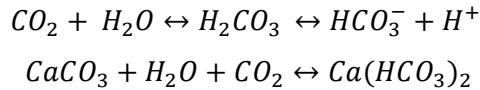
Los tipos de agua encontrados en la zona a lo largo del año de estudio corresponden a familias bicarbonatadas y sulfatadas, encontrando tipo cálcica, mixta y sódica, variaciones que dependen de la estación y la ubicación espacial de los sitios donde se tomaron las muestras.

Las familias sulfatadas – cálcicas ($\text{Ca} - \text{SO}_4$) se encuentran en todos los pozos, excepto en los pozos ubicados en la comunidad de la Boca (8) y Barbechos (7). Estos al igual que en las norias y los estanques presentan familias bicarbonatadas – cálcicas ($\text{Ca} - \text{HCO}_3$). Este comportamiento se presenta a lo largo de los cuatro muestreos.

En la figura 17, también se puede observar, que existen dos puntos donde varía el tipo de familia con respecto a la temporada muestreada, pasando de $\text{Mx} - \text{SO}_4$ a $\text{Ca} - \text{SO}_4$ y a $\text{Na} - \text{SO}_4$, y de $\text{Ca} - \text{Mx}$ a $\text{Ca} - \text{HCO}_3$, localizados en la parte norte y sur de Villa de la Paz, respectivamente. Para entender esta variación, se consideró la geología y el sistema de flujo definido en el capítulo de hidrogeología, que junto con la composición química generan un panorama más completo de su comportamiento (Figura 18). Esta representación se hizo solo con los muestreos que corresponden a octubre y marzo 2015, ya que es donde se observa de manera más clara las variaciones y los factores que aportan a la composición química del agua subterránea, así como su evolución tanto espacial como temporal; aunque esto mismo sucede en los otros dos muestreos.

El flujo local indicado con flechas rojas (Figura 18), da lugar a la presencia de familia $\text{Ca} - \text{HCO}_3$ que se encuentra en todas las norias además de los pozos de la Boca (8) y Barbechos (7). Las norias se localizan en zona donde el medio geológico está constituido principalmente por rocas calizas. En el flujo local las zonas de recarga y descarga se encuentran a corta distancia, por lo que representa un sistema dinámico y de trayectoria de corta duración en el subsuelo, generando aguas de temperatura similar a la media anual ambiental y de bajo contenido de STD. Cuando la precipitación se infiltra en el suelo, el cambio natural más importante es la disolución del CO_2 presente en la atmósfera, en el suelo, y la reacción con carbonatos.

El CO_2 en contacto con el agua, en primera instancia genera H_2CO_3 , el cual se disocia parcialmente produciendo HCO_3^- y H^+ . Además, otro proceso que se lleva a cabo con la infiltración del agua, es la interacción con las rocas calizas (CaCO_3). El CaCO_3 se disuelve con agua que contiene CO_2 disuelto, formando el *bicarbonato de calcio* ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). Estas reacciones implican tres fases; aire, agua y rocas dando como resultado la familia $\text{Ca} - \text{HCO}_3$.



La variación de Ca - HCO₃ a Ca - Mx es por la mineralización de la zona, ya que los aprovechamientos donde ocurre este cambio están en el aluvión (7, 8, 1), donde al llegar a la planicie se presentan minerales como el yeso, pero no lo suficiente para predominar sobre los iones HCO₃⁻, dando una mezcla entre HCO₃⁻ y SO₄²⁻. Este cambio ocurre desde el final de la temporada de lluvia hacia la temporada seca, cuando el agua de lluvia deja de influir.

Por otro lado, el flujo intermedio representado por flechas azules (Figura 18) da lugar a la familia Ca - SO₄, en pozos profundos, ubicados principalmente en aluvión y algunos en el conglomerado (unidad geológica de menor permeabilidad). El flujo intermedio se localiza a mayores profundidades, con temperaturas entre 22 y 28°C, generalmente se inician en terrenos de mayor altitud y finalizan en las zonas más bajas. Debido a su profundidad, se llevan a cabo reacciones de disolución de minerales e intercambio iónico con materiales arcillosos, donde el tiempo de residencia es el principal factor que origina este tipo de reacciones. Este flujo presenta su zona de descarga a una mayor distancia, generando agua con mayor contenido de STD.

El cambio de Mx - SO₄ (inicio de temporada de lluvias) a Ca - SO₄ (fin de temporada de lluvia) y Na - SO₄ (temporada seca), se debe a las reacciones de intercambio iónico entre los cationes. La mayoría de los acuíferos contienen minerales arcillosos, los cuales ofrecen un área de contacto para el agua subterránea. Los iones multivalentes son adsorbidos más fuertemente que los monovalentes, dichos iones en solución tenderán a equilibrarse con los existentes en los minerales arcillosos. Los procesos de cambio iónico involucran principalmente al Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺, pero los procesos de intercambio Ca²⁺ - Na⁺ son los más comunes dentro de los sistemas naturales. Así, si una arcilla entra en contacto con una solución donde el Ca²⁺ es el catión dominante, cada par de iones Na⁺ que pase a solución, será reemplazado por un Ca²⁺ adsorbido, hasta que el incremento del contenido de iones Na⁺ alcance el equilibrio, lo que generará que la dureza total del agua disminuya notablemente (Price, 2003).

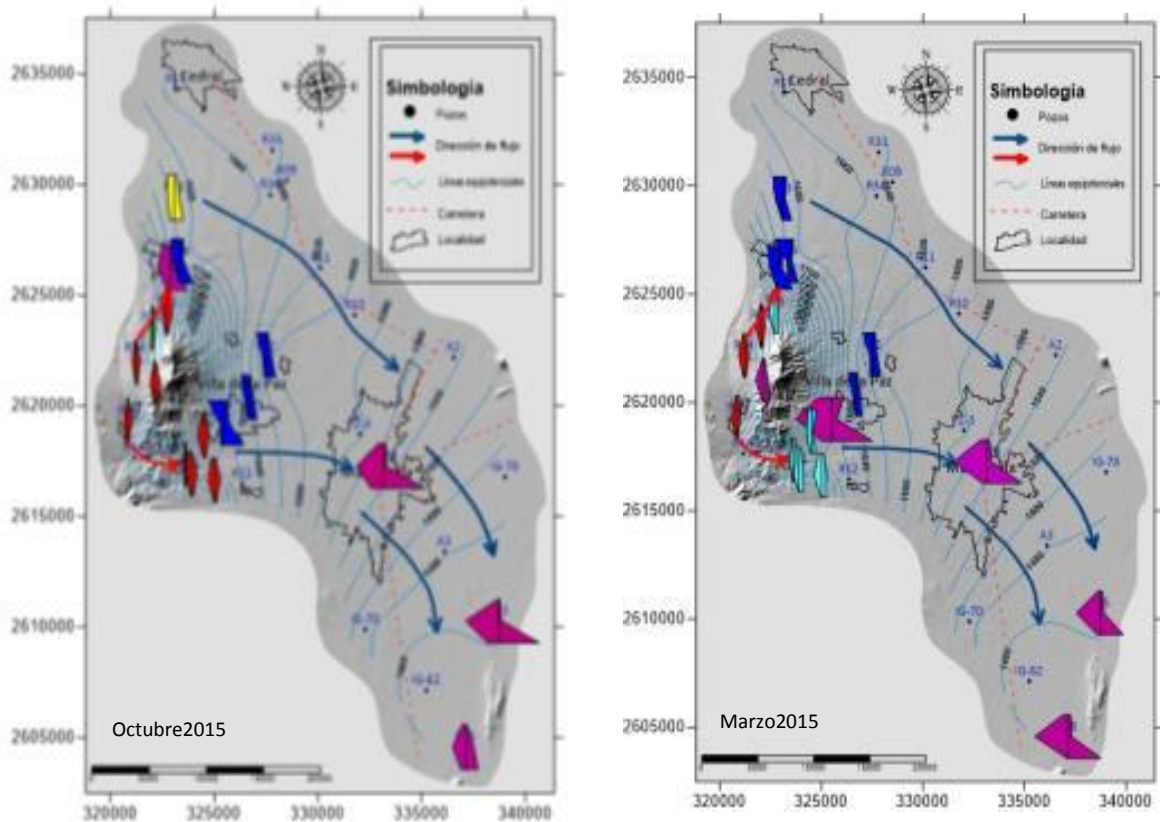
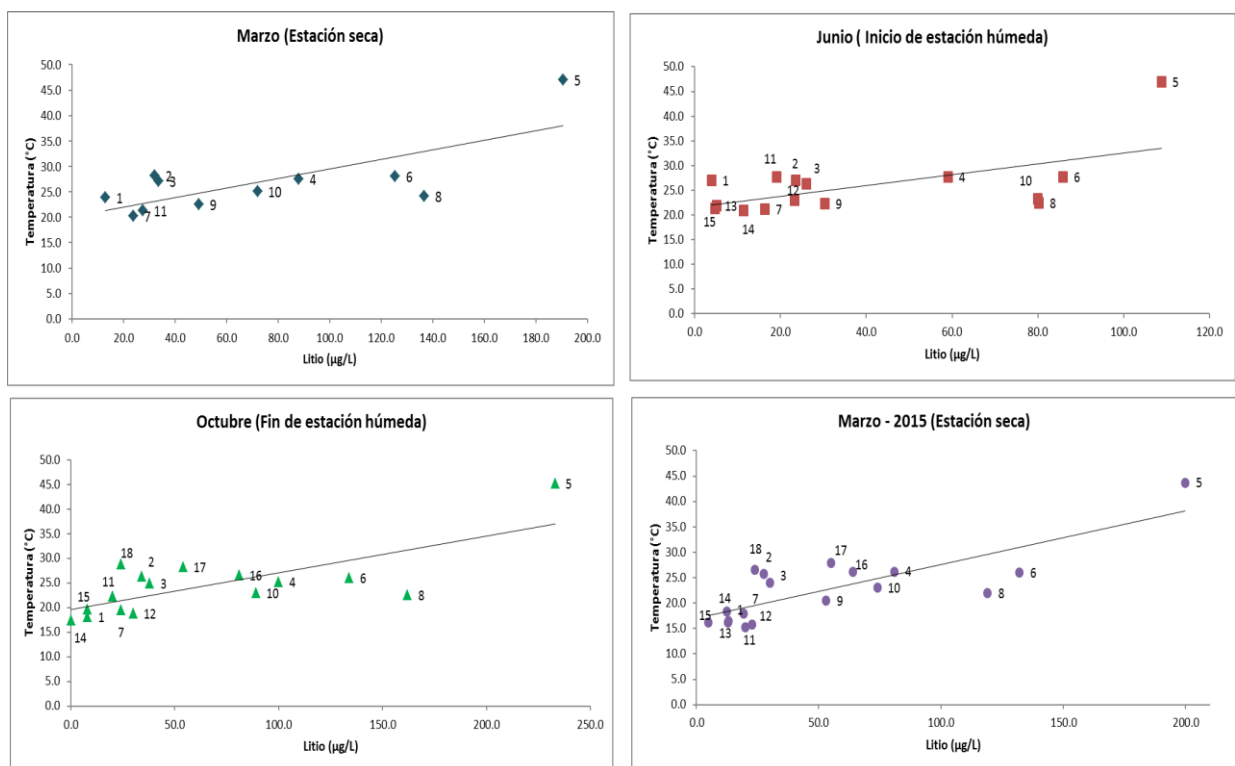


Figura 18. Dirección de flujo de agua subterránea y diagramas de Stiff (Octubre2014 – Marzo2015).
(Fuente: elaboración con datos propios)

Para confirmar el tiempo de residencia del agua subterránea se tomaron en cuenta la concentración de litio y la temperatura, los cuales son parámetros empleados como indicadores del tiempo de residencia relativo del agua en el subsuelo, y que ayudan a definir el flujo al que pertenecen; esto se debe a que el litio de las rocas es fácilmente liberado y no se incorpora a la formación de nuevos minerales, ni es afectado por procesos de precipitación, ni óxido – reducción (Edmunds & Smedley, 2000). A mayor temperatura y concentración de litio, mayor será el tiempo de residencia relativa, por el contrario, a menor temperatura y concentración de litio, su residencia relativa será menor.

En las gráficas siguientes se confirma la presencia de los diferentes sistemas de flujo, en función del tiempo de residencia (Gráfica 4), y en la tabla 9, se indican las concentraciones de cada aprovechamiento de litio y la temperatura.



Gráfica 4. Litio vs temperatura

	Aprovechamiento	ID	Litio (µg/L)				Temperatura (°C)			
			Marzo 2014	Junio 2014	Octubre 2014	Marzo 2015	Marzo 2014	Junio 2014	Octubre 2014	Marzo 2015
V. de la Paz/La boca	Estanque	1	12.9	4.0	8.0	12.8	23.9	27.0	18.0	16.2
V.de la Paz/La boca	Pozo	2	32.1	23.5	34.0	27.5	28.2	27.0	26.3	25.8
V. de la Paz/Barbechos	Pozo	3	33.5	26.1	38.0	30.0	27.1	26.3	24.9	24.0
Cedral/El Blanco	Pozo 1	4	87.8	59.1	100.0	81.0	27.5	27.7	25.2	26.2
V.de la Paz/V. de la Paz	Tiro	5	190.4	108.8	233.0	200.0	47.1	46.9	45.1	43.7
Cedral/El Blanco	Pozo 2	6	125.3	85.9	134.0	132.0	28.0	27.7	26.0	26.0
Cedral/El Blanco	Noria	7	23.8	16.4	24.0	19.2	20.2	21.2	19.5	18.0
Matehuala/Matehuala	Pozo	8	136.5	80.3	162.0	119.0	24.1	22.4	22.5	22.0
Matehuala/Noria de los C.	Noria	9	49.1	30.4	-	53.0	22.5	22.3	21.1	20.5
Matehuala/Santa Lucia	Noria	10	71.9	80.0	89.0	74.0	25.1	23.2	22.9	23.0
V. de la Paz/V.de la Paz	Estanque	11	27.4	19.0	20.0	20.0	21.3	27.7	22.3	15.3
Cedral /El Blanco	Noria	12	-	23.3	30.0	22.7	-	23.0	18.7	15.8
Cedral /El Blanco	Noria	13	-	4.7	-	13.1	-	21.3	19.1	16.4
V. de la Paz /Limones	Noria	14	-	11.4	0.0	12.5	-	20.9	17.4	18.4
V. de la Paz/El Jato	Noria	15	-	5.1	8.0	4.9	-	21.8	19.6	16.2
Cedral/Refugio de las M.	Pozo	16	-	-	81.0	64.0	-	-	26.5	26.2
V. de la Paz/San Antonio	Pozo	17	-	-	54.0	55.0	-	-	28.2	27.9
V./Villa de la Paz	Pozo	18	-	-	24.0	24.0	-	-	28.7	26.5

Tabla 9. Concentraciones de litio y temperatura por muestreo.

El comportamiento de los aprovechamientos es el mismo en los cuatro muestreos, presentan una tendencia en función del flujo; las concentraciones aumentan siguiendo la dirección del flujo, es decir, aumentan en función al tiempo de residencia. Los aprovechamientos que presentan concentraciones y temperaturas menores, corresponden a los aprovechamientos de las norias localizadas al oeste de Villa de la Paz y de los dos pozos del sur de Villa de la Paz, con una concentración promedio de 17.79 µg/L de Litio y una temperatura promedio de 21.25°C, conformando el sistema de flujo local que exhibe un menor tiempo de residencia.

El aprovechamiento No 5, el cual pertenece a la empresa NEMISA, tiene una profundidad aproximada de 512 m, y presenta elevada concentración de STD y temperatura alta, por lo que se deduce que pertenece a un flujo regional, con una concentración de 183.05 µg/L de Litio y una temperatura de 45.7 °C. Este sistema circula por rocas sedimentarias del mesozoico, que tiene baja conductividad hidráulica por lo que su movimiento es muy lento, dando lugar al agua más antigua de la zona. Los aprovechamientos que corresponden a los pozos, que presentan familias sulfatadas - cálcicas, presentan concentraciones promedio de 74.95 µg/L de Litio y temperaturas promedio de 25.43 °C, *dando lugar al flujo intermedio, que constituye al que es captado por la mayoría de los aprovechamientos en el acuífero administrativo Cedral – Matehuala.*

7.4. Modelación inversa

La composición química del agua natural a lo largo de una línea de flujo es el resultado de complejos procesos de interacción entre fases sólidas, acuosas y gaseosas. En estas interacciones se generan mecanismos de incorporación de solutos al agua subterránea, ya sea de manera inmediata por procesos de disolución, o transformaciones químicas que requieren de mayor tiempo como el intercambio iónico o la precipitación. Los cambios de composición química en el agua como resultado de su flujo a través del acuífero fueron definidos por Chebotarev (1955), quién determinó la secuencia evolutiva de las aguas naturales (Martínez, et al, 2000). La secuencia típica completa de la evolución de agua subterránea meteórica comienza con agua en la cual los HCO_3^- son los aniones principales, a medida que el agua se mueve a profundidad, aumenta la importancia de los iones SO_4^{2-} , y éstos se vuelven dominantes; finalmente, si el sistema tiene la profundidad suficiente, el Cl^- se vuelve dominante. Desde el punto de vista de los cationes, la secuencia inicia teniendo al Ca^{2+} como principal componente, cuando el agua llega a

equilibrio con carbonatos como la calcita y dolomita, las reacciones de intercambio catiónico que se llevan a cabo con la fracción arcillosa, facilita que el Na^+ se incremente paulatinamente hasta que eventualmente pueda ser el catión principal (Price, 2003).

Existen dos tipos de modelos que permiten describir reacciones geoquímicas de la evolución del agua subterránea, los modelos directos y modelos inversos. Los primeros implican conocer la composición química inicial de una solución y establecer las reacciones hidrogeoquímicas que tendrán lugar en el sistema, con las cuales se obtendrá la composición final de la solución. Los modelos inversos son aquellos donde se conoce la composición inicial y final de una solución, y a partir de estas concentraciones se calculan las reacciones que explican los cambios en la composición química entre los dos puntos definidos a través de la transferencia de masa entre las distintas fases (Hernández, 2008).

Para la modelación inversa se requiere establecer un modelo geoquímico conceptual, el cual debe incluir los elementos necesarios para simular las reacciones químicas en el sistema que produce la composición química observada. Los elementos del modelo incluyen las fases que interactúan entre sí y la cantidad de la fase que se disuelve, precipita o escapa de la solución. Por lo tanto, la información requerida para hacer la modelación inversa, incluye: una solución (muestra de agua) a la que se le pueda atribuir una composición química inicial y final, así como los minerales con los que ha estado en contacto durante el tiempo de evolución. La solución definida como inicial y final no tiene que formar parte del mismo patrón de flujo, solo tiene que presentar una evolución geoquímica. Con base al conocimiento de los minerales con los que estuvo en contacto, se plantea la serie de reacciones que pueden ser responsables de la evolución geoquímica, obteniendo la cantidad neta de masa transferida entre las fases del medio para cada una de las reacciones especificadas.

El modelo geoquímico conceptual obliga a que todos los elementos definidos tengan sentido, lo que asegura que las reacciones químicas definidas sean las causantes de la composición química del agua y por ende las que condicionan la calidad del agua. Incorporado a esto, se debe tener en cuenta que cuando una solución acuosa está en contacto con minerales, la cantidad de cada mineral que se puede disolver en el agua, está condicionada por el índice de saturación. El índice de saturación (IS) es la relación que existe entre las actividades en solución que forman un determinado mineral y la constante de equilibrio de la reacción de disolución de ese mineral (Ec 5) (Martínez, et al, 2000).

$$IS = \log \frac{([a_i][a_j])}{K_{ij}} \quad (Ec 5)$$

Donde:

IS = índice de saturación del mineral

a_i es el coeficiente de actividad del ion *i*

a_j es el coeficiente de actividad del ion *j*

K_{ij} = constante de equilibrio del mineral *ij*

Si el IS es positivo, la solución está sobresaturada y el mineral tenderá a precipitar; si es negativo la solución está subsaturada y disolverá el mineral; si el IS es igual a cero está en equilibrio o saturada.

En la década de 1970 aparecieron los primeros trabajos referidos a programas de computación, que permitieron simplificar los complejos cálculos que son necesarios realizar para determinar el estado de equilibrio del agua con respecto a diferentes minerales. Diversos trabajos a nivel mundial han sido desarrollados para conocer la evolución geoquímica del agua subterránea. La evolución de estos programas dio lugar a otros más modernos, con mayores facilidades para su aplicación. PhreeqC (Parnachev, et al, 1999), es uno de los programas que puede ser utilizado para realizar modelación inversa. Sin embargo, hay que considerar que los modelos inversos no proporcionan soluciones únicas, por lo que se requiere elegir el modelo más probable, de acuerdo con la información disponible de las condiciones reales del medio estudiado; es decir, de la correcta formulación del modelo conceptual.

Para definir las reacciones de la evolución química del agua de lluvia a agua superficial y a agua poco profunda (norias), el modelo conceptual que se estableció incluye las fases de yeso, calcita, dolomita, halita, montmorillonita, caolinita, illita, dióxido de carbono, intercambio iónico y agua. El modelo se simuló con una incertidumbre de 0.085.

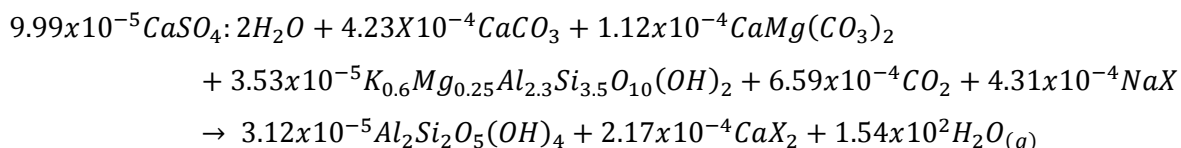
Los índices de saturación (IS) para verificar si el agua está en equilibrio, subsaturada o sobresaturada, con respecto a un mineral para la evolución del agua de lluvia de la muestra 27 (Ca – Cl) a agua superficial de la muestra 13 (Ca – HCO₃) se presentan en la tabla 10:

Mineral	Formula	Índices de saturación	
		Muestra 27 (agua de lluvia)	Muestra 13 (agua superficial)
Calcita	CaCO ₃	-2.37	0.24
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	-6.12	-0.19
Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	-4.41	-2.60
halita	NaCl	--	-8.39
Montmorillonita	Ca _{0.165} Al _{2.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂	-6.83	1.58
caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-2.34	3.50
illita	K _{0.6} Mg _{0.25} Al _{2.3} Si _{3.5} O ₁₀ (OH) ₂	-8.05	1.22
Dióxido de carbono	CO ₂	p10 ^{-3.812}	p10 ^{-3.07}
Agua (g)	H ₂ O	p10 ^{-1.51}	p10 ^{-1.44}

Tabla 10. Índices de saturación, evolución geoquímica de agua de lluvia a agua superficial (muestra 27 – muestra 13)

Los índices de saturación indican que la muestra de agua de lluvia esta subsaturada con respecto a los minerales indicados en la tabla 10, y para la muestra de agua superficial está sobresaturada con respecto a la calcita y las arcillas, y con relación a la dolomita, al yeso y a la halita está subsaturada. El agua de lluvia al no presentar IS de un mineral indica que la evolución geoquímica es debida a otro factor donde no involucra dicho mineral, en este caso la halita.

La reacción química para la evolución química del agua de lluvia de baja mineralización al agua superficial, es la disolución de una pequeña cantidad de yeso (0.00009 moles), calcita (0.0004 moles), dolomita (0.0001 moles), e illita (0.0003 moles), donde la mayor aportación en el aumento de la concentración de los iones del agua superficial proviene de la evapotranspiración del agua de lluvia. Por cada 1 L de agua superficial se evaporan 3.77 L de agua de lluvia, concentrando los iones, lo que genera la liberación de 15.4 moles de vapor de agua y la precipitación de arcillas como la montmorillonita. La concentración de los iones calcio en solución da lugar al intercambio iónico, reemplazando a los iones sodio concentrados en la superficie de la arcilla. El crecimiento de la concentración de los iones cloruros en el agua superficial (14.81 mg/L) son a causa de la evapotranspiración que sufre el agua de lluvia (4.49 mg/L). Los cloruros suelen representar la recarga local en condiciones semiáridas (la composición de la precipitación modificada por la evapotranspiración) (Cardona, et al, 2007). La reacción química que se lleva a cabo es la siguiente:

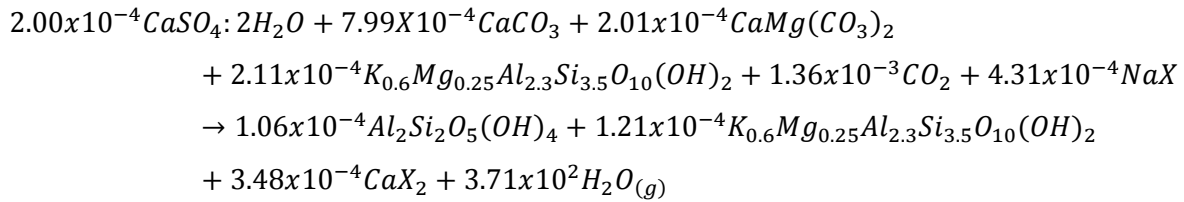


Para las reacciones químicas obtenidas de la evolución de agua de lluvia (Ca – Cl con clave 27) a agua subterránea poco profunda de la noria 5 (Ca – HCO₃), se consideró el mismo modelo geoquímico conceptual descrito anteriormente, con una incertidumbre de 0.05.

Mineral	Formula	Índices de saturación	
		Muestra 27 (agua lluvia)	Muestra 5 (agua subterránea)
Calcita	CaCO ₃	-2.37	-0.01
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	-6.12	-1.48
Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	-4.41	-2.08
halita	NaCl	--	-7.82
Montmorillonita	Ca _{0.165} Al _{2.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂	-6.83	-7.43
caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-2.34	-4.56
illita	K _{0.6} Mg _{0.25} Al _{2.3} Si _{3.5} O ₁₀ (OH) ₂	-8.05	-8.51
Dióxido de carbono	CO ₂	p10 ^{-3.812}	p10 ^{-2.15}
Agua (g)	H ₂ O	p 10 ^{-1.51}	p10 ^{-1.62}

Tabla 11. Índices de saturación, evolución geoquímica de agua de lluvia a agua subterránea (muestra 13 – muestra 5).

De acuerdo a la tabla 11, ambas muestras estas subsaturadas con respecto a los minerales. De la misma manera que la reacción anterior el proceso de evaporación que sufre el agua de lluvia es el factor que controla la composición química del agua de la noria, aportando la mayor concentración de iones presentes en el agua subterránea de baja profundidad (5.50 m). Por cada litro de agua subterránea se evaporan 7.6 litros de agua de lluvia. La reacción química incluye la disolución de yeso (0.0002 moles), calcita (0.0007 moles), dolomita (0.0002 moles) y montmorillonita (0.0002 moles), generando precipitación de caolinita, illita y liberación de vapor de agua (37.1 moles) a causa de la evaporación, además la presencia de los iones calcio y magnesio en solución dan lugar a intercambio iónico.



Para las simulaciones siguientes no se consideró evaporación de agua en el modelo conceptual debido a que ya se trata de agua subterránea, donde las condiciones atmosféricas dejan de influir de manera directa, asimismo se incluyeron más minerales al presentar mayor mineralización en su composición química.

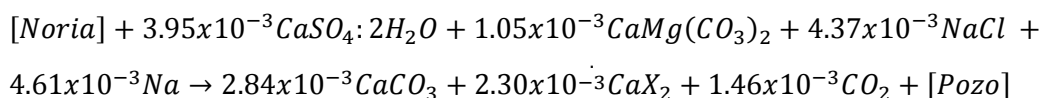
Se definió como modelo geoquímico conceptual las fases minerales de yeso, calcita, dolomita, barita, fluorita, celestita, halita, estroncianita y realización de intercambio iónico, además de presencia de dióxido de carbono.

La simulación es a partir de la muestra 1, tomada como la solución inicial (Ca – HCO₃) hasta alcanzar la composición de la muestra 11 (Na – SO₄), considerada como el punto final del recorrido del agua final, lo que corresponde a una noria y aun pozo respectivamente.

Mineral	Formula	Índices de saturación	
		Muestra1(agua noria)	Muestra11(agua pozo)
Calcita	CaCO ₃	-0.16	-0.03
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	-1.54	-0.18
Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	-1.72	-1.09
Dióxido de carbono	CO ₂	p10 ^{-1.59}	p10 ^{-1.06}
Halita	NaCl	-7.93	-6.03

Tabla 12. Índices de saturación, evolución geoquímica de agua subterránea poco profunda a agua subterránea profunda (muestra 1 – muestra 11).

Los índices de saturación indican que todos los minerales se están disolviendo tanto en la noria como en el pozo (Tabla 12), lo que indica que la muestra final de su recorrido (pozo) contendrá más sólidos disueltos. La reacción química que describe este comportamiento es la disolución de yeso (0.0039 moles) y de dolomita (0.0011 moles), aportando la mayor cantidad de sales a la muestra del pozo, lo que provoca la precipitación de la calcita (0.0023 moles) y la liberación de CO₂, además de intercambio iónico entre sodio y calcio.



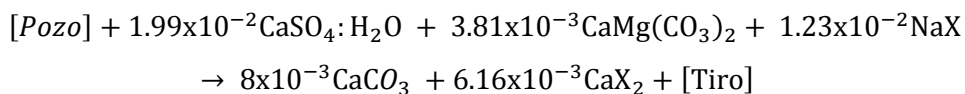
En la reacción también indica disolución de 0.0043 moles de halita, lo que justifica la presencia de cloruros en el agua, sin embargo, hasta ahora no se puede establecer la fuente de estos iones en el área de estudio: puesto que no se ha reportado en estudios geológicos la presencia de halita en la región, una posibilidad es la presencia de sales en el subsuelo, quienes estarían contribuyendo a la presencia de cloruros.

La evolución química del agua de pozo profundo 7 (Ca – Mx) a agua subterránea de mayor profundidad aproximadamente a 512 m (Ca - SO₄), se muestra en la tabla 13.

Mineral	Formula	Índices de saturación	
		Muestra 7 (Ca – Mx)	Muestra 12 (Ca – SO ₄)
Calcita	CaCO ₃	0.10	0.01
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	-0.52	-0.27
Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	-1.28	-0.09
Dióxido de carbono	CO ₂	p10 ^{-1.62}	p10 ^{-1.06}

Tabla 13. Índices de saturación, evolución geoquímica de agua subterránea (muestra 7 – muestra 12).

Los índices de saturación para el agua subterránea indican que el agua está en equilibrio con respecto a la calcita, y con respecto a la dolomita y el yeso el agua está subsaturada. La evolución de la muestra 7 a la 12 está condicionada por la reacción química de la disolución de yeso (0.019 moles); al ser más soluble produce la precipitación de calcita (0.008 moles), generando que no se produzcan más iones HCO₃⁻, y por consiguiente el consumo de CO₂ es mínimo (no aparece en la reacción). Este consumo mínimo de CO₂ y la no producción de HCO₃⁻, da lugar a la evolución geoquímica del agua de mixta a sulfatada cálcica, siendo la disolución de dolomita la que aporta los iones Ca²⁺ a la solución (0.003 moles). A diferencia de las anteriores, en esta reacción la cantidad de moles que intervienen en la reacción son concentraciones mayores debido a que la evolución química corresponde a la muestra de mayor profundidad de la zona (agua más antigua).



Por lo tanto, las principales reacciones que rigen la composición química en función de la zona donde se encuentra, son: la disolución de yeso, precipitación de calcita y el intercambio iónico entre Ca^{2+} y Na^+ , dando lugar a la variación en función del trayecto recorrido.

Las concentraciones empleadas para la modelación inversa se indican en la tabla 14.

	Unidades	Muestra 27(agualluvia)	Muestra 13(estanque)	Muestra 5(noria)	Muestra 7(pocho)	Muestra 12(tiro)	Muestra 1(noria)	Muestra 11(pocho)
Parámetro		Ca-Cl	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca - Mx	Ca -SO ₄	Ca - Mx	Ca -SO ₄
Temp	°C	--	20.80	20.9	26.3	46.9	21.2	27.5
pH		7.59	8.07	7.38	7.07	6.51	6.99	7.39
Ca ²⁺	mg/L	3.76	35.20	71.20	126.2	549.6	88.33	92.20
Mg ²⁺	mg/L	0.07	3.21	4.70	10.3	102.6	2.64	29.70
Na ⁺	mg/L	0.0	10.0	16.0	66.0	370.0	24.00	243.00
K ⁺	mg/L	0.59	3.50	1.69	2.3	25.8	3.37	3.48
Cl ⁻	mg/L	4.49	14.81	34.55	47.7	394.8	18.10	164.50
HCO ₃ ⁻	mg/L	5.71	101.20	183.49	292.8	246.0	277.18	171.78
SO ₄ ²⁻	mg/L	1.27	14.0	29.0	150.0	1900.0	60	420
F ⁻	mg/L	--	--	0.29	0.3	3.6	0.49	0.74
Si	mg/L	<1.08	4.78	12.04	12.23	18.93	10.69	7.94
Ba	µg/L	--	35.15	--	223.6	451.7	25.98	507.90
Al	µg/L	--	436	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001

Tabla 14. Evolución geoquímica de muestras de agua subterránea

7.5. Evaluación de la calidad del agua para consumo humano

Como ya se mencionó en los apartados anteriores, el agua subterránea va adquiriendo su composición química, a través de tres sistemas de interacción: atmósfera – agua, suelo – agua y agua – acuífero a través de reacciones químicas de difusión de CO₂, de disolución de yeso, de precipitación de calcita y de intercambio iónico entre Na⁺, y Ca²⁺, dando lugar a la variación de la composición química, presentado cambios tanto espaciales como temporales. Consecuentemente la variación de esta composición química define la calidad del agua para consumo humano al llegar a su destino final.

A partir de estos resultados se hizo una evaluación sobre la calidad del agua a lo largo del año muestreado, para observar de qué manera los factores naturales o antropogénicos, condicionan la calidad del agua.

La calidad del agua está en función de su uso, por lo tanto, la composición química del agua subterránea se comparó con la norma 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". Esta norma, establece los valores de referencia para consumo humano, siendo de carácter obligatorio para sistemas de abastecimiento público y privado, o cualquier persona física o moral que la distribuya.

La comparación de la composición química del agua subterránea con la norma se muestra en la tabla 15. La clave usada para identificar los aprovechamientos corresponde a la empleada en la tabla 5, de la misma forma que en los mapas posteriores.

Cada fila de datos por parámetro corresponden a un muestreo, con un orden: marzo2014, junio2014, octubre2014 y marzo2015. Los parámetros que están fuera de los límites que establece la NOM – 127 – SSA1 – 1994, están marcados en color rojo; en las casillas de los parámetros se indica el valor de referencia de la norma. Las columnas en color azul corresponden a los aprovechamientos muestreados que forman parte del sistema de abastecimiento de agua de la población de Villa de la Paz. Las columnas en color naranja corresponden a aprovechamientos ubicados en Cedral y Matehuala, donde solo el pozo 14 se emplea para consumo de esta misma comunidad. Las columnas en color café corresponden a los puntos analizados de agua superficial en Villa de la Paz, y las últimas dos columnas en color gris son aprovechamientos de uso exclusivo de la empresa minera NEMISA. Por consiguiente, el análisis de calidad de agua se centra en los resultados de las columnas en color azul, y las demás columnas ayudan a entender la variación de la calidad del agua, pero al no formar parte del sistema de abastecimiento de Villa de la Paz, no se toman en cuenta para definir la calidad del agua.

Como se observa en la tabla 15, a lo largo del año la calidad del agua de Villa de la Paz varía en función de las estaciones muestreadas.

Presentó concentraciones superiores a lo que establece la NOM – 127 – SSA1 – 1994 en diez parámetros en diferentes aprovechamientos: STD, DT, Fe, Ba, As, Na⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, CT y CF.

Aprovechamiento Parámetro	7	8	15	10	11	1	2	3	5	6	14	21	23	17	4	13	16	12
pH (6.5 -8.5)	7.04	7.08	-	7.06	7.26	7.0	-	-	-	-	-	6.68	6.84	6.81	8.11	8.54	-	6.54
	7.07	7.13	-	7.04	7.39	7.39	7.42	8.09	7.38	7.30	-	6.68	6.89	6.86	8.23	8.07	-	6.51
	7.18	7.15	7.81	7.06	7.48	7.10	1.73	7.60	7.59	7.32	7.38	6.76	6.91	6.89	8.87	7.15	7.63	6.43
	7.24	7.23	7.74	7.15	7.40	7.25	7.74	7.84	7.71	7.49	7.35	6.75	6.86	6.89	8.0	9.21	8.19	6.86
Sólidos Totales Disueltos (STD) (mg/L) (1000mg/L)	425	408	-	890	714	254	-	-	-	-	-	1249	1147	-	-	136	-	-
	478	447	-	1018	793	287	340	218	273	413	-	1401	1279	1287	661	106	-	2166
	314	345	282	1692	1236	314	272	434	274	498	940	3078	2808	2922	620	548	716.0	4406
	475	685	685	1038	841	289	251	342	267	399	690	1453	1357	1355	525	108	506	2325
Dureza Total (CaCO ₃) (mg/L) (500 mg/L)	320.0	356.0	-	650.0	364.0	180.0	-	-	-	-	-	1580.0	1480.0	-	580	132	-	2000
	126.2	87.8	-	217.2	92.20	88.30	84.8	82.5	71.2	140.5	-	580.0	704.0	660	205.6	35.2	-	549.6
	320.0	265.6	304.0	752.0	432.0	208.0	179.2	252.8	268.8	288.0	560.0	1936.0	2240.0	928	332.8	265.6	264.0	408.0
	336.3	336.35	325.5	1030.75	1030.75	208.3	234.36	243.04	251.7	390.6	325.5	1312.8	119.3	1497.30	282.1	195.3	141.0	-
Fluoruro (F) (mg/L) (1.5 mg/L)	0.56	0.57	-	0.73	1.0	0.44	-	-	-	-	-	2.15	1.72	2.05	1.28	2.07	-	3.53
	0.33	0.36	-	0.72	0.74	0.49	1.00	0.41	0.29	0.60	-	1.99	1.61	1.58	1.03	0.0	-	3.58
	0.20	0.14	0.70	0.44	0.36	0.80	0.33	0.63	0.00	0.45	0.92	1.53	1.24	1.46	0.73	0.14	1.0	1.7
	0.39	0.37	0.32	0.71	0.66	0.42	0.98	0.63	0.24	0.63	0.98	1.93	1.46	1.80	0.90	0.31	1.3	1.87
Cloruro (Cl) (mg/L) (250 mg/L)	26.8	27.8	-	198.5	81.9	9.90	-	-	-	-	-	40.7	32.8	54.6	67	14.9	-	486.4
	47.71	34.55	-	164.5	164.5	18.10	23.03	4.94	34.55	9.87	-	78.14	57.58	74.03	100.35	14.8	-	394.8
	43.68	16.88	56.58	102.2	88.3	13.90	6.95	14.89	19.85	6.95	108.20	102.25	22.8	28.79	43.68	16.88	18.9	106.22
	71.47	62.54	80.41	156.3	147.4	44.67	31.27	53.60	80.41	26.80	120.61	80.41	62.54	80.41	151.88	80.41	35.74	388.64
Manganeso (Mn) (µg/L) (150 µg/L)	1.99	0.23	-	4.9	5.75	0.54	-	-	-	-	-	29.85	6.05	4.17	27.99	2.27	-	4525.0
	3.10	<0.01	-	2.6	4.80	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	3.6	-	17.8	9.10	5.3	34.4	13.8	-	2720.0
	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	10.0	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	21.0	-	<0.01	<0.01	<0.01	170.0	>247
	1.97	<0.01	3.2	1.9	8.7	<0.01	1.82	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	4.11	2.53	1.82	43.78	6.41	39.84	654.3
Hierro (Fe) (mg/L) (0.30mg/L)	0.11	0.57	-	0.17	0.10	0.09	-	-	-	-	-	0.27	0.13	0.10	0.11	0.08	-	0.1
	0.07	0.05	-	0.13	0.03	0.04	0.06	0.04	0.03	0.03	-	0.07	0.08	0.09	0.03	0.14	-	1.68
	0.05	0.03	0.06	0.10	0.07	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.05	0.07	0.09	-	0.06	<0.01	0.032	0.08	1.39
	0.035	0.008	0.01	0.09	0.03	<0.005	0.008	0.006	<0.005	0.005	<0.005	0.014	0.043	0.028	0.011	0.059	0.17	1.16
Bario (Ba) (µg/L)(700 µg/L)	945.67	43.11	-	26.97	20.44	84.71	-	-	-	-	-	7.06	21.65	14.82	98.34	59.37	-	24.96
	223.60	208.0	-	940.7	507.9	25.98	95.76	47.54	47.38	29.48	-	620.08	122.60	168.0	116.4	36.37	-	451.70
	240.00	220.0	110.0	133.0	102.0	71.00	40.00	31.00	87.00	75.00	170.0	41.00	-	76.00	73.00	218.0	200.0	103.00
	48.4	43.5	14.8	7.6	13.1	88.49	52.28	36.47	113.0	12.88	18.10	2.75	5.64	3.07	68.78	31.41	25.28	6.21
Arsénico (As) (µg/L) (25 µg/L)	0.82	0.81	-	3.77	2.45	12.40	-	-	-	-	-	22740	38.73	509.60	330.90	9.30	-	4518.0
	1.16	1.91	-	3.22	2.30	10.40	37.24	282.30	2.19	8.45	-	18570	33.01	430.20	186.7	15.45	-	3606.0
	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	22.00	550.00	46.0	<0.01	<0.01	<0.01	15149	-	379.0	204.0	<0.01	<0.01	2855.0
	<0.01	<0.01	2.46	<0.01	1.97	9.85	726.9	40.18	1.04	7.35	0.61	4081	3.87	46.63	168.0	15.33	7.37	538.7
Aluminio (Al) (µg/L) (200 µg/L)	2.66	4.23	-	7.42	8.34	1.25	-	-	-	-	-	1.77	0.47	9.20	11.96	24.81	-	4.94
	<0.01	<0.01	-	<0.01	<0.01	<0.01	3.56	1.75	1.25	<0.01	-	0.12	<0.01	1.28	2.51	439.9	-	2.3
	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	32.0	44.0	70.0	39.0	<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01	100.0	<0.01	<0.01	<0.01
	5.47	5.59	33.18	13.70	77.51	6.24	11.24	12.0	5.58	5.22	25.17	13.61	14.63	10.55	21.49	124.2	12.57	9.7
Cadmio (Cd) (µg/L) (5 µg/L)	0.067	0.21	-	0.72	0.10	0.04	-	-	-	-	-	0.048	0.086	1.1	0.912	0.172	-	7.327
	0.14	0.02	-	0.01	0.02	1.24	0.046	0.69	0.15	0.039	-	0.197	0.162	0.23	1.04	0.484	-	5.99
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<0.01	<0.01	0.59	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.303

Tabla 15. Parámetros evaluados para la calidad del agua de Villa de la Paz

Aprovechamiento Parámetro	7	8	15	10	11	1	2	3	5	6	14	21	23	17	4	13	16	12
Cobre (Cu) (µg/L) (2000 µg/L)	1.85 2.25 - <0.01	1.19 0.19 - <0.01	- - - <0.01	1.41 0.51 - <0.01	1.02 0.40 - <0.01	0.58 0.06 - <0.01	- 0.80 - <0.01	- 1.95 - <0.01	- 0.17 - <0.01	- 0.49 - <0.01	- - - <0.01	- 3.94 3.39 <0.01	- 1.77 1.97 0.67	5.0 3.39 - 0.63	20.26 22.63 - 21.29	8.41 5.89 - 0.75	- - - <0.01	1.86 2.80 - <0.01
Cromo (Cr) (µg/L) (50 µg/L)	0.62 <0.01 0.69	0.46 <0.01 0.42	- - - <0.01	0.71 <0.01 - <0.01	0.44 <0.01 - <0.01	0.30 <0.01 - <0.01	- <0.01 - <0.01	- <0.01 - <0.01	- <0.01 0.36 0.36	- <0.01 - 0.36	- - - <0.01	0.38 <0.01 - <0.01	0.42 <0.01 - <0.01	0.44 <0.01 - <0.01	0.35 <0.01 - <0.01	0.67 <0.01 - <0.01	- - - <0.01	0.50 <0.01 - <0.01
Plomo (Pb) (µg/L) (25 µg/L)	1.47 0.82 <0.01 1.84	1.04 <0.01 <0.01 1.88	- - - 3.20	0.50 <0.01 - 2.44	0.94 0.14 - 6.44	<0.01 0.13 - 1.89	- <0.01 - 1.85	- <0.01 - 1.95	- 0.29 - 1.86	- <0.01 - 1.86	- - - 2.54	- 0.98 0.26 2.34	0.14 0.23 - 2.31	3.56 12.49 - 2.54	1.63 0.85 <0.01 2.75	0.96 3.35 <0.01 2.26	- - - 2.15	1.41 1.81 <0.01 2.31
Zinc (Zn) (µg/L) (5000 µg/L)	398.8 434.1 220.0 244.9	23.0 18.4 <0.01 2.4	- - 140.0 282.6	67.13 39.63 <0.01 70.09	79.25 49.91 <0.01 1614	25.56 12.87 28.0 0.75	- 6.26 22.0 0.68	- 13.87 28.0 0.30	- 43.32 31.0 4.09	- 22.43 <0.01 1.76	- - <0.01 21.6	- 38.90 15.04 14.73	12.53 10.32 - 42.79	27.27 13.33 - 244.5	25.48 23.69 21.0 16.29	11.0 97.51 <0.01 0.14	- - <0.01 20.73	2233.0 1907.0 1629.0 326.0
Sodio (Na ⁺) (mg/L) (200 mg/L)	78.5 66.0 73.0 71.0	78.0 78.0 87.0 97.0	- - 231.0 197.0	233.6 220.0 183.0 216.0	215.0 243.0 234.0 283.0	29.2 24.0 26.0 30.0	- 36.0 10.0 14.0	- 3.0 46.0 45.0	- 16.00 19.00 26.0	- 31.00 26.00 42.0	- - 156.00 186.0	- 93.90 152.00 122.00 125.0	37.95 58.00 0.00 53.0	90.00 81.00 86.00 101.0	68.00 71.00 38.00 69.0	17.110 10.00 87.00 21.0	- - 179.0 148.0	425.64 370.00 376.00 262.0
Sulfatos (SO ₄ ²⁻) (mg/L) (400 mg/L)	200.0 150.0 73.0 195.0	195.0 162.5 93.0 200	- - 437.0 325.0	633.3 640.0 860.0 600.0	471.4 420.0 580.0 412.0	70.0 60.0 68.0 70.0	- 155.0 27.0 81.0	- 71.0 33.0 150.0	- 29.0 28.0 22.0	- 262.5 42.0 235.0	- - 412.0 375.0	- 1625.0 2017.0 1480.0	1380.0 1480.0 1964.0 980.0	1550.0 1460.0 580.0 1380.0	450.00 562.50 107.00 194.0	27.00 14.00 93.00 20.0	- - 362.0 256.0	2000.00 1900.00 950.00 1713.0
Nitratos (mg/L)(44.28mg/L)	114.48 140.60 66.30 47.84	38.45 82.20 43.30 38.54	- - 44.60 38.54	86.63 130.8 57.50 47.40	88.40 35.80 31.80 36.77	13.26 14.60 14.10 8.86	- 16.80 18.10 9.30	- 68.50 15.50 11.96	- 70.70 35.40 29.24	- 14.60 15.50 9.30	- - 67.60 45.63	- 37.13 55.30 23.92	31.82 52.60 30.90 25.25	46.41 75.60 40.70 35.88	23.87 40.20 23.90 24.81	13.26 18.60 43.30 2.66	- - 33.60 3.99	5.30 6.20 10.20 3.54
Organismos Coliformes Totales (CT)NMP (2nmp/100ml)	- 4 93 3	43 75 <3 23	- - - 11	28 240 23 4	9 23 <3 4	4 240 23 3	- 240 23 <3	- 93 23 3	- 4.3 240 4	- >2400 23 3	- - - 4	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -
Organismos Coliformes Fecales (CF)NMP (0NMP/100ml)	- <3 15 3	4 23 <3 4	- - - <3	3.0 240 <3 <3	3 <3 <3 <3	<3 23 9 3	- >2400 9 <3	- <3 23 3	- >2400 93 <3	- 7 9 <3	- - - <3	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -

Tabla 15. Parámetros evaluados para la calidad del agua de Villa de la Paz. Continuación

En la tabla 16 se resumen los aprovechamientos que abastecen agua al municipio de Villa de la Paz, donde se indica qué muestreo y cuales parámetros no cumplen con lo establecido en la NOM – 127 – SSA1 – 1994.

Clave aprovechamiento	Muestreo	Parámetros que rebasa la NOM - 127 - SSA1 - 1994
7	mar-14	Bario, nitratos
	jun-14	Coliformes totales
	oct-14	Nitratos, coliformes totales, coliformes fecales
	mar-15	Nitratos, coliformes totales, coliformes fecales
8	mar-14	Fierro
	jun-14	Nitratos, coliformes totales, coliformes fecales
	oct-14	Nitratos
	mar-15	Coliformes totales, coliformes fecales
15	oct-14	Sodio, sulfatos, nitratos
	mar-15	Coliformes totales
10	mar-14	Dureza total, sodio, sulfatos, nitratos, coliformes totales, coliformes fecales
	jun-14	Sólidos totales disueltos, bario, sodio, sulfatos, nitratos, coliformes totales, coliformes fecales
	oct-14	Sólidos totales disueltos, dureza total, sulfatos, nitratos, coliformes totales
	mar-15	Sólidos totales disueltos, dureza total, sodio, sulfatos, nitratos, coliformes totales
11	mar-14	Sodio, sulfatos, nitratos, coliformes totales, coliformes fecales
	jun-14	Bario, sodio, sulfatos, coliformes totales
	oct-14	Sólidos totales disueltos, sodio, sulfatos,
	mar-15	Dureza total, sodio, sulfatos, coliformes totales
1	mar-14	Coliformes totales
	jun-14	Coliformes totales, coliformes fecales
	oct-14	Coliformes totales, coliformes fecales
	mar-15	Coliformes totales, coliformes fecales
2	jun-14	Coliformes totales, coliformes fecales
	oct-14	Arsénico, coliformes totales, coliformes fecales
	mar-15	Arsénico
3	jun-14	Arsénico, nitratos, coliformes totales
	oct-14	Coliformes totales, coliformes fecales
	mar-15	Coliformes totales, coliformes fecales
5	jun-14	Nitratos, coliformes totales, coliformes fecales
	oct-14	Coliformes totales, coliformes fecales
	mar-15	Coliformes totales
6	jun-14	Coliformes totales, coliformes fecales
	oct-14	Coliformes totales, coliformes fecales
	mar-15	Coliformes totales

Tabla 16. Aprovechamientos por muestreo del sistema de abastecimiento de Villa de la Paz que rebasan la NOM – 127 – SSA1 – 1994.

Los STD se encuentran por encima de 1,000 mg/L, límite que establece la norma, principalmente en el pozo 10, lo que indica que presenta concentraciones altas de sales. No se tienen datos sobre efectos sobre la salud asociados a la ingestión de STD presentes en el agua de consumo; no obstante, la presencia de concentraciones altas (superiores a 1200 mg/L) puede resultar en un gusto desagradable para los consumidores.

El hierro solo apareció durante el mes de marzo 2014 con una concentración de 0.57 mg/L en el pozo 8, en los posteriores muestreos su concentración disminuyó considerablemente. No se ha propuesto un valor de referencia basado en efectos sobre la salud humana en agua de consumo. Algunos inconvenientes que se han encontrado es que arriba de 0.3 mg/L, el hierro mancha la ropa y los accesorios de fontanería, y concentraciones de 1 – 3 mg/L pueden resultar aceptables para quienes beben agua de pozos anaerobios.

Dureza total, de igual manera, solo presenta concentraciones superiores a 500 mg/L en los pozos 10 y 11. No se ha propuesto un valor de referencia basado en efectos sobre la salud. No obstante el agua con una dureza mayor a 200 mg/L, en función de la interacción con otros factores (pH y alcalinidad), puede provocar la formación de incrustaciones en las instalaciones de tratamiento, el sistema de distribución, y las tuberías. Otra consecuencia será el consumo excesivo de jabón y la consiguiente formación de restos insolubles de jabón.

Bario; se presentó en tres aprovechamientos, en distintas estaciones. En el pozo 7, durante la estación seca, y en el 10 y 11 durante el inicio de la temporada de lluvias. No hay pruebas de que el bario sea cancerígeno o mutágeno. Solo se ha comprobado que el bario produce nefropatías en animales de laboratorio, pero el criterio de valoración toxicológico que implica un mayor riesgo para las personas parece ser su potencial para causar hipertensión. El valor de referencia basado en efectos sobre la salud es de 0.7 mg/L, debido a su potencial para causar hipertensión (OMS, 2006).

Arsénico, se presentó en concentraciones por arriba de 25 µg/L, en las norias 2 y 3, a finales de la estación húmeda y a inicios de la estación húmeda respectivamente. Si se considera el valor de referencia que establece la OMS de 10 µg/L, valor establecido en

torno a la evaluación de riesgos a la capacidad cancerígena (OMS, 2006), son las norias 1, 2 y 3, las que presentan concentraciones superiores a este valor a lo largo de los cuatro muestreos. El arsénico es un contaminante importante, ya que se ha demostrado que es una de las sustancias que produce cáncer en el ser humano por el consumo de agua contaminada con este elemento. En toda esta zona se encuentran yacimientos minerales, por lo que la presencia de arsénico puede estar en forma de sulfuro de arsénico o arseniatos, siendo de origen natural su presencia. Sin embargo, es importante, establecer medidas precautorias para que la población no consuma agua de estas norias; aunque no se emplean constantemente para consumo humano, ya que cuentan con el pozo de la comunidad del Blanco; sin embargo, existen temporadas en que los habitantes usan el agua para su abastecimiento.

Cabe mencionar, que este es uno de los principales problemas que presenta el agua en Matehuala. Razo, (2002), indica que la contaminación que presenta el agua de Matehuala se debe al transporte fluvial y eólico tanto de residuos como de partículas minerales desde los taludes no estabilizados de las presas de jales, dando lugar a la presencia de altas concentraciones de arsénico en los pozos y norias ubicados en Matehuala, aunado a esto, la poca profundidad que presentan los vuelve vulnerables a contaminación superficial, siendo un constituyente de la calidad del agua, ya que como se observa en la tabla 15, los aprovechamientos ubicados en este municipio (14, 17, 21 y 23) sobrepasan los valores de referencia de la NOM – 127 – SSA1 – 1994 de varios parámetros.

Sodio, sulfatos, nitratos, coliformes totales y coliformes fecales, son parámetros que también presentan concentraciones arriba del límite que establece la norma, y a diferencia de los parámetros anteriores, estos se presentan en concentraciones superiores durante los cuatro muestreos.

Por consiguiente, la evaluación de la calidad del agua se centró en estos parámetros, dando una descripción más detallada de su variabilidad.

7.5.1. Sulfatos (SO_4^{2-})

Las concentraciones de sulfatos por arriba de lo que establece la NOM – 127 – SSA1 – 1994 (400 mg/L) se presentan en los pozos 10, 11, 21, 23, 17 y 12, de los cuales, solo el 10 y 11 suministran agua para el abastecimiento de Villa de la Paz. Las altas

concentraciones se deben principalmente a la disolución de yeso. Estos pozos suministran agua a la parte media y baja de la cabecera municipal, por ende, esta zona también presenta concentraciones altas de sulfatos. Los aprovechamientos de la zona de Matehuala (17, 21, 23) son los que presentan concentraciones mayores (Figura 19), al ser la zona próxima a la descarga del acuífero, donde el tiempo de residencia en el medio geológico es mayor.

Como se aprecia en los mapas, la calidad del agua no es apta para el consumo humano con respecto a la concentración de los sulfatos, independientemente de la temporada en la que se encuentre, ya que a pesar de que su concentración varía, la presencia de este ion al ser de origen natural, es constante a lo largo de los cuatro muestreos. Como ya se comentó, la existencia de los sulfatos se debe al medio geológico, siendo el flujo subterráneo el que rige su concentración, ya que como se observa en la figura 19, los aprovechamientos del flujo local presentan concentraciones por debajo de las que presentan los aprovechamientos que forman parte del flujo intermedio.

En la gráfica 5, se puede ver que el régimen de precipitación, genera un comportamiento diferente en los sulfatos. Las concentraciones se consideran prácticamente estables en las estaciones secas y al inicio de la estación húmeda, solo al final de la estación húmeda la concentración difiere de las anteriores. Las norias y los pozos que pertenecen al sistema de flujo local (1, 2, 3, 5, 6, 8, 7) presentan concentraciones más bajas al final de la temporada de lluvias debido a la dilución, mientras que en los aprovechamientos profundos (10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 21, 23) sucede lo contrario; las concentraciones aumentan dado que, la aportación de agua incrementa la disolución del mineral, acrecentando considerablemente sus concentraciones. Otro factor que incrementa considerablemente las concentraciones de sulfatos es el retorno de agua empleada para riego, ya que aumenta la salinidad del suelo, a través de la infiltración de sulfatos del agua subterránea, efecto observado en los aprovechamientos empleados para riego además del consumo humano (15, 14, 10, 17). El aprovechamiento que corresponde al tiro de la mina (12), presenta concentraciones mayores debido a la profundidad y a la temperatura (45 °C) que facilitan la disolución de yeso (principal mineral de aporte de sulfatos).

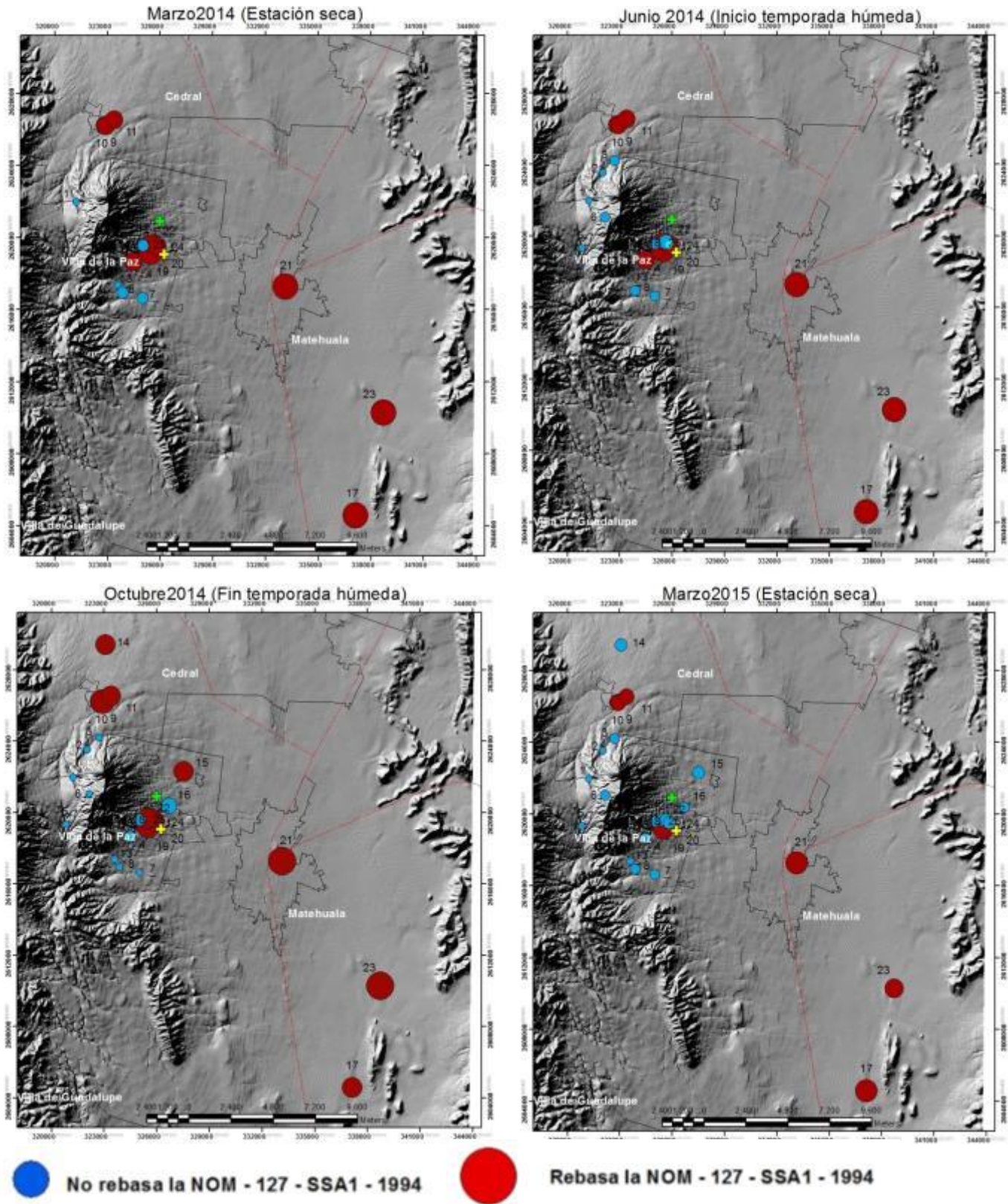
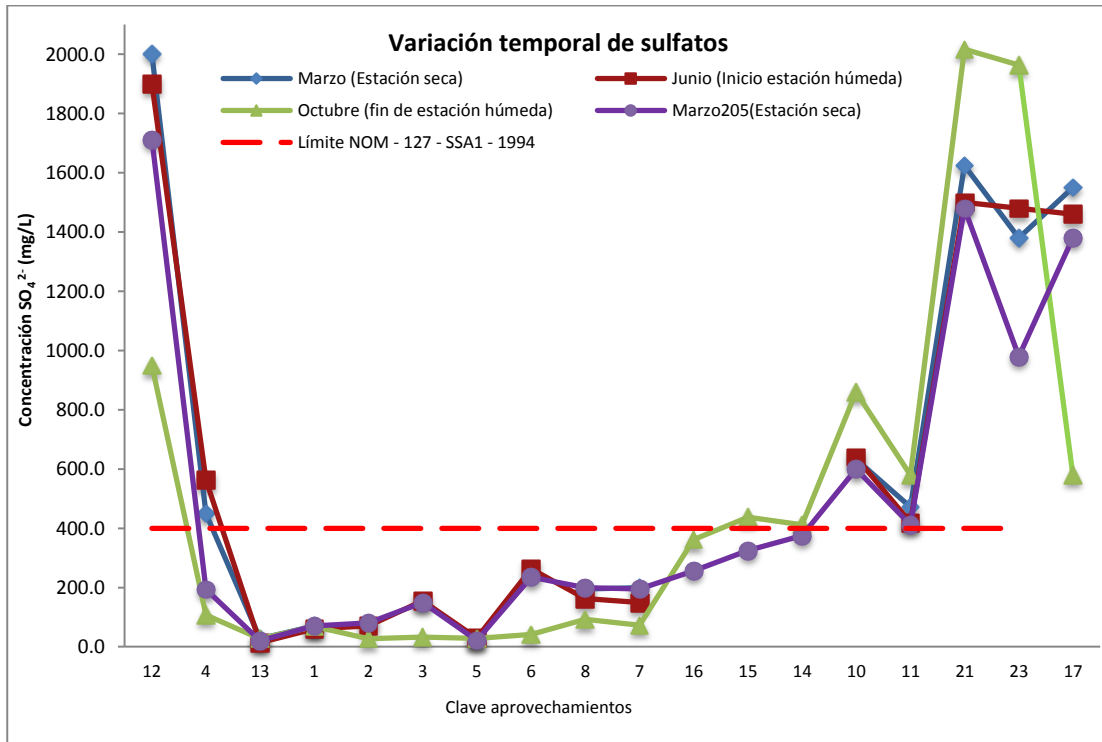


Figura 19. Variación espacial y temporal de sulfatos. (Fuente: elaboración con datos propios)



Gráfica 5. Variación temporal de sulfatos.

7.5.2. Sodio (Na^+)

Como se observa en la figura 20, las concentraciones de sodio por arriba de lo que establece la NOM – 127 – SSA1 – 1994 (200 mg/L) se presentan en los aprovechamientos con clave 10, 11, 12, 15, 17, 21 y 23 de los cuales al igual que con los sulfatos, solo el 11 y 12 abastecen agua a Villa de la Paz.

Su comportamiento no presenta variaciones significativas a lo largo de las estaciones seca y húmeda, ya que tanto en los aprovechamientos que cumplen lo establecido a la norma como los que la sobrepasan, sus concentraciones permanecen prácticamente constantes (Gráfica 6). Las concentraciones más altas se presentan en los aprovechamientos 15, 14, y 10; son pozos que además de usarse para consumo humano también se emplean para riego, lo que genera un aumento en la salinidad del suelo, que a través de la infiltración aumenta la concentración de sodio del agua subterránea.

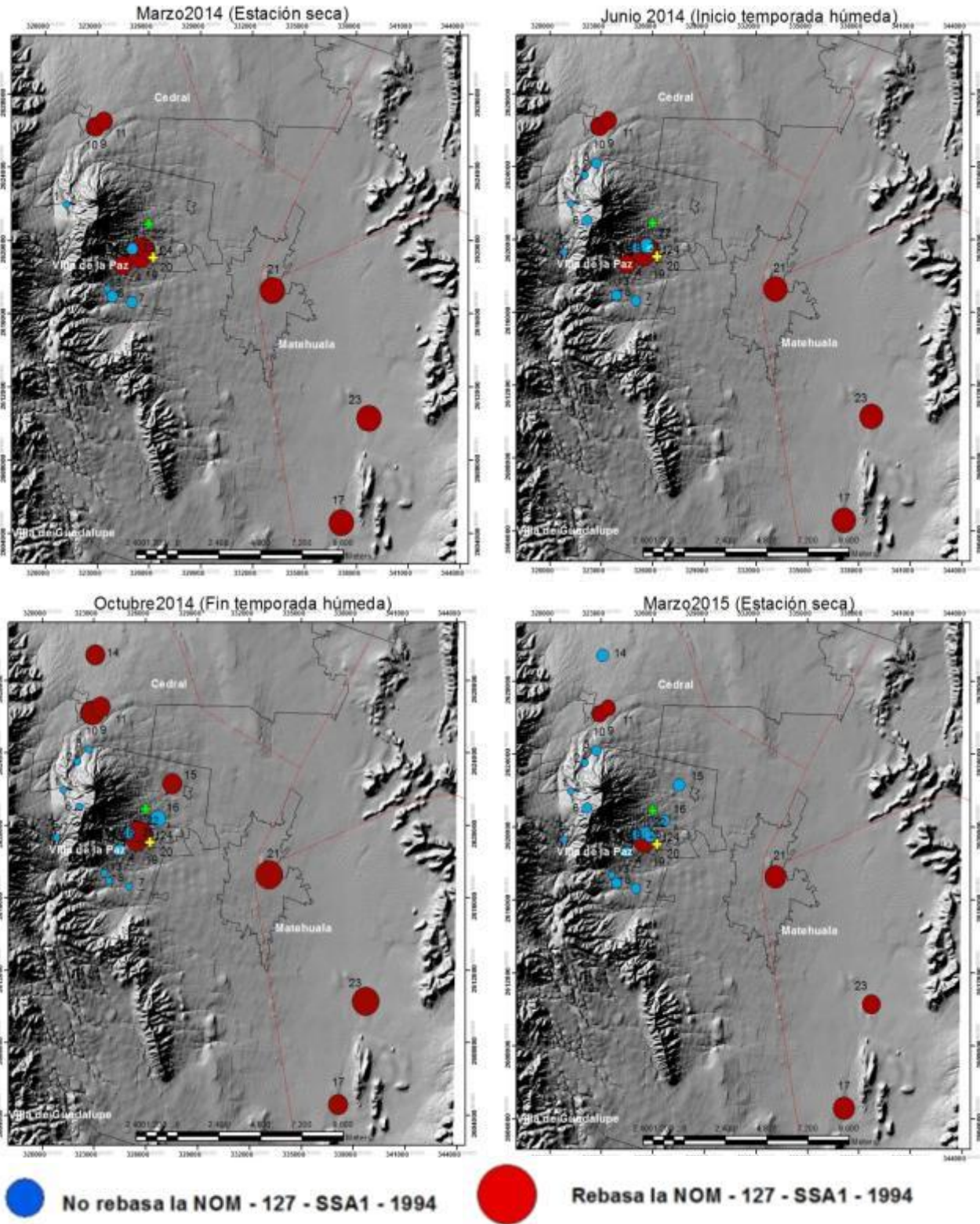
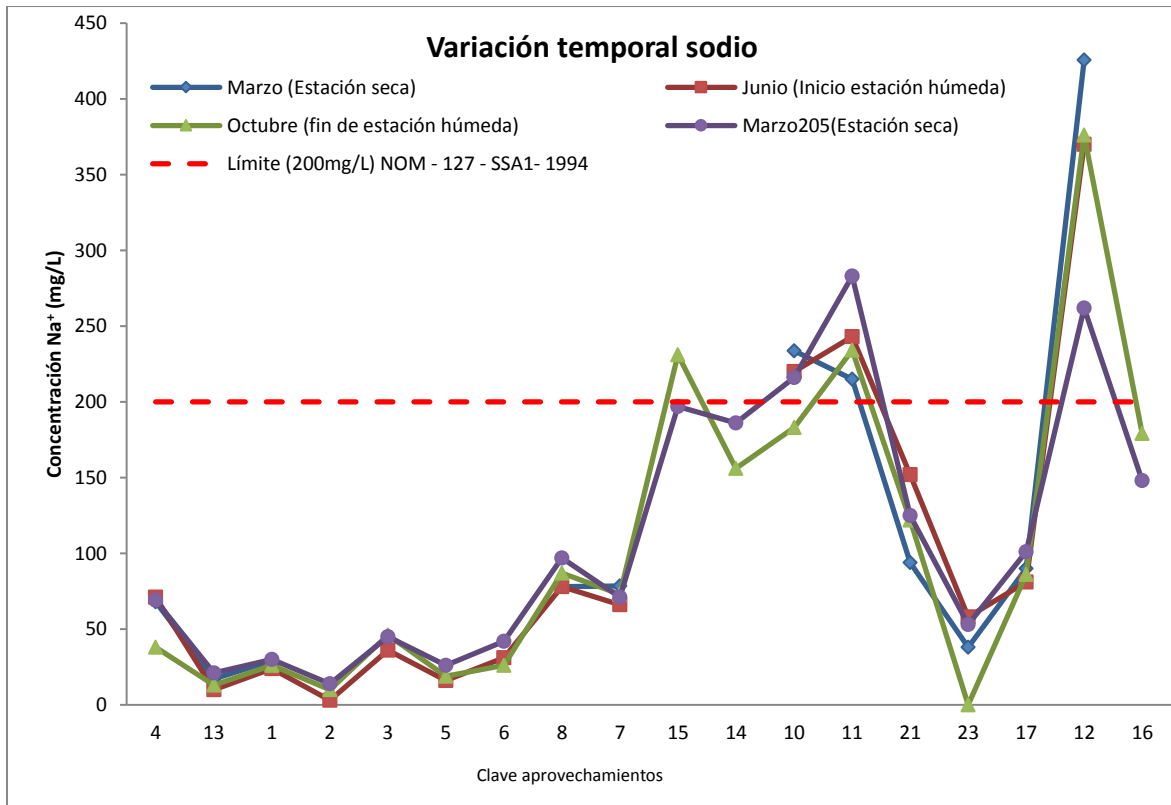


Figura 20. Variación espacial y temporal de sodio. (Fuente: elaboración con datos propios)



Gráfica 6. Variación temporal de sodio.

Al igual que en los sulfatos, los aprovechamientos que pertenecen al flujo local (1, 2, 3, 5, 6, 8, 7) presentan concentraciones menores (entre 15 y 90 mg/L) con respecto a los aprovechamientos que forman parte al sistema de flujo intermedio (entre 90 y 290 mg/L) (10, 11, 14, 15, 16, 17, 21, 23); en relación al tiro de la mina (12) su concentración es superior, del orden de 400 mg/L a una profundidad de 512 m. La formación del mesozoico y la temperatura aportan esta concentración de sodio siendo el agua más antigua de la región.

7.5.3. Nitratos (NO_3^-)

De acuerdo a la figura 21, los nitratos son el constituyente químico que presenta mayor variación temporal de concentración, rebasando el límite que establece la NOM – 127 – SSA1 – 1994 (44.3 mg/L). La estación que corresponde al inicio de la temporada de lluvias, es la temporada en la cual los nitratos presentan una mayor concentración. Dispersos en toda la zona de estudio, las concentraciones encontradas son del orden de

80 a 180 mg/L. Al final de la temporada de lluvias se observa una reducción significativa, sobre todo en norias y pozos someros, con concentraciones alrededor de 40 mg/L, donde el agua de lluvia es el principal factor de disminución en su concentración debido a la dilución que genera quedando por debajo del límite.

En la temporada seca, la concentración de nitratos que excede la NOM – 127 – SSA1 - 1994 solo se presenta en tres aprovechamientos (7, 10, 14); estos presentan concentraciones superiores, independientemente de la temporada en la que se encuentren, por lo que se demostraría que existe una mala construcción y/o mantenimiento de los pozos. Si se considera como posibles fuentes las actividades agrícolas y la disposición de residuos sobre y debajo de la superficie de la tierra, al estar estas fuentes de contaminación cercanas a los pozos y durante la infiltración del agua por las posibles averías en las paredes del pozo, es probable que los nitratos se incorporen al cuerpo de agua; además, debido a que el movimiento lateral del agua subterránea es lento, la infiltración de este ion provoca valores altos en su concentración solamente en los puntos cercanos a la fuente de contaminación, por lo que este ion no alcanza a extenderse hacia toda la zona, durante la temporada de sequía (Auge, 1997). Esto es solo una posibilidad, ya que visualmente no se encontró ninguna posible fuente, solo en el pozo 10, donde existe un corral cercano y el pozo está al descubierto.

Las concentraciones detectadas a inicios de la temporada de lluvias indican que los pozos se encuentran dentro o cercanos a una zona agrícola (riego o temporal), donde se emplean fertilizantes o abono orgánico para los cultivos. El agua de lluvia puede generar dos procesos: i) la infiltración del agua de lluvia arrastra a los nitratos presentes en el medio, o ii) el agua de lluvia al infiltrarse trae consigo un aporte de oxígeno atmosférico, generando condiciones oxidantes donde en presencia de nitrógeno orgánico o amonio, provenientes de los fertilizantes, se lleva a cabo el proceso de nitrificación (proceso que normalmente ocurre encima del nivel freático) originando los nitratos.

Se descartó la posibilidad de que la fuente de nitratos se deba a la descarga de aguas residuales, ya que éstas se localizan en la parte baja de la cabecera municipal de Villa de la Paz, al igual que el tiradero de desechos municipales representados con una cruz amarilla y verde respectivamente en la figura 21. Cabe mencionar que por falta de tiempo no se pudo identificar la localización del tiradero ni descarga de aguas residuales del municipio de Cedral, por lo que no se descarta que sea una fuente que puede influir en la presencia de nitratos.

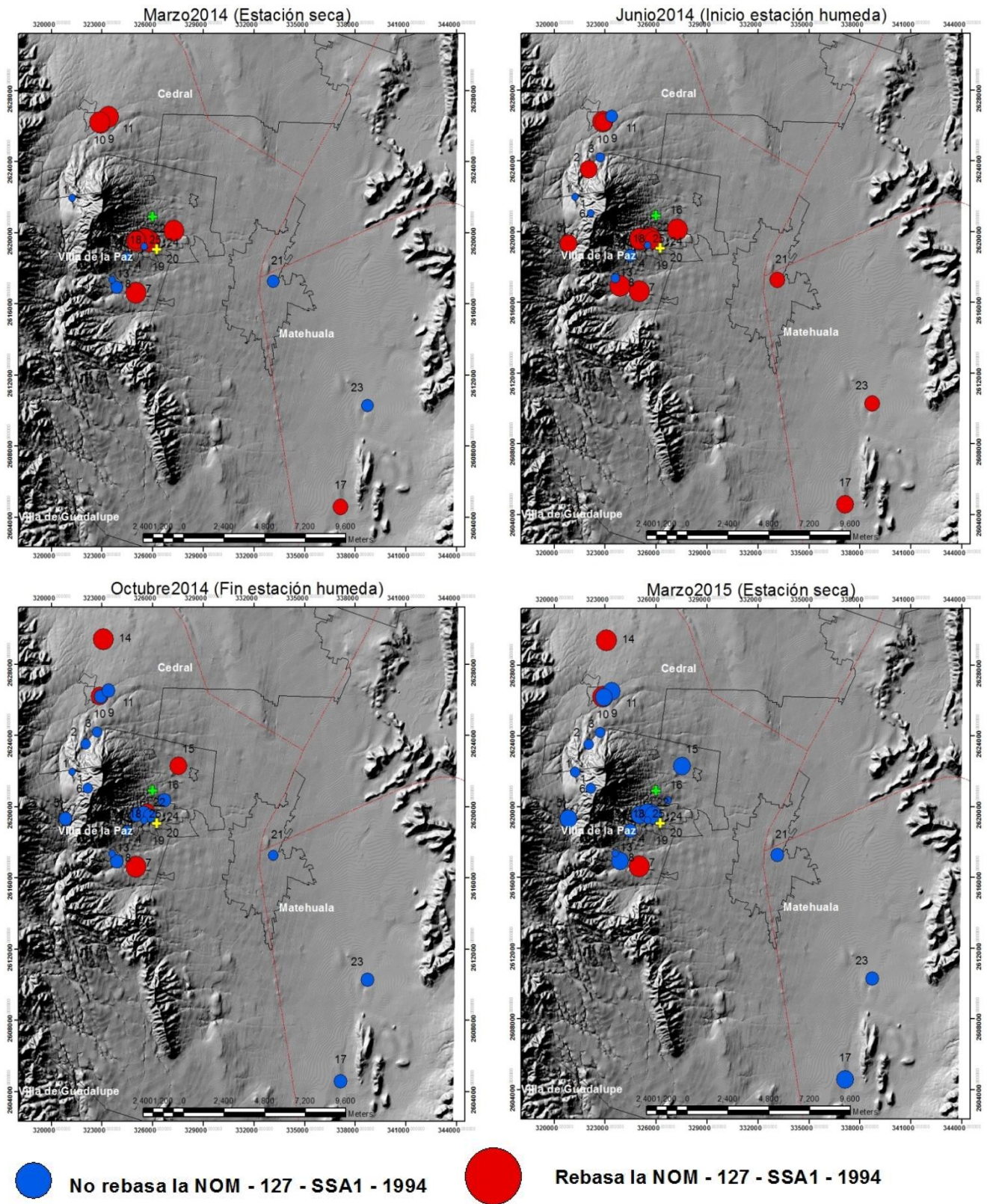


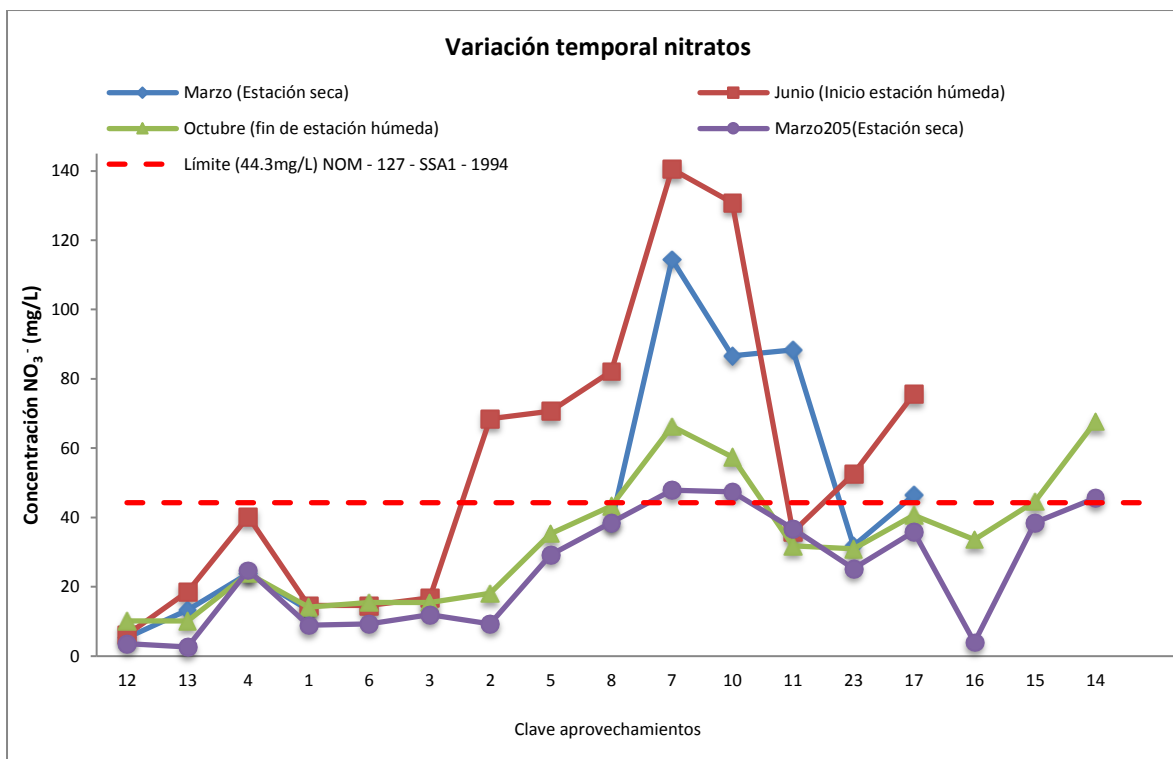
Figura 21. Variación espacial y temporal de nitratos. (Fuente: elaboración con datos propios)

Por otro lado, son seis los aprovechamientos que no presentaron concentraciones superiores a lo que establece la norma durante ninguna temporada muestreada, los dos aprovechamientos superficiales (4, 13), tres norias (1, 3, 6) y el tiro de la mina (12). Las norias se encuentran retiradas de las comunidades y en zonas de no muy fácil acceso para la población ni para los animales de ganado, por lo que la falta de influencia humana en esta zona hace que los nitratos se presenten en concentraciones bajas, del orden de 18 mg/L. Para el tiro de la mina, la profundidad es de 512 m y sus condiciones reductoras producen concentraciones promedio de 5 mg/L durante el año evaluado, mientras el resultado de las concentraciones en los aprovechamientos superficiales, se debe a que este ion tiende a moverse con el agua de infiltración hacia las aguas subterráneas por lo que generalmente el agua de escurrimiento superficial tiene concentraciones bajas de NO_3^- (Perdomo, et al, 2001)

En ocasiones la presencia de nitratos puede ser debido a causas naturales, derivadas de la descomposición de materiales nitrogenados orgánicos, como las proteínas de las plantas, por microorganismos, dando como resultado pequeñas concentraciones de este ion; además, también se puede encontrar en rocas ígneas que a través del proceso de meteorización proporcionan concentraciones mínimas al agua natural. Los minerales que contienen nitratos son muy raros, solamente los salitres (nitrato de sodio y nitrato de potasio) son los más difundidos (Pachecho & Cabrera, 2003), minerales que no se encuentran en la zona de estudio.

En la gráfica 7 se observa el comportamiento temporal de los nitratos, el cual para el inicio de la temporada de lluvias es mayor su concentración en comparación con los otros muestreos, lo que probablemente es debido a que los compuestos nitrogenados presentes en el suelo en condiciones oxidantes, generadas por la infiltración del agua de lluvia, se oxidan a nitratos aumentando considerablemente su concentración; esto ocurre en la mayoría de los aprovechamientos independientemente si está fuera o no de lo que establece la norma. En consecuencia el aumento y dispersión está ligado al régimen de precipitación, temporada que coincide con el acondicionamiento de tierras de cultivo.

El pozo 7 y el 10, son los aprovechamientos que presentan concentraciones más altas del orden de 120 a 140 mg/L, lo que genera que el agua de lluvia no alcance a diluir lo suficiente para disminuir la concentración durante la temporada de lluvias.



Gráfica 7. Variación temporal de nitratos.

7.5.4. Coliformes totales y coliformes fecales

Los coliformes totales y fecales son otro parámetro que está fuera de los límites de la NOM – 127 – SSA1 - 1994. De acuerdo a la figura 22, su presencia está durante todo el año de evaluación, que al igual que los nitratos, es un parámetro que tiene una gran variación en función de la temporada. La NOM – 127 – SSA1 - 1994 establece 0 NMP/100 mL para coliformes fecales y coliformes totales. Las concentraciones más altas con respecto a los otros muestreos se encontraron a inicios de la temporada de lluvias (junio2014), mientras que los valores más bajos se presentaron en la temporada seca (marzo2015). Debido a que los coliformes fecales suelen sobrevivir menos tiempo que los totales, se puede suponer que la contaminación es reciente si se encuentran en altas concentraciones como sucede a inicios de temporada de lluvias. Es importante mencionar que, independientemente de la concentración en la que se encuentran, la sola presencia de estos microorganismos en el agua es un indicador de contaminación al igual que de deficiencias de construcción de pozos (Perdomo, et al, 2001), y a mayor concentración mayor probabilidad de encontrar microorganismos patógenos y por tanto aumenta el

riesgo de sufrir infecciones por su consumo. El círculo en color rojo indica valores por encima del valor de la norma para coliformes totales, y el círculo de color naranja son valores por arriba de la norma para coliformes fecales.

Los coliformes totales son el conjunto de coliformes que pueden ser coliformes fecales (provenientes del tracto intestinal de animales), y de coliformes de origen natural del suelo y el agua. La presencia de coliformes son indicadores de deficiencias sanitarias de la fuente del agua, y una de las principales fuentes de contaminación de coliformes fecales es el estiércol animal, empleado generalmente para preparar el suelo para el cultivo, además hay que considerar que existen animales como vacas, borregos y chivas, los cuales rondan principalmente las norias en busca de agua para su consumo; estos son la principal fuente de la presencia de los coliformes en estas zonas.

Al igual que los nitratos, la infiltración del agua transporta las bacterias del suelo hasta el agua subterránea; Smith et al (1987) menciona que la supervivencia de los coliformes es más probable en aguas profundas, de lento movimiento, dando lugar a un mayor crecimiento de los microorganismos, como sucede con en el pozo 10, donde se presentan concentraciones más altas que el resto de los aprovechamientos.

A raíz de la evaluación de la calidad del agua, se distinguió que principalmente el pozo ubicado en el Blanco (Pozo 10), al presentar concentraciones que sobrepasan los límites de la NOM – 127 – SSA1 – 1994 independientemente de la estación de muestreo, la problemática es consecuencia de su mala construcción, lo que genera un foco de contaminación hacia el agua subterránea. Si se toma en cuenta que esta agua se distribuye tanto a la parte media como a la parte baja de la cabecera municipal, hay una dispersión de contaminación que se emplea para consumo humano.

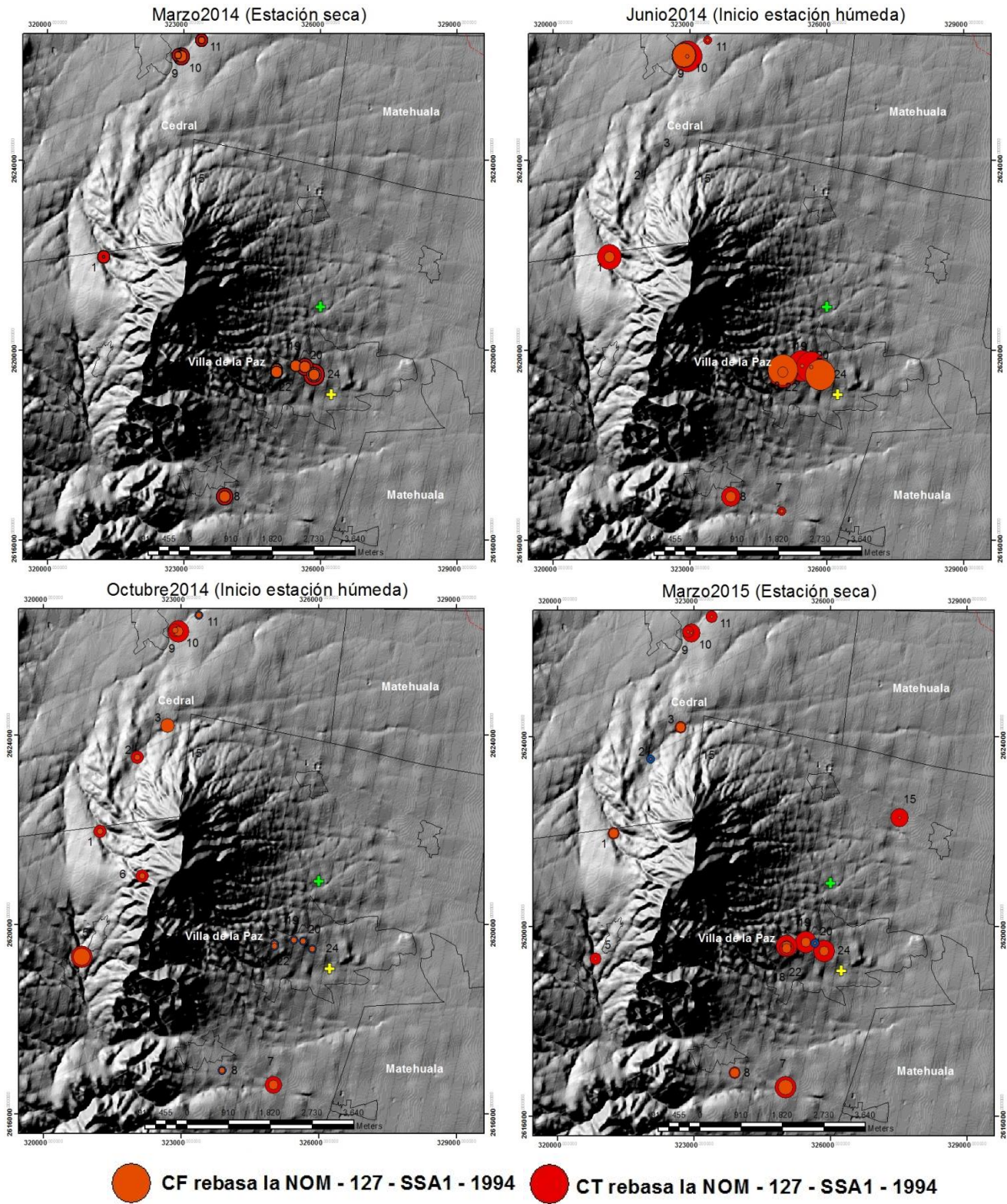


Figura 22. Variación espacial y temporal de coliformes totales y fecales. (Fuente: elaboración con datos propios)

7.6. Calidad del agua por el sistema de abastecimiento

A raíz de este resultado, también se hizo un análisis de la variación de la calidad del agua que pudiera sufrir a través del sistema de abastecimiento, para descartar aspectos relacionados con la tubería o falta de mantenimiento. Este análisis solo se hizo para la cabecera municipal. Para esto se trazaron los tres trayectos que toma el agua subterránea desde la fuente hasta el origen (aprovechamiento – casa habitación).

En la figura 23, se indican los tres recorridos que toma el agua subterránea de acuerdo al sistema de abastecimiento de la cabecera municipal de Villa de la Paz.

El primer recorrido indicado con la línea punteada roja, comienza en los pozos 10 y 11 de la comunidad del Blanco, después esta agua se mezcla en la primera pileta 9 localizada también en la comunidad del Blanco (a 20 metros del pozo 10 y aproximadamente 2 km del pozo 11), posteriormente se dirige a la pileta 19 (ubicada en la cabecera de Villa de la Paz); desde esta pileta el agua toma dos caminos, uno va directamente a las casas de la parte media de la cabecera municipal (20), y el segundo hacia la pileta 24, la cual suministra agua a la parte baja de la cabecera municipal (25).

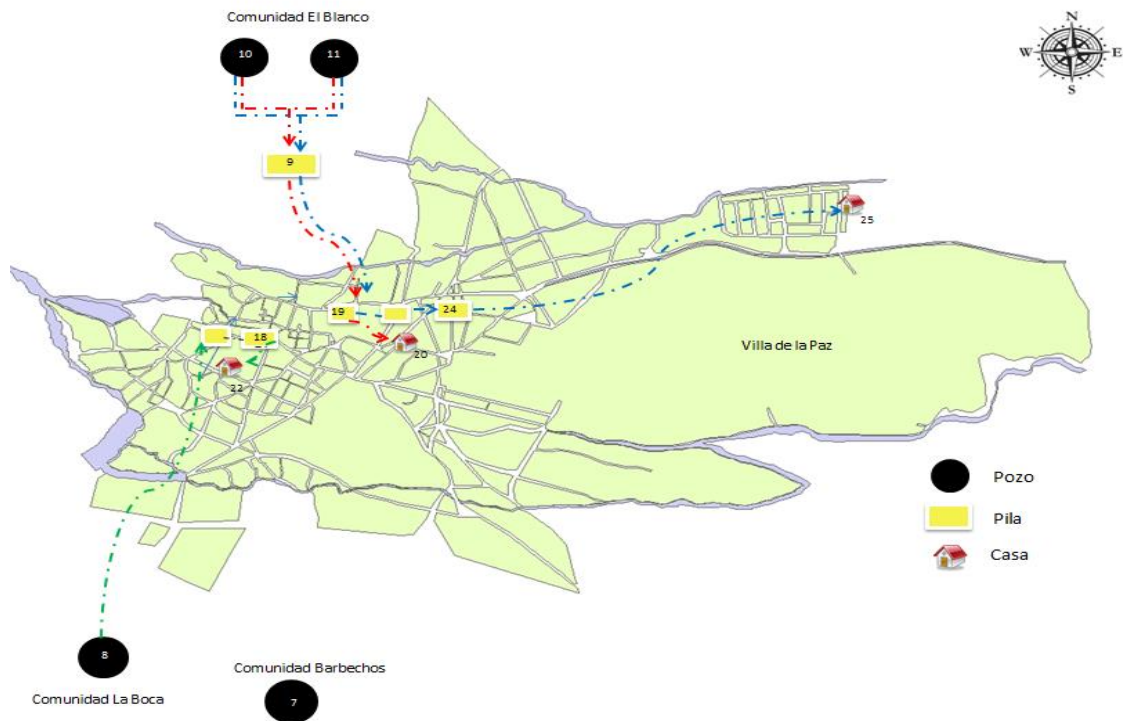
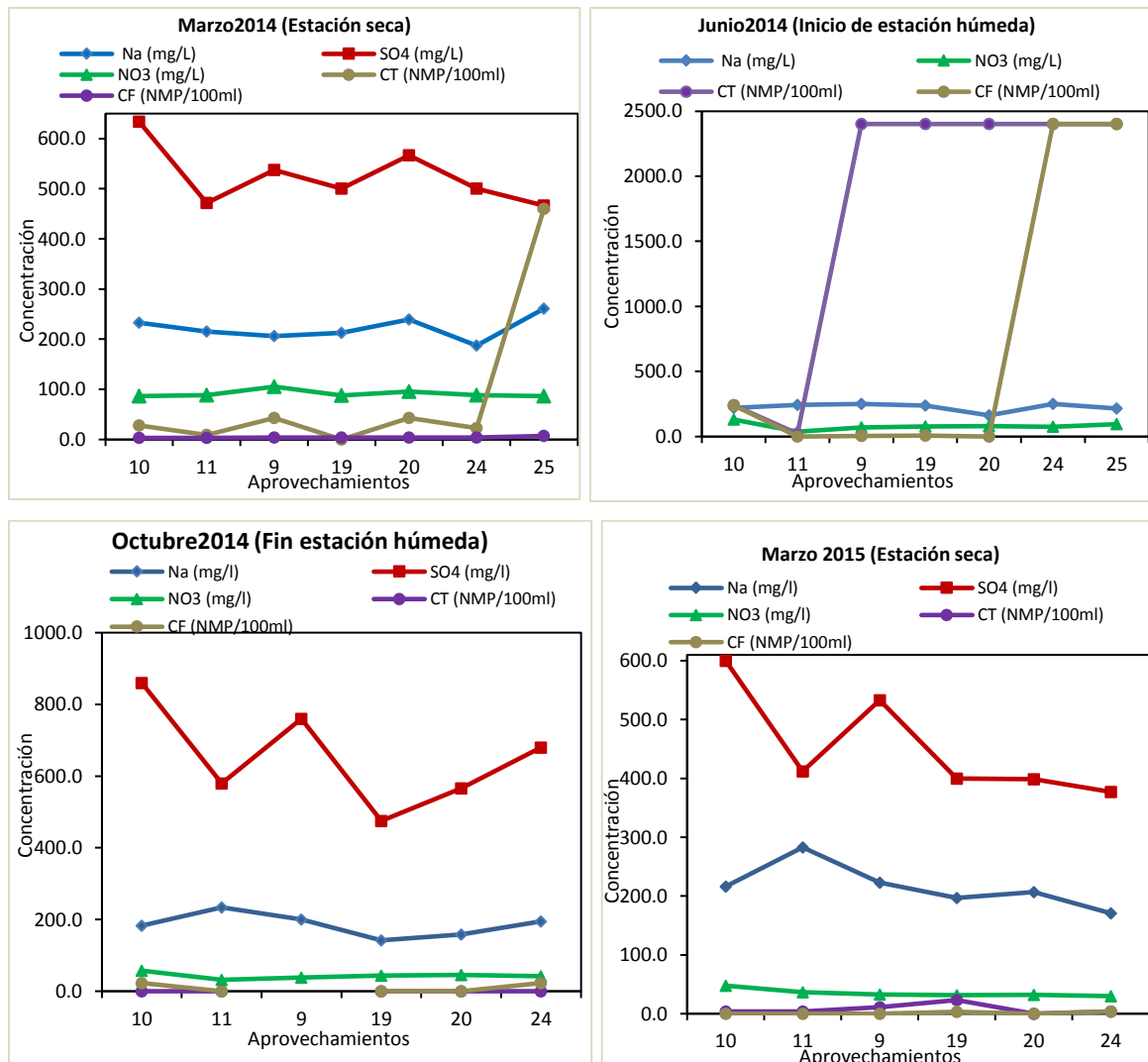


Figura 23. Representación gráfica, del sistema de abastecimiento de agua de la cabecera municipal Villa de la Paz. Trayectos de agua subterránea para consumo humano. (Fuente: elaboración con datos propios)

En las siguientes figuras (Gráfica 8), se representan las concentraciones de cada uno de los parámetros evaluados (sodio, sulfatos, nitratos, coliformes totales y fecales), en función del recorrido del agua (pozo – pileta – casa); las gráficas se representan por estación muestreada.



Gráfica 8. Trayecto agua subterránea (fuente – destino), Pozos del Blanco (10,11) hacia pileta 19 Y 24.

Los coliformes totales y fecales son los principales parámetros que sufren variación a lo largo del trayecto fuente – destino. En la estación seca, el aumento más significativo se observa después de la pileta 24; es decir, en la casa 25 que representa la parte baja de la cabecera municipal, muestra concentraciones altas a las provenientes de la fuente; sin embargo, la concentración en la casa (20) de la parte media de la cabecera municipal

también es más alta al de la pileta 19, donde posiblemente se cloró el agua, al presentar concentración inferior a la pileta del pozo del Blanco (9).

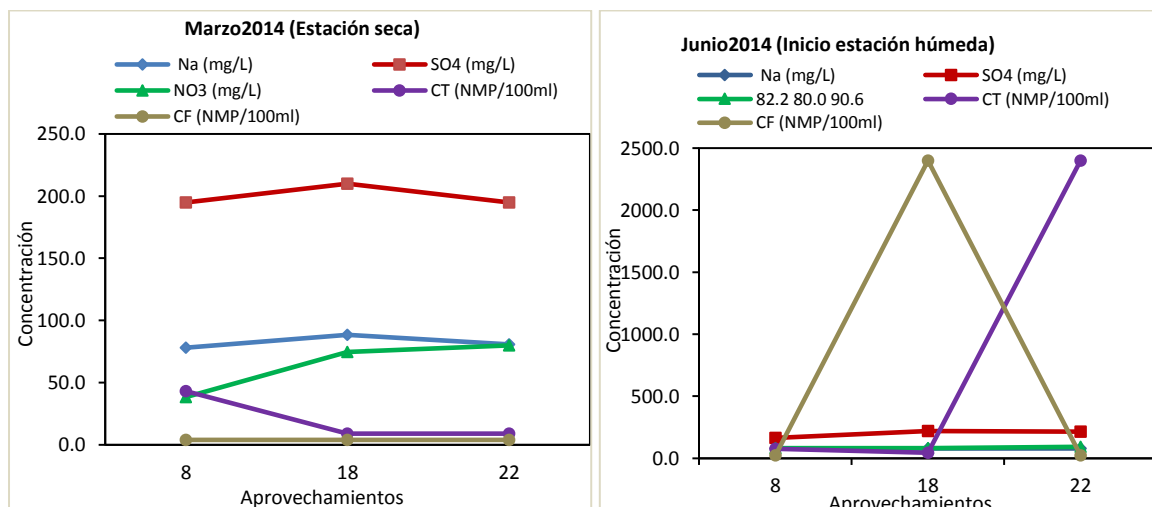
En el muestreo de junio, las concentraciones de coliformes totales aumentan en la pileta 9 donde se mezcla el agua proveniente de los pozos 10 y 11, su concentración es superior a la que presentan los pozos. Con respecto a los coliformes fecales, se presentan concentraciones superiores a los pozos (10 y 11) en la pileta 24 y la casa 20.

En el muestreo de octubre y marzo se presentan concentraciones de CF y CT superiores a la fuente en la pileta 24 y en la pileta 19, respectivamente.

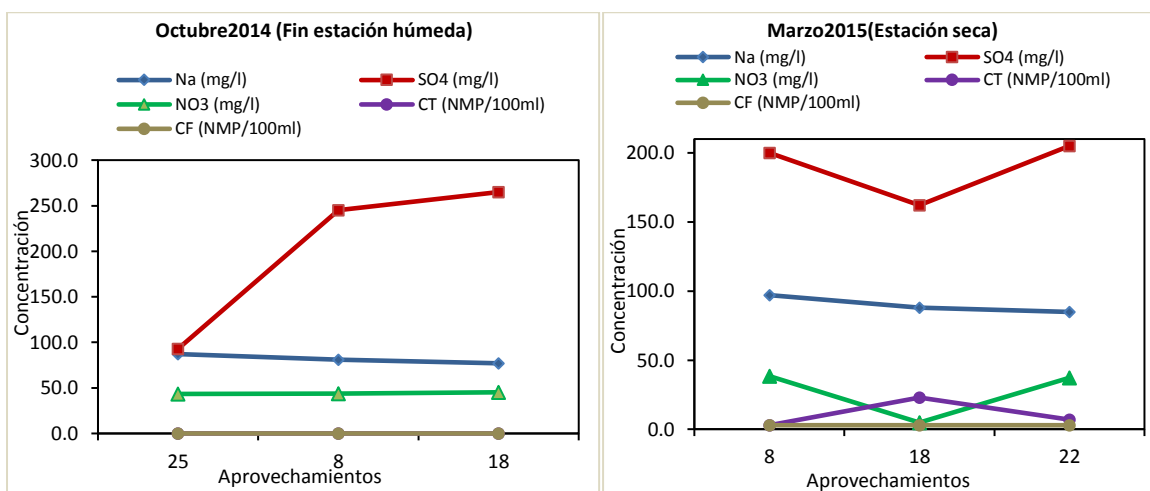
Sin lugar a dudas, el punto de aumento de contaminación, sobre todo de coliformes, se produce en las piletas, lo que indica la falta de mantenimiento y precaución para el almacenamiento del agua. De hecho, desde la fuente presenta mala calidad, pero en las piletas la calidad empeora, evidenciando que no existe un programa de limpieza del recipiente y/o de cloración antes de suministrar el agua.

Los resultados del recorrido que va de la comunidad de la Boca del pozo 7, el cual dirige el agua a la pileta 18, que suministra agua a la parte alta de la cabecera municipal, se muestran en la gráfica 8, y el trayecto que recorre el agua indicado con línea punteada verde en la figura 23.

De igual manera que en el anterior análisis, los coliformes totales y fecales son el parámetro que sufre una variación a lo largo del recorrido; sin embargo, en esta ocasión, los nitratos aumentan en la pileta 18 en la estación de marzo 2014 y 2015 (Gráfica 9).



Gráfica 9. Trayecto agua subterránea (fuente – destino), Pozo 8 hacia pileta 18.



Gráfica 10. Trayecto agua subterránea (fuente – destino), Pozo 8 hacia pileta 18. Continuación

Resumiendo, la calidad del agua de Villa de la Paz no es apta para consumo humano, independientemente de la temporada en la que se encuentre, ya que a pesar de la variación espacial y temporal, siempre hay al menos un parámetro que presenta concentraciones superiores al límite permisible de la NOM-127-SSA1-1994, ya sea en pozos o en norias. Aunque hay parámetros con concentraciones altas que se deben a factores naturales, son los factores antropogénicos los que disminuyen la calidad generando un verdadero riesgo para la salud de los habitantes.

La población expuesta ante la mala calidad del agua es aquella que consume agua directamente de la fuente, frecuentemente es la que se encuentra en zonas rurales, consecuentemente es la más expuesta a contraer enfermedades.

La población de Villa de la Paz consta de 5,350 habitantes distribuidos a lo largo del municipio, en sus 16 localidades incluyendo la cabecera municipal (INEGI, 2010). En la siguiente tabla 17 se indica la población por localidad.

Nombre de la localidad	Población total	Grado de marginación
Jaquis	11	Muy alto
Barbechos	61	Alto
El Carmen	69	Alto
El Jato	159	Alto
Laureles	121	Alto
Limonos	298	Alto
Villa de la Paz	3739	Bajo
La Boca	450	Bajo
Los Nazarios	247	Medio
San Antonio de las Trojes	181	Medio
San Antonio de Zaragoza	14	Bajo
TOTAL DE POBLACIÓN	5350	

Tabla 17. Distribución de la población de Villa de la Paz por localidades

El hecho de que las comunidades presenten un grado de marginación que va desde muy alto a bajo (Tabla 18), indica que la población tiene carencias por falta de oportunidades, servicios o bienes, con respecto al estilo de vida, educación, la residencia en viviendas inadecuadas y la percepción de ingresos económicos, lo que da lugar a que los habitantes de estas localidades sean las más afectadas al tener necesidades básicas que cubrir, no teniendo oportunidad de consumir agua embotellada. La población que vive en la cabecera municipal, comentaba, durante los muestreos, que están enterados de que el agua no es apta para consumo humano; sin embargo, no tienen conocimiento de cuál o cuáles son los parámetros de calidad del agua que superan el límite permisible. Desafortunadamente, los habitantes de las localidades señalan que de acuerdo con las condiciones semiáridas, no tienen fuentes adicionales, por lo que no tienen otra alternativa. De este modo, al menos el 30 % de la población total del municipio es la que está expuesta a los riesgos que genera el consumir agua de mala calidad. Siendo las localidades que se abastecen de norias (Limonos, El Jato, Los Laureles) las que son más vulnerables, representan el 10.8 % de la población total, población que consume agua directamente de las norias.

En el siguiente mapa (Figura 24) se muestra la densidad poblacional por localidades.

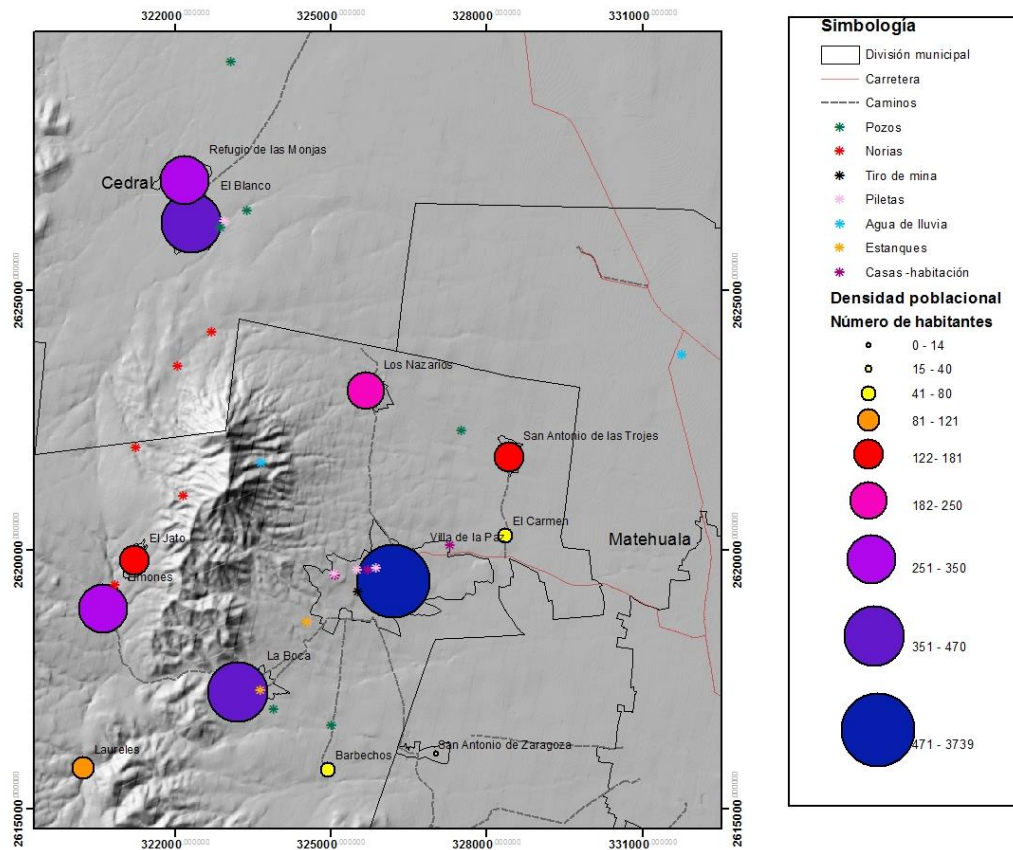


Figura 24. Distribución de la población de Villa de la Paz.

8. PROPUESTA DE TRATAMIENTO

8.1. Evaluación de riesgos por la mala calidad del agua

Si bien es cierto que la mayoría de los problemas de salud se relacionan por la presencia de microorganismos en el agua, es importante también considerar y evaluar los riesgos que presentan los constituyentes químicos, como es el caso de, sodio, sulfatos y nitratos. Con la finalidad de definir una propuesta de tratamiento, se analizaron los parámetros descritos en el apartado de calidad del agua, en función de la repercusión que puede tener en la salud de la población.

El análisis se realizó tomando en cuenta lo que establece la guía para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006).

Aspectos microbiológicos: Los mayores riesgos microbianos son los derivados del consumo de agua contaminada con excrementos humanos o animales, siendo los patógenos fecales los que más preocupan, al aumentar el riesgo de enfermedades intestinales y otras enfermedades infecciosas. El tratamiento más común para la destrucción de microorganismos patógenos es la desinfección del agua mediante la adición de productos químicos; el método más habitual es la desinfección por la adición del cloro (OMS, 2006). El objeto de la cloración es la destrucción de microorganismos gracias a la acción germicida del cloro y a su capacidad de oxidación de sustancias inorgánicas reducidas como el hierro, manganeso, sulfuros, etc., así como la destrucción de compuestos que producen olor y sabor, y la eliminación de algas (Pérez & Espigares, 1995).

La desinfección constituye una barrera eficaz para numerosos patógenos del agua, lo cual reduce el riesgo de enfermedades, si bien existen microorganismos que no se ven afectados, tales como el *Cryptosporidium* y algunos virus.

Las reacciones redox del cloro con las sustancias inorgánicas reductoras son muy rápidas, mientras que la oxidación de la materia orgánica suele ser más lenta, requiriendo varias horas para que se produzca la oxidación total de algunos compuestos.

La dosis de cloro además de estar en función de la calidad del agua, también depende del volumen a desinfectar, ya que se debe dejar una concentración adecuada de cloro libre residual para proteger el agua de la recontaminación entre el punto de cloración y el punto de consumo (OMS, 2006). Es conveniente mantener un nivel de cloro libre residual de 0.2 a 0.5 mg/L en el sistema de distribución para reducir el riesgo de una reactivación microbiana.

Durante la toma de muestras se midió la concentración de cloro residual (Tabla 18), en el muestreo de octubre, después de encontrar valores altos de coliformes durante la temporada de inicio de lluvias (junio). El cloro residual se midió en las piletas y en las casas que corresponden a los mismos puntos donde se tomaron las muestras de agua. Los valores de cloro residual están por debajo de lo ideal para la eliminación de contaminación de coliformes, lo que indica que no se realiza la adición mínima de cloro al agua previa a su distribución.

Cloro residual (mg/L)	
Pileta 1	0.0
Pileta 4	0.3
Casa 4	0.1
Pileta 6	0.1
Pileta 2	0.1
Casa 2	0.1

Tabla 18. Concentración de cloro residual en el sistema de abastecimiento de agua de Villa de la Paz

El sistema de abastecimiento en Villa de la Paz, facilita la cloración del agua previa a su suministro, ya que al utilizar piletas para su almacenamiento, se puede controlar la dosis necesaria de acuerdo al volumen colectado de agua, sin embargo se tiene que considerar ciertos factores para que el proceso de desinfección sea eficiente, tales como: el tiempo de contacto, concentración, temperatura, número de microorganismos y naturaleza del agua. De tal manera es necesario *capacitar y concientizar* a la población para que realicen la adición de cloro de manera correcta para que sea una medida de mejoramiento de la calidad del agua, y que por lo menos los coliformes ya no sean problema.

Asimismo es importante mantener las instalaciones del sistema de abastecimiento de agua limpias y exentas de basura o malezas, para evitar condiciones en las que se puedan desarrollar los microorganismos. La instalación de válvulas de purga para evitar y/o eliminar sedimentos provenientes en el agua es una medida para mantener limpias las piletas durante el llenado y almacenamiento de agua, ya que se puede establecer de manera periódica la apertura de estas válvulas para evitar la acumulación de sedimentos o basura.

Los constituyentes químicos: Puede haber numerosos productos químicos en el agua; sin embargo, sólo unos pocos suponen un peligro inmediato para la salud en cualquier circunstancia determinada. Por lo que la prioridad de corrección de la contaminación del agua de consumo se ha gestionado con respecto a la repercusión sobre la salud.

La presencia de sodio y sulfato al ser de origen natural, no ha requerido de establecer valores de referencia correlacionados al riesgo a la salud del consumidor, aunque, si pueden afectar la aceptabilidad del agua. Los valores de referencia para el sodio y el sulfato, corresponden a concentraciones con respecto al umbral degustativo, que pueden afectar el sabor del agua consumida. Para el sodio, el umbral degustativo se ha

determinado en 200 mg/L como máximo, mientras que para el sulfato, puede generar un sabor apreciable a concentraciones de 250 mg/L cuando se habla de sulfato de sodio y para el sulfato de calcio de 1000 mg/L, y en niveles altos puede provocar un efecto laxante en consumidores no habituados. Si bien estos compuestos no tienen afectación sobre la salud del consumidor, se recomienda, de ser posible, hacer mezclas de agua con menor concentración para su dilución.

Para el caso de los nitratos se han establecido valores de referencia de 50 mg/L, para México el valor establecido es de 44.3 mg/L. La presencia de nitratos en agua de consumo si afecta la salud, con una exposición de afectación a corto plazo. El principal riesgo para la salud es la enfermedad de la metahemoglobinemia, también llamada síndrome del recién nacido cianótico. El nitrato se reduce a nitrito en el estómago de los bebés y el nitrito puede oxidar la hemoglobina a metahemoglobina, la cual no puede transportar oxígeno por el organismo, esta enfermedad produce cianosis y en concentraciones más altas asfixia. El cuadro clínico de la cianosis se presenta cuando la metahemoglobina alcanza de un 20 % a un 30 % en el organismo, lo que provoca diarreas, taquicardia, cefalea, fatiga, lipotimias, náuseas, anorexia y vómitos; cuando esta cifra está entre el 55 % y el 60 % ocurre letargo y estupor; concentraciones mayores al 70% son mortales (Ortiz, 2008). El efecto agudo de la metahemoglobina se ve reflejado principalmente en infantes, ya que poseen un pH gástrico de menor acidez, generando las condiciones necesarias para la reducción del nitrato a nitrito, además de presentar un déficit de metahemoglobina – reductasa, la cual es la enzima que al detectar metahemoglobina se encarga de reducirla a hemoglobina. Este efecto sobre la salud se complica por la presencia de contaminación microbiana, que puede aumentar significativamente el riesgo de enfermedad (OMS, 2006). Además, la práctica de hervir el agua a cielo abierto multiplica 2.4 veces la concentración de nitratos aumentando el riesgo adicional a contraer la enfermedad (Ortiz, 2008). Regularmente el hervir el agua es una práctica generalizada en las comunidades rurales para mejorar su calidad y poder consumirla. Se han detectado casos de metahemoglobinemia en varios lugares. En el año 1980 se reportaron dos casos confirmados de metahemoblobinemia por ingestión de aguas de pozos con alto contenido de nitratos en la ciudad de Holguín, Cuba. De los dos casos, uno falleció. En los años posteriores se publicaron casos de niños afectados con metahemoglobinemia en Camagüey, Velazco, y en la Habana, Cuba (Ortiz, 2008). Los casos detectados rondan de uno a tres meses de edad y los menores de treinta días fueron los de mayor incidencia. En México se ha identificado tendencia a contraer

metahemoglobinemia relacionada con el consumo de agua con concentraciones altas de nitratos. Calleros et al. (2012), demostró que en una población de 346 niños que fueron estudiados presentaron una tendencia 1.54 veces mayor al aumento en los niveles de metahemoglobina; estudio realizado en 10 localidades del municipio de Ciudad Lerdo, Durango, zona agrícola que presenta altos contenidos de nitratos en agua que se emplea para consumo. Algunos estudios recientes han mostrado que los nitratos en el agua de consumo además de causar metahemoglobinemia pueden dar como resultado otras manifestaciones clínicas como, estomatitis recurrente y enfermedades recurrentes del tracto respiratorio.

Desde el punto de vista de la calidad del agua, se han desarrollado una variedad de tratamientos químicos, físicos y biológicos para la remoción de los nitratos del agua; la OMS indica que el uso de métodos como el intercambio iónico, métodos de membranas, y métodos biológicos, son los que han demostrado ser eficientes en la remoción de los nitratos (OMS, 2006). Sin embargo, hasta ahora es difícil definir el método indicado para la mitigación de nitratos, ya que la remoción de nitratos está relacionada a impactos ambientales.

8.2. Alternativas de tratamiento

Debido a que la presencia de nitratos representa un riesgo a la salud, la alternativa de tratamiento se basó en la mitigación de este parámetro.

Los nitratos son el contaminante más común en el agua subterránea y su incremento ha llegado a ser generalizado por las actividades agrícolas y por la disposición de aguas residuales sobre o debajo de la superficie de la tierra. El nitrato al ser la especie más estable del nitrógeno, se mueve junto con el agua subterránea con ninguna transformación y poco o ningún retraso, dificultando su remoción (Freeze & Cherry, 1979). Cuando el agua subterránea se encuentra muy cercana a la superficie, y la roca es muy permeable o esta fracturada comúnmente contiene O_2 disuelto, y es en estos ambientes hidrogeológicos cuando el nitrato migra grandes distancias (Price M. , 2003).

Las opciones de tratamiento de nitratos, se puede clasificar en dos categorías: la remoción de nitratos y la reducción de nitratos. La primera incluye intercambio iónico y osmosis inversa, y la segunda incluye la desnitrificación biológica.

8.2.1. Remoción de nitratos

8.2.1.1. Intercambio iónico (IX)

El intercambio iónico (IX) es el principal método usado para el tratamiento de nitratos, en sistemas a gran escala, principalmente en USA.

El efluente es conducido a través de un reactor donde el nitrato se remueve por el intercambio de otro anión (por ejemplo cloruro) presente en una resina de intercambio iónico. Posteriormente, la regeneración de la resina es necesaria cuando la capacidad de intercambio se agota, para lo cual se requiere de una solución para revertir el proceso, resultando en un residuo de salmuera o concentrado de nitratos que requiere de su disposición.

Debido a la fuerte afinidad de los iones sulfatos por las resinas genéricas de intercambio aniónico, se han desarrollado resinas selectivas con mayor afinidad hacia los nitratos. Los factores importantes que se deben de considerar en la selección de la resina son, la capacidad de intercambio, el coeficiente de selectividad y la velocidad de transferencia.

Por lo tanto, el factor clave para la eficiencia del IX reside en la selección de la resina, el pretratamiento y postratamiento, la regeneración y la disposición de residuos.

Otro punto a considerar es el manejo de la salmuera generada, por lo que existen opciones tales como: la descarga en tanques sépticos, camas secadoras para la reducción de volumen, pozos profundos de inyección, etc. Las características de la calidad del agua de la salmuera o concentrado puede afectar la factibilidad del método desde el punto de vista económico dado que la salmuera debe disponerse. No obstante, también, generan una preocupación ambiental por las cantidades de residuos (Seidel et al, 2011).

8.2.1.2. Osmosis inversa (OR)

En el proceso de ósmosis inversa (OR), el agua es inyectada a altas presiones sobre un conjunto de membranas semipermeables. Estas membranas son capaces de dejar pasar el agua de menor concentración que el agua de mayor concentración, creándose así una diferencia de potencial hidráulico entre estos dos líquidos. Aumentando convenientemente

la presión en el lado del agua con mayor concentración se puede hacer pasar el agua al compartimento diluido. La presión neta de trabajo es la que obliga al agua a atravesar la membrana (Rintelen, 2013).

La ósmosis inversa genera una corriente de agua tratada y una corriente de agua residual relativamente concentrada; el volumen de este residuo puede ser considerable, que va desde el 15 al 50 % del volumen inicial del agua a tratar. El concentrado o salmuera puede ser descargado en plantas de tratamiento de aguas residuales, o sistemas sépticos; al igual que en el intercambio iónico, se pueden utilizar camas de secado, pozos de inyección, y más comúnmente descarga cerca de superficies de agua salina.

Las presiones requeridas dependen de la concentración de nitratos a tratar (Seidel et al, 2011), por ejemplo, para agua con una conductividad de 1550 $\mu\text{g/L}$, la presión requerida es de 145 – 174 psi. La vida de las membranas, los prefiltros y la frecuencia del lavado de las membranas, dependen directamente de la calidad del agua de entrada, ya que cuando la concentración de sales excede el punto de saturación de la superficie de la membrana, puede disminuir la eficiencia de remoción. Otro aspecto a considerar, es que como la membrana no es selectiva para la remoción de nitratos, el agua tratada llega a ser desmineralizada.

Tanto el intercambio iónico como la osmosis inversa, se basan en remover el ion nitrato, generando un concentrado o salmuera; esta generación de residuos, limita su aplicación dado que su disposición implica altos costos, además de generar un impacto ambiental, ya que estos métodos disponen las soluciones generadas en pozos profundos de inyección, siendo una amenaza ambiental a largo plazo, sobre todo, para el agua subterránea (Seidel et al, 2011).

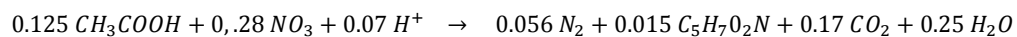
8.2.2. Reducción de nitratos

8.2.2.1. Desnitrificación biológica

La desnitrificación biológica es un proceso que ocurre en la naturaleza como parte del ciclo del nitrógeno; ciertas bacterias participan utilizando el nitrato como aceptor de electrones en su proceso de respiración en ausencia de oxígeno. Las bacterias pertenecen taxonómicamente a diversas subclases de Proteobacterias, debido a esta gran diversidad taxonómica, las bacterias desnitrificantes se pueden encontrar en todo

tipo de nicho, lo que garantiza la desnitrificación en la mayoría de los hábitats (Calderer, 2010).

La desnitrificación al tratamiento de agua potable utiliza bacterias desnitrificantes que reducen el nitrato a nitrógeno gaseoso en ausencia de oxígeno (condiciones anóxicas). Para que la desnitrificación se lleve a cabo, se requiere de un donador de electrones (materia orgánica como sustrato) para la reducción de nitrógeno a gas (Seidel et al, 2011). Por lo tanto, el tratamiento de la biorremediación *in situ* consiste en proveer donadores de electrones para asegurar la desnitrificación a partir de las bacterias presentes en el medio. La adición de la materia orgánica puede realizarse a través de pozos de inyección, donde las bacterias presentes de manera natural en el acuífero generan condiciones reductoras, y en presencia de un agente oxidante como el nitrato, se lleva a cabo el proceso de desnitrificación produciendo solo N₂ y CO₂, como lo muestra la siguiente reacción:



En contraste a las soluciones concentradas generadas por los procesos de remoción, la desnitrificación biológica limita la generación de residuos debido a la conversión de nitratos a nitrógeno gas.

Para maximizar su desarrollo se debe suministrar continuamente sustrato en la dosis adecuada, por lo que se debe de mantener un monitoreo de la calidad del agua obtenida. Este sistema es más sustentable porque su principio se basa en reducir el nitrato a nitrógeno gaseoso inocuo, en lugar de un concentrado que requerirá costos adicionales para la disposición de los residuos producidos.

La biorremediación *in situ* del agua subterránea es un método que se desarrolla más comúnmente en Europa que en Estados Unidos (Seidel et al, 2011). Sin embargo, una de las principales desventajas es la falta de estudios para comprobar su eficiencia de tratamiento para grandes volúmenes de agua.

No obstante, en Cataluña se desarrolla el proyecto “In-situ treatment technology for drinking water production from nitrate-polluted groundwater”, realizado en el Centre Tecnològic (CTM), el cual tiene como objetivo demostrar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la tecnología de tratamiento biológico para la remoción de nitratos *in situ* mediante una planta piloto.

La planta piloto consiste en la construcción de 2 pozos de inyección cercanos al pozo de extracción de agua para la inyección de materia orgánica, y formar la zona de reacción

para la reducción de nitratos, y 3 pozos de monitoreo para la vigilancia del proceso de desnitrificación. El diseño de la planta se llevó a cabo con ayuda del software COMSOL Multiphysics versión 4.4 donde se plasmó la caracterización hidrogeológica del acuífero y se modeló el flujo en el medio poroso. A partir de resultados experimentales, se modelizaron y evaluaron las reacciones de desnitrificación en el software de PHREEQC, para obtener las constantes cinéticas de las reacciones con ácido acético como materia orgánica, para posteriormente a través de la herramienta IST-Tool (basada en un modelo matemático) describir el comportamiento (hidrogeoquímica) del acuífero, y sobre todo las reacciones biológicas para la predicción del transporte de nitrato, nitrito, oxígeno disuelto y carbón orgánico, para prevenir la formación de obstrucciones a causa del crecimiento de la biomasa generada por las bacterias.

Los criterios clave considerados para la desnitrificación biológica son: el número de pozos de inyección y su ubicación, el tipo de materia orgánica empleada, y la dosis de esta materia orgánica (Calderer, 2010).

Cabe mencionar que la norma española UNE – EN 13194 (productos químicos utilizados para el tratamiento del agua destinada al consumo humano – ácido acético) establece al ácido acético como materia orgánica que bajo cierto control puede ser empleada como reductor para la desnitrificación de la potabilización del agua.

Durante la desnitrificación los nitratos son reducidos a nitritos y posteriormente a óxido nítrico, óxido nitroso y finalmente a nitrógeno gaseoso (Rodríguez, et al., 2014). Por lo tanto, un inconveniente, es que se lleve a cabo la desnitrificación parcial generando subproductos intermedios. Uno de los subproductos menos deseado es el N_2O , ya que es uno de los principales gases que contribuye en la disminución de la capa de ozono y se considera como un gas de efecto invernadero en el proceso del calentamiento global. Derivado de esto, la biorremediación *in situ* se vuelve un método de alto grado de monitoreo y de un control estricto, sobretodo en el volumen de inyección de materia orgánica con respecto a la tasa de desnitrificación requerida. La cuantificación del impacto ambiental que se pueda generar, en caso de existir productos intermedios, se realizó mediante un análisis de ciclo de vida.

El análisis de ciclo de vida es una metodología que "...trata los aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final,

reciclado, hasta su disposición final...”. Esta perspectiva, dónde se tratan todas las etapas del ciclo de vida del producto o proceso, es a menudo denominada como “de la cuna a la tumba”. Sin embargo, este análisis se hizo con la perspectiva desde la materia prima hasta la extracción del agua desnitrificada apta para consumo humano.

Una de las categorías sobre la que se evaluó el impacto ambiental es en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la cual es una medida de la contribución del proceso al calentamiento global.

Para la cuantificación de impacto se consideró un volumen de extracción de 216 m³ por día de agua desnitrificada, removiendo 0.063 kg/m³ lo que corresponde a 100% de desnitrificación, adicionando 0.058 kg/m³ de ácido acético.

Con estas condiciones se estaría reduciendo 12.61 kg de nitratos al día, produciendo 2.91 kg de biomasa y 12.83 kg de CO₂. Sin embargo, si se añade la etapa de la construcción de la planta, y la energía necesaria para su operación, el impacto ambiental generado sería de 0.53 kg CO₂ eq por cada m³ de agua desnitrificada apta para consumo humano; aquí se consideró la no formación de N₂O, por lo que este proceso de desnitrificación *in situ* generaría un impacto de 41,785.2 kg CO₂ eq en la desnitrificación de agua subterránea durante un año tratando 78,840 m³ de agua subterránea.

Un escenario alternativo simulado fue con la generación de N₂O, donde se obtuvo que la producción de 0.75 % de N₂O con respecto a la tasa de desnitrificación, el impacto aumentaría 26 % más con respecto al impacto generado por la no formación de N₂O, por lo que este tipo de proceso requiere un control riguroso para prevenir la formación la N₂O. Como manera de comparación, la capacidad de adsorción de CO₂ de un árbol grande y vigoroso promedio es de 93 kg CO₂ al año (Figuroa, 2007), por lo que se requerirían aproximadamente 449 árboles para que adsorber el CO₂ generado por la planta de desnitrificación *in situ*, considerando un volumen de desnitrificación de 216 m³ al día durante un año. Cabe mencionar, que la capacidad de fijación de CO₂ de los árboles depende de la especie, tamaño, edad, entre otros aspectos.

Una de las etapas de mayor generación de CO₂, correspondería a la energía empleada en la extracción del agua. El método de desnitrificación *in situ* no requiere energía para extraer el agua y desnitrificarla. Mientras que para los métodos de IX y OR forzosamente se tiene que extraer el agua para tratarla, es decir, estas emisiones de CO₂ corresponderían a la energía necesaria para extraer el agua subterránea y así tratarla por

OR o IX. Esto da lugar a que el impacto ambiental de los métodos convencionales (IX, OR) al ser *ex situ*, implique una mayor cantidad de emisiones de CO₂, sobre todo en OR, donde se requiere energía extra para generar la presión que impulsaría el paso del agua a través de la membrana.

Si se quisiera implementar uno de estos métodos en Villa de la Paz, se tendría que tomar en cuenta, ciertos puntos. En Villa de la Paz, se suministran alrededor de 269 m³ de agua extraída al día, pensando solo en el volumen de agua suministrada en la cabecera municipal.

Si se considera como ejemplo un caso de estudio donde se extraen 272 m³ (volumen de agua similar al de Villa de la Paz), y que utilizan el intercambio iónico para tratar en promedio 62 mg/L de nitratos, es necesario regenerar 30.24 L de resina por cada 3.8 m³ de agua tratada, con el 99.7% de eficiencia (Seidel et al, 2011). Si se compara con el volumen distribuido en la cabecera municipal de Villa de la Paz, se requerirían regenerar 2.1 m³ de resina al día para tratar 269 m³, esto considerando la concentración promedio del caso de estudio. El método de la disposición de residuos empleado, es almacenar la salmuera en un tanque subterráneo de 7.5 m³, y se está explorando la opción de construir un pozo profundo para inyectar solución concentrada producida.

Para la Osmosis inversa, una de sus desventajas es el porcentaje de eficiencia, además de la demanda energética requerida para suministrar la presión para el paso de la membrana. Si se considera tratar los 269 m³, con una eficiencia de 33 %, se estaría generando 88 m³ de residuo al día.

Para la desnitrificación biológica se generaría únicamente 3.62 kg de biomasa y 15.67 kg de CO₂ para desnitrificar 260 m³ al día, para lo que no se requeriría de energía adicional. Siendo así la desnitrificación biológica el método ambientalmente más viable para la remoción de nitratos, al no generar residuos durante la desnitrificación y no utilizar energía extra durante su proceso lo que implica menor aportación de CO₂ al ambiente.

Cabe mencionar que estas comparaciones fueron hechas de manera general, ya que para implementar cada método, se requerirían de estudios específicos en la zona.

Otro punto a considerar es el costo de operación para el tratamiento por remoción de nitratos. Al considerar solo un sistema de disminución de nitratos del agua, un factor decisivo para la adquisición de un sistema de tratamiento, es el capital, costo de operación así como mantenimiento, y la cantidad deseable de agua a tratar. Los costos de los tratamientos de nitratos están en función de varios factores; sin embargo, de manera comparativa, se consideraron los siguientes datos establecidos por Seidel, et al, (2011), a través de una evaluación del estado de las alternativas de tratamientos de nitratos en Estados Unidos.

En la tabla 19 se indican los costos de implementación, operación y mantenimiento de los métodos aceptados para el tratamiento de nitratos.

Método	Capital (\$/3.78 m3)	Operación y mantenimiento (\$/3.78 m3)	TOTAL ANUAL (\$/3.78m3)
Intercambio iónico	0.37 - 1.21	0.60 - 4.65	0.97 - 5.71
Osmosis inversa	3.51 - 5.17	1.46 - 16.16	5.73 - 19.70
Desnitrificación biológica	0.83	0.3	1.13

Tabla 19. Costos de los métodos para el tratamiento de nitratos del agua subterránea

El método de desnitrificación biológica *in situ*, es el que presenta menor costo por metro cubico tratado de agua subterránea. Si se consideran los 269 m³/día de agua que se suministra en la cabecera municipal de Villa de la Paz, al año se extraen 98,185 m³/año de agua subterránea, lo que requeriría de una inversión de \$29,351.6 al año. Este costo sería uno de los principales inconvenientes al momento de implementar un método de tratamiento de nitratos, debido al volumen de agua que se requiere tratar. Además, para la desnitrificación biológica, al ser un tratamiento *in situ*, se debe considerar características del acuífero, para su posible implementación.

Existen factores que deben valorarse para la implementación de esta técnica, tales como:

- La presencia de oxígeno en el acuífero determina las condiciones óxido – reducción del medio, lo que a su vez interviene en la movilidad de ciertos metales presentes, los cuales dependen de su estado de oxidación para su solubilidad, por lo que condiciones reductoras pueden provocar movilidad de metales, generando otro problema de calidad de agua.

- Si se tienen grandes cantidades de sulfatos en condiciones reductoras, estos pueden actuar como agentes oxidantes, y en presencia de materia orgánica reducirse a S_2^- , S, S_2O_3 , además de encontrar H_2S en el medio.
- Producción de metano, ya que muchos microorganismos anaeróbicos lo generan utilizando el CO_2 como aceptor final de electrones.
- Aunque la desnitrificación no es especialmente sensible al pH, valores de pH fuera del rango óptimo de 7 a 8 puede relacionarse con acumulación de productos intermediarios.
- Producción de biomasa en períodos largos, provocando la obstrucción de pozos.

A pesar de que la planta piloto en Cataluña ya se está operando, aún está en etapa de evaluación para determinar su viabilidad técnica a escalas mayores, sin embargo, la desnitrificación *in situ* es un método prometedor con respecto a los métodos convencionales, ya que debido a que la desventaja común de la aplicación de las tecnologías de remoción incluye el costo de manejo de residuos.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La calidad del agua de Villa de la Paz no es apta para consumo humano, identificando, las concentraciones totales de sodio, sulfatos, nitratos, coliformes totales y fecales, como los parámetros principales en la contribución de la mala calidad del agua a lo largo del año evaluado. No obstante, también existen otros elementos importantes como el arsénico, que se detectó en norias relativamente cercanas a la extracción de minerales ubicadas al norte del Cerro del Fraile.

Al inicio de la temporada de lluvias se encontraron concentraciones mayores en gran parte de los aprovechamientos, siendo la temporada seca donde estas concentraciones disminuyen notablemente. Los nitratos son el parámetro que presenta mayor variación con respecto a la temporada muestreada comparado con el resto de los parámetros (sodio, sulfatos, coliformes totales y fecales).

La calidad que presenta el agua se debe tanto a factores naturales como antropogénicos; las altas concentraciones de sodio y sulfatos corresponden a la aportación del medio geológico de la zona, mientras que los altos contenidos de nitratos y coliformes totales y fecales son causas antropogénicas. Las fuentes de contaminación detectadas corresponden al uso de fertilizantes en la agricultura así como el empleo y almacenamiento de estiércol animal como abono orgánico, además de la mala construcción de los pozos y la falta de mantenimiento del sistema de abastecimiento de agua del municipio. No obstante se requieren de estudios más específicos (isótopos) y más detallados, para definir la fuente exacta de su procedencia. Para el caso de Villa de la Paz, el desarrollo de la actividad minera en la región no constituye un riesgo para la calidad del agua subterránea utilizada para el abastecimiento de la población, al no observar la presencia de metales como el arsénico, plomo, zinc y cobre, los cuales han sido asociados a la contaminación ambiental (suelo y aire) de Villa de la Paz.

Prácticamente el peligro a la salud de los habitantes de Villa de la Paz con respecto a la calidad del agua, se puede corregir y prevenir, al ser aspectos antropogénicos los que la degradan, si bien, hay presencia de iones naturales (sodio y sulfato), estos no son prioridad al no representar riesgo tóxico a los habitantes.

La presencia de concentraciones de nitratos mayores al límite que establece la NOM – 127 – SSA1 - 1994 presenta mayor riesgo para la salud de los habitantes con respecto a los otros parámetros evaluados (sodio, sulfatos, coliformes totales y fecales). Para remediar esto, la desnitrificación biológica *in situ* se definió como la mejor alternativa para el tratamiento de agua conteniendo nitratos, debido a su nula formación de residuos y bajos costos comparado con los métodos convencionales (IX, OR). Sin embargo, para la implementación en la zona de Villa de la Paz, se requieren de estudios técnicos específicos para la construcción de la planta de tratamiento, no obstante, el costo de inversión es quizás la desventaja más importante ante cualquier alternativa de desnitrificación del agua.

Por lo tanto, para disminuir el riesgo que tienen los habitantes al consumir agua con altos contenidos de nitratos, se propone la reubicación de los pozos 7, 10, y 14 (estos presentan mayor concentración de nitratos de manera constante), a zonas alejadas de fuentes de contaminación, ya que si bien todos los pozos y norias del sistema de abastecimiento de Villa de la Paz presentan mala calidad, hay zonas dentro el acuífero administrativo Cedral – Matehuala que poseen agua apta para consumo humano sin necesidad de aplicar un tratamiento. Además, es importante, considerar la legislación para la construcción y mantenimiento de pozos, la cual establece los requisitos y elementos necesarios para evitar la entrada de contaminantes a través de las paredes del aprovechamiento (NOM – 003 – CNA – 1996 y NOM – 004 – CNA – 1996). Asimismo realizar programas de capacitación para el manejo y uso de fertilizantes químicos y orgánicos empleados para los cultivos de la región.

El comportamiento químico del agua subterránea (hidrogeoquímica e hidrogeología) permitió identificar las fuentes naturales y antropogénicas que condicionan la calidad del agua del municipio de Villa de la Paz.

La dirección preferencial del agua subterránea se definió de norte a sureste de Cedral a Matehuala, el cual corresponde a un sistema de flujo intermedio, constituyendo el principal flujo de agua que es captado por la mayoría de los aprovechamientos en el acuífero administrativo Cedral – Matehuala; los pozos profundos son los que generalmente lo componen presentando agua tipo cálcica – sulfatada, con variaciones a mixta – sulfatada y sódica – sulfatada. Se detectó la existencia de un segundo flujo (local) localizado en el municipio de Villa de la Paz, partiendo del oeste, desde el Cerro del Fraile, con dirección

hacia el norte y sureste de Villa de la Paz, generado por la presencia de agua con distinto comportamiento químico, presentando agua cálcica - bicarbonatada con variaciones a mixta – bicarbonatada y cálcica – mixta, captado en su mayoría por norias de baja profundidad localizadas en las cercanías del Cerro del Fraile. Además, de acuerdo con el tiempo de residencia relativo del agua subterránea se definió un tercer flujo, que corresponde al flujo regional el cual representa el agua más antigua de la región (512 m), identificado por el aprovechamiento que corresponde al tiro de agua empleado por la empresa NEMISA.

Las reacciones químicas principales que inciden en la evolución geoquímica del agua subterránea durante su recorrido son la disolución de yeso, la precipitación de calcita así como el intercambio iónico de sodio y calcio, la profundidad, el tiempo de residencia y el medio geológico; son aspectos que dan lugar a la generación de dichas reacciones. En relación al agua superficial, el proceso de evapotranspiración del agua de lluvia es el que define su composición.

La información que aporta el trabajo realizado, permitiría la ejecución de distintos programas informativos sobre la calidad del agua suministrada así como los riesgos a los que está expuesta la población al consumir dicha agua, además de programas para la mejora de la calidad del agua a través de capacitación para la cloración del agua. Así mismo se podría proponer la creación de programas sociales donde se hagan recomendaciones o propuestas para el bienestar de los habitantes con respecto a la calidad del agua, tales como la colecta de agua de lluvia que ayude a satisfacer sus necesidades básicas dado que ésta es el agua con mejor calidad para el consumo humano, realizar mezclas de agua para su dilución y así mejorar su calidad. También sería adecuado programas de agua segura en las localidades que se abastecen de las norias.

Asimismo se generó información suficiente, que se podría tomar como base para continuar con estudios en la región ya de manera más concreta, en áreas específicas tales como en el sector salud relacionado con el consumo del agua, en el área de gestión mejorando la organización y administración para la mejora de los aprovechamientos, en el área de evaluación ambiental evaluando directamente las fuentes de contaminación ya definidas y en el área de prevención y control para la implementación de propuestas de tratamiento.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Auge, M. (2006). Agua subterránea deterioro de calidad y reserva. *Universidad de Buenos Aires*. Buenos Aires, Argentina.
- Calderer, M. (abril de 2010). Study of denitrification and reductive dechlorination processes applied to groundwater bioremediation. *Tesis de doctorado*. Manresa, España.
- Calleros, R. E., Alarcón, H. M., Morán, M. J., Cueto, W. J., Morales, P. R., & Sanin, L. H. (2012). Caracterización de una zona contaminada por nitratos y su impacto en la salud humana. En SEMARNAT, *Género, ambiente y contaminación por sustancias químicas*. México, D.F.
- Cardona, B. A., Carrillo, R. J., & Castro, L. J. (2007). Combined use of indicators to evaluate waste - water contamination to local flow systems in semi-arid regions: San Luis Potosi, Mexico. En *Groundwater flow understanding from local to regional scale* (págs. 85 - 104).
- CNA. (Diciembre de 2013). Estudio geohidrológico y geofísico para la ubicación de las zonas de perforación de los pozos, en los municipios de Villa de Guadalupe y Matehuala, S.L.P. para la presa de almacenamiento La Maroma municipio de Catorce estado de San Luis Potosí. Comisión Nacional del Agua, San Luis Potosí.
- CONAGUA. (2011). *Estadísticas del agua en México*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. (2012). *Comisión Nacional del Agua*. Recuperado el 28 de MAYO de 2014, de <http://www.conagua.gob.mx/>
- Díaz, E., Duarte, O., & Ricciardi, C. (1998). *Tecnología de Tierras y Aguas I - Aguas Subterráneas*.
- Edmunds, W., & Smedley, P. (2000). Residence time indicators in groundwater: the East Midlands Triassic sandstone aquifer. *Pergamon, applied geochemistry*, 737 - 752.
- Fagundo, J. R., & González, P. (2005). *Hidrogeoquímica*. La Habana Cuba.
- Figueroa, M. E. (2007). *Los sumideros naturales de CO2: Una estrategia sostenible entre el cambio y el protocolo de Kyoto desde las perspectivas urbana y territorial*. Sevilla: Muñoz Moya Editores Extremeños.
- Freeze, A., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Prentice hall.
- González. (2009). Evolución espacio – temporal de la calidad del agua subterránea en el acuífero Cedral - Matehuala: alternativas de uso. *Tesis de maestría en Ciencias ambientales*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí.

- González. (2013). Análisis estructural de la sierra del Fraile y sistemas de mineralización del distrito minero La Paz, S.L.P. *Maestría en Ciencias en geología aplicada*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí.
- Gonzalez, D. J. (2006). Riesgo ecológico en la zona minera Villa de la Paz, San Luis Potosí. *Tesis de Maestría*. Univesidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí.
- González, F. (2012). *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación*. México.
- González, M. D. (2006). Riesgo ecológico en la zona minera Villa de la Paz, San Luis Potosí. *Maestría en Ciencias Ambientales*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí.
- Hernández, J. M. (Julio de 2008). Efecto de la evolución geoquímica en la calidad del agua subterránea en la porción central de la zona media del estado de San Luis Potosí. *Maestría en Ciencias Ambientales*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Villa de la Paz*.
- INEGI. (2012). *Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación*.
- Kehew, A. E. (2000). *Applied Chemical Hydrology*. New Jersey: Prentice Hall.
- Lloyd, J., & Heathcote, J. (1985). *Natural inorganic hydrochemistry in relation to groudwater*. Estados Unidos: Oxford.
- Luque, J., Pardo, E., & Chica, M. (2005). *Análisis de ciclicidades de series hidrogeológicas en el estudio de los procesos de recarga*. España.
- Martínez, D., Bocanegra, E., & Manzano, M. (2000). La modelaciión hidrogeoquímica como herramienta en estudios hidrogeológicos. *Boletín geológico y minero*, 83 - 97.
- Martinez, P. (2006). *Fundamentos de hidrogeología*. España: Mundi - Prensa.
- Nuñez, H. E. (2007). Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en el acuífero Cedral - Matehuala, San Luis Potosí. *Maestría en Ciencias Ambientales*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí.
- OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable, vol 1; Recomendaciones. Organización Mundial de la Salud. Versión electrónica para la Web.
- Ortiz, L. L. (2008). *Metahemoglobinemia en lactantes por ingestión de agua subterránea*. Camagüey, Cuba.
- Ortiz, L. L. (2008). *Metahemoglobinemia en niños: situación actual*.

- Pacheco, Á. J., & Cabrera, S. A. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Ingeniería*, 47 - 54.
- Perdomo, C., Casanova, O., & Ciganda, V. (2001). Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay. *Agrociencia*, 10 - 22.
- Pérez. (2006). Determinación de parámetros hidráulicos mediante métodos analíticos y numéricos en el acuífero Cedral - Matehuala, S.L.P. *Tesis de licenciatura*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Pérez, J. V. (Agosto de 2008). Caracterización Hidrogeoquímica del Agua Subterránea del Valle de Querétaro para el Estudio de Sistemas de Flujo. *Tesis Maestría e Ciencias Ambientales*. Santiago de Querétaro, Querétaro, México.
- Pérez, L. J., & Espigares, G. M. (1995). Desinfección del agua. Cloración. *Estudio sanitario del agua*. Universidad de Granada.
- Price, M. (2003). *Agua Subterránea*. México: Limusa.
- Razo, S. I. (2002). Evaluación de la contaminación de metales y del riesgo en salud en un sitio minero de sulfuros polimetálicos: caso de Villa de la Paz - Matehuala, S.L.P. (México). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí.
- Rintelen, F. Y. (marzo de 2013). Análisis del Ciclo de Vida de los tratamientos terciarios de la EDAR de El Prat para la reutilización del agua. *Tesis de maestría*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Rodarte, L. (2005). *Hidrología Subterránea*. México: IMTA.
- Rodríguez, A., Aymerich, I., Marques, R., Poch, M., & Pijuan, M. (Diciembre de 2014). Minimizing N2O emissions and carbon footprint on a full-scale activated sludge sequencing batch reactor. *Elsevier, Water research*, 1 - 10.
- Rodríguez, R., Fabregat, S., & Candela, L. (2000). La contaminación de las aguas subterráneas por residuos mineros. Ejemplo del aluvial del río Moa, Holguín (Cuba). *1ro Joint world congress on groundwater*. Fortaleza - Ceará Brasil.
- Santillana, M. C. (2009). Caracterización del polvo como medio en la ruta de exposición en la zona, minero - metalúrgica de Matehuala - Villa de la Paz, SLP. *Tesis de maestría en Ciencias Ambientales*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí.
- Seidel, C., Gorman, C., Darby, J., & Jensen, V. (2011). *An assessment of the State of Nitrate Treatment Alternatives*. The America Water Work Association (AWWA).

- Subdirección de informática y estadística. (2009 - 2015). *Villa de la Paz*. San Luis Potosí:
Coordinación estatal para el fortalecimiento institucional de los municipios.
- Vásquez, M. T., Alfaro, S. R., Sibaja, B. J., Esquivel, H. G., & Valdés, G. J. (2012). Composición
química del agua de lluvia y de niebla recolectada en la reserva biológica de Monteverde.
Universidad Nacional, Hereia, Costa Rica. Costa Rica.
- World Health Organization. (s.f.). *Guías para la calidad del agua potable, Número 481, Volumen 3*.

11. ANEXOS

ANEXO I. Formato de ficha de campo para muestras de agua

DATOS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

DATOS GENERALES

Clave del Aprovechamiento					Tipo de Aprovechamiento	Pozo	Noría	Manantial	Canal
Coordenadas UTM Datum WGS84	X=	Y=				Estanque	Arroyo	Presa	Papalote
Elevación (msnm)			Zona UTM		Uso del Agua	Potable	Agrícola	Pecuario	Doméstico
Municipio						Agropecuario	Servicios	Industrial	Sin uso
Localidad					Tipo de Bomba	Turbina Vertical	Sumergible	Centrífuga	
Fecha						Eléctrica	Combustión Interna	Sin equipo	
Litología Predominante					CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS				
Prof. al Nivel del agua	NE	m	ND	m	Color		Olor		
Lugar de Toma de Muestra	Llave en Brocal	Descarga	Canal	Estanque/Lago/Manantial	Apariencia		Sedimentación		
					Turbidez		Desprendimiento de gases		
					Profundidad (m)		Caudal de extracción (l/s)		

PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

Tiempo (min.)	1	3	5	7	9	11
T (°C)						
pH						
E campo (mV)						
CE (microSiem/cm)						
O.D. (%)						
O.D. (mg/l)						

DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD DE CAMPO

N ácido: 1.6 ± 0.008

V muestra (Alcal.): 25 ml

Gráfica Calculo de Alcalinidad

H₂SO₄									
NÚMERO DE vueltas									
pH									
ml (#v÷800)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

No. Consecutivo
 VP-16-AS
 Id. del proyecto → Matz

NOMENCLATURA MATRIZ
 AS: Agua subterránea.
 AP: Agua superficial.
 AD: Agua destilada

NA = No Aplica en este apartado
 # v = Número de vueltas

Alcalinidad total= mg/l CaCO₃

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA COLECTADA

MUESTRA PARA	TIPO DE ENVASE	CANTIDAD	CAPACIDAD	CONSERVADOR	FILTRADA?
CATIONES Y METALES	POLIETILENO	1	125 ML	REFRIGERACIÓN, HNO ₃	SÍ
NITRATOS	POLIETILENO	1	125 ML	REFRIGERACIÓN, H ₂ SO ₄	NO
ANIONES	POLIETILENO	1	500 ML	REFRIGERACIÓN	NO

OBSERVACIONES

ANEXO II. Formato para el nivel piezométrico

FORMATO PARA NIVELES DE POZO

ESTADO	_____	CLAVE DE IDENTIFICACIÓN	_____
MUNICIPIO	_____		
LOCALIDAD	_____		
PROPIETARIO	_____		
TIPO DE APROVECHAMIENTO	OPERACIÓN		
Noria ()	Pozo ()	Activo ()	Inactivo ()
COORDENADAS GEOGRÁFICAS (WGS84)			
X	_____	Y	_____ Z _____
ALTUR BROCAL:	_____	CM	
PIEZOMETRIA	CAUDAL DE OPERACIÓN		_____ l.p.s
HISTORIA:	Nivel Inicial	_____	Fecha _____
TIPO DE MOTOR	Eléctrico ()	Combustión Interna ()	Aire () Tracción Animal ()
TIPO DE BOMBA:	Pozo Profundo Lubricado con Agua ()	Pozo Profundo Lubricado con Aceite ()	
	Sumergible ()	Centrífuga ()	Pistón (Guimbalete) ()
LONGITUD COLUMNA SUCCIÓN	_____	m	PROFUNDIDAD TOTAL DE LA OBRA (m)
DIÁMETRO COL. SUCCIÓN	_____	in	DIÁMETRO DE DESCARGA _____ in
POTENCIA DEL MOTOR	_____	H.P	A _____ R.P.M
TIPO DE DESCARGA:	Libre ()	Tanque Elevado ()	A la Red () Mixta (Red y Tanque)
OBSERVACIONES:	_____		

FECHA MEDICIÓN (Año/mes/día)	_____	VERIFICÓ (NOMBRE)	_____

Croquis:

ANEXO III. Porcentaje de error, balance de electroneutralidad.

Porcentaje de error, muestras de marzo2014 (Estación seca)

UTM_Z14_X	UTM_Z14_Y	Clave Muestreo	Clave Tesis	Na(meq/l)	K(meq/l)	Ca(meq/l)	Mg(meq/l)	Sr(meq/l)	N-NO3 (meq/L)	HCO ₃ (meq/L)	Cl (meq/l)	SO ₄ (meq/l)	F (meq/l)	Σcat	Σanion	Σcat+Σanion	Σcat-Σanion	%Error
321234.000	2621964.000	VP-AS-C8	1	1.27	0.07	2.87	0.72	0.05	-0.05	-3.36	-0.28	-1.46	-0.02	4.98	-5.17	-0.19	10.15	-1.83
324503.000	2618650.000	VP-AP-C18	4	2.96	0.22	10.18	1.06	0.08	-0.09	-1.38	-1.89	-9.38	-0.07	14.50	-12.80	1.70	27.29	6.24
325012.000	2616617.000	VP-AS-C3	7	3.42	0.06	5.59	0.80	0.07	-0.42	-4.00	-0.76	-4.17	-0.03	9.94	-9.37	0.57	19.31	2.97
323888.000	2616916.000	VP-AS-C2	8	3.39	0.09	5.27	1.84	0.10	-0.14	-4.93	-0.78	-4.06	-0.03	10.69	-9.94	0.75	20.64	3.61
322938.000	2626190.000	VP-AS-C5	9	8.96	0.12	6.79	2.80	0.20	-0.38	-3.81	-1.96	-11.20	-0.03	18.87	-17.38	1.49	36.25	4.10
322870.000	2626214.000	VP-AS-C4	10	10.16	0.14	9.38	3.60	0.23	-0.32	-3.74	-5.60	-13.19	-0.04	23.52	-22.89	0.63	46.42	1.35
323383.000	2626533.000	VP-AS-C7	11	9.35	0.11	4.63	2.64	0.18	-0.32	-3.94	-2.31	-9.82	-0.05	16.91	-16.44	0.46	33.35	1.39
325487.000	2619226.000	VP-AS-C6	12	18.51	0.59	31.94	8.00	0.36	-0.02	-4.86	-13.72	-41.67	-0.19	59.40	-60.46	-1.06	119.86	-0.88
323605.000	2617339.000	VP-AP-C1	13	0.74	0.10	2.16	0.48	0.02	-0.05	-2.24	-0.42	-0.56	-0.11	3.50	-3.38	0.12	6.88	1.77
337138.000	2604569.000	M-AS-C17	17	3.91	0.48	30.74	4.80	0.36	-0.17	-3.84	-1.54	-32.29	-0.11	40.29	-37.95	2.35	78.24	3.00
325032.000	2619584.000	VP-AS-C10	18	3.85	0.09	5.27	1.12	0.10	-0.27	-4.70	-0.59	-4.38	-0.03	10.42	-9.96	0.46	20.39	2.23
325459.000	2619667.000	VP-AS-C9	19	9.26	0.11	5.03	2.72	0.18	-0.32	-3.39	-2.31	-10.42	-0.04	17.30	-16.48	0.82	33.78	2.43
325658.000	2619653.000	VP-AP4-C13	20	10.40	0.12	6.59	3.20	0.19	-0.35	-3.81	-5.18	-11.80	-0.03	20.50	-21.17	-0.67	41.67	-1.61
333143.000	2617263.000	M-AS-C15	21	4.08	0.23	31.54	2.00	0.38	-0.14	-4.13	-1.15	-33.85	-0.11	38.24	-39.38	-1.14	77.62	-1.47
325037.000	2619544.000	VP-AP2-C12	22	3.51	0.08	5.59	1.28	0.10	-0.29	-4.70	-0.62	-4.06	-0.03	10.56	-9.70	0.86	20.27	4.27
338725.000	2610273.000	M-AS-C16	23	1.65	0.44	31.54	1.60	0.35	-0.12	-3.68	-0.92	-28.75	-0.09	35.57	-33.56	2.01	69.14	2.91
325854.000	2619488.000	VP-AS-C11	24	8.13	0.12	6.39	3.60	0.20	-0.32	-3.46	-5.53	-10.42	-0.04	18.43	-19.77	-1.34	38.20	-3.50
327284.000	2619926.000	VP-AP6-C14	25	11.36	0.12	6.59	2.80	0.19	-0.31	-5.28	-5.53	-9.72	-0.04	21.05	-20.88	0.17	41.93	0.40

Porcentaje de error, muestras de junio2014 (Inicio de estación húmeda)

UTM_Z14_X	UTM_Z14_Y	Clave Muestreo	Clave Tesis	Na(meq/l)	K(meq/l)	Ca(meq/l)	Mg(meq/l)	Sr(meq/l)	N-NO3 (meq/L)	HCO ₃ (meq/L)	Cl (meq/l)	SO ₄ (meq/l)	F (meq/l)	Σcat	Σanion	Σcat+Σanion	Σcat-Σanion	%Error
321234.000	2621964.000	VP - AS - C21	1	1.04	0.09	4.41	0.22	0.02	-0.05	-4.54	-0.51	-1.25	-0.03	5.78	-6.38	-0.60	12.16	-4.97
322044.000	2623531.000	VP - AS - C20	2	0.13	0.08	4.12	0.07	0.01	-0.25	-2.56	-0.14	-1.48	-0.02	4.42	-4.45	-0.03	8.87	-0.37
322711.000	2624199.000	VP - AS - C19	3	1.57	0.06	4.23	0.99	0.03	-0.06	-3.40	-0.65	-3.23	-0.05	6.87	-7.39	-0.52	14.27	-3.65
324503.000	2618650.000	VP - AP - C32	4	3.09	0.24	10.26	1.01	0.04	-0.15	-0.64	-2.83	-11.72	-0.05	14.65	-15.39	-0.74	30.04	-2.47
320840.000	2619320.000	VP - AS - C28	5	0.70	0.04	3.55	0.39	0.01	-0.26	-3.01	-0.97	-0.60	-0.02	4.69	-4.86	-0.17	9.55	-1.81
322154.000	2621027.000	VP - AS - C29	6	1.35	0.07	7.01	2.26	0.02	-0.05	-4.00	-0.28	-5.47	-0.03	10.71	-9.83	0.87	20.54	4.25
325012.000	2616617.000	VP - AS - C31	7	2.87	0.06	6.30	0.85	0.04	-0.51	-4.80	-1.35	-3.13	-0.02	10.11	-9.80	0.31	19.91	1.57
323888.000	2616916.000	VP - AS - C27	8	3.39	0.07	4.38	1.18	0.05	-0.30	-4.74	-0.97	-3.39	-0.02	9.08	-9.41	-0.33	18.50	-1.80
322938.000	2626190.000	VP - AS - C24	9	10.83	0.09	5.51	2.53	0.12	-0.25	-4.86	-4.18	-9.58	-0.03	19.08	-18.90	0.18	37.98	0.47
322870.000	2626214.000	VP - AS - C22	10	9.57	0.12	10.84	3.33	0.15	-0.48	-3.80	-4.64	-13.33	-0.04	24.00	-22.29	1.71	46.29	3.70
323383.000	2626533.000	VP - AS - C23	11	10.57	0.09	4.60	2.44	0.11	-0.13	-2.82	-4.64	-8.75	-0.04	17.81	-16.38	1.44	34.19	4.21
325487.000	2619226.000	VP - AS - C25	12	16.09	0.66	27.43	8.44	0.23	-0.02	-4.03	-11.14	-39.58	-0.19	52.85	-54.96	-2.11	107.82	-1.96
323605.000	2617339.000	VP - AP - C26	13	0.43	0.09	1.76	0.26	0.00	-0.07	-1.66	-0.42	-0.29	0.00	2.55	-2.44	0.11	4.99	2.14
337138.000	2604569.000	VP - AS - C41	17	3.52	0.46	32.93	3.19	0.19	-0.28	-4.50	-2.09	-30.42	-0.08	40.30	-37.36	2.93	77.66	3.78
325032.000	2619584.000	VP - AS - C34	18	3.44	0.07	4.50	1.18	0.05	-0.29	-3.46	-1.02	-4.58	-0.02	9.23	-9.38	-0.14	18.61	-0.76
325459.000	2619667.000	VP - AS - C33	19	10.35	0.09	6.34	2.49	0.11	-0.28	-3.50	-3.94	-10.63	-0.04	19.38	-18.38	1.00	37.77	2.65
325658.000	2619653.000	VP - AP4 - C36	20	7.00	0.08	5.30	1.84	0.08	-0.29	-4.00	-2.37	-6.77	-0.02	14.31	-13.46	0.85	27.76	3.07
333143.000	2617263.000	VP - AS - C39	21	6.61	0.25	28.94	1.00	0.23	-0.20	-4.48	-2.20	-31.25	-0.10	37.03	-38.24	-1.21	75.27	-1.61
325037.000	2619544.000	VP - AP2 - C35	22	3.39	0.07	5.06	1.01	0.05	-0.33	-4.80	-0.97	-4.48	-0.02	9.58	-10.61	-1.02	20.19	-5.07
338725.000	2610273.000	VP - AS - C40	23	2.52	0.44	35.13	2.20	0.19	-0.19	-5.00	-1.62	-30.83	-0.08	40.48	-37.73	2.75	78.21	3.51
325854.000	2619488.000	VP - AS - C37	24	10.92	0.10	6.21	2.63	0.12	-0.27	-3.60	-3.81	-10.16	-0.04	19.98	-17.87	2.11	37.85	5.57
327251.000	2620127.000	VP - AP6 - C38	25	9.31	0.09	6.21	2.35	0.10	-0.34	-3.80	-3.48	-9.38	-0.03	18.06	-17.03	1.03	35.09	2.94

ANEXO III. Porcentaje de error, balance de electroneutralidad. Continuación

Porcentaje de error, muestras de octubre2014 (Fin de estación húmeda)

UTM_Z14_X	UTM_Z14_Y	Clave Muestreo	Clave Tesis	Na(meq/l)	K(meq/l)	Ca(meq/l)	Mg(meq/l)	sr(meq/l)	N-NO3 (meq/L)	HCO ₃ (meq/l)	Cl (meq/l)	SO ₄ (meq/l)	F (meq/l)	Σcat	Σanion	Σcat+Σanion	Σcat-Σanion	%Error
321234.000	2621964.000	VP-AS-C42	1	1.13	0.04	3.77	0.38	0.00	-0.05	-3.87	-0.39	-1.42	-0.11	5.32	-5.84	-0.52	11.16	-4.68
322044.000	2623531.000	VP-AS-C43	2	0.43	0.07	1.21	2.37	0.00	-0.07	-2.99	-0.20	-0.56	0.00	4.08	-3.82	0.27	7.90	3.36
322711.000	2624199.000	VP-AS-C44	3	2.00	0.05	4.09	0.96	0.00	-0.06	-5.98	-0.42	-0.69	0.00	7.09	-7.15	-0.05	14.24	-0.39
324503.000	2618650.000	VP-AP-C45	4	1.65	0.18	6.39	0.26	0.00	-0.09	-4.42	-1.23	-2.23	0.00	8.48	-7.97	0.50	16.45	3.04
320840.000	2619320.000	VP-AS-C46	5	0.83	0.04	3.58	1.79	0.00	-0.13	-4.40	-0.56	-0.58	0.00	6.24	-5.67	0.57	11.91	4.76
322154.000	2621027.000	VP-AS-C47	6	1.13	0.05	4.92	0.83	0.00	-0.06	-6.59	-0.20	-0.88	0.00	6.93	-7.72	-0.79	14.65	-5.37
325012.000	2616617.000	VP-AS-C48	7	3.18	0.06	6.26	0.13	0.00	-0.24	-5.81	-1.23	-1.52	0.00	9.62	-8.80	0.82	18.42	4.43
323888.000	2616916.000	VP-AS-C49	8	3.78	0.06	4.98	0.32	0.00	-0.16	-5.98	-0.48	-1.94	0.00	9.15	-8.56	0.59	17.70	3.34
322938.000	2626190.000	VP-AS-C50	9	8.70	0.09	9.10	2.88	0.00	-0.14	-3.17	-3.16	-15.83	0.00	20.77	-22.31	-1.54	43.07	-3.57
322870.000	2626214.000	VP-AS-C51	10	7.96	0.10	12.14	2.88	0.00	-0.21	-3.17	-2.88	-17.92	0.00	23.08	-24.18	-1.10	47.26	-2.33
323383.000	2626533.000	VP-AS-C52	11	10.18	0.09	7.35	1.28	0.00	-0.12	-3.30	-2.49	-12.08	0.00	18.89	-17.99	0.90	36.88	2.45
325487.000	2619226.000	VP-AS-C53	12	16.35	0.48	4.47	3.68	0.00	-0.04	-4.58	-3.00	-19.79	0.00	24.98	-27.41	-2.42	52.39	-4.62
323605.000	2617339.000	VP-AP-C54	13	0.57	0.06	0.96	0.64	0.00	-0.04	-1.41	-0.22	-0.56	0.00	2.22	-2.23	-0.01	4.45	-0.26
323075.000	2629413.000	VP-AS-C55	14	6.79	0.10	6.87	4.32	0.00	-0.25	-4.90	-3.05	-8.58	0.00	18.08	-16.78	1.29	34.86	3.71
327519.000	2622293.000	VP-AS-C56	15	10.05	0.50	4.15	1.92	0.00	-0.16	-5.76	-1.60	-9.10	0.00	16.62	-16.63	-0.01	33.24	-0.02
326683.000	2620366.000	VP-AS-C57	16	7.79	0.13	4.79	0.48	0.00	-0.12	-4.22	-0.53	-7.54	0.00	13.19	-12.42	0.76	25.61	2.98
337138.000	2604569.000	M-AS-C58	17	3.74	0.35	13.41	5.12	0.00	-0.15	-7.92	-0.81	-12.08	0.00	22.62	-20.97	1.66	43.59	3.80
325032.000	2619584.000	VP-AS-C59	18	3.52	0.07	3.96	2.56	0.00	-0.16	-3.34	-0.59	-5.10	0.00	10.11	-9.20	0.91	19.31	4.73
325459.000	2619667.000	VP-AS-C60	19	6.18	0.08	5.43	4.64	0.00	-0.16	-3.40	-1.88	-9.90	0.00	16.32	-15.33	0.99	31.65	3.13
325658.000	2619653.000	VP-AP4-C61	20	6.87	0.08	9.42	0.96	0.00	-0.16	-3.90	-1.65	-11.79	0.00	17.33	-17.51	-0.18	34.85	-0.52
333143.000	2617263.000	M-AS-C62	21	5.31	0.19	26.51	12.16	0.00	-0.09	-3.90	-2.88	-42.02	0.00	44.16	-48.91	-4.75	93.07	-5.10
325037.000	2619544.000	VP-AP2-C63	22	3.35	0.07	4.15	2.56	0.00	-0.16	-1.09	-5.52	-5.52	0.00	10.13	-10.33	-0.20	20.46	-0.99
338725.000	2610273.000	M-AS-C64	23	0.00	0.00	33.53	11.20	0.00	-0.11	-2.78	-0.64	-40.92	0.00	44.73	-44.46	0.27	89.19	0.31
325854.000	2619488.000	VP-AS-C65	24	8.48	0.08	11.50	0.16	0.00	-0.15	-4.38	-0.50	-14.17	0.00	20.22	-19.21	1.01	39.43	2.57

Porcentaje de error, muestras de marzo 2015 (Estación seca)

UTM_Z14_X	UTM_Z14_Y	Clave Muestreo	Clave Tesis	Na(meq/l)	K(meq/l)	Ca(meq/l)	Mg(meq/l)	sr(meq/l)	N-NO3 (meq/L)	HCO ₃ (meq/l)	Cl (meq/l)	SO ₄ (meq/l)	F (meq/l)	Σcat	Σanion	Σcat+Σanion	Σcat-Σanion	%Error
321234.000	2621964.000	VP-AS-80	1	1.96	0.04	4.68	0.17	0.06	-0.04	-2.93	-0.60	-3.13	-0.05	6.91	-6.75	0.16	13.66	1.15
322044.000	2623531.000	VP-AS-79	2	0.61	0.05	4.50	0.17	0.05	-0.03	-3.12	-0.35	-1.69	-0.04	5.39	-5.23	0.16	10.62	1.51
322711.000	2624199.000	VP-AS-78	3	1.30	0.03	3.90	0.26	0.05	-0.03	-3.78	-0.50	-1.46	-0.02	5.55	-5.79	-0.24	11.34	-2.14
324506.000	2618653.000	VP-AP-69	4	3.00	0.18	4.33	1.30	0.05	-0.09	-1.42	-4.28	-4.04	-0.05	8.86	-9.88	-1.02	18.74	-5.43
320841.000	2619293.000	VP-AS-82	5	0.87	0.03	4.76	0.26	0.02	-0.11	-2.93	-2.27	-0.46	-0.01	5.94	-5.77	0.17	11.71	1.45
322154.000	2621028.000	VP-AP-81	6	1.83	0.05	3.37	0.47	0.05	-0.03	-1.92	-0.76	-2.67	-0.03	5.76	-5.41	0.35	11.17	3.15
325011.000	2616618.000	VP-AS-86	7	3.09	0.05	6.81	0.91	0.07	-0.17	-4.06	-2.02	-4.06	-0.02	10.92	-10.33	0.59	21.26	2.79
323885.000	2616912.000	VP-AS-83	8	4.22	0.10	6.06	0.65	0.09	-0.14	-3.96	-1.76	-4.17	-0.02	11.13	-10.06	1.07	21.18	5.05
322936.000	2626188.000	VP-AS-72	9	9.70	0.09	7.35	3.28	0.15	-0.12	-4.06	-4.16	-11.10	-0.03	20.59	-19.48	1.11	40.06	2.77
322870.000	2626214.000	VP-AS-71	10	9.40	0.15	7.63	0.94	0.18	-0.17	-3.30	-4.41	-12.50	-0.04	18.30	-20.42	-2.13	38.72	-5.50
323381.000	2626527.000	VP-AS-73	11	12.31	0.13	1.56	0.09	0.11	-0.13	-2.74	-4.16	-8.58	-0.03	14.19	-15.65	-1.45	29.84	-4.87
325492.000	2619227.000	VP-AS-90	12	11.40	0.51	31.16	8.48	0.29	-0.01	-4.06	-10.96	-35.69	-0.10	51.83	-50.82	1.01	102.65	0.99
323596.000	2617333.000	VP-AP-68	13	0.91	0.04	3.25	0.65	0.01	-0.01	-2.27	-2.27	-0.42	-0.02	4.87	-4.98	-0.11	9.84	-1.11
323077.000	2629414.000	VP-AS-77	14	8.09	0.10	6.28	0.22	0.11	-0.17	-2.45	-3.40	-7.81	-0.05	14.80	-13.89	0.92	28.69	3.19
327520.000	2622195.000	VP-AS-74	15	8.57	0.26	2.58	1.93	0.07	-0.14	-3.68	-2.27	-6.77	-0.05	13.42	-12.91	0.51	26.33	1.93
326685.000	2620364.000	VP-AS-75	16	6.44	0.15	2.60	0.22	0.10	-0.01	-3.87	-1.01	-5.33	-0.07	9.50	-10.29	-0.79	19.80	-3.99
337137.000	2604565.000	M-AS-67	17	4.39	0.24	29.02	0.87	0.29	-0.13	-3.21	-2.27	-28.75	-0.11	34.81	-34.47	0.34	69.28	0.50
325032.000	2619584.000	VP-AS-89	018	3.83	0.10	6.06	0.43	0.07	-0.02	-3.68	-4.54	-3.38	-0.02	10.49	-11.63	-1.14	22.13	-5.17
325459.000	2619667.000	VP-AS-88	019	8.57	0.12	5.41	1.09	0.15	-0.11	-3.02	-3.28	-8.33	0.00	15.33	-14.74	0.59	30.08	1.96
325660.000	2619658.000	VP-AS-85	020	9.00	0.12	6.06	0.43	0.14	-0.12	-3.78	-3.15	-8.31	-0.03	15.76	-15.39	0.38	31.15	1.21
333141.000	2617262.000	M-AS-70	21	5.44	0.18	29.00	3.41	0.27	-0.09	-3.78	-2.27	-30.83	-0.10	38.31	-37.07	1.24	75.37	1.65
325038.000	2619549.000	VP-AS-84	22	3.70	0.10	5.85	0.43	0.09	-0.14	-4.25	-1.39	-4.27	-0.02	10.17	-10.06	0.10	20.23	0.52
338722.000	2610274.000	M-AS-76	23	2.31	0.35	20.91	2.96	0.28	-0.09	-3.02	-1.76	-20.42	-0.08	26.81	-25.37	1.44	52.18	2.76
325854.000	2619488.000	VP-AS-87	025	7.44	0.08	6.50	0.22	0.14	-0.11	-3.21	-2.77	-7.85	-0.03	14.38	-13.98	0.40	28.36	1.41

ANEXO III. Porcentaje de error, balance de electroneutralidad. Continuación

Porcentaje de error, muestras de agua de lluvia de junio 2014 (inicio de estación húmeda). Estación Matehuala, Villa de la Paz y Santa Lucia y de la estación de Matehuala de enero 2014

UTM_Z14_X	UTM_Z14_Y	Clave_muestreo	Clave_tesis	Ca(meq/L)	Mg(meq/L)	Na(meq/L)	K(meq/L)	sr(meq/L)	SO ₄ (meq/L)	Cl(meq/L)	N-NO3(meq/L)	F(meq/L)	HCO ₃ (meq/L)	Σcat	Σanion	Σcat+Σanion	Σcat-Σanion	%Error
331733	2623761	7653905/14/06	27	1.00	0.06	0.00	0.00	0.00	-0.21	-0.03	0.00	0.00	-0.77	1.06	-1.02	0.04	2.08	1.88
337230	2605218	7653906/14/06	28	0.94	0.02	0.00	0.00	0.00	-0.43	-0.03	-0.01	0.00	-0.14	0.96	-0.60	0.36	1.56	23.01
323661	2621670	7653907/14/06	26	0.63	0.05	0.00	0.00	0.00	-0.21	-0.01	-0.01	0.00	-0.21	0.68	-0.45	0.24	1.13	20.94
331733	2623761	7653905/14/01	27	0.19	0.01	0.00	0.02	0.00	-0.03	-0.13	0.00	0.00	-0.09	0.21	-0.24	-0.03	0.45	-6.15

ANEXO IV. Clasificación de las familias de agua, en función del ion dominante (elementos mayores)

Muestras de marzo2014 (Estación seca)

UTM_Z14_X	UTM_Z14_Y	CLAVE Muestreo	CLAVE Tesis	TEMP. °C (CAMPO)	pH (campo)	STD (mg/l)_LAB	COND. ELECT. mmhos/cm (CAMPO)	HCO3_CAMPO (mg/L)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	F (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Familia	
323638	2617138	VP-AP-C1	13	23.90	8.54	136.00	318.00	103.46	14.89	27.00	13.29	2.07	17.11	4.10	43.20	5.83	BICARBONATADA	CÁLCICA
321234	2621969	VP-AS-C8	1	20.20	7.00	254.00	572.00	353.31	9.93	70.00	13.29	0.44	29.18	2.70	57.60	8.75	BICARBONATADA	CÁLCICA
324535	2618449	VP-AP-C18	4	21.30	8.11	--	1370.00	83.94	67.01	450.00	23.92	1.28	68.00	8.70	204.00	12.90	SULFATADA	CÁLCICA
325045	2616416	VP-AS-C3	7	27.10	7.04	425.00	941.00	244.00	26.80	200.00	114.74	0.56	78.55	2.50	112.00	9.72	MIXTA	CÁLCICA
323919	2616715	VP-AS-C2	8	28.20	7.08	408.00	895.00	238.28	27.80	195.00	38.54	0.57	78.00	3.60	105.60	22.37	BICARBONATADA	CÁLCICA
322938	2626190	VP-AS-C5	9	27.10	7.30	794.00	2010.00	209.84	69.49	537.50	105.43	0.63	206.00	4.80	136.00	34.03	SULFATADA	MIXTA
322903	2626013	VP-AS-C4	10	27.50	7.06	890.00	2100.00	228.38	198.54	633.33	86.83	0.73	233.65	5.60	188.00	43.76	SULFATADA	MIXTA
323414	2626325	VP-AS-C7	11	28.00	7.26	714.00	1545.00	240.10	81.90	471.43	88.60	1.00	215.00	4.20	92.80	32.09	SULFATADA	SÓDICA
325521	2619029	VP-AS-C6	12	47.10	6.54	1916.00	4160.00	296.70	486.42	2000.00	5.32	3.53	425.64	23.00	640.00	97.24	SULFATADA	CÁLCICA
323638	2617138	VP-AP-C1	13	23.90	8.54	136.00	318.00	103.46	14.89	27.00	13.29	2.07	17.11	4.10	43.20	5.83	BICARBONATADA	CÁLCICA
337171	2604368	M-AS-C17	17	25.10	6.81	--	2400.00	234.24	54.60	1550.00	46.52	2.05	90.00	18.90	616.00	58.34	SULFATADA	CÁLCICA
325064	2619383	VP-AS-C10	18	27.90	7.61	404.00	1036.00	349.41	20.85	210.00	74.87	0.48	88.42	3.40	105.60	13.61	MIXTA	CÁLCICA
325491	2619466	VP-AP-C9	19	25.20	7.55	729.00	1732.00	206.91	81.90	500.00	88.16	0.76	213.00	4.30	100.80	33.06	SULFATADA	SÓDICA
325690	2619452	VP-AP4-C13	20	24.20	7.72	756.00	1651.00	257.66	183.65	566.61	95.69	0.61	239.13	4.70	132.00	38.90	SULFATADA	SÓDICA
333176	2617062	M-AS-C15	21	24.10	6.68	1249.00	2620.00	251.81	40.70	1625.00	37.21	2.15	93.90	9.10	632.00	24.31	SULFATADA	CÁLCICA
325070	2619342	VP-AP2-C12	22	24.50	7.33	406.00	993.00	275.23	21.84	195.00	80.18	0.49	80.74	3.30	112.00	15.56	MIXTA	CÁLCICA
338757	2610072	M-AS-C16	23	22.50	6.84	1147.00	2460.00	224.48	32.76	1380.00	31.90	1.72	37.95	17.20	632.00	19.45	SULFATADA	CÁLCICA
325854	2619488	VP-AS-C11	24	24.60	7.91	751.00	1794.00	210.82	196.06	500.00	88.60	0.80	187.00	4.50	128.00	43.76	SULFATADA	MIXTA
327284	2619926	VP-AP6-C14	25	26.00	7.83	762.00	1639.00	322.08	196.06	466.62	86.39	0.70	261.08	4.50	132.00	34.03	MIXTA	SÓDICA

Muestras de junio2014 (Inicio de estación húmeda)

UTM_Z14_X	UTM_Z14_Y	CLAVE Muestreo	CLAVE Tesis	TEMP. °C (CAMPO)	pH (campo)	STD (mg/l)_LAB	COND. ELECT. mmhos/cm (CAMPO)	HCO3_CAMPO (mg/L)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	F (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Familia	
321201	2622170	VP - AS - C21	1	21.20	6.99	287.00	616.00	277.18	18.10	60.00	14.62	0.49	24.00	3.37	88.33	2.64	BICARBONATADA	CÁLCICA
322044	2623531	VP - AS - C20	2	21.30	8.09	218.00	478.00	156.16	4.94	71.00	68.67	0.41	3.00	3.22	82.54	0.88	BICARBONATADA	CÁLCICA
322711	2624199	VP - AS - C19	3	23.00	7.42	340.00	734.00	281.09	23.03	155.00	16.83	0.86	36.00	2.32	84.80	12.00	MIXTA	CÁLCICA
324503	2618650	VP - AP - C32	4	27.70	8.23	661.00	1440.00	39.04	100.35	562.50	40.31	1.03	71.00	9.53	205.62	12.32	SULFATADA	CÁLCICA
320840	2619320	VP - AS - C28	5	20.90	7.38	273.00	593.00	183.49	34.55	29.00	70.88	0.29	16.00	1.69	71.20	4.70	BICARBONATADA	CÁLCICA
322154	2621027	VP - AS - C29	6	21.80	7.30	413.00	865.00	156.16	9.87	262.50	14.62	0.60	31.00	2.56	140.46	27.48	SULFATADA	CÁLCICA
325012	2616617	VP - AS - C31	7	26.30	7.07	478.00	1050.00	187.39	47.71	150.00	140.87	0.33	66.00	2.29	126.20	10.30	MIXTA	CÁLCICA
323888	2616916	VP - AS - C27	8	27.00	7.13	447.00	990.00	288.90	34.55	162.50	82.40	0.36	78.00	2.92	87.80	14.40	BICARBONATADA	MIXTA
322938	2626190	VP - AS - C24	9	27.70	7.55	828.00	1800.00	296.38	148.05	460.00	68.67	0.65	249.00	3.59	110.40	30.80	SULFATADA	SÓDICA
322870	2626214	VP - AS - C22	10	27.70	7.04	1018.00	2075.00	226.43	164.50	640.00	131.13	0.72	220.00	4.56	217.20	40.48	SULFATADA	MIXTA
323383	2626533	VP - AS - C23	11	27.50	7.39	793.00	1680.00	171.78	164.50	420.00	35.88	0.74	243.00	3.48	92.20	29.70	SULFATADA	SÓDICA
325487	2619226	VP - AS - C25	12	46.90	6.51	2166.00	4085.00	245.95	394.80	1900.00	6.20	3.58	370.00	25.81	549.60	102.60	SULFATADA	CÁLCICA
323605	2617339	VP - AP - C26	13	20.80	8.07	106.00	239.00	101.50	14.81	14.00	18.61	0.00	10.00	3.50	35.20	3.21	BICARBONATADA	CÁLCICA
337138	2604569	VP - AS - C41	017	23.2	6.86	1287	2707	265.47	74.03	1460.00	75.75	1.58	81.00	17.86	660.00	38.77	SULFATADA	CÁLCICA
325032	2619584	VP - AS - C34	18	27.70	7.57	449.00	1015.00	210.82	36.19	220.00	80.18	0.46	79.00	2.79	90.20	14.30	MIXTA	MIXTA
325459	2619967	VP - AS - C33	19	25.30	7.73	823.00	1864.00	179.58	139.83	510.00	76.64	0.68	238.00	3.51	127.00	30.30	SULFATADA	SÓDICA
325658	2619653	VP - AP4 - C3	20	25.40	7.53	634.00	1385.00	197.64	83.90	325.00	80.63	0.46	161.00	3.17	106.20	22.40	SULFATADA	MIXTA
333143	2617263	VP - AS - C39	21	22.4	6.68	1401	2929	273.28	78.14	1500.00	55.38	1.99	152.00	9.75	580.00	12.16	SULFATADA	CÁLCICA
325037	2619544	VP - AP2 - C3	22	23.80	7.33	445.00	995.00	308.42	34.55	215.00	90.82	0.45	78.00	2.80	101.36	12.32	MIXTA	CÁLCICA
338725	2610273	VP - AS - C40	23	22.3	6.89	1279	2680	304.51	57.58	1480.00	52.72	1.61	58.00	17.17	704.00	26.74	SULFATADA	CÁLCICA
325821	2619689	VP - AS - C37	24	24.90	7.94	864.00	1840.00	210.82	134.89	487.50	73.98	0.72	251.00	3.74	124.50	32.00	SULFATADA	SÓDICA
327251	2620127	VP - AP6 - C3	25	27.0	7.77	797	1730.00	126.88	123.38	450.00	93.92	0.62	214.00	3.44	124.40	28.60	SULFATADA	SÓDICA

ANEXO IV. Clasificación de las familias de agua, en función del ion dominante (elementos mayores). Continuación.

Muestras de octubre 2014 (Fin de estación húmeda)

UTM_Z14_X	UTM_Z14_Y	CLAVE Muestreo	CLAVE Tesis	TEMP. °C (CAMPO)	pH (campo)	STD (mg/l)_LAB	COND. ELECT. mmhos/cm (CAMPO)	HCO ₃ _CAMPO (mg/L)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	F (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Familia	
321234	2621964	VP-AS-C42	1	19.50	7.10	314.00	574.00	322.00	13.90	68.00	14.18	0.04	26.00	1.40	75.52	4.67	BICARBONATADA	CÁLCICA
322044	2623531	VP-AS-C43	2	19.10	7.73	272.00	437.30	283.04	6.95	27.00	18.16	0.02	10.00	2.60	24.32	28.79	BICARBONATADA	MAGNÉSICA
322711	2624199	VP-AS-C44	3	18.70	7.60	434.00	679.00	302.56	14.89	33.00	15.51	0.03	46.00	1.80	81.92	11.67	BICARBONATADA	CÁLCICA
324503	2618650	VP-AP-C45	4	22.30	8.87	620.00	909.00	109.80	43.68	107.00	23.92	0.04	38.00	7.00	128.00	3.11	BICARBONATADA	CÁLCICA
320840	2619320	VP-AS-C46	5	17.40	7.59	274.00	511.00	296.70	19.85	28.00	35.44	0.00	19.00	1.70	71.68	21.78	BICARBONATADA	CÁLCICA
322154	2621027	VP-AS-C47	6	19.60	7.32	498.00	759.00	402.00	6.95	42.00	15.51	0.02	26.00	2.00	98.56	10.11	BICARBONATADA	CÁLCICA
325012	2616617	VP-AS-C48	7	24.90	7.18	610.00	1077.00	317.20	43.68	73.00	66.45	0.01	73.00	2.20	125.44	1.56	BICARBONATADA	CÁLCICA
323888	2616916	VP-AS-C49	8	26.30	7.15	548.00	1008.00	353.80	16.88	93.00	43.41	0.01	87.00	2.40	99.84	3.89	BICARBONATADA	CÁLCICA
322938	2626190	VP-AS-C50	9	25.90	7.53	1256.00	1971.00	268.40	112.17	760.00	38.10	0.02	200.00	3.40	182.40	35.01	SULFATADA	MIXTA
322870	2626214	VP-AS-C51	10	25.20	7.06	1692.00	2248.00	294.75	102.25	860.00	57.59	0.02	183.00	4.10	243.20	35.01	SULFATADA	CÁLCICA
323383	2626533	VP-AS-C52	11	26.00	7.48	1236.00	1829.00	201.06	88.35	580.00	31.90	0.02	234.00	3.50	147.20	15.56	SULFATADA	SÓDICA
325487	2619226	VP-AS-C53	12	45.10	6.43	4406.00	6717.00	327.94	106.22	950.00	10.19	0.09	376.00	18.70	89.60	44.73	SULFATADA	SÓDICA
323605	2617339	VP-AP-C54	13	18.10	8.99	134.00	208.20	138.59	7.94	27.00	10.19	0.00	13.00	2.20	19.20	7.78	BICARBONATADA	MIXTA
323075	2629413	VP-AS-C55	14	26.50	7.38	940.00	1472.00	240.10	108.20	412.00	67.78	0.05	156.00	4.10	137.60	52.51	SULFATADA	MIXTA
327519	2622293	VP-AS-C56	15	28.20	7.81	972.00	1619.00	351.36	56.58	437.00	44.74	0.04	231.00	19.50	83.20	23.34	SULFATADA	SÓDICA
326683	2620366	VP-AS-C57	16	28.70	7.63	716.00	1150.00	517.28	18.86	362.00	33.67	0.05	179.00	5.10	96.00	5.83	SULFATADA	SÓDICA
337138	2604569	M-AS-C58	17	22.90	6.89	2922.00	2849.00	199.10	28.79	580.00	40.76	0.08	86.00	13.70	268.80	62.24	SULFATADA	CÁLCICA
325032	2619584	VP-AS-C59	18	24.40	7.70	614.00	1003.00	226.43	20.85	245.00	43.86	0.01	81.00	2.60	79.36	31.12	SULFATADA	MIXTA
325459	2619667	VP-AS-C60	19	22.6	7.48	828	1436	207.4	66.5	475	43.41	0.02	142	3	108.8	56.4038	SULFATADA	MIXTA
325658	2619653	VP-AP4-C61	20	23.1	7.75	1098	1577	238.1	58.6	566	45.19	0.02	158	3.1	188.8	11.6698	SULFATADA	CÁLCICA
333143	2617263	M-AS-C62	21	22.5	6.76	3078	2961	238.1	102.2	2017	25.69	0.08	122.00	7.30	531.20	147.82	SULFATADA	CÁLCICA
325037	2619544	VP-AP2-C63	22	27.0	7.44	712	1059	216.7	38.7	265	45.19	0.01	77.00	2.60	83.20	31.12	SULFATADA	MIXTA
338725	2610273	M-AS-C64	23	21.1	6.91	2808	2667	169.8	22.8	1964	31.01	0.07	0.00	0.00	672.00	136.15	SULFATADA	CÁLCICA
325854	2619488	VP-AS-C65	24	23.9	8.05	1284	1853	267.4	17.9	680	42.09	0.02	195.00	3.20	230.40	1.94	SULFATADA	CÁLCICA

Muestras de marzo 2015 (Estación seca)

UTM_Z14_X	UTM_Z14_Y	CLAVE Muestreo	CLAVE Tesis	TEMP. °C (CAMPO)	pH (campo)	STD (mg/l)_LAB	COND. ELECT. mmhos/cm (CAMPO)	HCO ₃ _LAB(mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	F (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Familia	
321201	2622159	VP-AS-78	1	18.00	7.25	289.00	520.00	230.34	17.87	70.00	8.86	0.42	30.00	1.29	78.12	3.17	BICARBONATADA	CÁLCICA
322040	2623531	VP-AS-79	2	16.40	7.74	251.00	435.00	190.03	12.51	81.00	9.30	0.76	14.00	2.06	90.27	2.11	BICARBONATADA	CÁLCICA
321234	2621964	VP-AS-80	3	15.80	7.84	342.00	592.00	178.51	21.44	150.00	11.96	0.98	45.00	1.51	93.74	2.11	MIXTA	CÁLCICA
324506	2618653	VP-AP-69	4	15.30	8.00	525.00	883.00	86.38	151.88	194.00	24.81	0.90	69.00	6.98	86.80	15.83	MIXTA	CÁLCICA
320841	2619293	VP-AS-82	5	18.40	7.49	267.00	492.30	178.51	80.41	22.00	29.24	0.24	20.00	1.02	95.48	3.17	BICARBONATADA	CÁLCICA
322154	2621028	VP-AP-81	6	16.20	7.71	399.00	741.00	117.12	26.80	128.00	9.30	0.63	42.00	1.84	67.60	5.69	SULFATADA	CÁLCICA
325011	2616618	VP-AS-86	7	24.0	7.24	475.00	1016.00	247.61	71.47	195.00	47.84	0.39	71.00	1.89	136.38	11.05	MIXTA	CÁLCICA
323885	2616912	VP-AS-83	8	25.80	7.23	479.00	1033.00	241.85	62.54	200.00	38.54	0.37	97.00	3.81	121.52	7.91	MIXTA	CÁLCICA
322936	2626188	VP-AS-72	9	25.90	7.41	910.00	1859.00	247.61	147.41	533.00	32.78	0.65	223.00	3.68	147.36	39.92	SULFATADA	MIXTA
322870	2626214	VP-AS-71	10	26.20	7.15	1038.00	2220.00	201.54	156.35	600.00	47.40	0.71	216.00	6.00	152.88	11.38	SULFATADA	SÓDICA
323381	2626527	VP-AS-73	11	26.00	7.40	841.00	1797.00	166.99	147.41	412.00	36.77	0.66	283.00	4.95	31.25	1.06	SULFATADA	SÓDICA
325492	2619227	VP-AS-90	12	43.7	6.86	2325.00	6310.00	247.61	388.64	1713.00	3.54	1.87	262.00	19.84	624.54	103.07		
323596	2617333	VP-AP-68	13	16.20	9.21	108.00	188.60	138.20	80.41	20.00	2.66	0.31	21.00	1.69	65.10	7.91	MIXTA	CÁLCICA
323077	2629414	VP-AS-77	14	26.20	7.35	690.00	1467.00	149.72	120.61	375.00	45.63	0.98	186.00	4.05	125.86	2.64	SULFATADA	SÓDICA
327520	2622195	VP-AS-74	15	27.90	7.74	685.00	1532.00	224.58	80.41	325.00	38.54	0.92	197.00	10.25	51.79	23.52	SULFATADA	SÓDICA
326685	2620364	VP-AS-75	16	26.50	8.19	506.00	1100.00	236.09	35.74	256.00	3.99	1.30	148.00	5.75	52.08	2.64	SULFATADA	SÓDICA
337137	2604565	M-AS-67	17	23.00	6.89	1355.00	2740.00	195.79	80.41	1380.00	35.88	1.80	101.00	9.46	581.56	10.55	SULFATADA	CÁLCICA
325021	2619581	VP-AS-89	18	23.8	7.73	635.00	986.00	224.58	160.81	162.00	4.87	0.46	88.00	3.72	121.52	5.28	MIXTA	CÁLCICA
325465	2619664	VP-AS-88	19	19.3	7.80	799.00	1489.00	184.27	116.14	400.00	31.45	0.00	197.00	4.56	108.50	13.19	SULFATADA	SÓDICA
325660	2619658	VP-AS-85	20	19.5	8.07	765.00	1444.00	230.34	111.68	399.00	31.90	0.60	207.00	4.57	121.52	5.28	SULFATADA	SÓDICA
333141	2617262	M-AS-70	21	22.00	6.75	1453.00	2821.00	230.34	80.41	1480.00	23.92	1.93	125.00	7.10	581.18	41.47	SULFATADA	CÁLCICA
325038	2619549	VP-AS-84	22	15.60	7.72	485.00	82.50	259.13	49.14	205.00	37.21	0.46	85.00	3.85	117.18	5.28	MIXTA	CÁLCICA
338722	2610274	M-AS-76	23	20.50	6.86	1357.00	2531.00	184.27	62.54	980.00	25.25	1.46	53.00	13.53	419.12	36.03	SULFATADA	CÁLCICA
325822	2619690	VP-AS-87	25	19.6	7.96	765.00	1440.00	195.79	98.28	377.00	30.12	0.63	171.00	3.30	130.20	2.64	SULFATADA	SÓDICA