

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE POSGRADO



**EVALUACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E HIDROQUÍMICA DE  
LA SUBCUENCA DEL RIO ARANCHACAL**

PRESENTADO POR:

**ÁLVARO JOSUÉ AMAYA ARÉVALO**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

**MAESTRO EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS**

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL 2015

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

SECRETARIA GENERAL :

**DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

SECRETARIO :

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

DIRECTORA :

**MSc. PATRICIA HAYDÉE ESTRADA DE LÓPEZ**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE POSGRADO

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**MAESTRO EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLOGÍCOS**

Título :

**EVALUACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E HIDROQUÍMICA DE  
LA SUBCUENCA DEL RIO ARANCHACAL**

Presentado por :

**ÁLVARO JOSUÉ AMAYA ARÉVALO**

Trabajo de Graduación Aprobado por :

Docente Asesor :

**MSc. TANIA TORRES RIVERA**

San Salvador, abril 2015

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**MSc. TANIA TORRES RIVERA**



## RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación consistió en la evaluación de datos hidrogeoquímicos del acuífero de la subcuenca del río Aranchacal, y su interacción con la hidroquímica superficial. El objetivo de la investigación fue la aplicación de nuevas metodologías de análisis de datos químicos y de composición de diferentes muestras de agua (superficiales, subterráneas, del área de recarga y de la descarga de la Subcuenca) y combinarlos o contrastarlos con información de datos geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, químicos y de calidad de agua. Dicho método utilizó técnicas bayesianas, de análisis estadístico y geoespacial, estudios de especiación química (modelación en equilibrio químico), estudios de dispersión de contaminantes (hidrodinámicos), estudios de caracterización química, estudios de evolución temporal, etc., con lo cual se comprendió mejor la interacción del agua subterránea en la subcuenca y se actualizó el modelo conceptual integrado de los sistemas de acuíferos de la subcuenca alta del río Aranchacal, además se presentó un inventario actualizado de manantiales y pozos, un inventario actualizado de fuentes contaminantes, fichas de sitios superficiales muestreados y de agua subterránea, registros actualizados de agua subterránea, diagramas interpretativos, mapas geoquímicos, etc. Además se ha caracterizado el flujo del río Aranchacal-Sauce y sus principales tributarios y a partir de ello, se ha realizado un análisis de aforos diferenciales. También se han realizado gráficos explicativos de evolución de la cantidad y la calidad del agua (superficial y subterránea) utilizando por primera vez el índice de calidad de agua canadiense (CCME-WQI), y evaluación del cumplimiento de normativas nacionales para potabilización y riego.

Entre otros nuevos resultados se estimó el valor promedio del coeficiente de dispersión hidrodinámico longitudinal del río Aranchacal ( $113.9 \text{ m}^2/\text{s}$ ) siendo la dispersión mecánica predominante en el sentido del flujo. También, con los aforos diferenciales realizados se pudo determinar exactamente los tramos del río Aranchacal en los cuales éste actúa como efluente e influente al acuífero y se definió que en la parte alta, luego del primer tributario (Vertiente) el río Aranchacal es influente al acuífero con un caudal de 20 L/s y en el tramo principal posterior al río Zarco (a 3.5 Km del sitio inicial) también el río Aranchacal es influente al acuífero con un caudal de 49 L/s; en el resto de tramos, el río es

efluente del acuífero y el caudal que este aporta al río en todo el recorrido estudiado es de 1.051 m<sup>3</sup>/s.

Los análisis estadísticos permitieron además definir correlaciones entre variables, reducir variables para mejorar su interpretación, realizar análisis de agrupamiento (clustering), variogramas espaciales y árboles de clasificación con lo que se obtuvo mayor información del sistema.

Todo esto permitió probar la hipótesis acerca de la interacción directa entre el agua superficial y subterránea; y finalmente permitió recomendar aspectos relacionados a la gestión y protección del recurso hídrico del municipio de Santa Ana.

## **DEDICATORIA**

En primer lugar quiero dedicarle este logro a Dios Todopoderoso, por la ayuda y el inmenso apoyo que me ha brindado durante toda mi vida. Te pido padre celestial que me permitas siempre poder llevar a la práctica la humildad, sencillez y modestia que caracterizan a nuestra buena madre, María.

A mi esposa y amiga María Albertina de Amaya por todo su amor y apoyo durante todo este proyecto. Gracias a tu abnegación hacia nuestra familia he podido dedicar el tiempo necesario para llevar a cabo este proyecto. Un día Dios nos unió en cuerpo y alma así que este logro no sólo te lo dedico sino que también es tuyo. Mil gracias, Te amo.

A mis amados hijos Alvaro Mateo y Carlos Santiago por ser mi inspiración y la luz de mi vida. Ustedes son el motor que me permite continuar, llenan de felicidad mi vida y me hacen soñar en nuevos proyectos que me permitan brindarles un mejor futuro. Gracias también por ser el reflejo del amor de Dios en nuestra casa.

A mis padres, Carlos Amaya y Martha Arévalo de Amaya, por su eterno apoyo en todos mis proyectos. Gracias por estar en todos los momentos de mi vida; gracias por enseñarme algo que no se aprende en los libros: El amor. Ustedes son mi ejemplo eterno, los admiro más que a nadie en este mundo y los amo con todo mi corazón.

A mis hermanos, Hamilton y Yoselyne, ustedes han sido los mejores hermanos que he podido tener; Dios me ha bendecido tanto que además de regalarme tan buenos padres me regaló su compañía, amor y apoyo. Aunque haya distancia o tiempo que nos puedan distanciar, siempre seremos hermanos y nos unirá el amor y la sangre por siempre. Gracias también por ser buenos tíos y también porque soy tío de la princesita linda y sé que pronto seré nuevo tío para sus hijos Yoselyne. Los amo.

A mis amigos de toda la vida Juan Miguel y Walter, así como mis nuevos amigos de la Iglesia Charlie y Claudia, y también a todos mis hermanos en Cristo del grupo de crecimiento; gracias por compartir grandes momentos, sentir conmigo, reír y llorar; los considero parte de mi familia.

Finalmente quiero pedir disculpas a todos, si no he profundizado en lo mucho que hemos vivido y en lo mucho que los aprecio individualmente. También disculpas a aquellos que aprecio mucho y que me haría falta papel para mencionarlos, prometo dedicarles mis nuevos proyectos. A todos ustedes en nombre de Dios, les dedico este logro.

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo hacer extensivo mi agradecimiento a todas las personas que contribuyeron a la realización de este trabajo especialmente:

A mi asesora de tesis, coordinadora de maestría, jefa y amiga, Maestra e Ingeniera Tania Torres Rivera por sus consejos, su guía profesional, tiempo y dedicación, así como también por su ejemplo como persona; que Dios Todopoderoso la colme de bendiciones siempre.

A la Maestra e Ing. Patricia Estrada por su enorme apoyo, su ética profesional y calidad humana que han hecho de la dirección de este proyecto un programa de alto rendimiento acoplado a nuestra realidad.

A los jurados, profesores, amigos y grandes profesionales en la rama de la Hidrogeología: los Maestros e Ingenieros: Marcia Calderón, Laura Gil, Mario Guevara, Randy Merlos y Dagoberto Arévalo, por todo su conocimiento, guía, amistad y esfuerzo.

A todos los docentes de la Maestría en Gestión de Recursos Hidrogeológicos por su arduo trabajo durante todo el desarrollo de este estudio de posgrado, gracias por su dedicación, esfuerzo y por transmitirnos su valioso conocimiento.

A Luis Chipagua, al Ing. Teodoro Ramírez y la Ing. Cecilia de Flamenco por su apoyo en las visitas de reconocimiento que realizamos en el año 2012 y 2013. A los tesisistas que asesoré en el trabajo de graduación de la EIQA del año 2013: Rebeca, Leandro y Allan por su apoyo en los aforos que a la vez sirvieron en su trabajo de grado y que fueron de enorme ayuda para el análisis de la técnica de aforos diferenciales en la presente investigación. También a los tesisistas que asesoré en el trabajo de graduación de la EIQA año 2014: Carla, Enrique y Leonel por los análisis de las tres muestras de agua que a la vez sirvieron en su trabajo de grado y para el análisis de evolución temporal de los sitios de muestreo en el acuífero somero en la presente investigación.

A mis amigas del MARN, en especial a Zulma Mena y Regina Cortez por todos sus consejos de vida, por ser tan sensibles, nobles, sinceras y a la vez grandes profesionales.

A mis amigos de la Maestría en especial a Luis, Glenda y Aura por todas las experiencias inolvidables. Gracias por emprender conmigo ésta carrera profesional y espontáneamente, convertirla en miles de momentos llenos de alegría y amistad.

*¡Gracias a Dios por todo y gracias a todos ustedes por su apoyo!*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>I. ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	4
1.5. OBJETIVOS.....	4
1.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.6. JUSTIFICACIÓN.....	9
1.7. BENEFICIOS ESPERADOS.....	10
1.8. DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	11
1.9. ANTECEDENTES.....	13
<b>II. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
2.1. CONTEXTO LOCAL.....	16
2.1.1. INDICADORES DEMOGRÁFICOS.....	16
2.1.2. CLIMA.....	19
2.1.2.1. CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE SANTA ANA.....	20
2.2. GEOLOGÍA Y VULCANISMO.....	22
2.2.1. DEFINICIONES GEOLÓGICAS Y CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL.....	22
2.2.1.1. VULCANISMO EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	25
A. VOLCÁN DE SANTA ANA.....	25
B. EVOLUCIÓN DE COMPLEJO VOLCÁNICO SANTA ANA.....	29
C. DEPÓSITOS VOLCÁNICOS:.....	30
D. PETROGRAFÍA:.....	30
E. GEOQUÍMICA DEL VOLCÁN DE SANTA ANA:.....	30
2.2.1.2. GEOLOGÍA.....	30
2.3. HIDROLOGÍA.....	36
2.3.1. DEFINICIONES Y CONTEXTO HIDROLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	36
2.3.1.1. USOS DEL AGUA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SUQUIAPA.....	38
2.4. HIDROGEOLOGÍA.....	42

2.4.1. DEFINICIONES HIDROGEOLOGICAS .....	42
2.5. HIDROGEOQUÍMICA .....	47
2.5.1. DEFINICIONES DE ESTUDIOS HIDROGEOQUÍMICOS .....	48
2.6 ESPECIACIÓN QUÍMICA .....	51
2.6.1. DEFINICIONES ACERCA DE EQUILIBRIO QUÍMICO Y ESPECIACIÓN	51
2.6.1.1. REACCIONES QUÍMICAS Y EQUILIBRIO QUÍMICO .....	51
A. REACCIONES DE COMPLEJACIÓN ACUOSA .....	53
B. INTERACCIONES SÓLIDO-LÍQUIDO .....	54
C. INTERACCIONES GAS-LÍQUIDO .....	54
D. REACCIONES CINÉTICAS .....	55
2.7. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES.....	56
2.7.1. DEFINICIONES ACERCA DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES .56	
2.7.1.1. FENÓMENOS DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES .....	56
A. DISPERSIÓN .....	56
B. ADVECCIÓN.....	57
C. TÉCNICA DE TRAZADORES.....	57
2.8. CALIDAD DE AGUA.....	58
2.8.1. FUNDAMENTO TEÓRICO. ....	58
2.8.1.1. CALIDAD DE AGUA Y CONTAMINACIÓN HÍDRICA.....	59
2.9. GEOESTADÍSTICA Y ESTADISTICA BAYESIANA.....	63
2.9.1. DEFINICIONES ACERCA DE HERRAMIENTAS ESTADISTICAS .....	63
2.10. INTERACCIÓN DEL AGUA SUPERFICIAL Y EL AGUA SUBTERRÁNEA ..	70
2.10.1. INTERACCIÓN ACUÍFERO - MANANTIALES .....	70
2.10.2. RÍOS QUE GANAN O CEDEN AGUA AL ACUÍFERO .....	71
<b>III. ESTUDIO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>73</b>
3.1. EVALUACIÓN GEOLÓGICA.....	74
3.1.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	74
3.1.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	75
3.1.2.1. GEOLOGIA DEL AREA GEOGRÁFICA DE INTERÉS .....	75
3.1.2.2. FORMACIÓN SAN SALVADOR (HOLOCENO HASTA PLEISTOCENO).....	77
A. MIEMBRO S1 .....	78
B. MIEMBRO S2 .....	78
C. MIEMBRO S3 .....	79
D. MIEMBRO S3'A.....	79
E. MIEMBRO S5 .....	80

F. MIEMBRO S5'C.....	80
G. MIEMBRO Q'F.....	80
3.1.2.3. FORMACIÓN CUSCATLÁN (PLEISTOCENO INFERIOR HASTA PLIOCENO SUPERIOR) .....	80
A. MIEMBRO C1.....	82
B. MIEMBRO C1'L.....	82
C. MIEMBRO C3.....	82
3.1.2.4. FORMACIÓN BÁLSAMO (PLIOCENO SUPERIOR HASTA MIOCENO) .....	82
A. MIEMBRO B1.....	84
B. MIEMBRO B2.....	84
C. MIEMBRO B3.....	84
3.1.2.5. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA EN LOS SITOS DE MUESTREO .....	85
3.2. EVALUACIÓN HIDROLÓGICA.....	90
3.2.1. METODOLOGÍA DE LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS .....	90
3.2.1.1. METODOLOGÍA DE TRABAJO EN CAMPO .....	90
A. METODOLOGÍA PARA OBTENCIÓN DE DATOS PARA EL CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS: TÉCNICA DE AFOROS POR VADEO.....	91
3.2.1.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE PUNTOS DE MUESTREO.....	94
A. CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE AFORO POR VADEO.....	100
3.2.1.3. PRESENTACIÓN DE DATOS HIDRODINÁMICOS .....	101
3.2.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	122
3.2.2.1. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA.....	122
A. PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS DE FLUJO .....	124
B. PARÁMETROS QUÍMICOS DE CAMPO .....	125
• TEMPERATURA.....	126
• POTENCIAL HIDRÓGENO.....	126
• PORCENTAJE DE OXÍGENO DISUELTO.....	127
• CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	128
• SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES.....	128
3.3. EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA .....	129
3.3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	130
3.3.1.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO DE CAMPO .....	130
3.3.1.2. UBICACIÓN DE SITIOS DE MUESTREO.....	131
3.3.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	131
3.3.2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ACUÍFERO.....	133
A. LÍMITES DEL ACUÍFERO Y DIRECCION DE FLUJO .....	133
B. ÁREA DE RECARGA.....	133



C. UNIDADES HIDROGEOLOGICAS .....	134
D. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL ACUÍFERO .....	135
3.3.2.2. PRESENTACIÓN DE DATOS .....	141
3.4. EVALUACIÓN HIDROGEOQUÍMICA.....	150
3.4.1. METODOLOGÍA DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS Y ANÁLISIS .....	150
3.4.1.1. DETERMINACIÓN DE CONFIABILIDAD DE DATOS DE LABORATORIO.....	151
3.4.1.2. CALCULO DE GRÁFICOS HIDROGEOQUÍMICOS .....	152
3.4.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	153
3.5. EVALUACIÓN DE LA ESPECIACIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS. ....	169
3.5.1. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS ESPECIES QUÍMICAS TERMODINÁMICAMENTE CONSISTENTES EN LA ZONA EN ESTUDIO.....	169
3.5.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	170
3.5.2.1 REACCIONES DE FORMACIÓN DE LAS ESPECIES EN EQUILIBRIO QUÍMICO DE FASE SÓLIDA EN EL ACUÍFERO DE SANTA ANA.....	170
3.5.2.2. ESPECIACIÓN QUÍMICA EN LOS SITIOS DE MUESTREO DEL ÁREA GEOGRÁFICA DE INTERÉS. ....	173
3.6. EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL SUPERFICIAL DEL RÍO ARANCHACAL.....	192
3.6.1. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE LA DISPERSIÓN A TRAVÉS DE LA TÉCNICA DE TRAZADORES QUÍMICOS.....	192
3.6.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	196
3.6.2.1. RESULTADOS.....	197
A. COEFICIENTE DE DISPERSIÓN USANDO MÉTODO FOGLER. PUNTO DE DETECCIÓN 1 DEL RÍO SUQUIAPA. ....	197
B. COEFICIENTE DE DISPERSIÓN USANDO MÉTODO FOGLER. PUNTO DE DETECCIÓN 2 DEL RÍO SUQUIAPA. ....	201
3.7. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA.....	205
3.7.1. METODOLOGÍA PARA LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS ..	205
3.7.1.1. METODOLOGÍA PARA TOMA DE MUESTRAS DE AGUA PARA ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DE CALIDAD DE AGUAS.....	206
A. ANÁLISIS DE PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS DE AGUA. ....	206
B. DETERMINACIÓN DE LAS FUENTES CONTAMINANTES.....	207
3.7.1.2. METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN DE CALIDAD DE AGUA .....	226

A. ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA (ICA BROWN Y CCME-WQI) .....	226
• ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA. ICA (BROWN) .....	226
• ÍNDICE CANADIENSE DE CALIDAD DE AGUAS (CCME WQI).....	228
B. EVALUACIÓN DE APTITUDES DE USO DE AGUA (NORMATIVAS NACIONALES.) .....	230
• EVALUACIÓN DE APTITUD DE USO DE AGUA CRUDA PARA POTABILIZAR.....	230
• EVALUACION DE APTITUD DE USO DE AGUA PARA RIEGO.....	231
3.7.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	232
3.7.2.1. CALIDAD DE AGUA .....	232
A. ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA (CCME-WQI).....	235
B. APTITUD DE RIEGO.....	240
C. APTITUD DE AGUA CRUDA PARA POTABILIZAR .....	244
3.7.3. MEDIDAS DE MITIGACION .....	248
3.7.3.1. TIPOS DE MEDIDAS A PROPONER.....	248
A. VIGILANCIA POR PARTE DE AUTORIDADES COMPETENTES .....	248
B. INFRAESTRUCTURA FÍSICA .....	249
C. IMPLEMENTACIÓN DE LA AGRICULTURA ORGÁNICA .....	249
D. MEDIDAS DE CONTROL DE CONTAMINACIÓN PARA AGRICULTORES DE LA ZONA.....	250
3.8. ANÁLISIS Y EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS DATOS	
HIDROGEOQUÍMICOS .....	251
3.8.1. SERIES TEMPORALES .....	251
3.8.2. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS TEMPORAL.....	252
3.8.3. ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS EVOLUTIVOS DE	
CAUDALES SUPERFICIALES DEL RÍO SUQUIAPA.....	253
3.8.4. ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS QUÍMICOS EVOLUTIVOS	
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ACUIFERO DE SANTA ANA.....	258
3.8.5. ANÁLISIS TEMPORAL DE LA CALIDAD DE AGUA DE SITIOS DE	
CONTROL SUPERFICIALES, SOBRE EL RÍO SUQUIAPA .....	263
3.8.6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS EVOLUTIVOS DE CALIDAD	
DE AGUA SUPERFICIAL.....	265
3.8.7. ANÁLISIS TEMPORAL DE LA CALIDAD DE AGUA DE SITIOS DE ÁREA	
DE RECARGA, LAGO DE COATEPEQUE.....	268
3.8.8. ANÁLISIS TEMPORAL DE CORRELACIÓN ENTRE MUESTRAS DE	
AGUA SUBTERRÁNEA TOMADAS EN ÉPOCA LLUVIOSA Y ÉPOCA SECA,	
RESPECTIVAMENTE.....	269

3.8.8.1. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DEL SITIO SAN-02, TOMADAS EN ÉPOCA LLUVIOSA Y ÉPOCA SECA.....	272
3.9. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICOS Y GEOESPACIAL DE DATOS. ....	275
3.9.1. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	275
3.9.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	276
3.9.2.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	276
3.9.2.2. ESTADÍSTICA BAYESIANA.....	279
A. FACTORES PRINCIPALES Y VARIABLES QUÍMICAS.....	280
B. MATRIX PLOT (FACTORES PRINCIPALES) .....	296
C. DENDROGRAMAS.....	303
D. ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN.....	306
• ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN POR TIPO DE MUESTRA DE AGUA.....	307
• ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN (POR GEOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA) .....	309
• ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN POR ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS.....	311
• ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN POR TIPO DE ACUIFERO.....	313
• ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN POR TIPO DE SUELO.....	316
• ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN POR VULNERABILIDAD (DRASTIC) .....	318
E. VARIOGRAMAS ESPACIALES (GEOESTADÍSTICA) .....	320
3.10. RELACIÓN ENTRE AGUA SUPERFICIAL-SUBTERRÁNEA. ....	328
3.10.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	328
3.10.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	328
3.10.2.1. ANÁLISIS DE AFOROS DIFERENCIALES. ....	329
<b>IV. MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO E HIDROGEOQUÍMICO.</b>	<b>333</b>
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>338</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>341</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>344</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>347</b>
ANEXO 1. HOJAS DE AFOROS DE AGUA SUPERFICIAL.....	347
ANEXO 2. MAPA HIDROGEOLÓGICO DE ANDA .....	367
ANEXO 3. REPORTES DE CLASIFICACIÓN DE AGUAS DE LA BASE DE DATOS GEOQUÍMICA DEL ÁREA GEOGRÁFICA DE INTERÉS.....	368
ANEXO 4. REPORTE DE ESPECIACIÓN QUÍMICA: ALCALINIDAD .....	403
ANEXO 5: FOTOGRAFÍAS EN CAMPAÑAS DE MUESTREO .....	407

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Matriz resumen de la investigación.....	5
Tabla 2 Densidad poblacional.....	16
Tabla 3 Población por área y sexo.....	17
Tabla 4 Indicadores sociodemográficos.....	19
Tabla 5 Minicentrales hidroeléctricas en la parte alta del río Suquiapa.....	38
Tabla 6 Definición de los principales parámetros fisicoquímicos para evaluación de calidad agua.....	61
Tabla 7 Minerales estimados por especiación química en los sitios de muestreo del área geográfica de interés.....	86
Tabla 8 Sitios seleccionados en la técnica de aforo por vadeo.....	95
Tabla 9 Resultados de cálculo de parámetros hidrodinámicos obtenidos por medio de la técnica de aforo por vadeo.....	123
Tabla 10 Valores de Transmisividad según tipos de acuíferos.....	135
Tabla 11 Valores de porosidad totales en Unidades Hidrogeológicas.....	136
Tabla 12 Tipo de agua y categoría Hidrogeológica de base de datos Hidrogeoquímicos.....	155
Tabla 13 Especies químicas mayoritarias de pozos y evolución temporal.....	164
Tabla 14 Reacciones de formación utilizadas por el software MINEQL 4.6 para la estimación de especies químicas en equilibrio químico presentes en el área geográfica de interés.....	171
Tabla 15 Procedimiento de cálculo para el cálculo del coeficiente de dispersión.....	194
Tabla 16 Identificación de sitios para la técnica de trazadores.....	195
Tabla 17 Ubicación de fuentes contaminantes y otros datos de la actividad en el área geográfica de interés.....	209
Tabla 18 Interpretación del valor de índice de calidad de agua de Brown.....	226
Tabla 19 Ponderaciones y pesos de subparámetros para la evaluación del ICA-Brown.....	227
Tabla 20 Criterio para clasificación de calidad de aguas.....	230
Tabla 21 Normativa de agua cruda para potabilizar, Decreto 51, El Salvador.....	231
Tabla 22 Normativa de agua para riego, Decreto 51, El Salvador.....	231
Tabla 23 Evaluación de índice de calidad de agua canadiense (CCME-WQI) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	235
Tabla 24 Evaluación de aptitud de uso de agua para riego en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	240
Tabla 25 Evaluación de aptitud de uso de agua cruda para potabilizar en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	244
Tabla 26 Evolución de mediciones de caudales del canal principal del río Suquiapa.....	255
Tabla 27 Evolución de mediciones de caudales de ríos tributarios.....	256
Tabla 28 Evolución temporal de cloruros en pozos.....	258
Tabla 29 Evolución temporal de sulfatos en pozos.....	259

Tabla 30 Evolución temporal de bicarbonatos en pozos .....	260
Tabla 31 Evolución temporal de calcio en pozos.....	261
Tabla 32 Evolución temporal de sodio en pozos .....	262
Tabla 33 Evolución temporal de magnesio en pozos .....	262
Tabla 34 Evolución temporal de la calidad de agua superficial de parámetros fisicoquímicos .....	266
Tabla 35 Índice de calidad de agua superficial (Brown) y resumen de parámetros hidrodinámicos correspondientes.....	267
Tabla 36 Evaluación del Índice de Calidad de agua del Lago de Coatepeque y aptitudes de uso.....	268
Tabla 37 Evaluación de Aptitud de uso de agua cruda para potabilizar a través de decreto 51, del Lago de Coatepeque.....	269
Tabla 38 Evaluación de Aptitud de uso de agua para riego a través de decreto 51, del Lago de Coatepeque	269
Tabla 39 Análisis comparativo de muestras de agua de pozo SAN-02 de diferentes épocas del año .....	272
Tabla 40 Estadística descriptiva básica de la base de datos geoquímica.....	277
Tabla 41 Reglas de clasificación por tipo de muestras.....	308
Tabla 42 Reglas de clasificación por estratigrafía .....	310
Tabla 43 Reglas de clasificación por estructuras geológicas.....	312
Tabla 44 Reglas de clasificación por tipo de acuífero.....	314
Tabla 45 Reglas de clasificación por tipo de suelo .....	317
Tabla 46 Reglas de clasificación por vulnerabilidad acuífera .....	319
Tabla 47 Resumen de datos hidrodinámicos en los sitios de agua superficial. ....	329
Tabla 48 Cálculo de caudal diferencial en los sitios de agua superficial. ....	330
Tabla 49 Hoja de cálculo de aforo por vadeo para el sitio A01SUQUI.....	347
Tabla 50 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A02VERTI.....	348
Tabla 51 Hoja de cálculo de aforos por vadeo para sitio A03SUQUI .....	349
Tabla 52 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A04APANT .....	350
Tabla 53 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A05SUQUI .....	351
Tabla 54 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A06SAUCE-1 .....	352
Tabla 55 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A07SAUCE-2 .....	353
Tabla 56 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A07CARCAG .....	354
Tabla 57 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A08SUQUI .....	355
Tabla 58 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A09MOLIN-1 .....	356
Tabla 59 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A09MOLIN-2 .....	357
Tabla 60 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A10SUQUI. ....	358
Tabla 61 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A11ZARCO. ....	359
Tabla 62 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A12SUQUI. ....	360
Tabla 63 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A13VERTI.....	361
Tabla 64 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A14SUQUI. ....	362

Tabla 65 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A15PUENTE. ....	363
Tabla 66 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A16SUQUI. ....	364
Tabla 67 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A17GUILGUAYO. ....	365
Tabla 68 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A18SUQUI. ....	366

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estructura general del informe .....	3
Figura 2 Esquema de capítulo II: marco teórico de la investigación .....	15
Figura 3 Promedio mensual de precipitación en municipio de Santa Ana .....	20
Figura 4 Promedio mensual de humedad relativa en municipio de Santa Ana .....	21
Figura 5 Promedio de temperaturas en municipio de Santa Ana .....	21
Figura 6 Piscina artesanal dentro de Hacienda San Francisco .....	39
Figura 7 Movimiento transversal y longitudinal de la dispersión hidrodinámica.....	56
Figura 8 Movimiento longitudinal advectivo .....	57
Figura 9 Herramientas estadísticas para el análisis de información.....	64
Figura 10 Distancia entre dos objetos y distancia euclidiana. ....	66
Figura 11 Esquema de cálculo de componentes principales.....	67
Figura 12 Esquema de eigenvectores y ejes de componentes principales en el espacio .....	68
Figura 13 Esquema de eigenvalues en el espacio .....	69
Figura 14 Esquema de surgimiento de Manantiales.....	71
Figura 15 Tipos de ríos: A) Efluente, B) Influyente, C) Efluente en período de lluvia e influyente en época de sequía .....	72
Figura 16 Esquema de capítulo III: estudio experimental de la investigación .....	73
Figura 17 Geología en porcentaje de área geográfica en la zona en estudio .....	76
Figura 18 Caracterización geológica porcentual de la formación San Salvador .....	77
Figura 19 Caracterización geológica porcentual de la formación Cuscatlán.....	81
Figura 20 Caracterización geológica porcentual de la formación Bálsamo .....	83
Figura 21 Sitios seleccionados en la técnica de recolección de datos hidrodinámicos de aguas superficiales .	99
Figura 22 Ficha sitio superficial. A01SUQUI .....	102
Figura 23 Ficha sitio superficial. A02VERTI.....	103
Figura 24 Ficha sitio superficial. A03SUQUI .....	104
Figura 25 Ficha sitio superficial. A04APANT .....	105
Figura 26 Ficha sitio superficial. A05SUQUI .....	106
Figura 27 Ficha sitio superficial. A06SAUCE-1 .....	107
Figura 28 Ficha sitio superficial. A06SAUCE-2 .....	108
Figura 29 Ficha sitio superficial. A07CARCAG .....	109
Figura 30 Ficha sitio superficial. A08SUQUI .....	110
Figura 31 Ficha sitio superficial. A09MOLIN.....	111
Figura 32 Ficha sitio superficial. A09MOLIN-2 .....	112
Figura 33 Ficha sitio superficial. A10SUQUI .....	113
Figura 34 Ficha sitio superficial. A11ZARCO .....	114

Figura 35 Ficha sitio superficial. A12SUQUI .....	115
Figura 36 Ficha sitio superficial. A13VERTI.....	116
Figura 37 Ficha sitio superficial. A14SUQUI .....	117
Figura 38 Ficha sitio superficial. A15PUENTE .....	118
Figura 39 Ficha sitio superficial. A16SUQUI .....	119
Figura 40 Ficha sitio superficial. A17GUILGUAYO .....	120
Figura 41 Ficha sitio superficial. A18SUQUI .....	121
Figura 42 Distribución de caudales a lo largo del río Suquiapa. ....	124
Figura 43 Gráfico de dispersión de valores de la velocidad media a lo largo del río Suquiapa. ....	125
Figura 44 Gráfica de temperatura medida a lo largo del río Suquiapa.....	126
Figura 45 Gráfica de pH medido a lo largo del río Suquiapa .....	127
Figura 46 Valores de porcentaje de Oxígeno Disuelto a lo largo del río Suquiapa .....	127
Figura 47 Valores de conductividad registrados en los sitios a lo largo del río Suquiapa .....	128
Figura 48 Valores de sólidos disueltos totales registrados en los sitios a lo largo del río Suquiapa .....	129
Figura 49 Procedimiento resumido de muestreo de aguas subterráneas. ....	130
Figura 50 Ficha de sitio de muestreo de agua subterránea SA-04-12MX.....	141
Figura 51 Ficha de sitio de muestreo de agua subterránea SA-18-12MX.....	142
Figura 52 Ficha de sitio de muestreo de agua subterránea SAGRANJA-12MX.....	143
Figura 53 Ficha de sitio de muestreo de agua subterránea SAN-01 .....	144
Figura 54 Ficha de sitio de muestreo de agua subterránea SAN-02 .....	145
Figura 55 Ficha de sitio de muestreo de agua subterránea SAN-04 .....	146
Figura 56 Ficha de sitio de muestreo de agua subterránea SAN-09 .....	147
Figura 57 Gráfico de dispersión de conductividad eléctrica vs suma de iones .....	154
Figura 58 Diagrama de Piper de Base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	161
Figura 59 Diagrama de Schoeller de la base de datos geoquímica del área geográfica de interés .....	163
Figura 60 Gráfico de dispersión de Cloro vs Boro de la base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	164
Figura 61 Especies químicas mayoritarias de 4 pozos, año 2005 .....	165
Figura 62 Especies químicas mayoritarias de 4 pozos, año 2006.....	166
Figura 63 Especies químicas mayoritarias de 4 pozos, año 2012 .....	166
Figura 64 Ejemplo de gráfico circular de composición de especies mayoritarias del sitio: Centro del Lago de Coatepeque.....	167
Figura 65 Ejemplo de gráfico radial de composición de especies mayoritarias del sitio: Fuente termal del Lago de Coatepeque .....	167
Figura 66 Ejemplos de gráficos radiales de composición de especies mayoritarias en pozos del acuífero de Santa Ana.....	168
Figura 67 Gráfico box plot de datos globales .....	169



Figura 68 Especiación química de compuestos del arseniato [ $\text{AsO}_4^{3-}$ ] en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	173
Figura 69 Especiación química de compuestos del Borato [ $\text{B}(\text{OH})_3$ ] en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	174
Figura 70 Especiación química de compuestos del Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	175
Figura 71 Especiación química de compuestos del Cloro ( $\text{Cl}^-$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	176
Figura 72 Especiación química de compuestos Carbonatados [ $\text{CO}_3^{2-}$ ] en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	177
Figura 73 Especiación química de compuestos cromatados [ $\text{CrO}_4^{2-}$ ] en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	178
Figura 74 Especiación química de compuestos de Hierro II ( $\text{Fe}^{2+}$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	179
Figura 75 Especiación química de compuestos del ión Hidrón ( $\text{H}^+$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	180
Figura 76 Especiación química de compuestos acuosos ( $\text{H}_2\text{O}$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	181
Figura 77 Especiación química de compuestos potásicos ( $\text{K}^+$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	182
Figura 78 Especiación química de compuestos magnésicos ( $\text{Mg}^{2+}$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	183
Figura 79 Especiación química de compuestos manganeso ( $\text{Mn}^{3+}$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	184
Figura 80 Especiación química de compuestos sódicos ( $\text{Na}^+$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	185
Figura 81 Especiación química de compuestos de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	186
Figura 82 Especiación química de compuestos de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	187
Figura 83 Especiación química de compuestos de Plomo II ( $\text{Pb}^{2+}$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	188
Figura 84 Especiación química de compuestos de fosfatos [ $\text{PO}_4^{3-}$ ] en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	189
Figura 85 Especiación química de compuestos de silicatos [ $\text{SiO}_4^{4-}$ ] en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	190

Figura 86 Especiación química de compuestos de sulfatos [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] en base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	191
Figura 87 Gráfico de Concentración de NaCl vs Tiempo de paso del trazador en punto detector 1 .....	198
Figura 88 Gráfico de Concentración de NaCl vs Tiempo de paso del trazador en punto detector 2 .....	202
Figura 89 Procedimiento general de recolección de muestras de agua .....	207
Figura 90 Gráfico temporal de caudal para sitio superficial de agua (A01SUQUI) .....	253
Figura 91 Gráfico temporal de caudal para sitio superficial de agua (A04SUQUI) .....	254
Figura 92 Gráfico temporal de caudal para sitio superficial de agua (A23SUQUI) .....	254
Figura 93 Gráfico evolutivo de cloruros en pozos del Acuífero de Santa Ana .....	258
Figura 94 Gráfico evolutivo de sulfatos en pozos del Acuífero de Santa Ana .....	259
Figura 95 Gráfico evolutivo de bicarbonatos (ppm) en pozos del Acuífero de Santa Ana .....	260
Figura 96 Gráfico evolutivo de calcio en pozos del Acuífero de Santa Ana.....	261
Figura 97 Gráfico evolutivo de sodio en pozos del Acuífero de Santa Ana.....	262
Figura 98 Gráfico evolutivo de magnesio en pozos del Acuífero de Santa Ana .....	263
Figura 99 Gráfico evolutivo de calidad de agua superficial (ICA-Brown) en sitio A01SUQUI.....	264
Figura 100 Gráfico evolutivo de calidad de agua superficial (ICA-Brown) en sitio A04SUQUI.....	264
Figura 101 Gráfico evolutivo de calidad de agua superficial (ICA-Brown) en sitio A23SUQUI.....	265
Figura 102 Promedio mensual de lluvia en área geográfica de interés, año 2013 .....	270
Figura 103 Evolución temporal de lluvia en el mes de abril (AGI) .....	270
Figura 104 Evolución temporal de lluvia en el mes de mayo (AGI) .....	271
Figura 105 Evolución temporal de lluvia en el mes de junio (AGI) .....	271
Figura 106 Comparación de series de datos entre muestras de agua subterránea del pozo SAN-02 en diferentes épocas del año .....	273
Figura 107 Estadísticas básicas e histograma de muestras de aguas tomadas en diferentes épocas del pozo SAN-02 .....	273
Figura 108 Gráfico de Box-Plot y comparación de medias del pozo SAN-02.....	274
Figura 109 Gráfico de cuantiles y probabilidad normal de muestras de agua en diferentes épocas para el pozo SAN-02 .....	274
Figura 110 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 1 y Oxígeno. 282	
Figura 111 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 2 y Potasio.. 283	
Figura 112 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 3 y algunas especies químicas .....	284
Figura 113 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 4 y algunas especies químicas .....	285
Figura 114 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 5 y referencia espacial .....	286

Figura 115 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 6 y Bicarbonatos.....	287
Figura 116 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 7 y Nivel freático .....	288
Figura 117 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 8 y Hierro ...	289
Figura 118 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 9 y algunas especies químicas .....	290
Figura 119 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 10 y algunas especies químicas .....	291
Figura 120 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 11 y algunas especies químicas .....	292
Figura 121 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 12 y Calcio .	293
Figura 122 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 13 y algunas especies químicas .....	295
Figura 123 Gráfico de matrix plot de componentes principales, etiquetas en base a tipo de muestras de agua de la base de datos geoquímica del AGI .....	297
Figura 124 Gráfico de matrix plot de componentes principales, etiquetas en base a geología de la base de datos geoquímica del AGI .....	298
Figura 125 Gráfico de matrix plot de componentes principales, etiquetas en base a estructuras geológicas de la base de datos geoquímica del AGI .....	299
Figura 126 Gráfico de matrix plot de componentes principales, etiquetas en base a tipo de acuíferos de la base de datos geoquímica del AGI.....	300
Figura 127 Gráfico de matrix plot de componentes principales, etiquetas en base a pedología de la base de datos geoquímica del AGI .....	301
Figura 128 Gráfico de matrix plot de componentes principales, etiquetas en base a vulnerabilidad acuífera de la base de datos geoquímica del AGI .....	302
Figura 129 Dendogramas de sitios de muestreo de la base de datos geoquímica del área geográfica de interés .....	304
Figura 130 Dendogramas de variables de la base de datos geoquímica del área geográfica de interés.....	305
Figura 131 Árbol de clasificación de la base de datos geoquímica del AGI, variable de decisión por tipo de muestras .....	307
Figura 132 Árbol de clasificación de la base de datos geoquímica del AGI, variable de decisión por geología .....	309
Figura 133 Árbol de clasificación de la base de datos geoquímica del AGI, variable de decisión por estructuras geológicas.....	311
Figura 134 Árbol de clasificación de la base de datos geoquímica del AGI, variable de decisión por tipo de acuífero .....	313

Figura 135	Árbol de clasificación de la base de datos geoquímica del AGI, variable de decisión por tipo de suelo.....	316
Figura 136	Árbol de clasificación de la base de datos geoquímica del AGI, variable de decisión por vulnerabilidad acuífera (Método DRASTIC) .....	318
Figura 137	Variograma espacial del Factor Principal 1 .....	321
Figura 138	Variograma espacial del Factor Principal 2 .....	321
Figura 139	Variograma espacial del Factor Principal 3 .....	322
Figura 140	Variograma espacial del Factor Principal 4 .....	322
Figura 141	Variograma espacial del Factor Principal 5 .....	323
Figura 142	Variograma espacial del Factor Principal 6 .....	323
Figura 143	Variograma espacial del Factor Principal 7 .....	324
Figura 144	Variograma espacial del Factor Principal 8 .....	324
Figura 145	Variograma espacial del Factor Principal 9 .....	325
Figura 146	Variograma espacial del Factor Principal 10 .....	325
Figura 147	Variograma espacial del Factor Principal 11 .....	326
Figura 148	Variograma espacial del Factor Principal 12 .....	326
Figura 149	Variograma espacial del Factor Principal 13 .....	327
Figura 150	Aporte de aguas subterráneas al río Suquiapa.....	331
Figura 151	Resultados de caudales diferenciales .....	332
Figura 152	Corte de Perfil AB .....	337
Figura 153	Corte de perfil CD .....	337

## INDICE DE MAPAS

Mapa 1 Acuífero de Santa Ana, Área de recarga y Subcuenca río Aranchacal. (AGI) .....	12
Mapa 2 Límites municipales en área geográfica de interés. ....	18
Mapa 3 Estructuras geovulcanológicas .....	28
Mapa 4 Pedología del área geográfica de interés .....	33
Mapa 5 Uso de suelo del Área geográfica de interés .....	34
Mapa 6 Geología del área geográfica de interés .....	35
Mapa 7 Manantiales en el área geográfica de interés .....	40
Mapa 8 Ríos principales y secundarios del área geográfica de interés .....	41
Mapa 9 Imagen satelital del tramo de la parte alta del río Suquiapa (Aranchacal).....	98
Mapa 10 Base de datos geoquímica en el área geográfica de interés.....	132
Mapa 11 Pozos excavados en el área geográfica de interés .....	137
Mapa 12 Pozos perforados en el área geográfica de interés .....	138
Mapa 13 Curvas de nivel cada 100 m. en el área geográfica de interés.....	139
Mapa 14 Curvas isofreáticas cada 50 m. en el área geográfica de interés.....	140
Mapa 15 Ubicación de acuífero poroso y superficial en el área geográfica de interés .....	148
Mapa 16 Acuífero libre, poroso de interacción directa superficial, Geología e índice de calidad de agua canadiense CCMEWQI .....	149
Mapa 17 Diagramas de Stiff en el área geográfica de interés.....	157
Mapa 18 Diagramas de Stiff en Acuífero de Santa Ana.....	158
Mapa 19 Diagramas de Stiff en área de recarga (Lago de Coatepeque) .....	159
Mapa 20 Sitios de inyección y detectores 1 y 2 seleccionados para la técnica de Trazadores.....	196
Mapa 21 Fuentes contaminantes en acuífero de Santa Ana.....	208
Mapa 22 Índice de calidad de agua canadiense (CCME-WQI) en el área del acuífero de Santa Ana.....	237
Mapa 23 Índice de calidad de agua canadiense (CCME-WQI) en el área de recarga (Lago de Coatepeque) .....	238
Mapa 24 Índice de calidad de agua canadiense (CCME-WQI) en el área de descarga del río Suquiapa .....	239
Mapa 25 Aptitud de uso de agua para riego en el área geográfica de interés.....	243
Mapa 26 Aptitud de uso de agua cruda para potabilizar en el área geográfica de interés.....	247
Mapa 27 Cortes y Perfiles para modelo conceptual en el área geográfica de interés. ....	336
Mapa 28 Mapa Hidrogeológico ANDA .....	367

## NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS

Ec.	Ecuación
EIQIA	Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos
Fig.	Figura
mol/L	Mol por cada litro (medida de concentración)
%	Porcentaje
REDOX	Reacciones de reducción y oxidación
pH	Potencial de Hidrógeno
DGOA	Dirección General de Observatorio Ambiental
DGSNET	Dirección General del Servicio Nacional de Estudios Territoriales
SNET	Servicio Nacional de Estudios Territoriales
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
L/s	Litro por segundo (medida de caudal)
ICA	Índice de calidad de agua
CCME-WQI	Canadian Council of Ministers of the Environment- Water Quality Index
Sub-i	Subíndice (referido al índice de calidad de agua superficial de Brown)
NMP	Número más probable (obtenido de recuento microbiológico)
FAU	Unidades de atenuación de formazina (unidades para medir turbidez)
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxígeno leída al quinto día
mg/L	Miligramo por cada litro (medida de concentración)
Na <sup>+</sup>	Catión sodio
Mg <sup>2+</sup>	Catión magnesio
Ca <sup>2+</sup>	Catión calcio
Cl <sup>-</sup>	Anión cloro
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Anión Sulfato
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Anión bicarbonato
Al <sup>3+</sup>	Catión aluminio
UFC	Unidades formadoras de colonias (obtenido de recuento microbiológico)
NMP/100ml	Número más probable en 100 mililitros (unidades de concentración de coliformes fecales)
AGI	Área geográfica de interés
N	Norte
W	Oeste
Km	Kilómetro
Av	Avenida
S.S.	San Salvador
C.P.	Calle poniente
Ej.	Ejemplo
A.N.	Aguas negras
S.A. de C.V.	Sociedad anónma de capital variable
etc.	Etcétera

# **I. ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

## **1.1. INTRODUCCIÓN**

El acuífero de Santa Ana es ampliamente explotado y se tiene un modelo conceptual y línea base básico, además no se ha realizado una correlación de toda la información hidrogeoquímica e hidroquímica existente, de manera integral. Así mismo, no se ha realizado un análisis histórico y global de toda la información que poseen las diferentes instituciones gubernamentales y privadas que explotan y han estudiado este acuífero, por lo anterior se requiere realizar dicha investigación, con el fin de proveer a las instituciones de herramientas que les permitan tomar decisiones de ordenamiento y protección para el recurso y para la población.

La presente investigación propone evaluar hidrogeoquímicamente el sistema de acuíferos de la subcuenca del río Aranchacal en el municipio de Santa Ana, y determinar su interacción con la hidroquímica superficial con el fin de proporcionar herramientas para que instituciones gubernamentales propongan medidas de protección, tratamiento, y se puedan definir áreas críticas de aguas subterráneas y superficiales; para reducir riesgos de enfermedades por su consumo o definir nuevas aptitudes para su uso.

La estructura del documento contiene dos partes importantes, primero los alcances y planteamiento de la investigación y luego la investigación propiamente realizada, ésta a su vez se subdividió en un apartado teórico y en uno experimental. En la matriz resumen de actividades presentada en la tabla 1 se detallan los objetivos de la investigación con sus correspondientes actividades, costos y recursos para llevarlos a cabo, también este documento contiene antecedentes sobre investigaciones de línea base, planteamiento de la investigación, hipótesis, marco teórico conteniendo información básica de la zona en estudio (geología, hidrogeología, hidrología e hidrogeoquímica), contiene además un resumen de la metodología a utilizar y finalmente un cronograma de actividades desarrolladas.

## 1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El acuífero de la ciudad de Santa Ana es un recurso importante para el desarrollo de esa ciudad, sus usos son diversos: Potabilización, riego, recreación, industria; por su parte el río Suquiapa alimentado por manantiales de este acuífero también es utilizado para producción piscícola, riego y generación de energía hidroeléctrica, entre otros usos, sin embargo el río Aranchacal-Suquiapa es uno de los tres ríos más contaminados de El Salvador (SNET, 2002); la contaminación del agua superficial y su interacción con el agua subterránea limita en cuanto a calidad los diferentes usos que se le dan al agua, y si aun así el agua es utilizada para consumo directo o indirecto, ésto supone un riesgo para la salud humana, por ello es importante realizar un estudio que explique a profundidad las interacciones que existen entre el agua subterránea y superficial de dicha subcuenca hidrogeológica, y para ello se debe de evaluar la mayor cantidad de variables posibles de las diferentes ramas científicas que influyen en esa interacción.

La geología, litología, estructuras geovulcanológicas, tipo de suelo, entre otras, son atributos físicos que definen, determinan y que con certeza aportan características químicas a las aguas que fluyen en esa matriz, desde su recarga en el Volcán Ilamatepec y Caldera Coatepeque (Pullinger, 1998), descarga subterránea a río Aranchacal, hasta su descarga superficial al río Lempa; también existen características propias del terreno: tales como elevación, pendiente, morfología, uso de suelo, entre otras que influyen en la velocidad advectiva, dispersión y distribución de agua superficial y subterránea en el área geográfica de interés; con los estudios hidrológicos e hidrogeológicos como tales, se evalúan variables hidráulicas, advectivas y químicas que aportan otras características, y la química de las muestras de agua evalúa directamente las composiciones puntuales de los sitios, con toda esa matriz de información y combinada con los datos de cantidad y calidad de agua se puede definir estadística y espacialmente la interacción del agua superficial y subterránea y de esa forma proponer medidas importantes de protección, remediación o descontaminación del Recurso Hídrico.



### 1.3. RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN.

En la Tabla 1 “Matriz resumen de la investigación” se detallan los productos específicos de la investigación y el enfoque metodológico o estructural que se persigue de manera deductiva, basado en el cumplimiento de un objetivo general, tres objetivos específicos, así como diversas actividades y subactividades consecuentes para llevar a cabo la investigación desarrollada. En la Figura 1, se presenta el esquema general del informe.

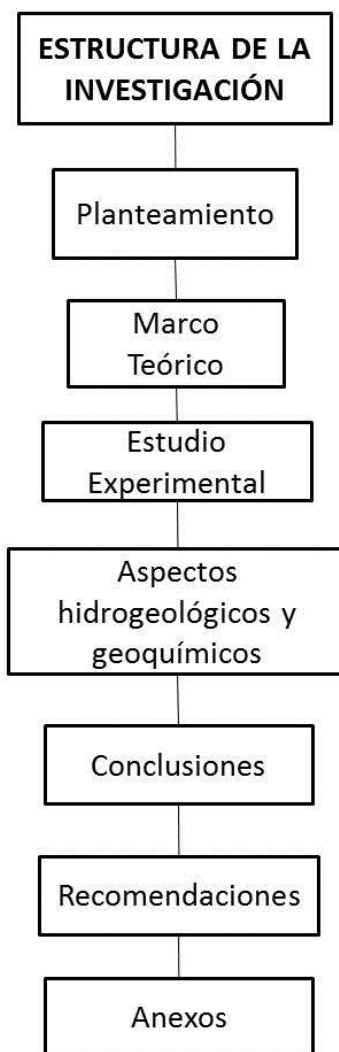


Figura 1 Estructura general del informe

Fuente: Elaboración propia.

## **1.4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

1. ¿Cuál es el modelo conceptual hidrogeológico en la subcuenca?
2. ¿Cuáles son los diferentes tipos de acuíferos presentes en la subcuenca hidrográfica del río Aranchacal?
3. ¿Cuál es la composición hidrogeoquímica, hidroquímica y de calidad del agua subterránea y superficial?
4. ¿Existe contaminación antropogénica superficial que pueda afectar a alguno de los sistemas acuíferos de la subcuenca del río Aranchacal?

## **1.5. OBJETIVOS**

### **1.5.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la hidrogeoquímica de las aguas en el sistema acuífero de la subcuenca del río Aranchacal y su interacción con la hidroquímica superficial.

### **1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Evaluar la hidrogeoquímica y calidad de agua del acuífero.
2. Evaluar la hidroquímica y calidad de agua del río Aranchacal.
3. Determinar la interacción entre los parámetros hidrogeoquímicos, hidroquímicos y de calidad del agua entre el sistema de acuíferos y el agua superficial.

Tabla 1 Matriz resumen de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECIFICOS	ACTIVIDADES	SUB-ACTIVIDADES	PRODUCTO
<p>Evaluar la hidrogeoquímica y la calidad de las aguas en el sistema acuífero de la subcuenca del río Aranchacal y su interacción con la hidroquímica superficial.</p>	<p>1. Evaluar la hidrogeoquímica y calidad de agua del acuífero.</p>	<p>1. Describir, integrar y actualizar el modelo conceptual definido en estudios previos.</p>	<p>1.1. Realizar revisión bibliográfica de la información hidrogeológica dentro del área geográfica de interés.</p>	<p>Modelo conceptual integrado de los sistemas de acuíferos de la subcuenca alta del río Aranchacal.</p>
			<p>1.2. Inventario de pozos y manantiales.</p>	<p>*Listado de manantiales y pozos que pueden ser monitoreados. *Fichas de sitios escogidos para muestreo en la presente investigación</p>
		<p>2. Evaluar las características hidrogeoquímicas y de calidad de agua de pozos en acuíferos porosos y profundos.</p>	<p>2.1. Toma de muestras de parámetros físicos, hidrogeoquímicos y microbiológicos en 6-9 pozos seleccionados con juicio criterioso en 2 campañas de muestreo (época seca y lluviosa).</p>	<p>Registros actualizados de agua subterránea</p>
			<p>2.2 Clasificación de aguas, Diagramas de Stiff, Piper, Cálculo de la especiación química.</p>	<p>*Diagramas interpretativos en un mapa * Análisis de Especiación en equilibrio químico por pozo.</p>

OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECIFICOS	ACTIVIDADES	SUB-ACTIVIDADES	PRODUCTO
			2.3. Análisis estadístico multivariado de datos para correlación y similitud estadística entre los datos hidrogeoquímicos de los sistemas de acuíferos poroso y profundo.	Informe estadístico y gráficos multivariados utilizando componentes principales y estadística bayesiana para correlación de datos entre los sistemas de acuíferos.
	2. Evaluar la hidroquímica, y calidad de agua del río Aranchacal.	3. Describir las características hidrológicas e hidroquímicas del área geográfica de interés y del río Aranchacal y principales tributarios, de acuerdo a estudios disponibles y revisión bibliográfica.		Línea base del río Aranchacal-Sauce y sus principales tributarios
4.1. Realizar aforos en tres tramos del río Aranchacal y Revisión de aforos históricos existentes.			*Análisis de Aforos *Modelo de especiación química. * Mapa de evolución de la calidad de agua (Cantidad y calidad de agua)	
4.2. Muestreo de parámetros físicos, químicos, microbiológicos y de calidad de agua en 3 sitios de muestreo en época seca.			*Informe e interpretación Estadística de datos hidroquímicos superficiales, correlaciones químicas y geográficas utilizando técnicas multivariadas y componentes principales.	
4.3. Cálculo de especiación química, y gráficos de calidad de agua.				
		4.4. Análisis estadístico de datos obtenidos en la investigación y los datos recopilados.		

OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECIFICOS	ACTIVIDADES	SUB-ACTIVIDADES	PRODUCTO
	3. Determinar la interacción entre parámetros hidrogeoquímicos, hidroquímicos y de calidad del agua entre el sistema de acuíferos poroso, profundo y el agua superficial.	5. Aplicar análisis estadístico multivariado a los datos obtenidos para determinar posibles relaciones. Acuífero poroso – Acuífero Profundo – Agua superficial (Manantiales y río Aranchacal).	5.1. Análisis de componentes principales.	*Informe de correlación entre agua superficial y agua subterránea (Acuífero Poroso y profundo) *Análisis de la dispersión de contaminantes en el Área Geográfica de interés.
5.2. Dendogramas de correlación				
5.3. Gráficos estadísticos descriptivos.				
5.4. Análisis correlativo de factores y parámetros.				
5.5. Análisis por unidades hidrogeológicas y geológicas.				
6. Evaluar índices de calidad de agua superficial y subterránea para poder comparar el grado de contaminación que existe en los diferentes tramos o áreas geográficas en estudio.		6.1. Calculo de Índice de Calidad de agua Superficial.	*Mapa de Índice de Calidad de Agua. * Elaboración de mapas interpretativos de las interrelaciones de la Hidrogeoquímica con la Hidroquímica del río Aranchacal.	
6.2. Calculo de Índice de Calidad de agua Subterráneo.				

OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECIFICOS	ACTIVIDADES	SUB-ACTIVIDADES	PRODUCTO
		7. Evaluación de normativas de aptitudes de uso de las aguas para cada resultado.	7.1. Aptitudes de uso de agua para consumo humano. 7.2. Aptitudes de uso de agua para riego. 7.3. Aptitudes de uso de agua para recreación.	*Evaluación de cumplimiento de normativas relacionadas

## 1.6. JUSTIFICACIÓN

En la cuenca alta del río Suquiapa las fuentes contaminantes de tipo doméstico, industrial, agroindustrial y difusas han aumentado considerablemente en las últimas décadas y a pesar de ello las aguas superficiales del río Suquiapa son utilizadas durante todo su recorrido y en especial en su desembocadura (Distrito de riego de Atiocy) para actividades agrícolas; por su parte, las aguas subterráneas del acuífero de Santa Ana son utilizadas para diversas actividades industriales, agrícolas, piscícolas, recreativas, etc. y también de acuerdo a estudios precedentes se sabe que éstas aguas poseen una vulnerabilidad importante a la contaminación.

Según ANDA en el 2008, la demanda de explotación anual del acuífero equivalía aproximadamente a 582 L/s, la cual no contempla los pozos de explotación privada, lo cual se estima en aproximadamente 200 L/s adicionales obteniendo un caudal total de explotación de 782 L/s equivalentes a 24.7 millones de m<sup>3</sup> al año. (MARN-BID 1209-OC-ES No.03, 2008)

La presente investigación pretende caracterizar la hidrogeoquímica del acuífero en la subcuenca alta del río Suquiapa y determinar su interacción con la hidrología superficial con el fin de proponer medidas generales de protección, tratamiento y descontaminación del río Suquiapa en su parte alta y definir áreas críticas contaminadas de aguas subterráneas para reducir riesgos de enfermedades por su consumo o definir nuevas aptitudes para su uso.

Otro aspecto importante que justifica la realización de este estudio es que además de que la ciudad de Santa Ana es una importante área de desarrollo para el país el río Suquiapa es uno de los 3 ríos más contaminados de El Salvador (Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2002) por ello además de conocer su interacción es importante caracterizar el flujo del cuerpo de agua en cuanto a cantidad y calidad a partir de parámetros hidrogeoquímicos y así proponer medidas importantes de protección, remediación o descontaminación del Recurso Hídrico.

Por lo anterior, es necesaria la elaboración de estudios hidrogeológicos que caractericen las formaciones acuíferas presentes, su extensión, capacidad, origen, composición hidrogeoquímica del agua y calidad del agua, etc. Los productos de la presente investigación hidrogeoquímica se detallan a continuación.

### **1.7. BENEFICIOS ESPERADOS**

Esta investigación realiza diversos análisis químicos de datos y los combina con metodologías novedosas de análisis de información que permiten conceptualizar mejor el área geográfica de interés y proponer medidas de protección del recurso y reducción de la contaminación ambiental del agua.

A continuación se presentan los elementos o productos específicos de la presente investigación:

1. Modelo conceptual integrado de los sistemas de acuíferos de la subcuenca alta del río Aranchacal.
2. Listado de manantiales y pozos.
3. Fichas de sitios escogidos para muestreo en la presente investigación.
4. Registros actualizados de agua subterránea.
5. Diagramas interpretativos en mapas.
6. Análisis de especiación en equilibrio químico por pozo.
7. Informe estadístico y gráficos multivariados utilizando componentes principales y estadística bayesiana para correlación de de datos entre los sistemas de acuíferos.
8. Línea base del río Aranchacal-Sauce y sus principales tributarios.
9. Análisis de aforos diferenciales.
10. Modelo de especiación química.
11. Mapa de evolución de la calidad de agua (Cantidad y calidad de agua).
12. Informe e interpretación.



13. Estadística de datos hidroquímicos superficiales, correlaciones químicas y geográficas utilizando técnicas multivariadas y componentes principales.
14. Informe de correlación entre agua superficial y agua subterránea (Acuífero Poroso y profundo).
15. Mapa de Índice de Calidad de Agua.
16. Evaluación al cumplimiento de normativas nacionales
17. Análisis de la dispersión de contaminantes en el Área Geográfica de interés.
18. Elaboración de mapas interpretativos de las interrelaciones de la Hidrogeoquímica con la Hidroquímica del río Aranchacal.

## **1.8. DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

La delimitación de la investigación es de tipo temporal y geográfico, a continuación se detallan las categorías:

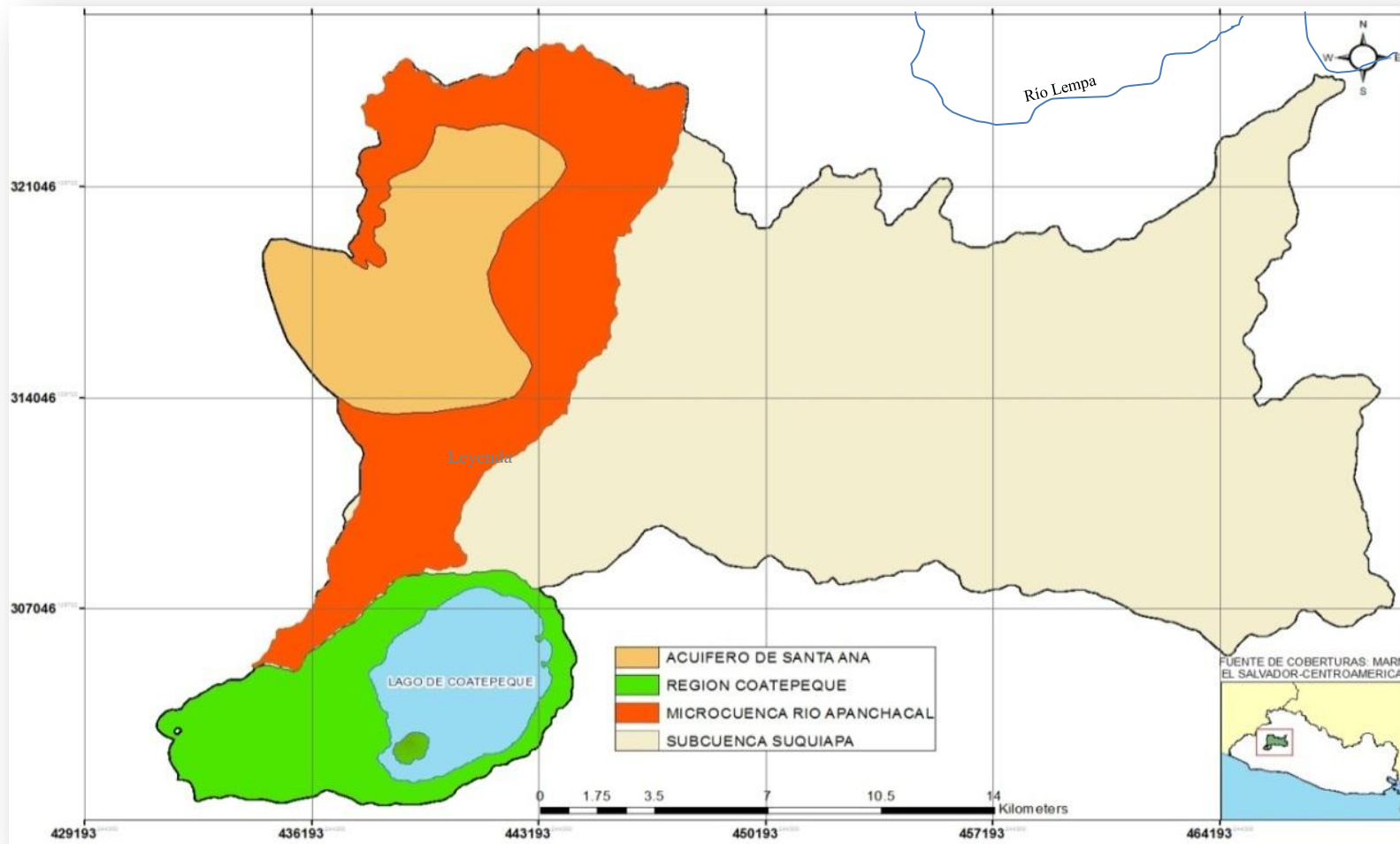
### **1. TEMPORAL**

Para el muestreo de aguas subterráneas, se han de realizar 2 muestreos en 6 pozos (época seca y lluviosa) en el área geográfica de interés y correlación con los datos históricos de investigaciones precedentes.

### **2. GEOGRÁFICO:**

La delimitación del área de estudio en la presente investigación será puntos de agua del Acuífero de Santa Ana e hidrología superficial dentro de la subcuenca del río Aranchacal.

En el Mapa 1 se muestra el área de estudio ó área geográfica de interés (AGI), compuesto por el acuífero de Santa Ana, área de recarga y subcuenca del río Aranchacal-Suquiapa.



Mapa 1 Acuífero de Santa Ana, Área de recarga y Subcuenca río Aranchacal. (AGI)

Fuente: Elaboración propia. Coberturas: MARN

## 1.9. ANTECEDENTES.

En la cuenca alta del río Suquiapa, específicamente en la subcuenca del río Aranchacal, las fuentes contaminantes de tipo doméstico, industrial, agroindustrial y difusas han aumentado considerablemente en las últimas décadas, y a pesar de ello las aguas superficiales del río Suquiapa son utilizadas en su desembocadura para actividades agrícolas, en el distrito de riego de Atiocoyo (Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2002), Las aguas subterráneas de dicha zona, también son utilizadas para diversas actividades relacionadas al consumo humano (López Araujo & Retana Peña, 2007).

A continuación, se detallan 5 estudios realizados en el área de interés que cuentan con información de referencia en cuanto a parámetros geológicos, topográficos, hidrológicos, geográficos y químicos que han servido de antecedentes a la presente investigación:

- PNUD (1981) “Plan Maestro para el Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos”: (PLAMDARH). El Salvador, documento básico No. 12, volumen 1: “Recursos y Demandas Potenciales en la Región A, Cuenca Alta”, estudio realizado por el Gobierno de El Salvador y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), que entre los años de 1979 y 1982 recopiló la mayor cantidad de información para conocer con certeza la situación del agua en la Región Hidrográfica “A”, región alta. Se describe la zona como una región accidentada geográficamente con una excelente y extensa red de comunicaciones hídricas.
- Pullinger, C. (1998). “Evolution of the Santa Ana volcanic complex, El Salvador” (M.S, thesis). Michigan: Michigan Technological University. Esta investigación es una tesis de maestría en la que se describe la cronología geovulcanológica del área de recarga: volcán Ilamatepec y Caldera de Coatepeque.
- Machuca W. (2006). “Estudio hidrogeológico del área de proyecto: Residencial Montecristo, Cantón Loma Alta y Flor Amarilla abajo; Municipio de Santa Ana,

Departamento de Santa Ana”, estudio elaborado por el Ing. Walter Edwin Machuca en Septiembre de 2006, el cual se realizó para determinar las alternativas de abastecimiento de agua potable para el proyecto urbanístico Residencial Montecristo que se encuentra aproximadamente a 5 km al sur de la Ciudad de Santa Ana, en donde predomina en un 95% la Formación San Salvador y en un 3% la Formación El Bálsamo, conteniendo materiales de buena permeabilidad.

- López Araujo, D., & Retana Peña, J. (2007). “Reconocimiento hidrogeológico de la zona norte del departamento de Santa Ana y área aledaña del departamento de Chalatenango”, UCA. Esta investigación realizada como tesis de grado en el área urbana de Santa Ana y zona norte de ésta, se realizó con el propósito de aportar elementos en sistemas de información geográfica que sirviesen de base al ente regulador de la explotación del Recurso ANDA para integrarlos posteriormente al Mapa Hidrogeológico de la República de El Salvador.
  
- MARN-BID 1209-OC-ES No.03. (2008). “Diagnóstico de la Calidad de Aguas Subterráneas, Modelo de Flujo y Evaluación de Riesgo a la Contaminación en tres zonas prioritarias: A) Zapotitán-Opíco, B) Subcuenca río Aranchacal (Santa Ana) y Subcuenca río Grande de San Miguel”, realizado por Hidrodesarrollo consultores. Este documento contiene mucha información química del acuífero de Santa Ana evaluada en cuanto a calidad del recurso en una campaña de muestreo, sin embargo no profundiza en la correlación de los datos químicos con otros aspectos importantes del sistema tales como geología o el modelo conceptual hidrogeológico y al tener como objetivo el diagnóstico de 3 acuíferos importantes del país pero dispersos en cuanto a localización geográfica no logra profundizar en el análisis (ya que desde el inicio no fue planteado ese como objetivo de la investigación); sino más bien desde una perspectiva nacional define directrices de actuación en cuánto a ordenamiento territorial y en una cita el mismo documento expone la recomendación de la realización de una investigación posteriores que profundice en la interacción superficial-subterránea del recurso.

## II. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se resumen los fundamentos teóricos, definiciones, conceptos y características locales de área de estudio. Se presenta información relevante y resumida en los distintos ejes de la investigación: Contexto local, clima, geología y vulcanismo, hidrología, hidrogeología, hidrogeoquímica, especiación química, dispersión de contaminantes, calidad de agua, conceptos de herramientas geoestadísticas, y definiciones acerca de interacción del agua superficial y subterránea que se utilizarán a lo largo de la investigación y específicamente útil como línea base del estudio experimental desarrollado en el capítulo 3. En la figura 2 se presenta el esquema general del presente capítulo.

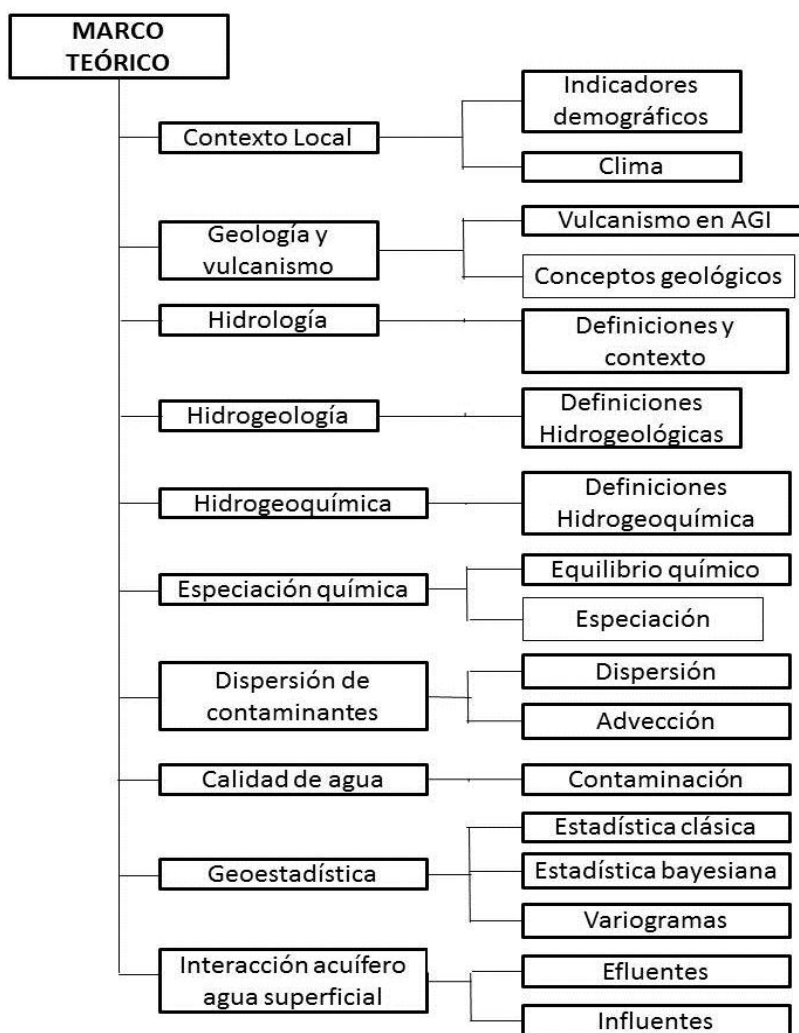


Figura 2 Esquema de capítulo II: marco teórico de la investigación

Fuente: Elaboración propia

## 2.1. CONTEXTO LOCAL

En este apartado se detalla el contexto geográfico, geopolítico y social en donde se desarrolla la investigación, su contenido describe los límites geográficos de la investigación, los indicadores demográficos de la zona y aspectos climáticos del área geográfica de interés, específicamente: Precipitación, humedad relativa y temperaturas mínimas, máximas y medias en la zona en estudio.

### 2.1.1. INDICADORES DEMOGRÁFICOS

De acuerdo al Censo de población y vivienda de El Salvador realizado en 2007, el municipio de Santa Ana, cabecera departamental del mismo nombre, posee un área geográfica de 400.05 Km<sup>2</sup>, posee una densidad poblacional de 613.48 habitantes por Km<sup>2</sup> (Ver Tabla 2 para ampliar sobre la estimación de este parámetro), el porcentaje de población urbana es equivalente a 83.26%; otros indicadores sociodemográficos y datos estadísticos del municipio se presentan en la Tabla 3 y en la Tabla 4. (Dirección General de Estadística y Censos, 2007)

Tabla 2 Densidad poblacional

Fuente: Censo de población y vivienda, El Salvador, 2007.

MUNICIPIO		Santa Ana
ÁREA (Km <sup>2</sup> )		400.05
POBLACIÓN (NÚMERO DE HABITANTES)	TOTAL	245,421
DENSIDAD POBLACIONAL (HABITANTE/Km <sup>2</sup> )		613.475816

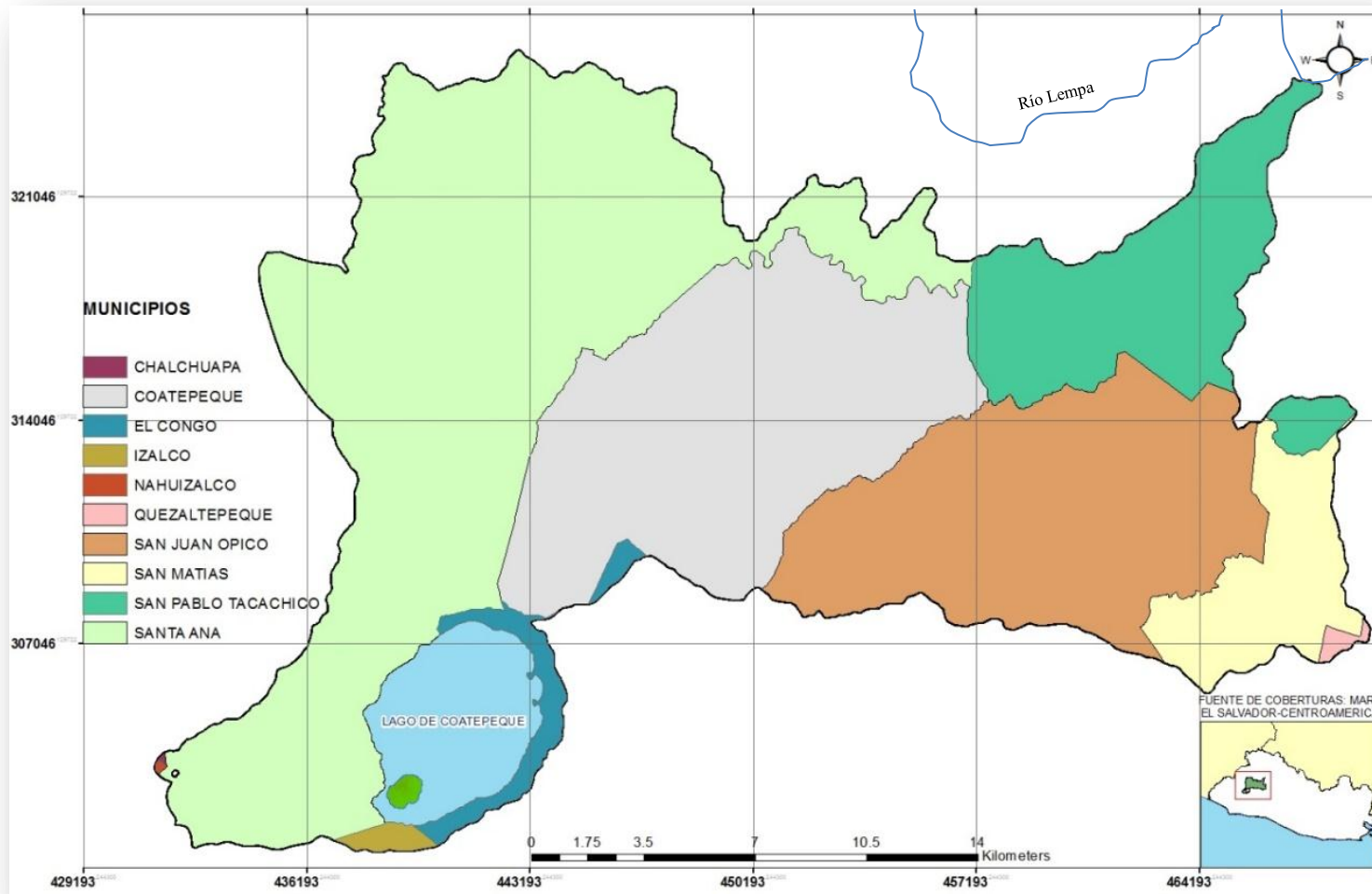
Tabla 3 Población por área y sexo

Fuente: Censo de población y vivienda, El Salvador, 2007.

MUNICIPIO: SANTA ANA		NÚMERO DE HABITANTES	
POBLACIÓN		TOTAL	245,421
		HOMBRES	117,565
		MUJERES	127,856
ÁREA	URBANO	TOTAL	204,340
		HOMBRES	9,7115
		MUJERES	107,225
	RURAL	TOTAL	41,081
		HOMBRES	20,450
		MUJERES	20,631
% POBLACIÓN URBANA		83.2610086	

En la Tabla 4 pueden observarse algunos indicadores sociodemográficos importantes como la tasa de mortalidad infantil, la cual es similar a la promedio nacional de El Salvador, también pueden resaltar algunos indicadores que están relacionados con la infraestructura de los hogares y los servicios que poseen de manera porcentual en los hogares del municipio de Santa Ana, como el porcentaje de los hogares que son abastecidos con agua potable (84.13%); dicha agua en su mayoría es proveniente del acuífero profundo y el 15.87% restante probablemente se compone de los hogares que se autoabastecen de agua de pozos artesanales (excavados), agua de manantiales, o de agua de ríos cercanos a sus hogares.

También destaca el indicador relacionado al porcentaje de hogares que no posee servicio sanitario en sus hogares (1.94%), lo cual conlleva a suponer que poseen letrinas y dependiendo de su construcción a su vez pueden ser fuentes puntuales de contaminación del acuífero superficial. En el Mapa 2 se muestran los límites municipales en el área geográfica de interés.



Mapa 2 Límites municipales en área geográfica de interés.

Fuente: Elaboración propia. Coberturas: MARN



Tabla 4 Indicadores sociodemográficos

Fuente: Censo de población y vivienda, El Salvador, 2007.

	MUNICIPIO	Santa Ana
	DENSIDAD	613.475816
	% URBANO	83.2610086
	% 60 AÑOS Y MÁS	10.4978792
TASA GLOBAL DE FECUNDIDAD (PROMEDIO DE HIJOS POR MUJER)		2.3
TASA DE MORTALIDAD INFANTIL (MENORES DE UN AÑO POR CADA 1000 NACIDOS)		25
TASA – ANALFABETISMO		11.8760454
% ASISTENCIA ESCOLAR		86.8736256
% HOGARES (SERVICIOS BÁSICOS)	AGUA POTABLE	84.1259126
	ELECTRICIDAD	90.2928016
	SIN SERVICIO SANITARIO	1.94206767
% VIVIENDAS	CON PISO DE TIERRA	14.6426402

### 2.1.2. CLIMA

Según Koppen, Sapper y Laurer, el microclima de la región del municipio de Santa Ana se define como “Sabana tropical caliente o Tierra caliente” (0-800 msnm). La estación de Santa Ana “El Palmar”, de donde se obtuvo la información que se presenta en este apartado, se encuentra ubicada al costado sur del estadio Oscar Quiteño, en el valle interior de la región occidental del país. Es una zona urbanizada en los alrededores, se caracteriza por tener tierras planas con suelo arcilloso. La región donde se ubica la estación se zonifica climáticamente según la regionalidad climática de Holdridge como “Bosque húmedo subtropical”, con biotemperatura y temperatura del aire, medio anual menor a 24°C. Los rumbos de los vientos son predominantemente del Suroeste y del Oeste durante la estación seca y lluviosa y la velocidad promedio anual es de 7.8 Km/hr.

### 2.1.2.1. CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE SANTA ANA.

En la Figura 3 se muestra el promedio mensual de precipitación en el municipio de Santa Ana, es importante resaltar que la época lluviosa principalmente se registra entre los meses de Mayo y Octubre y la época seca entre los meses de Noviembre y Abril, siendo generalmente los meses límites los considerados de transición propios de cada año hidrológico.

En la Figura 4 se observa el promedio mensual de humedad relativa en el municipio de Santa Ana; es importante destacar que el mes promedio más húmedo del municipio es septiembre y el más seco es febrero.

En la Figura 5 se muestra el promedio de temperaturas en el municipio de Santa Ana, correspondientes a la mínima, máxima y media para cada mes del año.

En general la temperatura mínima promedio es de 18.5°C, la temperatura máxima promedio de 30.1°C y la media de 22.8°C, estos datos aportan elementos acerca del contexto climático local.

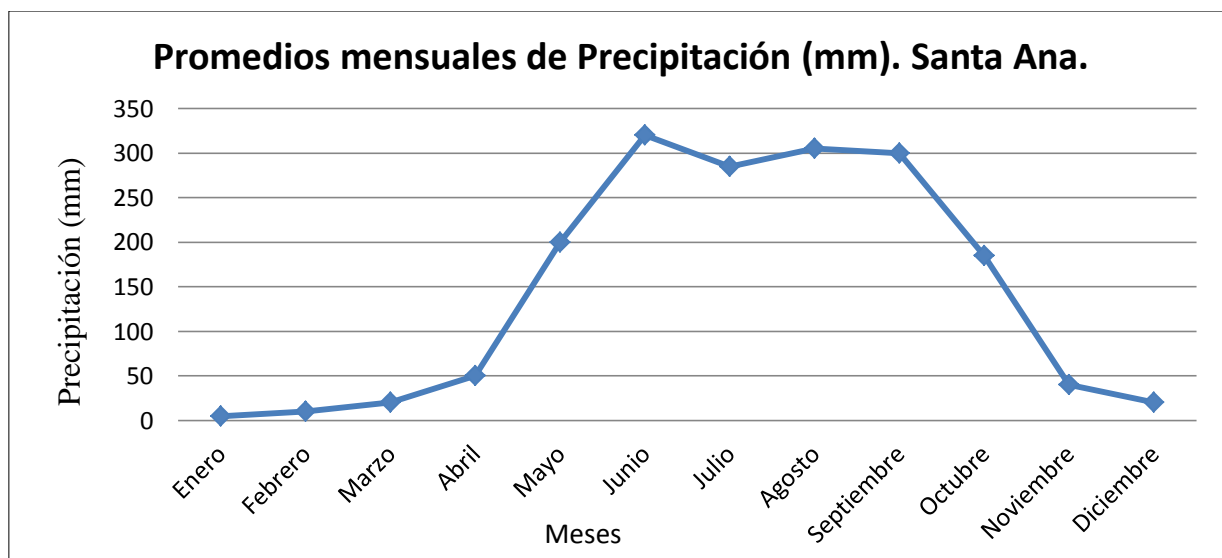


Figura 3 Promedio mensual de precipitación en municipio de Santa Ana

Fuente: Datos recuperados de <http://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/clima/perfiles+climatologicos/>, (2014)

Es importante mencionar que las temperaturas ambientales contribuyen indirectamente a la especiación química de las especies y a la microbiología de los cuerpos de agua en especial a los que se encuentran en reposo.

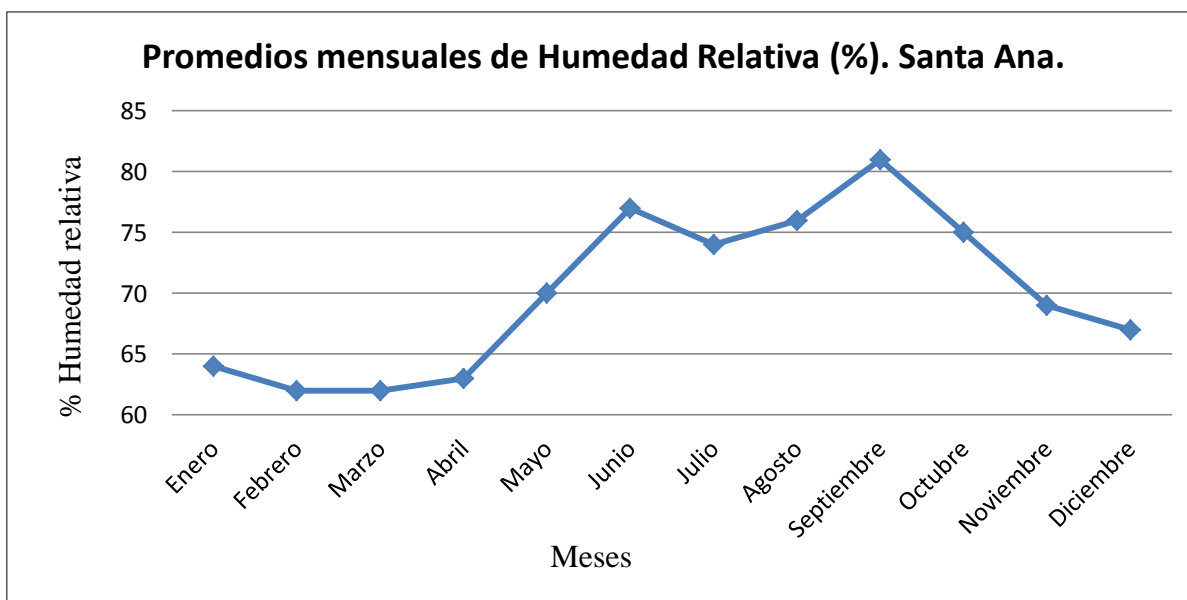


Figura 4 Promedio mensual de humedad relativa en municipio de Santa Ana

Fuente: Datos recuperados de <http://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/clima/perfiles+climatologicos/>, (2014)

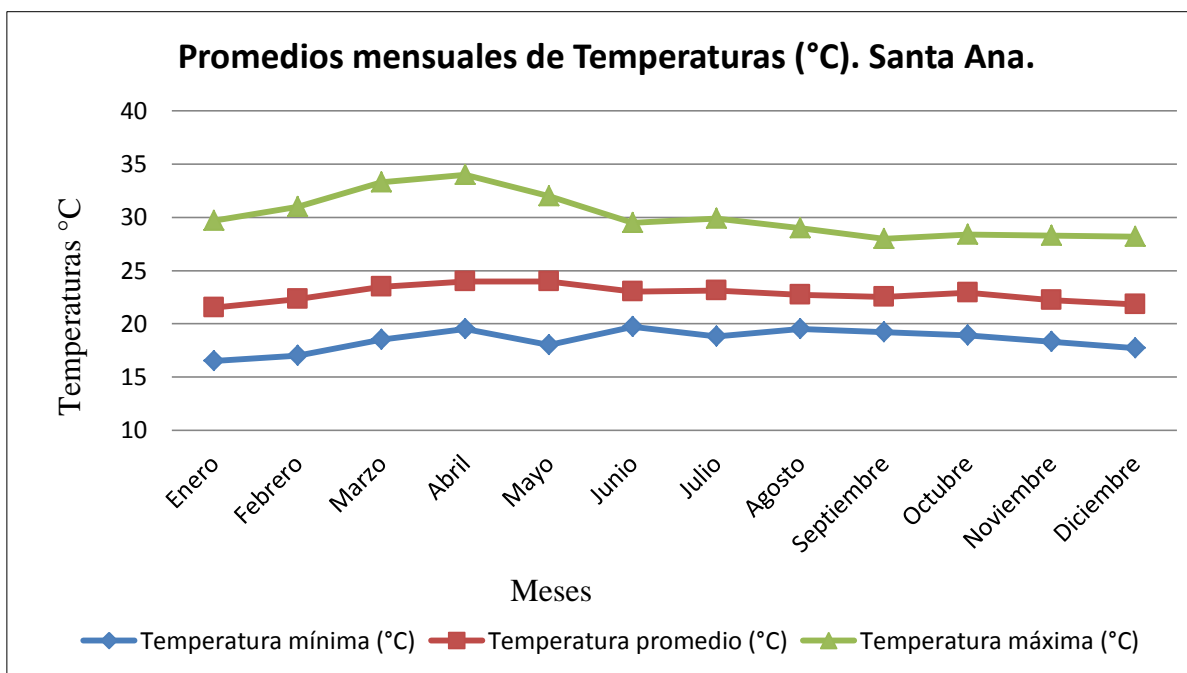


Figura 5 Promedio de temperaturas en municipio de Santa Ana

Fuente: Datos recuperados de <http://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/clima/perfiles+climatologicos/>, (2014)

## **2.2. GEOLOGÍA Y VULCANISMO**

Este apartado define el marco geológico y su aporte al modelo conceptual del sistema. La estructura investigativa de la presente caracterización geológica conlleva un fundamento teórico acerca del vulcanismo y geología del área geográfica de interés.

### **2.2.1. DEFINICIONES GEOLÓGICAS Y CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL**

A continuación se presentan definiciones importantes para este apartado sobre geología, vulcanismo. (SNET, 2004)

- Andesita: Roca ígnea de grano fino sin cuarzo o sin ortoclasa, compuesta de alrededor del 75 por ciento de feldespato plagioclasa y el resto de silicatos ferromagnesianos. Aparece en forma de lavas, posiblemente derivado de un magma basáltico por cristalización fraccionada.
- Arcillas: Silicatos hidratados finamente cristalinos, que se forman como resultado del intemperismo de los silicatos minerales tales como el feldespato, piroxeno y el anfíbol. Las arcillas más comunes pertenecen a los grupos de la montmorillonita e illita.
- Basalto: Roca ígnea de grano fino en la que predominan los minerales de color oscuro, que consisten de más de 50 por ciento de feldespatos plagioclasa y el resto de silicatos ferromagnesianos. Los basaltos y las andesitas representan aproximadamente el noventa y ocho por ciento de todas las rocas extrusivas. Se caracteriza por ser pobre en contenido de SiO<sub>2</sub> (45-50 %) y posee grandes concentraciones de FeO, MgO y CaO y tienen poco Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O.
- Calcita: Mineral compuesto de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>).
- Caldera: Depresión volcánica aproximadamente circular, de paredes interiores abruptas, cuyo diámetro es cuando menos 3 ó 4 veces mayor que su profundidad. El lago de Coatepeque es un típico ejemplo de colapso de caldera.
- Ceniza volcánica: Es toda partícula piroclástica menor que 2 mm de diámetro y compuesta por material vítreo, cristalino o lítico, formados cuando el magma es arrojado al aire durante una erupción.

- Cráter: Depresión o cuenca volcánica de paredes abruptas, casi circular, cuyo diámetro es menor que tres veces su profundidad. Comúnmente ocupa la cima de un volcán.
- Cristal: sólidos cuyos átomos están dispuestos en forma ordenada. Puede o no desarrollar caras externas que le den forma cristalina.
- Depósitos de caída de cenizas o lluvia de tefras: Es un depósito de piroclastos formado por la erupción de material fragmentado a través de un conducto por una explosión volcánica y eyectada a la atmósfera por medio de una columna eruptiva o por elutriación de finos sobre un flujo piroclástico en movimiento.
- Depósitos de flujo piroclástico: Sinónimo de ignimbritas.
- Efusiva: Sinónimo de extrusivas. Son las rocas formadas por la salida de magma en forma de lava a la superficie y se endurecen con el enfriamiento.
- Erupción central: Es una erupción volcánica con boca más o menos circular.
- Erupción de fisura: Extrusión de lava por una fisura de la corteza terrestre.
- Erupción pliniana: Son las erupciones más violentas que liberan gran cantidad de energía en pocos segundos. Ocurren generalmente como respuesta a la despresurización violenta de una cámara magmática dacítica a riolítica. Esta columna se compone de fragmentos sólidos y gas y puede superar los 30 km de altura por encima del cráter.
- Erupción volcánica: Emisión explosiva o quieta de lava, materiales piroclásticos o gases volcánicos a la superficie de la Tierra, usualmente por un cráter y raramente por fisuras.
- Estrato potente: Capa geológica de gran espesor.
- Estrato incompetente: Capa geológica de poca dureza y poco resistente.
- Estrato competente: capa geológica dura y resistente.
- Estratificación: Término colectivo que se usa para indicar la existencia de capas o estratos en las rocas sedimentarias. Algunas veces se usa como sinónimo de plano de estratificación.
- Falla: Superficie de ruptura de una roca a lo largo de la cual ha habido movimiento diferencial.
- Feldespatos: Minerales silicatados compuestos de tetraedros de silicio-oxígeno y aluminio-oxígeno unidos en una red tridimensional con iones positivos encajados en dos intersecciones de la red de tetraedros cargados negativamente.

Se les clasifica como silicio-aluminatos. Cuando el ion positivo es potasio  $K^+$ , el mineral resultante es ortoclasa; cuando es sodio  $Na^+$ , el mineral es albita; cuando es  $Ca^{+2}$ , el mineral anortita.

- Plagioclasa: Albita y anortita.
- Forma cristalina: La forma geométrica tomada por un mineral, que da una expresión externa del arreglo interno de los átomos.
- Fractura: Como característica de los metales y los minerales, se aplica a la forma en la que un mineral se rompe cuando no tiene clivaje.
- Granito: Roca ígnea de grano grueso en la que predominan los minerales de color claro que consisten de casi 50 por ciento de ortoclasa, 25 por ciento de cuarzo y el resto de feldespatos plagioclasa y silicatos ferromagnésicos. Los granitos y granodioritas constituyen el 95 por ciento de todas las rocas intrusivas.
- Ignimbrita: El término ignimbrita tiene sus raíces en el latín ignis – fuego- e imber- lluvia- para describir a todas las rocas formadas a partir de un material caliente finamente fragmentado que se desplaza lateralmente a la superficie. Los depósitos ignimbríticos corresponden al colapso gravitatorio continuo de una columna eruptiva pliniana.
- Lapilli: Todo fragmento volcánico entre 2 mm y 64 mm de diámetro.
- Lava: Magma que ha escurrido sobre la superficie terrestre, o roca que se ha solidificado a partir del material original que es el magma.
- Magma: Silicatos fundidos que se presentan en forma natural, que pueden tener cristales de silicatos en suspensión o gases disueltos, o ambos. Estas condiciones se pueden encontrar en general en una mezcla que contenga hasta 15 por ciento de cristales, pero no más del 11 por ciento de gases disueltos.
- Magnetita: Mineral de óxido de hierro,  $Fe_3O_4$ . Es de color oscuro, fuertemente magnético.
- Micas: Grupos de silicatos minerales que se caracterizan por tener laminillas u hojuelas de clivaje resultantes de su ordenamiento atómico, de acuerdo con este ordenamiento, los tetraedros de silicio-oxígeno están enlazados en hojas. La biotita es la mica ferromagnésica, negra; la muscovita es la mica potásica, blanca.

- Mineral: Elemento o compuesto sólido que se presenta naturalmente. Tiene una composición definida y un arreglo interno ordenado de sus átomos, conocido como estructuras cristalinas, lo que da propiedades físicas y químicas únicas, incluyendo la tendencia a adoptar ciertas formas geométricas llamadas cristales.
- Piroclasto: Se refiere al origen de los fragmentos a partir de una erupción volcánica explosiva.
- Roca: Agregado de minerales de diferentes clases en proporciones variables.
- Roca ígnea: Agregado de silicatos minerales entrelazados, formados por el enfriamiento y solidificación del magma.
- Roca piroclástica: Rocas fragmentaria arrojada por una explosión volcánica y depositada por el aire o un flujo piroclástico, que se han litificado. Ejemplo: tobas, tobas brechadas, tobas líticas.
- Sedimentación: Proceso mediante el cual se asienta la materia orgánica y la mineral.
- Silicatos: Minerales con estructura cristalina que contienen tetraedros de SiO<sub>4</sub>, colocados.
- Tefra: Nombre genérico para designar depósitos piroclásticos no consolidados que podrían incluir depósitos de flujos piroclásticos.
- Volcán: forma terrestre desarrollada por la acumulación de productos magmáticos cerca de conducto central.

#### **2.2.1.1. VULCANISMO EN LA ZONA DE ESTUDIO**

A continuación se presenta información relevante acerca del vulcanismo en el área de estudio:

##### **A. VOLCÁN DE SANTA ANA**

Este volcán, cuyo nombre indígena es Ilamatepec, está situado entre los departamentos de Santa Ana y Sonsonate. Es el más alto del país, ya que alcanza los 2365 metros sobre el nivel del mar. Está aproximadamente a 50 km. al oeste de la ciudad de San Salvador.

De acuerdo a Pullinger (1998), el complejo volcánico de Santa Ana consiste de la caldera de Coatepeque, los volcanes de Santa Ana e Izalco, y varios conos de escoria y cráteres de explosión a lo largo de fallas al noroeste y sureste de la cima del volcán de Santa Ana. En las faldas del volcán Ilamatepec se encuentran los volcanes siguientes:

- Cerro Verde, con 2030 msnm., formado principalmente por escoria volcánica.
- Astillero, con una altura de 1480 msnm.
- San Marcelino/Cerro Chino, con 1260 y 1323 msnm, respectivamente.
- Volcán de Izalco, con 1950 metros de altura msnm.
- Caldera de Coatepeque, en cuyo interior se localiza el lago del mismo nombre, que posee un área de 165 km<sup>2</sup>.
- El Conejal, con 1495 msnm

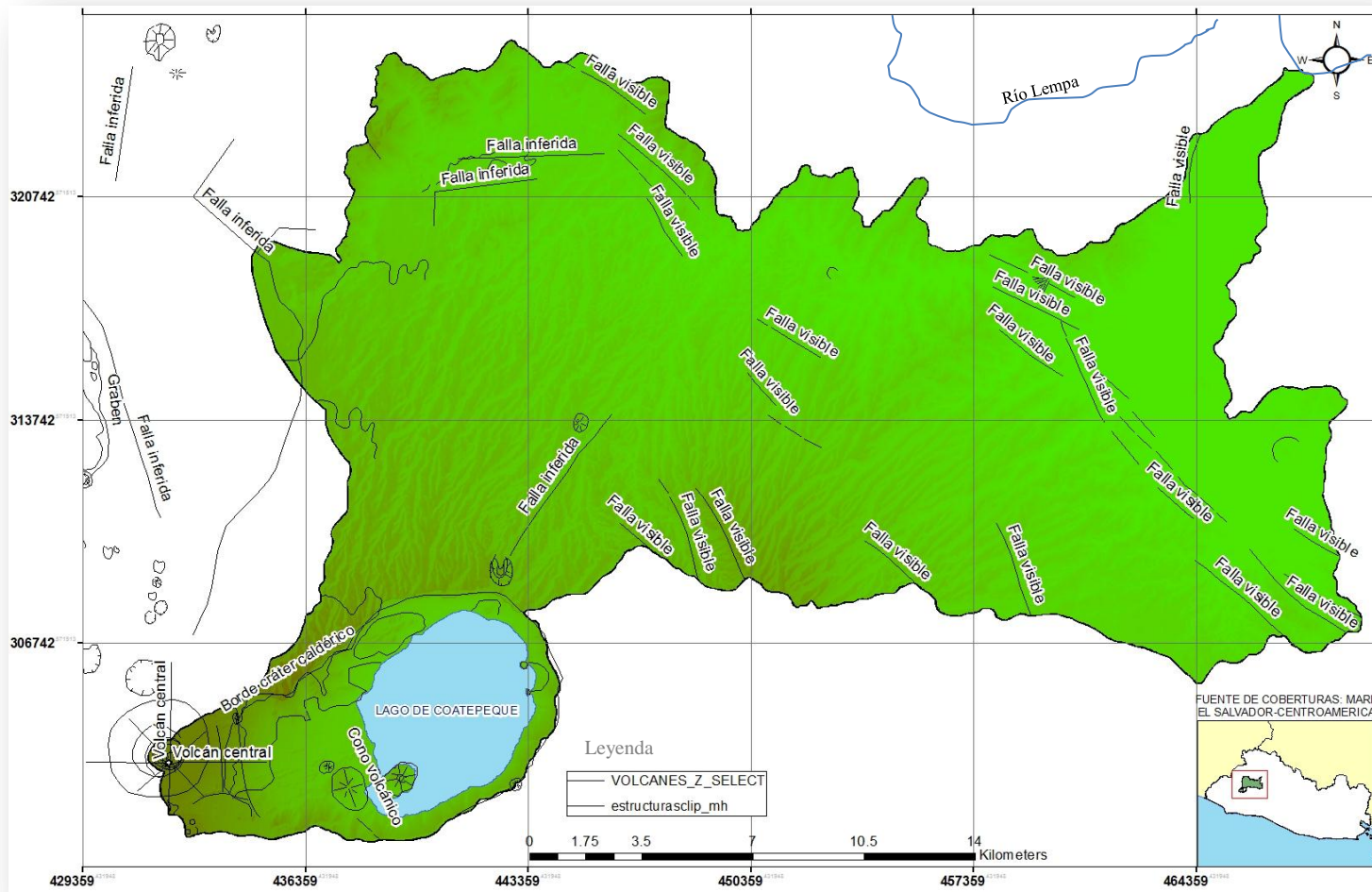
El cráter del volcán de Santa Ana tiene un diámetro de aproximadamente 400 metros. Presenta una pequeña laguna, cuyas aguas son de color amarillo verdoso, debido a su contenido de azufre en suspensión. De acuerdo a reportes históricos estuvo en actividad en 1520, manteniéndose así con diferentes intervalos de tiempo hasta el año de 1920, cuando hizo erupción en forma conjunta con El Izalco. (Pullinger, 1998)

La actividad volcánica del complejo de Santa Ana inició con la creación del antiguo volcán de Coatepeque hace aproximadamente 0.22 millones de años. Dos importantes erupciones plinianas que resultaron en colapso caldérico ocurrieron hace aproximadamente 70 y 50 mil años, produciéndose la presente depresión donde se ubica el lago de Coatepeque. Luego de estos eventos la actividad volcánica se ubicó debajo de la presente posición del volcán de Santa Ana el cual todavía se mantiene en actividad. El colapso total del sector sur del volcán de Santa Ana ocurrió un tiempo después de la última erupción pliniana de Coatepeque, creando un depósito de avalancha de detritos de cerca de 6 km<sup>3</sup> el cual cubrió aproximadamente 300 km<sup>2</sup> y formó la península de Acajutla. Después del colapso la actividad volcánica de Santa Ana continuó, casi completamente rellenando el vacío dejado por el colapso y cubriendo los remanentes de la estructura precolapso. (Pullinger, 1998)



El estudio de las relaciones estructurales y estratigráficas del interior del cráter de Santa Ana evidencia un pequeño colapso en el lado oriental del cráter, el cual posteriormente ha sido rellenado por lavas y escorias que fluyeron hacia el Interior de la caldera de Coatepeque. Dicho colapso formó el área de pendiente suave al lado suroeste de la caldera, un área de aproximadamente 5 km<sup>2</sup>. Cráteres de explosión y conos de escoria se formaron a lo largo de un eje de fallas con direcciones NO-SE centrado en el volcán de Santa Ana probablemente como resultado de una migración de magma desde el reservorio magmático del mismo. La erupción más reciente de este grupo de centros eruptivos sucedió en 1722 con la erupción del cono de escorias San Marcelino. La actividad volcánica de Izalco inició en 1770 y continuó casi ininterrumpidamente hasta 1966. La composición de los productos del volcán de Izalco refleja un cambio en la actividad magmática del área, diferente al del volcán de Santa Ana y de los centros eruptivos del eje NO-SE. Con una elevación de 2381 msnm el volcán de Santa Ana domina el terreno un su alrededor. Su tamaño, compleja historia eruptiva y su intensa actividad fumarólica, inclusive el lago cratérico de aguas sumamente ácidas el cual se formó dentro del cráter (de 0.5 km de diámetro) creado en la erupción de 1904, hacen del volcán de Santa Ana el enfoque principal de posibles peligros volcánicos futuros. (Pullinger, 1998)

En el Mapa 3 se muestran las estructuras geovolcanológicas presentes en el área geográfica de interés, inclusive las fallas inferidas que son de notable interés en la interacción de agua subterránea del sistema.



Mapa 3 Estructuras geovolcanológicas

Fuente: Elaboración propia. Coberturas: MARN

## **B. EVOLUCIÓN DE COMPLEJO VOLCÁNICO SANTA ANA**

Registros históricos muestran que el volcán de Santa Ana ha estado activo desde el tiempo de la conquista española, particularmente entre 1520 y 1570 (Meyer-Abich, 1956, Macdonald, 1972; en Pullinger, 1998). Erupciones freáticas y freatomagmáticas en el cráter principal han ocurrido contemporáneamente con las erupciones del volcán Izalco y San Marcelino. Este último centro eruptivo es parte del complejo, situado al Sur Este del Volcán de Santa Ana, a continuación se detallará la historia eruptiva (Simkin & Siebert, 1994, en Pullinger, 1998).

1. En 1722: Erupción de cenizas.
2. En 1874: Fuerte actividad fumarólica, que llegó incluso a dañar las plantaciones de café.
3. En 1879: Pequeña erupción de cenizas.
4. En 1880: Erupción de cenizas con lanzamiento de escorias, cubierta de cenizas en las haciendas de los distritos de Sonsonate y Acajutla, hasta 10 cm de grosor.
5. En 1884: Fuerte erupción de gases con ligeros lanzamientos de cenizas.
6. En 1895: Actividad fumarólica.
7. En 1904: Empieza período de actividad de dos semanas lanzando esencialmente escorias; actividad simultánea con el volcán Izalco.
8. En 1920: Erupción simultánea con el volcán Izalco, que dura varias semanas hasta fines del año, se evapora considerablemente el pequeño lago del cráter, pero no se seca completamente.
9. En 1950: Débil actividad fumarólica.
10. En 2005: Volcán Ilamatepec hizo una erupción explosiva de moderada a mediana magnitud con lanzamiento de ceniza y rocas volcánicas en el área cratérico y alrededores del mismo. La dirección de los vientos al momento de la erupción era con dirección S-SO con 6 km/h por lo que el material emitido se desplazó en esta dirección.”(SNET, 2005).

### **C. DEPÓSITOS VOLCÁNICOS:**

El volcán está formado principalmente por escorias y mantos de ceniza. El volcán de Santa Ana ha eruptado una gran variedad de depósitos durante su historia eruptiva, que son generalmente de composición basáltica a andesítica. La más prominente colada de lava que cubre gran parte de los flancos del complejo, se extiende en algunas ocasiones a más de 20 km de la cima. Uno de esos flujos se observa a lo largo de la carretera Panamericana, junto al norte de la ciudad de Santa Ana. Williams & Meyer-Abich (1955, en Pullinger, 1998), creen que la mayor parte de la ciudad fue asentada sobre esas lavas.

### **D. PETROGRAFÍA:**

Las rocas del volcán Santa Ana consisten en basaltos, andesitas, basaltos olivínicos y andesitas labradoríticas. Las lavas de Santa Ana, se describen como andesitas y basaltos que contienen plagioclasa, clinopiroxeno y minerales opacos en una masa de grano fino de los mismos minerales con vidrio (Car, 1974, en Pullinger, 1998).

### **E. GEOQUÍMICA DEL VOLCÁN DE SANTA ANA:**

El volcán de Santa Ana presenta rocas cuarzo-andesíticas y leuco-cuarzo andesitas. El promedio general de SiO<sub>2</sub> oscila entre 53.5% y 61.4%. (Pullinger, 1998)

#### **2.2.1.2. GEOLOGÍA**

La geología se analizó desde 3 perspectivas: pedología, usos de suelo y la estratigrafía geológica del área geográfica de interés.

En el Mapa 4 se muestra la pedología del área geográfica de interés, en la cual se observa la clasificación general de los suelos en 4 grupos importantes los cuales se definen a continuación: (Organización de Estados Americanos (OEA), 2000)

- Andisoles: La propiedad distintiva de los Andisoles es la preponderancia de minerales tales como los complejos de aluminio y humus que resultan de la meteorización y transformación mineral con un mínimo de translocación. Entre las características que comparten casi todos los Andisoles se pueden mencionar una alta retención de fósforo, disponibilidad de agua y capacidad de intercambio catiónico. La mayoría de los Andisoles se han formado en eyecciones volcánicas o material clásico volcánico. Pueden desarrollarse en casi cualquier ambiente, en tanto que la temperatura y humedad sean adecuadas para permitir meteorización y la formación de minerales como los mencionados previamente
- Grumosoles: Son suelos de topografía un poco disectada que varía de ondulada a plana. Son altamente cohesivos, con un color negro acromático muy típico. Los horizontes superficiales son arcillas plásticas compactas y de color negro. Por lo general no varían hasta una profundidad de 75 cm. Estas capas se agrietan cuando están secas. Los subsuelos son arcillosos, plásticos, de color gris claro a oscuro y usualmente con moteados. Las capas de toba o talpetate se encuentran a profundidades que varían de 1 a 2 metros. En áreas muy pequeñas se presenta una delgada capa superficial de textura franca y de mejores características para cultivar. Son suelos poco permeables, con alta capacidad de retención de agua, y dificultan el laboreo y las comunicaciones durante la estación lluviosa. Debido a las pobres condiciones físicas de los suelos se requieren prácticas especiales de cultivo y el empleo de fertilizantes nitrogenados y fosforados. La mayoría de estos complejos pueden ser capaces de producir altos rendimientos de forraje y arroz durante todo el año. Algunas áreas pueden ser moderadamente apropiadas para cultivos, tales como maíz y maicillo. Necesitan la incorporación de fertilizantes nitrogenados y fosforados, particularmente en la producción de gramíneas como el arroz, el millo u otros cultivos similares.
- Latosoles: Los horizontes superiores de los latosoles arcillo rojizos son de textura franca a franco arcillosa, de color café muy oscuro y con estructura granular. Los subsuelos son arcillosos con estructura en bloques fuertes y con películas de arcilla, de color café oscuro a café rojizo oscuro, bastante desarrollados y profundos. Las capas inferiores están constituidas por pómez medianamente grueso de textura arenosa y de

cenizas volcánicas a distintas profundidades, y de intemperización variable. En general, varían de medianamente profundos a profundos; sin embargo, en las quebradas se encuentran suelos muy poco profundos y mezclados con Latosoles. La capacidad de producción varía de moderada a alta. Responden a los fertilizantes a base de nitrógeno y fósforo. Los latosoles predominan sobre los grumosoles en una relación de 70 y 30 por ciento respectivamente.

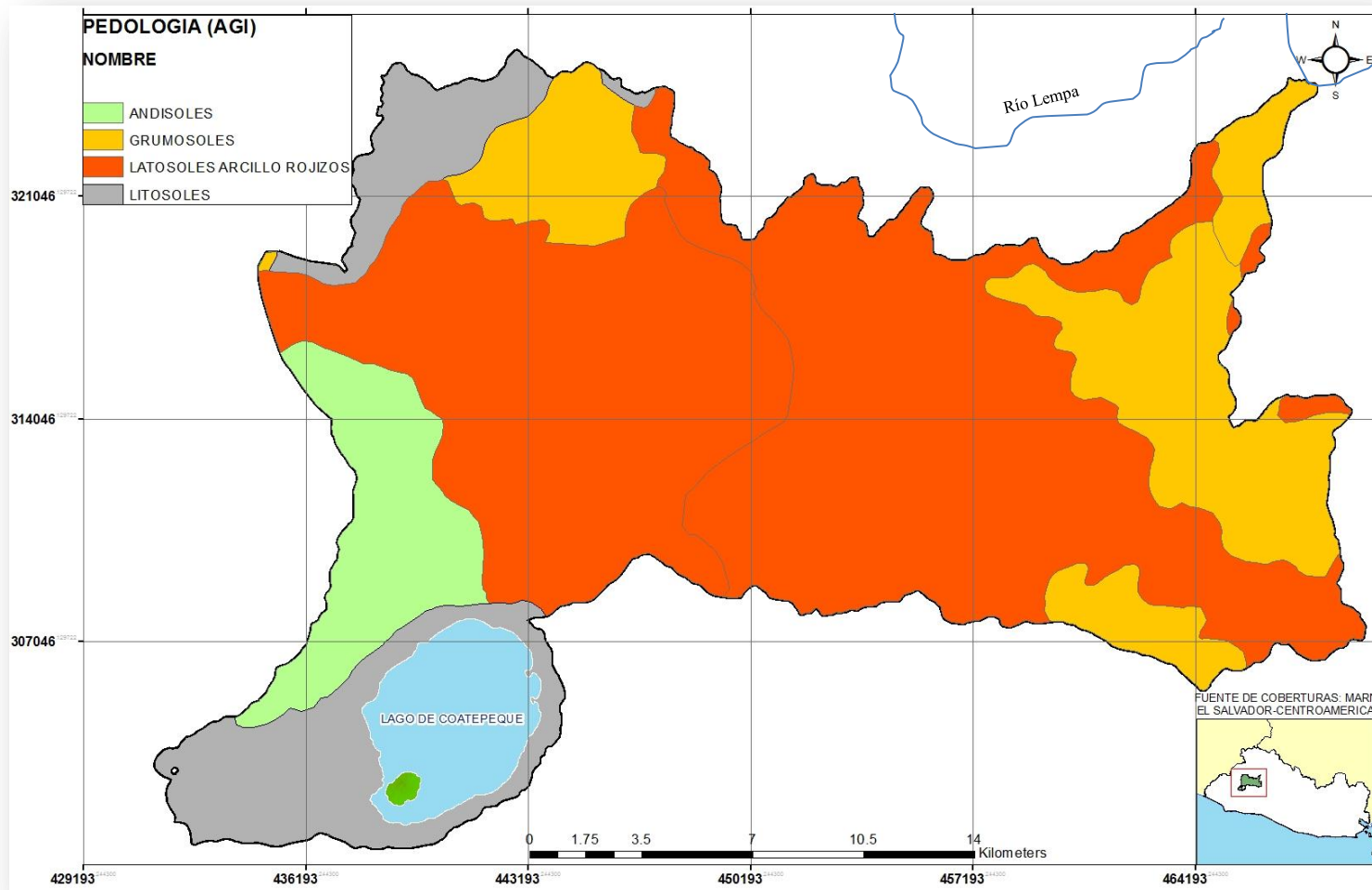
- Litosoles: Horizontes delgados. Influidos por el tipo de roca madre debido a poca evolución temporal o desarrollo en grandes pendientes. Inmaduros o brutos. Horizontes mal desarrollados.

En el Mapa 5 se muestran las coberturas de uso de suelo del área geográfica de interés a través de 6 categorías que se enlistan a continuación:

- Áreas urbanas
- Bosques naturales
- Café
- Caña de azúcar
- Pastos y granos básicos
- Industria y Agroindustria

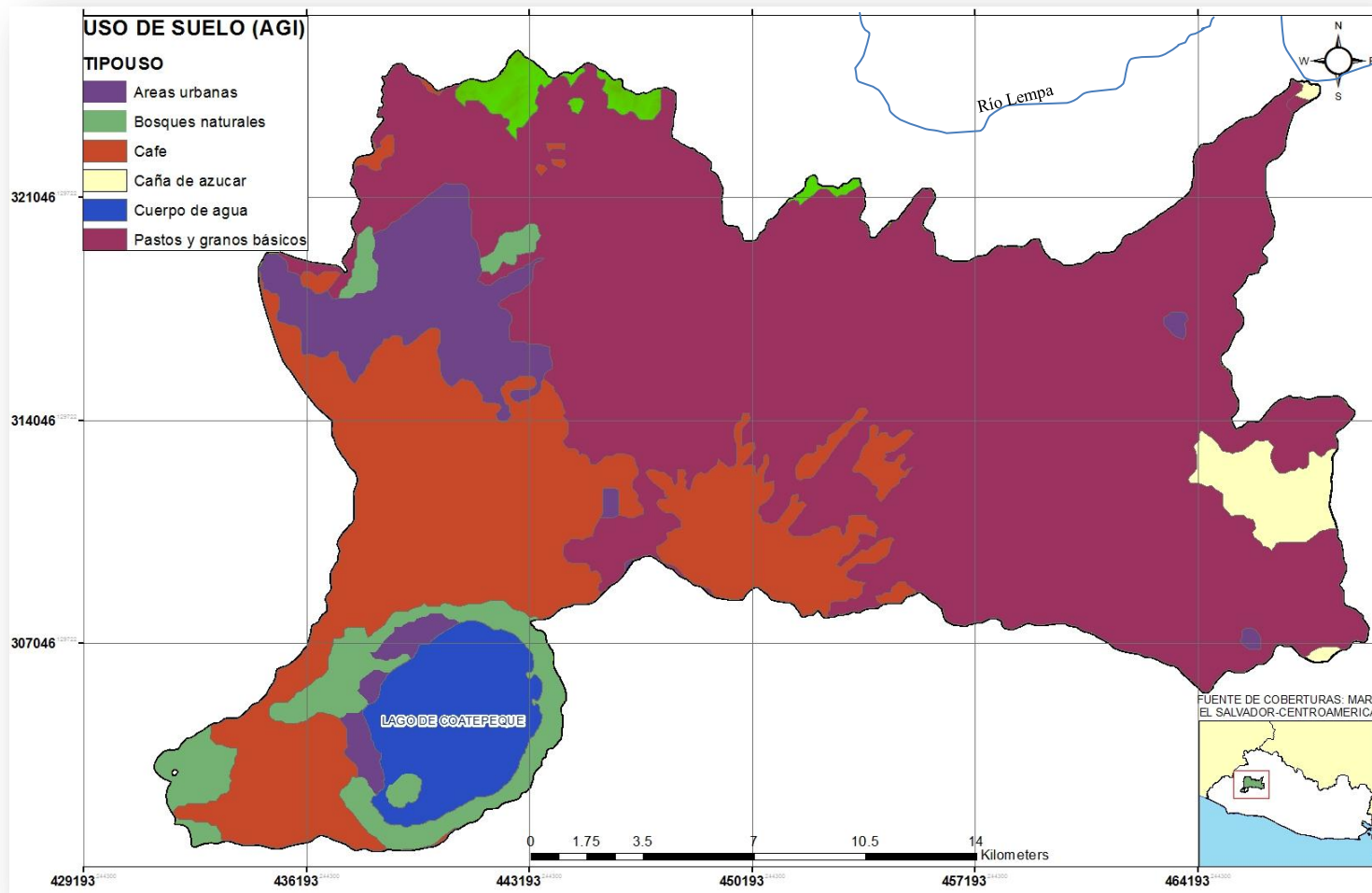
Es importante mencionar que en la zona alta de Santa Ana entre el municipio de Santa Ana y el área de recarga (Coatepeque, Volcán Ilamatepec) el uso de suelo es mayoritariamente destinado para el café, el área de bosques naturales es muy poco y el área de pastos y granos básicos abarca el área de roca no acuífera por lo que su riego debe hacerse mayoritariamente con agua superficial o abastecimiento potable.

En el Mapa 6 se muestra la geología del área geográfica de interés y en el apartado de análisis (3.1.2) se detallará la información acerca de las formaciones y miembros geológicos.



Mapa 4 Pedología del área geográfica de interés

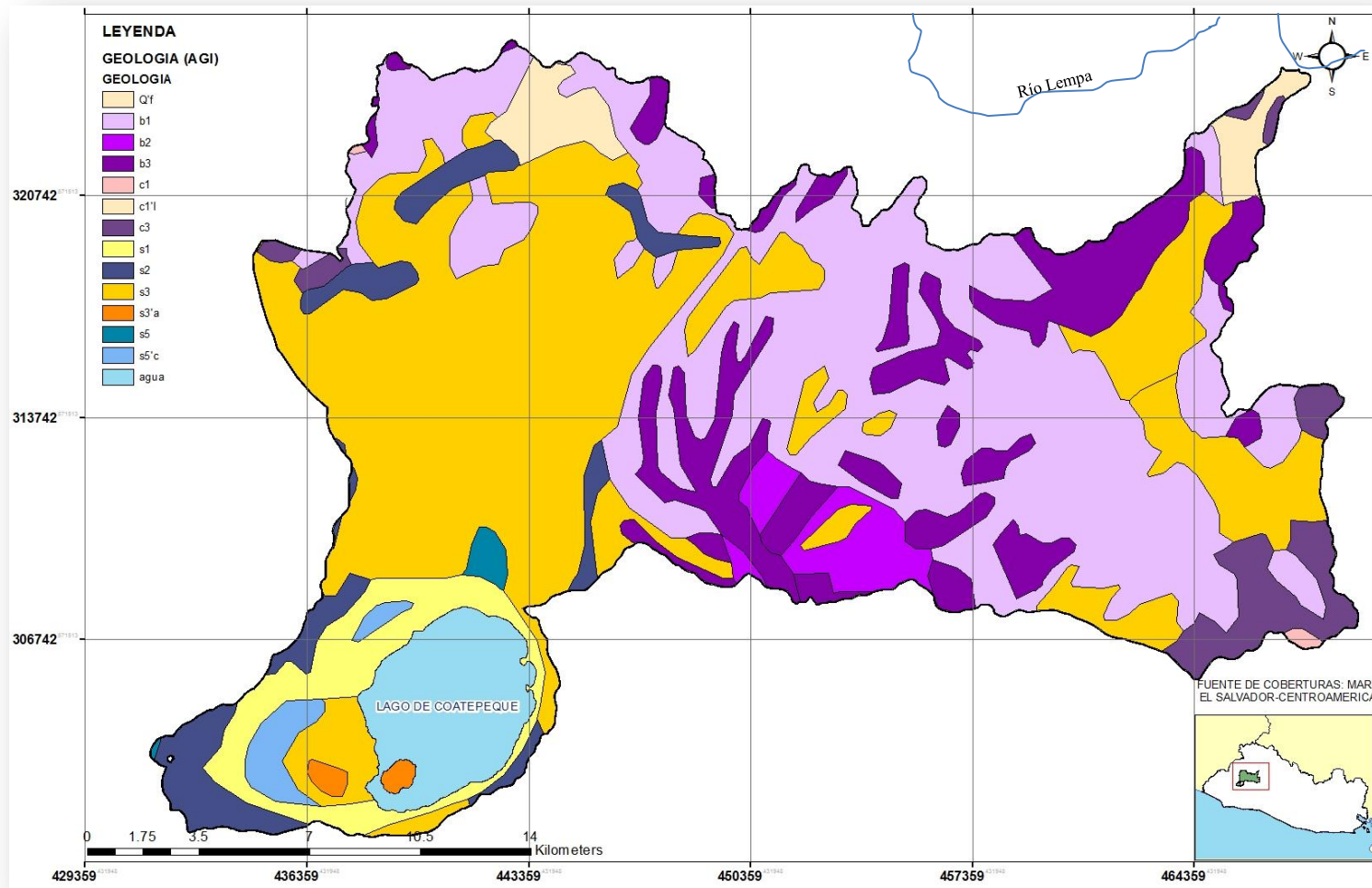
Fuente: Elaboración propia. Coberturas: MARN



Mapa 5 Uso de suelo del Área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia. Coberturas: MARN





Mapa 6 Geología del área geográfica de interés  
 Fuente: Elaboración propia. Coberturas: MARN.

## **2.3. HIDROLOGÍA**

En este apartado se mencionan conceptualmente los elementos más importantes de una cuenca hidrográfica y se caracteriza a la subcuenca de interés a partir de estos elementos.

### **2.3.1. DEFINICIONES Y CONTEXTO HIDROLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO**

A continuación se definen conceptos teóricos básicos acerca de los elementos de una cuenca hidrográfica:

- **Afluentes:** Son los ríos secundarios que desaguan en el río principal. Cada afluente tiene su respectiva cuenca, denominada subcuenca.
- **Cuenca alta:** Corresponde a la zona donde nace el río. Está caracterizado por erosión e incisiones verticales.
- **Cuenca baja:** Es la parte de la cuenca en la cual el material extraído de la parte alta se deposita en lo que se llama cono de deyección. Puede formarse un delta por sedimentación de limos. Cerca de la boca del río el flujo está alterado por convergencia con el otro cuerpo de agua.
- **Cuenca media:** Es la parte de la cuenca en la cual hay un equilibrio entre el material sólido que llega traído por la corriente y el material que sale. Visiblemente no hay erosión. Puede presentar brazos entrelazados y tramos meandrosos.

La aparición de entrelazamiento o meandros depende de la pendiente del río, el material de fondo y la descarga a curso lleno. Generalmente, los brazos entrelazados tienen fondos de grava, mientras que los canales meandrosos presentan fondos de arena.

- **Cuenca hidrográfica:** Es el territorio drenado por un único sistema principal de drenaje natural, es decir, que drena sus aguas a través de un único río, o que vierte sus aguas a un único lago endorréico. Una cuenca hidrográfica es delimitada por la línea de las cumbres, también llamada divisoria de aguas.

- Línea divisoria de aguas: Es una línea imaginaria que delimita la cuenca hidrográfica. Una línea divisoria de aguas marca el límite entre una cuenca hidrográfica y las cuencas vecinas.
- Relieve de la cuenca: Consta de los valles principales y secundarios, con las formas de relieve mayores y menores y la red fluvial que conforma una cuenca. Está formado por las montañas y sus flancos; por las quebradas o torrentes, valles y mesetas.
- Río principal: El río principal suele ser definido como el curso con mayor caudal de agua o bien con mayor longitud o mayor área de drenaje. Actúa como el único colector de las aguas. El curso del río principal es la distancia entre su nacimiento y su desembocadura.

A continuación se muestran las características generales de la subcuenca hidrológica del río Aranchacal:

- Nombre de la Subcuenca Hidrológica: río Suquiapa.
- Región Hidrográfica a la que pertenece: Región A, río Lempa.
- Límites de la Subcuenca o parte agua: En el Mapa 1 se muestran las áreas geográficas de interés para esta investigación. Las regiones en color anaranjado (Es decir todas las zonas a excepción de la región de Coatepeque) componen la Subcuenca del río Suquiapa.
- Área de la cuenca: La subcuenca del río Suquiapa tiene un área de 425 Km<sup>2</sup>.
- Longitud del cauce más largo: 42.8 Km.
- Elevaciones: En el Mapa 13 se muestran las curvas de nivel cada 100 m en el área geográfica de interés.
- Precipitación: En la figura 3 se puede observar el perfil de lluvia en el municipio de Santa Ana, se observa que la época lluviosa se registra generalmente entre los meses de Mayo y Octubre y la época seca entre los meses de Noviembre y Abril.
- Desembocadura: río Lempa antes de desembocar en Embalse Cerrón Grande.
- Límites municipales de la Subcuenca Hidrológica: Santa Ana, Coatepeque, San Juan Opíco, San Matías y San Pablo Tacachico.

### 2.3.1.1. USOS DEL AGUA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SUQUIAPA

Según (Espinoza Rivas, Merino, & Zavaleta, 2013) los usos del agua de la subcuenca del río Aranchacal-Suquiapa son:

- Generación de energía hidroeléctrica: La velocidad del cauce del río Suquiapa y de algunos de sus tributarios es utilizada para la producción de energía hidroeléctrica. En la Tabla 5 se presentan las centrales instaladas y proyectos en curso que utilizan el cauce del río Suquiapa.

Tabla 5 Minicentrales hidroeléctricas en la parte alta del río Suquiapa

Fuente: (SIGET, 2007)

<b>Planta</b>	<b>Río utilizado</b>	<b>Potencia instalada (MW)</b>
Central Hidroeléctrica Atehuesias	Río El Molino	0.60
Central Hidroeléctrica Cutumay Camones	Río El Sauce	0.40
Central Hidroeléctrica San Luis I	Río Suquiapa	0.63
Proyecto Hidroeléctrico San Luis II	Río Suquiapa	0.74

Entre las minicentrales hidroeléctricas instaladas se encuentra la Planta Hidroeléctrica San Luis N° 2, ubicada en la jurisdicción del cantón Nancintepeque. Esta minicentral es administrada por la Compañía Eléctrica Cucumacayán, S.A. de C.V. (CECSA) y permite una generación con dos unidades de 384 kW cada una. Esta minicentral se encuentra cercana al sitio A18SUQUI que contempla este estudio.

- Distrito de riego de Atiocoyo: Según la Ley de Creación del Distrito de Riego y Avenamiento N° 2 Atiocoyo, el Distrito será de una extensión superficial de cinco mil setecientos setenta hectáreas. Sus límites territoriales están comprendidos en jurisdicción de los Municipios de San Pablo Tacachico, en el Departamento de La Libertad, y Nueva Concepción y Agua Caliente, en el Departamento de Chalatenango. Una de las 3 zonas definidas para riego es San Isidro; delimitada por la margen derecha del río Lempa, margen izquierdo del río Suquiapa y la cota 285 msnm; los principales cultivos de la zona son

granos básicos, entre estos, arroz y maíz. También se cultivan cítricos, frutas y caña de azúcar.

- Turismo: La zona cuenta con algunos balnearios cuyas aguas provienen de fuentes subterráneas y manantiales de la zona. Uno de los sitios turísticos más grandes, es el Balneario Las Cascadas: ubicado en las cercanías del río Zarco, Hacienda San Cayetano, Lotificación Amayito; además se pueden observar piscinas artesanales en haciendas privadas, tal como se muestra en la figura 6, que se utiliza para fines recreativos.

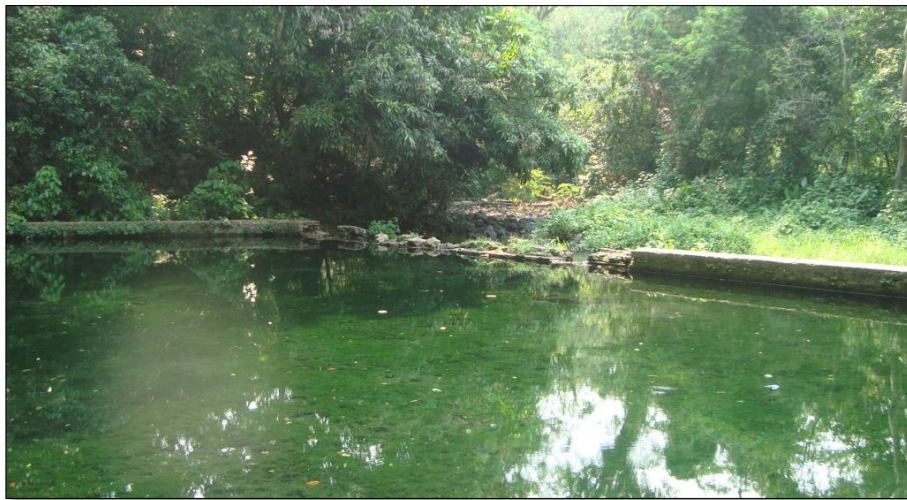
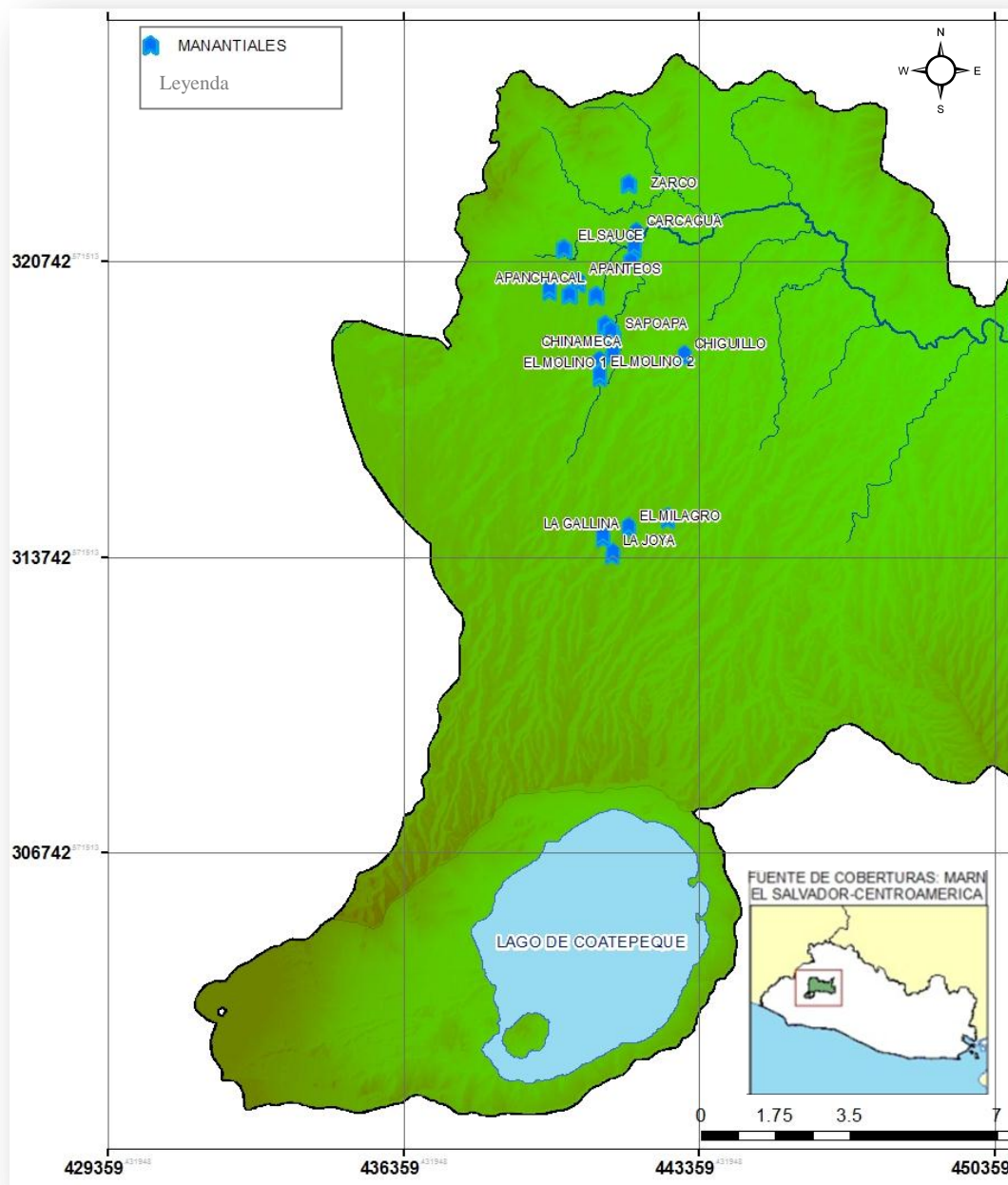


Figura 6 Piscina artesanal dentro de Hacienda San Francisco

Fuente: Fotografía propia.

- Acuicultura: La crianza de tilapias es una actividad característica de la zona. El Comité Acuicultores de Atiocoyo utiliza recursos hídricos del Distrito de riego de Atiocoyo para fines de producción acuícola. También se encuentra el Beneficio El Sauce, donde se crían y venden tilapias.
- Distribución de agua: Muchos de los manantiales que alimentan la corriente principal del río Suquiapa, además de ser espacios de recreación, también sirven como fuente de agua para consumo humano. Ver en el mapa 7 la distribución geográfica de los manantiales en la zona de interés, en el mapa 11 se muestran los pozos excavados y en el mapa 12 se pueden observar los pozos perforados en la zona de estudio.

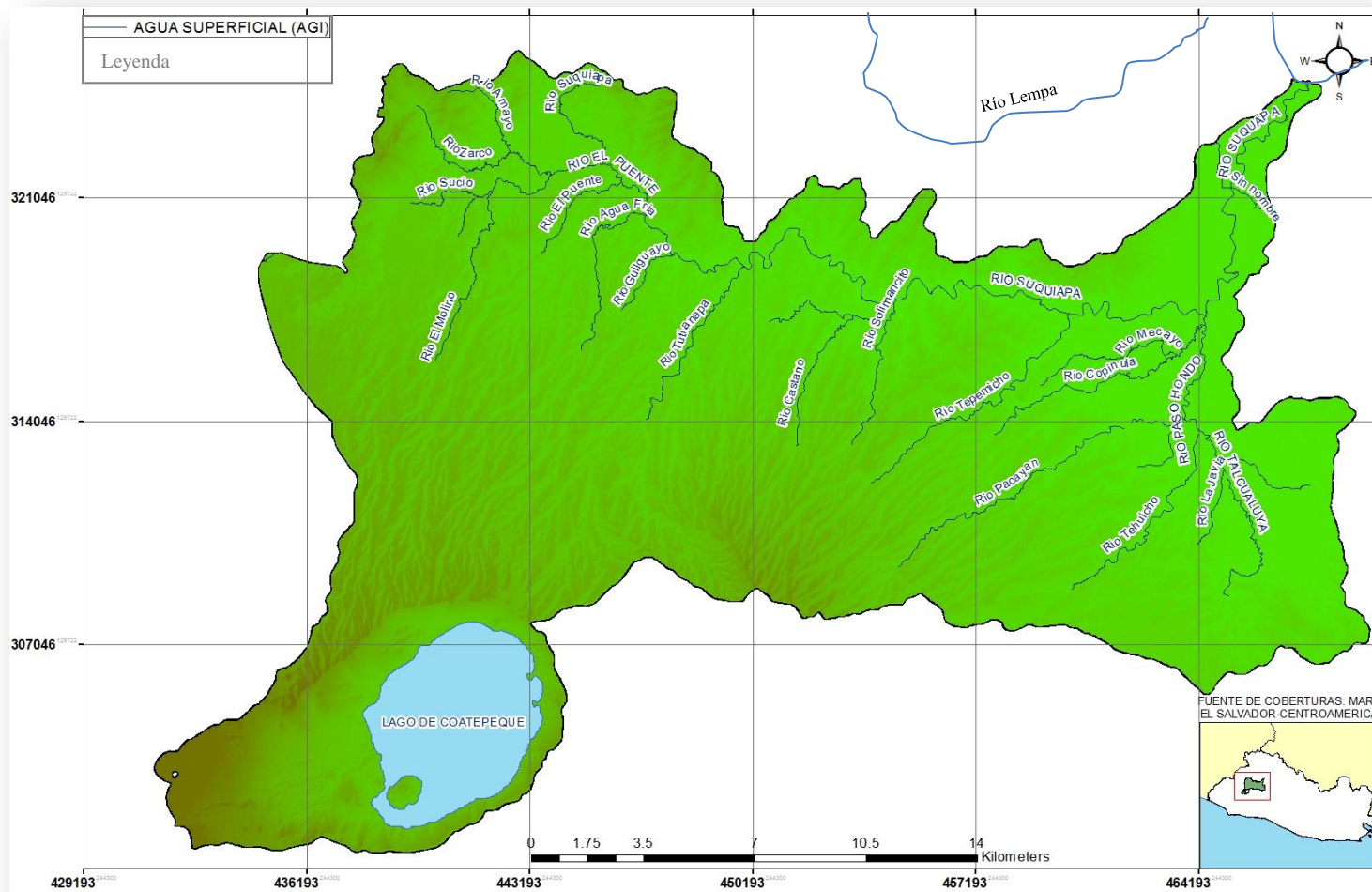
- Usos industriales: En el área geográfica de interés existen diferentes industrias que pueden consultarse en la tabla 17 se muestra su ubicación, tipos de efluentes y tratamientos realizados previos a descarga a cuerpo receptor y otros datos de la actividad en el área geográfica de interés, también en el mapa 21 puede consultarse su ubicación geográfica.



Mapa 7 Manantiales en el área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia. Cobertura de manantiales: MARN y ANDA





Mapa 8 Ríos principales y secundarios del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia. Coberturas: MARN

## **2.4. HIDROGEOLOGÍA**

El presente apartado explica los fenómenos hidráulicos y físicos relativos a la formación, movimiento y uso del agua subterránea en el acuífero de la ciudad de Santa Ana. En esta sección se mencionan las definiciones y conceptos más importantes, luego se detalla la metodología para la recolección y finalmente el análisis de los datos y presentación de los resultados.

### **2.4.1. DEFINICIONES HIDROGEOLÓGICAS**

La hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento y regulación. (Mijailov, 1985)

A continuación se presentan algunos términos hidrogeológicos importantes para el análisis posterior del presente estudio. (UNESCO, 1998)

- Acuífero: Cuerpo formado por una roca saturada de agua y lo suficientemente permeable como para conducir agua subterránea y proporcionar caudales económicamente significativos.
- Acuícludo: Cuerpo formado por una roca que es capaz de contener (almacenar) agua pero que no la cede de forma significativa a causa de su muy pequeña permeabilidad. Actúa como límite superior y/o inferior de un acuífero.
- Acuífero artesiano: Es un acuífero confinado que contiene agua subterránea sometida a una presión lo suficientemente alta como para provocar la descarga por pozos o manantiales (es un término que tiende a quedar obsoleto; se recomienda usar surgente).
- Acuífero confinado: Es un acuífero que se encuentra limitado superior e inferiormente por capas impermeables o por capas con una permeabilidad mucho menor que la del acuífero; estos acuíferos contienen agua subterránea confinada.



- Acuífero colgado: Es el acuífero no saturado que se encuentra separado de un cuerpo importante de agua subterránea inferior por una zona no saturada.
- Acuífero no confinado: Es un acuífero que contiene agua subterránea no confinada (agua freática). Se denomina también acuífero freático o acuífero libre
- Acuífero semicautivo: Es el acuífero que tiene por encima y/o por debajo una capa semipermeable (acuitardo) a través de la cual sale o entra agua del acuífero de forma difusa. También se llama acuífero semiconfinado.
- Acuífero surgente: Designación más reciente de acuífero artesiano.
- Acuitardo: Estrato que retarda pero que no impide el flujo (goteo) de agua desde acuíferos verticalmente adyacentes. No proporciona caudales de agua subterránea significativos directamente a los pozos o manantiales, pero puede servir como una unidad de almacenamiento del agua subterránea. También se llama nivel semipermeable y produce un semiconfinamiento.
- Agua artesiana: En el sentido tradicional es el agua subterránea con un nivel piezométrico lo suficientemente grande como para que fluya naturalmente por los pozos o manantiales. Es más recomendable hablar de agua surgente.
- Agua dulce: Es el agua natural que contiene una concentración de sal  $< 1\text{g/L}$ .
- Agua freática: Término que originalmente se aplicaba sólo al agua que tenía lugar en la parte superior de la zona de saturación bajo condiciones freáticas, pero ha pasado a aplicarse a toda el agua que se halla en la zona de saturación no confinada. En su límite superior está a la presión atmosférica.
- Agua subterránea: Agua subsuperficial que se encuentra en la zona de saturación. Incluye cursos de agua subterráneos. y agua subsuperficial
- Agua subterránea confinada: Es el agua subterránea sometida en un límite superior a una presión mayor que la presión atmosférica. Si se excava un pozo en el acuífero el nivel del agua en el pozo asciende por encima de dicho límite superior hasta igualar la presión atmosférica. Esta diferencia de altura corresponde a la diferencia de presión entre el punto en el que se ha excavado el pozo y la presión atmosférica.
- Agua surgente: Agua subterránea con un nivel piezométrico lo suficientemente alto como para que fluya naturalmente por pozos o manantiales.

- Área de captación: Es el área que se encuentra entre la zona en que se produce la recarga y el lugar de descarga.
- Capa confinante: Es la formación menos permeable situada por encima o por debajo a un acuífero.
- Ciclo hidrológico: Es una sucesión de pasos durante los cuales el agua pasa de la atmósfera al terreno y vuelve a la atmósfera. Incluye la evaporación desde el suelo o del mar o del agua continental, la condensación para formar las nubes, la precipitación, la acumulación en el terreno o en los embalses de agua, y la evaporación.
- Coeficiente de almacenamiento: Es el volumen de agua que libera o toma un acuífero por unidad de superficie del acuífero y por unidad de variación del nivel piezométrico.
- Coeficiente de infiltración: Fracción de la precipitación que penetra en el terreno.
- Conductividad hidráulica (K): es un coeficiente de proporcionalidad que describe la velocidad a la que el agua se mueve a través del medio permeable. Depende de la densidad y la viscosidad del fluido. Posee dimensiones de velocidad. Con frecuencia se denomina permeabilidad.
- Cono de bombeo: Es la depresión, en forma de cono invertido de la superficie piezométrica, en el que el nivel piezométrico en el acuífero desciende a causa de la extracción por bombeo. Define el área de influencia del pozo.
- Descenso: Es la disminución del nivel del agua que tiene lugar en un pozo debido a la extracción de agua subterránea.
- Difusión: Proceso de dispersión de un soluto como resultado de la agitación térmica de las moléculas de este soluto.
- Divisoria del agua subterránea: Es la línea del nivel freático o de la superficie piezométrica a partir de la cual el flujo de agua subterránea diverge.
- Flujo de base: Es la parte del caudal que entra en el cauce de un curso de agua desde los acuíferos. Esta es la escorrentía que se observa durante largos períodos en los que ni llueve ni tiene lugar fusión de hielo.
- Flujo de retorno: Es el flujo de agua que vuelve al cauce fluvial o al agua subterránea después de ser utilizada.
- Flujo subsuperficial: Es la proporción de la precipitación que no pasa al nivel freático y que se descarga desde la zona no saturada por medio de un drenaje lateral durante e

inmediatamente después de la lluvia. El agua subsuperficial se descarga directamente a los cauces fluviales o a los lagos.

- Manantial: Descarga de agua subterránea al exterior, concentrada en un punto o a lo largo de una línea.
- Manantial intermitente: Es el manantial que descarga durante determinados períodos y queda seco durante otros.
- Minería del agua subterránea: Es la extracción de agua de un acuífero que contiene agua subterránea fósil, o que se realiza a un caudal claramente superior al de recarga.
- Nivel de confinamiento: Es la superficie superior del agua subterránea que se encuentra sometida a una presión mayor que la atmosférica. Coincide con la superficie superior de un acuífero confinado. Si se excava un pozo el nivel del agua asciende hasta alcanzar la superficie piezométrica.
- Nivel del agua subterránea: Es la altura, en un determinado punto y para un tiempo en concreto, del nivel freático o de la superficie piezométrica de un acuífero. Puede variar con la profundidad.
- Nivel freático o libre: Es el nivel de agua subterránea de un acuífero no confinado, donde la presión es igual a la presión atmosférica.
- Nivel piezométrico: Es el nivel al que asciende el agua de un determinado acuífero cuando se mide con un piezómetro.
- Permeabilidad: Es la propiedad o la capacidad de una roca porosa, sedimento o terreno para transmitir un fluido; es una medida de la facilidad relativa del flujo del fluido bajo un gradiente piezométrico. Las expresiones "permeable" e "impermeable" tienen un significado relativo. Cuando se tiene una capa con una misma permeabilidad entre capas de permeabilidad menor, ésta puede actuar como un acuífero mientras que si las capas son más permeables puede actuar como acuitardo. El término permeabilidad se emplea coloquialmente como sinónimo de conductividad hidráulica.
- Porosidad: Es el cociente del volumen de poros y fisuras respecto al volumen total de una porción de terreno.
- Porosidad efectiva: Es la fracción del volumen total de una masa de un sólido o de una roca determinada que son intersticios interconectados a través de los que se mueven el agua u otros fluidos. Se llama también porosidad cinemática.

- Porosidad primaria: Es la porosidad que tiene una roca como consecuencia de los procesos que dan lugar a su formación.
- Porosidad secundaria: Es la porosidad que se desarrolla en una roca después de que se produzca su deposición o emplazamiento por medio de procesos tales como la disolución o la fracturación.
- Porosidad total: Es la porosidad que considera el total de huecos existentes, estén éstos rellenos de líquido o de gas. Este parámetro puede variar en caso de retracción o expansión de la matriz sólida.
- Pozo: Excavación o perforación en el terreno que alcanza a las aguas subterráneas. Las perforaciones se designan comúnmente como sondeo.
- Pozo artesiano: Es un pozo que intercepta un acuífero confinado en el que el nivel estático del agua se encuentra por encima de la superficie del terreno. Se prefiere la designación pozo surgente.
- Recarga: Es la entrada neta de agua en el terreno (infiltración menos evaporación menos escorrentía subsuperficial) que se transmite hasta los acuíferos. Se mide como una tasa (altura/tiempo o un caudal).
- Recarga directa o difusa: Es la recarga que produce el agua de lluvia caída sobre la superficie del terreno. Esta recarga debe transferirse desde el suelo al nivel freático (recarga en tránsito).
- Recarga indirecta o concentrada: Es el agua que se recarga a través de los ríos, los lagos y otros depósitos de agua superficial, o bien la que penetra por discontinuidades del terreno.
- Sistema acuífero: Es un conjunto de acuíferos y acuíferos que intercambian agua entre ellos y que se les puede separar del resto de unidades territoriales por límites bien definidos.
- Sobreexplotación del agua subterránea: Es la extracción de un caudal superior al caudal medio de llenado de un depósito con agua subterránea. Es un término con connotaciones negativas que se debiera substituir por uso intensivo del agua subterránea.
- Superficie piezométrica: Es el nivel que alcanza el agua en los piezómetros dentro del mismo acuífero. Generalmente esta superficie no es horizontal ni plana sino curva, y

refleja la distribución del potencial hidráulico; es decir, de la energía mecánica del agua dentro del acuífero a la profundidad a la que llegan los piezómetros.

- Transmisividad: Es el producto de la conductividad hidráulica por el espesor del acuífero. Es función de las propiedades del líquido, el medio poroso y del espesor de dicho medio.
- Uso intensivo del agua subterránea: Es aquel uso que supone cambios sensibles o importantes en el funcionamiento hidrológico del acuífero o sistema acuífero.
- Velocidad de filtración o real: Es el valor promedio de la velocidad de las partículas de agua en el acuífero. Vale la velocidad de flujo dividida por la porosidad cinemática.
- Velocidad de flujo o de Darcy: Es el caudal de agua por unidad de sección, calculado mediante la ley de Darcy.
- Zona de saturación o saturada: Es la zona del terreno en la que todos los intersticios están ocupados por agua a una presión igual o mayor que la atmosférica.
- Zona intermedia: es la parte de la zona no saturada que se encuentra bajo la zona radicular y por encima de la zona capilar.
- Zona no saturada: Es la zona que se encuentra entre la superficie del terreno y el nivel freático. Incluye la zona radicular, la zona intermedia y la zona capilar.  
Los poros de esta zona contienen agua que se encuentra a una presión menor que la atmosférica y también contienen aire y otros gases. En esta zona pueden encontrarse niveles saturados, tales como los acuíferos colgados.
- Zona radicular o radical: Es la zona que se extiende desde la superficie del terreno hasta el nivel que alcanzan las raíces de las plantas. Puede contener parte o toda la zona no saturada, dependiendo de la profundidad de las raíces y del nivel freático.

## **2.5. HIDROGEOQUÍMICA**

La Hidrogeoquímica es la rama de la hidrogeología que explica los fenómenos químicos que caracterizan, describen y clasifican a las aguas subterráneas, su comportamiento y evolución de acuerdo a la cuantificación y cualificación de sus constituyentes químicos. Para su posterior análisis se describen las definiciones más importantes a continuación.

### 2.5.1. DEFINICIONES DE ESTUDIOS HIDROGEOQUÍMICOS

A continuación se presentan las definiciones de las especies mayoritarias que determinan en gran medida el comportamiento químicos de las aguas subterráneas:

- Calcio: Suele ser el catión principal por su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Proviene de rocas ígneas (constituyente esencial en feldespatos, piroxenos y anfíboles), de rocas sedimentarias (carbonatos, sulfatos o cemento intergranular en rocas detríticas), y en menor cantidad pueden provenir de la fluorita, del apatito, de la montmorillonita, y a menudo, aparece adsorbido en las superficies de minerales en rocas y suelos. Es moderadamente soluble a muy soluble y precipita fácilmente como  $\text{CaCO}_3$ ; junto al  $\text{Mg}^{2+}$  contribuye a la dureza del agua. Su química está asociada a la de los iones  $\text{CO}_3\text{H}^-$  y  $\text{CO}_2$ . (Pinto Rodríguez, 2009)
- Carbonatos y bicarbonatos: Tanto el  $\text{CO}_3^{2-}$  como el  $\text{CO}_3\text{H}^-$  proceden, en parte, de la disolución del  $\text{CO}_2$  atmosférico (gas) en agua de lluvia y de la incorporación del  $\text{CO}_2$  del suelo al agua de infiltración. También, de la disolución de calizas y dolomitas potenciada por el aporte de  $\text{CO}_2$  y ácidos orgánicos e inorgánicos. Además de la hidrólisis de silicatos (el  $\text{CO}_2$  disuelto en agua, al aumentar el pH da lugar a iones  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ). Los carbonatos y bicarbonatos comunican alcalinidad al agua. No son oxidables ni reducibles en aguas naturales. (Pinto Rodríguez, 2009)
- Cloruros: El cloro es el halógeno más difundido; muy soluble en agua; muy estable en disolución; difícilmente precipitable; no se oxida ni se reduce en aguas naturales; normalmente, aparece como  $\text{Cl}^-$  en aguas naturales; proviene de la meteorización de rocas ígneas, del lavado de rocas, de evaporitas, de procesos de contaminación puntual (abonos, sales en carreteras, etc). (Pinto Rodríguez, 2009)
- Componentes nitrogenados: La mayor parte del nitrógeno aparece como forma gaseosa en la atmósfera, aunque existe una fracción importante en suelos y sustancias orgánicas en forma oxidada. Puede aparecer en forma de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4^+$  (estas dos últimas formas reducidas, son oxidadas con gran facilidad a  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ; fácilmente retenidos por el terreno por cambio de bases; suelen aparecer como trazas en aguas subterráneas, y si las cantidades son significativas, pueden ser indicadores de contaminación reciente),

$N_2$ ,  $NO_2^-$  y  $NO_3^-$  (es la forma más usual en que aparece en las aguas subterráneas; muy soluble y difícilmente precipitable; tiende a ser fijado biológicamente en suelos con vegetación). Debido a su estabilidad, puede encontrarse estratificado en acuíferos libres, con mayores concentraciones en las capas superiores. El  $NH_3$  proviene de la fijación química del  $N_2$  atmosférico, de la putrefacción de proteínas de origen animal o vegetal por acción bacteriana, o de la reducción de nitritos. El  $NO_2^-$  proviene de la oxidación del  $NH_3$  o  $NH_4^+$  por acción bacteriana, o de la reducción del  $NO_3^-$ . (Pinto Rodríguez, 2009)

- Magnesio: Similar al calcio pero más soluble y más difícil de precipitar. Su forma predominante es  $Mg^{2+}$ . Puede formar complejos como  $MgOH^+$ ,  $MgSO_4$  o  $HCO_3Mg^+$ . Junto al calcio contribuye a la dureza del agua. Proviene de minerales ferromagnesianos en rocas ígneas (olivinos, piroxenos, anfíboles, micas negras, etc.) y de minerales de alteración (clorita, montmorillonita, serpentina, etc) (Pinto Rodríguez, 2009)
- Potasio: El potasio tiene una solubilidad muy alta, es difícilmente precipitable, y muy abundante en la corteza, pero escaso en el agua al ser fijado por las arcillas. Procede de rocas ígneas (en feldespatos, biotitas y moscovitas), de procesos de hidrólisis de silicatos, de depósitos de evaporitas, de actividades agrícolas (uso intensivo de fertilizantes), o por actividades industriales. (Pinto Rodríguez, 2009) Sílice: A pesar de que el silicio es el segundo elemento abundante en la corteza terrestre, la baja solubilidad de los compuestos silicatados determina su inclusión en quinto o sexto lugar entre los constituyentes mayoritarios de las aguas. La mayor parte está en forma de  $H_4SiO_4$  en parte disuelta y en parte coloidal y sólo una pequeña parte ionizada. No proviene de la disolución del cuarzo, dada su lentitud de meteorización; proviene principalmente de la meteorización química (hidrólisis) de feldespatos o silicatos en general, que se transforman en minerales de la arcilla y otros productos de descomposición en la zona edáfica. (Pinto Rodríguez, 2009)
- Sodio: Es el alcalino más abundante. Suele ir asociado al ión  $Cl^-$ . Es un buen indicador de aguas blandas. Dada su alta solubilidad, tiene tendencia a permanecer en solución y no precipitar. Su forma predominante es el  $Na^+$ . A altas concentraciones forma complejos como  $NaCO_3^-$ ,  $NaHCO_3$ ,  $NaSO_4^-$ , etc Proviene de rocas ígneas (componente mayoritario), de la meteorización de silicatos, relacionado con rocas sedimentarias y

con depósitos evaporíticos, en rocas detríticas, aporte de agua marina en regiones costeras, reciclaje de riegos, contaminación urbana, etc. (Pinto Rodríguez, 2009)

- Sulfatos: A 25 °C y 1 atm, las formas estables del azufre, son  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HSO}_4^-$ , S,  $\text{HS}^-$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{S}^{2-}$  aunque generalmente aparece en estado de máxima oxidación ( $\text{SO}_4^{2-}$ ); en medios reductores, con abundante materia orgánica, puede sufrir reducción bacteriana de  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{HS}^-$ . El ión  $\text{SO}_4^{2-}$  es moderadamente soluble a muy soluble; es muy difícilmente precipitable. Proviene de la disolución del yeso y de la anhidrita, del lavado de terrenos formados en ambientes muy áridos, y de la oxidación de sulfuros (rocas ígneas y rocas sedimentarias). (Pinto Rodríguez, 2009)

A continuación se definen las fórmulas de concentraciones químicas de interés para la presente investigación:

- Partes por millón (ppm): Es la cantidad de soluto expresada en miligramos disuelta en 1 kilogramo de solvente. En la ecuación siguiente se muestra la fórmula para transformar fracción peso (w) a partes por millón, en donde w es el número de gramos de soluto y wo el número de gramos de solvente.

Ec. 1

$$ppm = \frac{w}{w + w_o} * 100\%$$

Al ser el agua el solvente mayoritario y al tratarse de soluciones diluidas, la densidad de dichas soluciones son aproximadamente igual a la densidad del agua pura, esto es ( $\rho_{\text{soln}} = \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1.00 \text{ g/cm}^3$ ); por lo que para este caso 1Kg es aproximadamente igual a 1 L, por ello mismo las unidades de ppm expresan miligramos de soluto por litro de solución (mg/L)

- Molaridad (M): Es la forma más frecuente de expresar la concentración de las disoluciones en química. Indica el número de moles de soluto disueltos (n) por cada litro de disolución (V). Matemáticamente se describe como:

Ec. 2

$$M = \frac{n}{V} = \frac{\text{numero de moles}}{\text{volumen de la solucion en litros}}$$



Es importante recordar que el número de moles (n) en gmol es igual a la masa en gramos entre el peso molecular de la sustancia.

- Miliequivalentes por litro (meq/L): Un miliequivalente es la unidad de masa que representa a la mínima unidad equivalente que puede reaccionar con otra sustancia químicamente compatible.

Ec. 3

$$\frac{\text{miliequivalentes}}{\text{Litro}} = \frac{\left(\frac{\text{miligramos}}{\text{Peso atómico}}\right) * \text{valencia}}{\text{Litro}}$$

## 2.6 ESPECIACIÓN QUÍMICA

En este apartado se presenta el fundamento teórico acerca del equilibrio químico en sistemas reaccionantes.

### 2.6.1. DEFINICIONES ACERCA DE EQUILIBRIO QUÍMICO Y ESPECIACIÓN

Especiación química es el proceso de determinación de la probabilidad de formación de todos los compuestos a través de las especies químicas participantes, y su concentración a partir de las condiciones de equilibrio establecidas. Para ello debe de considerarse la termodinámica de equilibrio químico de las diferentes especies solubles, complejos acuosos, sólidos con actividad fija, sólidos precipitados que pueden convertirse en sólidos disueltos, sólidos disueltos que tienen el potencial de precipitar, etc. La especiación química involucra el análisis de sistemas acuosos en equilibrio y su interpretación a partir de diferentes escenarios, tales como, cambios de pH, temperatura, potencial REDOX, solubilidad, adsorción, etc. (Manzano Orellana, 2004)

#### 2.6.1.1. REACCIONES QUÍMICAS Y EQUILIBRIO QUÍMICO

Un sistema químico está compuesto de un conjunto de especies y reacciones. Una especie química está definida como cualquier entidad química que se pueda distinguir de la resta a partir de su composición elemental, y de la fase en la que se encuentra presente.

Las especies están compuestas por constituyentes atómicos, como en el caso de la especie de materia orgánica simple, está formada por un átomo de carbono, dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno. No todas las especies son necesarias para describir totalmente el sistema químico. El subconjunto de especies que son estrictamente necesarias está formado por las que se conocen como componentes. Estas componentes se pueden elegir arbitrariamente entre todas las especies. Aunque los números de constituyentes atómicos ( $N_c$ ) podrían servir como conjunto de componentes, no se utilizan nunca porque los constituyentes atómicos raramente se encuentran presentes en fase acuosa. Por esta razón, es más conveniente seleccionar como número de componentes ( $N_c$ ) combinaciones lineales de número de especies químicas ( $N_s$ ).

En un sistema formado por  $N_s$  especies químicas, cualquier número de reacciones ( $N_r$ ) que tienen lugar pueden ser representadas como una combinación lineal de la manera que se expresa en la ecuación siguiente.

Ec. 4

$$\sum_{j=1}^{N_s} (v_{ij} \cdot Q_j) = 0; \quad i = 1, \dots, N_r$$

Donde:

1.  $Q_j$  es la fórmula química de la  $j$ -ava especie.
2.  $v_{ij}$  es su coeficiente estequiométrico en la reacción  $i$ .

La matriz  $S$  de coeficientes estequiométricos es una matriz de tamaño  $N_r \times N_s$ , rectangular con un rango igual a  $N_r$ , que puede escribirse de la forma:

Ec. 5

$$S = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1N_c} & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2N_c} & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{N_r,1} & v_{N_r,2} & \cdots & v_{N_r,N_c} & 0 & 0 & \cdots & -1 \end{pmatrix}$$

En el software MINEQL (Chemical Equilibrium Modeling System) los valores de  $v_{ij}$  de la submatriz  $\mathbf{S}^*$  ( $\mathbf{S} = \mathbf{S}^* \cdot \mathbf{I}$ ) se obtienen de una base de datos termodinámicas definiendo unos conjuntos de especies acuosas como primarias. El código comprueba que este conjunto de especies sea independientes y capaz de formar el resto de especies, denominadas secundarias, siendo combinación lineal de las primarias.

## A. REACCIONES DE COMPLEJACIÓN ACUOSA

El movimiento continuo de los iones disueltos juntamente con el gran número de estos por unidad de volumen, causan numerosas colisiones haciendo posible la formación de parejas de iones y/o complejos disueltos que normalmente tienen una vida efímera. Por lo que hace a estas reacciones son casi instantáneas, pueden ser consideradas como reacciones en equilibrio. Aplicando la ley de acción de masas se obtiene:

Ec. 6

$$\log K_a = S_a \log c_a + S_a \log \gamma_a(c_a)$$

Donde:

1.  $\mathbf{K}_a$  es el vector de constantes de equilibrio, que solo depende de la temperatura y de la presión.
2.  $\mathbf{S}_a$  es la matriz de coeficientes estequiométricos para reacciones de complejación acuosa.
3.  $\mathbf{C}_a$  es el vector de concentraciones molales de las especies acuosas y  $\gamma_a$  es el vector de los coeficientes de actividad termodinámica, calculados a partir de  $\mathbf{C}_a$  de acuerdo con la fórmula de B-dot (Helgeson and Kirkham, 1974).

Se pueden calcular las concentraciones de las especies secundarias,  $\mathbf{Ca}_2$  (asociadas a la matriz  $-\mathbf{I}$ ), a partir del conjunto de concentraciones de  $N_c$  especies primarias,  $\mathbf{Ca}_1$ , resultando la siguiente expresión:

Ec. 7

$$\log c_{a2} = \log K_a + S_a^* \log c_{a1} + S_a^* \log \gamma_{a1}(c_a)$$

## B. INTERACCIONES SÓLIDO-LÍQUIDO

Bajo condiciones de equilibrio, las reacciones de disolución-precipitación pueden ser descritas por la ley de acción de masas que se establece a continuación en la Ec. 8.

Ec. 8

$$\log X_m + \log \gamma_m + \log K_m = S_m^* \log c_{a1} + S_m^* \log \gamma_{a1}$$

Donde:

1.  $X_m$  es el vector de la fracción molar de la m-ava especie de la fase sólida.
2.  $\gamma_m$  es su coeficiente de actividad termodinámica.
3.  $S_m$  es la submatriz de coeficientes estequiométricos de las reacciones de disolución ( $Nm \times Na1$ ,  $Nm$  es el número de minerales).
4.  $K_m$  es el vector de constantes de equilibrio.

La condición de equilibrio solo proporciona una relación entre las concentraciones de las especies acuosas involucradas.

## C. INTERACCIONES GAS-LÍQUIDO

Se asume que todas las reacciones gas-líquido son suficientemente rápidas respecto al flujo para llegar al equilibrio. Luego la ley de acción de masas es,

Ec. 9

$$\log p_f = -\log K_f - \log \gamma_f + S_f^* \log c_{a1} + S_f^* \log \gamma_{a1}$$

Donde:

1.  $p_f$  es el vector de las presiones parciales de las especies gaseosas en la fase gaseosa.
2.  $\gamma_f$  son los coeficientes de actividad.
3.  $S_f^*$  es la submatriz de coeficientes estequiométricos de las reacciones de disolución de gas ( $Nf \times Na1$ ).
4.  $K_f$  es el vector de las constantes de equilibrio.

## D. REACCIONES CINÉTICAS

Algunos procesos geoquímicos progresan muy lentamente respecto el flujo de fluido y nunca pueden llegar al equilibrio, tales como disoluciones y precipitaciones de algunos minerales. También reacciones de complejación acuosa, particularmente reacciones redox, no pueden siempre ser consideradas en equilibrio.

Contrariamente a la aproximación en equilibrio, la expresión cinética proporciona una manera explícita de calcular la cantidad de reactantes y productos por unidad de volumen y tiempo. Esto se expresa a través de la ley cinética. Para reacciones cinéticas en que intervienen minerales se usa la fórmula general que incluye diversos tipos de funciones experimentales (Steeffel and Lasaga, 1994), la cual se muestra en la ecuación siguiente:

Ec. 10

$$r_k = \sigma_k \xi_k e^{-\frac{E_{a,k}}{RT}} \sum_{j=1}^{N_k} k_{kj} \prod_{i=1}^{N_c+N_s} a^{P_{kji}} \left( \Omega_k^{\theta_{kj}} - 1 \right)^{n_{kj}}$$

Donde:

1.  $r_k$  es la tasa de disolución del mineral (moles de mineral por unidad de volumen y unidad de tiempo).
2.  $E_{a,k}$  es la energía de activación aparente del conjunto del proceso reactivo.
3.  $N_k$  es el número de términos de la expresión experimental.
4.  $k_{kj}$  es una constante experimental.
5.  $a^{P_{kji}}$  representa el efecto catalítico de algunas especies, donde el valor de  $P_{kji}$  está determinado experimentalmente.
6.  $\Omega_k$  es el índice de saturación para la reacción del mineral k-ésimo.

Los parámetros  $\theta$  y  $\eta$  deben ser determinados a partir de experimentos. El término entre paréntesis, denominada función de desequilibrio, decrece la tasa de reacción no linealmente, cuando la solución se acerca al equilibrio. El factor  $\xi_k$  toma el valor de +1 o -1 en función de si  $\Omega_k$  es más grande o más pequeño que 1 (precipitación o disolución), según Caldentey (2005).

## 2.7. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

En ésta sección se describen algunos conceptos importantes acerca de la dispersión de contaminantes y los fenómenos de transporte que la determinan.

### 2.7.1. DEFINICIONES ACERCA DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

Esta sección trata de algunos conceptos básicos que permiten comprender la metodología y los resultados de la técnica de trazadores. En primer lugar conceptos necesarios: Dispersión, Advección y la Técnica de trazadores.

#### 2.7.1.1. FENÓMENOS DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

A continuación se mencionan algunos conceptos de interés dentro de éstas temáticas en la presente investigación.

#### A. DISPERSIÓN.

La dispersión es el fenómeno de transporte de masa por mezclado o desplazamiento microscópico de un fluido sobre un medio dispersivo. En corrientes de agua se refiere a la mezcla molecular, dispersiva o turbulenta de las partículas de un fluido sobre el cuerpo de agua en dirección longitudinal, transversal o vertical. A continuación, se muestra en la figura 7, la descripción de su movimiento:

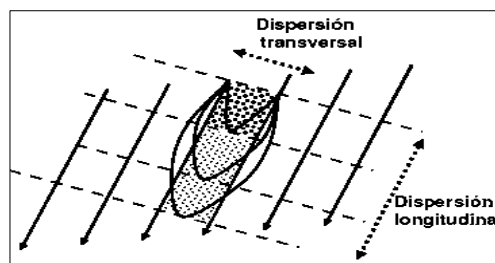


Figura 7 Movimiento transversal y longitudinal de la dispersión hidrodinámica.

Fuente: Propagación longitudinal y transversal. (Delleur, 2000)

## B. ADVECCIÓN.

La Advección es el fenómeno de transporte de masa caracterizado o descrito por el desplazamiento macroscópico de un cuerpo o fluido sobre un medio advectivo. En corrientes de agua el término se refiere al movimiento pasivo de solutos disueltos o del material particulado fino con la velocidad de la corriente sobre el cuerpo de agua en dirección longitudinal, transversal y vertical. A continuación, se muestra en la figura 8 la descripción de su movimiento:

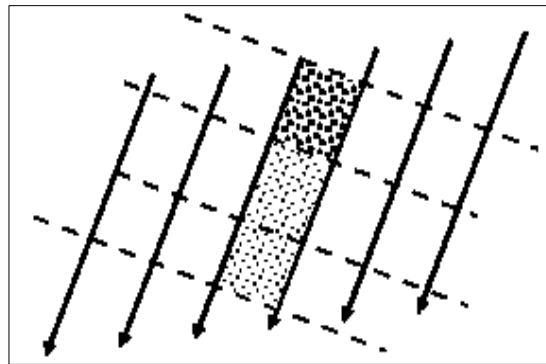


Figura 8 Movimiento longitudinal advectivo

Fuente: Propagación longitudinal y transversal debido al mecanismo de dispersión mecánica. (Delleur, 2000)

## C. TÉCNICA DE TRAZADORES

El método de los trazadores es una técnica para obtener información sobre un sistema o sobre alguna parte de un sistema, mediante la observación del comportamiento de una sustancia específica, el trazador, que ha sido añadido al sistema. El trazador es una sustancia específica que sirve para "marcar" o hacer más fácilmente identificable una fase específica o parte de un sistema denominado material marcado. En general el principio básico del método de los trazadores es "marcar" una sustancia, un objeto o una fase, y después "seguirlo" a través del sistema, o llevar a cabo la determinación cuantitativa del mismo después que ha abandonado el sistema.

Entre las distintas sales utilizables, la más común es el Cloruro de Sodio, debido a que es fácil de conseguir y es económicamente accesible. En general son más utilizadas para el método de inyección instantánea. El método de inyección constante con sal resulta muchas veces impracticable debido a las grandes cantidades de sal que se deben manejar para poder hacer las experiencias.

La forma más común de medir la curva de respuesta de la sal en el cauce es a través del cambio en la conductividad eléctrica del agua a medida que la nube de trazador avanza con el flujo. Este aumento de la conductividad se mide con un conductímetro y, por medio de una curva de calibración, se pasa de conductividad a concentración.

Otras opciones de trazadores en cuerpos de agua superficiales son el uso de trazadores fluorescentes, tales como, la Rodamina WT, el uso de trazadores radiactivos como el Tecnecio, entre otros. En la presente investigación debido a las características propias del trazador y del cuerpo de agua, se decidió utilizar el cloruro de sodio.

## **2.8. CALIDAD DE AGUA**

En esta sección se describen los conceptos de los parámetros químicos utilizados en la evaluación de la calidad de las aguas a través del cálculo de índice de calidad canadiense CCME-WQI y normativas nacionales para aptitudes de uso del agua para potabilización y riego contenidas en el Decreto 51 de la República de El Salvador. También, se describen los tipos de contaminación y contaminantes.

### **2.8.1. FUNDAMENTO TEÓRICO.**

En esta sección se definen algunos conceptos para la realización posterior de las evaluaciones de calidad de agua, relacionados con el origen de la contaminación hídrica, tipos de contaminantes y las definiciones de los parámetros de monitoreo.



### **2.8.1.1. CALIDAD DE AGUA Y CONTAMINACIÓN HÍDRICA**

A continuación se detallan los tipos más usuales de orígenes de la contaminación de los recursos hídricos:

- Contaminación agrícola

La contaminación agrícola es una fuente de contaminación no localizada, o no puntual, por lo que resulta más difícil controlarla y darle seguimiento para su tratamiento. En general los contaminantes agrícolas más significativos son tres:

- a. Los sedimentos producidos por la erosión, que acarrearán las diversas sustancias químicas que se han absorbido.
- b. La pesada carga de nutrientes, sobre todo en nitrógeno y en fósforo procedente de la fertilización de cultivos o de áreas de crianza de animales.
- c. Los pesticidas, aunado a estos está el alto nivel de agentes patógenos en las masas de aguas superficiales.

Los sedimentos producen turbiedad obstruyendo la penetración de luz solar, inhiben el crecimiento de algas y plantas acuáticas con raíces. Los depósitos en los lechos de grava en los ríos pueden afectar el desove de los peces, conducir a inundaciones desmedidas o a la obstrucción de canales. Las partículas más pequeñas acarrearán fósforo, metales y agentes contaminadores orgánicos persistentes, que afectan sobre todo a organismos bentónicos y se acumulan en la cadena alimenticia, llegando a concentrarse eventualmente en los depredadores superiores.

- Contaminación de origen doméstico

Las aguas servidas domésticas son una mezcla de residuos que incluyen, sustancias presentes en el excremento humano, es decir, una mezcla de compuestos orgánicos y minerales no disueltos en solución acuosa. Los compuestos orgánicos son las grasas, jabones, proteínas, glúcidos y los compuestos provenientes de la descomposición, detergentes, aceites minerales y otros desperdicios de origen animal y vegetal.

- Contaminación de origen industrial

Los contaminantes contenidos en aguas de origen industrial son innumerables dependiendo del tipo de producción. En general, la contaminación puede ser debida a materia inorgánica que se encuentra en suspensión y en solución, y también, a sustancias orgánicas como los desechos químicos fenólicos, orgánicos fermentables y desechos tóxicos. Los detergentes contenidos en las aguas naturales provienen en su mayoría de descargas industriales.

Un cuerpo de agua puede estar contaminado por especies de diferente tipo, a continuación se describen las categorías más usuales de clasificación de los contaminantes:

- Orgánica/ Microbiológica: En esta clasificación se incluyen los desechos domiciliarios orgánicos (de vegetales, frutas, carnes, etc.), heces fecales tratadas y no tratadas de carácter antropogénico o animal, residuos agrícolas, residuos ganaderos, etc.; lo que conlleva a un aumento directo de la Demanda biológica de oxígeno (DBO), disminución de oxígeno disuelto del cuerpo de agua, aumento del recuento de coliformes fecales en muestras, etc.
- Físico-Química: En esta clasificación se incluyen los residuos de detergentes domiciliarios e industriales, desechos químicos industriales típicos de cada industria (colorantes, ácidos, sales, etc.) lo que conlleva a cambios de pH, temperatura, aumento de sales, aumento en la concentración de parámetros fisicoquímicos (nitratos, fosfatos, sulfatos, sólidos disueltos, etc.)
- Ecotóxica: En esta clasificación se incluyen los metales pesados, plaguicidas, insecticidas, desechos químicos peligrosos, etc.

A continuación en la tabla 6 se muestran algunos conceptos acerca de los principales parámetros fisicoquímicos para evaluaciones de calidad de agua.

Tabla 6 Definición de los principales parámetros fisicoquímicos para evaluación de calidad agua

Fuente: Elaboración propia

No.	PARÁMETRO	DEFINICIÓN
1	Coliformes fecales	Se encuentran en los intestinos de los humanos y otros animales de sangre caliente, son un tipo de bacterias coliformes. La presencia de coliformes fecales en un suministro de agua es un buen indicador de que las aguas negras han contaminado el agua. Se pueden hacer pruebas específicamente para Coliformes fecales o para el total de bacterias Coliformes que incluye todos los tipos de bacterias coliformes y que puede indicar contaminación fecal. Se miden en UFC, Unidades Formadoras de Colonias es un valor que indica el grado de contaminación microbiológica de un ambiente. Expresa el número relativo de microorganismos de un taxón determinado en un volumen de 100 centímetros cúbico de agua.
2	pH	Indica la reacción ácida y básica de la muestra y es una propiedad de carácter químico de vital importancia para el desarrollo de la vida acuática (tiene influencia sobre determinados procesos químicos y biológicos).
3	DBO <sub>5</sub>	La Demanda Biológica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) es una medida del oxígeno que usan los microorganismos para descomponer el agua. Si hay una gran cantidad de desechos orgánicos en el suministro de agua, también habrá muchas bacterias presentes trabajando para descomponer este desecho. Se mide a los 5 días de inóculo en unidades de mg/l o ppm.
4	Nitratos	El nitrógeno es un elemento necesario para que todas las plantas y los animales vivientes produzcan proteínas. En los ecosistemas acuáticos, el nitrógeno está presente en muchas formas, puede combinarse con el oxígeno para formar un compuesto llamado nitrato. Los nitratos pueden provenir de fertilizantes, aguas negras y desechos industriales; y causan la eutrofización de lagos o pozas.

No.	PARÁMETRO	DEFINICIÓN
		Se mide en mg/l o ppm.
5	Fosfatos	El fósforo generalmente está presente en las aguas naturales en forma de fosfatos. Estos se encuentran en los fertilizantes y los detergentes y pueden llegar al agua con el escurrimiento agrícola, los desechos industriales y las descargas de aguas negras. Los fosfatos, al igual que los nitratos, son nutrientes para las plantas. Cuando entra demasiado fosfato al agua, florece el crecimiento de las plantas. Se mide en mg/l o ppm.
6	Cambio de Temperatura	La temperatura es una variable física que influye notablemente en la calidad de un agua. Afecta a parámetros tales como la solubilidad de gases y sales, la cinética de las reacciones químicas y bioquímicas, desplazamientos de los equilibrios, tensión superficial, desarrollo de organismos presentes en el agua. Se mide en °K.
7	Turbidez	La turbidez de un agua es provocada por la materia insoluble, en suspensión o dispersión coloidal. Es un fenómeno óptico que consiste esencialmente en una absorción de luz combinado con un proceso de difusión. La turbidez se mide en unidades nefelométricas de turbidez (NTU o UNF9 por medida de la intensidad de la luz dispersada o en mg de SiO <sub>2</sub> /L).
8	Sólidos disueltos totales	Los sólidos disueltos totales pueden afectar adversamente la calidad de un cuerpo de agua o un efluente de varias formas. Aguas para el consumo humano, con un alto contenido de sólidos disueltos, son por lo general de mal agrado para el paladar y pueden inducir una reacción fisiológica adversa en el consumidor. Los análisis de sólidos disueltos son importantes como indicadores de la efectividad de procesos de tratamiento biológico y físico de aguas usadas. Se mide en mg/l o ppm.
9	Oxígeno Disuelto	El Oxígeno Disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno que está disuelta en el agua y es esencial para los ríos y lagos saludables. El nivel de oxígeno disuelto puede ser un indicador de cuán

No.	PARÁMETRO	DEFINICIÓN
		contaminada está el agua y cuán bien puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal. Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. Si los niveles de oxígeno disuelto son demasiado bajos, algunos peces y otros organismos no pueden sobrevivir. Se expresa en % de saturación.

## 2.9. GEOESTADÍSTICA Y ESTADÍSTICA BAYESIANA

Las técnicas estadísticas bayesianas de modelación son herramientas que están siendo cada vez más utilizadas en diferentes disciplinas científicas en donde se tienen volúmenes de datos enormes pero muy poca información concatenada y condensada. La Hidrogeoquímica es una rama de la ciencia que como su nombre lo refiere involucra varias disciplinas cuyo conocimiento y caracterización en un área geográfica de interés conlleva la obtención y análisis de datos de diferente tipo: datos cualitativos (por ejemplo unidades hidrogeológicas), datos cuantitativos (la mayoría de parámetros fisicoquímicos), datos discretos (conteo de bacterias: coliformes fecales en agua), datos continuos (la mayoría de datos físicos y químicos como caudales, concentraciones, etc.), y si a esto le sumamos que estos datos son función del tiempo y de su ubicación geográfica, el proceso de modelación, caracterización e interpretación se va complicando, y si aún más, definimos que nuestro sistema de representación gráfica se limita a la presentación tridimensional en ejes cartesianos, y también considerando que muchas veces existen factores mezclados (pool) o con interacciones entre variables que no pueden describir los procesos únicamente con variables puras sino que nos muestran únicamente realidades parciales.

### 2.9.1. DEFINICIONES ACERCA DE HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS

En esta sección se describen los conceptos fundamentales acerca de las herramientas estadísticas utilizadas en la presente investigación.

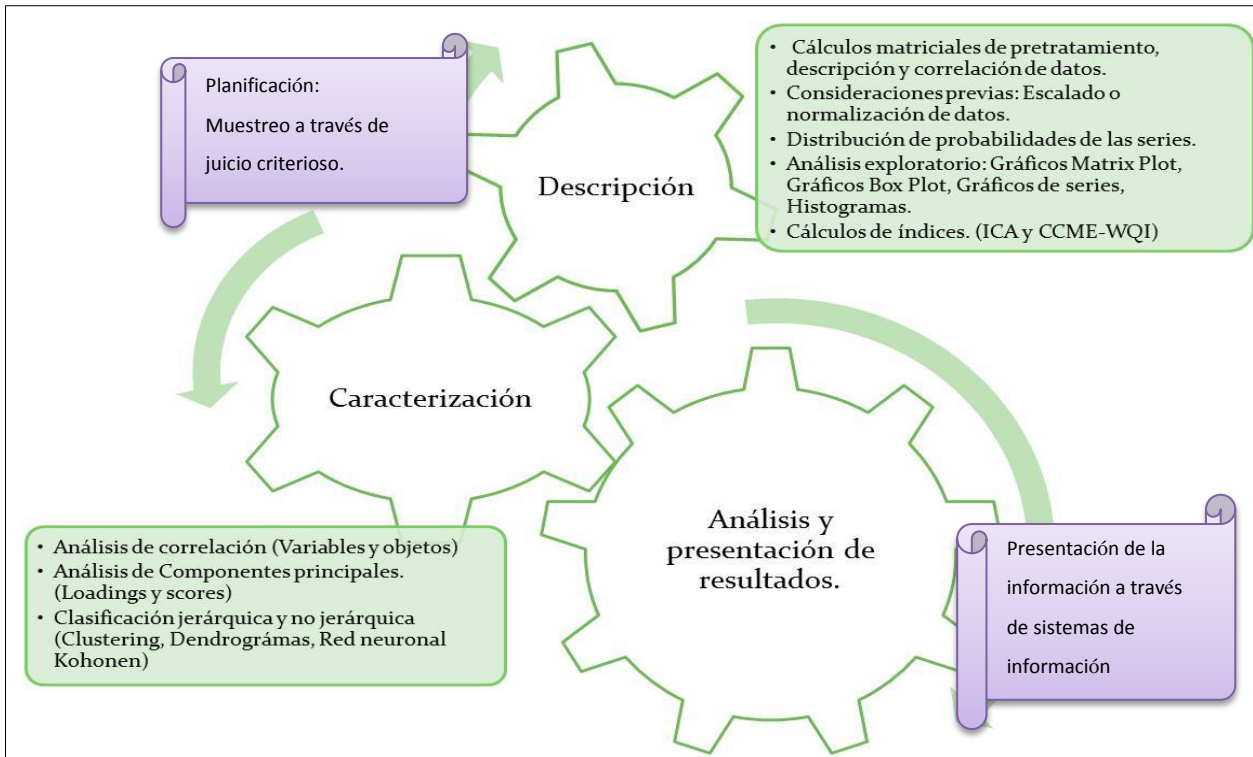


Figura 9 Herramientas estadísticas para el análisis de información

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 9 se aprecia que existen diferentes tipos de análisis que aportan elementos a los aspectos de descripción, caracterización, análisis y presentación de resultados de la investigación, todos esos análisis y otros más fueron utilizados en la presenta investigación con el fin de comprender mejor el sistema.

A continuación se describen 7 herramientas estadísticas y teoría básica sobre los análisis realizados a la investigación:

### 1. Estadística descriptiva básica.

La estadística descriptiva básica contempla el cálculo de medidas de tendencia central (Media aritmética, mediana, moda), Valores extremos y medios (Valor Mínimo, Máximo y Percentiles) y el cálculo de medidas de dispersión de datos (Desviación estándar, varianza, etc).

## 2. Gráficos dinámicos de series.

El gráfico de series a través de tablas estáticas o dinámicas es una representación univariada de vectores columnas en el cual pueden fácilmente determinarse las variaciones progresivas de la variable respecto al valor consecutivo anterior y posterior en toda la serie de datos, es muy útil para discriminar anomalías y tendencias.

## 3. Matrix Plot.

El Gráfico de Matrix Plot es una matriz de gráficos de dispersión de todas las variables vs todas las variables. Los vectores columna de los datos (Correspondientes a las variables) poseen la característica de estar autoescalados o estandarizados, con el fin de que el efecto de las unidades no sea significativo y los gráficos respecto a su escala, sean comparables. Es un gráfico muy práctico para la descripción global de los datos, es útil para observar tendencias y para ayudar a comprender y caracterizar los datos a nivel preliminar.

## 4. Dendogramas de variables y/o observaciones

Los Dendogramas son gráficos con ramificaciones que se distancian de las variables u observaciones (que se ubican en el eje de las “X”) de acuerdo a su similitud, es por ello que en primer lugar se deben de calcular las distancias de similitud estadísticas:

Ec. 11

$$D_{ii'} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - x_{i'j})^2}$$

Es importante establecer que así como hay varios tipos de distancias entre los objetos, también hay varios tipos de algoritmos para formar los clúster jerárquicos. Los más típicos son: el average linkage (Basado en el promedio de las distancias), el single linkage (Basado en el valor mínimo de las distancias) y el complete linkage (Basado en el valor máximo de las distancias).

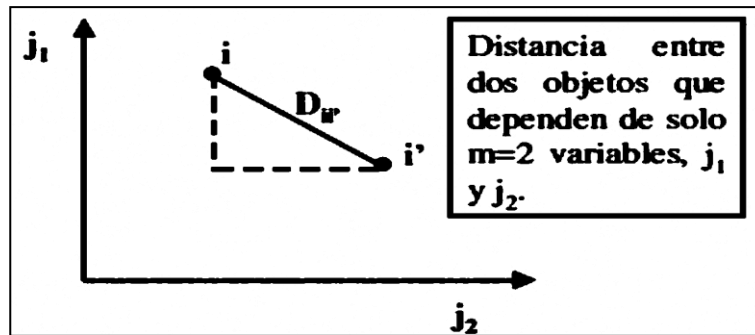


Figura 10 Distancia entre dos objetos y distancia euclidiana.

Fuente: Handbook of Chemometrics and Qualimetrics, D.L. Massart (1997)

## 5. Gráficos univariados.

- Box Plot: Un diagrama de caja es un gráfico, basado en cuartiles, mediante el cual se visualiza un conjunto de datos. Está compuesto por un rectángulo, la "caja", y dos brazos, los "bigotes". Es un gráfico que suministra información sobre los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q1, Q2 o mediana y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución.
- Cuartiles: Cuando se ordenan los datos de menor a mayor, los cuartiles o percentiles son los datos que dividen la muestra en grupos de un determinado tamaño, de forma que cierto porcentaje de los casos se encuentra por debajo del valor del dato considerado y el resto por encima.
- P P Plot: Gráfico de Probability Plot o gráfico de probabilidad permite investigar si los datos se ajustan a una determinada distribución, por ejemplo la normal, y en caso que no sea así; cuál es la posible razón de este alejamiento de la normalidad (por ejemplo, el sesgo) y cuál puede ser la distribución teórica más apropiada.
- Q Q Plot: Un gráfico Q-Q (Cuartiles, ver definición\*) es un método gráfico para el diagnóstico de diferencias entre la distribución de probabilidad de una población de la que se ha extraído una muestra aleatoria y una distribución usada para la comparación. Una forma básica de gráfico surge cuando la distribución para la comparación es una distribución teórica. No obstante, puede usarse la misma idea para comparar las distribuciones inferidas directamente de dos conjuntos de observaciones, donde los tamaños de las muestras sean distintos



## 6. Análisis de factores.

La idea principal para el cálculo de los Componentes Principales es que la información más importante está asociada con valores de varianza grandes. Es posible demostrar que la dirección de máxima varianza es paralela al eigenvector correspondiente al mayor eigenvalue de la matriz de varianza-covarianza de los datos. Por lo anterior es imprescindible que la matriz de datos haya sido transformada a Matriz covarianza y correlación (provenientes de matrices auto escaladas o estandarizadas) previo al proceso de obtención de los Eigenvalues, Eigenvectores y Scores.

El esquema de cálculo de los factores principales se describe a continuación en la Figura 9:

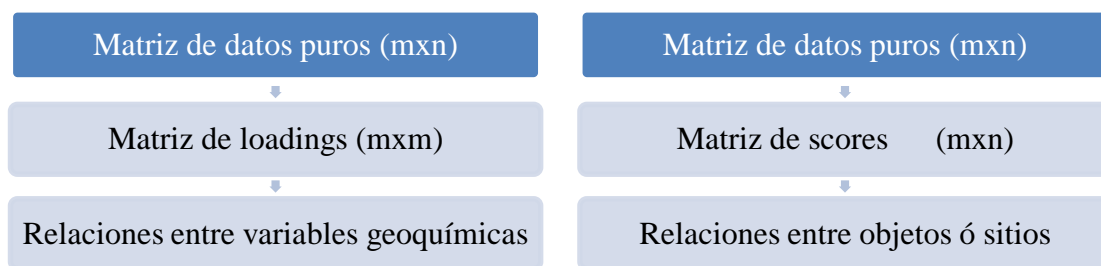


Figura 11 Esquema de cálculo de componentes principales.

Fuente: Elaboración propia

El Análisis factorial tiene algunas propiedades importantes:

- Los scores resultantes no están correlacionados, la varianza muestral de los m Componentes Principales viene dada en función de los eigenvalues, y es un método de obtener una serie de nuevas variables no correlacionadas.
- La suma de la varianza muestral para los Componentes Principales es igual a la suma de la varianza muestral de la matriz de datos.
- Los Componentes principales son nuevos ejes que contienen el porcentaje de información de todas las variables, equivalente al Paretizado acumulado de las varianzas o eigenvalues de sus correspondientes componentes principales.

- Los vectores loadings resultantes del proceso, contienen la información resumida de las variables, Los vectores de scores contienen la información resumida de los objetos.

En la Figura 12 se describe el esquema de ejes que se genera a partir del cálculo de los componentes o factores principales, dichos ejes resumen la información (Varianza estadística de los datos) en vectores propios y valores propios.

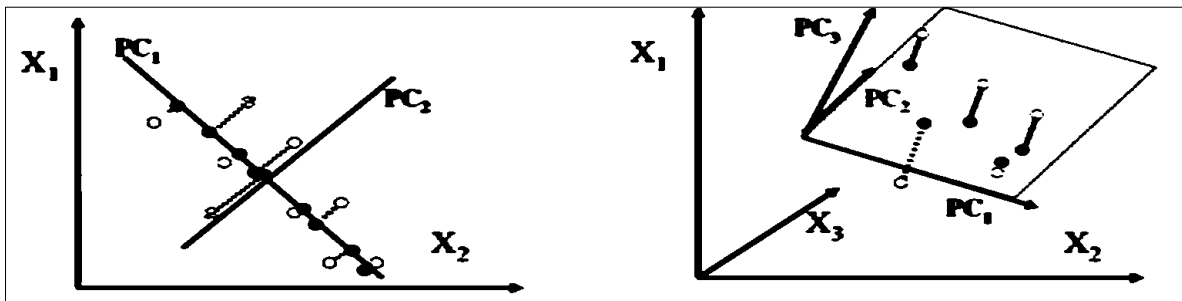


Figura 12 Esquema de eigenvectores y ejes de componentes principales en el espacio

Fuente: Handbook of Chemometrics and Qualimetrics, D.L. Massart (1997)

A continuación definiremos conceptual y matemáticamente algunos términos sinónimos propios de este análisis:

Eigenvalue = Valor propio = Valor característico = Valores latentes

Eigenvector = Vector propio = Vector característico = Vector latente

Sea una matriz cuadrada  $A$  de  $m \times n$ . El número real  $\lambda$  es un *eigenvalue* de  $A$ , si existe un vector  $x$  (*eigenvector*), distinto de cero, tal que:

Ec. 12

$$A \cdot x = \lambda \cdot x$$

La ecuación del vector de loadings se detalla a continuación:

Ec. 13

$$L = V_{con\_mayor\_ \lambda}$$

La ecuación de la matriz de scores se detalla a continuación:

Ec. 14

$$S = M.V^T$$

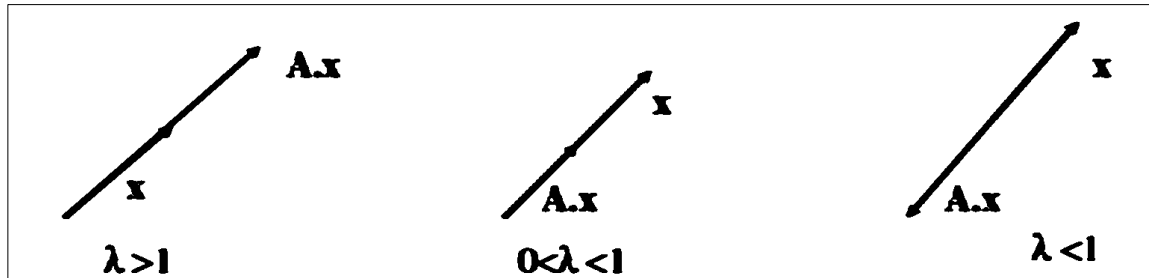


Figura 13 Esquema de eigenvalues en el espacio

Fuente: Handbook of Chemometrics and Qualimetrics, D.L. Massart (1997)

## 7- Variograma espacial

Un variograma es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida, obteniendo como resultado la influencia de los datos a diferentes distancias.

El variograma muestra características importantes de la variable regionalizada: Por ejemplo el crecimiento de la gráfica indica la velocidad con la cual se “desestructura” la variable en el espacio. La distancia para la cual se estabiliza el variograma representa la “zona de influencia” de un dato. Además se llama alcance al comportamiento cercano al origen el cual indica la continuidad o regularidad de la variable a pequeña escala. El efecto nugget se lee cuando  $X=0$  y este denota la varianza intrínseca de los datos, es decir la variación del proceso debido a la sumatoria de los errores sistemáticos, personales y aleatorios en el muestreo o recolección de los datos.

El cálculo del variograma puede hacerse a lo largo de distintas direcciones del espacio y evidenciar anisotropía o continuidad. (Massart, Vandeginste, & Buydens, 1997)

## **2.10. INTERACCIÓN DEL AGUA SUPERFICIAL Y EL AGUA SUBTERRÁNEA**

En los manantiales y ríos siempre existe una conexión hidráulica con el acuífero. Por eso es necesario conocer su interrelación entre cada uno de ellos e indagar el comportamiento del acuífero para poder llevar un control de calidad y cantidad que permitan una buena gestión del recurso hídrico.

### **2.10.1. INTERACCIÓN ACUÍFERO - MANANTIALES**

Un manantial vinculado a un acuífero libre surge donde la superficie topográfica intercepta al nivel freático. Para un manantial vinculado a un acuífero cautivo supone la salida espontánea del agua provocada por una discontinuidad (fractura, diaclasa, falla). Un manantial tiene por lo tanto un amplio significado sobre la dinámica del acuífero. Se puede definir un manantial como un lugar donde se produce un afloramiento natural del agua subterránea.

En lugares donde estratos impermeables bloquean el flujo subterráneo del agua, esta logra llegar a la superficie tal como puede observarse en la Figura 14. La descarga del acuífero se puede dar en una situación al descubierto, como manantial, o de un modo invisible, como cuando el flujo subterráneo aporta a un río o arroyo. (Bryan, 1979).

En lugares donde el agua aflora en forma de manantial se le puede captar fácilmente. De hecho, los abastecimientos públicos de agua más antiguos se basaban a menudo en manantiales y cuando el flujo subterráneo aporta al río o viceversa es importante conocer la calidad y cantidad de ambos aporte con el fin de establecer riesgos para su uso. (Bryan, 1979)

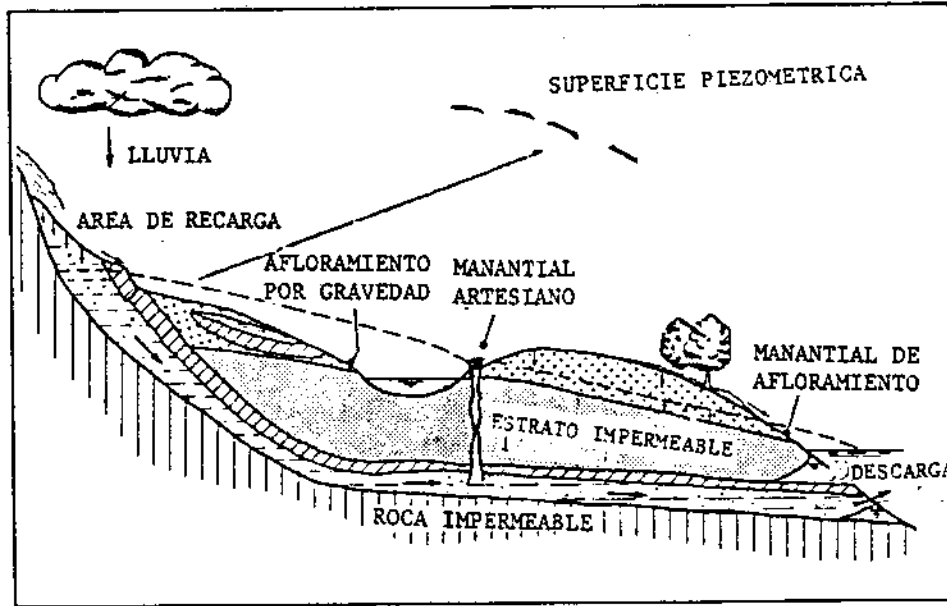


Figura 14 Esquema de surgimiento de Manantiales

Fuente: Bryan, K. Classification of springs, Journal of Geology, 1979

### 2.10.2. RÍOS QUE GANAN O CEDEN AGUA AL ACUÍFERO

El río o arroyo típico de una región húmeda recibe agua del nivel freático. Éste es un río efluente o que gana agua (Figura 13A). En las regiones áridas, muchos ríos llevan bastante agua en las partes altas. A medida que llegan a una elevación más baja, su cauce decrece debido a una menor precipitación, lo que provoca un descenso en el nivel freático, hasta el punto en que el río cede agua al acuífero, y se llama río influente (Figura 13B).

Algunos ríos pueden ser de ambos tipos, cediendo agua en épocas de sequía y recibéndola en tiempos de lluvia (Figura 13C). La técnica más utilizada para poder definir esta relación se le llama aforos diferenciales y consiste en medir caudal del canal principal del río y de todas las entradas de ríos tributarios al sistema, de modo que si no existe balance las pérdidas o ganancias corresponden a contribuciones o descargas del acuífero, lo cual se describirá en la metodología de la investigación a continuación de esta sección. (Bryan, 1979)

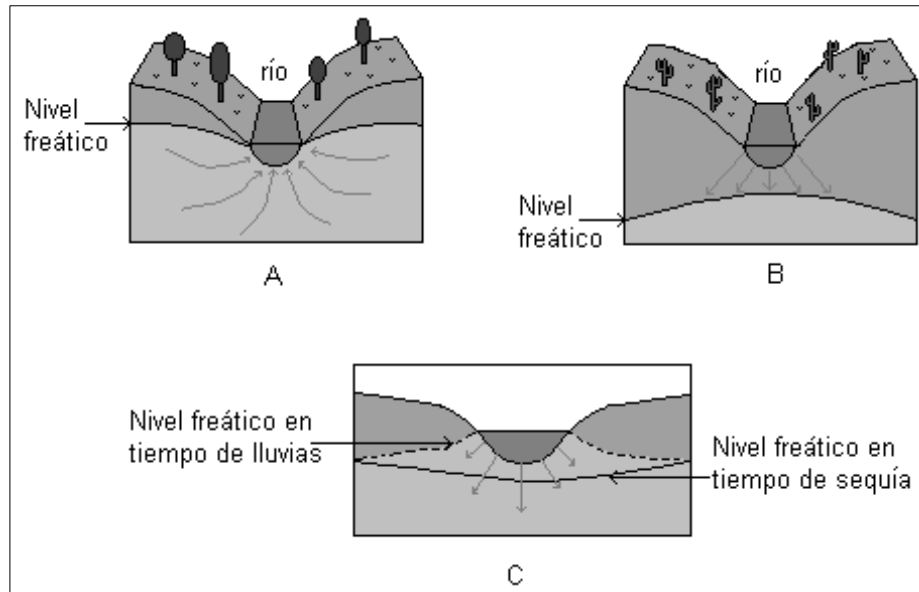


Figura 15 Tipos de ríos: A) Efluente, B) Influyente, C) Efluente en período de lluvia e influyente en época de sequía

Fuente: Bryan, K. Classification of springs, Journal of Geology, 1979

### III. ESTUDIO EXPERIMENTAL.

Este capítulo trata acerca de la metodología y resultados obtenidos en las diferentes líneas de estudio de la presente investigación, las cuáles son: Evaluación geológica, Evaluación hidrológica, Evaluación hidrogeológica, Evaluación hidrogeoquímica, Evaluación de la especiación química de la base de datos, Estudio de dispersión de contaminantes en agua superficial, Evaluación de la calidad de agua, Análisis y evolución temporal de los datos, Análisis geoestadístico de la base de datos y relación entre el agua superficial y subterránea del área geográfica de interés. A continuación en la figura 16, se presentan las temáticas desarrolladas en este capítulo de manera estructurada.

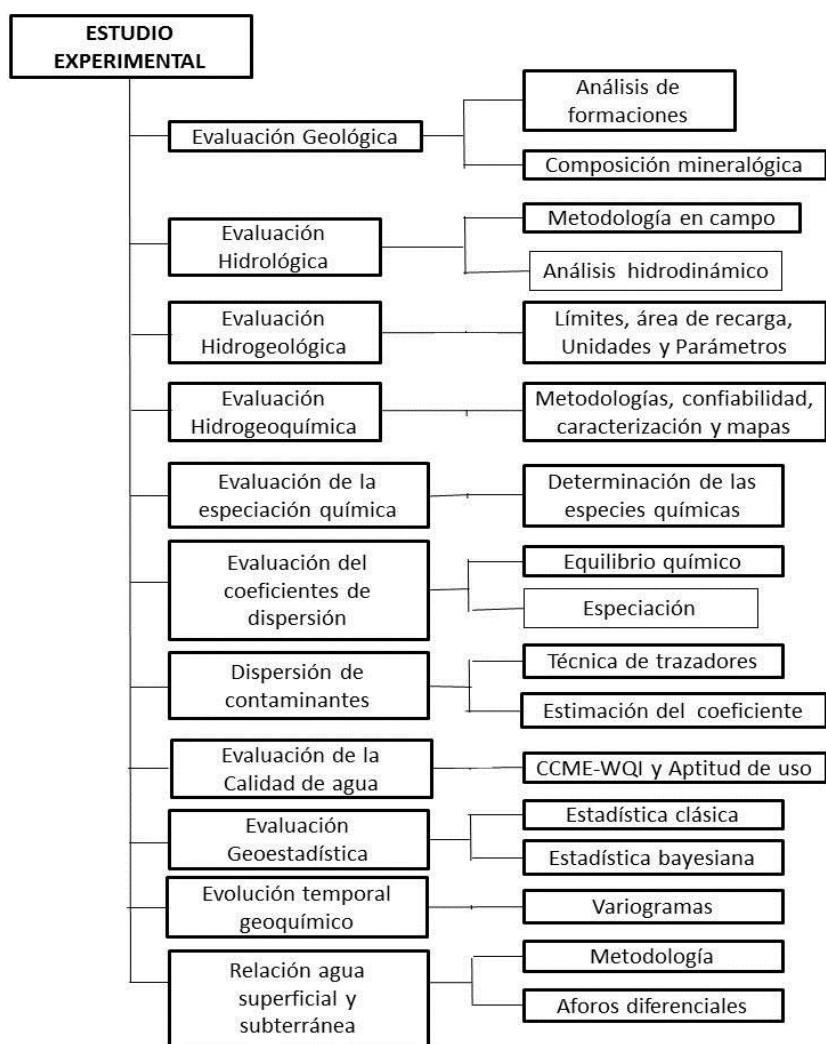


Figura 16 Esquema de capítulo III: estudio experimental de la investigación

Fuente: Elaboración propia.

### **3.1. EVALUACIÓN GEOLÓGICA.**

Es bien sabido que la matriz geológica por la cual se transportan las aguas subterráneas determina en gran medida su composición o concentración química, consecuentemente y desde una perspectiva inversa, la concentración química de las muestras de agua nos brinda también información acerca de la geología del sistema; es este proceso inverso el que se ha realizado al final de este proceso, concatenando la caracterización geológica con el estudio de especiación química que se describe en el apartado 3.5.

La metodología investigativa involucra el proceso de inversión inductiva que conlleva a obtener de la química, datos que nos brinden información acerca de los procesos mineralógicos presentes en el transporte de las aguas subterráneas, por ello el análisis de la información se hace desde 2 perspectivas; la primera a partir de análisis con software de información geográfica y coberturas del mapa geológico de El Salvador (subapartados del 3.1.2.1 al 3.1.2.4) y la segunda con componentes de equilibrio químico de especies en fase sólida (apartado 3.5.2.2) en donde se detalla la caracterización mineralógica de los sitios de muestreo de la base de datos hidrogeoquímica de la investigación.

#### **3.1.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

A partir de las coberturas del Mapa Geológico de El Salvador (Misión geológica alemana, 1967-1971), que se observa en el Mapa 6 y del procesamiento geométrico en un sistema de información geográfica, se ha determinado el porcentaje de área de aporte de cada uno de los miembros y formaciones geológicas, en el área total de interés en este estudio (Ver Figura 14). De igual forma en la sección 3.1.2.5 se describen los minerales en equilibrio químico que son consistentes a la química de las muestras de agua subterránea evaluadas para toda la base de datos geoquímica de la investigación.



### **3.1.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

El análisis de la información en este apartado se basa en la explicación de los cálculos realizados para cada formación así por ejemplo para el cálculo de los gráficos circulares porcentuales se llevó a cabo una metodología tabular de la información extraída de las coberturas del mapa geológico (ver mapa 6) a partir de las discretizaciones por formación y miembro geológico descritas de manera porcentual al área geográfica de interés, dando como resultado un análisis detallado por cada una de las 3 formaciones geológicas presentes: Formaciones San Salvador, Cuscatlán y Bálsamo respectivamente. Finalmente en el apartado 3.1.2.5 se logra realizar un análisis específico por sitio de muestreo en el cual se enlistan las especies en fase sólida que son termodinámicamente consistentes en las localizaciones individuales de cada sitio, (Ver Tabla 7).

#### **3.1.2.1. GEOLOGIA DEL AREA GEOGRÁFICA DE INTERÉS**

El Mapa 6 muestra la geología del área geográfica de interés y cómo se distribuyen los diferentes miembros geológicos en toda el área de estudio; es importante destacar que a partir del procesamiento geométrico de mapas fue posible calcular las áreas específicas de cada uno de éstos miembros geológicos los cuales se describen en la Figura 17. A continuación se describen los miembros geológicos en base a los elementos que se detallan en los atributos de las coberturas del Mapa Geológico de la República de El Salvador:

- b1:epiclastitas volcánicas, piroclastitas, corrientes de lava intercaladas
- b2: efusivas andesíticas, piroclastitas, epiclastitas volcánicas subordinadas
- b3:efusivas andesíticas-basálticas
- c1:piroclastitas acidas, epiclastitas volcánicas, tobas ardientes y fundidas
- c1':piroclastitas acidas, epiclastitas volcánicas, tobas ardientes y fundidas, edad de Chalatenango localmente
- c3:efusivas andesíticas-basálticas
- Q'f: aluviones, localmente con intercalaciones de piroclastitas

- s1:piroclastitas acidas, epiclastitas volcánicas, tobas ardientes y fundidas; efusivas andesíticas
- s2:efusivas andesíticas y basálticas: piroclastitas
- s3:piroclastitas acidas, epiclastitas volcánicas (tobas color café)
- s3'a:piroclastitas acidas, epiclastitas volcánicas (tobas color café): efusivas acidas
- s5:efusivas basálticas
- s5'c:efusivas basálticas: cenizas y tobas de lapilli

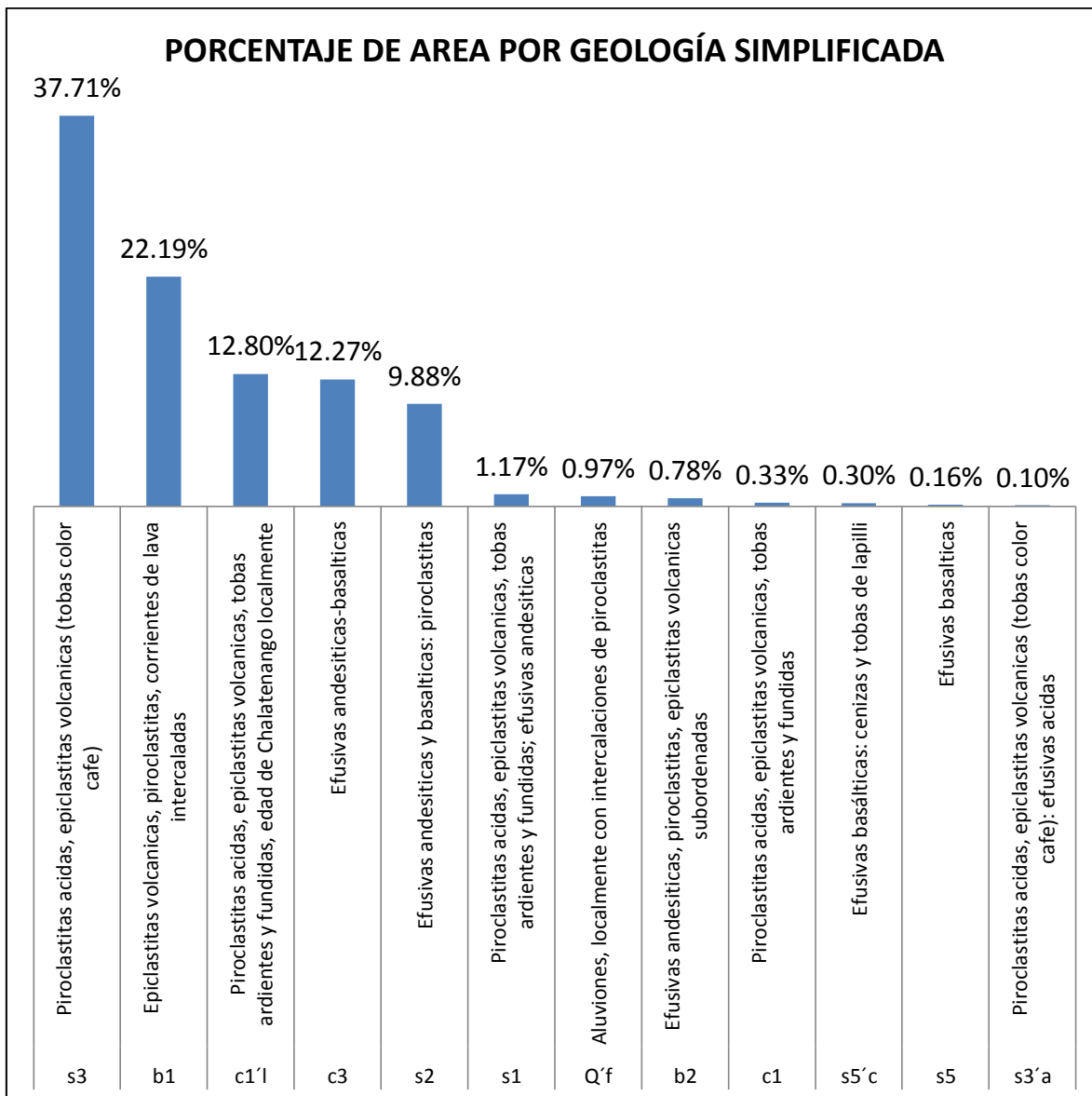


Figura 17 Geología en porcentaje de área geográfica en la zona en estudio

Fuente: Elaboración propia. Datos: Coberturas de mapa geológico de El Salvador (MARN)

Con la información anterior y tabulación cualimétrica de la información, en las figuras 18, 19 y 20 se detalla la caracterización geológica porcentual de las formaciones San Salvador, Cuscatlán y Bálsamo, respectivamente.

### 3.1.2.2. FORMACIÓN SAN SALVADOR (HOLOCENO HASTA PLEISTOCENO)

La Formación San Salvador, de edad desde el Pleistoceno hasta el Cuaternario Reciente, está constituida por un manto de tobas poco compactas y piroclásticos sueltos que descansan sobre lavas andesíticas y basálticas muy fracturadas, con intercalaciones de escorias y lapilli. Esta formación se encuentra al sur de la ciudad de Santa Ana, hasta el Volcán de Santa Ana y cerca del Lago de Coatepeque. (López Araujo & Retana Peña, 2007). La Formación San Salvador se encuentra en la cadena volcánica joven y consiste del 50.29% del área geográfica de interés de esta investigación y se muestra en la figura 18.

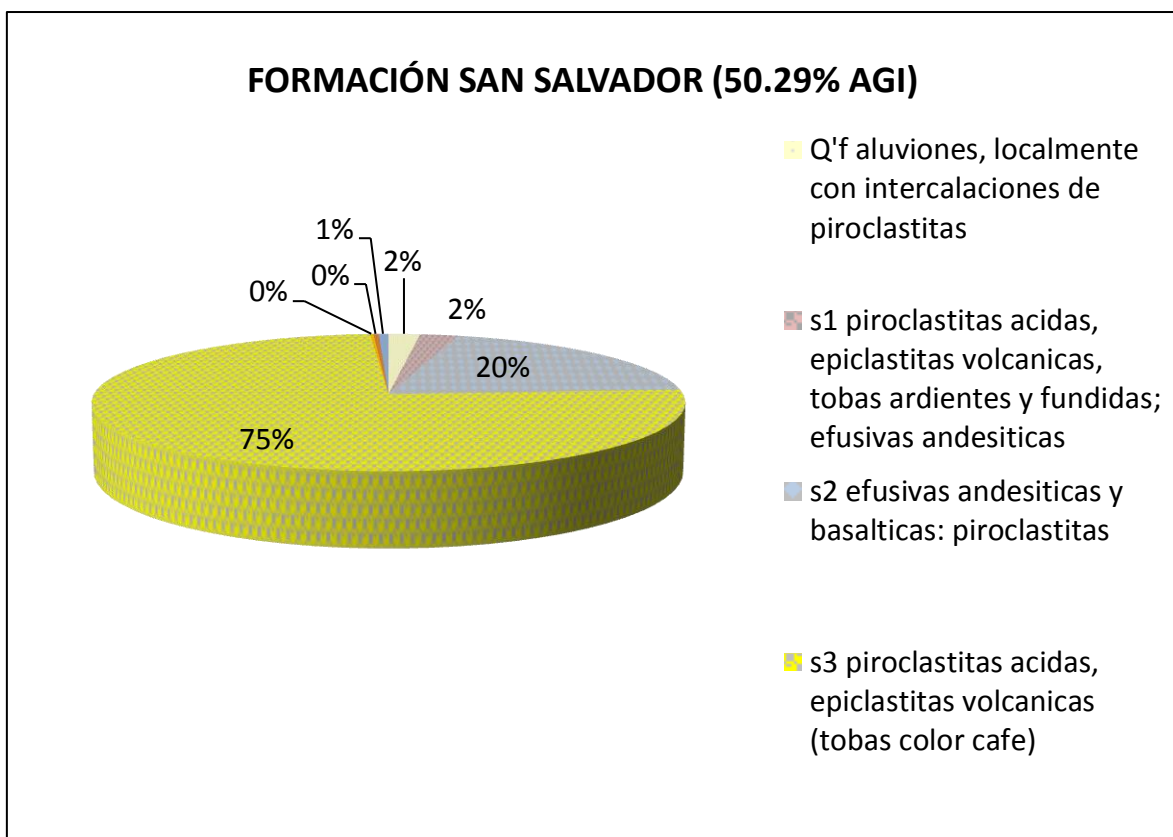


Figura 18 Caracterización geológica porcentual de la formación San Salvador

Fuente: Elaboración propia. Datos: Coberturas de mapa geológico de El Salvador (MARN)

En la figura 18 se muestra la caracterización geológica porcentual de la formación San Salvador la cual en general se sabe que consiste de productos extrusivos de los volcanes individuales tales como: corrientes de lava, cúpulas de lava, tobas fundidas, tobas, pómez, escoria y cenizas volcánicas, que se encuentran a veces con intercalaciones de sedimentos lacustres. El espesor de los estratos y la sucesión varía de acuerdo a los eventos volcánicos. También se encuentran suelos fósiles color café y negro. (López Araujo & Retana Peña, 2007)

Los miembros que se encuentran dentro de la zona de estudio y que pertenecen a esta formación son los siguientes: s1, s2, s3, s3'a, s5, s5'c y Q'f, los cuáles se describen a continuación (Mapa Geológico de El Salvador, 1975)

#### **A. MIEMBRO s1**

Se define como piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas localmente efusivas básicas intermedias eventualmente lavas basálticas y andesíticas con tobas de baja permeabilidad con índices de infiltración aproximados del 5%; las lavas pueden tener permeabilidad secundaria y las tobas forman el basamento impermeable del manto freático superior, se encuentran en los alrededores del Lago de Coatepeque en el Municipio de Santa Ana y en pequeños sectores ubicados en los municipios de San Pablo Tacachico y San Juan Opíco.

Los materiales que se encuentran en este miembro dentro de la zona de estudio son fragmentos de hasta 2 cm de pómez de color azul-gris aplastados, la parte superior está constituida por fragmentos porosos de vidrio volcánico negro y material efusivo compacto. (López Araujo & Retana Peña, 2007)

#### **B. MIEMBRO s2**

Se define como efusivas básicas-intermedias y piroclastitas subordinadas de secuencias lávica-tobácea, se encuentran pequeños afloramientos alrededor de la Ciudad de

Santa Ana en el Municipio de Santa Ana. Los materiales que se encuentran en los alrededores del volcán de Santa Ana son lavas basálticas y andesíticas hipersténicas principalmente, basaltos de color café y gris olivínicos augíticos de textura variable y en la falda norte del volcán se encuentra cubierto de lapilli compuesto de vidrio café con pocos fenocristales de plagioclasas. Constituye la principal área de recarga hídrica de la subcuenca del río Aranchacal y forma la cubierta lávica joven de la estructura volcánica; en la parte baja de la cuenca está cubierta por tobas café (s3a). Este miembro estatigráfico posee alta permeabilidad e índice de infiltración mayor al 40% y constituyen acuíferos de alto rendimiento. En el Volcán Chingo se encuentran productos piroclásticos intercalados por depósitos lacustres del Pleistoceno Medio. (López Araujo & Retana Peña, 2007)

### **C. MIEMBRO s3**

El miembro s3 en el área geográfica de interés está constituida principalmente por piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas (tobas de color café). (Mapa Geológico de El Salvador, 1975)

### **D. MIEMBRO s3'a**

Se define como piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas (Tobas de color café) facies de proximales gruesos y distales afines de piroclásticos de caldera Coatepeque con flujos y estratos de pómez grueso, se encuentran específicamente en las faldas del Volcán de Santa Ana y caldera Coatepeque, cubriendo en su gran mayoría al municipio de Santa Ana. Los materiales que se encuentran al norte y noroeste del Lago de Coatepeque están constituidos por fragmentos de pómez y líticos de hasta 15 cm y sobreyace una secuencia de cenizas dacíticas de un espesor superior a los 30m. Los bancos de cascajo de pómez yacen sobre unidades Pliocénicas. (López Araujo & Retana Peña, 2007) A las facies proximales distales se les atribuyen un índice de infiltración aproximado de 5%. Los acuíferos de la facie proximal son de buen rendimiento. (MARN-BID 1209-OC-ES No.03, 2008)

## **E. MIEMBRO s5**

El miembro s5 en el área geográfica de interés está constituido principalmente por rocas efusivas basálticas. (Mapa Geológico de El Salvador, 1975)

## **F. MIEMBRO s5'c**

Se define como Efusivas Básicas-Intermedias, se encuentran en pequeños afloramientos en los municipios de El Porvenir y Candelaria de la Frontera; Piroclásticos proximales de proyección en las faldas del volcán de Santa Ana. Los materiales que se encuentran son coladas de lava de tipo basalto olivínico de color gris claro, cenizas, lapilli y tobas. Constituye zona de recarga hídrica con un índice de infiltración mayor al 40%. (López Araujo & Retana Peña, 2007)

## **G. MIEMBRO Q'f**

Se define como depósitos sedimentarios del cuaternario, constituidos principalmente por sedimentos detríticos o depósitos en pequeñas depresiones cratéricas e intercalaciones de rocas piroclásticas, depósitos de estuario, barras costeras, conos de deyección, depósitos coluviales, arenas, gravas, etc., se encuentran principalmente en el municipio de Texistepeque y pequeños depósitos en las afueras del municipio de Santa Ana. El índice de infiltración aproximado de este miembro estatigráfico es mayor al 40%. (López Araujo & Retana Peña, 2007)

### **3.1.2.3. FORMACIÓN CUSCATLÁN (PLEISTOCENO INFERIOR HASTA PLIOCENO SUPERIOR)**

La Formación Cuscatlán que posee el 19.67% del área geográfica de interés de ésta investigación data de la edad Pleistoceno Inferior y está constituida por tobas líticas compactas y lavas descompuestas.

En la Figura 19 se muestra la caracterización geológica porcentual de la formación Cuscatlán, la cual está compuesta por productos extrusivos de los volcanes individuales.

Estos productos son: corrientes de lava, aglomerados, tobas, escorias y cenizas volcánicas endurecidas y tobas fundidas con intercalaciones de sedimentos lacustres y fluviales. Los miembros que conforman la formación en el AGI se encuentran en pequeños afloramientos en las colinas al oeste de la Ciudad de Santa Ana. (Mapa Geológico de El Salvador, 1975)

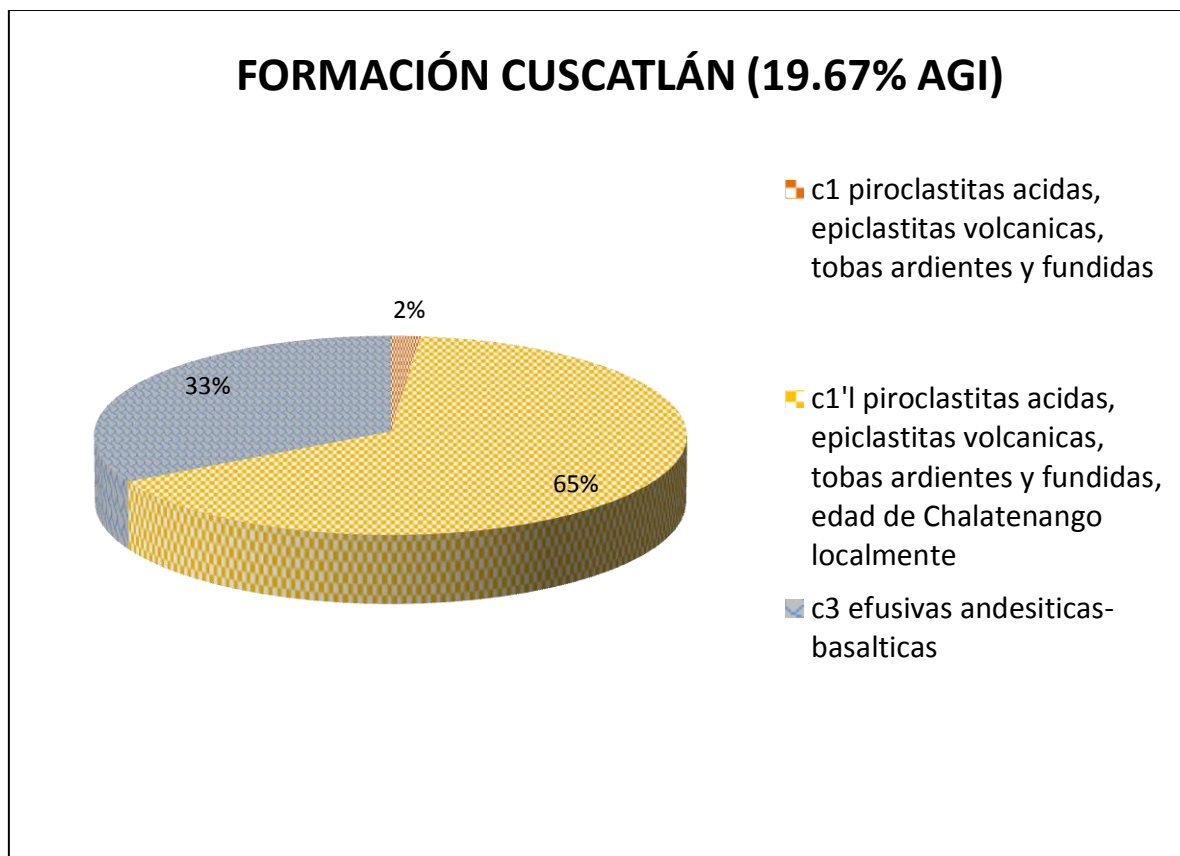


Figura 19 Caracterización geológica porcentual de la formación Cuscatlán

Fuente: Elaboración propia. Datos: Coberturas de mapa geológico de El Salvador (MARN)

Los miembros que se encuentran dentro de la zona de estudio y que pertenecen a esta formación son los siguientes c1, c1'l y c3. (Mapa Geológico de El Salvador, 1975)

## **A. MIEMBRO c1**

Se define como piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas, formadas por unidades sedimentarias como volcánicas, se encuentran ubicadas principalmente en los municipios de Santa Ana y San Pablo Tacachico. Los materiales que se encuentran comprenden depósitos de diatomitas en la parte inferior y estratos lacustres de 2 a 5 m en la parte superior. (López Araujo & Retana Peña, 2007)

Forma parte de la barrera de baja permeabilidad que limita el acuífero en la parte norte de la cuenca con índice de infiltración menor al 5%.

## **B. MIEMBRO c1'**

Forma parte de la barrera de baja permeabilidad que limita al acuífero en la parte norte de la cuenca constituido por Piroclastitas acidas, epiclastitas volcanicas, tobas ardientes y fundidas, edad de Chalatenango y con índice de infiltración menor al 5%. (López Araujo & Retana Peña, 2007)

## **C. MIEMBRO c3**

Se definen como efusivas básicas-intermedias constituida por rocas volcánicas de tipo andesita y basáltica con permeabilidad primaria baja y permeabilidad secundaria media estas últimas pueden constituir acuíferos de mediano o bajo rendimiento; constituye el estrato superior de la barrera lateral de baja permeabilidad que limita el acuífero en la parte noroeste de la cuenca subterránea e índice de infiltración aproximado del 12%. (López Araujo & Retana Peña, 2007)

### **3.1.2.4. FORMACIÓN BÁLSAMO (PLIOCENO SUPERIOR HASTA MIOCENO)**

La Formación del Bálsamo posee el 28.60% del área geográfica de interés de ésta investigación y es una de las formaciones más antiguas que se encuentra dentro de la zona de estudio, pertenece al periodo Mio-Pliocénico, constituida por lavas básicas por lo regular



descompuesta, con intercalaciones de tobas fundidas que descansan sobre aglomerados volcánicos. Esta formación en general posee muy bajas permeabilidades.

En la figura 20 se muestra la caracterización geológica porcentual de la formación Bálsamo, dicha formación contiene en general productos volcánicos en los cuales abundan los aglomerados con intercalaciones de tobas volcánicas endurecidas y corrientes de lava basáltica-andesítica con un espesor aproximado de 500 m. También hay suelos fósiles de color rojo de gran profundidad (hasta 20 m). Además se encuentran rocas extrusivas con pocas intercalaciones de tobas volcánicos y aglomerados; la parte inferior es de carácter andesítico y en la parte superior, basáltico. (López Araujo & Retana Peña, 2007)

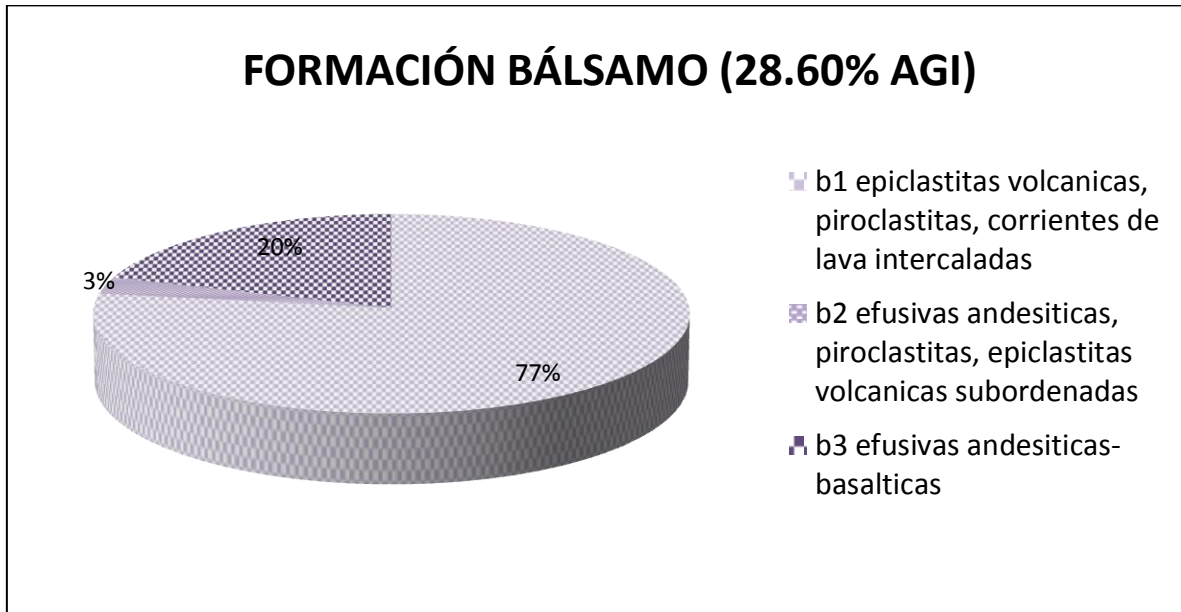


Figura 20 Caracterización geológica porcentual de la formación Bálsamo

Fuente: Elaboración propia. Datos: Coberturas de mapa geológico de El Salvador (MARN)

Esta formación es más joven que las ignimbritas ácidas de la Formación Chalatenango, pero anteriores a las de la Formación Cuscatlán por lo que se puede decir que ésta se encuentra entre ellas. Dentro de la zona de estudio se encuentran los miembros b1, b2 y b3 de esta formación, concentrándose en el centro de la misma cubriéndola en su gran mayoría. (López Araujo & Retana Peña, 2007)

### **A. MIEMBRO b1**

Se define como epiclastitas volcánicas y piroclastitas (tobas) localmente efusivas básicas-intermedias intercaladas con lapilli de pómez y limo rojo con baja permeabilidad. Se encuentran tobas brechosas andesíticas, tobas interestratificadas y flujos de lavas. Tanto los fragmentos de las tobas brechosas como los flujos de lava son andesitas hipersténicas. Constituye parte de la barrera de baja permeabilidad que limita la cuenca subterránea del acuífero en la parte norte y noreste con índices de infiltraciones mayores al 12%. (López Araujo & Retana Peña, 2007)

### **B. MIEMBRO b2**

Se define como rocas volcánicas efusivas básicas-intermedias, basálticas andesíticas con intercalaciones de estratos piroclásticos y epiclastitas volcánicas subordinadas (estratos no diferenciados y edificios volcánicos) que constituyen parte de las barreras de baja permeabilidad que limitan el acuífero en el extremo sur y sureste, éstas se encuentran en pequeños afloramientos en los municipios de Coatepeque y Texistepeque. Poseen permeabilidad baja con índices de infiltración mayores al 12%. Los acuíferos de esta formación son de bajo rendimiento. (López Araujo & Retana Peña, 2007)

### **C. MIEMBRO b3**

Se define como rocas efusivas básicas-intermedias basálticas y andesíticas de baja permeabilidad, siendo este el miembro superior de la formación, se encuentran pequeños afloramientos de rocas piroclásticas en los municipios de Coatepeque, Opíco y Tacachico.

Cuando se localizan en las zonas de saturación constituye acuíferos de bajo rendimiento. Forma parte de las barreras laterales que limitan al acuífero en la parte sur de la cuenca subterránea y posee un índice de infiltración aproximado del 12%. (López Araujo & Retana Peña, 2007)

### **3.1.2.5. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA EN LOS SITOS DE MUESTREO**

La composición mineralógica específica de la base de datos geoquímica de la investigación se obtuvo por la metodología de especiación química (Ver Capítulo 3.5) los cuales son termodinámicas consistentes (En la tabla 14 se muestran las reacciones de formación utilizadas por el software MINEQL 4.6 para la estimación de especies químicas en equilibrio químico presentes en el área geográfica de interés) y con lo cual se ha logrado estimar para cada sitio, los minerales que se presentan en la Tabla 7; es importante aclarar que los minerales presentes en cada sitio no necesariamente fueron formados en la cercanía del sitio, sino que pudieron haber sido formados en el recorrido de las aguas y su interacción con las rocas en tiempos diversos. Se aclara además, que los nombres de los minerales se presentan en idioma inglés por ser el idioma nativo del software de especiación utilizado y que algunas traducciones de dichos nombres propios no son usuales, y para homogenizar los resultados se presentan como tal.

Tabla 7 Minerales estimados por especiación química en los sitios de muestreo del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración Propia.

SITIO	GEOLOGÍA	FECHA	LATITUD	LONGITUD	MINERALES ESTIMADOS TERMODINAMICAMENTE POR ESPECIACIÓN QUÍMICA
SA-01	s3a	14/03/2008	13.95947	-89.56958	HYDROXYLAPATITE, HUNTITE, DOLOMITE, ARTINITE, HYDROMAGNESITE, NESQUEHONITE, MAGNESITE, PERICLASE, BRUCITE
SA-02	s2	14/03/2008	13.98178	-89.55742	CERRUSITE, MASSICOT, LITHARGE
SA-03	s3a	14/03/2008	13.99467	-89.54667	HYDROXYLAPATITE
SA-04	s3a	14/03/2008	14.01017	-89.54422	LIME, PORTLANDITE, HYDROXYLAPATITE, ARAGONITE, CALCITE, HUNTITE, DOLOMITE, ARTINITE, HYDROMAGNESITE, NESQUEHONITE, SIDERITE, MAGNESITE, WUSTITE, GREENALITE, VIVIANITE, PERICLASE, BRUCITE
SA-05	s3a	14/03/2008	14.02253	-89.53664	LAURIONITE, PHOSGENITE, HYDROCERRUSITE, CERRUSITE, MASSICOT, LITHARGE
SA-06	s3a	14/03/2008	14.02219	-89.53372	CERRUSITE, MASSICOT, LITHARGE, CRISTOBALITE, CHALCEDONY, QUARTZ
SA-07	s3a	14/03/2008	14.02381	-89.52747	LAURIONITE, PHOSGENITE, HYDROCERRUSITE, CERRUSITE, GREENALITE, BIXBYITE, MASSICOT, LITHARGE, HYDROXYLPYROMORPHITE, LARNAKITE, ANGLESITE, HYDROXYLAPATITE
SA-08	s3a	26/03/2008	13.99228	-89.54353	LAURIONITE, PHOSGENITE, HYDROCERRUSITE, CERRUSITE, VIVIANITE, MELANTERITE, MASSICOT, LITHARGE, HYDROXYLPYROMORPHITE, MIRABILITE, THENARDITE, HYDROXYLAPATITE
SA-09	s3a	26/03/2008	13.98536	-89.54906	HYDROCERRUSITE, CERRUSITE, GREENALITE, VIVIANITE, MELANTERITE, MASSICOT, LITHARGE, HYDROXYLPYROMORPHITE, HYDROXYLAPATITE
SA-10	s3a	26/03/2008	13.98275	-89.54636	SIDERITE, WUSTITE, GREENALITE, VIVIANITE, MELANTERITE
SA-11	s3a	26/03/2008	13.96225	-89.55001	SIDERITE, WUSTITE, GREENALITE, VIVIANITE

SITIO	GEOLOGÍA	FECHA	LATITUD	LONGITUD	MINERALES ESTIMADOS TERMODINAMICAMENTE POR ESPECIACIÓN QUÍMICA
SA-12	s3a	26/03/2008	13.95492	-89.53367	THERMONATRITE, NATRON, SIDERITE, WUSTITE, GREENALITE, VIVIANITE
SA-13	s3a	26/03/2008	13.95694	-89.57453	SIDERITE, WUSTITE, GREENALITE, VIVIANITE, MELANTERITE, MASSICOT, LITHARGE
SA-14	s3a	26/03/2008	13.96111	-89.56628	LIME, PORTLANDITE, HYDROXYLAPATITE, ARAGONITE, CALCITE, HUNTITE, DOLOMITE, ARTINITE, HYDROMAGNESITE, NESQUEHONITE, SIDERITE, MAGNESITE, WUSTITE, GREENALITE, VIVIANITE, MELANTERITE, PERICLASE, BRUCITE
SA-15	b1	27/03/2008	13.98542	-89.59047	HYDROCERRUSITE, CERRUSITE, VIVIANITE, MELANTERITE, MASSICOT, LITHARGE
SA-16	c3	27/03/2008	13.99447	-89.60025	HYDROCERRUSITE, SIDERITE, CERRUSITE, WUSTITE, GREENALITE, VIVIANITE, MELANTERITE, MASSICOT, LITHARGE, CRISTOBALITE, CHALCEDONY, QUARTZ
SA-17	s2	27/03/2008	13.94800	-89.57428	SIDERITE, WUSTITE, GREENALITE, VIVIANITE, MELANTERITE
SA-18	s3a	27/03/2008	14.01994	-89.54775	LIME, PORTLANDITE, HYDROXYLAPATITE, ARAGONITE, CALCITE, DOLOMITE, SIDERITE, WUSTITE, GREENALITE, VIVIANITE, MELANTERITE
SA-19	s3a	27/03/2008	14.01567	-89.55153	LIME, HYDROXYLAPATITE, HYDROCERRUSITE, CERRUSITE, VIVIANITE, MELANTERITE, MASSICOT, LITHARGE, HYDROXYLPYROMORPHITE
SA-20	s3a	27/03/2008	13.98972	-89.58334	MELANTERITE
SA-21	s3a	31/03/2008	13.97608	-89.58219	GYPHUM, ANHYDRITE, LAURIONITE, HYDROCERRUSITE, CERRUSITE, BIXBYITE, MASSICOT, LITHARGE, EPSOMITE
SA-22	s3a	31/03/2008	14.00300	-89.56578	GYPHUM, ANHYDRITE, LAURIONITE, PHOSGENITE, HYDROXYLPYROMORPHITE, LARNAKITE, EPSOMITE, ANGLSITE, HYDROXYLAPATITE
SA-23	s2	31/03/2008	13.99833	-89.56803	HYDROCERRUSITE, CERRUSITE, MASSICOT, LITHARGE
SA-24	s3a	09/04/2008	13.96644	-89.59456	HYDROCERRUSITE, CERRUSITE, MASSICOT, LITHARGE

SITIO	GEOLOGÍA	FECHA	LATITUD	LONGITUD	MINERALES ESTIMADOS TERMODINAMICAMENTE POR ESPECIACIÓN QUÍMICA
SA-25	s3a	09/04/2008	13.97722	-89.58789	THERMONATRITE, NATRON, BIXBYITE
SAN-09	s3	17/02/2005	13.98428	-89.57982	LIME, PORTLANDITE, HYDROXYLAPATITE, ARAGONITE, CALCITE, HUNTITE, DOLOMITE, ARTINITE, HYDROMAGNESITE, NESQUEHONITE, MAGNESITE, PERICLASE, BRUCITE, CRISTOBALITE, CHALCEDONY, QUARTZ
SAN-02	s3a	20/06/2005	14.02347	-89.53134	HYDROXYLAPATITE, GYPSUM, ANHYDRITE, LAURIONITE, PHOSGENITE, MASSICOT, LITHARGE, HYDROXYLPYROMORPHITE, LARNAKITE, EPSOMITE, MIRABILITE, CRISTOBALITE, CHALCEDONY, QUARTZ, THENARDITE, ANGLESITE
SAN-01	b1	20/06/2005	14.02199	-89.54576	GYPSUM, ANHYDRITE, LAURIONITE, MELANTERITE, HYDROXYLPYROMORPHITE, LARNAKITE, EPSOMITE, MIRABILITE, CRISTOBALITE, CHALCEDONY, QUARTZ, THENARDITE, ANGLESITE, HYDROXYLAPATITE
SAN-04	s3a	20/06/2005	14.00794	-89.52701	HYDROXYLPYROMORPHITE, CRISTOBALITE, CHALCEDONY, QUARTZ, HYDROXYLAPATITE
SAN-08	s3a	17/02/2005	14.01025	-89.56059	HYDROXYLAPATITE, GYPSUM, ANHYDRITE, LAURIONITE, PHOSGENITE, HYDROCERRUSITE, CERRUSITE, MASSICOT, LITHARGE, HYDROXYLPYROMORPHITE, LARNAKITE, EPSOMITE, MIRABILITE, CRISTOBALITE, CHALCEDONY, QUARTZ, THENARDITE, ANGLESITE
SA04-12MX	s3	09/10/2012	14.01013	-89.54428	HYDROXYLAPATITE, GYPSUM, ANHYDRITE, LAURIONITE, PHOSGENITE, HYDROCERRUSITE, CERRUSITE, MASSICOT, LITHARGE, HYDROXYLPYROMORPHITE, LARNAKITE, EPSOMITE, MIRABILITE, CRISTOBALITE, CHALCEDONY, QUARTZ, THENARDITE, ANGLESITE
SAGRANJAMX-12	s3	09/10/2012	14.01373	-89.53600	GYPSUM, ANHYDRITE, LAURIONITE, PHOSGENITE, HYDROXYLPYROMORPHITE, LARNAKITE, EPSOMITE, MIRABILITE, CRISTOBALITE, CHALCEDONY, QUARTZ, THENARDITE, ANGLESITE, HYDROXYLAPATITE

SITIO	GEOLOGÍA	FECHA	LATITUD	LONGITUD	MINERALES ESTIMADOS TERMODINAMICAMENTE POR ESPECIACIÓN QUÍMICA
SA18MX-12	b1	09/10/2012	14.01997	-89.54770	HYDROXYLAPATITE, LAURIONITE, HYDROCERRUSITE, CERRUSITE, BIXBYITE, MASSICOT, LITHARGE, HYDROXYLPYROMORPHITE, CRISTOBALITE, CHALCEDONY, QUARTZ
CENTRO-COAT	s1	21/09/2012	13.86936	-89.54197	LIME, PORTLANDITE, ARAGONITE, CALCITE, HUNTITE, DOLOMITE, ARTINITE, HYDROMAGNESITE, NESQUEHONITE, THERMONATRITE, NATRON, MAGNESITE, PERICLASE, BRUCITE, BIXBYITE
F-TERMAL-COAT	s3	14/09/2012	13.84400	-89.56812	LIME, PORTLANDITE, ARAGONITE, CALCITE, HUNTITE, DOLOMITE, ARTINITE, HYDROMAGNESITE, NESQUEHONITE, THERMONATRITE, NATRON, SIDERITE, MAGNESITE, WUSTITE, GREENALITE, PERICLASE, BRUCITE, BIXBYITE, MIRABILITE, THENARDITE
PTO-MADERO-COAT	s1	14/09/2012	13.87165	-89.56870	LIME, PORTLANDITE, ARAGONITE, CALCITE, HUNTITE, DOLOMITE, ARTINITE, HYDROMAGNESITE, NESQUEHONITE, THERMONATRITE, NATRON, SIDERITE, MAGNESITE, WUSTITE, GREENALITE, PERICLASE, BRUCITE, BIXBYITE
CONSTITUCION-COAT	s1	27/09/2012	13.88413	-89.54395	LIME, PORTLANDITE, ARAGONITE, CALCITE, HUNTITE, DOLOMITE, ARTINITE, HYDROMAGNESITE, NESQUEHONITE, THERMONATRITE, NATRON, MAGNESITE, PERICLASE, BRUCITE, BIXBYITE, MIRABILITE, THENARDITE

## **3.2. EVALUACIÓN HIDROLÓGICA.**

En este apartado se describirá de manera detallada las características hidrológicas, hidráulicas e hidrográficas de la subcuenca en estudio, en 2 etapas importantes: primero en la metodología de la investigación se describen las actividades realizadas en la presente investigación para la obtención de datos, muestreo en campo, cálculos hidrodinámicos y finalmente se realiza un análisis de la información y presentación de resultados.

### **3.2.1. METODOLOGÍA DE LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS**

Los elementos hidrográficos de la subcuenca del río Suquiapa presentados en el apartado 2.3.1 fueron calculados en base a geometría de mapas utilizando software de información geográfica. El aporte al modelo hidrológico que la presente investigación realiza es la evaluación de 18 sitios a través de medición y análisis parámetros hidrodinámicos tales como: caudal, velocidad media, radio hidráulico, ancho y otras variables hidrodinámicas, así como un estudio de dispersión de contaminantes que más adelante se detallará en la sección 3.6, y también se determinaron parámetros fisicoquímicos de campo en los 18 sitios de agua superficial que se describen en el apartado 3.2.2.1.

#### **3.2.1.1. METODOLOGÍA DE TRABAJO EN CAMPO**

La selección de sitios de control hidrodinámicos en agua superficial y toma de muestras de agua en el río Suquiapa se realizó a través del criterio de continuidad por lo cual se seleccionaron todos los sitios sobre el canal principal antes de la confluencia con todos los ríos secundarios, y además sitios sobre los ríos tributarios antes de la confluencia con el canal principal tal como puede apreciarse en la Figura 21. El tramo de control para este estudio hidrodinámico fue de 10.037 km los sitios seleccionados en la técnica de aforo por vadeo se presentan en la Tabla 8 en donde además se muestra la columna distancia que es la longitud en metros desde el punto A01SUQUI hasta el punto final de este estudio, A18SUQUI.



Las características hidronámicas de flujo que se estimaron sobre el aguas superficiales a través de aforos por vadeo fueron : Nivel medio (m), Velocidad media (m/s), Área Mojada ( $m^2$ ), Perímetro Mojado (m), Radio Hidráulico (m), Ancho del cauce (m), Coeficiente de dispersión teórico ( $m^2/s$ ). A continuación se describe la metodología de aforo por vadeo, posteriormente en la sección 3.6 se describe la metodología del estudio de trazadores químicos para el cálculo experimental del coeficiente de dispersión hidrodinámico.

## **A. METODOLOGÍA PARA OBTENCIÓN DE DATOS PARA EL CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS: TÉCNICA DE AFOROS POR VADEO**

Con el fin de evaluar caudales de vertidos en ríos o manantiales, el aforo se puede realizar por medio de molinete<sup>1</sup> (Aforo por vadeo).

1. Se selecciona el sitio de aforo. Los sitios seleccionados para las mediciones de caudal, a través de ésta técnica, deben tener las siguientes características:
  - Velocidades paralelas en todos los puntos y que formen ángulo recto con la sección transversal de la corriente.
  - Curvas regulares de distribución de velocidad en la sección, en los planos vertical y horizontal.
  - Velocidades suficientes para la utilización del molinete.
  - Lecho de la sección uniforme y estable.
  - Ausencia de plantas acuáticas u otros obstáculos.

---

<sup>1</sup> Los molinetes son aparatos que miden la velocidad del agua en un punto dado, es medida mediante una hélice que transmite una señal por cada giro de la misma sobre un contador (impulso de sonido, luminoso o digital). Existen diferentes tipos de molinete: (a) Eje vertical, sin hélice, donde el elemento móvil son pequeñas copas (como las del anemómetro); (b) Eje horizontal, con elemento móvil la hélice. Estos son vendidos con sus certificados de calibración que sirven para calcular las velocidades a partir del número de vueltas por segundo de la hélice determinada.

2. La primera actividad en campo a realizar es la limpieza de la sección de aforo, quitando cualquier obstáculo que dificulte la medida o que inciden en la velocidad o corriente normal del vertido, tales como: ramas, piedras, lama, maleza, etc.
3. Para medir el ancho de la sección de aforo determinada, se utilizará un cable marcado o cinta métrica, sujetando dicho cable en ambos márgenes de la corriente del vertido y se tensa lo más posible en forma transversal a la corriente.
4. Al realizar el proceso de medición del caudal se divide el ancho del río en un número determinado de tramos o verticales (10 mínimo según la tabla de verticales mínimas recomendadas por el Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano, PHCA).
5. Teniendo ya las verticales definidas donde se harán las mediciones, se procede a tomar las profundidades en cada una de ellas, comenzando la medición por el margen izquierdo, viendo la corriente del vertido aguas abajo, puede suceder que en los márgenes la profundidad sea cero o diferente de cero.
6. Debido a que la velocidad en la vertical cambia según su profundidad, se tomarán mediciones en distintos puntos de la vertical, usualmente estas profundidades son: al 20%, 60% y 80% de la superficie, cuando la profundidad lo requiera de acuerdo a los siguientes intervalos:
  - Para profundidades menores de 24 cm, se usa el método superficial, es decir el molinete es colocado superficialmente.
  - Cuando hay profundidades de 0.25 cm hasta 0.74 cm en la vertical, la velocidad del agua en la sección se mide colocando el molinete al 60% de profundidad a partir de la superficie.
  - Cuando existen profundidades mayores de 0.74 cm, se hacen mediciones de velocidad al 20% y 80% de la superficie en la vertical.

7. El eje horizontal del molinete no debe estar situado a menos de una vez o una vez y media de la altura del rotor con respecto a la superficie del agua, ni a menos de tres veces la altura del rotor desde el fondo del vertido.
8. Para medir la velocidad de la corriente, se debe sostener el molinete en la posición deseada por medio de una varilla de vadeo. Una vez que el molinete se haya colocado en el punto seleccionado de la vertical, se alineará en dirección de la corriente antes de comenzar las mediciones. La hélice comenzará a dar vueltas y se inicia el conteo de las vueltas (revoluciones) a través de una caja de contacto adaptada al cuerpo del molinete. Dicha caja proporciona automáticamente el número de revoluciones en un tiempo determinado, usualmente este tiempo es de 40 segundos. En el molinete Gurley 622 también se puede utilizar un audífono para percibir las revoluciones por contacto y se utiliza un cronómetro para contabilizar el tiempo, y si el agua y la velocidad lo permite se puede contar las revoluciones en forma visual colocando una señal en la hélice o cazoleta del molinete, el número de giros se anotan en el formato de cálculo de aforo por vadeo.
9. Se repite el proceso de medición de la velocidad para las profundidades definidas y en todas las verticales a medir.
10. Cuando se está realizando la medición del caudal (aforo) se anotan los datos en un formato especial para el cálculo. Los datos son: vertido, cuenca, fecha, nombre de estación o industria, tipo de medición (vadeo o suspensión), tipo de molinete a utilizar, número de contactos (1=1, 1=5), hora de inicio y hora final de la medición del aforo, especificación del lugar de la medición, comportamiento de la corriente (bajando – subiendo) como se observa el agua (turbia, limpia o muy turbia), nombre de la persona que afora o realiza las mediciones y del que anota los resultados, ancho de los tramos a medir, profundidad total, altura en que se colocará el molinete en la vertical y las revoluciones. En espacio de observaciones, anotar cualquier anomalía en el registro de los niveles de las velocidades o cualquier fenómeno anormal en el sitio.

11. El cálculo de caudal obtenido en un aforo es la suma de las descargas individuales de cada subsección, es decir, la sumatoria de los productos del área de cada subsección y la velocidad promedio en la subsección respectiva.

- Para calcular descargas individuales en cada subsección se utiliza la fórmula general siguiente:

Ec. 15

$$q_i = V_i \left[ \frac{d_{(i+1)} - d_{(i-1)}}{2} \right] * p_i$$

$q_i$  = descarga en la subsección.

$V_i$  = Velocidad promedio de la subsección.

$d$  = distancia de la subsección al punto del inicio del aforo.

$p_i$  = profundidad de cada subsección.

- La velocidad promedio de la subsección, vendrá dada por la formula propia de cada molinete, la cual convierte los datos de giros/s de la hélice a m/s de la corriente. En las subsecciones en donde en una misma vertical se realizaron más de una medición de giros/s se deberá de realizar un promedio aritmético para obtener la velocidad promedio de dicha subsección.
- La sumatoria de cada descarga nos dará el caudal de toda la sección.

Ec. 16

$$Q = \sum q_i$$

### 3.2.1.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE PUNTOS DE MUESTREO

A continuación se presenta tabulados los puntos de muestreo, su descripción y datos geográficos para su ubicación:

Tabla 8 Sitios seleccionados en la técnica de aforo por vadeo

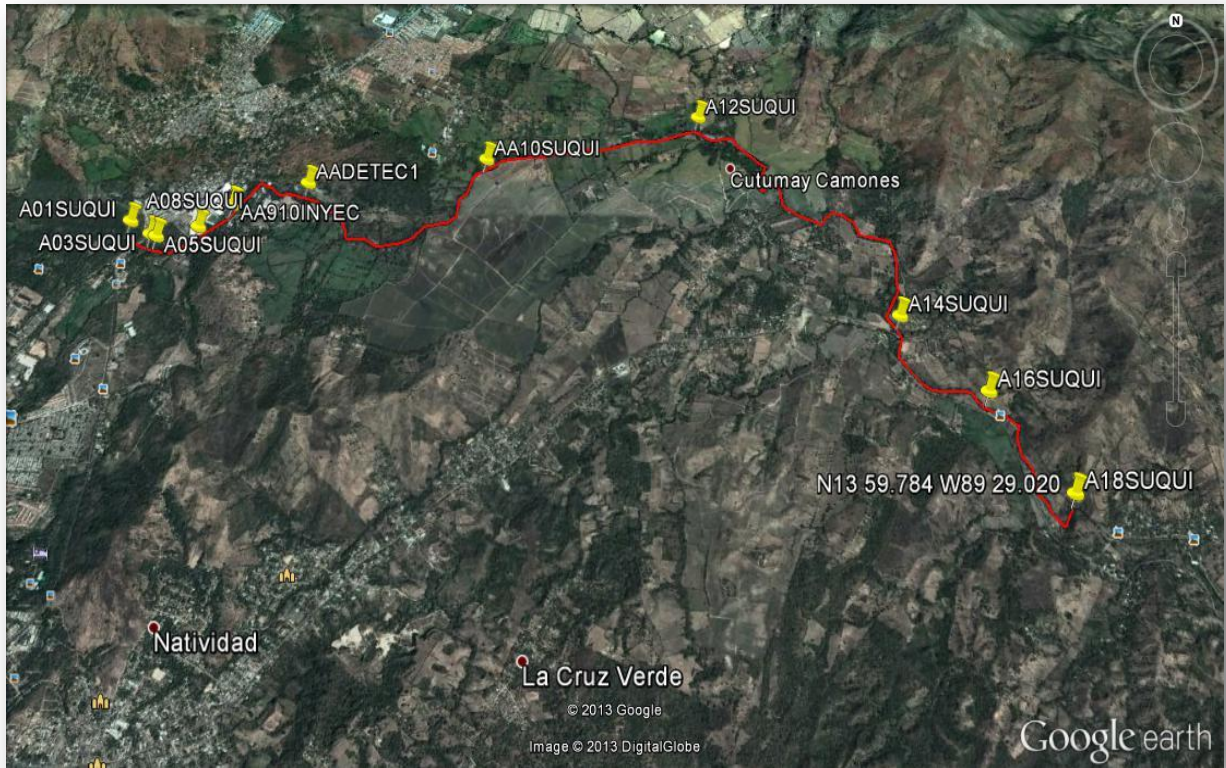
Fuente: Elaboración propia

Sitio	Descripción	Coordenadas Latitud	Coordenadas Longitud	Distancia (m)	Altura (msnm)
A01SUQUI	Punto de partida, cercano al Beneficio El Sauce.	14.013350	-89.542917	0	591
A02VERTI	Aproximadamente a 30 metros de A01SUQUI. Tributario conocido por los lugareños como Vertiente.	14.013183	-89.543083	17.77	620
A03SUQUI	Punto antes de la unión del río Suquiapa con el río Apanteos. A 25 metros aguas arriba de la unión de los ríos.	14.012400	-89.541400	208.95	577
A04APANT	Río Apanteos, dentro del Beneficio El Sauce.	14.012233	-89.541333	228.91	567
A05SUQUI	Aproximadamente a 30m aguas debajo de la unión con el río Apanteos.	14.012267	-89.541000	254.96	564

Sitio	Descripción	Coordenadas Latitud	Coordenadas Longitud	Distancia (m)	Altura (msnm)
A06SAUCE	A 75 metros del punto anterior.	14.012417	-89.540167	334.26	578
A07CARCA	Tributario cercano a A06 SAUCE.	14.011850	-89.539783	387.27	576
A08SUQUI	A aproximadamente 210 metros de A07CARCAG.	14.012967	-89.538367	587.62	579
A09MOLIN	A 50m del enganche con la corriente principal y 135m de sitio A10SUQUI.	14.013567	-89.537050	721.25	510
A10SUQUI	A 2710 m de la unión con el río molino.	14.018467	-89.519683	3,502.85	536
A11ZARCO	Conocido por los lugareños como Poza “El Cajón”. A unos 30m del enganche con el río principal.	14.018883	-89.519633	3,5028.57	517
A12SUQUI	A 1650 de la unión con el río Zarco.	14.021750	-89.504900	5,234.63	519
A13VERTI	Corriente utilizada para recreación y para bombear agua a	14.024117	-89.504183	5,263.54	545

Sitio	Descripción	Coordenadas Latitud	Coordenadas Longitud	Distancia (m)	Altura (msnm)
	comunidades aledañas (aproximadamente 200 familias). Se localiza aproximadamente a 330 m de enganche con corriente principal.				
A14SUQUI	A 175 m de unión con A13VERTI.	14.007233	-89.492550	8,095.20	480
A15PUENTE	A 2500 m de A14SUQUI.	14.007150	-89.493033	8,159.21	473
A16SUQUI	A 800 m de enganche con río Puente.	14.002367	-89.487733	8,984.12	506
A17GUILGU	A 810 m de sitio A16SUQUI.	14.995517	-89.485300	9,890.50	506
A18SUQUI	A 300 m de unión con río Guilguayo.	14.996400	-89.483667	10,036.98	499

En el Mapa 9, se presenta el recorrido de los 18 sitios a estudiar. El tramo de estudio mide 10,036.98 m.



Mapa 9 Imagen satelital del tramo de la parte alta del río Suquia (Aranchacal)

Fuente: Google Earth

A continuación, se presenta un esquema no a escala de los 18 sitios descritos en la tabla 8.



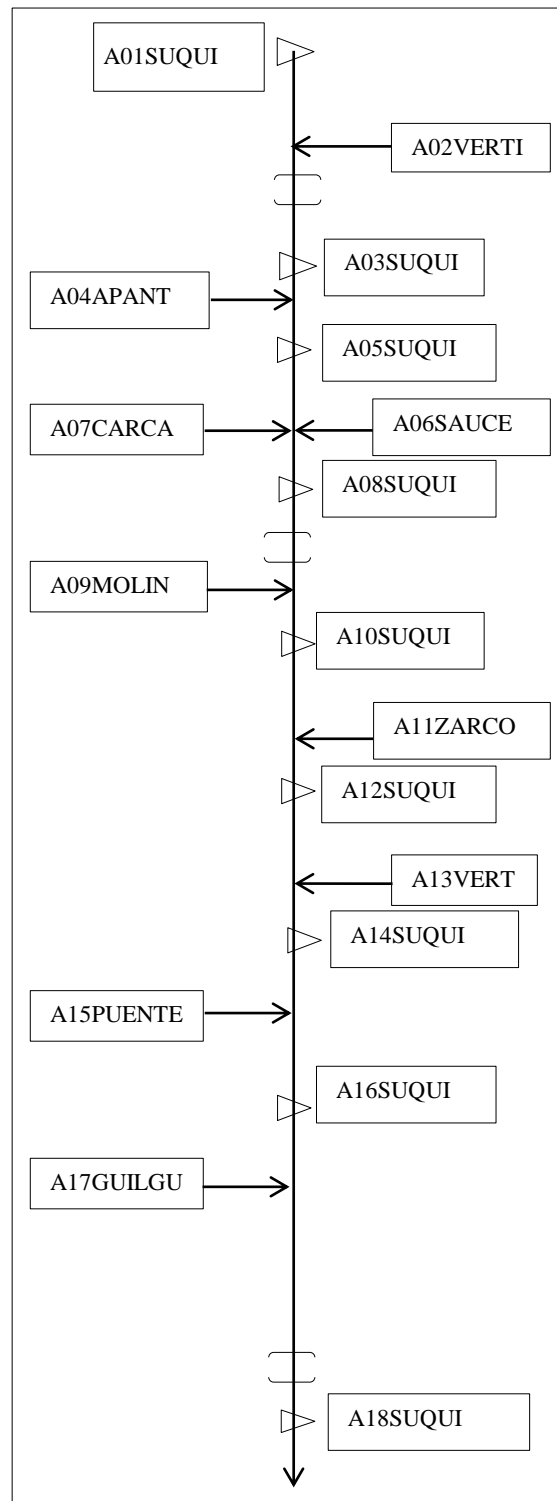


Figura 21 Sitios seleccionados en la técnica de recolección de datos hidrodinámicos de aguas superficiales

Fuente: Elaboración propia

## A. CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE AFORO POR VADEO.

Para el cálculo de los parámetros hidrodinámicos por medio de la técnica de aforo por vadeo, se utilizaron las hojas de cálculo que se presenta en el Anexo 1.

Los datos leídos en campo son ancho (m), profundidad (m), revoluciones (giros/40s) y velocidad (m/s). Utilizando el factor de conversión adecuado se obtienen los valores de velocidad en metros/segundos. La velocidad promedio es la media aritmética de las velocidades medidas para cada sección.

El área parcial se calcula de la siguiente manera:

Ec. 17

$$\text{area parcial} = \frac{\text{Profundidad}_i + \text{Profundidad}_{i-1}}{2} * \text{Ancho de la sección}$$

El caudal parcial se calcula de la siguiente forma:

Ec. 18

$$\text{Caudal} = \frac{\text{Velocidad}_i + \text{Velocidad}_{i-1}}{2} * \text{Área parcial}$$

Luego se obtiene una suma de las áreas y caudales parciales, el resto de propiedades se obtienen utilizando las siguientes ecuaciones:

Ec. 19

$$\text{Perímetro mojado} = \left( \frac{\text{Área total}}{\text{Ancho}} \right) * 2 + \text{Ancho}$$

Ec. 20

$$\text{Radio hidráulico} = \frac{\text{Área total}}{\text{Perímetro mojado}}$$

Ec. 21

$$\text{Velocidad media} = \frac{\text{Caudal}}{\text{Área total}}$$

### **3.2.1.3. PRESENTACIÓN DE DATOS HIDRODINÁMICOS**

A continuación se presenta la descripción de cada uno de los sitios con su respectiva ubicación y datos hidrológicos e hidráulicos medidos, fechas de muestreo y otros parámetros importantes.

El resumen de los datos recolectados en campo se presenta en las fichas de las figuras 22 a la 41 obtenidos mediante la técnica de aforo por vadeo. En las 18 fichas se reportan valores de caudal, velocidad media, perímetro mojado, radio hidráulico, profundidad, área de sección transversal y coeficientes de dispersión obtenidos con la ecuación empírica de Fischer.

## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

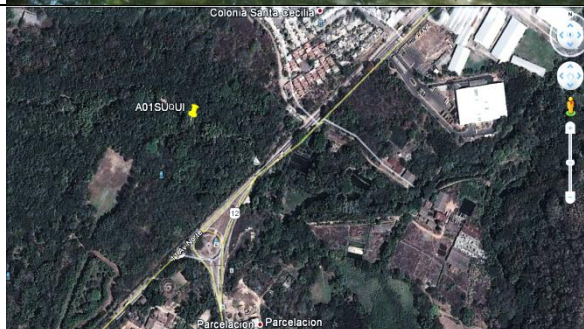
Nombre del sitio: A01SUQUI  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región Hidrográfica: A  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 11/03/2013 ;  
 12:35 pm  
 Latitud: 14.01335  
 Longitud: -89.54291667



Departamento: Santa Ana

Municipio: Santa Ana

Dirección: 100 m aguas  
 arriba de puente  
 Sucio.



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s)

0.609

Área Mojada  
 (m<sup>2</sup>)

2.45

Ancho del  
 cauce (m)

10

Perímetro

Mojado (m)

10.49

Radio

Hidráulico (m)

0.2335

Velocidad

Media (m/s)

0.248

Nivel medio  
 (m)

0.249

Coefficiente de

Dispersión

10.635

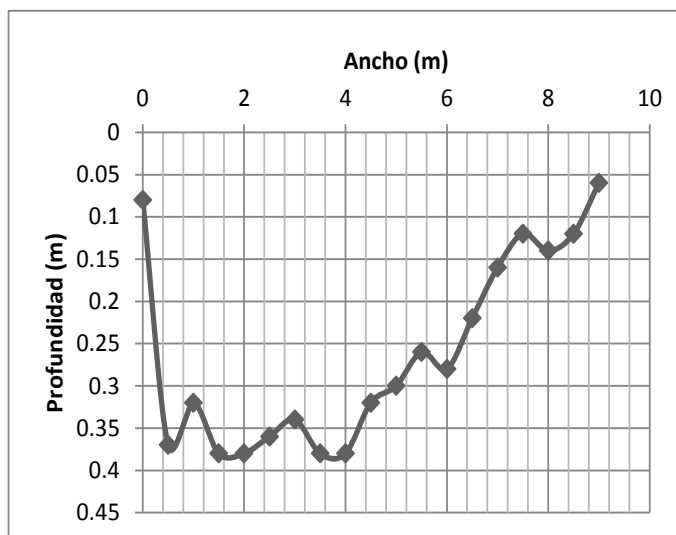
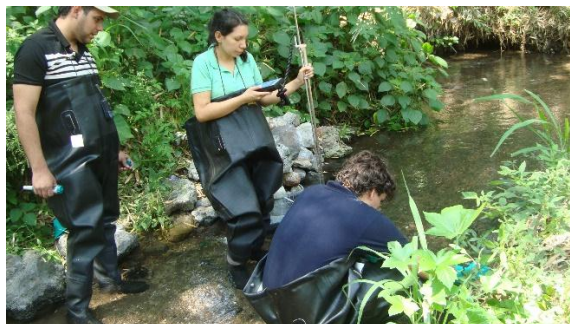


Figura 22 Ficha sitio superficial. A01SUQUI

Fuente: Elaboración propia

## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

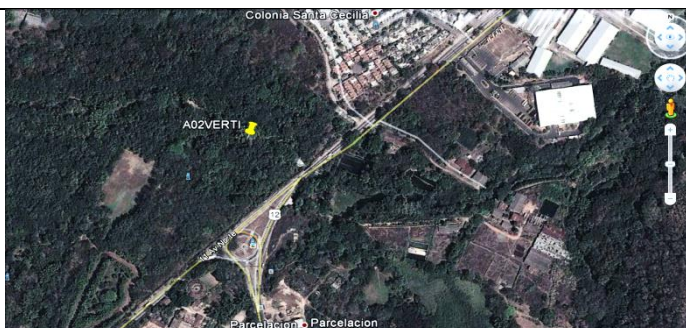
Nombre del sitio: A02VERTI  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 11/03/2013 ;  
 1:00 pm  
 Latitud: 14.01318333  
 Longitud: -89.54308333



Departamento: Santa Ana

Municipio: Santa Ana

Dirección: 3 m debajo de  
 punto  
 A01SUQUI



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0.0631
Área Mojada (m <sup>2</sup> )	0.284
Ancho del cauce (m)	1.5
Perímetro Mojado (m)	1.878
Radio Hidráulico (m)	0.1509
Velocidad Media (m/s)	0.214
Nivel medio (m)	0.182
Coefficiente de Dispersión (m <sup>2</sup> /s)	0.303

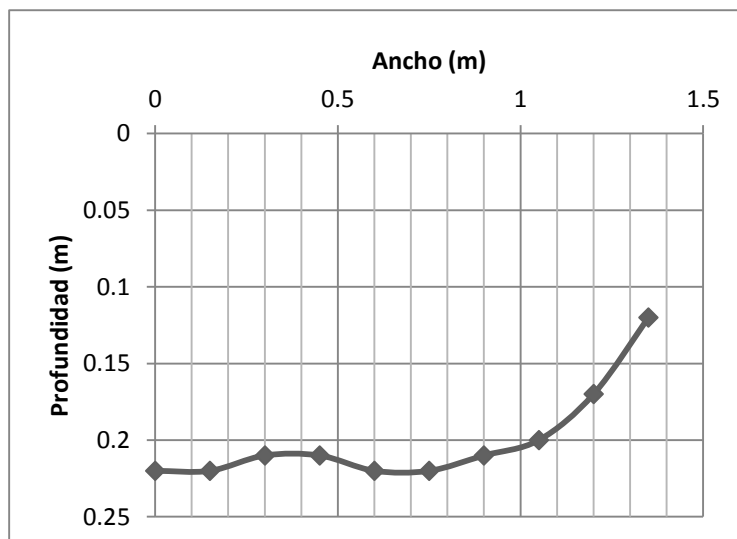


Figura 23 Ficha sitio superficial. A02VERTI

Fuente: Elaboración propia

## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio: A03SUQUI  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 30/04/13;  
 4:11 pm  
 Latitud: 14.0124  
 Longitud: -89.5414



Departamento: Santa Ana  
 Municipio: Santa Ana  
 Dirección: 20 m debajo de  
 puente Sucio



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 0.6523  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 3.183  
 Ancho del cauce (m) 9  
 Perímetro Mojado (m) 9.707  
 Radio Hidráulico (m) 0.3278  
 Velocidad Media (m/s) 0.213  
 Nivel medio (m) 0.325  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 5.413

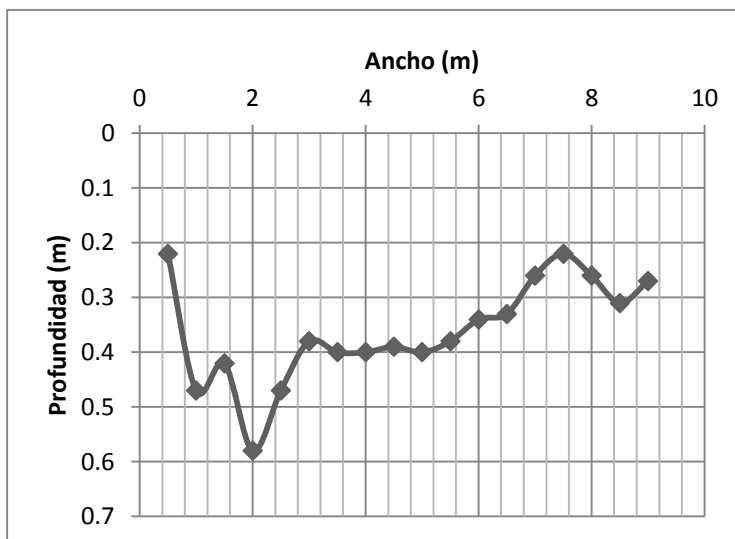


Figura 24 Ficha sitio superficial. A03SUQUI

Fuente: Elaboración propia



## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio: A04APANT  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 30-04-13; ;  
 9:30 A.M  
 Latitud: 14.01223333  
 Longitud: -89.54133333



Departamento: Santa Ana  
 Municipio: Santa Ana  
 Dirección: 1 m debajo de  
 A03SUQUI



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 0.3461  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 1.163  
 Ancho del cauce (m) 4.1  
 Perímetro Mojado (m) 4.667  
 Radio Hidráulico (m) 0.249  
 Velocidad Media (m/s) 0.298  
 Nivel medio (m) 0.238  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 1.926

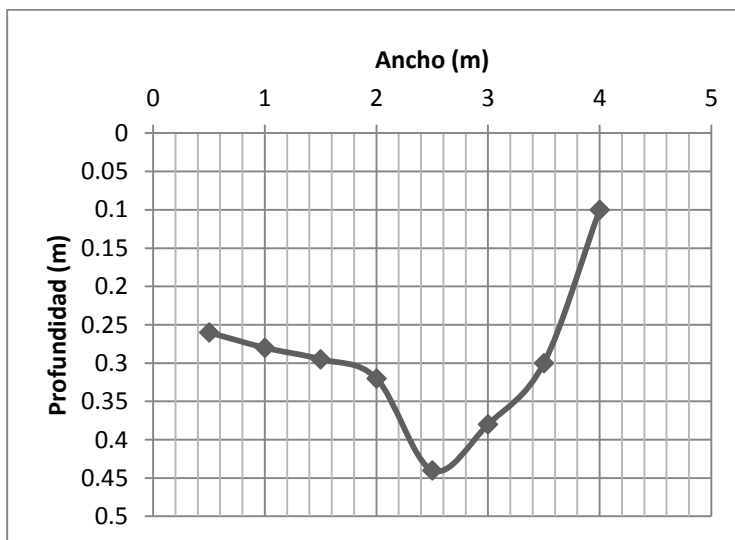


Figura 25 Ficha sitio superficial. A04APANT

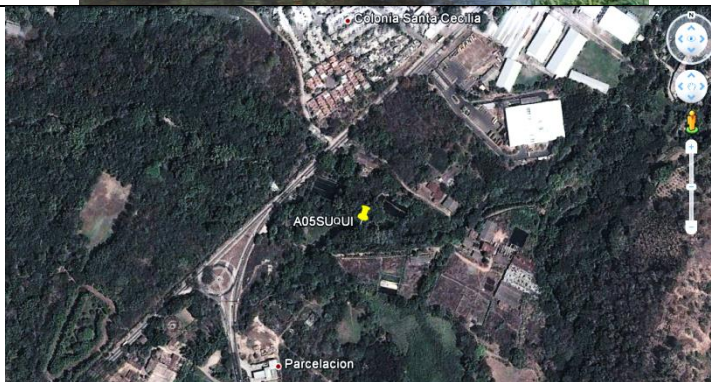
Fuente: Elaboración propia

## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio: A05SUQUI  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 07-05-13; 4:10 pm  
 Latitud: 14.01226667  
 Longitud: -89.541



Departamento: Santa Ana  
 Municipio: Santa Ana  
 Dirección: 6 m abajo de A04SUQUI



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 1.1004  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 4.125  
 Ancho del cauce (m) 10.5  
 Perímetro Mojado (m) 11.286  
 Radio Hidráulico (m) 0.3655  
 Velocidad Media (m/s) 0.264  
 Nivel medio (m) 0.347  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 7.684

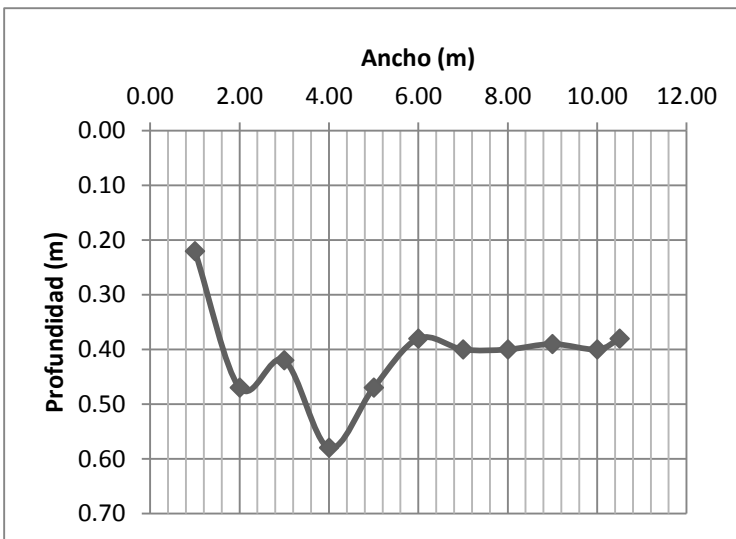


Figura 26 Ficha sitio superficial. A05SUQUI

Fuente: Elaboración propia



## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio: A06SAUCE-1  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 02-05-13



Latitud: 14.01241667  
 Longitud: -89.54016667

Departamento: Santa Ana

Municipio: Santa Ana

Dirección: 9 m arriba de  
 puente  
 improvisado por  
 el beneficio



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 0.16  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 0.645  
 Ancho del cauce (m) 1  
 Perímetro Mojado (m) 2.289  
 Radio Hidráulico (m) 0.2815  
 Velocidad Media (m/s) 0.249  
 Nivel medio (m) 0.588  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 0.092

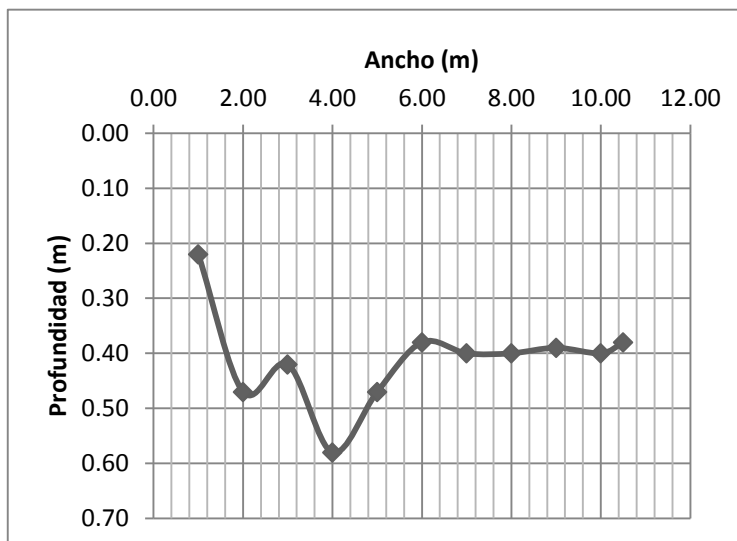


Figura 27 Ficha sitio superficial. A06SAUCE-1

Fuente: Elaboración propia

## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio: A06SAUCE-2  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 02-05-13 ; 11:23 a.m.  
 Latitud: 14.01241667  
 Longitud: -89.54016667



Departamento: Santa Ana  
 Municipio: Santa Ana  
 Dirección: bifurcación natural del río al salir de uso en el beneficio



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 0.0196  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 0.214  
 Ancho del cauce (m) 0.8  
 Perímetro Mojado (m) 1.335  
 Radio Hidráulico (m) 0.1603  
 Velocidad Media (m/s) 0.092  
 Nivel medio (m) 0.227  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 0.041

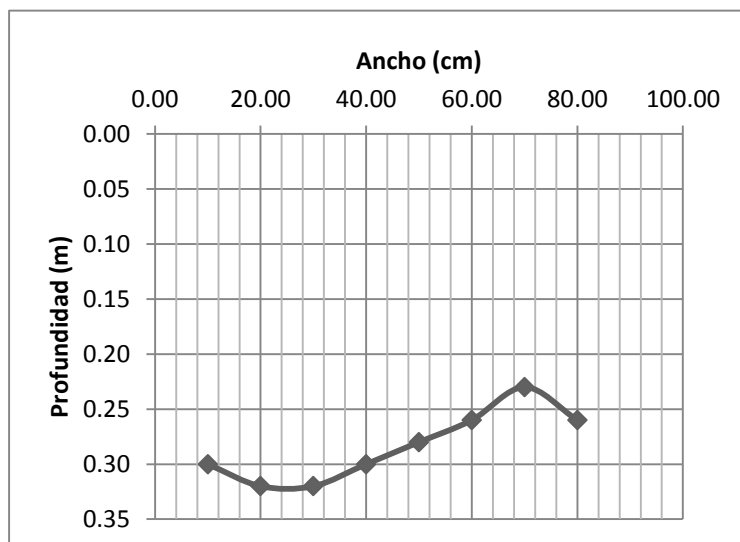


Figura 28 Ficha sitio superficial. A06SAUCE-2

Fuente: Elaboración propia

## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

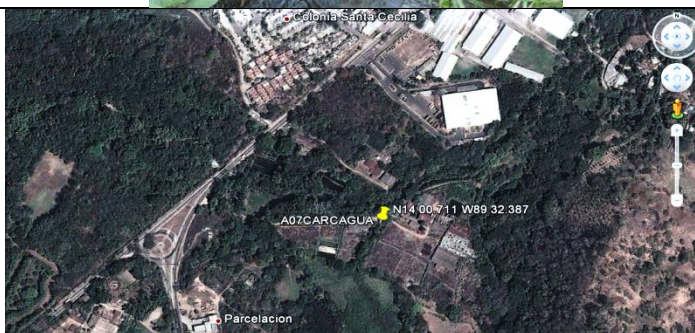
Nombre del sitio: A07CARCAG  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 02-05-13  
  
 Latitud: 14.01185  
 Longitud: -89.53978333



Departamento: Santa Ana

Municipio: Santa Ana

Dirección: tributario  
 proveniente de uso  
 para piscinas,  
 aporte simultáneo a  
 la vertiente del  
 sauce



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 0.0949378  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 0.416  
 Ancho del cauce (m) 1.5  
 Perímetro Mojado (m) 2.054  
 Radio Hidráulico (m) 0.2023  
 Velocidad Media (m/s) 0.228  
 Nivel medio (m) 0.231  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 0.236

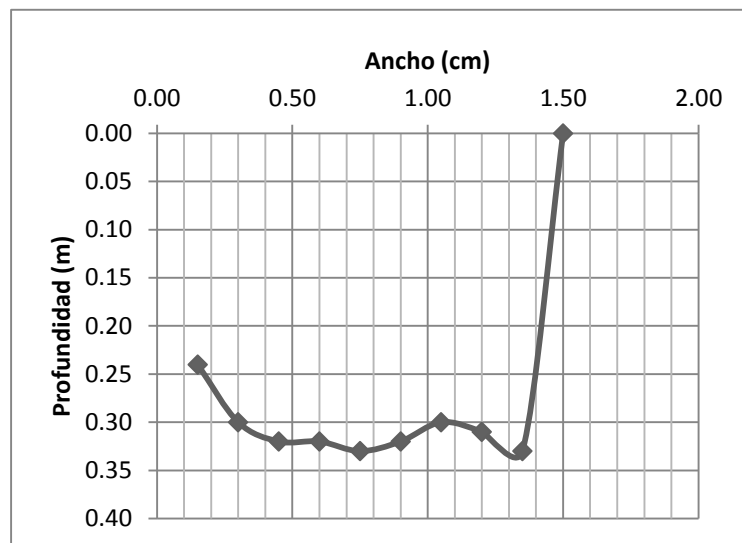


Figura 29 Ficha sitio superficial. A07CARCAG

Fuente: Elaboración propia



## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio: A08SUQUI  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 30-04-13; 11:23 a.m.  
 Latitud: 14.01296667  
 Longitud: -89.53836667



Departamento: Santa Ana  
 Municipio: Santa Ana  
 Dirección: frente a viviendas dentro del beneficio, mucho antes del aporte de A09MOLIN



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 1.2071642  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 5.18  
 Ancho del cauce (m) 13  
 Perímetro Mojado (m) 13.797  
 Radio Hidráulico (m) 0.3754  
 Velocidad Media (m/s) 0.232  
 Nivel medio (m) 0.345  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 10.747

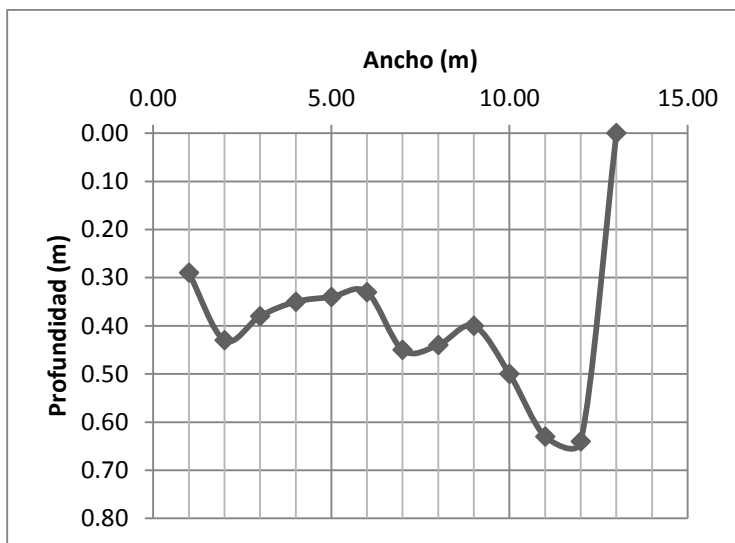


Figura 30 Ficha sitio superficial. A08SUQUI

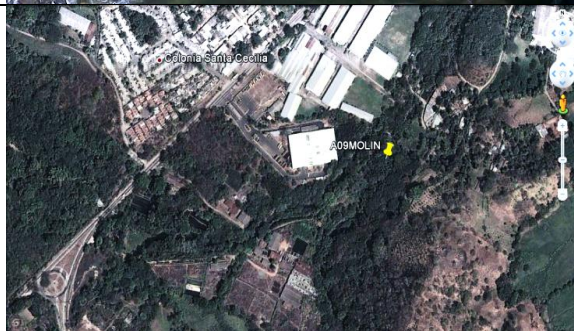
Fuente: Elaboración propia

## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio: A09MOLIN  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 30-04-13;  
  
 Latitud: 14.01356667  
 Longitud: -89.53705



Departamento: Santa Ana  
 Municipio: Santa Ana  
 Dirección: 20 m debajo de caída de agua



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 0.0667828  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 0.698  
 Ancho del cauce (m) 4  
 Perímetro Mojado (m) 3.4657  
 Radio Hidráulico (m) 0.1346  
 Velocidad Media (m/s) 0.241  
 Nivel medio (m) 0.22  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 0.976

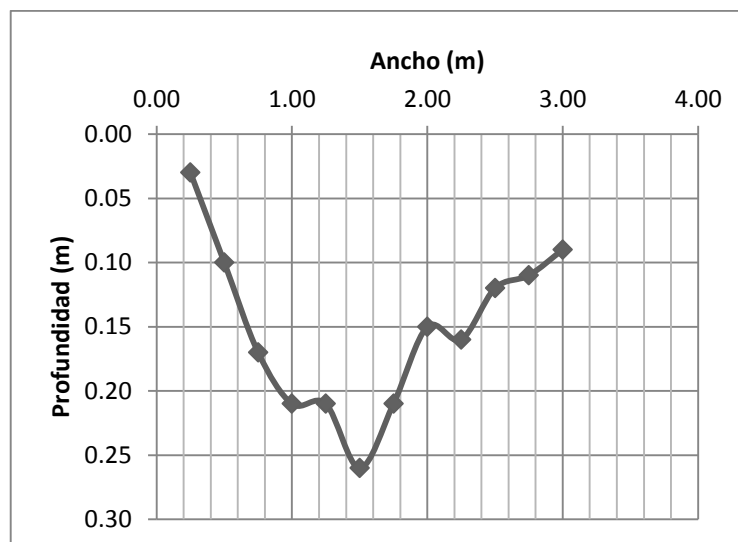


Figura 31 Ficha sitio superficial. A09MOLIN

Fuente: Elaboración propia

## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

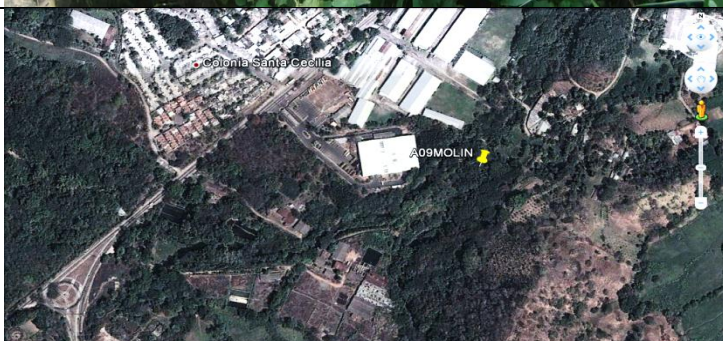
Nombre del sitio: A09MOLIN-2  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 07-05-13  
 Latitud: 14.01356667  
 Longitud: -89.53705



Departamento: Santa Ana

Municipio: Santa Ana

Dirección: Bifurcación elaborada para aprovechamiento del agua, en viviendas y riego.



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 0.0875562  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 0.254  
 Ancho del cauce (m) 1  
 Perímetro Mojado (m) 1.508  
 Radio Hidráulico (m) 0.1684  
 Velocidad Media (m/s) 0.334  
 Nivel medio (m) 0.264  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 0.2181

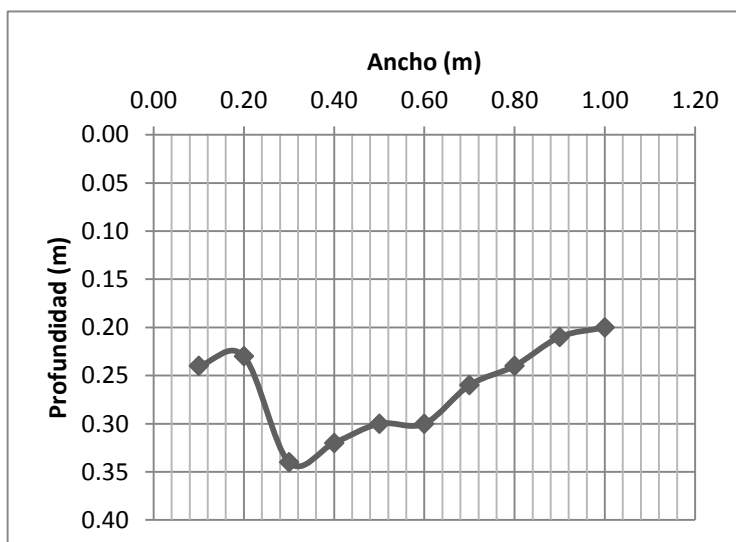


Figura 32 Ficha sitio superficial. A09MOLIN-2

Fuente: Elaboración propia



## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

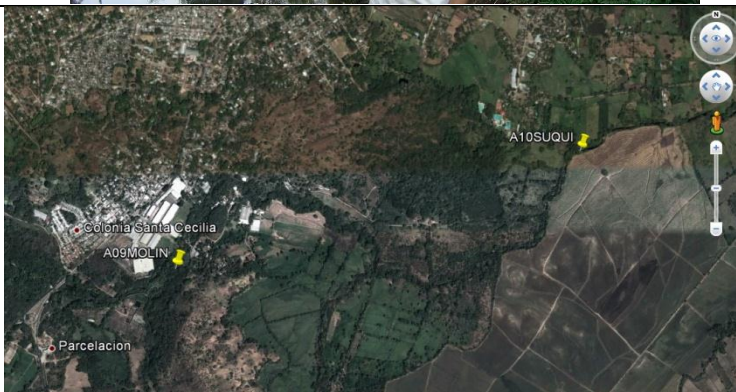
Nombre del sitio: A10SUQUI  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 09-05-13  
 Latitud: 14.01846667  
 Longitud: -89.51968333



Departamento: Santa Ana

Municipio: Santa Ana

Dirección: Finca San  
 Cayetano justo  
 antes del  
 tributario  
 A11ZARCO.



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 1.8103413  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 5.115  
 Ancho del cauce (m) 13  
 Perímetro Mojado (m) 13.787  
 Radio Hidráulico (m) 0.371003  
 Velocidad Media (m/s) 0.354  
 Nivel medio (m) 0.351  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 17.738

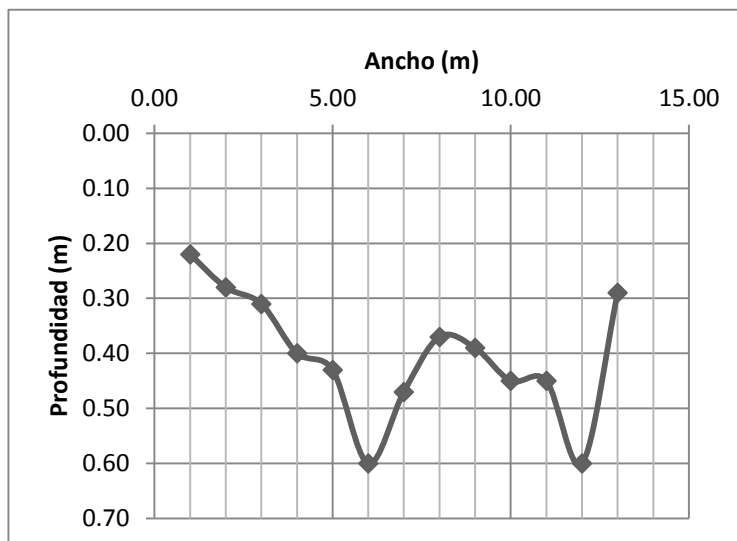


Figura 33 Ficha sitio superficial. A10SUQUI

Fuente: Elaboración propia

## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio: A11ZARCO  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 09-05-13  
 Latitud: 14.01888333  
 Longitud: -89.51963333



Departamento: Santa Ana  
 Municipio: Santa Ana  
 Dirección: Delimitante natural entre terrenos, Conocida como la Poza El Cajón



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 0.5379648  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 2.34  
 Ancho del cauce (m) 6.5  
 Perímetro Mojado (m) 7.22  
 Radio Hidráulico (m) 0.3241  
 Velocidad Media (m/s) 0.25  
 Nivel medio (m) 0.333  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 2.577

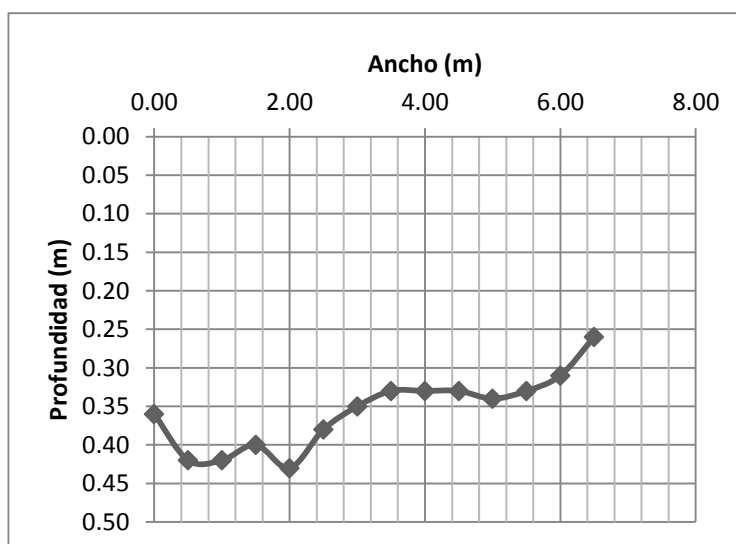


Figura 34 Ficha sitio superficial. A11ZARCO

Fuente: Elaboración propia



## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio: A12SUQUI  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 04-05-13



Departamento: Santa Ana

Municipio: Santa Ana

Dirección: 3 m arriba de la vertiente



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 2.4982  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 10.7  
 Ancho del cauce (m) 17  
 Perímetro Mojado (m) 18.259  
 Radio Hidráulico (m) 0.586  
 Velocidad Media (m/s) 0.23  
 Nivel medio (m) 0.571  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 16.166

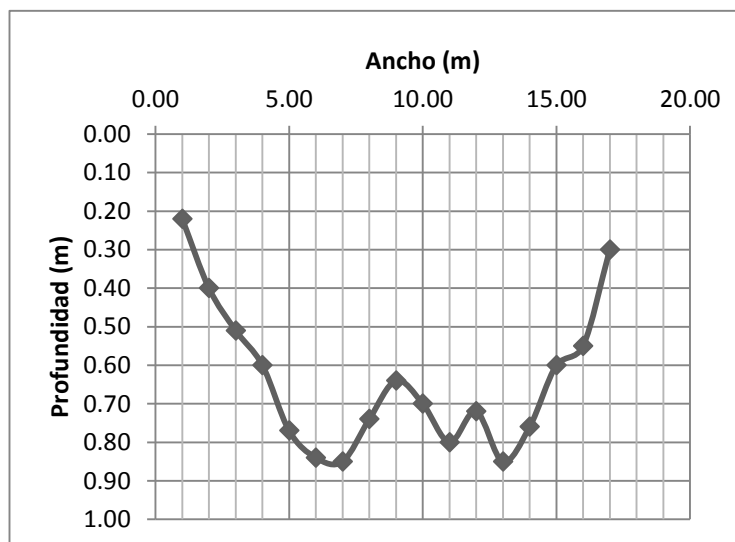


Figura 35 Ficha sitio superficial. A12SUQUI

Fuente: Elaboración propia

## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio: A13VERTI  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 05-05-13



Departamento: Santa Ana  
 Municipio: Santa Ana  
 Dirección: atravesando camino vecinal, junto a instalación de bombeo comunal



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 0.0509586  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 0.764  
 Ancho del cauce (m) 2  
 Perímetro Mojado (m) 2.764  
 Radio Hidráulico (m) 0.2764  
 Velocidad Media (m/s) 0.069  
 Nivel medio (m) 0.335  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 0.105

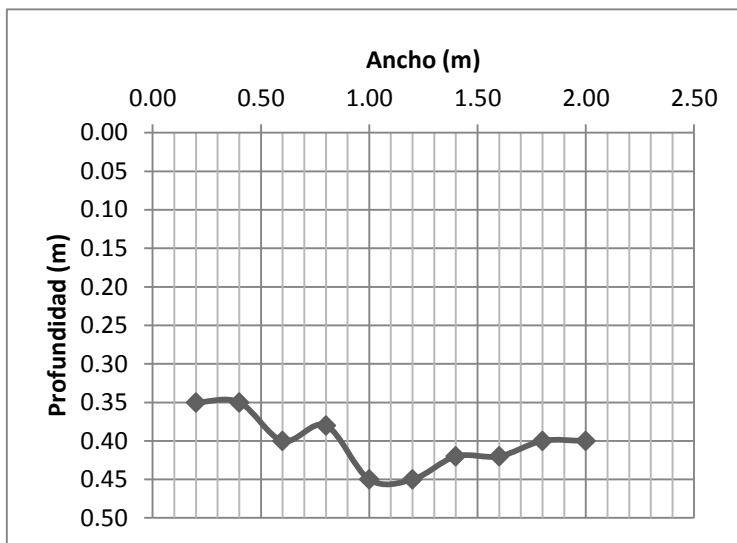


Figura 36 Ficha sitio superficial. A13VERTI

Fuente: Elaboración propia

## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio: A14SUQUI  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 11-05-13  
 Latitud: 14.00723333  
 Longitud: -89.49255



Departamento: Santa Ana  
 Municipio: Santa Ana  
 Dirección: 8 m debajo de puente, justo antes del tributario A15PUENTE



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 2.5561781  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 11.43  
 Ancho del cauce (m) 16  
 Perímetro Mojado (m) 17.429  
 Radio Hidráulico (m) 0.6558  
 Velocidad Media (m/s) 0.233  
 Nivel medio (m) 0.658  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 8.031

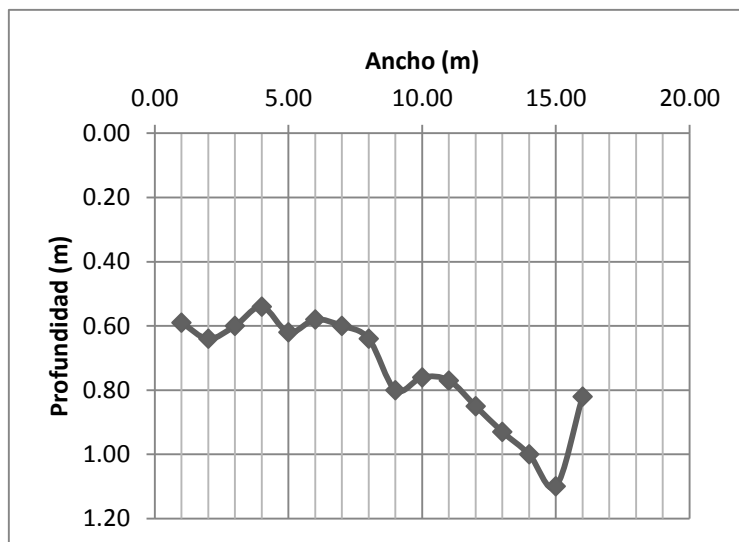


Figura 37 Ficha sitio superficial. A14SUQUI

Fuente: Elaboración propia



## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

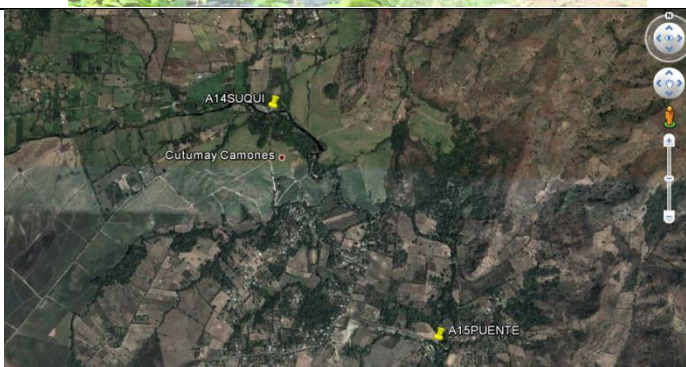
Nombre del sitio: A15PUENTE  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 11-05-13  
 Latitud: 14.00715  
 Longitud: -89.49303333



Departamento: Santa Ana

Municipio: Santa Ana

Dirección: Sobre carretera a  
 San Pablo  
 Tacachico, bajo  
 puente del mismo  
 nombre



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 0.5593177  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 1.73  
 Ancho del cauce (m) 6  
 Perímetro Mojado (m) 6.577  
 Radio Hidráulico (m) 0.263  
 Velocidad Media (m/s) 0.416  
 Nivel medio (m) 0.251  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 5.186

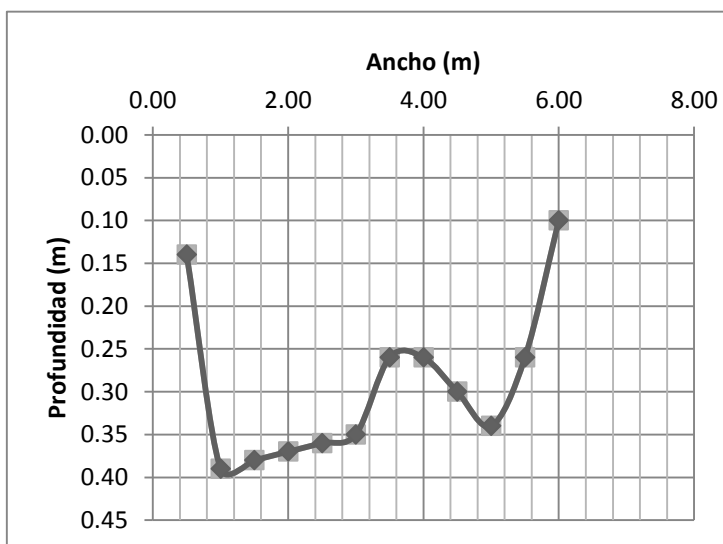


Figura 38 Ficha sitio superficial. A15PUENTE

Fuente: Elaboración propia

## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

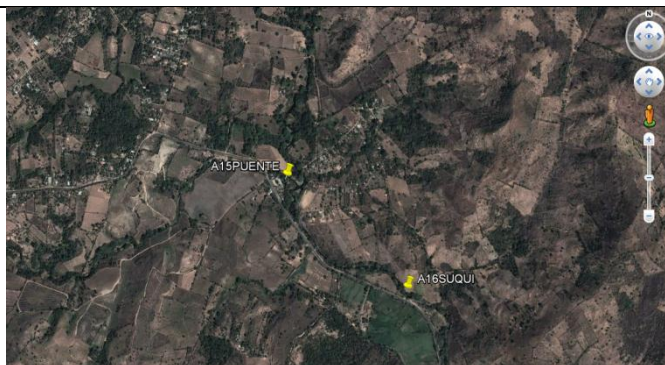
Nombre del sitio: A16SUQUI  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 11-05-13



Departamento: Santa Ana

Municipio: Santa Ana

Dirección: sobre carretera a San Pablo Tacachico, antes del lugar donde realizan extracción de arena



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 3.272576  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 5.035  
 Ancho del cauce (m) 12  
 Perímetro Mojado (m) 12.839  
 Radio Hidráulico (m) 0.39215  
 Velocidad Media (m/s) 0.65  
 Nivel medio (m) 0.365  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 18.573

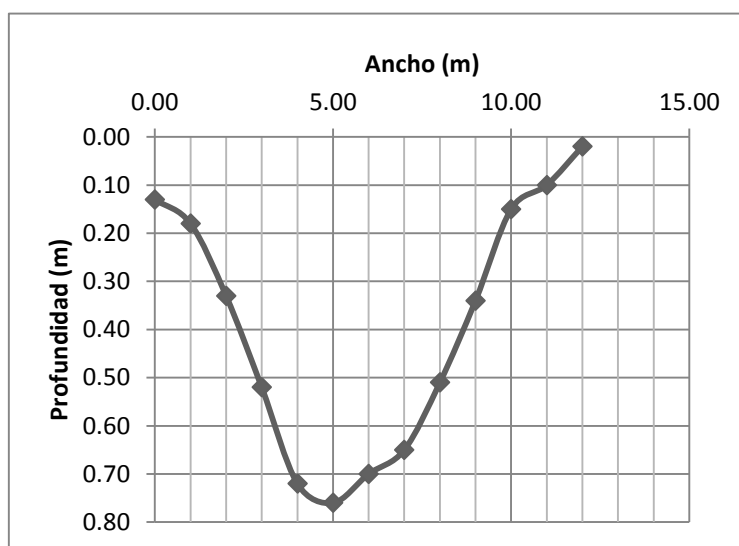


Figura 39 Ficha sitio superficial. A16SUQUI

Fuente: Elaboración propia

## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

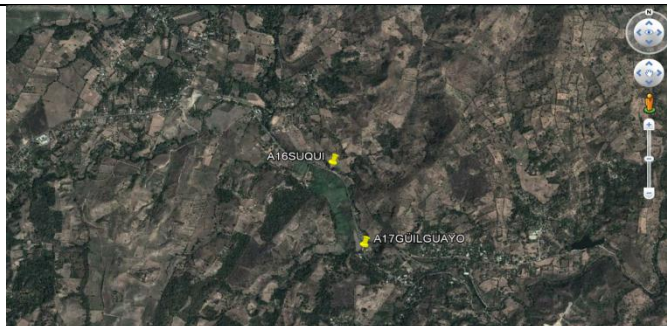
Nombre del sitio: A17GUILGUAYO  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 11-05-13  
 Latitud: 14.99551667  
 Longitud: -89.4853



Departamento: Santa Ana

Municipio: Santa Ana

Dirección: sobre carretera a San Pablo Tacachico, 45 m antes de desvío a la planta San Luis



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal (m<sup>3</sup>/s) 0.1271593  
 Área Mojada (m<sup>2</sup>) 0.578  
 Ancho del cauce (m) 2.5  
 Perímetro Mojado (m) 2.962  
 Radio Hidráulico (m) 0.1949  
 Velocidad Media (m/s) 0.22  
 Nivel medio (m) 0.193  
 Coeficiente de Dispersión (m<sup>2</sup>/s) 0.629

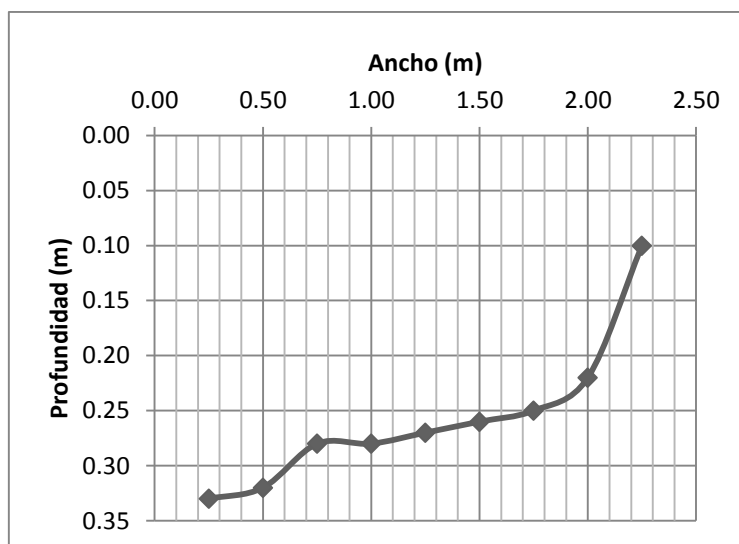


Figura 40 Ficha sitio superficial. A17GUILGUAYO

Fuente: Elaboración propia



## FICHA DE MONITOREO DE CAUDAL DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre del sitio: A18SUQUI  
 Nombre del río: Suquiapa  
 Región: A  
 Hidrográfica:  
 Cuenca: Lempa  
 Fecha, Hora: 11-05-13  
  
 Latitud: 14.9964  
 Longitud: -89.48366667



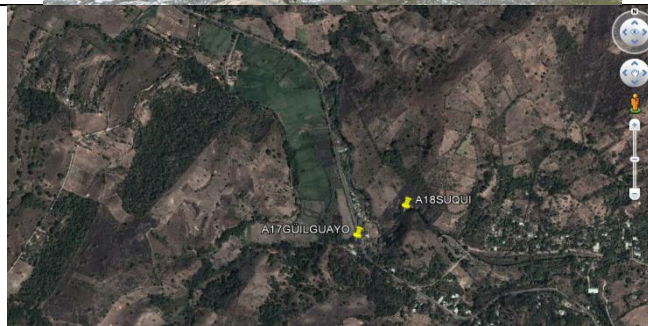
Departamento: Santa Ana  


---

 Municipio: Santa Ana  


---

 Dirección: 35 m antes de  
 modificación de la  
 Planta San Luis  
 N° 2



### DATOS HIDROLÓGICOS

Caudal  
 (m<sup>3</sup>/s) 3.568188  
 Área Mojada  
 (m<sup>2</sup>) 1.53  
 Ancho del  
 cauce (m) 7  
 Perímetro  
 Mojado (m) 7.437  
 Radio  
 Hidráulico  
 (m) 0.3128  
 Velocidad  
 Media (m/s) 2.2  
 Nivel medio  
 (m) 0.284  
 Coeficiente  
 de Dispersión  
 (m<sup>2</sup>/s) 16.611

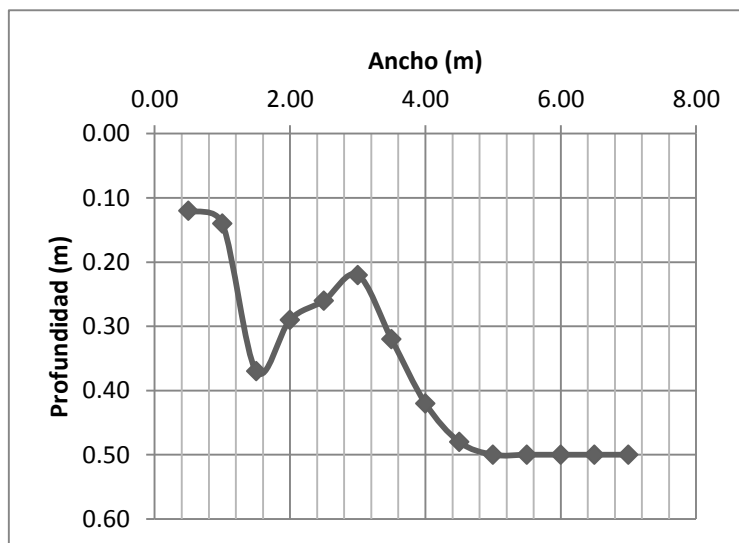


Figura 41 Ficha sitio superficial. A18SUQUI

Fuente: Elaboración propia

### **3.2.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

El río Aranchacal es un río afluente del río Suquiapa de la región hidrográfica del río Lempa. Dentro del área de estudio de la presente investigación se tienen al menos 7 manantiales que aportan su caudal a los ríos tributarios además están presentes otros ríos y quebradas, siendo los más representativos los siguientes: río El Molino, río Sucio, río Zarco, río Sauce, río Agua Fría, río Suquiapa (Ver Hidrología en Mapa 8). También en el Mapa 7 se muestran los manantiales en el área geográfica de interés.

El cálculo del caudal obtenido por la técnica de aforo por vadeo consiste en la suma de los productos del área de cada sub-sección y la velocidad promedio en la sub-sección respectiva. Los anchos y profundidades son medidas directas tomadas en campo y nos permiten calcular las áreas parciales de cada sección, las velocidades medidas indirectas con molinetes permiten el cálculo del caudal de cada sección y a partir de la sumatoria de las descargas individuales en cada sub-sección se obtiene el caudal total de la sección aforada.

Otras variables hidrodinámicas que caracterizan las secciones del cauce son perímetro mojado, radio hidráulico y velocidad media.

Las variables hidrodinámicas presentadas en esta sección serán utilizadas en el apartado 3.10.2 para el análisis de aforos diferenciales y determinación del aporte e interacción entre el agua superficial y agua subterránea en el área geográfica de interés.

#### **3.2.2.1. RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA.**

Se ha realizado la caracterización de los parámetros hidrodinámicos en un tramo aproximado de 10 km. de la parte alta del río Suquiapa, los resultados se presentan en la Tabla 9 (Espinoza, Merino & Zavaleta, 2013):



Tabla 9 Resultados de cálculo de parámetros hidrodinámicos obtenidos por medio de la técnica de aforo por vadeo

Fuente: (Espinoza Rivas, Merino, & Zavaleta, 2013)

<b>Sitio</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Área de sección transversal (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Ancho de la sección (m)</b>	<b>Perímetro mojado (m)</b>	<b>Veloc. Media (m/s)</b>	<b>Prof. (m)</b>	<b>Coefficiente de dispersión (m<sup>2</sup>/s)</b>
A01SUQUI	0.609	2.450	10.00	10.49	0.248	0.249	10.635
A02VERTI	0.063	0.284	1.5	1.878	0.214	0.182	0.303
A03SUQUI	0.652	3.183	9.0	9.707	0.213	0.325	5.413
A04APANT	0.346	1.163	4.1	4.667	0.298	0.238	1.926
A05SUQUI	1.100	4.125	10.5	11.286	0.264	0.347	7.684
A06SAUCE	0.16	0.645	1.0	2.289	0.249	0.588	0.092
A06SAUCE-2	0.02	0.214	0.8	1.335	0.092	0.227	0.041
A07CARCA	0.095	0.416	1.5	2.054	0.228	0.231	0.236
A08SUQUI	1.207	5.18	13.0	13.797	0.232	0.345	10.747
A09MOLIN	0.154	0.698	3.0	3.4657	0.241	0.22	0.976
A10SUQUI	1.810	5.115	13.0	13.787	0.354	0.351	17.738
A11ZARCO	0.538	2.340	6.5	7.22	0.18	0.333	2.577
A12SUQUI	2.299	10.7	17.0	18.259	0.298	0.571	16.166
A13VERTI	0.051	0.764	2.0	2.764	0.069	0.335	0.105
A14SUQUI	2.556	11.430	16.00	17.429	0.233	0.658	8.031
A15PUENTE	0.559	1.730	6.000	6.577	0.416	0.251	5.186
A16SUQUI	2.273	5.035	12.00	12.839	0.576	0.365	18.573
A17GUILG	0.127	0.578	2.500	2.962	0.220	0.193	0.629
A18SUQUI	3.568	1.530	7.00	7.437	0.893	0.284	16.611

## A. PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS DE FLUJO

En la Figura 42, se resume el aumento del caudal del río Suquiapa luego de la contribución de sus tributarios, iniciando con el caudal del punto A01SUQUI, que fue el punto donde se inició el presente estudio, hasta el punto A18SUQUI.

El caudal del punto A18SUQUI es igual a la suma del caudal del río principal mas la de todos los contribuyentes que desembocan sus aguas en el río Suquiapa. Esa es la razón por la que el caudal en el último punto es el mayor. Es importante mencionar que posterior al punto A18SUQUI, el caudal del río Suquiapa es utilizado para la generación de energía hidroeléctrica en la Planta San Luis II (la cual genera 740 KW).

A continuación se presenta la gráfica de distribución de caudales a lo largo del cauce principal del río Suquiapa.

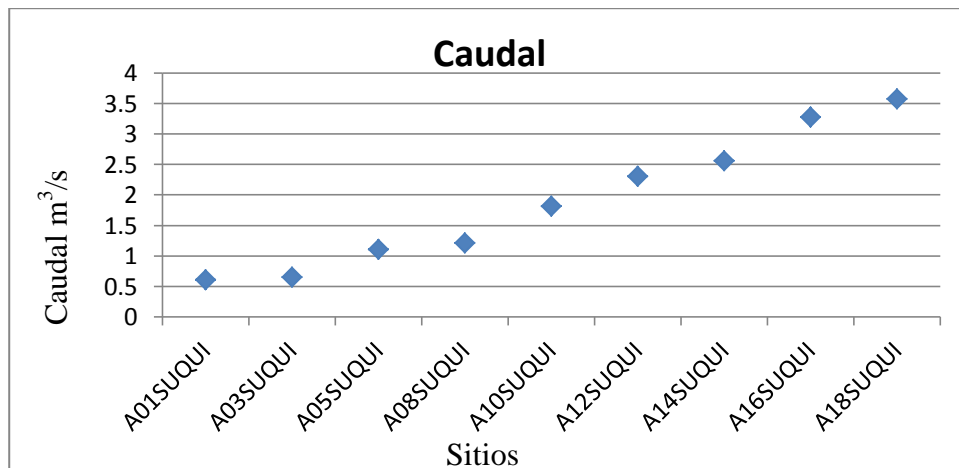


Figura 42 Distribución de caudales a lo largo del río Suquiapa.

Fuente: (Espinoza Rivas, Merino, & Zavaleta, 2013)

En la figura 43 se puede observar la velocidad media de cada punto de estudio del río principal. Se observa que el punto con mayor velocidad es el A18SUQUI, y esto es debido a que el ancho de la sección es menor en este punto y el caudal es bastante alto, ya que captura todo el caudal de los sitios anteriores más sus tributarios. Se puede determinar que a mayor ancho de sección menor es la velocidad.

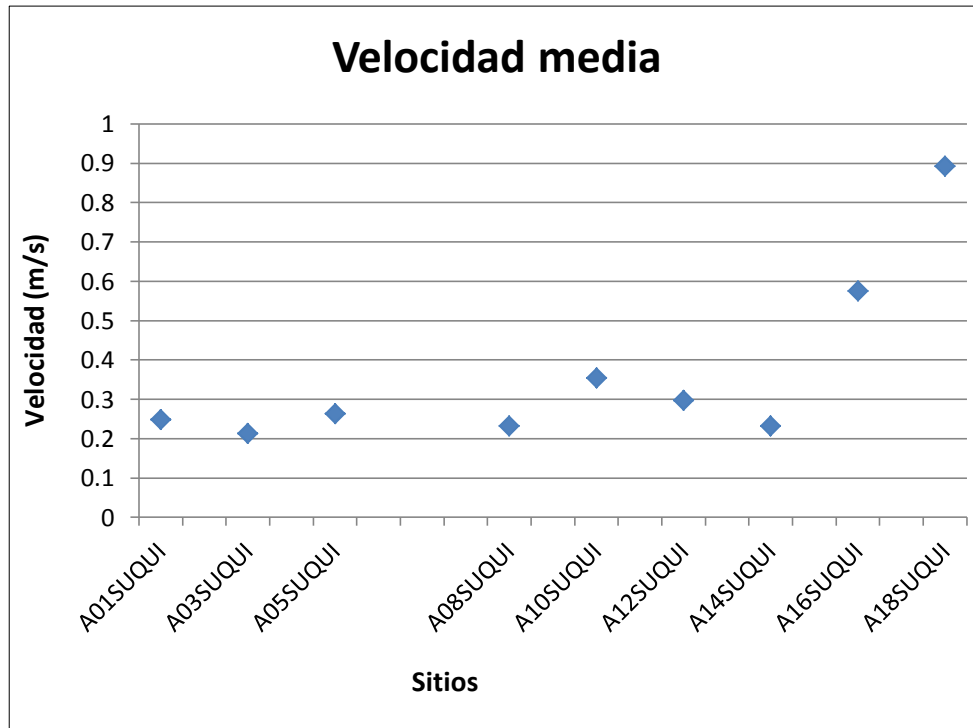


Figura 43 Gráfico de dispersión de valores de la velocidad media a lo largo del río Suquiapa.

Fuente: (Espinoza Rivas, Merino, & Zavaleta, 2013)

## B. PARÁMETROS QUÍMICOS DE CAMPO

Además del cálculo y análisis de los parámetros hidrodinámicos en esta sección se presentan los resultados y análisis de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo, los cuales son: pH (Unidades pH), Conductividad eléctrica ( $\mu$ Siemens/cm), Salinidad (%), Temperatura Ambiental ( $^{\circ}$ C), Temperatura de la muestra ( $^{\circ}$ C), Oxígeno disuelto (mg/L). Los resultados más representativos se describen en las figuras 44 a la 47.

Luego de medidos los parámetros de campo se tomaron, preservaron, y transportaron muestras de agua para su posterior cuantificación en laboratorios: En total fueron analizados 20 Análisis de parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, iones mayores y menores, nutrientes y compuestos de nitrógeno, etc.

- **TEMPERATURA.**

A continuación se presenta la evolución de la temperatura a lo largo del tramo del río principal estudiado, presentando un valor promedio de 26.84 °C. Algunos de los factores que influyen en el factor temperatura de muestra son el porcentaje de sombra del sitio y en su recorrido y la temperatura ambiental en la que se tomaron las medidas, así por ejemplo es de hacer notar que los sitios A14SUQUI, A16SUQUI y A18SUQUI fueron muestreados en una semana con temperaturas ambientales mas frías debido al efecto de un frente frío que afectó las condiciones en Mayo 2013.

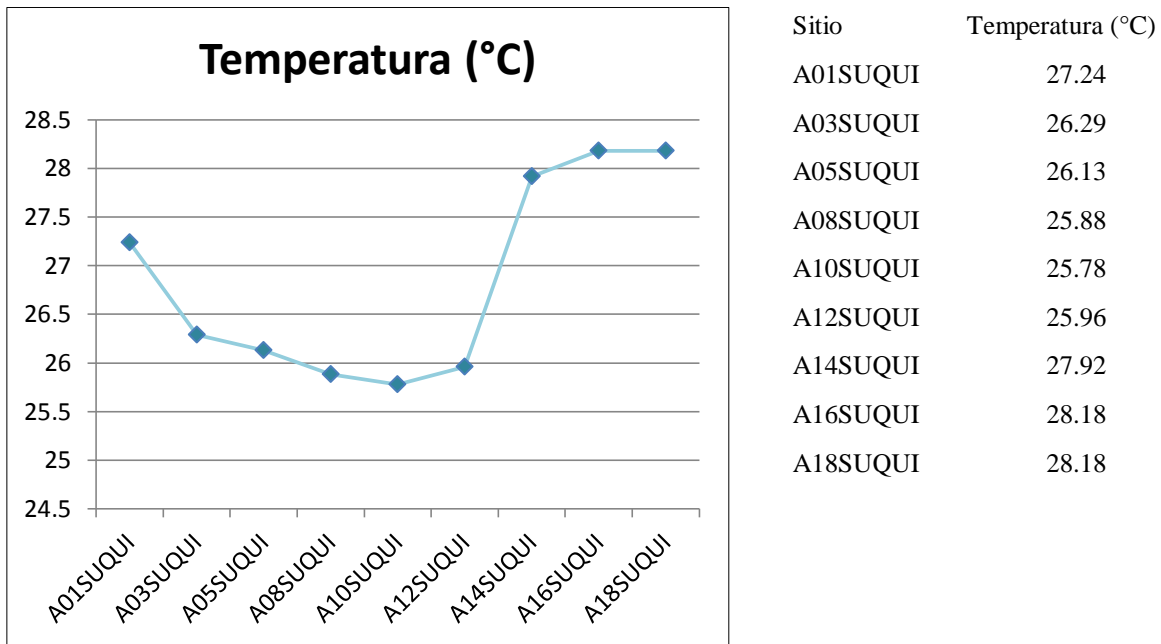
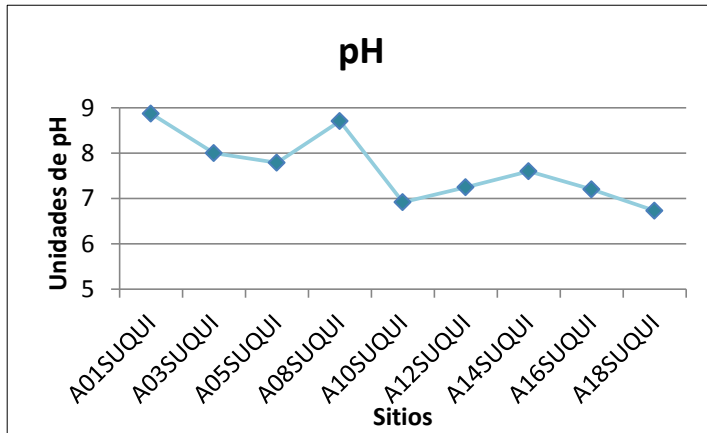


Figura 44 Gráfica de temperatura medida a lo largo del río Suquiapa

Fuente: (Espinoza Rivas, Merino, & Zavaleta, 2013)

- **POTENCIAL HIDRÓGENO.**

El valor promedio de pH es de 7.67; el sitio A01SUQUI presenta el valor más alto, con tendencia a disminuir hasta el punto A18SUQUI con un valor de 6.73.



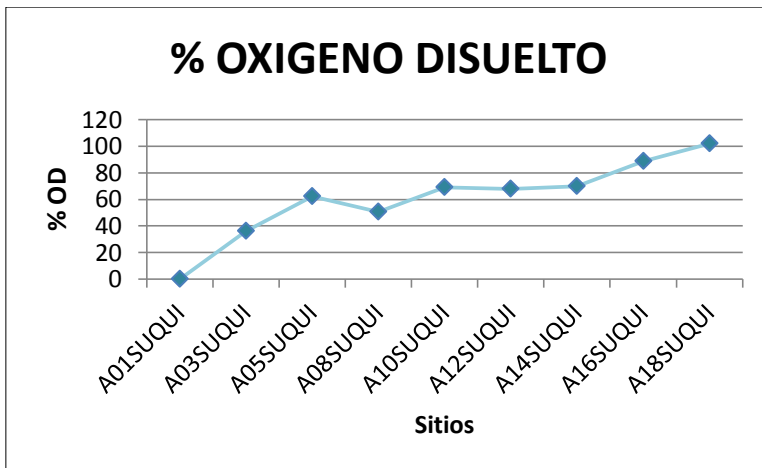
Sitio	pH
A01SUQUI	8.86
A03SUQUI	7.99
A05SUQUI	7.78
A08SUQUI	8.7
A10SUQUI	6.91
A12SUQUI	7.24
A14SUQUI	7.59
A16SUQUI	7.2
A18SUQUI	6.73

Figura 45 Gráfica de pH medido a lo largo del río Suquia

Fuente: (Espinoza Rivas, Merino, & Zavaleta, 2013)

- PORCENTAJE DE OXÍGENO DISUELTO.**

El valor promedio del porcentaje de oxígeno disuelto es de 60.66; se puede observar una notoria tendencia de mayor porcentaje de Oxígeno Disuelto al ir aguas abajo en el río, indicando una notable autodepuración orgánica.



Sitio	% OD
A01SUQUI	0
A03SUQUI	36
A05SUQUI	62.2
A08SUQUI	50.5
A10SUQUI	69.2
A12SUQUI	67.7
A14SUQUI	69.7
A16SUQUI	88.7
A18SUQUI	100

Figura 46 Valores de porcentaje de Oxígeno Disuelto a lo largo del río Suquia

Fuente: (Espinoza Rivas, Merino, & Zavaleta, 2013)

- **CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.**

El agua posee un valor promedio de conductividad eléctrica de 532  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , los valores mayores corresponden a los primeros sitios y los menores corresponden a los últimos sitios, esto se debe a la elevada contaminación al inicio del cauce principal, que gradualmente se va diluyendo con el ingreso de los tributarios.

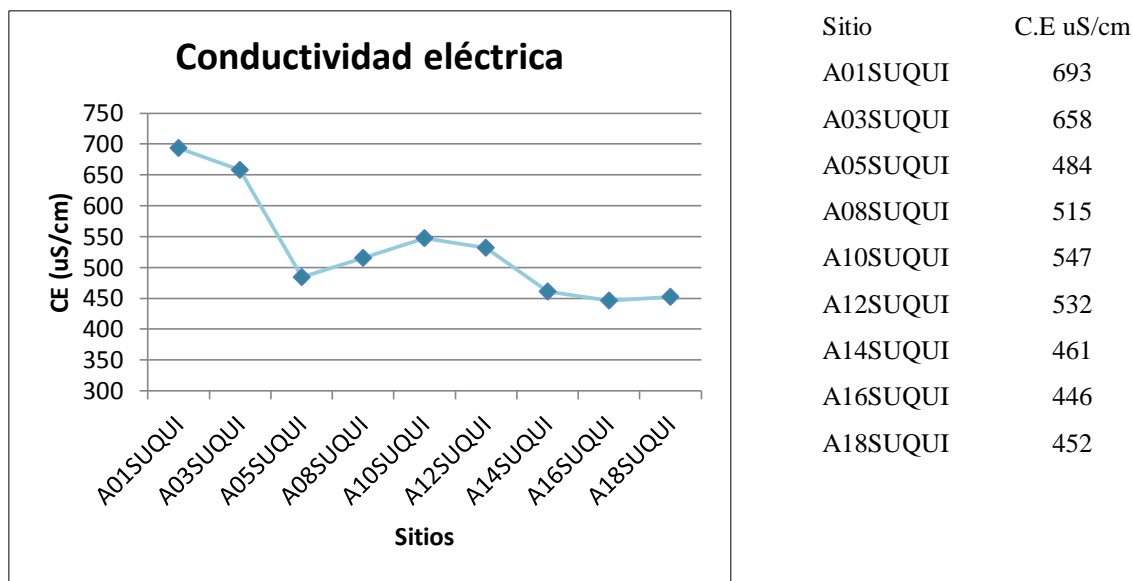
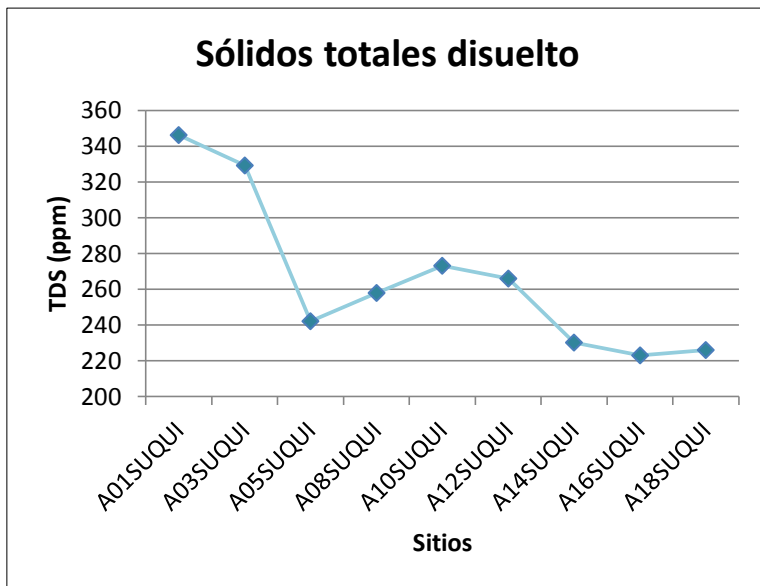


Figura 47 Valores de conductividad registrados en los sitios a lo largo del río Suquiapa  
Fuente: (Espinoza Rivas, Merino, & Zavaleta, 2013)

- **SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES.**

En la gráfica de sólidos disueltos totales, se observan altos valores de los primeros sitios y bajos valores en los últimos, al igual que la conductividad eléctrica; registrando un valor promedio de 265.89 ppm.



Sitio	TDS ppm
A01SUQUI	346
A03SUQUI	329
A05SUQUI	242
A08SUQUI	258
A10SUQUI	273
A12SUQUI	266
A14SUQUI	230
A16SUQUI	223
A18SUQUI	226

Figura 48 Valores de sólidos disueltos totales registrados en los sitios a lo largo del río Suquiapa

Fuente: (Espinoza Rivas, Merino, & Zavaleta, 2013)

### 3.3. EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA

De acuerdo a la recopilación realizada, se define al acuífero de Santa Ana como un acuífero volcánico fisurado de gran extensión que posee una zona no saturada sobreyacente a una formación acuífera cuya función principal es dar cobertura a esa parte del acuífero; ésta se encontraría a profundidades que varían entre 2 y 60 metros, y gracias a su buena permeabilidad permitiría que el agua se filtre a través de ella, alojándose en los flujos y coladas de lavas y basaltos (estrato geológico s2 y s3), formando este el principal acuífero de la ciudad de Santa Ana. [Modificado de (López Araujo & Retana Peña, 2007)]

De acuerdo a análisis y correlaciones realizadas en apartado 3.10, también se ha localizado un acuífero libre, poroso y de interacción directa superficial en la parte alta de la Subcuenca del río Suquiapa (Aranchacal).

### 3.3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En este apartado se detallan los protocolos de trabajo en campo para muestreo de aguas subterráneas, ubicación de sitios de muestreo, descripción de la base de datos de aguas subterráneas, cálculos realizados, análisis de la información y presentación de los resultados.

#### 3.3.1.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO DE CAMPO

A continuación en la figura 49 se muestra la metodología para toma de muestras de agua subterránea:

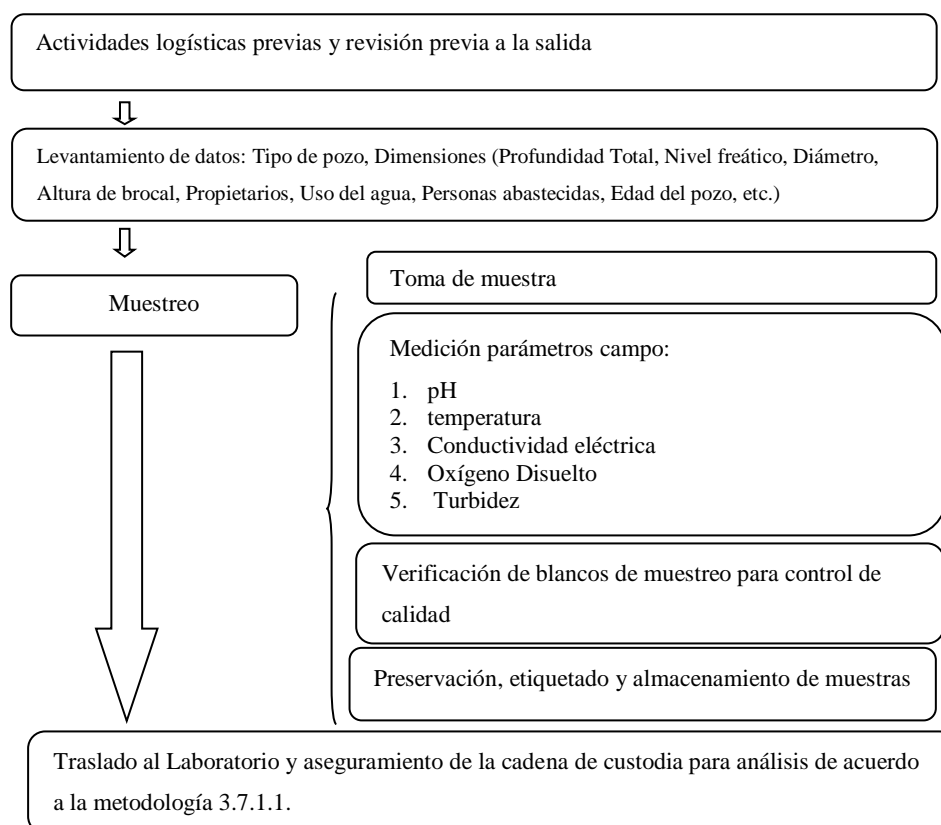


Figura 49 Procedimiento resumido de muestreo de aguas subterráneas.

Fuente: Metodologías de muestreo de aguas subterráneas, DGOA/MARN, 2012



### **3.3.1.2. UBICACIÓN DE SITIOS DE MUESTREO**

Los sitios de muestreo para agua subterránea se concentran en el municipio de Santa Ana. A continuación en el Mapa 10 se muestra la base de datos geoquímica en el área geográfica de interés, incluyendo las muestras de agua del Lago de Coatepeque (Zona de recarga) y muestra de agua en la desembocadura del río Suquiapa (Zona de descarga). Es importante mencionar que también existe una clasificación de estas muestras, por ejemplo en el mapa 7 se muestran los manantiales que conforman la base de datos, en el mapa 11 se muestran los pozos excavados que forman la base de datos y en el mapa 12 los pozos perforados en el área geográfica de interés. Los gráficos geoquímicos y análisis de los mismos se realizarán posteriormente en los apartados 3.4 y 3.7.

### **3.3.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

De acuerdo al actual mapa hidrogeológico de El Salvador, “Unidad Hidrogeológica” se define como el agrupamiento de los diferentes materiales que componen las formaciones geológicas con base a parámetros hidráulicos similares que existen entre ellas. Según esa definición dentro de la zona en estudio, se identifican cuatro unidades hidrogeológicas. La principal característica que poseen estos acuíferos es su capacidad para almacenar y conducir el agua, por lo que en la sección 3.3.2.1. se han agruparon los miembros geológicos que reúnen características en común y se definen 4 tipos de acuíferos, además en esa misma sección se presentan otras características del acuífero tales como los límites y fronteras, área de recarga y características propias de cada unidad hidrogeológica.



### **3.3.2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ACUÍFERO**

En esta sección se definen las características hidrogeológicas generales del acuífero de Santa Ana o Aranchacal, entre ellas sus límites, área de recarga, y unidades hidrogeológicas que lo conforman.

#### **A. LÍMITES DEL ACUÍFERO Y DIRECCION DE FLUJO**

El río Aranchacal se localiza al norte de la ciudad de Santa Ana y es el área de descarga del Acuífero. Sobre el área del acuífero, se asienta la ciudad de Santa Ana, cuya extensión alcanza los 40 km<sup>2</sup>. Cuando los materiales piroclásticos y lavas fracturadas provenientes de los macizos volcánicos de Santa Ana y Coatepeque (s3'a y s2) chocaron con los materiales terciarios del Bálsamo (b1 y b3) constituyendo una barrera al flujo del agua subterránea, tornándola en dirección sur-norte y en dirección oeste-este (Ver vectores de dirección en Mapa 11 y Mapa 12 y curvas isofreáticas cada 50 metros en Mapa 14). Los límites del acuífero, de acuerdo a estudios geológicos y geofísicos precedentes, se localizan al norte en los materiales terciarios del Bálsamo b1, que forman una barrera al flujo. Al oeste también por una barrera del material del bálsamo b'1 (Cerro de Santa Lucía) al este por otra barrera del Bálsamo b1 y b3, Cerro de Tecana. Estas barreras se dan en el sector de la ciudad y en el lado sur el acuífero se extiende hacia el área de recarga. (MARN-BID 1209-OC-ES No.03, 2008)

#### **B. ÁREA DE RECARGA.**

El acuífero tiene un área aproximada de 60 km<sup>2</sup>, su área de recarga en los volcanes tiene un área de 100 km<sup>2</sup>, su área de descarga a lo largo del río Aranchacal se estima en 5 km<sup>2</sup>. La recarga al acuífero se da en la conocida como zona de recarga en los volcanes y en el área del valle que aún no ha sido urbanizado y que de acuerdo a las formaciones geológicas s3'a y s2 en condiciones forestadas pueden al menos infiltrar un 30% de la lluvia anual.. (MARN-BID 1209-OC-ES No.03, 2008)

### C. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

- El acuífero fisurado de gran extensión y posiblemente alta producción lo componen estratos geológicos tales como: s2, s5'a, c3. Este tipo de acuífero está formado principalmente por rocas volcánicas del tipo andesíticas y basálticas que pertenecen a los miembros c3, s2 y s5'a, y por piroclásticos subordinados del período Holoceno-Pleistoceno pertenecientes al miembro s2. Abarca aproximadamente un área de 125 km<sup>2</sup>. El acuífero consta de flujos y coladas de lavas y basaltos provenientes al volcán de Santa Ana y sobre éste existe una capa de cobertura la cual contiene material piroclástico mezclado en algunas partes con pómez de granulometría fina a mediana proveniente del Volcán de Santa Ana, perteneciente a la era del Cuaternario, período Holoceno de la Formación San Salvador, Miembro s3'a. (López Araujo & Retana Peña, 2007).
- El acuíferos granular porosos de extensión limitada y productividad de mediana a baja lo componen estratos geológicos tales como: Q'f. Este tipo de acuífero se conoce por tener acumulaciones aisladas de materiales sedimentarios aluvionales (Q'f) que sobreyacen a los estratos pertenecientes al terciario y generalmente poseen permeabilidad baja. Este acuífero se encuentra en la zona norte del municipio de Santa Ana y debido a su granulometría compuesta por arena y grava provenientes del cuaternario y al grado de compactación, presenta características como porosidad y permeabilidad baja, y un rango de transmisividades entre 1 a 200 m<sup>2</sup>/día.(López Araujo & Retana Peña, 2007)
- Las rocas no acuíferas lo componen estratos geológicos tales como: c1, c2, b1, b2, b3. Se encuentra formado específicamente por rocas efusivas básicas intermedias, epiclastitas volcánicas y piroclastitas intermedias que pertenecen a los miembros b1, b2 y b3 de la Formación Bálsamo. La profundidad a la que se encuentra esta unidad es desconocida, y se consideran barreras negativas por presentar permeabilidad baja o nula ya que presentan porosidad baja y un alto grado de compactación, lo que es congruente al no haber registros de pozos perforados, sino únicamente la existencia de algunos manantiales con caudales bajos. (López Araujo & Retana Peña, 2007)

- El acuífero libre, poroso de interacción directa superficial se compone del estrato geológico s3 y s2 (Alta productividad), Qf (Productividad mediana) y tiene una barrera no acuífera (b1) al sur de ésta estructura y que a la vez corta transversalmente el flujo subsuperficial formando una barrera lateral que retarda el flujo subterráneo (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y que además sumado con la explotación agroindustrial de esa zona y la explotación doméstica (se produce un cono de depresión favorable a la intrusión del río al acuífero) y considerando además que en esas latitudes el nivel de agua se encuentra a profundidades someras que oscilan entre los 2 y 12 metros (Ver niveles de agua en los pozos de las figuras 50, 51 y 52, entre otros pozos) se puede afirmar que es un acuífero con potenciales riesgos de contaminación humana por uso directo o indirecto. El perímetro de este sector del acuífero se estima en 12.096 Km y el área de 7.2096 Km<sup>2</sup>.

#### D. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL ACUÍFERO

Respecto a los parámetros hidráulicos del acuífero, las tres características principales para definir a un acuífero son: la capacidad del acuífero para almacenar el agua y transmitirla a través del mismo; La porosidad y la permeabilidad o conductividad hidráulica que ayuda a identificar el transporte del agua dentro del mismo. . (López Araujo & Retana Peña, 2007)

Tabla 10 Valores de Transmisividad según tipos de acuíferos

Fuente: (López Araujo & Retana Peña, 2007)

Tipo de Acuífero	Transmisividad (m <sup>2</sup> /día)
Acuíferos volcánico fisurados de gran extensión y altamente productivos.	500-2800
Acuíferos sedimentarios porosos de gran extensión medianamente productivos	200-500
Acuíferos locales de extensión limitada y productividad de mediana a baja.	Menor a 200
Acuífero libre, poroso de interacción directa superficial	Menor a 200

Tipo de Acuífero	Transmisividad (m <sup>2</sup> /día)
Rocas no acuíferas. Presentan limitaciones en cuanto al almacenamiento y flujo de aguas subterráneas.	0

Según López & Retana (2007) los valores asociados a porosidades de las unidades hidrogeológicas antes mencionadas se detallan en la Tabla 11 a continuación.

Tabla 11 Valores de porosidad totales en Unidades Hidrogeológicas.

Fuente: (López Araujo & Retana Peña, 2007)

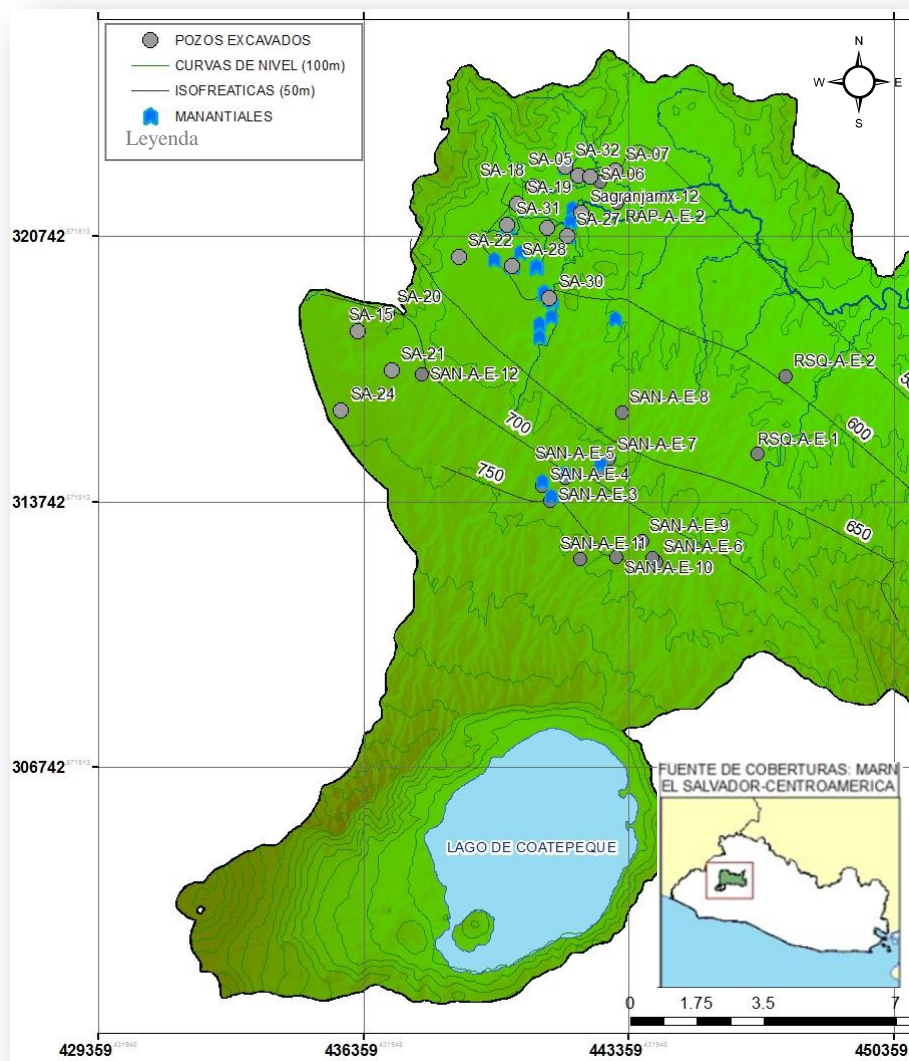
Unidad Hidrogeológica	Porosidad Total (%)	Porosidad Eficaz (%)
Acuífero volcánico fisurado de gran extensión y posiblemente alta producción	30	< 5
Acuíferos granulares (porosos) de extensión limitada de productividad mediana a baja	25	15
Rocas No Acuíferas	0.3	< 0.2

La permeabilidad es el cociente entre la transmisividad y el espesor del acuífero que a su vez disminuye en dirección N-S por lo que sus valores varían respecto a las latitudes del sistema en un rango de 10<sup>1</sup> m/día hasta 10<sup>-2</sup> m/día respectivamente.

Para el caso de los materiales constituyentes del acuífero volcánico fisurado de gran extensión y posiblemente alta producción y según el Mapa Hidrogeológico de la República de El Salvador (ANDA, 2008) (Ver Anexo 2, Mapa 28) pueden presentar conductividades hidráulicas de medianas a altas, como consecuencia de su porosidad secundaria. Para el caso de los acuíferos clasificados como de productividad media en base a los materiales constituyentes, las conductividades hidráulicas pueden variar de medianas a bajas, como consecuencia al grado de cementación o compactación que pueden tener los granos de los materiales que la constituye. El acuífero de productividad mediana a baja al estar

constituido por sedimentos aluviales presenta una conductividad hidráulica de media a baja, la que depende de la granulometría, del grado de limpieza (contenido de limo y arcilla) y del grado de compactación que presentan los materiales.

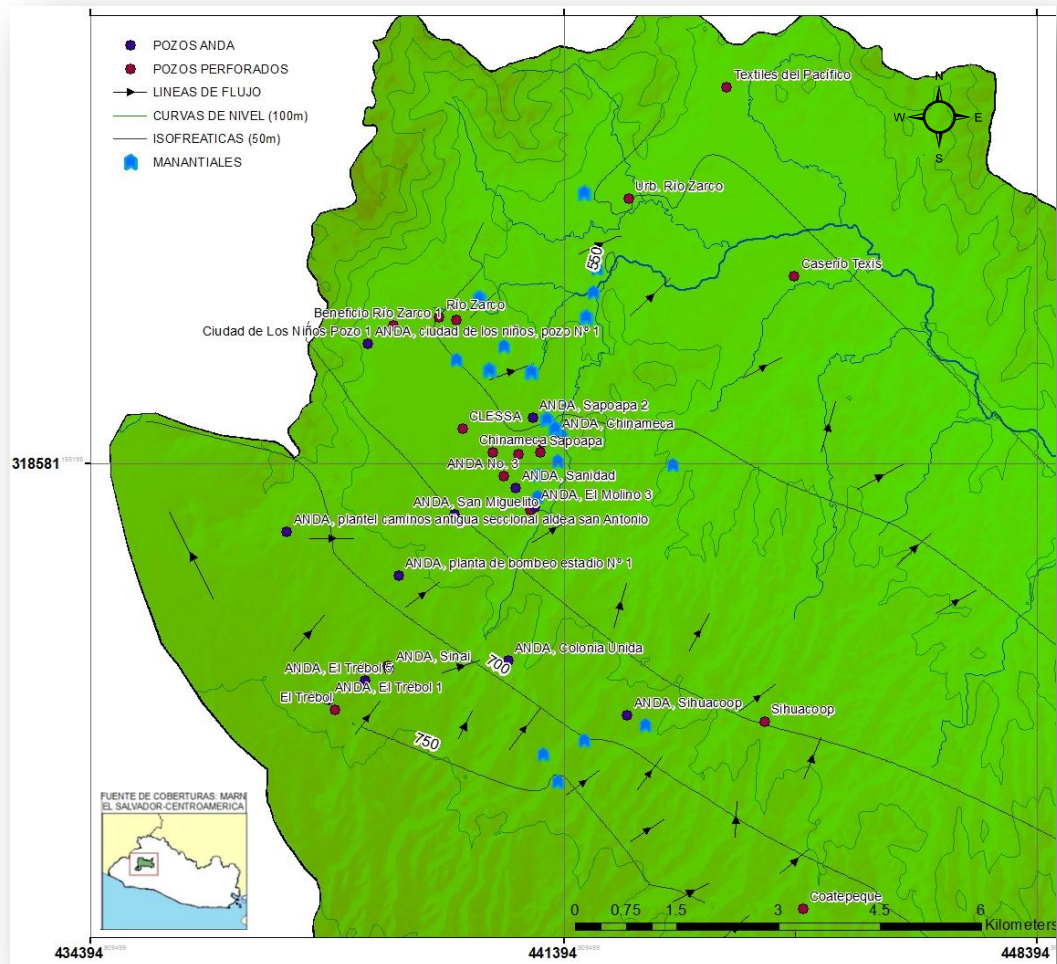
A continuación se presentan los Mapas 11, 12, 13 y 14 que muestran los pozos excavados en el área geográfica de interés, los pozos perforados, las curvas de nivel cada 100 metros y el mapa de curvas isofreáticas cada 50 metros respectivamente.



Mapa 11 Pozos excavados en el área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN - ANDA y propios.

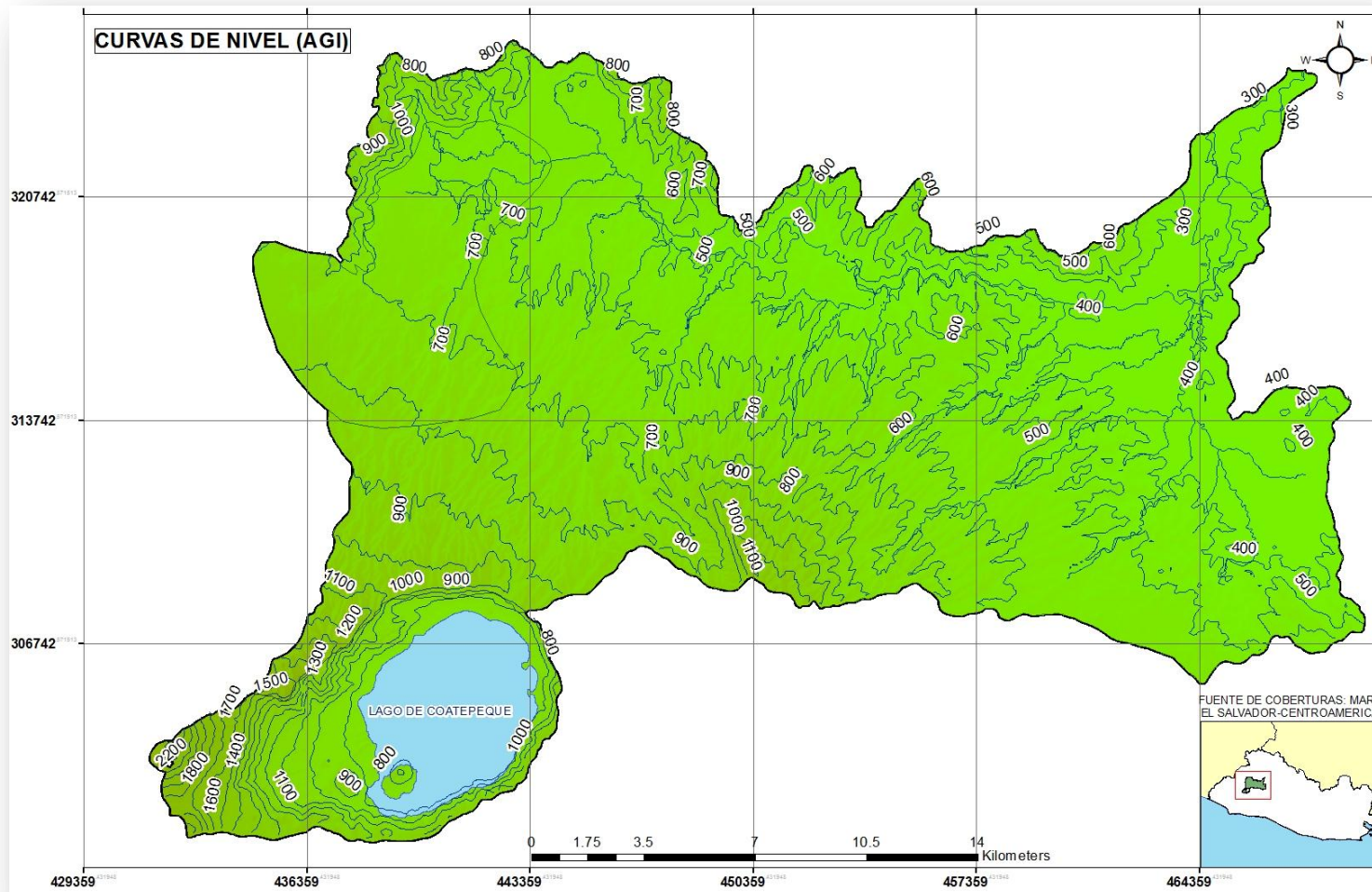




Mapa 12 Pozos perforados en el área geográfica de interés

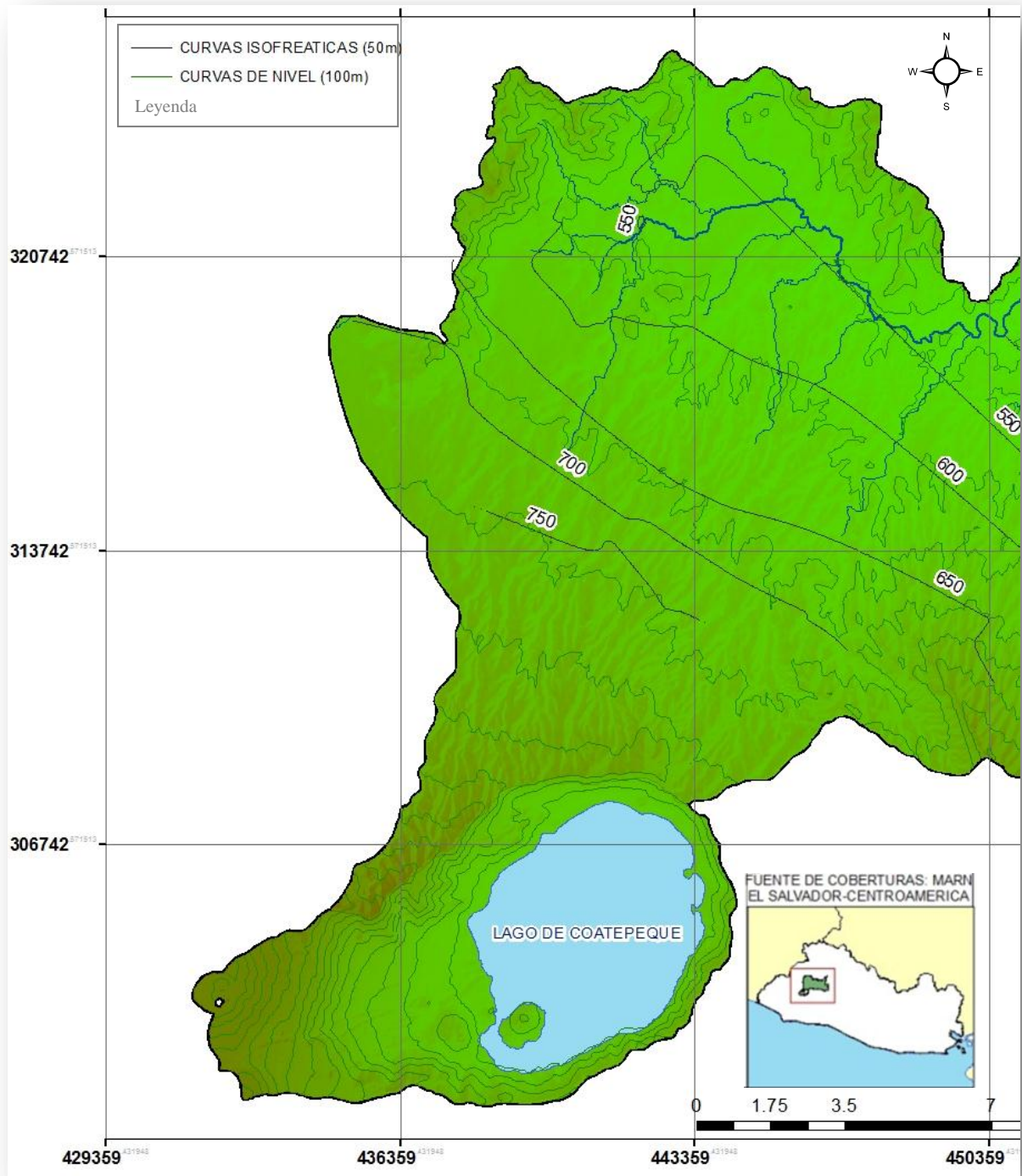
Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN - ANDA y propios.





Mapa 13 Curvas de nivel cada 100 m. en el área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia. Coberturas: MARN.



Mapa 14 Curvas isofreáticas cada 50 m. en el área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN - ANDA y propios

### 3.3.2.2. PRESENTACIÓN DE DATOS

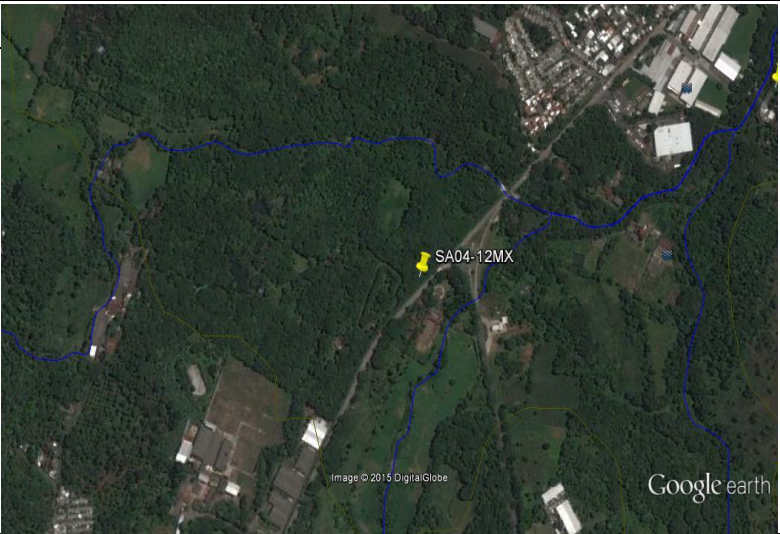
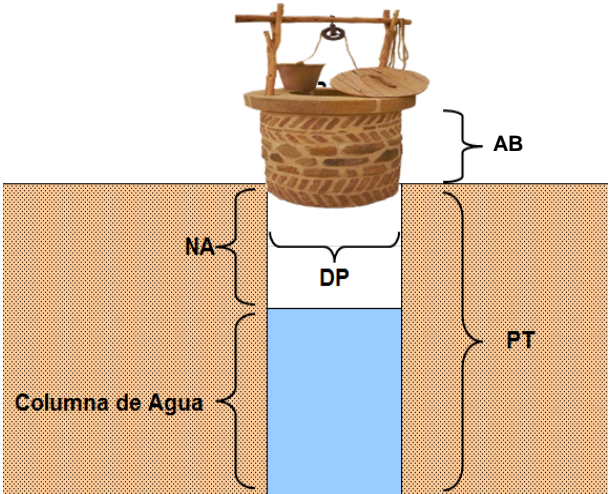
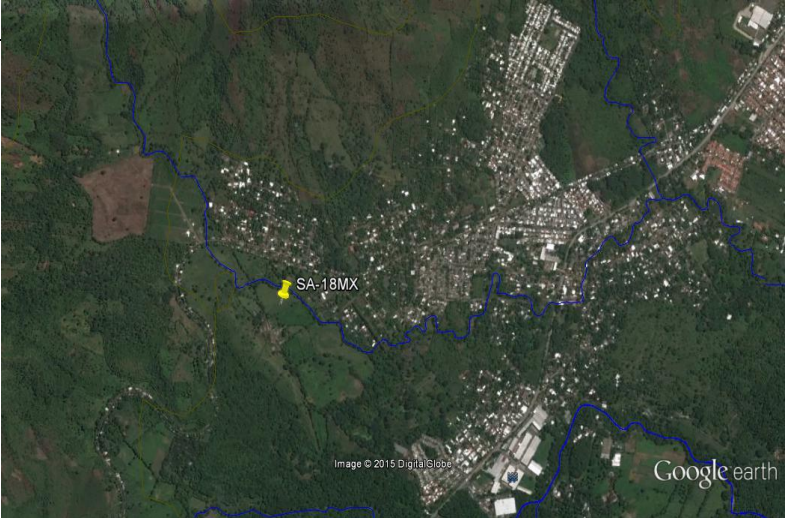
FICHA POZO SA04-12MX		
Latitud:	14.010133	
Longitud:	-89.544283	
Departamento:	Santa Ana	
Propietario	Vidal Álvarez	
Dirección:	Hacienda San Cayetano, Santa Ana	
Tipo de pozo:	Excavado	
DATOS DEL POZO		
Elevación GPS E (m):	589.000	
Altura de Brocal AB (m):	0.31	
Diámetro de Pozo DP (m):	0.99	
Profundidad Nivel del agua NA(m):	4.11	
Profundidad del pozo PT(m):	5.8	
Nivel Freático NF (m):	584.89	
Uso:	Doméstico	
Fecha:	09/10/2012	

Figura 50 Ficha de sitio de muestreo de agua subterránea SA-04-12MX

Fuente: Elaboración propia



<b>FICHA POZO SA18-12MX</b>	
Latitud:	14.019944
Longitud:	-89.54775
Departamento:	Santa Ana
Propietario	Tomás Ramírez
Dirección:	Hacienda San José, Santa Ana
Tipo de pozo:	Excavado



<b>DATOS DEL POZO</b>	
Elevación GPS E (m):	587.000
Altura de Brocal AB (m):	0.6
Diámetro de Pozo DP (m):	1.72
Profundidad Nivel del agua NA(m):	5.49
Profundidad del pozo PT(m):	8
Nivel Freático NF (m):	581.51
Uso:	Doméstico
Fecha:	09/10/2012

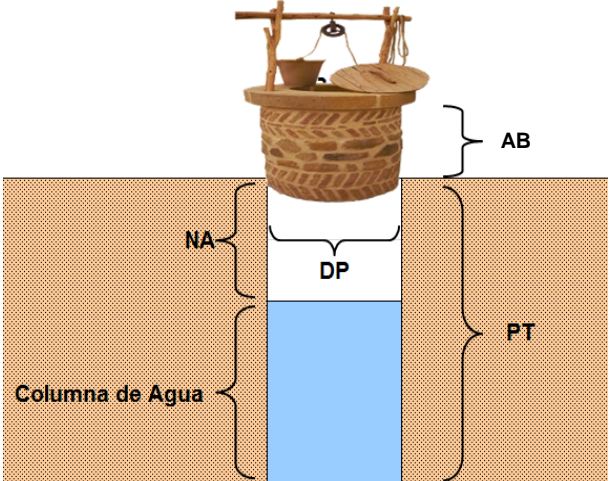



Figura 51 Ficha de sitio de muestreo de agua subterránea SA-18-12MX

Fuente: Elaboración propia

<b>FICHA POZO SAGRANJA-12MX</b>	
Latitud:	14.013733
Longitud:	-89.536
Departamento:	Santa Ana
Propietario:	Privado
Dirección:	Quinta Santana, Santa Ana
Tipo de pozo:	Excavado



<b>DATOS DEL POZO</b>	
Elevación GPS E (m):	574.000
Altura de Brocal AB (m):	0.5
Diámetro de Pozo DP (m):	1
Profundidad Nivel del agua NA(m):	12.16
Profundidad del pozo PT(m):	13.8
Nivel Freático NF (m):	561.840
Uso:	Doméstico
Fecha:	09/10/2012

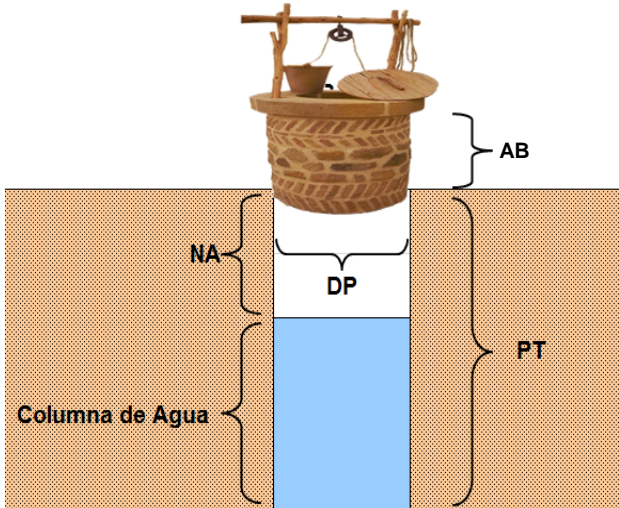


Figura 52 Ficha de sitio de muestreo de agua subterránea SAGRANJA-12MX

Fuente: Elaboración propia

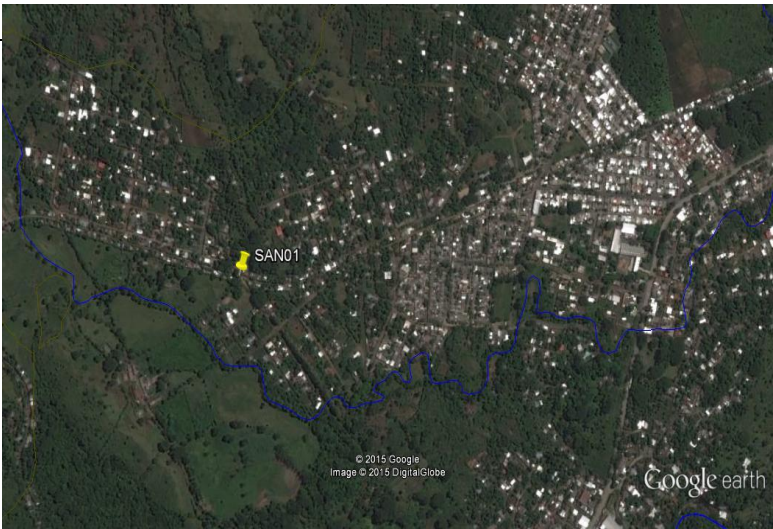
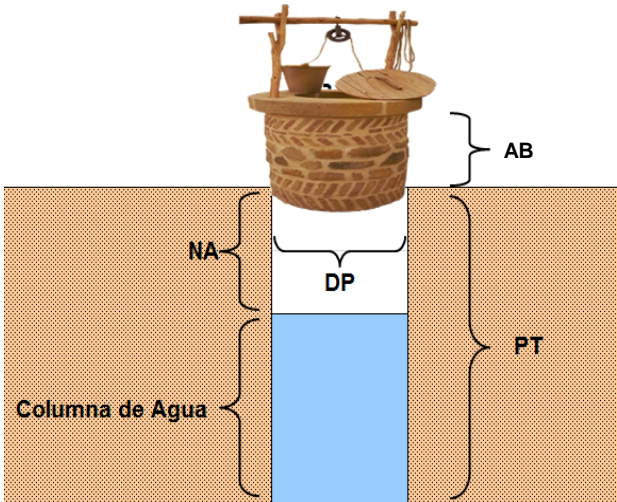
<b>FICHA POZO SAN 01</b>		
Latitud:	14°01'15,7"	
Longitud:	- 89°32'44,7"	
Departamento:	Santa Ana	
Propietario	Milagro del Pilar Medrano	
Dirección:	Colonia San Carlos, Municipio de Santa Ana, Santa Ana.	
Tipo de pozo:	Excavado	
<b>DATOS DEL POZO</b>		
Elevación GPS E (m):	574.000	
Altura de Brocal AB (m):	0.35	
Diámetro de Pozo DP (m):	0.84	
Profundidad Nivel del agua NA(m):	1.68	
Profundidad del pozo PT(m):	4.68	
Nivel Freático NF (m):	572.32	
Uso:	Doméstico	
Fecha:	23/03/2012	

Figura 53 Ficha de sitio de muestreo de agua subterránea SAN-01

Fuente: Elaboración propia



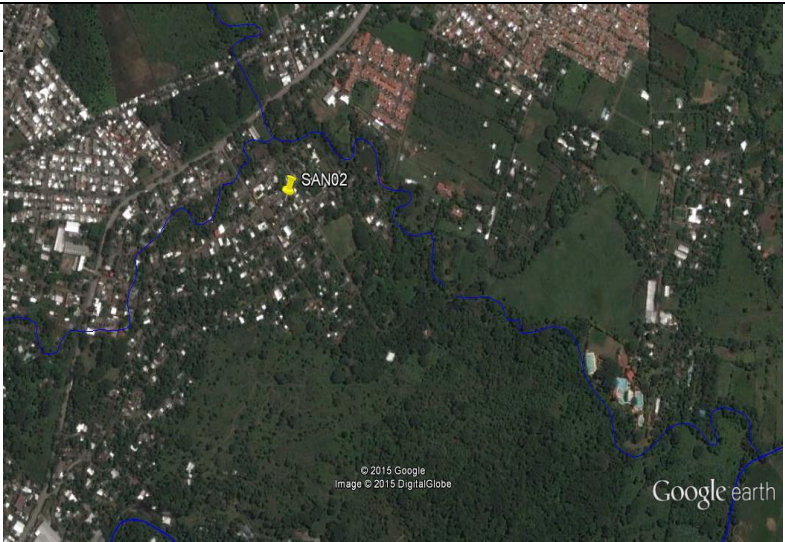
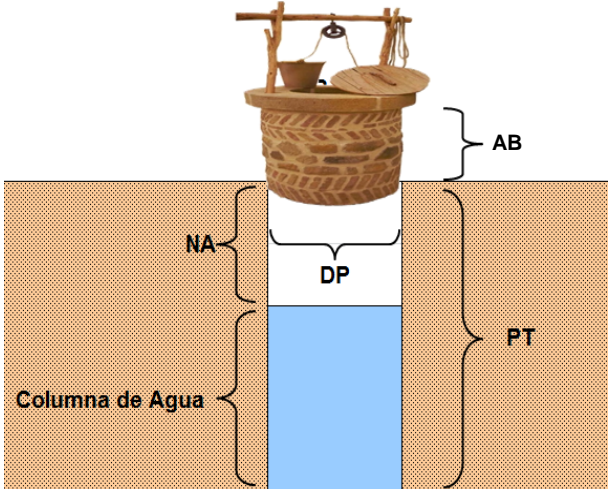
<b>FICHA POZO SAN 02</b>		
Latitud:	14°0'24.7"	
Longitud:	- 89°32'52.9"	
Departamento:	Santa Ana	
Propietario	Juan Francisco Menéndez	
Dirección:	Beneficio El Trapiche, Municipio de Santa Ana, Santa Ana.	
Tipo de pozo:	Excavado	
<b>DATOS DEL POZO</b>		
Elevación GPS E (m):	599.000	
Altura de Brocal AB (m):	0.45	
Diámetro de Pozo DP (m):	1	
Profundidad Nivel del agua NA(m):	9.5	
Profundidad del pozo PT(m):	11.5	
Nivel Freático NF (m):	589.5	
Uso:	Domestico	
Fecha:	23/03/2012	

Figura 54 Ficha de sitio de muestreo de agua subterránea SAN-02

Fuente: Elaboración propia

<b>FICHA POZO SAN 04</b>	
Latitud:	14° 0'25.10"N
Longitud:	- 89°31'37.20"
Departamento:	Santa Ana
Propietario	Alicia Urrutia/ Encargado Jesús Arriola Calderón
Dirección:	Calle la China. Hacienda La Reforma.
Tipo de pozo:	Excavado

<b>DATOS DEL POZO</b>	
Elevación GPS E (m):	565.000
Altura de Brocal AB (m):	0.52
Diámetro de Pozo DP (m):	1.1
Profundidad Nivel del agua NA(m):	25.8
Profundidad del pozo PT(m):	30
Nivel Freático NF (m):	539.2
Uso:	Domestico
Fecha:	23/03/2012

Figura 55 Ficha de sitio de muestreo de agua subterránea SAN-04

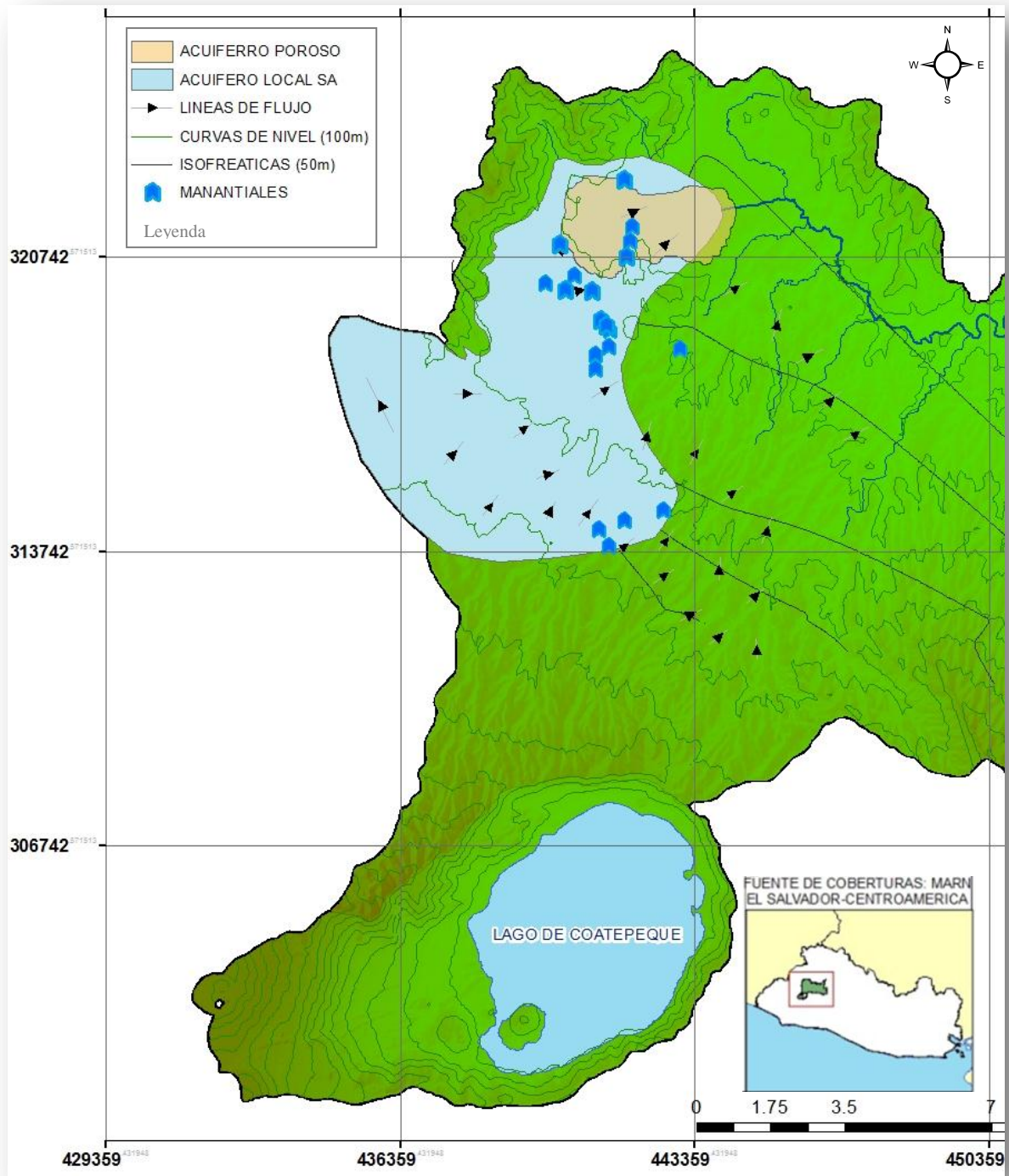
Fuente: Elaboración propia



<b>FICHA POZO SAN 09</b>		
Latitud:	13°58'59.9"	
Longitud:	- 89°34'47.3"	
Departamento:	Santa Ana	
Propietario	Elizabeth Aguilar/Saúl Aguilar	
Dirección:	Colonia Los Cedros, Lote N° 21, Municipio de Santa Ana, Santa Ana.	
Tipo de pozo:	Excavado	
<b>DATOS DEL POZO</b>		
Elevación GPS E (m):	735.000	
Altura de Brocal AB (m):	0.5	
Diámetro de Pozo DP (m):	1.5	
Profundidad Nivel del agua NA(m):	11.98	
Profundidad del pozo PT(m):	18.11	
Nivel Freático NF (m):	723.02	
Uso:	Domestico	
Fecha:	23/03/2012	

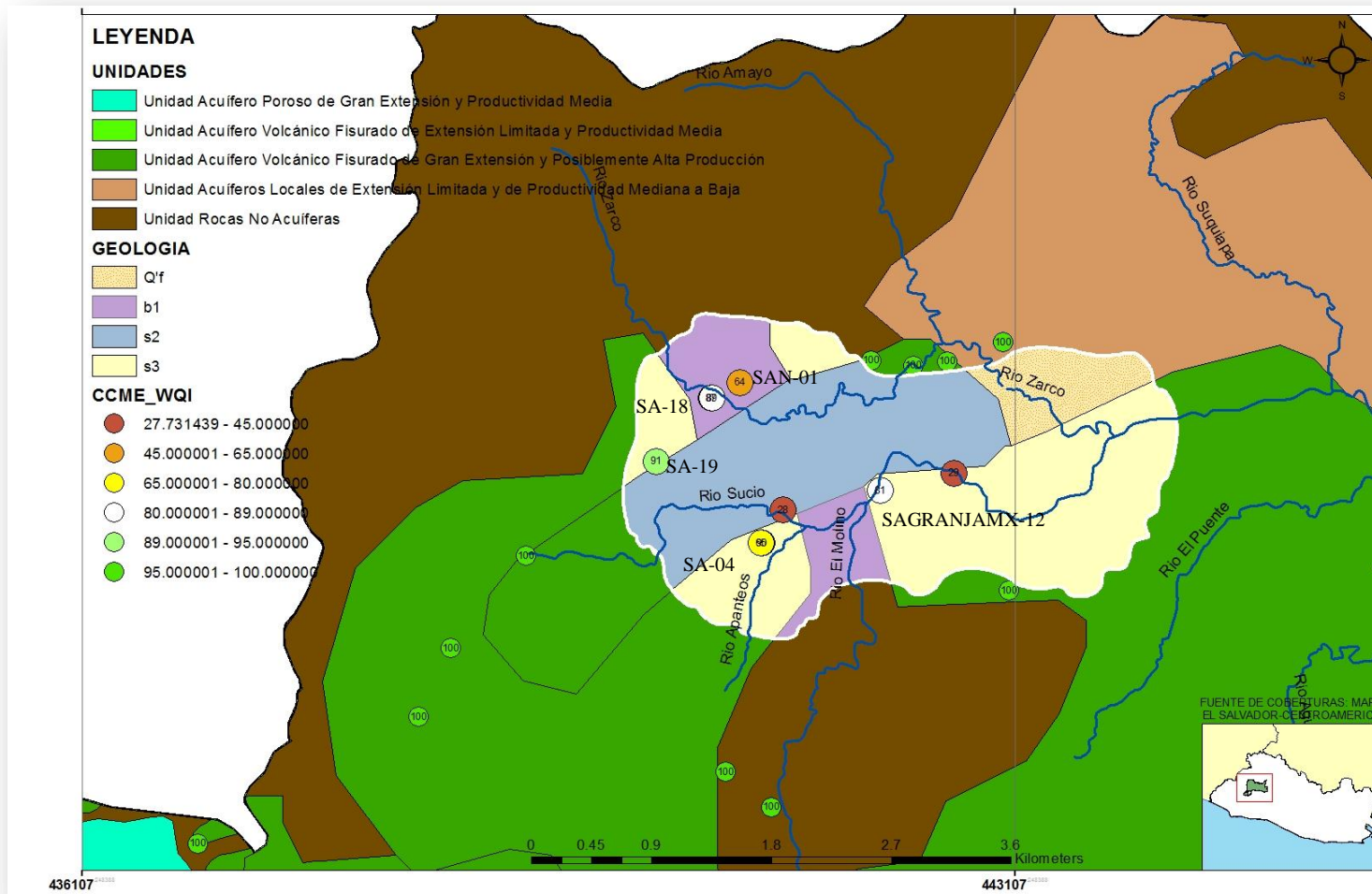
Figura 56 Ficha de sitio de muestreo de agua subterránea SAN-09

Fuente: Elaboración propia



Mapa 15 Ubicación de acuífero poroso y superficial en el área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia. Coberturas: MARN



Mapa 16 Acuífero libre, poroso de interacción directa superficial, Geología e índice de calidad de agua canadiense CCMEWQI

Fuente: Elaboración propia

### **3.4. EVALUACIÓN HIDROGEOQUÍMICA**

Los objetivos primordiales de esta caracterización hidrogeoquímica son: Identificar tendencias espaciales en la evolución química del agua subterránea, identificar relaciones espaciales entre distintas aguas (mezclas de aguas de distinta composición), Identificar procesos hidrogeoquímicos que modifiquen la composición de un agua natural durante su circulación por el terreno, mezclas de distintas aguas, reacciones de disolución/precipitación de minerales, de adsorción o intercambio iónico con el terreno, de oxidación/reducción, etc.

#### **3.4.1. METODOLOGÍA DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS Y ANÁLISIS**

La metodología utilizada en campo para recolección de muestras de agua se detalla a continuación:

1. Se prepararon reactivos químicos y estándares de calibración en campo.
2. Se comprobó el buen funcionamiento de los equipos de medición de campo.
3. Se revisaron las listas de equipos y materiales.
4. Se prepararon los estándares para calibración del equipo de campo multiparámetro
5. Se prepararon los recipientes (lavado).
6. Se preparó la cadena de custodia y bitácora de campo.
7. Se calibró el equipo de medición en campo.
8. Se midieron parámetros geográficos: Latitud (°), Longitud (°), Altitud (m).
9. Se determinaron características de los pozos: Tipo de pozo, Dimensiones (Profundidad Total, Nivel freático, Diámetro, Altura de brocal, Propietarios, Uso del agua, Personas abastecidas, Edad del pozo, etc.)
10. Se etiquetaron las muestras: Codificación de la muestra, Fecha y hora de muestreo, Parámetro a determinar, Tipo de muestra, Identificación del responsable, preservantes.
11. Se bombeó agua de pozo hasta que las muestras fuesen representativas del acuífero (el volumen de la columna se estimó en campo).
12. Se midieron los parámetros en campo:

- pH (Unidades pH), Conductividad eléctrica ( $\mu$ Siemens/cm), Salinidad (%), Temperatura Ambiental ( $^{\circ}$ C), Temperatura de la muestra ( $^{\circ}$ C), Oxígeno disuelto (mg/L).
13. Se tomaron muestras de agua de pozo y se filtraron muestras en campo
  14. Se Llenaron los frascos considerando un espacio libre de seguridad del 1% aproximadamente de la capacidad total de los frascos.
  15. Se preservaron las muestras de agua con los reactivos requeridos.
  16. Se colocaron las muestras en una hielera acondicionada a una temperatura entre  $1^{\circ}$ C y  $4^{\circ}$ C, para su posterior análisis en el Laboratorio designado.
  17. Se realizó el proceso de blanco de muestreo viajero, que consistió en la verificación de parámetros de campo antes, durante y después del muestreo con agua destilada.
  18. Se transportaron las muestras y el formato de Cadena de Custodia con datos de campo al laboratorio en el menor tiempo posible.

#### **3.4.1.1. DETERMINACIÓN DE CONFIABILIDAD DE DATOS DE LABORATORIO.**

Para determinar la confiabilidad de los cálculos de laboratorio, se calcula el balance de carga entre aniones y cationes de cada solución, basándose en el principio de la electroneutralidad, el cual estipula que toda solución no puede tener carga neta.

El principio de electroneutralidad enuncia que la sumatoria de cargas positivas de las especies presentes en una matriz en equilibrio debe de ser aproximadamente igual a la sumatoria de cargas negativas de las especies en esa matriz dada, y viene dado por la siguiente expresión:

Ec. 22

$$\sum z_a m_a = \sum z_c m_c$$

$z_a$ : Carga de la especie aniónica

$z_c$ : Carga de la especie catiónica

$m_a$ : Molaridad de los aniones [mol/l]

$m_c$ : Molaridad de los cationes [mol/l]



El cálculo del porcentaje de error molar (epm, por sus iniciales en inglés) en dicho balance viene dado por la ecuación siguiente:

Ec. 23

$$\text{epm} = \frac{(\sum z_a m_a - \sum z_c m_c) \times 100}{(\sum z_a m_a + \sum z_c m_c)}$$

Si el porcentaje de error es menor del 10%, se considera satisfactorio el balance de carga; si está entre 10 y 15%, el balance es aceptable; si es mayor que 15%, las mediciones realizadas en la muestra son inaceptables y deben descartarse. (Custodio y Llamas, 2001).

### 3.4.1.2. CALCULO DE GRÁFICOS HIDROGEOQUÍMICOS

En la presente investigación se han utilizado algunos softwares para la elaboración de gráficos hidrogeoquímicos. Aquachem, EasyQuim, ArcGis y Minitab. En general, la metodología utilizada para la elaboración de los gráficos hidrogeoquímicos se realizó en 3 etapas:

1. Transformación de unidades: La mayoría de laboratorios reportan las concentración químicas de las especies solicitadas en partes por millón (ppm), algunos gráficos realizados a partir de los software antes mencionados requieren transformaciones de datos, previo a su presentación o que éstos sean reportados de acuerdo a una conversión específica, en general las unidades usuales de ingreso de datos han sido: unidades de partes por millón, meq/L, % meq/L y molaridad.
2. Ingreso de datos: Algunos software tales como Aquachem y ArcGis requieren que el ingreso de datos se realice a partir de un archivo de base de datos externo en formato de base de datos o texto, otros como Minitab poseen hojas de cálculo para poder analizar la información y otros como EasyQuim utilizan las herramientas de procesamiento y gráficos de Excel para poder reportar la información solicitada. Por lo que para cada caso específico se realizaron las transformaciones de datos necesarias utilizando las ecuaciones 8, 9 ó 10.

3. Parametrizaciones específicas: Para cada gráfico hidrogeoquímico las operaciones de Parametrización son específicas pero lo importante es conocer el uso e interpretación que cada gráfico brinda a la evaluación de la base de datos geoquímica y la ubicación de las opciones en los software específicos. Todo el software utilizado poseen características intuitivas y lógicas para su elaboración, en general: Selección del tipo de gráfico, asignación de campos a cada uno de los ejes o tramas que el gráfico específico requiere, formato de datos y de presentación de resultados.

En el siguiente apartado se presenta el análisis de la información hidrogeoquímica haciendo uso de las herramientas gráficas antes mencionadas.

### **3.4.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

De acuerdo a la metodología para la determinación de la confiabilidad de la base de datos geoquímica, se construyó el gráfico de dispersión de la figura 57 de Conductividad eléctrica vs Suma de iones, con el fin de visualizar fácilmente si las muestras evaluadas poseen una confiabilidad aceptable. En dicha figura puede apreciarse que la mayoría de los sitios siguen un comportamiento confiable. A excepción de los sitios centro de Lago de Coatepeque y fuente termal de Coatepeque donde el balance iónico no se adecua apropiadamente; sin embargo, para estos sitios hubo varias campañas de campo en el año 2012, por lo que se decidió eliminar estos datos anómalos para posteriores pruebas y sustituirlos por otra campaña de datos que no presentaba estas irregularidades.

De igual forma, el software Aquachem o Easyquim realizan cálculos de balance iónico reportando si la muestra es aceptable o no para posteriores análisis. (Ver Anexo 3: Reportes de clasificación de aguas de la base de datos geoquímica del área geográfica de interés que contiene un cálculo de balance iónico por muestra y Anexo 4: Reporte de especiación química: Alcalinidad, que también han servido para corroborar la validez y representatividad de las muestras)

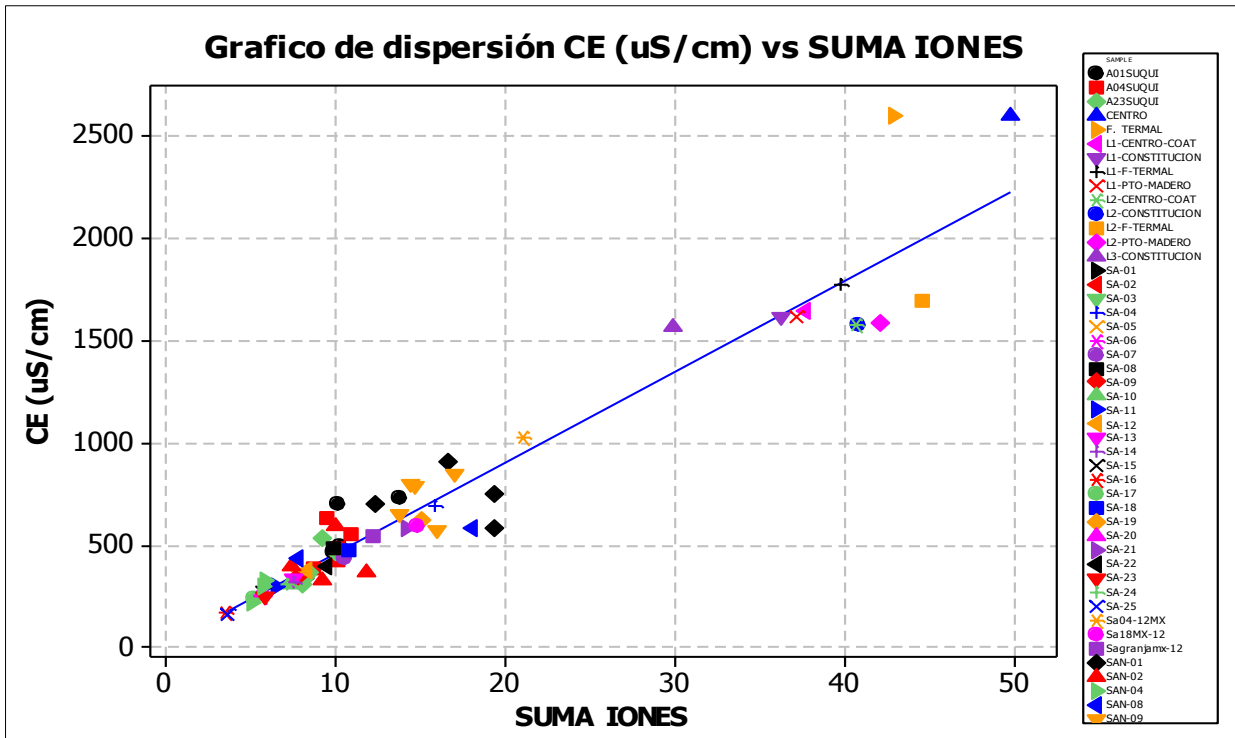


Figura 57 Gráfico de dispersión de conductividad eléctrica vs suma de iones

Fuente: Elaboración propia.

Luego de corroborar la validez y representatividad de los datos hidrogeoquímicos del área geográfica de interés, se ha procedido a clasificar las aguas de acuerdo a sus iones mayoritarios (Ver Tabla 12) y a elaborar los gráficos hidrogeoquímicos de clasificación e interpretación, que se presentan a continuación



Tabla 12 Tipo de agua y categoría Hidrogeológica de base de datos Hidrogeoquímicos

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN- ANDA y propios.

SITIO	FECHA	LATITUD	LONGITUD	TIPO DE AGUA	PROPIETARIO	TIPO DE POZO	GEOLOGIA	CATEGORÍA HIDROGEOLOGICA
SA-01	14/03/2008	13.95947	-89.56958	Mg-Na-HCO3	ANDA, El Trébol 5	Profundo	s3a	ACUIFERO INTERGRANULAR EXTENSO Y DE ALTA PRODUCTIVIDAD
SA-02	14/03/2008	13.98178	-89.55742	Mg-Na-HCO3	ANDA, San Miguelito	Profundo	s2	ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO
SA-03	14/03/2008	13.99467	-89.54667	Mg-Na-HCO3	ANDA, Sapoapa 2	Profundo	s3a	ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO
SA-05	14/03/2008	14.02253	-89.53664	Mg-Na-HCO3-Cl	Industria Magaña López	Somero	s3a	MATERIAL ACTUANDO COMO BARRERA DE FLUJO
SA-06	14/03/2008	14.02219	-89.53372	Mg-Na-HCO3	Colonia San José	Somero	s3a	ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO
SA-07	14/03/2008	14.02381	-89.52747	Mg-Na-HCO3	Danilo Magaña	Somero	s3a	MATERIAL ACTUANDO COMO BARRERA DE FLUJO
SA-08	26/03/2008	13.99228	-89.54353	Na-Mg-Cl-HCO3	ANDA, Chinameca	Profundo	s3a	ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO
SA-09	26/03/2008	13.98536	-89.54906	Na-Mg-HCO3-NO3-SO4	ANDA, Sanidad	Profundo	s3a	ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO
SA-10	26/03/2008	13.98275	-89.54636	Mg-Na-HCO3	ANDA, El Molino 3	Profundo	s3a	ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO
SA-14	26/03/2008	13.96111	-89.56628	Mg-Na-HCO3-SO4	ANDA, Sinai	Profundo	s3a	ACUIFERO INTERGRANULAR EXTENSO Y DE ALTA PRODUCTIVIDAD
SA-15	27/03/2008	13.98542	-89.59047	Mg-Na-HCO3-SO4	Miguel Martínez, Quinta La Felicidad	Somero	s3a	ACUIFERO INTERGRANULAR EXTENSO Y DE ALTA PRODUCTIVIDAD
SA-16	27/03/2008	13.99447	-89.60025	Na-Mg-HCO3	Colonia Avilés	Profundo	s3a	ACUIFERO INTERGRANULAR EXTENSO Y DE ALTA PRODUCTIVIDAD
SA-17	27/03/2008	13.94800	-89.57428	Mg-Na-HCO3	Familia Alvarez, Finca Piedra Pacha II	Profundo	s3a	ACUIFERO INTERGRANULAR EXTENSO Y DE ALTA PRODUCTIVIDAD
SA-18	27/03/2008	14.01994	-89.54775	Mg-HCO3-Cl	Tomás Ramírez, Hacienda San José	Somero	s3a	ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO
SA-19	27/03/2008	14.01567	-89.55153	Mg-HCO3	Jaime Rodríguez Bou, Las Victorias	Somero	b1	ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO
SA-20	27/03/2008	13.98972	-89.58334	Mg-Na-HCO3	José Luis Magaña, Quinta Alicia	Somero	c3	ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO
SA-21	31/03/2008	13.97608	-89.58219	Mg-HCO3	Taller Eléctrico Daniel	Somero	s2	ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO
SA-22	31/03/2008	14.00300	-89.56578	Mg-HCO3	Beneficio Tres Puertas	Somero	s3a	ESTRATOS CON MINIMOS RECURSOS DE AGUA
SA-23	31/03/2008	13.99833	-89.56803	Na-Mg-HCO3	IMACASA	Profundo	s3a	ESTRATOS CON MINIMOS RECURSOS DE AGUA
SA-24	09/04/2008	13.96644	-89.59456	Mg-Na-HCO3	Lotificación Santa Elena	Somero	s3a	ESTRATOS CON MINIMOS RECURSOS DE AGUA
SA-25	09/04/2008	13.97722	-89.58789	Na-HCO3	Planta de Bombeo Col. Panadez	Profundo	s3a	ESTRATOS CON MINIMOS RECURSOS DE AGUA
SAN-01	23/03/2012	14.02199	-89.54576	Mg-Na-HCO3-SO4	Col. San Carlos, Milagro Medrano	Somero	b1	MATERIAL ACTUANDO COMO BARRERA DE FLUJO
SAN-02	05/09/2005	14.02347	-89.53134	Na-Mg-HCO3	Col. Jardines de San José, Pedro Zaldaña	Somero	s3a	ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO
SAN-04	05/09/2005	14.00794	-89.52701	Mg-HCO3	Hda. La Reforma, Alicia Urrutia	Somero	s3a	ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO
SAN-08	17/02/2005	14.01025	-89.56059	Mg-HCO3	Finca Las Palmas, Víctor Rodríguez	Somero	s3a	AREA DE DESCARGA
A01SUQUI	24/03/2009	14.01240	-89.54274	Ca-HCO3	Río Aranchacal, Suquiapa	Río	s2	CUERPO DE AGUA
A04SUQUI	24/03/2009	14.01618	-89.53097	Ca-Mg-HCO3	Río Suquiapa	Río	s3a	CUERPO DE AGUA
A23SUQUI	20/03/2009	14.03769	-89.30642	Mg-Na-Ca-HCO3	Río Suquiapa	Río	Descarga	CUERPO DE AGUA
CENTRO-COAT	14/09/2012	13.86936	-89.54197	Na-Mg-Cl-SO4	Centro del Lago de Coatepeque	Lago Coatepeque	Agua	CUERPO DE AGUA
CONSTITUCION-COAT	21/09/2012	13.88413	-89.54395	Na-Mg-Cl-SO4	Orilla de Lago de Coatepeque	Lago Coatepeque	Agua	CUERPO DE AGUA
FTERMAL-COAT	21/09/2012	13.84400	-89.56812	Na-Mg-Cl-HCO3	Lago de Coatepeque, fuente termal	Lago Coatepeque	s3b	CUERPO DE AGUA

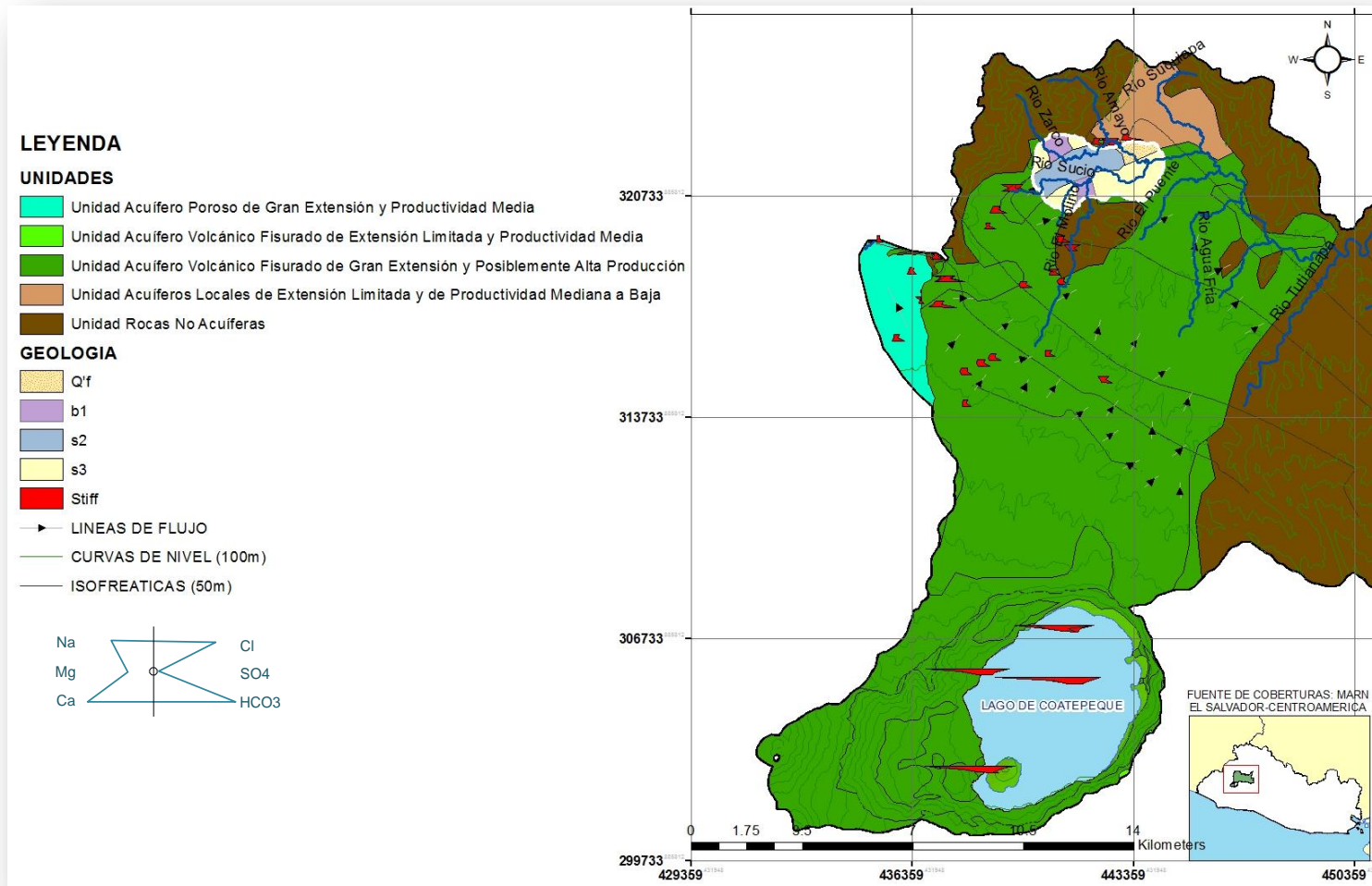
#### ○ Diagrama de Stiff

Los diagramas de Stiff caracterizan el contenido salino total de un agua y permiten ver evoluciones de composición espaciales y/o temporales ya que se reflejan  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , como cationes, y  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  como aniones. Estructuralmente el gráfico consta de tres o cuatro líneas horizontales cortadas por una vertical que indica la concentración 0. Se expresan en % de meq/l o usando una escala en meq/l. Se unen los extremos formando un polígono. (Pinto Rodríguez, 2009)

Una forma muy práctica de evidenciar la evolución espacial de la química es sobreponiendo los diagramas sobre el mapa o coberturas que evidencien otros atributos importantes para el análisis. En este estudio se presentan los mapas 17, 18 y 19 en donde se han clasificado las aguas y se han sobrepuesto los diagramas de Stiff a las unidades hidrogeológicas y evidentemente se observan diagramas característicos, así por ejemplo en las muestras del área de recarga (mapa 19) los componentes mayoritarios presentan valores más elevados de sodio, magnesio, cloro y sulfatos debido a que en el lago de Coatepeque hay descargas de aguas termales y el magnesio, por ejemplo es un elemento que es característico de aguas de origen volcánico.

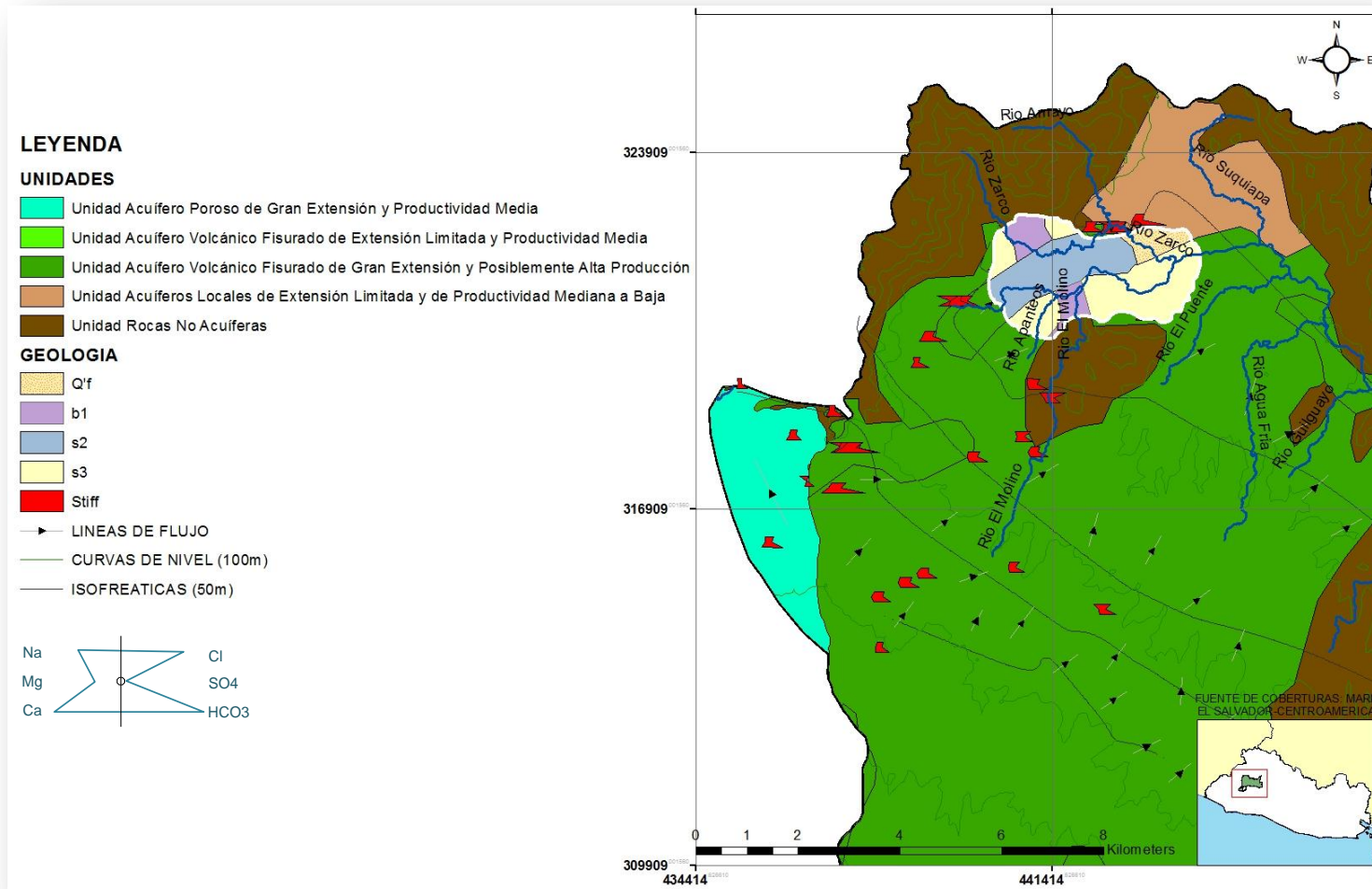
En el Mapa 18, del Acuífero de Santa Ana se puede evidenciar que muchas de las muestras poseen composiciones en las que sobresalen los componentes Sodio, Magnesio y Bicarbonatos; lo cual evidencia que el origen de las aguas es volcánico, y que el Bicarbonato ha sido incorporado en la matriz debido a la interacción superficial y meteorización influenciada por la precipitación que el agua ha sufrido desde su recarga hasta la incorporación al acuífero, a latitudes Lambert entre 313000 y 322000 km.

A continuación se muestran los mapas con los diagramas de Stiff de la base de datos geoquímica, en cuya leyenda se muestra la distribución de los cationes y aniones mayoritarios.



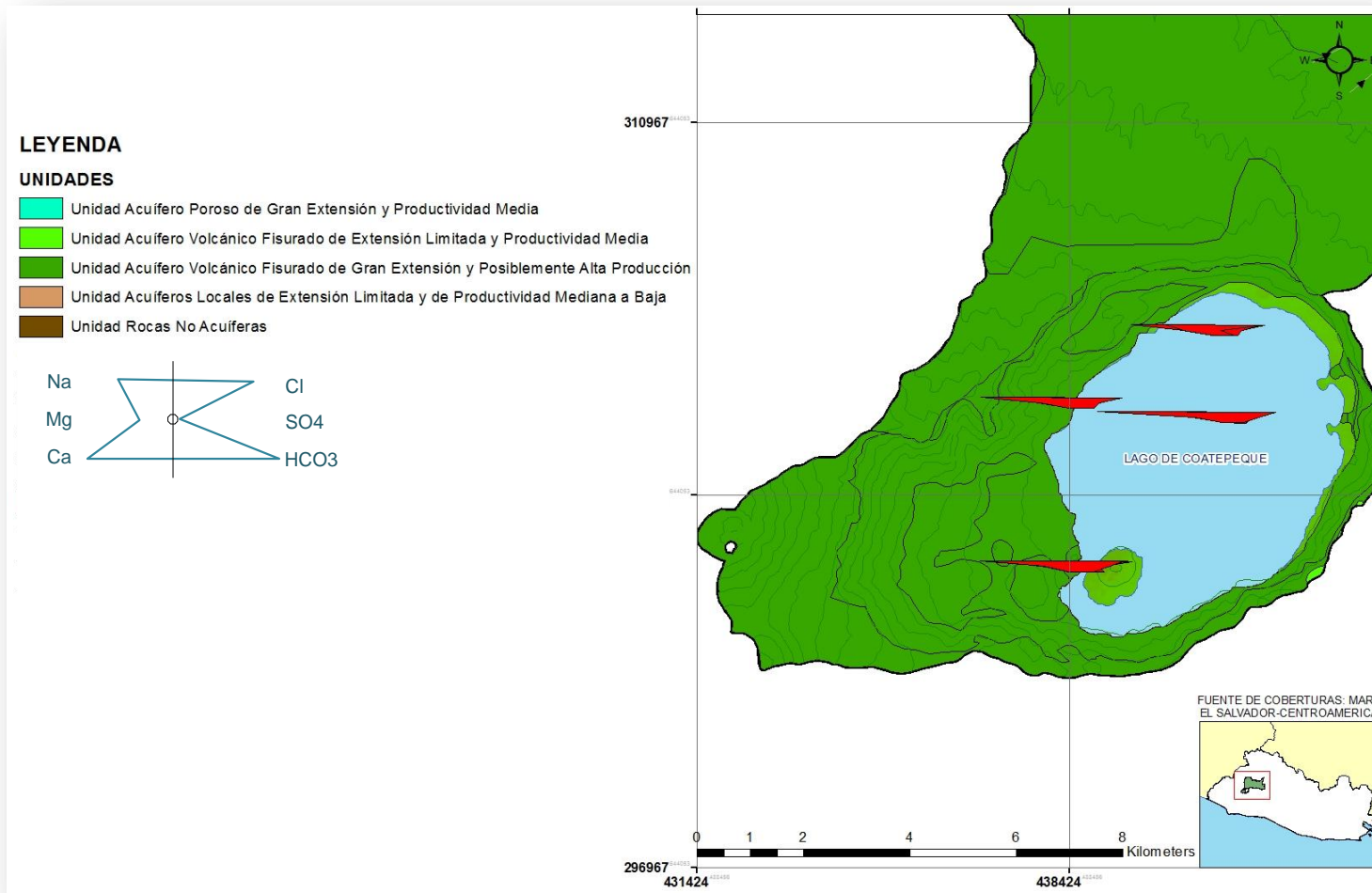
Mapa 17 Diagramas de Stiff en el área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN- ANDA y propios.



Mapa 18 Diagramas de Stiff en Acuífero de Santa Ana

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN- ANDA y propios.



Mapa 19 Diagramas de Stiff en área de recarga (Lago de Coatepeque)

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN- ANDA y propios.

○ Diagrama de Piper

Es un diagrama triangular compuesto, constituido por dos triángulos equiláteros en los que se representa, respectivamente, la composición aniónica y catiónica del agua, y un campo central romboidal en que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Es necesario reducir las concentraciones a porcentajes y cada vértice representa el 100 % del componente (meq/l). En cada triángulo se representan tres aniones y tres cationes, o una mezcla de ambos.

La ubicación de las muestras en el romboide superior permite distinguir fácilmente 4 grupos que se detallan a continuación:

1. Las muestras de agua al ser ubicadas en la parte superior del romboide muestran un comportamiento Sulfatado y/o clorurado cálcico y/o magnésico.
2. En la región derecha del romboide muestran un comportamiento clorurado y/o sulfatado sódico.
3. En la región izquierda del romboide muestran un comportamiento bicarbonatado cálcico y/o magnésico.
4. En la región inferior un comportamiento bicarbonatado sódico.

Para el presente caso en estudio, en la Figura 58 se muestra el diagrama de Piper de la base de datos geoquímica del área geográfica de interés, de la cual se puede observar que la mayoría de las muestras tienen un comportamiento Bicarbonatado Magnésico (Región izquierda del romboide), sin embargo hay algunas muestras particularmente las de la zona de recarga que presentan un comportamiento Clorurado-Sódico- Sulfatado (Región derecha del romboide). También hay una muestra (SA-25) que presenta un comportamiento más bicarbonatado-sódico que se encuentra localizado en el acuífero poroso de mediana productividad al oeste de la ciudad de Santa Ana.



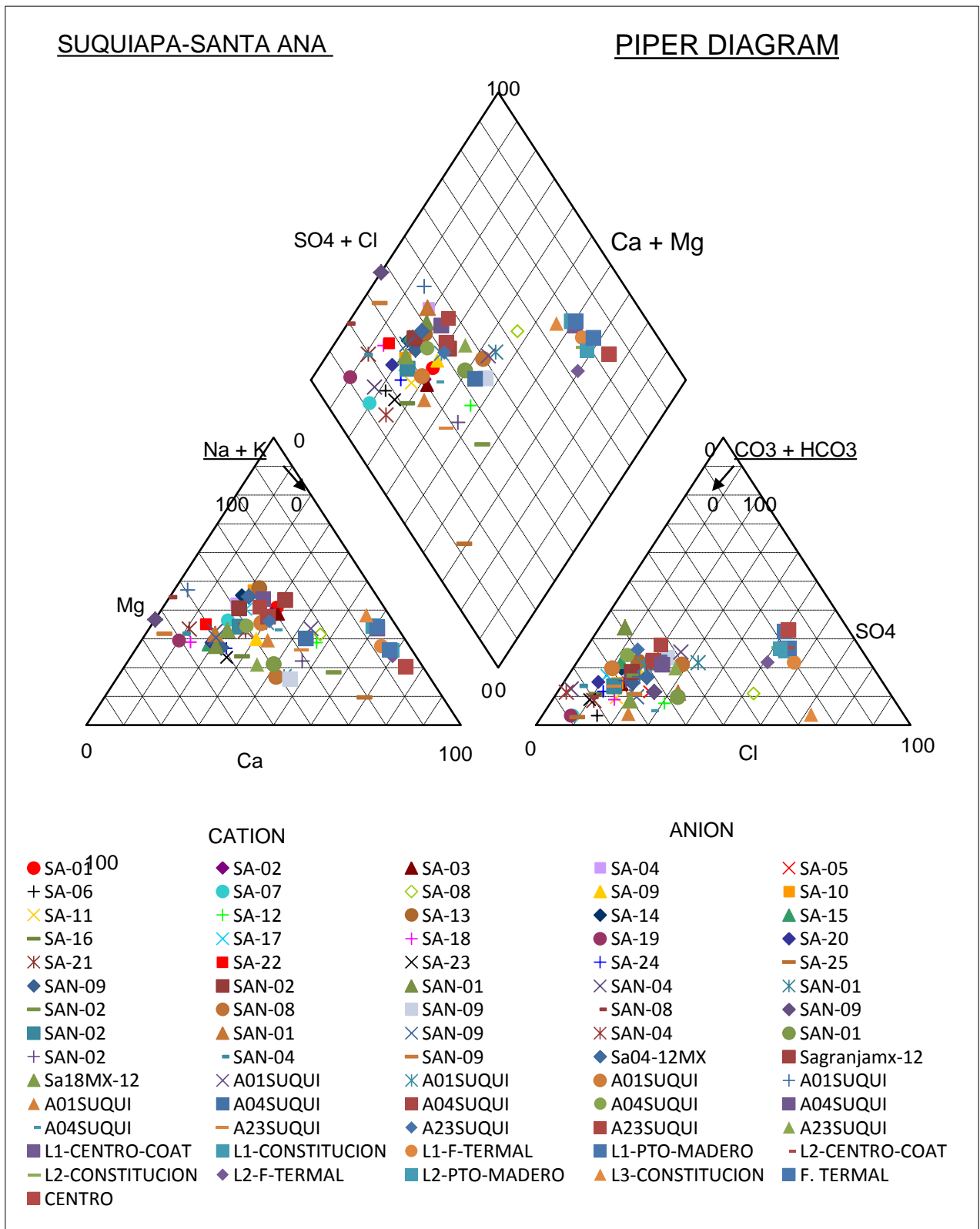


Figura 58 Diagrama de Piper de Base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia con software EasyQuim. Datos: MARN- ANDA y propios.

- Diagrama de Schöeller

El diagrama de Schöeller es un gráfico de series en el que las columnas o eje “Y” son escalas logarítmicas del mismo módulo y en el eje de las “X” se emplean concentraciones absolutas en meq/L. En la Figura 59 se muestra el diagrama de Schöeller de la base de datos geoquímica del área geográfica de interés, y se evidencia que los componentes mayoritarios en la base de datos son sodios, bicarbonatos y calcio (Grupos marcados como A, B y C sobre el gráfico).

En el grupo A se localizan las muestras del Lago de Coatepeque con altos contenidos de sodio, cloruro y magnesio, en el grupo D hay algunas muestras de agua que presentan bajos valores de sulfatos (como los pozos SA-25 y SA-06, y otros pozos generalmente profundos), en el grupo E se agrupan muestras con bajos contenidos de cloruros (como el SAN-04 y SA-20), El grupo F con bajo contenido de Sodio (como SAN-04 y SAN-09)

- Gráfico de dispersión de Cloro vs Boro

En la Figura 60 se muestra el gráfico de dispersión de Cloro vs Boro de la base de datos geoquímica, en él se evidencia alineación y proporcionalidad directa lo cual indica que en general las aguas del acuífero de Santa Ana poseen una conexión con las aguas del lago de Coatepeque y que como en todos los estudios precedentes se establece que el origen de dichas aguas es volcánico y constituyen la recarga del sistema, Puede observarse que la relación o proporción de Cloro/Boro (Que son elementos químicos conservativos) se mantiene aunque las cantidades de constituyentes van disminuyendo debido a mezclas y o diluciones con agua superficial o por agua lluvia en cuanto se avanza hacia latitudes norte.



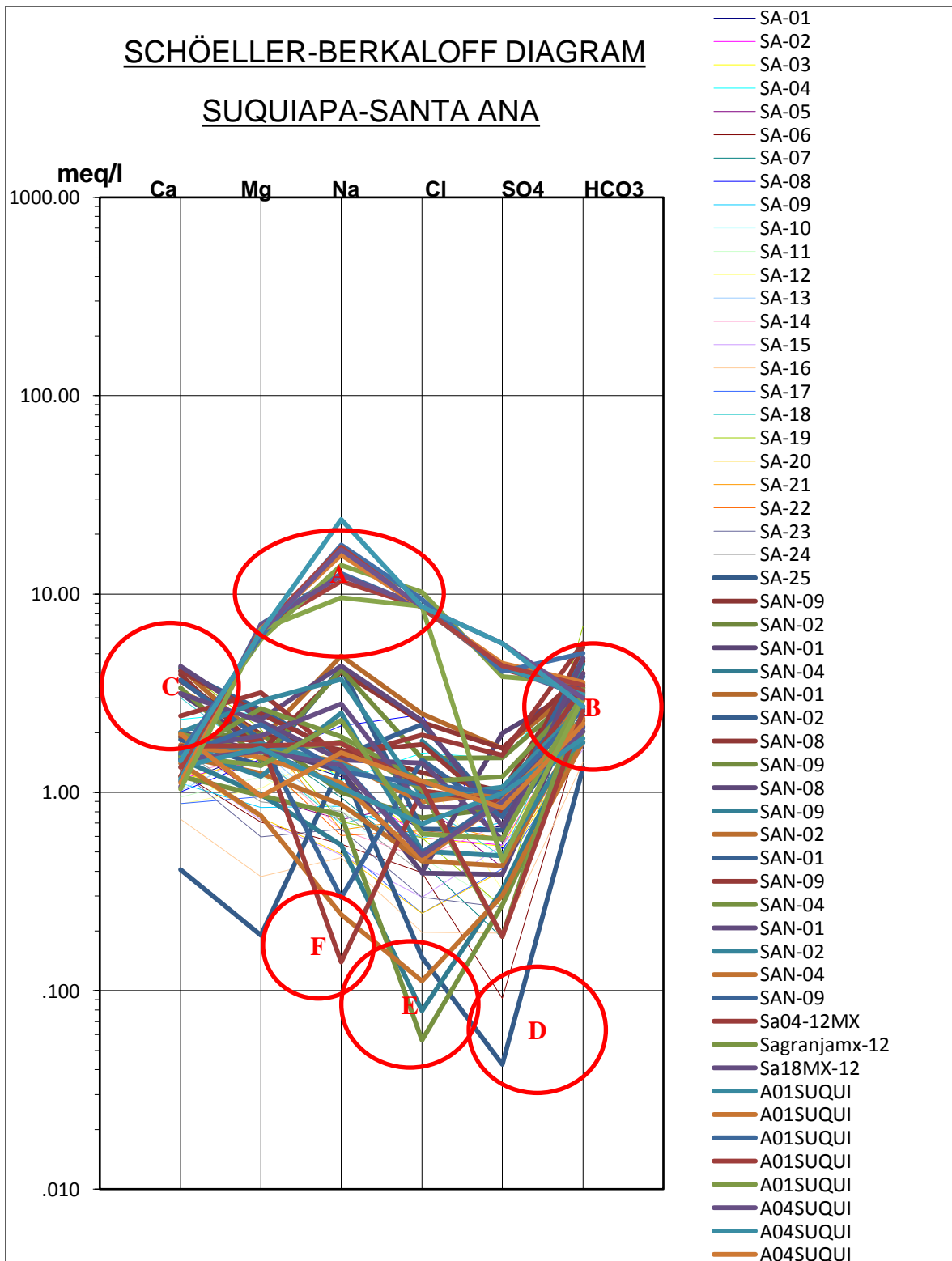


Figura 59 Diagrama de Schoeller de la base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia con software EasyQuim. Datos: MARN- ANDA y propios.

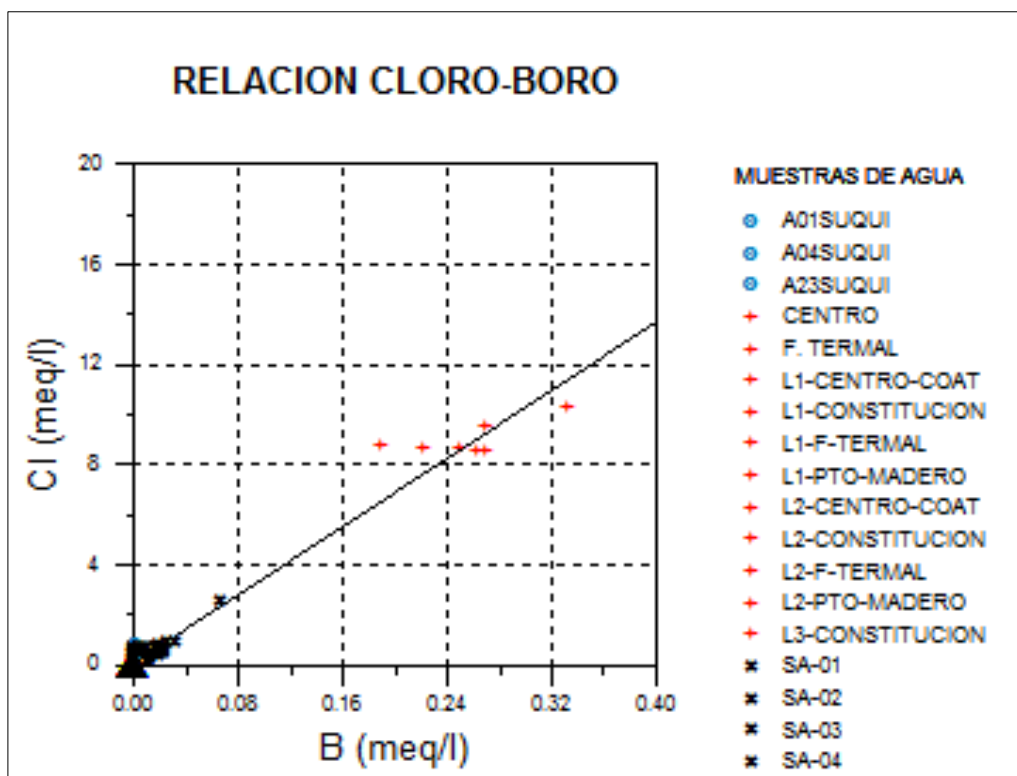


Figura 60 Gráfico de dispersión de Cloro vs Boro de la base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia con software AquaChem. Datos: MARN- ANDA y propios.

Las figuras mostradas desde la 58 a la 60 han conllevado un análisis global de toda la base de datos geoquímica de esta investigación, a diferencia de las figuras 61 a la 65, que se presentarán algunos análisis geoquímicos individuales de pozos. En la Tabla 13 se ha consolidado la evolución de los pozos SAN-01, SAN-02, SAN-04 y SAN-09.

Tabla 13 Especies químicas mayoritarias de pozos y evolución temporal.

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN.

AÑO	ESPECIE (meq/L)	SAN-01	SAN-02	SAN-04	SAN-09
2005	Na <sup>+</sup>	3.5848	1.9935	0.7083	1.7148
2005	Ca <sup>2+</sup>	4.1966	1.5988	1.2989	3.9835
2005	Mg <sup>2+</sup>	2.4574	1.2193	0.8597	2.2509
2005	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.7235	0.4528	0.2863	0.7843

AÑO	ESPECIE (meq/L)	SAN-01	SAN-02	SAN-04	SAN-09
2005	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3.8959	2.1975	1.9113	4.8540
2005	Cl <sup>-</sup>	2.2496	0.4781	0.0843	1.6753
2006	Na <sup>+</sup>	5.5000	4.7217	4.5870	4.8348
2006	Ca <sup>2+</sup>	4.2365	1.8383	1.5190	3.3573
2006	Mg <sup>2+</sup>	1.8379	1.3583	0.4796	1.4389
2006	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.6656	0.6454	0.6350	1.4887
2006	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3.5184	2.4476	1.8358	3.3655
2006	Cl <sup>-</sup>	2.4942	0.6533	1.2471	1.4846
2012	Na <sup>+</sup>	1.6217	1.2683	0.6609	1.9030
2012	Ca <sup>2+</sup>	3.1457	1.8867	1.4711	3.6372
2012	Mg <sup>2+</sup>	1.6783	1.9704	0.9708	1.9457
2012	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.9827	0.8359	0.3231	1.0096
2012	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3.4447	2.9505	2.1526	4.5722
2012	Cl <sup>-</sup>	0.3961	0.7458	0.0793	1.2606

De la Tabla 12 se han obtenido las gráficas de las figuras 61, 62 y 63 correspondientes a los años 2005, 2006 y 2012 respectivamente y se observa consistencia temporal sin embargo en el 2006 (año climatológico afectado por el fenómeno del Niño) con disminución de bicarbonatos.

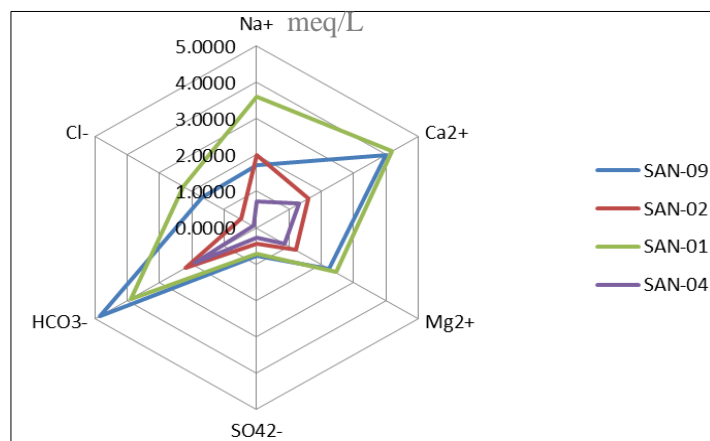


Figura 61 Especies químicas mayoritarias de 4 pozos, año 2005

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN.

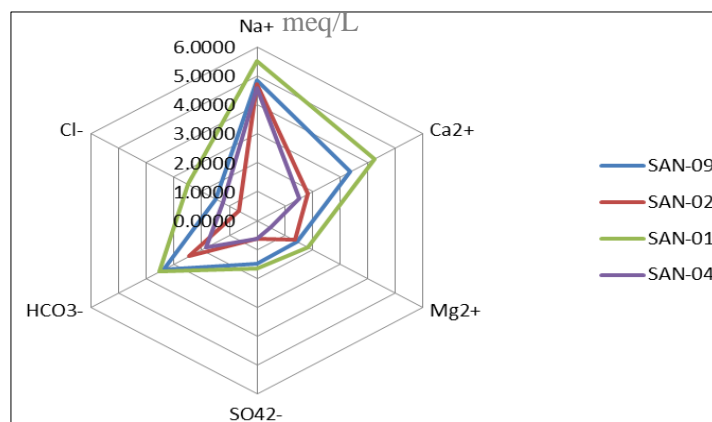


Figura 62 Especies químicas mayoritarias de 4 pozos, año 2006

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN.

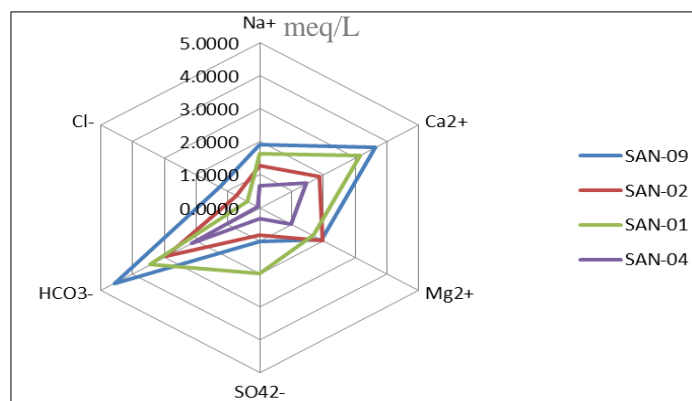


Figura 63 Especies químicas mayoritarias de 4 pozos, año 2012

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN.

Otros ejemplos de diagramas hidrogeoquímicos individuales se presentan en las figuras 64, 65 y 66, en ellos se evidencian características propias de las muestras, por ejemplo los altos contenidos de cloro y sodio en las muestras de origen volcánico.

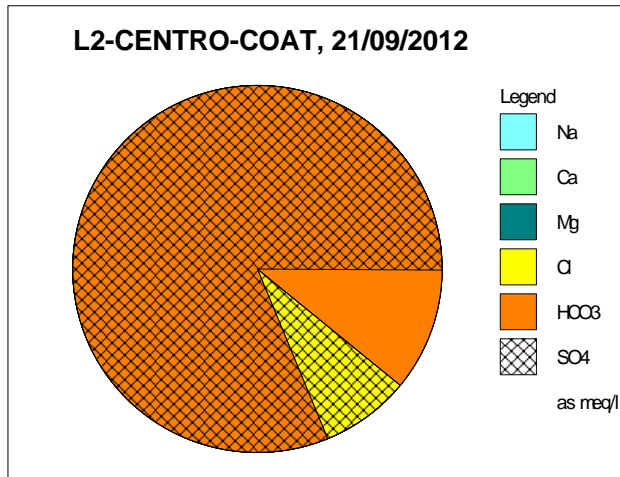


Figura 64 Ejemplo de gráfico circular de composición de especies mayoritarias del sitio: Centro del Lago de Coatepeque

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN.

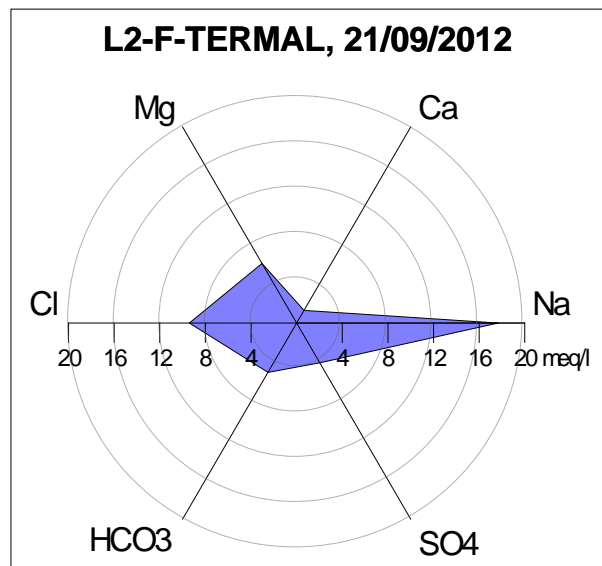


Figura 65 Ejemplo de gráfico radial de composición de especies mayoritarias del sitio: Fuente termal del Lago de Coatepeque

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN.

Así también la figura 66, nos muestra características particulares de 2 pozos en donde se muestra claramente que el contenido de bicarbonatos en dichas muestras es mayoritario.

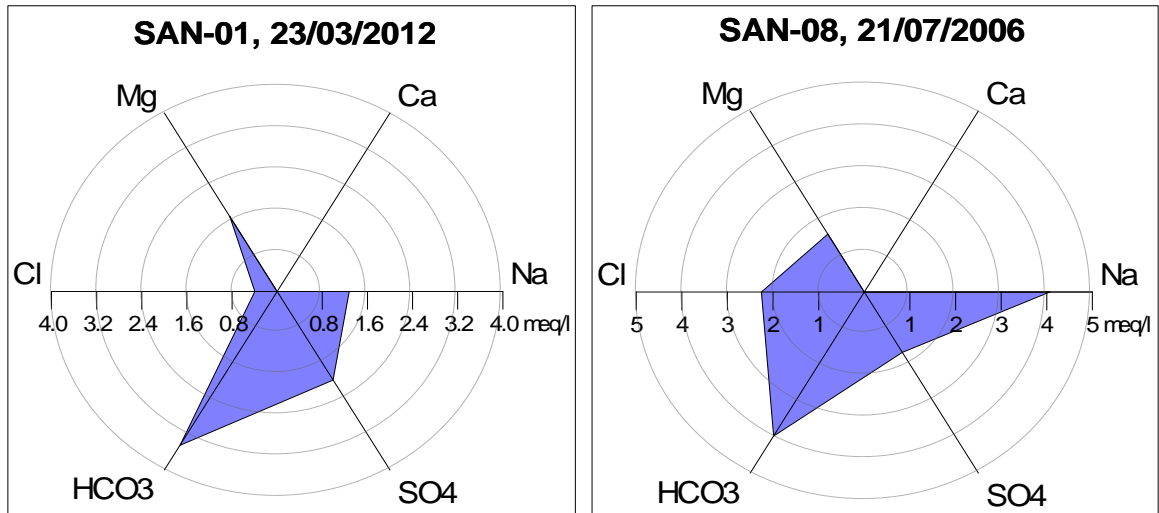


Figura 66 Ejemplos de gráficos radiales de composición de especies mayoritarias en pozos del acuífero de Santa Ana

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN.

Finalmente en la figura 67 se presenta un gráfico de Box Plot global de las muestras de aguas, en cuanto a sus componentes mayoritarios.

En general podemos observar que los datos tienen una tendencia central no sesgada, para cada componente se visualiza su valor mínimo, percentil 25, mediana, percentil 75 y máximo, no se observan valores outliers. Y se puede apreciar gráficamente los rangos de variación de cada parámetro.

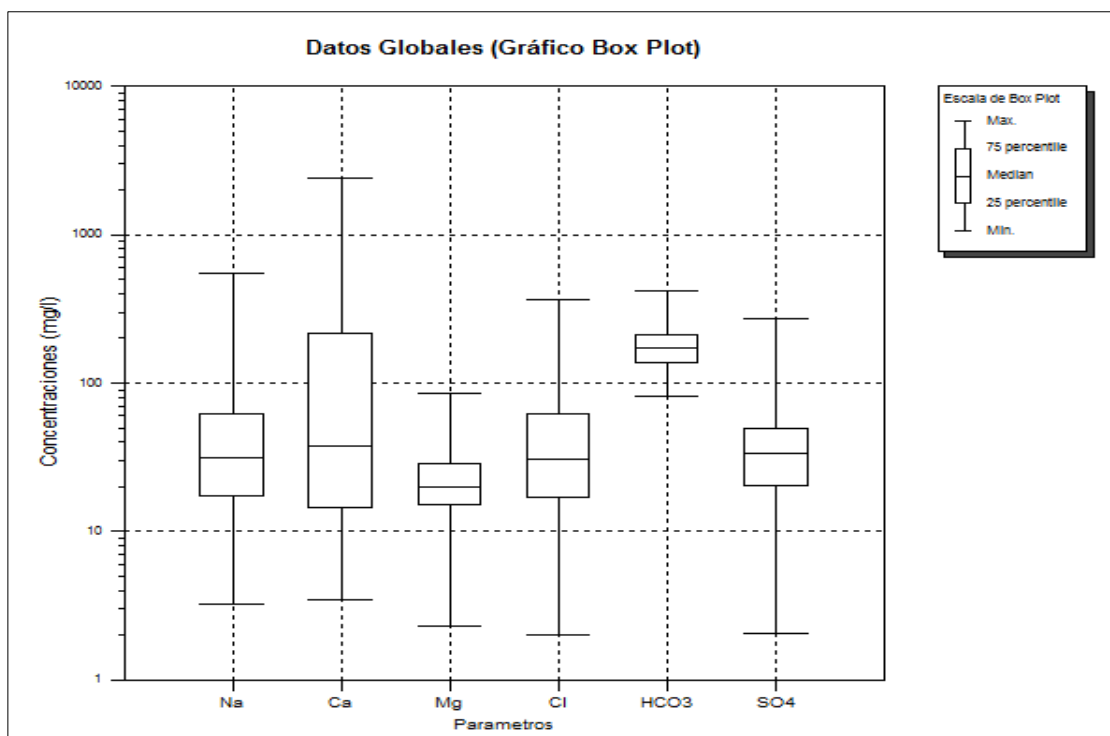


Figura 67 Gráfico box plot de datos globales

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN y propios.

### 3.5. EVALUACIÓN DE LA ESPECIACIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS.

En este apartado se presentan las reacciones termodinámicamente posibles y las especies propias de cada sitio.

#### 3.5.1. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS ESPECIES QUÍMICAS TERMODINÁMICAMENTE CONSISTENTES EN LA ZONA EN ESTUDIO.

Para este estudio se utilizó software especializado de equilibrio químico y especiación, MINEQL4.6. Previo a introducir la información, se creó una base de datos en unidades químicas de mmol/L (milimoles por litro) y luego se ingresaron los valores de concentraciones químicas de las especies totales; se crearon listados de minerales termodinámicamente estables (Ver en la Tabla 14 las reacciones de formación utilizadas

por el software MINEQL 4.6 para la estimación de especies químicas en equilibrio químico presentes en el área geográfica de interés) y en la sección de análisis de resultados se presentan gráficas por componente mayoritario.

### **3.5.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

El desarrollo de éste análisis, permite entre otras cosas:

1. Determinar la concentración de especies concretas en el agua, por ejemplo: la toxicidad de muchos metales va ligada a la concentración de una especie química concreta del mismo, no a su concentración total (caso del  $Al^{3+}$ ).
2. Determinar el estado de saturación de los minerales disueltos en un agua: informa sobre los minerales que ha disuelto esa agua, es decir, a través de qué terreno ha circulado.
3. Entender los factores que controlan la concentración de una especie química en un agua, por ejemplo: conocer qué efecto provoca un cambio del pH, de la temperatura o del contenido en  $Cl^-$  sobre la concentración de cierto metal traza.

#### **3.5.2.1 REACCIONES DE FORMACIÓN DE LAS ESPECIES EN EQUILIBRIO QUÍMICO DE FASE SÓLIDA EN EL ACUÍFERO DE SANTA ANA.**

Todas las especies químicas calculadas termodinámicamente a partir de las concentraciones totales y condiciones ingresadas al software MINEQL 4.6 de la base de datos geoquímica en el área geográfica de interés se presentan desde la figura 68 hasta la figura 86, ordenadas por ión total; y en la Tabla 7 se muestran los minerales estimados por especiación química en los sitios de muestreo del área geográfica de interés.

Las reacciones químicas de equilibrio que se presentan a continuación fueron estimadas termodinámicamente haciendo uso del software MINEQL 4.6, por lo cual se aclara que las especies en fase sólida se presentan en inglés.



Tabla 14 Reacciones de formación utilizadas por el software MINEQL 4.6 para la estimación de especies químicas en equilibrio químico presentes en el área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, a través del software MINEQL 4.6

FASE SÓLIDA	REACCION DE FORMACION
LIME	$H_2O + Ca^{(2+)} = 2H^{(+)} + CaO$
PORTLANDITE	$2H_2O + Ca^{(2+)} = 2H^{(+)} + Ca(OH)_2$
HYDROXYLAPATITE	$H_2O + 5Ca^{(2+)} + 3PO_4^{(3-)} = H^{(+)} + Ca_5OH(PO_4)_3$
GYPSUM	$2H_2O + Ca^{(2+)} + SO_4^{(2-)} = CaSO_4 \cdot 2H_2O$
ARAGONITE	$Ca^{(2+)} + CO_3^{(2-)} = CaCO_3$
CALCITE	$Ca^{(2+)} + CO_3^{(2-)} = CaCO_3$
HUNTITE	$Ca^{(2+)} + 4CO_3^{(2-)} + 3Mg^{(2+)} = CaMg_3(CO_3)_4$
DOLOMITE	$Ca^{(2+)} + 2CO_3^{(2-)} + Mg^{(2+)} = CaMg(CO_3)_2$
ANHYDRITE	$Ca^{(2+)} + SO_4^{(2-)} = CaSO_4$
LAURIONITE	$H_2O + Cl^{(-)} + Pb^{(2+)} = H^{(+)} + PbOHCl$
PHOSGENITE	$2Cl^{(-)} + CO_3^{(2-)} + 2Pb^{(2+)} = Pb_2CO_3Cl_2$
ARTINITE	$5H_2O + CO_3^{(2-)} + 2Mg^{(2+)} = 2H^{(+)} + Mg_2(OH)_2CO_3$
HYDROMAGNESITE	$6H_2O + 4CO_3^{(2-)} + 5Mg^{(2+)} = 2H^{(+)} + Mg_5(OH)_2(CO_3)_4 \cdot 4H_2O$
HYDROCERRUSITE	$2H_2O + 2CO_3^{(2-)} + 3Pb^{(2+)} = 2H^{(+)} + Pb_3(OH)_2(CO_3)_2$
NESQUEHONITE	$3H_2O + CO_3^{(2-)} + Mg^{(2+)} = MgCO_3 \cdot 3H_2O$
THERMONATRITE	$H_2O + CO_3^{(2-)} + 2Na^{(+)} = Na_2CO_3 \cdot H_2O$
NATRON	$10H_2O + CO_3^{(2-)} + 2Na^{(+)} = Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$
SIDERITE	$CO_3^{(2-)} + Fe^{(2+)} = FeCO_3$
MAGNESITE	$CO_3^{(2-)} + Mg^{(2+)} = MgCO_3$
CERRUSITE	$CO_3^{(2-)} + Pb^{(2+)} = PbCO_3$
WUSTITE	$H_2O + 0.95Fe^{(2+)} = 2H^{(+)} + (Fe_{0.95})O$
GREENALITE	$H_2O + 3Fe^{(2+)} + 2Si(OH)_4 = 6H^{(+)} + Fe_3Si_2(OH)_4O_5$
VIVIANITE	$8H_2O + 3Fe^{(2+)} + 2PO_4^{(3-)} = Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$
MELANTERITE	$7H_2O + Fe^{(2+)} + SO_4^{(2-)} = FeSO_4 \cdot 7H_2O$
PERICLASE	$H_2O + Mg^{(2+)} = 2H^{(+)} + MgO$

<b>FASE SÓLIDA</b>	<b>REACCION DE FORMACION</b>
BRUCITE	$2\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}^{(2+)} = 2\text{H}^{(+)} + \text{Mg}(\text{OH})_2$
BIXBYITE	$3\text{H}_2\text{O} + 2\text{Mn}^{(3+)} = 6\text{H}^{(+)} + \text{Mn}_2\text{O}_3$
MASSICOT	$\text{H}_2\text{O} + \text{Pb}^{(2+)} = 2\text{H}^{(+)} + \text{PbO}$
LITHARGE	$\text{H}_2\text{O} + \text{Pb}^{(2+)} = 2\text{H}^{(+)} + \text{PbO}$
HYDROXYLPYROMORPHITE	$\text{H}_2\text{O} + 5\text{Pb}^{(2+)} + 3\text{PO}_4^{(3-)} = \text{H}^{(+)} + \text{Pb}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$
LARNAKITE	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{Pb}^{(2+)} + \text{SO}_4^{(2-)} = 2\text{H}^{(+)} + \text{Pb}_2\text{OSO}_4$
EPSOMITE	$7\text{H}_2\text{O} + \text{Mg}^{(2+)} + \text{SO}_4^{(2-)} = \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
MIRABILITE	$10\text{H}_2\text{O} + 2\text{Na}^{(+)} + \text{SO}_4^{(2-)} = \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
CRISTOBALITE	$\text{Si}(\text{OH})_4 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$
CHALCEDONY	$\text{Si}(\text{OH})_4 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$
QUARTZ	$\text{Si}(\text{OH})_4 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$
THENARDITE	$2\text{Na}^{(+)} + \text{SO}_4^{(2-)} = \text{Na}_2\text{SO}_4$
ANGLESITE	$\text{Pb}^{(2+)} + \text{SO}_4^{(2-)} = \text{PbSO}_4$

Ver Anexo 4. Reporte de especiación química: Alcalinidad

### 3.5.2.2. ESPECIACIÓN QUÍMICA EN LOS SITIOS DE MUESTREO DEL ÁREA GEOGRÁFICA DE INTERÉS.

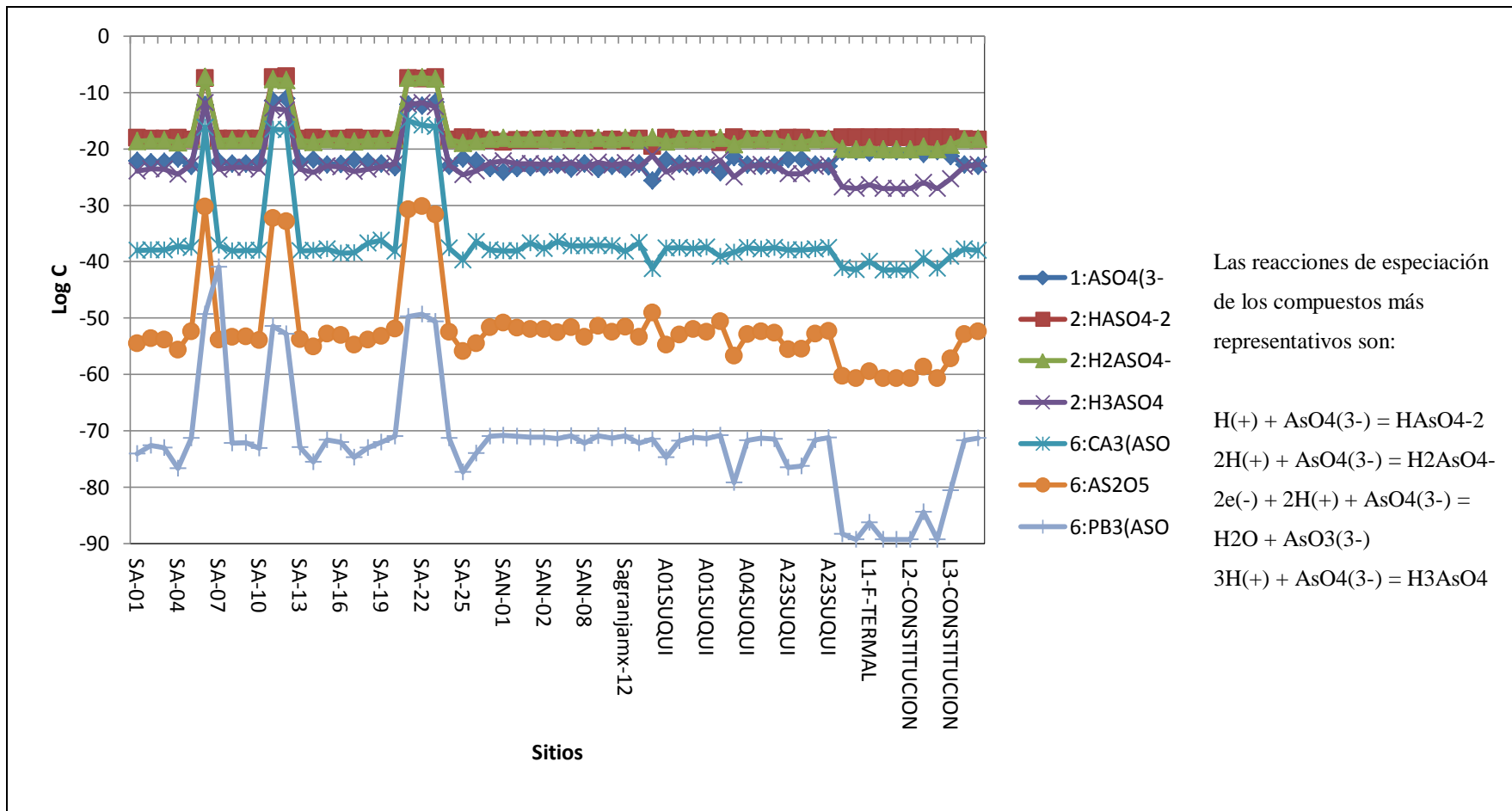


Figura 68 Especiación química de compuestos del arseniato [ $\text{AsO}_4^{3-}$ ] en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

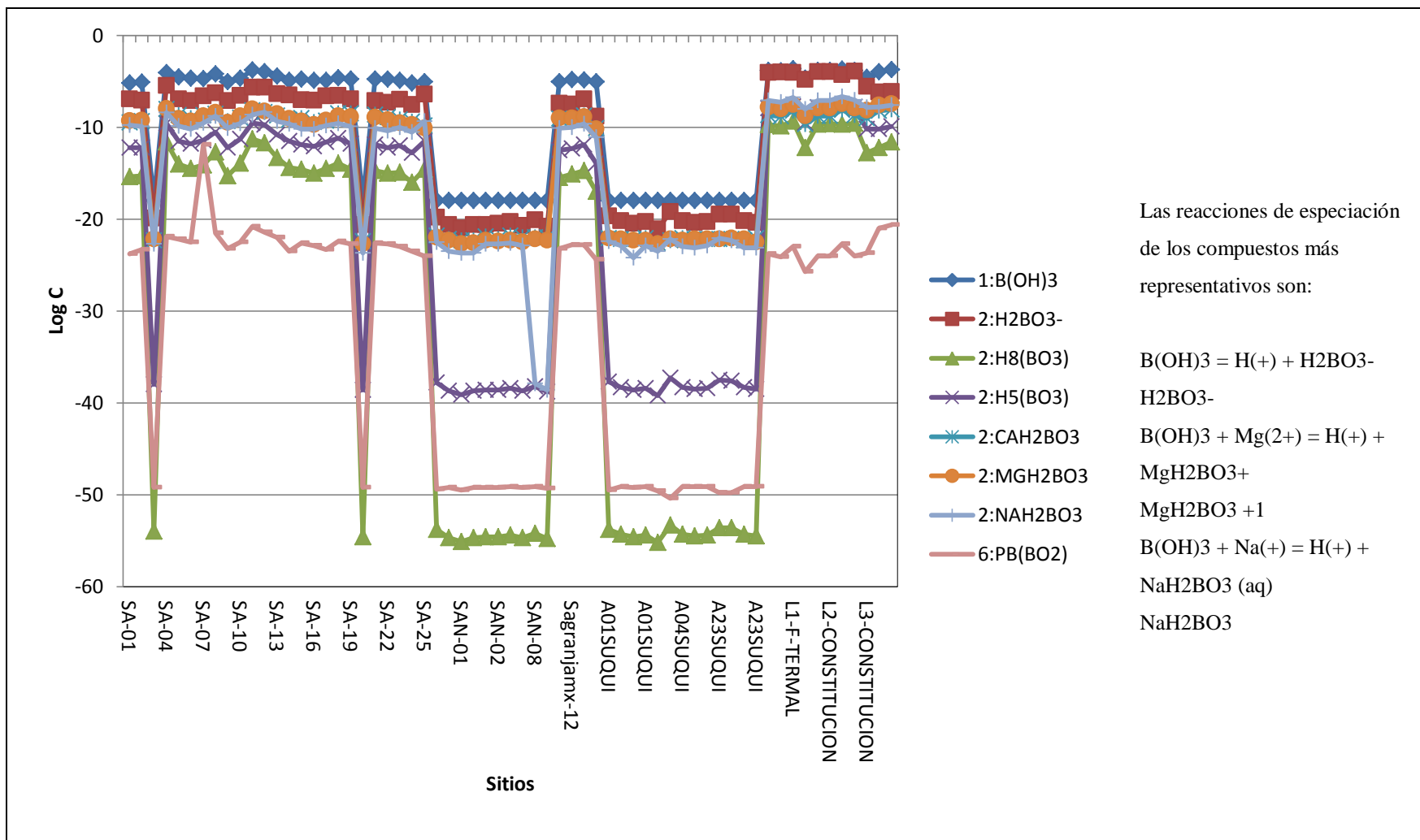


Figura 69 Especiación química de compuestos del Borato  $[B(OH)_3]$  en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

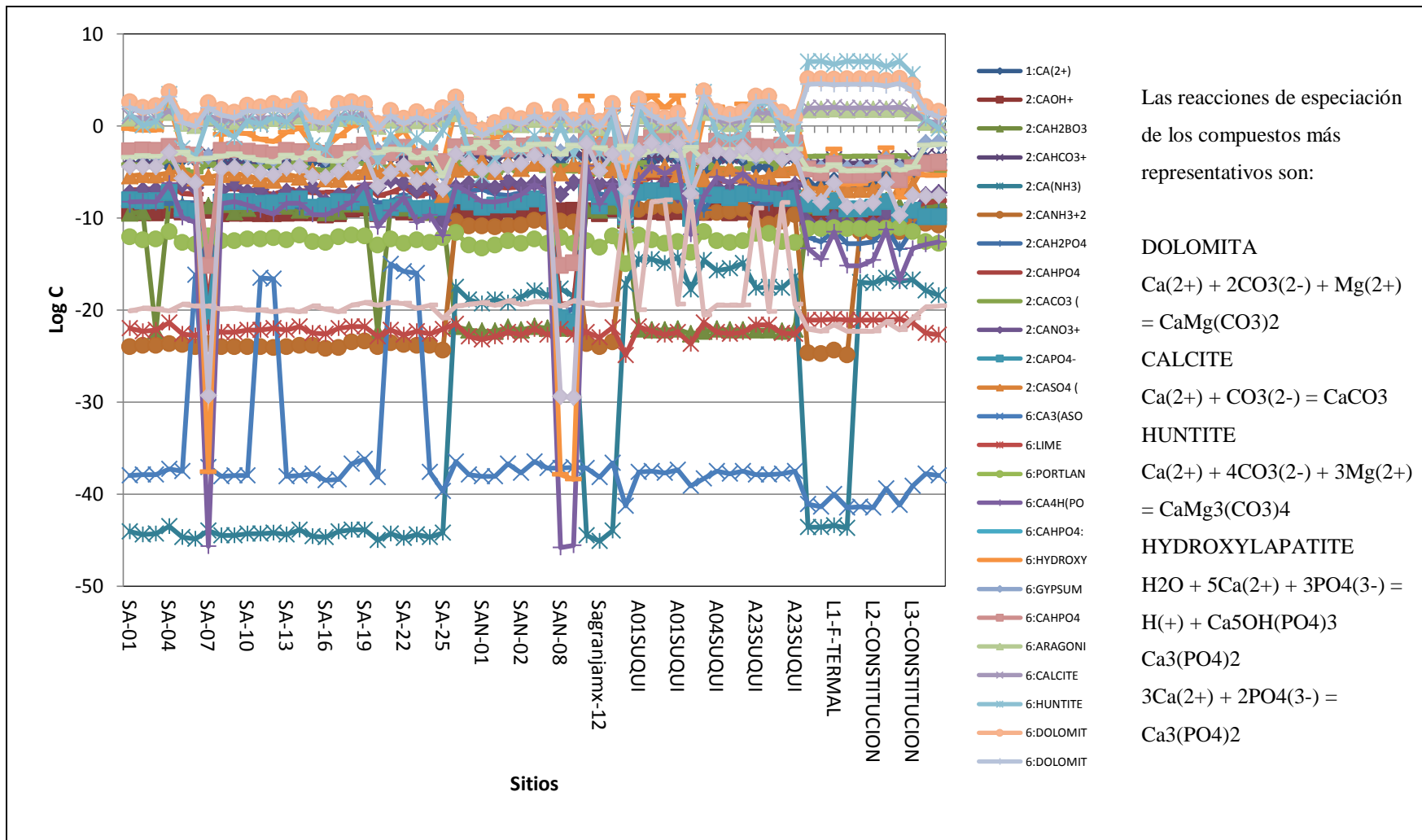


Figura 70 Especiación química de compuestos del Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

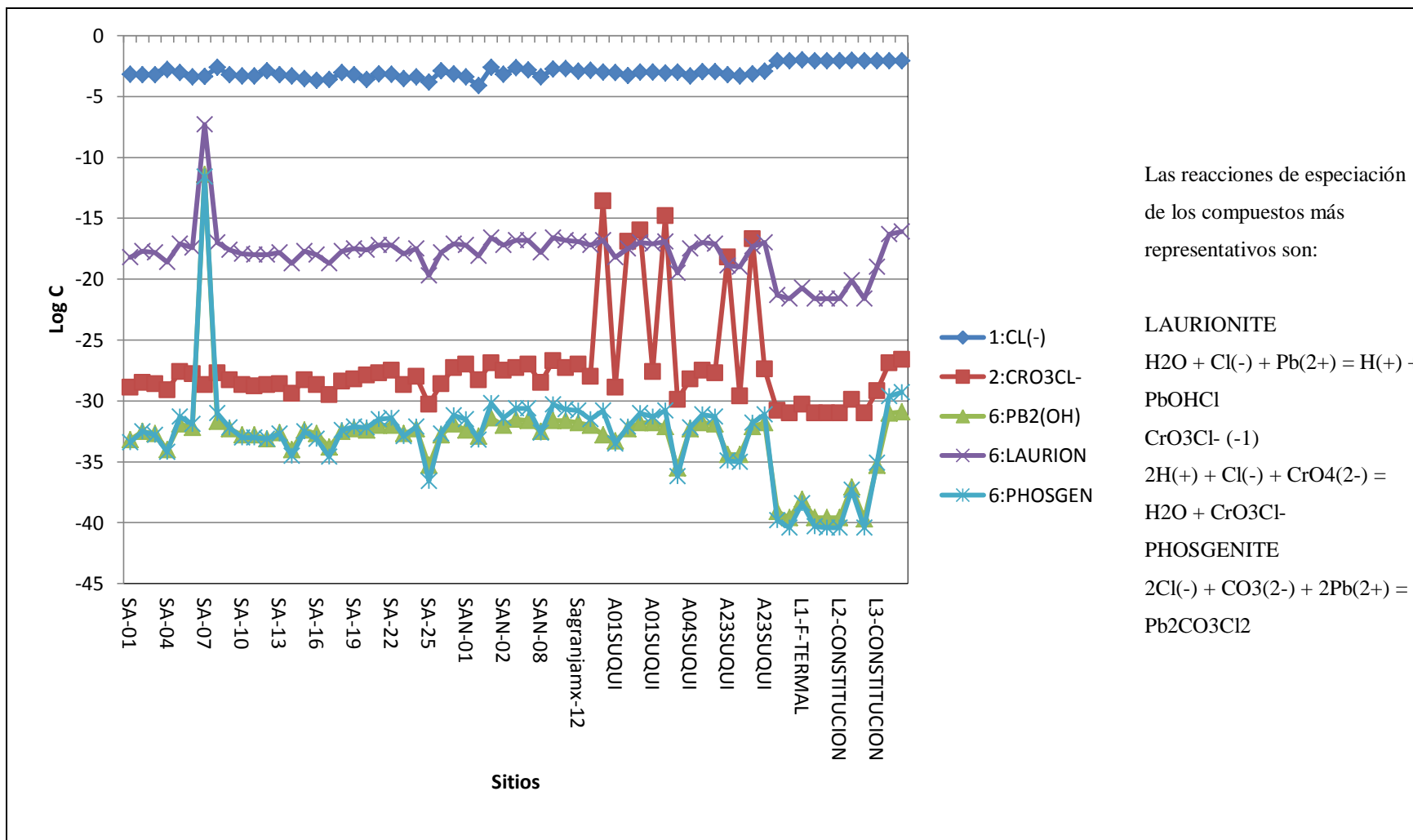


Figura 71 Especiación química de compuestos del Cloro (Cl<sup>-</sup>) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

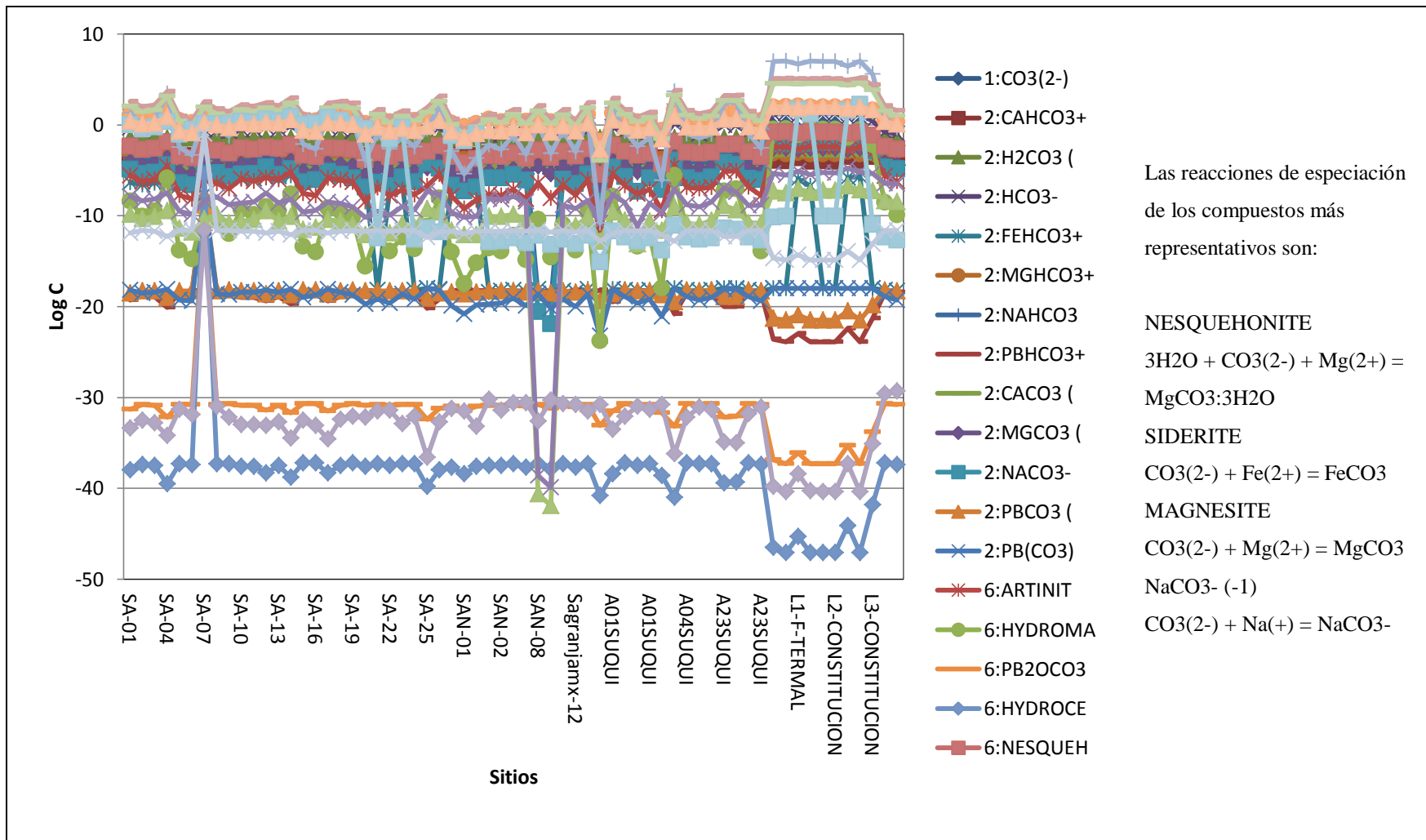


Figura 72 Especiación química de compuestos Carbonatados  $[\text{CO}_3^{2-}]$  en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

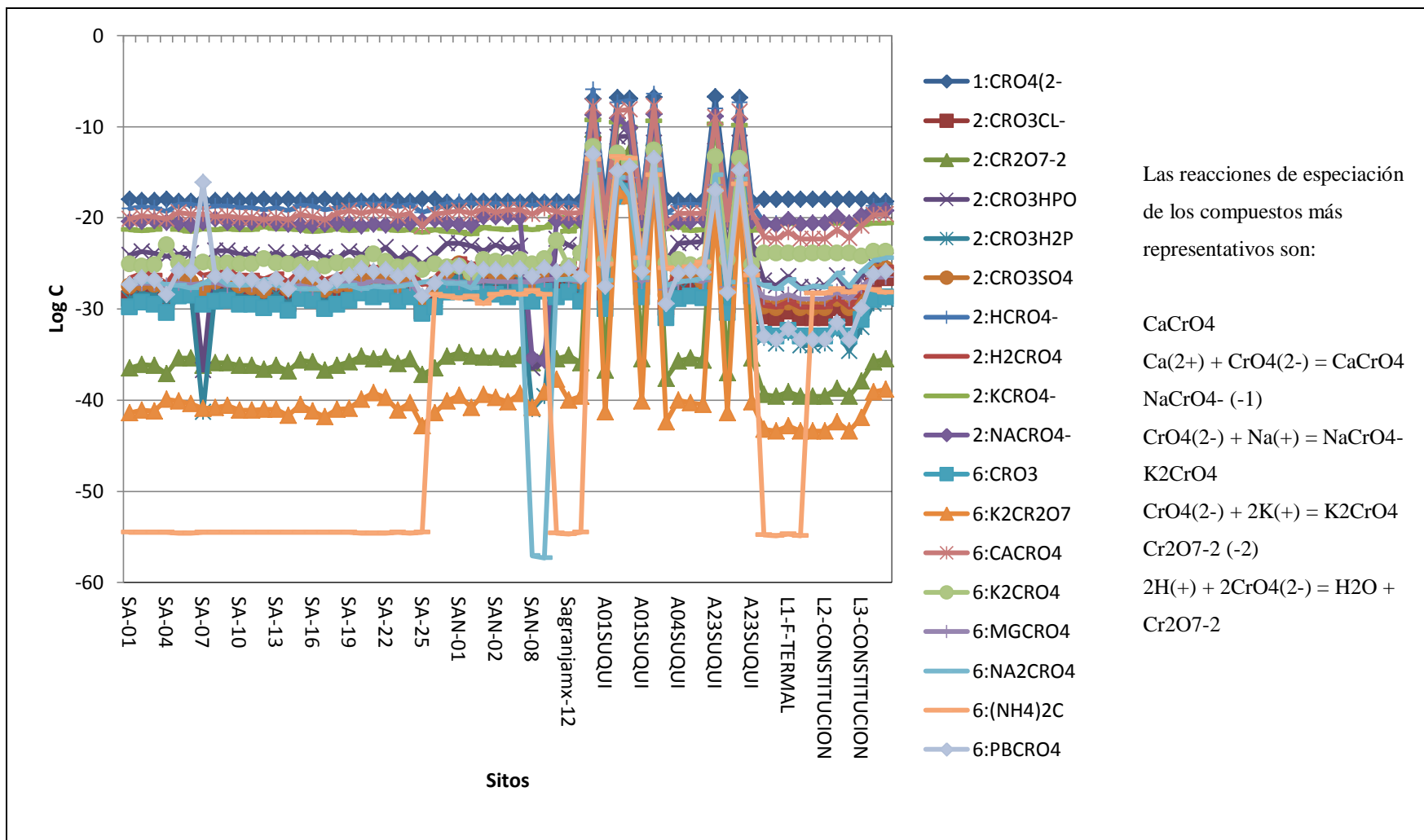


Figura 73 Especiación química de compuestos cromatados  $[\text{CrO}_4^{2-}]$  en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6



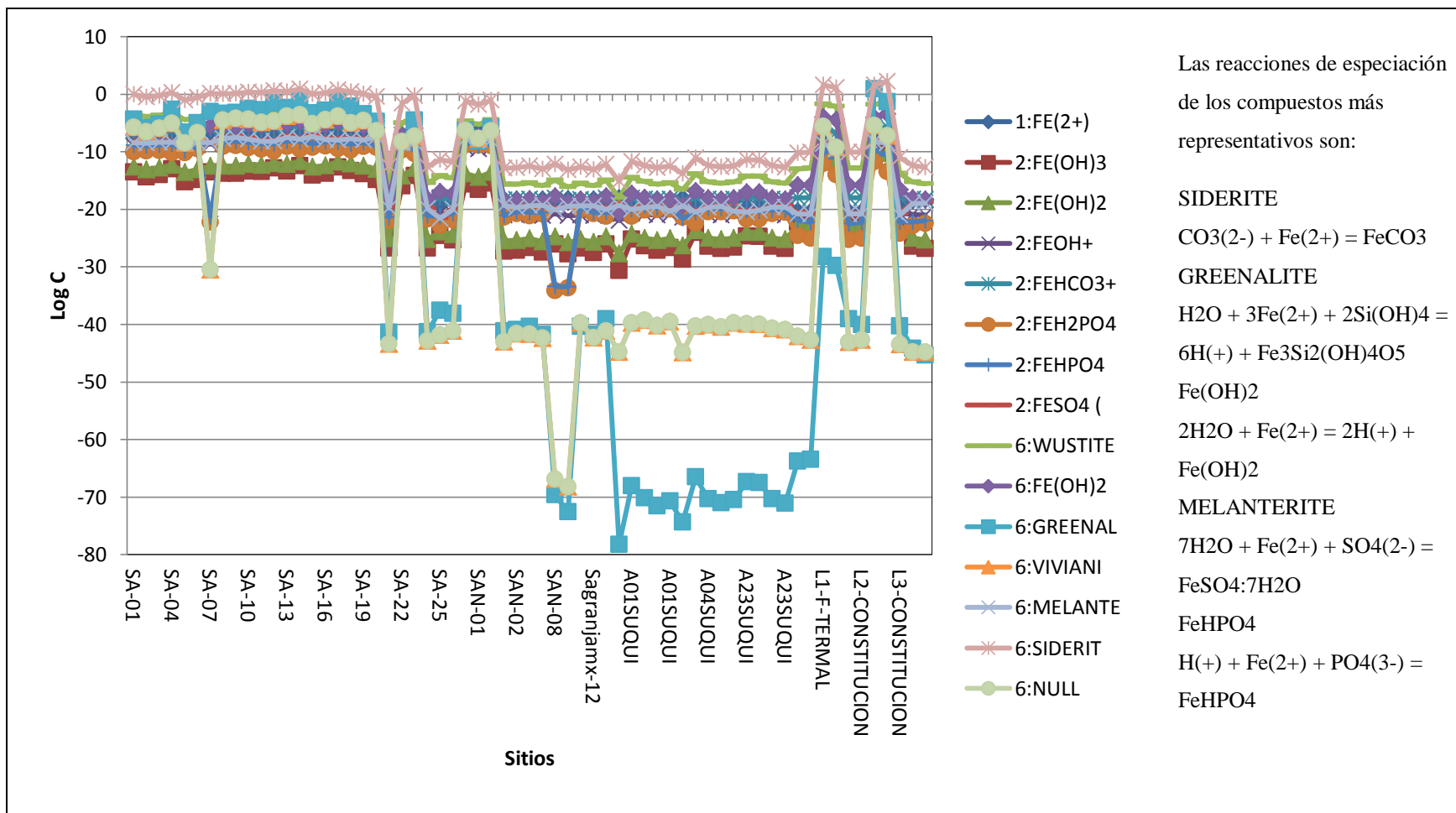


Figura 74 Especiación química de compuestos de Hierro II ( $\text{Fe}^{2+}$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

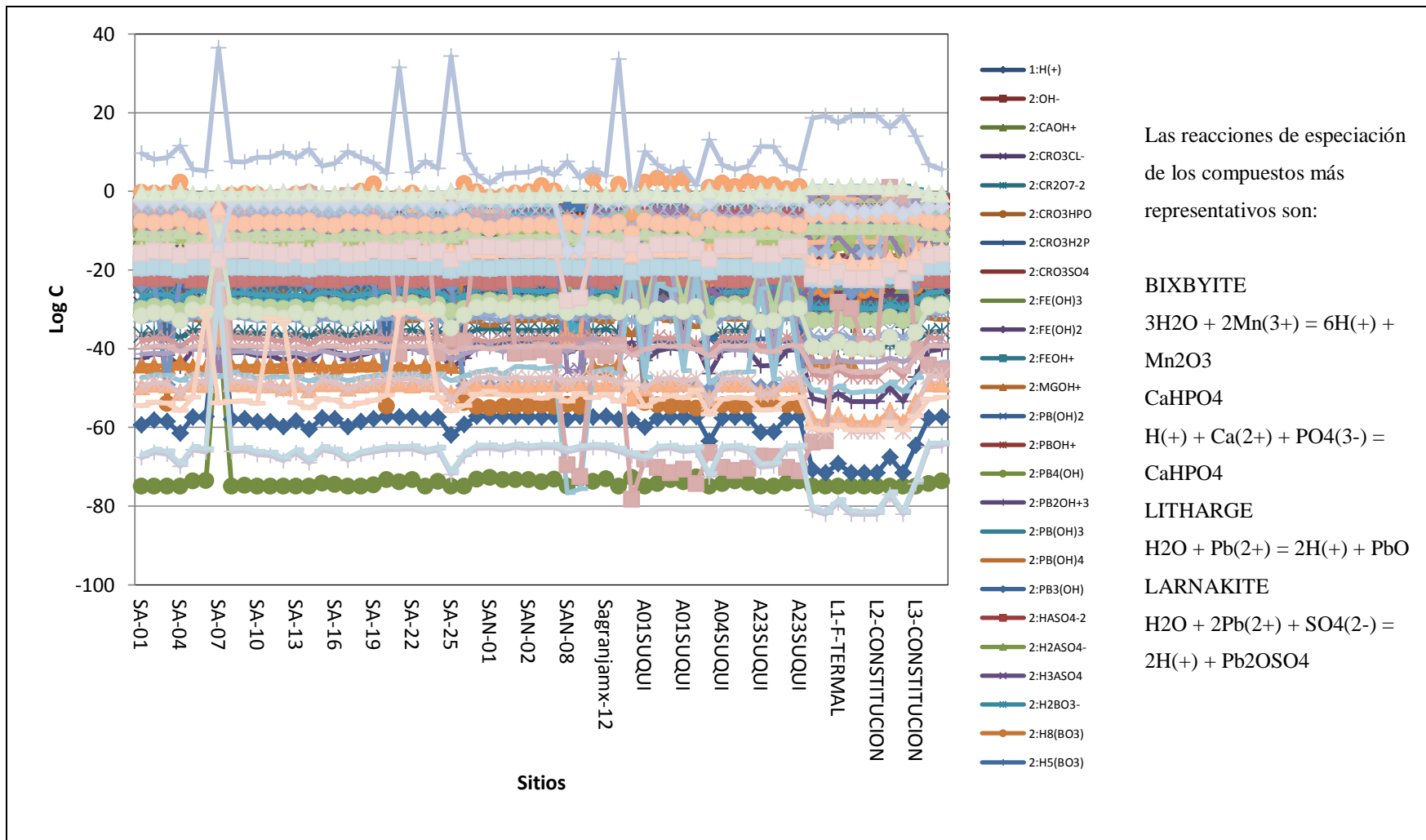


Figura 75 Especiación química de compuestos del ión Hidrón ( $\text{H}^+$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

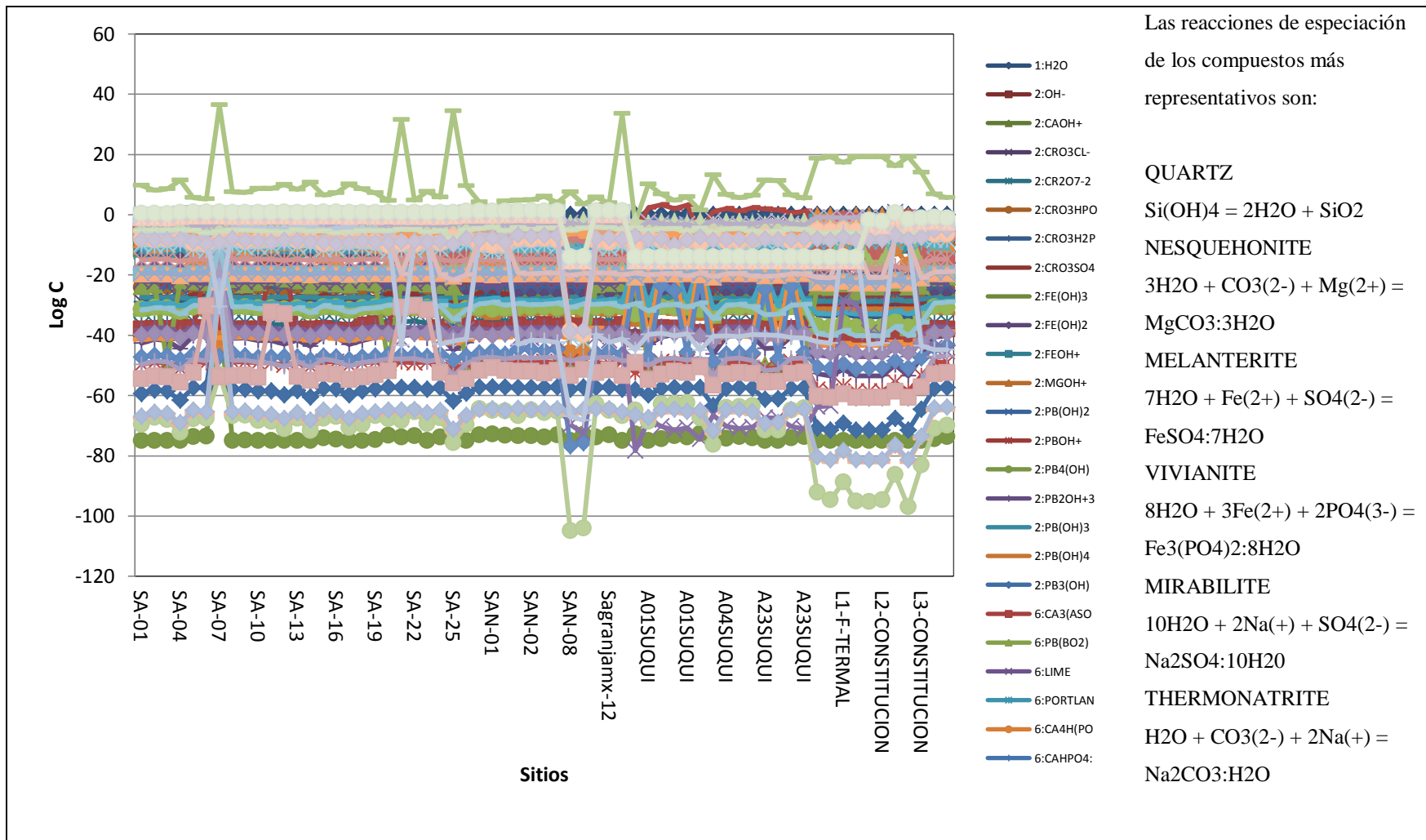


Figura 76 Especiación química de compuestos acuosos (H<sub>2</sub>O) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

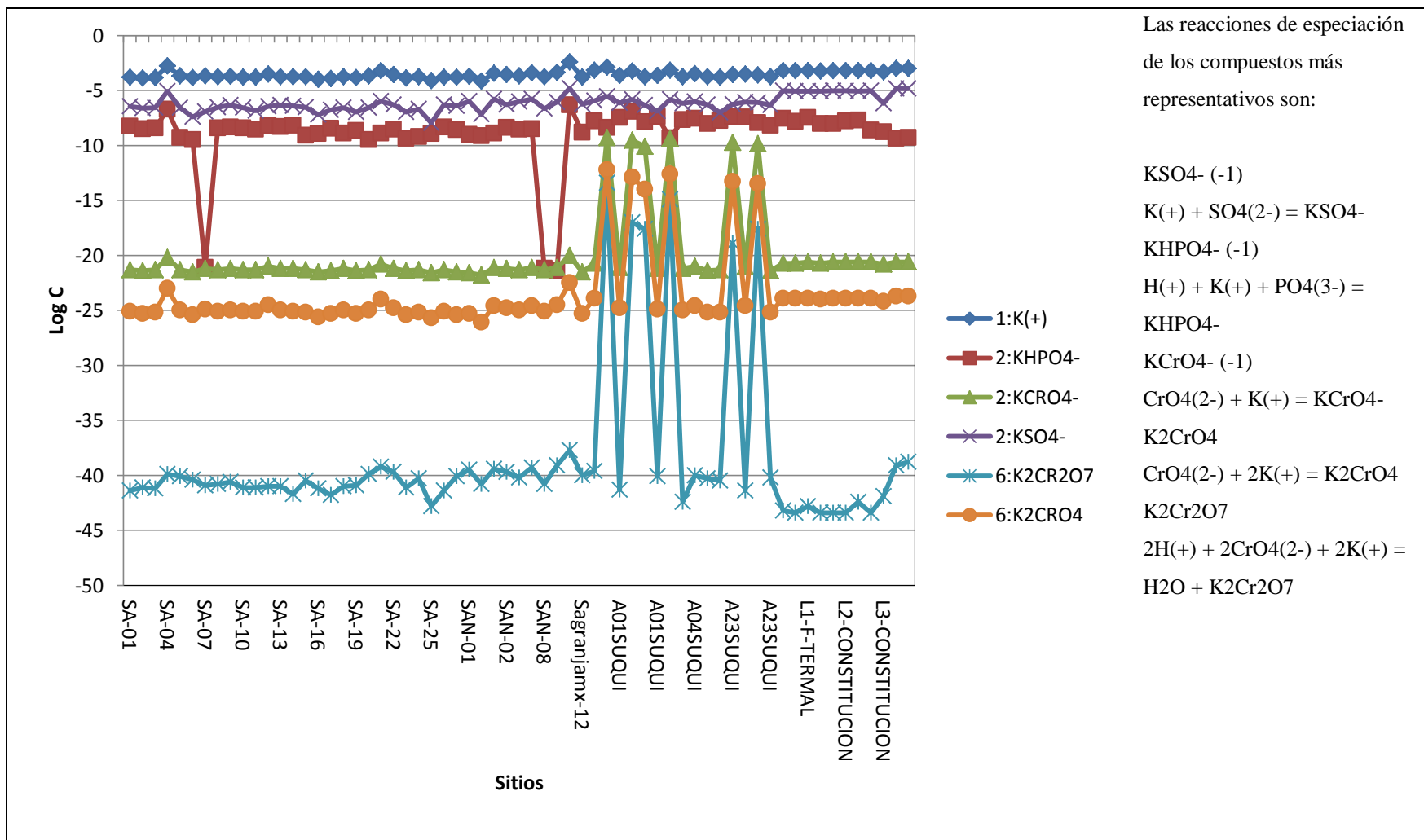


Figura 77 Especiación química de compuestos potásicos ( $\text{K}^+$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

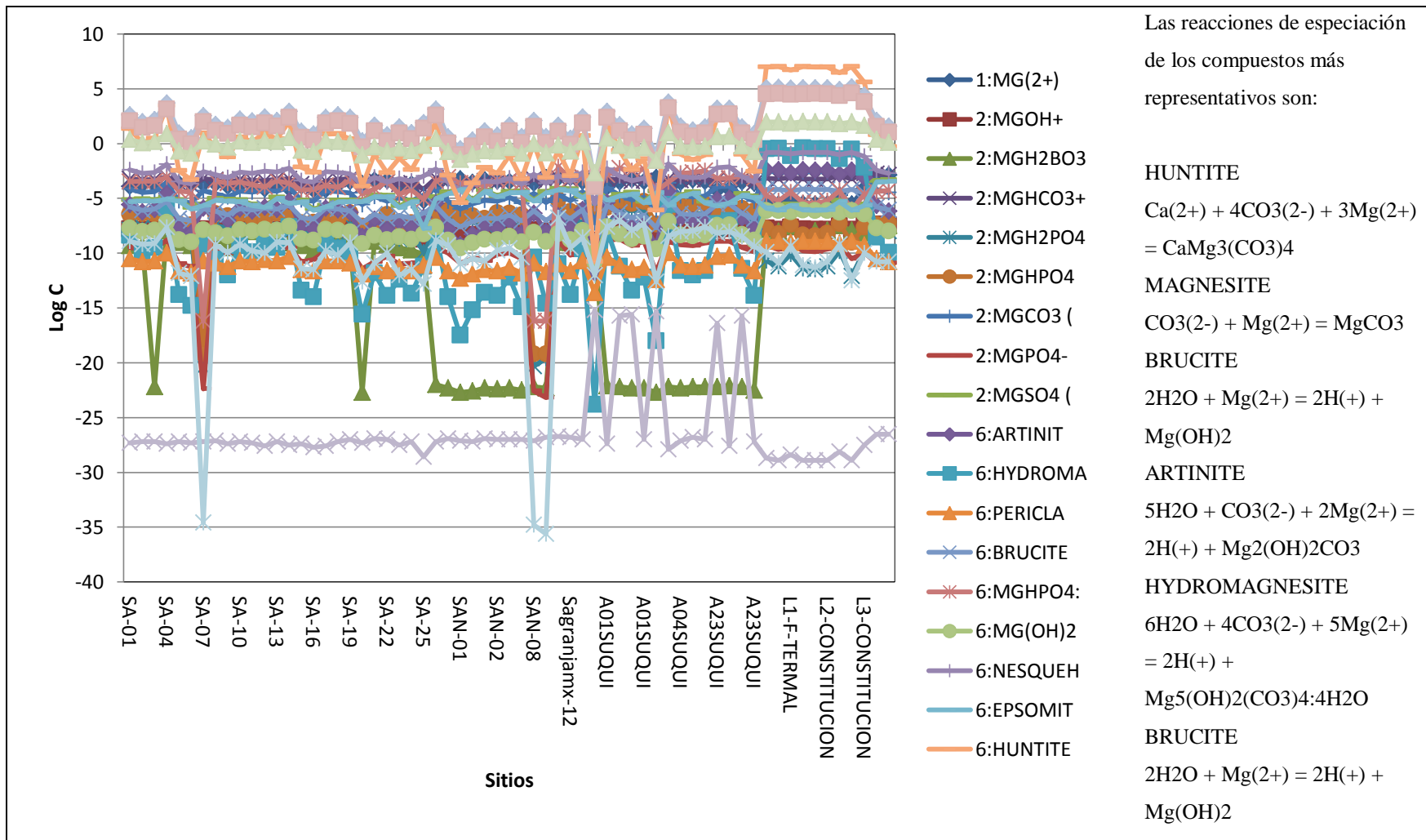


Figura 78 Especiación química de compuestos magnésicos ( $\text{Mg}^{2+}$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

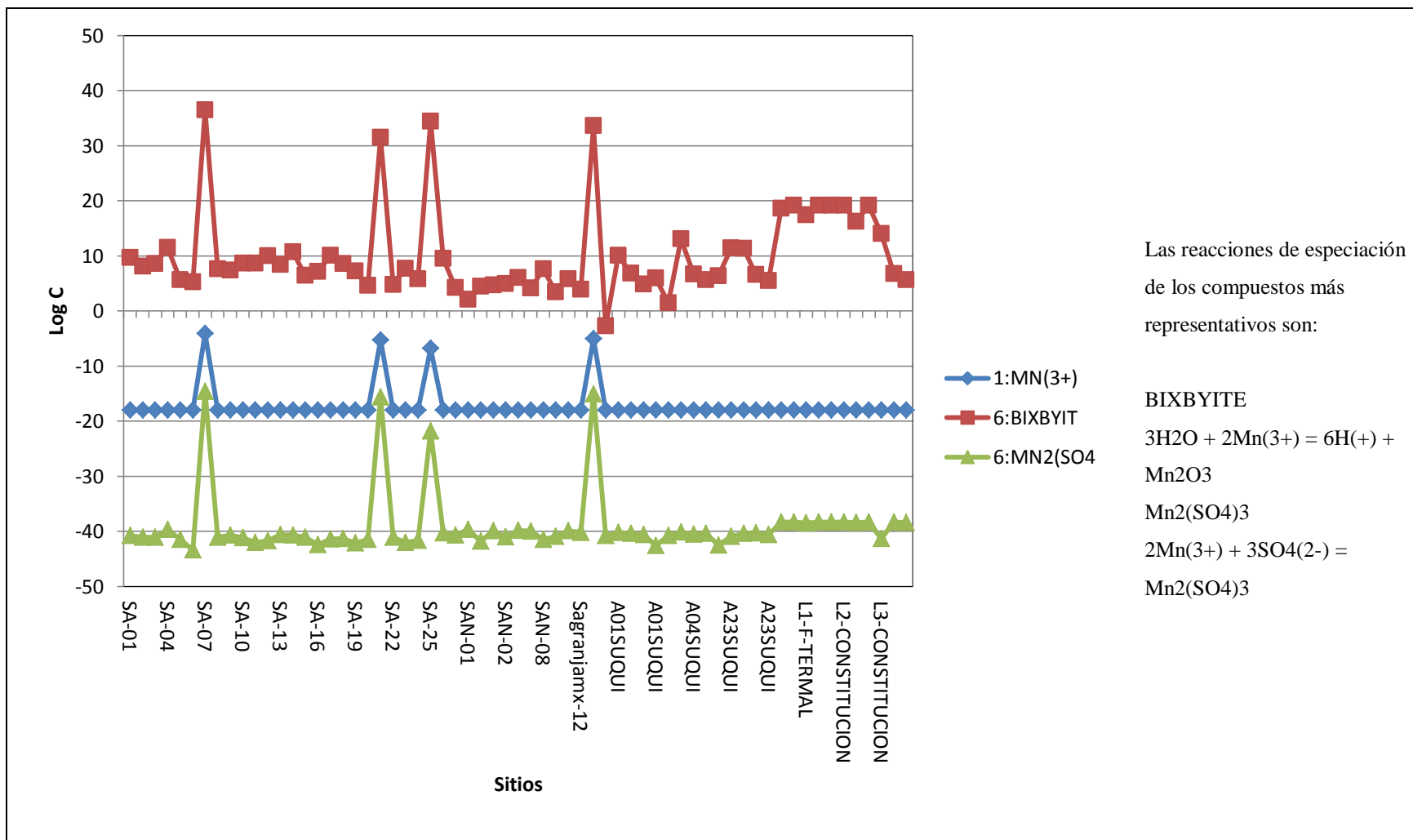


Figura 79 Especiación química de compuestos manganeso ( $\text{Mn}^{3+}$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

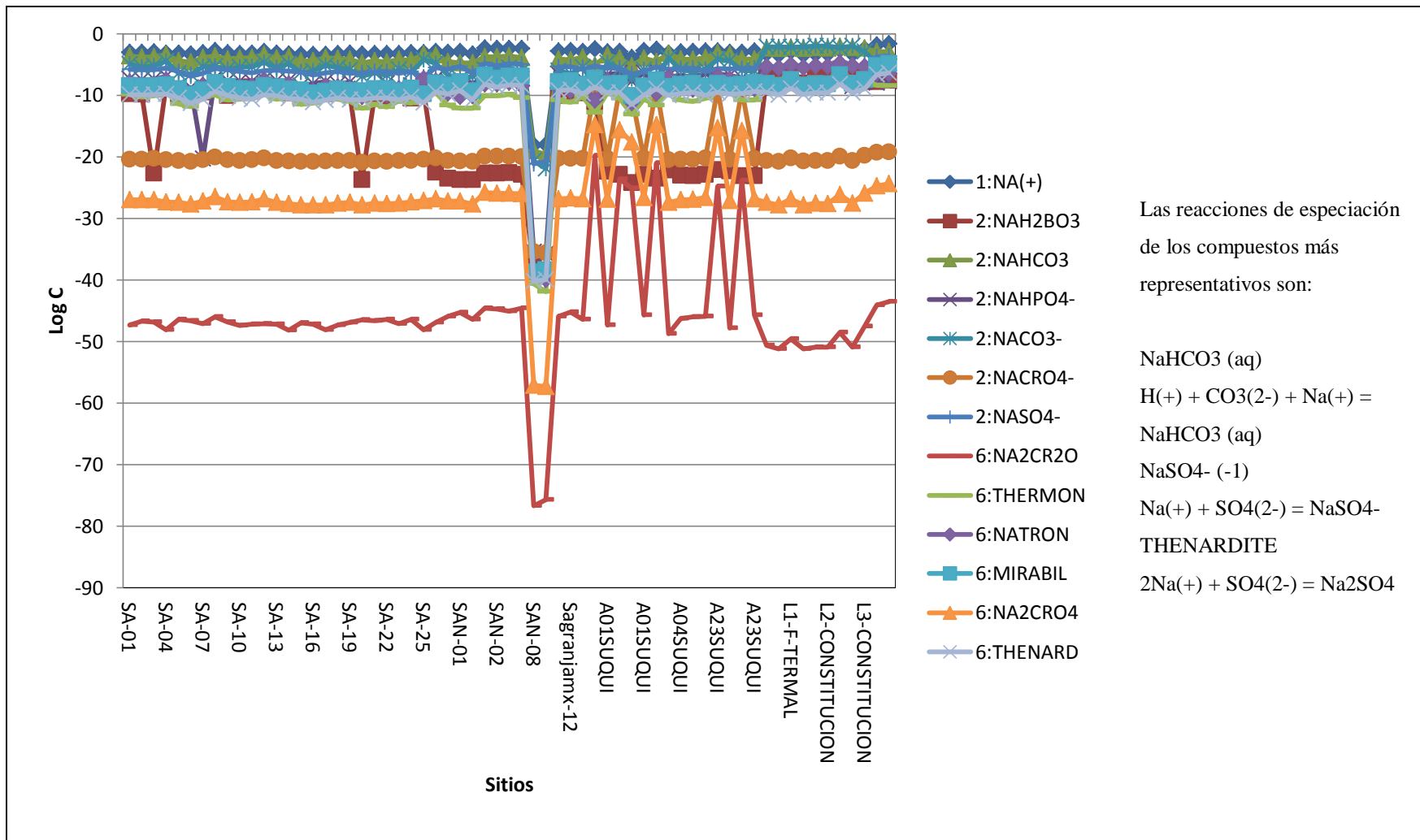


Figura 80 Especiación química de compuestos sódicos ( $\text{Na}^+$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

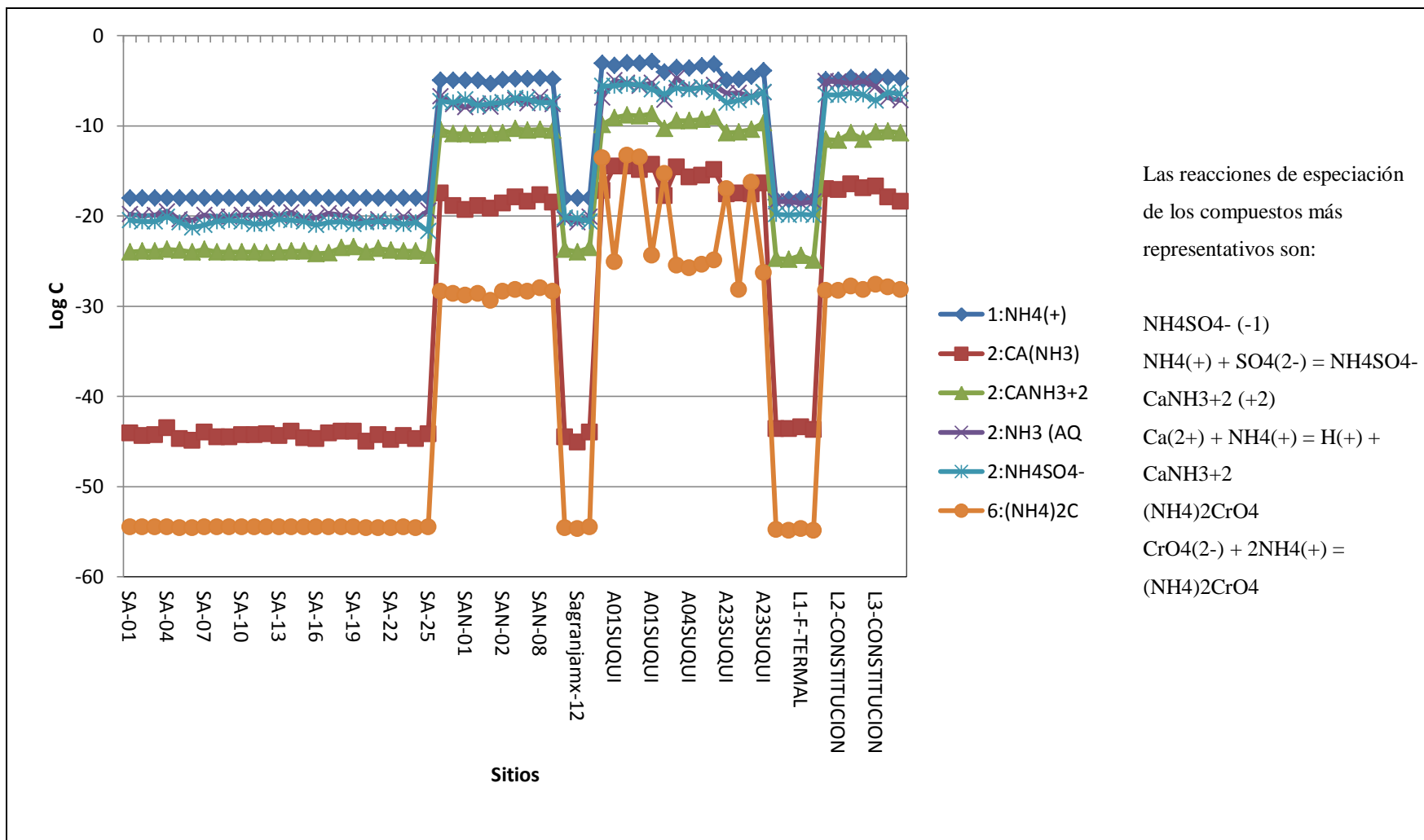


Figura 81 Especiación química de compuestos de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6



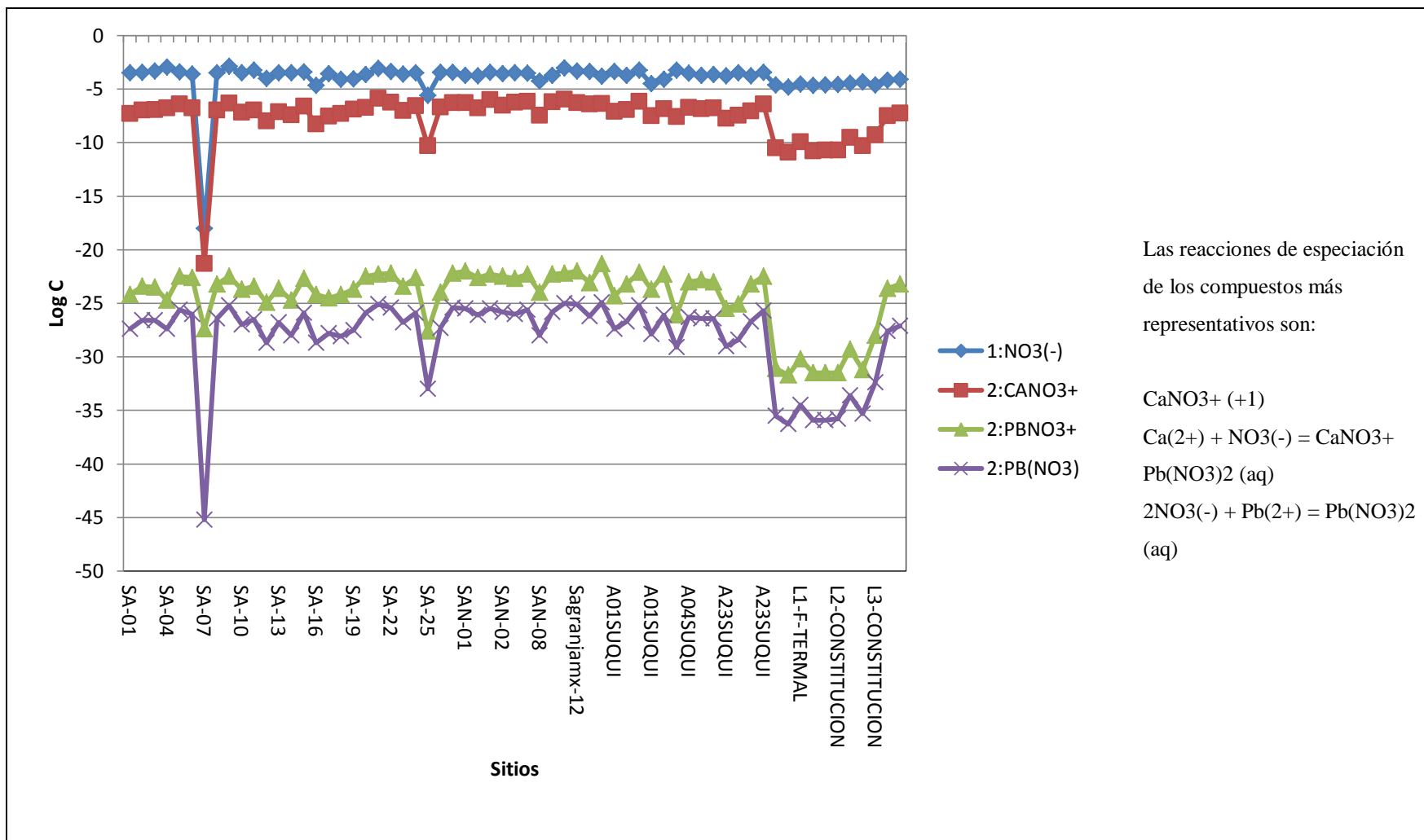


Figura 82 Especiación química de compuestos de nitratos (NO<sup>3-</sup>) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

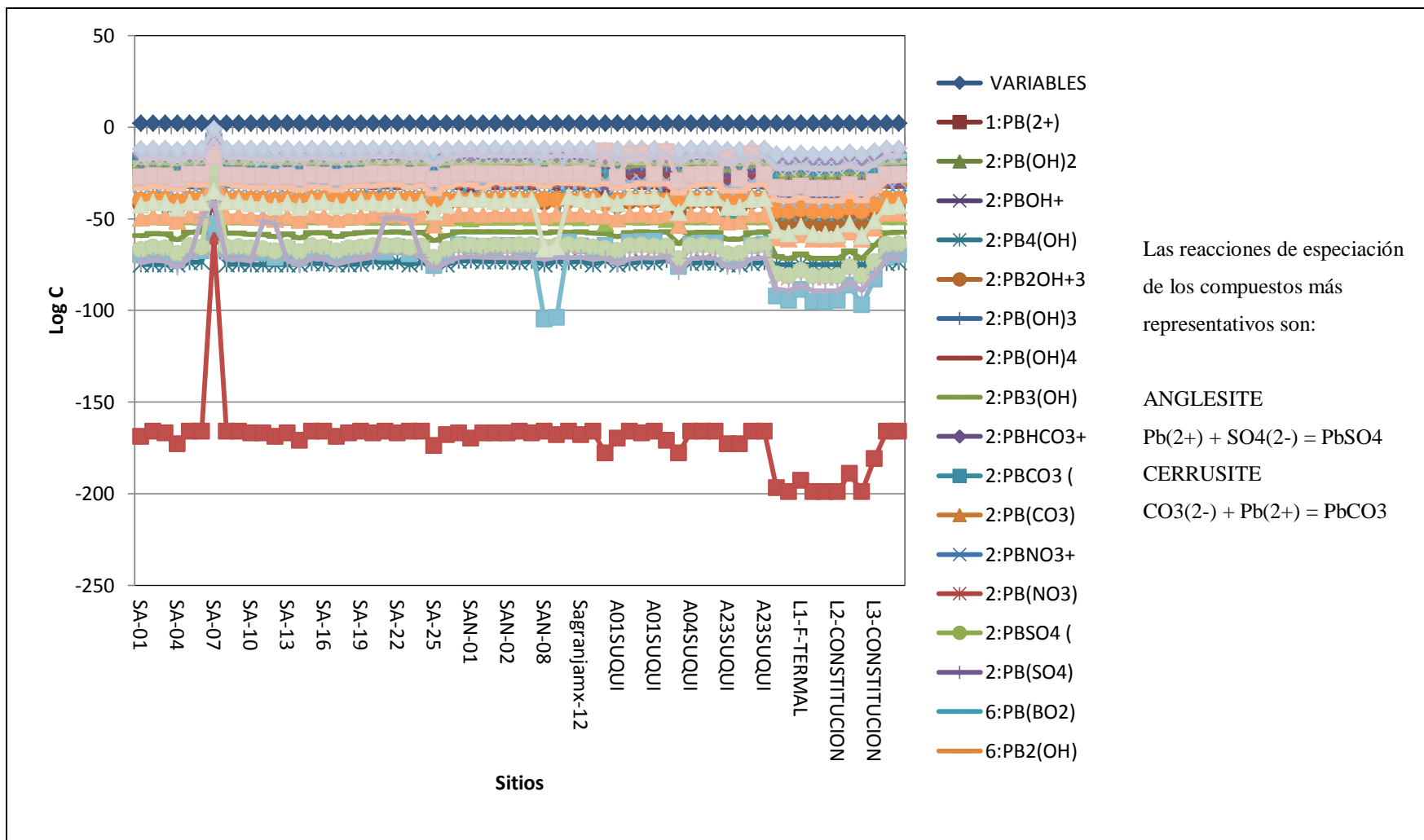


Figura 83 Especiación química de compuestos de Plomo II ( $Pb^{2+}$ ) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

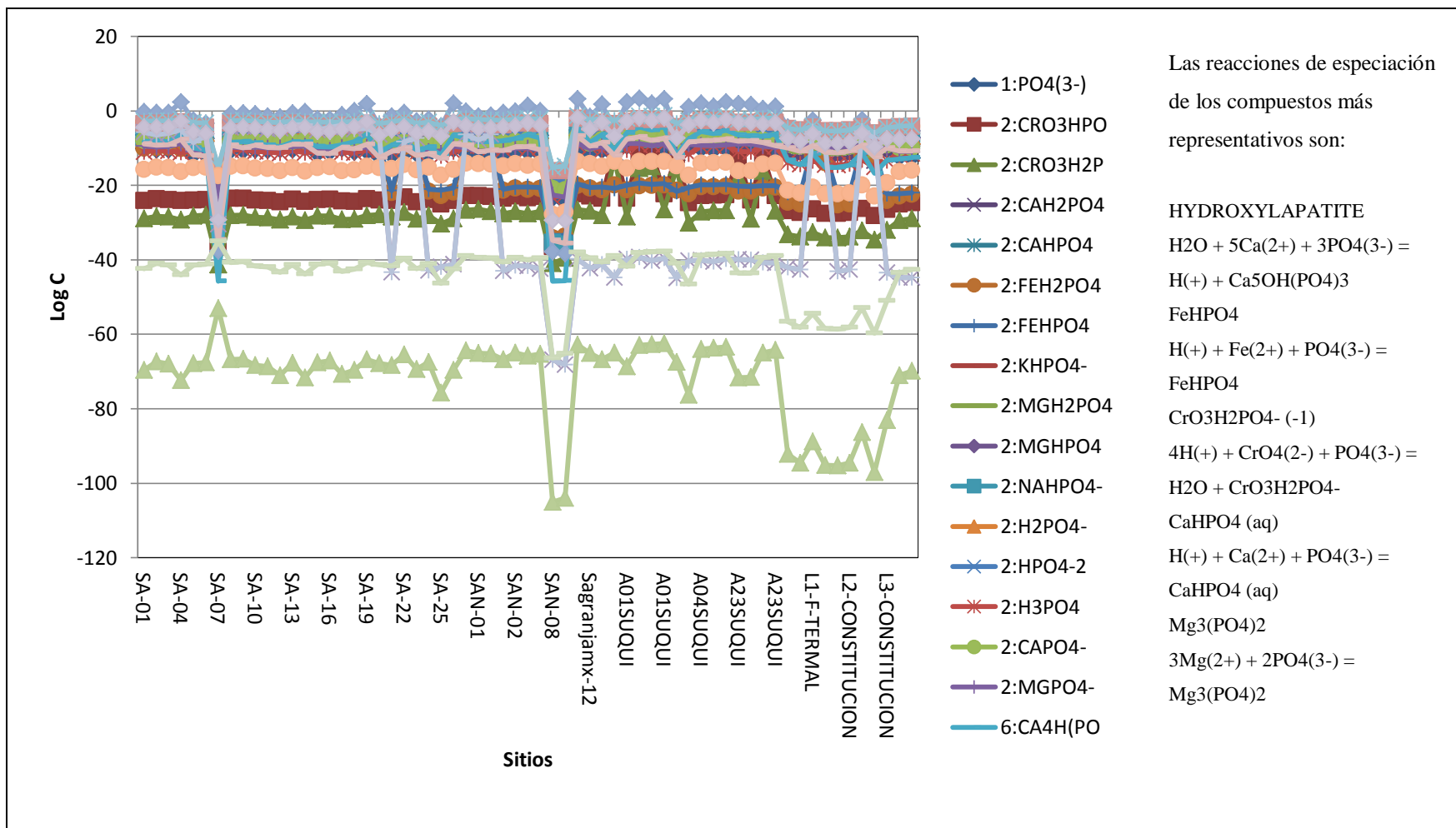


Figura 84 Especiación química de compuestos de fosfatos [PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>] en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

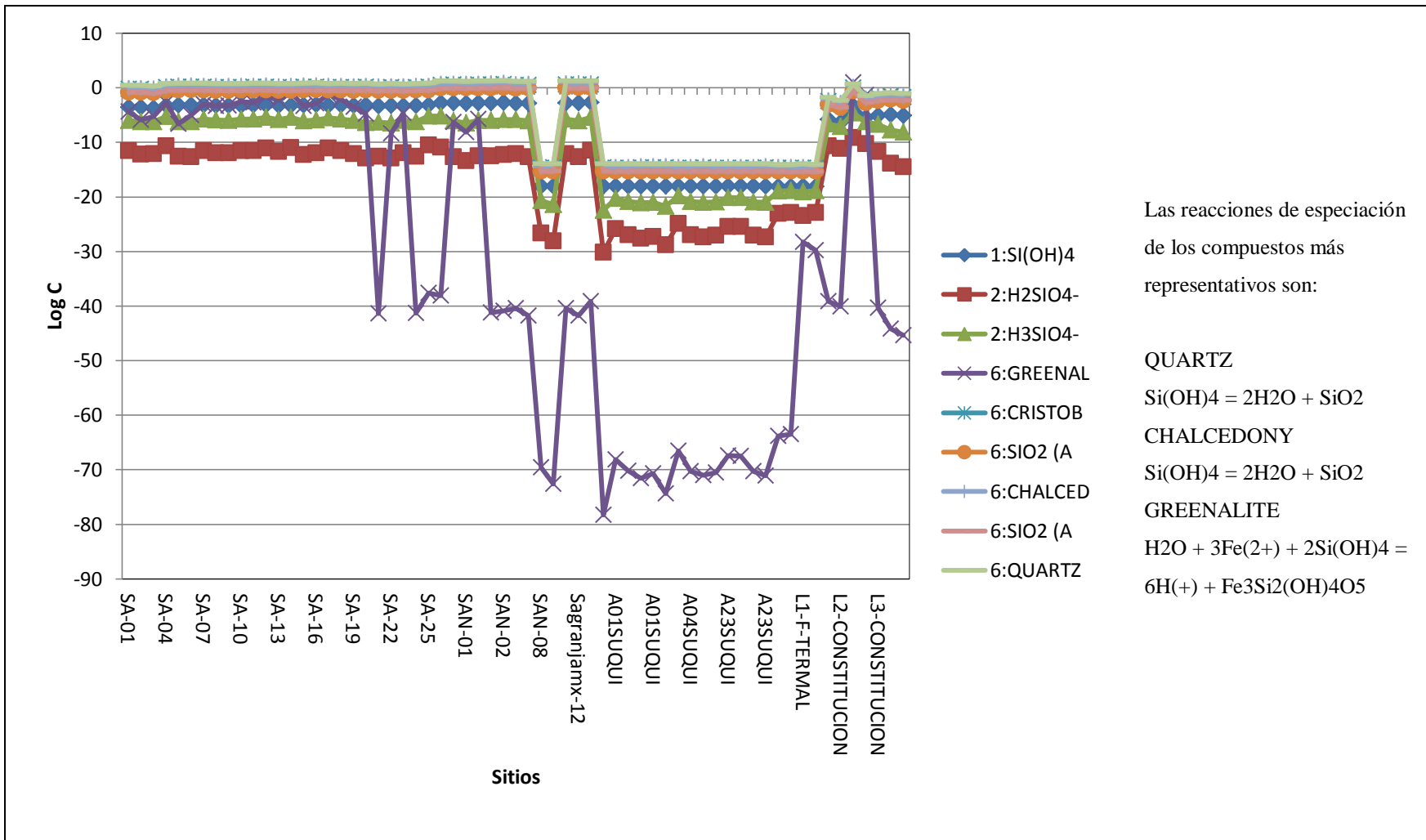


Figura 85 Especiación química de compuestos de silicatos  $[\text{SiO}_4^{4-}]$  en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

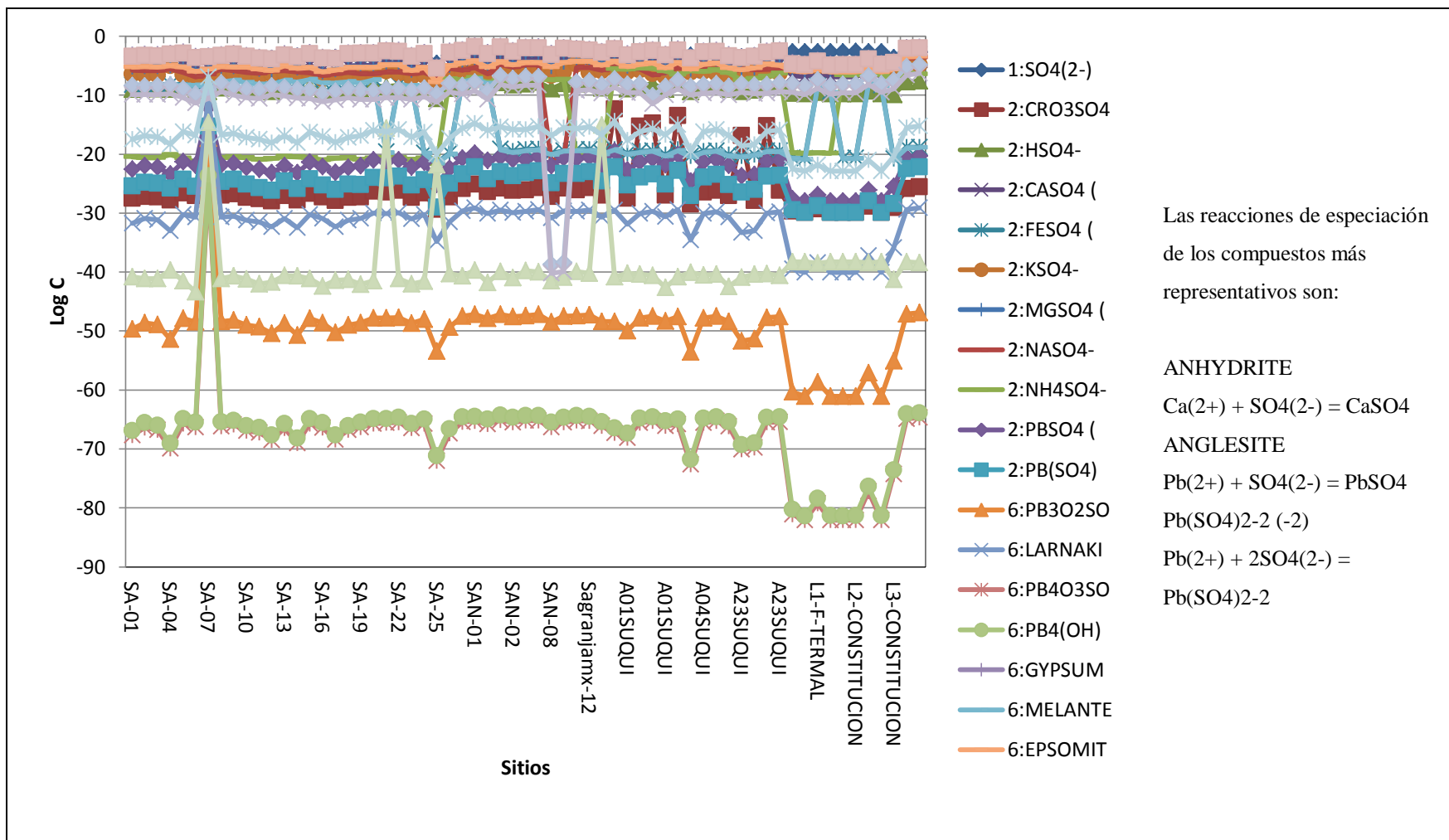


Figura 86 Especiación química de compuestos de sulfatos  $[\text{SO}_4^{2-}]$  en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia, utilizando software MINEQL 4.6

### **3.6. EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DISPERSIÓN LONGITUDINAL SUPERFICIAL DEL RÍO ARANCHACAL**

Este apartado describe el patrón de dispersión de contaminantes. Consta de una sección de metodología experimental, de cálculos y de análisis de resultados.

Se ha llevado a cabo el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal en la parte alta del río Suquiapa en un tramo de 1.88 km utilizando sal común como trazador y determinando conductividad eléctrica como función respuesta, este experimento se realizó en el mes de junio 2013.

#### **3.6.1. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE LA DISPERSIÓN A TRAVÉS DE LA TÉCNICA DE TRAZADORES QUÍMICOS**

La metodología de trazadores que se ha descrito anteriormente, está formada por las siguientes etapas:

- Selección del trazador
- Inyección del trazador
- Detección y medición de la concentración del trazador
- Tratamiento de datos y formulación de la DTR
- Análisis de los datos, interpretación y modelación.

En la presente investigación se evaluó el coeficiente de dispersión longitudinal hidrodinámico en la parte alta del río Suquiapa, Santa Ana; utilizando sal común como trazador químico y detectando pulsos indirecto de concentraciones a partir de la medición de conductividades eléctricas en dos puntos detectores ubicados a 745 m y 1880 m respectivamente desde el punto de inyección.

La metodología conllevó una primera etapa de trabajo de campo y uso de equipo para la detección de nubes de puntos que definen la curva “Concentración vs Tiempo” del trazador en cada punto detector, en una segunda etapa se realizó un proceso de cálculo de a

partir de la metodologías propuesta por S. Fogler, luego se realizó una etapa de análisis de resultados y finalmente comparación, validación y conclusiones de los métodos utilizados.

La etapa de cálculo y procesamiento de los datos inicia al plantear la ecuación que rige el fenómeno de transporte es la ecuación 24:

Ec. 24

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t}$$

Donde:

1. D: es el coeficiente de dispersión a determinar.
2. C: es la concentración de la sal.
3. x: es la distancia longitudinal del río.
4. t: es el tiempo de paso.

Luego ambas metodologías aportan una solución al sistema dadas las consideraciones y condiciones de frontera que lo simplifican.

A continuación en la tabla 15 se presenta la metodología de cálculo del coeficiente de dispersión hidrodinámico longitudinal propuesta por S. Fogler que resuelve la Ec 24, a través de una serie de pasos que se detallan en las ecuaciones de la 25 a la 31:

Tabla 15 Procedimiento de cálculo para el cálculo del coeficiente de dispersión.

Fuente: Elaboración propia.

ECUACION	OBSERVACIONES
Ec. 25  $C(t)$	Se calculó la función de la concentración respecto al tiempo (C(t)), graficando y obteniendo la regresión que más se ajustó para dicha grafica.
Ec. 26  $E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt}$	Se calculó la función E(t), y se dividió la función de concentración (Ec. 25) entre la integral de dicha función respecto a los límites exactos en que la curva intercepta el eje de las coordenadas.
Ec. 27  $tm = \int_0^{\infty} tE(t)dt$	Se calculó el tiempo de residencia medio (tm) y se integró el producto del tiempo y la función E(t) en los límites determinados anteriormente.
Ec. 28  $\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - tm)^2 E(t)dt$	Se calculó la varianza ( $\sigma^2$ ), es decir, la dispersión de los datos, obteniendo el área bajo la curva de la función, utilizando los límites definidos anteriormente.
Ec. 29  $\frac{\sigma^2}{tm^2} = \frac{2Pe_r + 8}{Pe_r^2 + 4Pe_r + 4}$	A partir de la ecuación para sistema abierto-abierto (Ec. 29), se calculó el número de Peclet ( $Pe_r$ ).
Ec. 30  $tm = (1 + \frac{2}{pe_r})\tau$	Se despejó $\tau$ a partir de tm y el número de Peclet obtenidos anteriormente (Ec. 27 y 29).
Ec. 31  $pe = \frac{Ul}{D_a}$	A partir del número de Peclet se calculó el coeficiente de dispersión ( $Da$ ) despejando su valor de la fórmula, y utilizando la velocidad media (U) y la longitud (l) del tramo del río.



La Metodología de S. Fogler propone el análisis matemático a partir de la transformación de los datos a una función de distribución de tiempos de residencia que consiste en la normalización de los vectores “c” vs “t”, y a partir de ello la realización de cálculo integral y ajuste matemático al modelo planteado en función del número de Peclet (Pe):

$$Pe = \frac{\text{Velocidad de transporte por convección}}{\text{Velocidad de transporte por difusión o dispersión}} = \frac{v \cdot x}{D};$$

- Para  $Pe < 0.4$ , la difusión molecular predomina sobre la dispersión mecánica.
- Para  $0.4 < Pe < 5$ , ambos efectos son del mismo orden de magnitud en la dirección del flujo.
- Para  $5 < Pe < 100$ , la dispersión mecánica predomina en el sentido del flujo, pero la difusión molecular debe tomarse en cuenta por su efecto transversal.

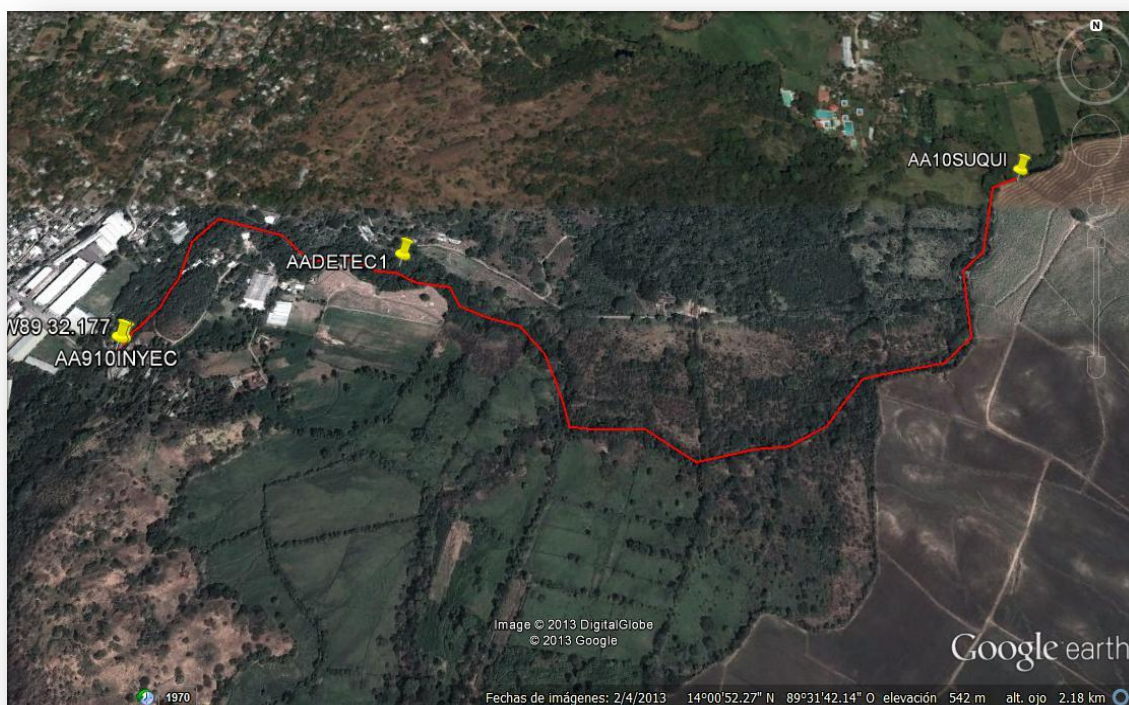
Para la ejecución de la técnica de trazado, se deben identificar un punto de inyección y dos puntos de detección. En la tabla 16 se describen los sitios escogidos.

Tabla 16 Identificación de sitios para la técnica de trazadores.

Fuente: Elaboración propia,

Tipo de punto	Sitio	Descripción del sitio	Coordenadas
Inyección	A910INyec	Localizado en la Colonia Santa Margarita. Para facilitar las operaciones de inyección, se escogió este punto situado cerca de un puente. Se encuentra aguas abajo del punto A08SUQUI.	LAT 14.014583 LON -89.536283
Detección	ADETEC1	Se encuentra a 745 m del punto de Inyección.	LAT 14.016306 LON -89.531417
Detección	A10SUQUI	Punto antes de unión con río Zarco. Está a 1880 metros del primero punto de detección.	LAT 14.018467 LON -89.519683

En el Mapa 20 se presenta una imagen satelital del recorrido del experimento de trazadores.



Mapa 20 Sitios de inyección y detectores 1 y 2 seleccionados para la técnica de Trazadores  
Fuente: Google Earth

### 3.6.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La obtención de los parámetros hidrodinámicos se realizó mediante la técnica de aforo por vadeo, utilizando un molinete hidrométrico tipo Gurley y mediante un experimento de pulso de trazadores utilizando Cloruro de Sodio y tomando como parámetro detector la conductividad eléctrica con un medidor multiparamétrico de calidad de agua.

El coeficiente de dispersión hidrodinámico es un parámetro muy importante en la propuesta de medidas de descontaminación de agua superficial, y de igual forma nos caracteriza muy bien al cuerpo de agua. Su estimación se puede determinar efectuando un experimento de pulso de trazador, que además nos brinda herramientas para estimar otros

parámetros hidrodinámicos como velocidad advectiva, tiempo de residencia, velocidad advectiva, etc, de igual forma como se obtienen a través de la técnica de aforo por vadeo, por lo cual en general la técnica también recibe el nombre de aforo químico. Para el caso de la determinación del coeficiente de dispersión hidrodinámico y longitudinal se mide la concentración en el efluente del tramo del sistema en estudio en función del tiempo. Con base en los datos de concentración en el efluente, se calcula el tiempo de residencia medio y la varianza, y luego se usan estos valores para determinar el coeficiente de dispersión,  $D_a$ .

### **3.6.2.1. RESULTADOS**

Para el estudio de trazado se utilizó Cloruro de Sodio como trazador, debido a su accesibilidad y debido a que se puede monitorear por medio de la conductividad eléctrica del sistema.

Los resultados del estudio a través de los valores de número de Peclet (7.14 y 8.58 respectivamente en los puntos detectores) permitieron confirmar que la dispersión mecánica predomina en el sentido del flujo. Se estimó que el valor promedio del coeficiente de dispersión hidrodinámico longitudinal promedio del cuerpo de agua en estudio fue de 113.9 m<sup>2</sup>/s.

#### **A. COEFICIENTE DE DISPERSIÓN USANDO MÉTODO FOGLER. PUNTO DE DETECCIÓN 1 DEL RÍO SUQUIAPA.**

A continuación se presenta la curva de los datos recolectados y tratados y la respectiva regresión.

La regresión y datos de dispersión obtenidos para la curva de detección 1 se muestran en la ecuación siguiente.

Ec. 32

$$C \left( \frac{g}{l} \right) = at^{10} + bt^9 + ct^8 + dt^7 + et^6 + ft^5 + gt^4 + ht^3 + it^2 + jt + k$$

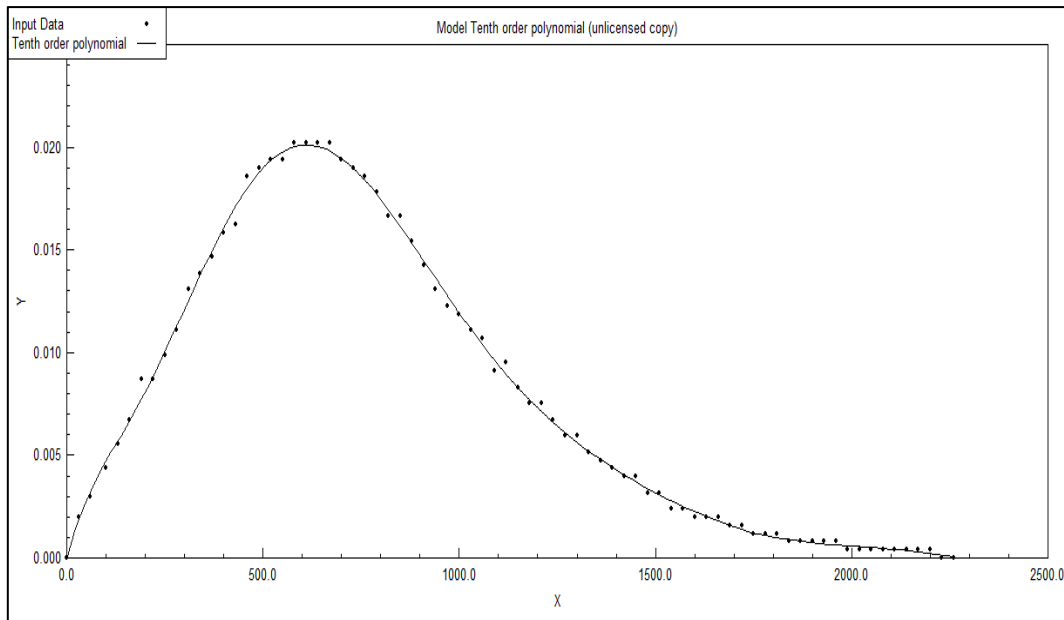


Figura 87 Gráfico de Concentración de NaCl vs Tiempo de paso del trazador en punto detector 1

Fuente: Datos tesis EIQA-FIA-UES 2013

A continuación se presentan los valores de las variables de regresión para la curva concentración-tiempo en el punto de detección 1:

<b>Variable</b>	<b>Value</b>
<b>a</b>	-9.62376757395376E-33
<b>b</b>	1.39247339740452E-28
<b>c</b>	-8.55046339010427E-25
<b>d</b>	2.90582025992545E-21
<b>e</b>	-5.95782020942826E-18
<b>f</b>	7.50210416568255E-15
<b>g</b>	-5.61705608876116E-12
<b>h</b>	2.28688408281425E-09
<b>i</b>	-4.58192904799483E-07
<b>j</b>	7.56949898402752E-05
<b>k</b>	-7.42958673859541E-05
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9983223009

Evaluando valores de X para la función, se estimó que t=2280 en el punto final para la integración.

$$\int_0^{2280} (-9.62376757395376E - 33t^{10} + 1.39247339740452E - 28t^9 - 8.55046339010427E - 25t^8 + 2.90582025992545E - 21t^7 - 5.95782020942826E - 18t^6 + 7.50210416568255E - 15t^5 - 5.61705608876116E - 12t^4 + 2.28688408281425E - 09t^3 - 4.58192904799483E - 07t^2 + 7.56949898402752E - 05t - 7.42958673859541E - 05)dt$$

=18.07831444691

Utilizando integración numérica se obtiene:

$$\int C(t)dt = 18.06792$$

Función de tiempos de residencia E (t) (Ec. 26)

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{2280} C(t)dt}$$

A continuación se muestran los valores de las variables de regresión para la curva de Distribución de Tiempos de Residencia para el punto detector 1.

<b>E(t)</b>
-5.3264391108405E-34
7.7068826815955E-30
-4.7324005143394E-26
1.6082760273044E-22
-3.2974577092594E-19
4.1521681331789E-16
-3.1088559661329E-13
1.2657151917953E-10
-2.5359471638101E-08
4.1894689505087E-06
-4.1120321202415E-06

Ec.27

$$tm = \int_0^{\infty} tE(t)dt$$

$$tm = 750 \text{ s} = 12.506346 \text{ min} = 0.20 \text{ horas}$$

Ec. 28

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - tm)^2 E(t)dt$$

$$\sigma^2 = 150,121.63600147$$

$$\sigma = 387.455$$

Cálculo de Peclet: utilizando la ecuación propuesta por Fogler para sistema abierto-abierto cuando se desconoce el tiempo espacial. Este caso surge cuando hay zonas de agregación muerta o estancadas en el sistema junto con efectos de dispersión.

Ec. 29

$$\frac{\sigma^2}{tm^2} = \frac{2Pe_r + 8}{Pe_r^2 + 4Pe_r + 4}$$

$$\frac{150,121.63600147}{750.3807524^2} = \frac{2Pe_r + 8}{Pe_r^2 + 4Pe_r + 4}$$

$$Pe = 7.142549673407$$

Ec. 30

$$tm = \left(1 + \frac{2}{pe_r}\right)\tau$$

$$750.3807524 = \left(1 + \frac{2}{7.142549673407911}\right)\tau$$

$$\tau = 586.22944249076 \text{ s}$$

$$\frac{tm}{\tau} = \frac{750.3807524}{586.22944249076} = 1.28$$

Ec. 31

$$pe = \frac{Ul}{D_a}$$

Utilizando la distancia del punto de detección hasta el detector 1:

$l=797.48$  m.

Cálculo de la velocidad advectiva:

$$U = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} = \frac{797.48 \text{ m}}{750.3807524 \text{ s}} = 1.0627671317 \text{ m/s}$$

Utilizando la definición de Número de Peclet, se despeja para  $D_a$ :

$$Pe = \frac{Ul}{D_a}$$
$$7.142549673407 = \frac{(1.165096 \frac{m}{s})(797.48m)}{D_a}$$
$$D_a = 118.66008232093$$

## **B. COEFICIENTE DE DISPERSIÓN USANDO MÉTODO FOGLER. PUNTO DE DETECCIÓN 2 DEL RÍO SUQUIAPA.**

La regresión y datos de dispersión obtenidos para la curva de detección 1 se muestran en la ecuación siguiente.

Ec. 33

$$C \left( \frac{g}{l} \right) = at^{10} + bt^9 + ct^8 + dt^7 + et^6 + ft^5 + gt^4 + ht^3 + it^2 + jt + k$$

A continuación se presentan los valores de las variables de regresión para la curva concentración-tiempo en el punto de detección 2 a utilizar en la Ec.17.

Variable	Value
<b>a</b>	-1.34252549521233E-35
<b>b</b>	2.84295938372956E-31
<b>c</b>	-2.64309337731063E-27
<b>d</b>	1.41006200732292E-23
<b>e</b>	-4.69498525535578E-20
<b>f</b>	9.80985618449998E-17
<b>g</b>	-1.19985416805569E-13
<b>h</b>	6.91390998268797E-11
<b>i</b>	-8.37638892552587E-09
<b>j</b>	5.85540306680091E-06
<b>k</b>	-1.29068888666635E-04
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9987818167

A continuación se presentan la gráfica de la regresión obtenida y la gráfica de puntos para el punto de detector 2.

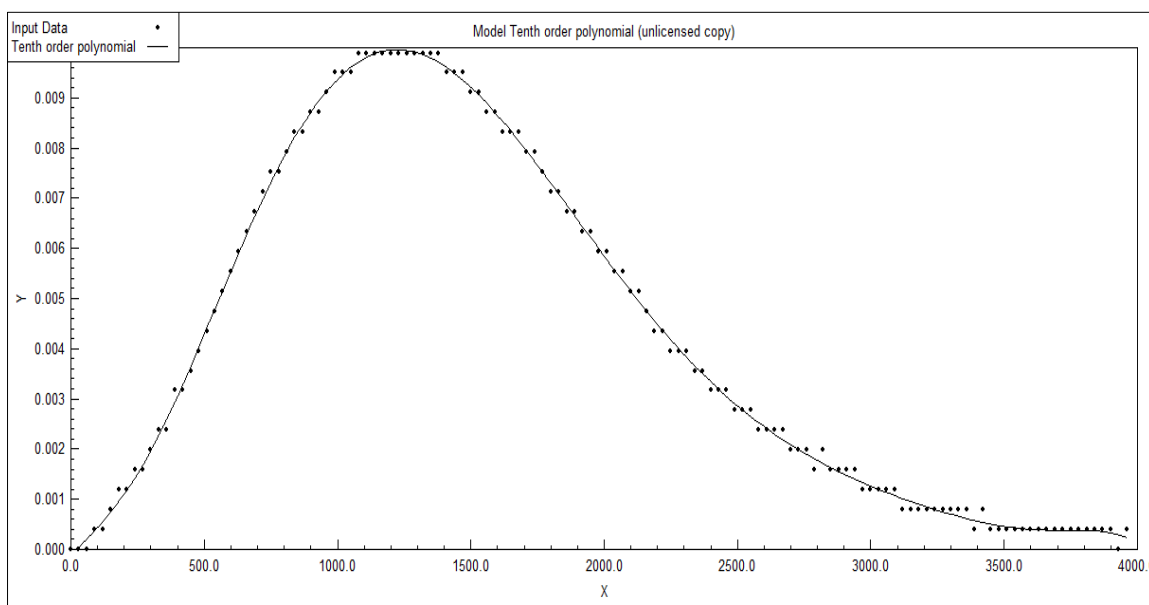


Figura 88 Gráfico de Concentración de NaCl vs Tiempo de paso del trazador en punto detector 2

Fuente: Datos tesis EIQA-FIA-UES 2013



Evaluando la función para valores de t, hasta un tiempo final t= 4023 segundos, se tiene.

$$\int_0^{4023} (-1.34252549521233E - 35t^{10} + 2.84295938372956E - 31t^9 - 2.64309337731063E - 27t^8 + 1.41006200732292E - 23t^7 - 4.69498525535578E - 20t^6 + 9.80985618449998E - 17t^5 - 1.19985416805569E - 13t^4 + 6.91390998268797E - 11t^3 - 8.37638892552587E - 09t^2 + 5.85540306680091E - 06t - 1.29068888666635E - 04)dt$$

$$=16.796026981879$$

Utilizando integración numérica se obtiene:

$$\int C(t)dt = 16.78287$$

A continuación se presentan los valores de las variables de regresión para la curva de distribución de tiempos de residencia del punto detector 2.

**E(t)**

-7.999379696156E-37

1.693964967690E-32

-1.574875678183E-28

8.401793062348E-25

-2.797486517715E-21

5.845160085552E-18

-7.149278806639E-15

4.119623153065E-12

-4.991034862050E-10

3.488916417038E-07

-7.690513521623E-06

Ec. 27

$$tm = \int_0^{\infty} tE(t)dt$$

$$tm = 1,496.6525323615 \text{ s} = 24.944208 \text{ min}$$

Ec. 28

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - tm)^2 E(t)dt$$

$$\sigma^2 = 503,573.17085306$$

$$\sigma = 709.629$$

Ec. 29

$$\frac{503,573.17085306}{1,496.6525323615^2} = \frac{2Pe_r + 8}{Pe_r^2 + 4Pe_r + 4}$$

$$Pe = 8.5782909906995$$

Ec. 30

$$tm = \left(1 + \frac{2}{pe_r}\right)\tau$$

$$1,496.6525323615 = \left(1 + \frac{2}{8.5782909906995}\right)\tau$$

$$\tau = 1,213.6857405276$$

$$\frac{tm}{\sigma} = \frac{1,496.6525323615}{1,213.6857405276} = 1.23315$$

Ec. 31

$$pe = \frac{Ul}{D_a}$$

Con velocidad advectiva de vadeo:

$$8.5782909906995 = \frac{(0.354178016 \frac{\text{m}}{\text{s}})(2643.57\text{m})}{D_a}$$

$$D_a = 109.14695931535$$

El coeficiente de dispersión obtenido con el método de Fogler para este punto detector fue de 109.14695931535 m<sup>2</sup>/s.

El coeficiente de dispersión obtenido mediante el método de Fogler para el punto de detección 1, presentó un valor de 118.6600823209 m<sup>2</sup>/s por lo que podemos afirmar que la dispersión hidrodinámica longitudinal es mayor en el sitio detector con mayor altitud. El promedio de ambos sitios detectores fue de 113.9 m<sup>2</sup>/s y el número de Peclet indica que la dispersión mecánica predomina en el sentido del flujo.

### **3.7. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA**

En este apartado de la investigación se evaluó la calidad de agua de las muestras tomadas en campo y se ha reevaluado la base de datos geoquímica de investigaciones precedentes disponibles con el fin de uniformizar el análisis. De esta forma se propuso el cálculo del índice de calidad de agua canadiense (CCME-WQI) basado en estadística de exclusión, y las evaluaciones de aptitudes de uso de acuerdo al decreto nacional 51, correspondiente a aptitudes de uso de agua para potabilización y riego. Además se incluyó al final del apartado una propuesta de medidas de mitigación para la gestión y mejoramiento de la calidad del recurso hídrico.

#### **3.7.1. METODOLOGÍA PARA LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS**

Este apartado trata acerca de las metodologías utilizadas para toma de muestras de agua de análisis fisicoquímico de calidad de agua y metodologías para evaluación de calidad de agua, incluyendo en ella índices de calidad de agua y evaluación de normativas y aptitudes de uso.

### **3.7.1.1. METODOLOGÍA PARA TOMA DE MUESTRAS DE AGUA PARA ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE CALIDAD DE AGUAS**

En esta sección se presenta la metodología de medición de datos de calidad de agua en campo, preservación de muestras y de la determinación de fuentes contaminantes del área geográfica de interés.

#### **A. ANÁLISIS DE PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS DE AGUA.**

En cada uno de los sitios se tomaron muestras y se midieron parámetros de calidad de agua “*in situ*”. La calidad del agua está caracterizada por su composición física, química y biológica que indican la aptitud de su uso.

Los parámetros de calidad de agua medidos en campo fueron: temperatura de la muestra, temperatura ambiente, pH, conductividad, sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, potencial redox.

En cada uno de los sitios de muestreo se recolectaron muestras de agua para análisis de tipo físico y químico, luego se preservaron y trasladaron al Laboratorio FUSADES las muestras tomadas en el año 2013, y al Laboratorio de la UES, las muestras tomadas en el año 2014, para su procesamiento el mismo día de la recolección. En la figura 89 se muestra el procedimiento general de recolección de muestras de agua.

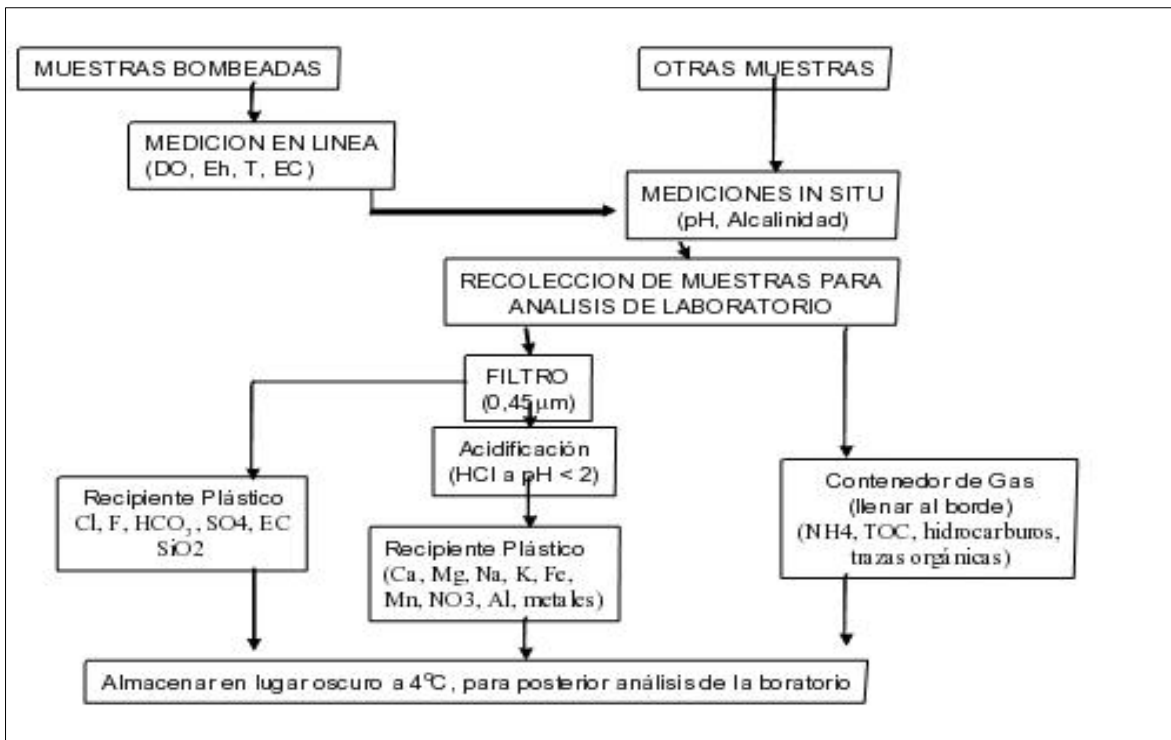


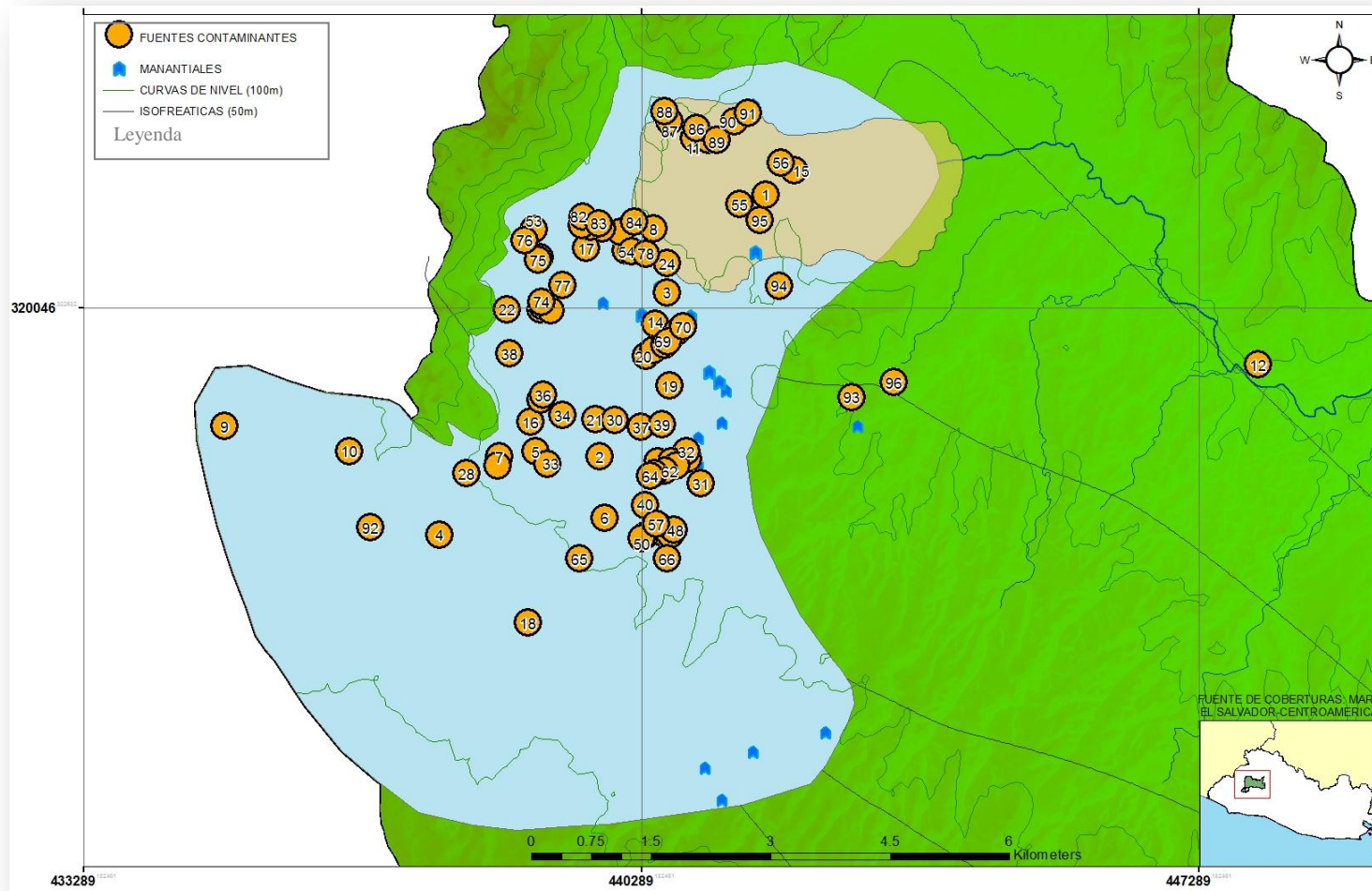
Figura 89 Procedimiento general de recolección de muestras de agua

Fuente: (Pinto Rodríguez, 2009)

## B. DETERMINACIÓN DE LAS FUENTES CONTAMINANTES

Un producto importante de esta investigación fue la compilación actualizada de la mayoría de empresas productoras que desarrollan sus procesos en la cuenca de interés.

La metodología para la determinación de fuentes contaminantes se realizó recabando información de ubicación, actividad industrial, tipos de tratamiento y destino del efluente y la búsqueda de información se realizó en 2 vías, la primera recopilando registros en censos, alcaldías y/o estudios, y la segunda en campo realizando entrevistas a los encargados de las industrias o en último caso evidenciando y midiendo sobre la descarga. En este caso particular se han determinado las fuentes contaminantes a partir de 2 registros: Documento estrategias de descontaminación de fuentes contaminantes (Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2002) y de datos proporcionados por DYGESTIC a través de consultorías realizadas por el MARN.



Mapa 21 Fuentes contaminantes en acuífero de Santa Ana

Fuente: Elaboración propia. Datos: MARN

Tabla 17 Ubicación de fuentes contaminantes y otros datos de la actividad en el área geográfica de interés

Fuente: Compilación de datos en investigaciones realizadas por el MARN.

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
1	Exmodica S.A. de C.V.	14.01472	-89.53833	Km 69 carretera a Santa Ana Metapán, Santa Ana frente a beneficio El Pedregal	Maquilado de prendas de vestir industria	3 fosas sépticas para aguas negras	Subsuelo
2	Pan Lucha	13.98500	-89.55750	3a. Av. Sur no. 78, Santa Ana	Producción de pan	Vertidos de lavados de moldes	Alcantarillado ANDA
3	Beneficio La China, S.A. de C.V.	14.00361	-89.54972	Carretera a Metapán a 3 km de Santa Ana	Beneficiado de café agroindustrial	Aguas de lavado y despulpe se recolecta en pila y se desaloja en terrenos. Aguas negras a fosa séptica	Evacuación a campos de agricultura subsuelo
4	Pan Wendy	13.97611	-89.57611	Urbanización santa cristina polígono b 16, 32, av. Sur y 47 c p. Santa Ana	Producción de pan	Aguas residuales	Vertidos líquidos de lavado a alcantarillado ANDA

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
5	Panadería San José y Súper pan	13.98556	-89.56500	14 av. Sur entre 21 y 23 calle poniente, Santa Ana	Producción de pan	Aguas de lavado no se tratan	Alcantarillado de aguas negras ANDA
6	Pastelería Tiffany	13.97806	-89.55694	Colonia bella santa Ana 100 mts. Poniente periférico	Producción de pan	Aguas de lavado no se tratan	Alcantarillado de aguas negras ANDA
7	Texaco la 25	13.98500	-89.56917	Final 25 c p y calle aldea San Antonio Santa Ana	Venta de combustibles	Trampa de aceite, para aguas de piso de taller lubricación	Cuneta de calle aldea San Antonio
8	Tenería El Búfalo, S.A. de C.V.	14.01083	-89.55139	Final 5a. A. N. Santa Ana	Producción de cueros. Industria	No existe tratamiento de aguas residuales de lavados. Aguas negras	Descarga al río Sucio y a alcantarillado de ANDA
9	Granja Santa María S.A. de C.V.	13.98833	-89.60111	Km 71 Chalchuapa, final colonia San Ignacio. 4 cuadras al Pte. De bodegas fertica, Santa Ana	Explotación agrícola, crianza de pollos y producción de huevos, agroindustria	No hay tratamiento para aguas de lavados. Aguas negras a fosa séptica	Lavado de galeras infiltradas en subsuelo subsuelo



No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
10	Planta de envasado de agua Dilacsa	13.98556	-89.58667	Calle Carranza 14 av. Sur # 45 entre 21 y 23 calle poniente Santa Ana	Envasado de agua potable.	No existe para aguas de procesos	Alcantarilla de aguas lluvias
11	Granja porcina El Jabalí	14.02111	-89.54667	Colonia lobato cantón cutumay camones , Santa Ana	Crianza y engorde de cerdos (Agroindustria)	4 lagunas de sedimentación a orillas río Zarco. Aguas negras a fosa séptica	A río y subsuelo
12	Hidroeléctrica San Luis compañía eléctrica cucumacayan	13.99556	-89.48111	Cantón nancitepeque oriente de la ciudad de Santa Ana, El Cerezo. Santa Ana	Producción de energía eléctrica	Aguas negras fosa séptica	Río Aranchacal
13	Implementos agrícolas Centroamericanos S.A. de C.V.	13.99667	-89.56806	Final de Calle Libertad poniente parque industrial Santa Lucia Santa Ana	Producción de herramientas de construcción industria	Sin tratamiento vertidos líquidos procesos de lavado y templado de herramientas	A río Aranchacal o cañaveral

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
14	Estación de servicio Esso La Ceiba	14.00000	-89.55111	Diagonal 9a y 11a av. Norte Barrio Santa Bárbara, Santa Ana	Venta de combustible	No existe tratamiento agua de lavado con pequeñas cantidades de aceite	Drenaje de aguas lluvias, río Aranchacal
15	Hidroeléctrica Cutumay Camones	14.01750	-89.53500	Colonia las Margaritas cantón Cutumay camones, río el Sauce carretera a Metapán, Santa Ana	Producción de energía eléctrica	Aguas negras a fosa séptica	Subsuelo
16	Estación de servicio shell Moraga	13.98889	-89.56556	Avenida Moraga sur e intersección con 13 y 15 c.p., Santa Ana	Venta de combustible	No existe para aguas de lavado	Descargan a alcantarilla en Av. Moraga
17	Beneficio río Zarco	14.00861	-89.55917	Colonia río Zarco, Santa Ana	Beneficiado de café agroindustrial	Aplicación de cal y enzimas filtros de piedra volcánica aguas negras a fosas sépticas	Descarga quebrada Santa Lucia subsuelo

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
18	Piel y calzado, S.A. de C.V. Pycasa S.A. de C.V.	13.96611	-89.56583	Avenida independencia sur a 100 m de urbanización la heroica Santa Ana, autopista Santa Ana, s.s. A 2,5 km de Metrocentro frente a gasolinera Esso Santa Ana	Fabricación de zapatos	Aguas negras a fosas sépticas	Subsuelo
19	Incalsa, S.A. de C.V.	13.99306	-89.54944	Calle Libertad oriente entre 17 y 19 av. Norte, Santa Ana próximo Hospital San Juan de Dios	Confección de prendas de vestir de algodón.	No hay tratamiento aguas residuales de lavado y teñido de tela. Aguas negras	A alcantarillado sanitario
20	Estación de servicio shell Santa Bárbara	13.99639	-89.55222	Barrio Santa Bárbara 11 av. Norte entre 6a y 8a calle oriente, Santa Ana	Venta de combustible servicios	Aguas negras a fosa séptica no hay tratamiento para aguas de lavados	Subsuelo destino de aguas de lavado y aguas lluvias drenaje pluvial

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
21	Estación de servicio Esso independencia	13.98917	-89.55806	Avenida independencia sur y 11a calle oriente Santa Ana	Venta de combustible	Aguas negras aguas de lavado con poco aceite	Sistema alcantarillado de ANDA y a sistema aguas lluvias
22	Beneficio las tres puertas j. Hill y Cia S.A. de C.V.	14.00167	-89.56833	Calle a ciudad de los niños Santa Ana	Beneficiado de café agroindustrial	Planta de tratamiento y lagunas facultativas a aguas de riego aguas negras a fosa séptica	Subsuelo
23	Estación de servicio Texaco Bolívar	13.98472	-89.54722	19 av. Sur y diagonal David Granadino Santa Ana	Venta de combustible	Aguas negras	A alcantarillado de ANDA
24	Beneficio El Trapiche comercial exportadora, S.A. de C.V.	14.00694	-89.54972	Carretera km 67 Santa Ana a Metapán	Beneficiado de café agroindustrial	Tratamiento de aguas mieles aguas negras a fosa séptica	Río Aranchacal o terrenos de riego subsuelo
25	Incassa S.A. de C.V.	14.01472	-89.53833	Carretera km 69 a Metapán cantón Cutumay, Santa Ana	Maquilado prendas de vestir camisas y pantalones.	Aguas negras a 3 fosas sépticas	Subsuelo

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
26	Pastelipan	13.99667	-89.56806	Colonia los pinos 147 barrio Santa Bárbara Santa Ana parque Colón	Panadería industria	Vertido líquido lavado moldes aguas negras	A alcantarillado de aguas negras. Alcantarillado de ANDA
27	Terminal de buses la vencedora	13.99139	-89.56444	16 av. Sur y 11 calle Pte. No. 6. Santa Ana	Terminal abordaje de buses.	Aguas negras	A colector de ANDA
28	Estación de servicio Shell San Antonio	13.98306	-89.57306	Barrio San Antonio calle aldea San Antonio. Santa Ana	Venta de combustible	Aguas negras	A alcantarillado de ANDA
29	Estación shell el molino	13.98472	-89.54722	Calle antigua a San Salvador by pass Santa Ana	Venta de combustible	Aguas negras aguas de lavado	A alcantarillado de ANDA y a quebrada Sinai
30	Estación de servicio Shell Santa Ana	13.98917	-89.55583	Intersección de 11 C. ote. y 5a av. Sur barrio Santa Cruz Santa Ana	Venta de combustible	Aguas negras	A alcantarillado sanitario de ANDA
31	Estación de servicios Texaco El Molino	13.98194	-89.54583	Final 25 av. Sur antigua carretera a Santa Ana	Venta de combustible	Aguas negras	A alcantarillado sanitario

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
32	Estación de servicio Shell el triángulo	13.98556	-89.54750	Diagonal David Granadino y 25 Av. Sur Santa Ana	Venta de combustible servicios	Aguas negras	A alcantarillado de ANDA
33	Estación de servicios Shell Santa María	13.98417	-89.56361	Km 71 autopista S.S. Santa Ana intercepción calle a Chalchuapa	Venta de combustible servicios	Aguas negras a fosa séptica	Subsuelo
34	Ban-ban S.A. de C.V.	13.98968	-89.56182	6a calle poniente entre av. José Matías delgado y fray Felipe de Jesús moraga norte no. 39. Santa Ana	Pastelería producción de pan. Industria	Predigestión enzimática sist. Sedimentación de sólidos y trampas de grasas. Aguas negras.	A quebrada Santa Lucia y alcantarillado de ANDA
35	Taller Didea sucursal Santa Ana	13.98389	-89.56944	Final 25 calle Pte. Y calle aldea San Antonio Santa Ana	Reparación mantenimiento enderezado y pintura de vehículos servicios	Aguas residuales en el áreas de lavado sin tratamiento	A sistema de aguas lluvias
36	Estación de servicios shell Santa Lucia	13.99194	-89.56417	9a calle poniente y av. Moraga sur. Santa Ana	Venta de combustible servicios	Aguas de lavado de lubricentro aguas negras	Quebrada Santa Lucia y alcantarilla de ANDA

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
37	Estación de servicio shell Santa Cruz	13.98833	-89.55278	11 calle oriente y 13 av. Sur barrio Santa Cruz. Santa Ana	Venta de combustible servicios	Aguas negras	A alcantarillado sanitario de ANDA
38	Estación de servicio shell autopista Santa Ana	13.99667	-89.56806	Avenida independencia entre 33 y 35 calle poniente. Santa Ana	Venta de combustible servicios	Aguas negras	Alcantarillado de ANDA
39	Prosabe procesadora salvadoreña de alimentos y bebidas	13.98861	-89.55028	9a calle oriente no. 43-b, barrio San Rafael entre 17 y 19 av. Sur Santa Ana	Elaboración y distribución de alimentos industria	Aguas negras vertido industrial sin previo tratamiento	A alcantarillado sanitario.
40	Calle de acceso a Colegio San José Colonia Solórzano	13.97944	-89.55222	Colonia Solórzano	Tubería A.N., Quebrada de Invierno	Descarga directa	Quebrada de Invierno
41	Granja de Pollos Ibáñez	14.00836	-89.55453	Lotificación Santa Marta # 4	Matado, embolsado de Pollos, se recoge en trampas y se deposita en río Zarco	Descarga directa	Río Zarco, Tubería de Diámetro 8"

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
42	Armando Quintanilla	14.01042	-89.55517	Lotificación Santa Anita Calle Principal # 5	Sistema en tubería con descarga a Qda efluente de río Zarco	Descarga directa	Qda. Efluente río Zarco, Tubería de Diámetro 6"
43	Quebrada Los Pericos	13.99911	-89.54867	Sobre Puente de unión de 11AV Nte Y13av Nte	Quebrada de Invierno	Descarga directa	Contaminación nacimiento Apanteos
44	Sr. Guillermo Hernández	13.97722	-89.55064	Colonia Zaldaña	Casa de Habitación	Fosa séptica con pozo de absorción	Sub - Suelo
45	María Celia Funes de Castillo	13.97667	-89.54978	Colonia Zaldaña Calle Principal	Casa de Habitación	Fosa séptica con pozo de absorción	Sub - Suelo
46	Julia Aguilar	13.97619	-89.54997	Colonia Zaldaña	Casa de Habitación	Fosa séptica con pozo de absorción	Sub - Suelo
47	Alma Lorena Estrada	13.97608	-89.54928	Colonia Zaldaña	Casa de Habitación	Fosa séptica con pozo de absorción	Sub - Suelo
48	Rosa Elvira Mancia de Hernández	13.97669	-89.54892	Colonia Zaldaña	Casa de Habitación	Fosa séptica con pozo de absorción	Sub - Suelo
49	Edith Candelaria Galicia Rivas	13.97600	-89.55222	Colonia San Mauricio	Casa de Habitación	Fosa séptica con pozo de absorción	Sub - Suelo



No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
50	Elba Nohemí Martínez	13.97572	-89.55258	Colonia San Mauricio	Casa de Habitación	Fosa séptica con pozo de absorción	Sub - Suelo
51	Cesar Corleto	14.00161	-89.56444	12ª C.PTE No 33 Barrio San Juan	Casa de Habitación	Fosa séptica con pozo de absorción	Sub - Suelo
52	Raúl Cruz	14.00758	-89.56458	Colonia Jardines de Santa Lucía Polígono 20 -# 1	Casa de Habitación	Fosa séptica con pozo de absorción	Sub - Suelo
53	Beatriz Marroquín	14.01075	-89.56525	Pje. Los Aguacates Lotificación Don Bosco	Casa de Habitación	Fosa séptica con pozo de absorción	Sub - Suelo
54	Reina Rivera	14.00828	-89.55389	Final 6ª AV NTE., Colonia Santa Marta 5	Casa de Habitación	Fosa séptica con pozo de absorción	Sub - Suelo
55	Graciela González	14.01364	-89.54133	Urbanización El Pedregal #2	Casa de Habitación	Fosa séptica con pozo de absorción	Sub - Suelo
56	INFOCA , Maquila de Concentrado	14.01836	-89.53653	Colonia Las Margaritas # 1	Maquila de Concentrado	Fosa séptica con pozo de absorción	Sub - Suelo
57	Gloria de Landaverde	13.97736	-89.55097	Colonia Calderón	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
58	María Dolores Chávez	13.98442	-89.55078	Colonia Amaus	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
59	Oscar Mancia (taller obra de banco)	13.65097	-89.55072	Colonia Amaus	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
60	José Serrano	13.98442	-89.54922	Colonia Villa Nueva	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
61	Juan Pérez	13.98400	-89.54864	Colonia Villa Nueva	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
62	Dolores Ramírez	13.98336	-89.54997	Barrio El Ángel	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
63	Iglesia Belén	13.98308	-89.55119	Barrio El Ángel	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
64	Blanca Estela Salazar	13.98281	-89.55167	Calle Loma Alta	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
65	Juan Pérez	13.97342	-89.55983	Colonia los Santos	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
66	Rosita Alvires	13.97342	-89.54967	Colonia los Santos	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
67	Martin Urías	13.99706	-89.55131	13 AV. Norte calle a Apanteos	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub-Suelo y Qda de Invierno
68	Ana María Velis	13.99764	-89.55001	13 AV. Norte calle a Apanteos	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub-Suelo y Qda de Invierno
69	Adela Henríquez	13.99806	-89.54967	13 AV. Norte calle a Apanteos	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub-Suelo y Qda de Invierno
70	Magdalena Rivas	13.99972	-89.54792	13 AV. Norte calle a Apanteos	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub-Suelo y Qda de Invierno
71	Marina Valdivieso	14.00161	-89.56444	12ª C.PTE No3 Barrio San Juan	Tienda, Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
72	Carlos Mancias	14.00200	-89.56422	Final 18 A.V. NTE, Comunidad La Dalia	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
73	Reina Flores	14.00153	-89.56331	Comunidad La Dalia Pje El Progreso No 1	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
74	Juana Hernández	14.00253	-89.56431	Colonia La Realidad	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
75	Antonio Ruano	14.00728	-89.56478	Colonia Jardines de Santa Lucia	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
76	Marta Rosales	14.00950	-89.56631	Calle Principal Col. Santa Eduvigez	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
77	Nelson Esquivel	14.00442	-89.56189	Colonia La Realidad # 221	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
78	Marta Coto	14.00800	-89.55219	Colonia El Progreso, calle a Tenería El Búfalo	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
79	Carmen Alfaro	14.01083	-89.55728	Lotificación Santa Anita Calle Principal # 22	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
80	María Zometa	14.01106	-89.55864	Lotificación Santa Anita Calle Principal # R-5	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
81	Berta Borja	14.01119	-89.55969	Lotificación Santa Anita Calle Principal # 21	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
82	Douglas Orellana	14.01219	-89.55953	Jardines de Santa Anita # 28	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
83	Gloria García	14.01144	-89.55772	Lotificación Santa Anita # 16	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
84	José Laínez	14.01156	-89.55358	Colonia La Realidad, # 292	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
85	Julio Jiménez	14.02086	-89.54497	Colonia San Carlos	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
86	Graciela González	14.02225	-89.54636	Calle Principal Colonia Lobato # 54	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
87	Juan Ortega	14.02300	-89.54953	Calle Principal Colonia Lobato # 16	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
88	Víctor Cruz	14.02414	-89.55008	Calle Principal Colonia Lobato # 1	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
89	Verónica Flores	14.02092	-89.54406	Calle de acceso a Colonia Lobato #6	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
90	Dora Alicia Retana	14.02297	-89.54200	Calle Principal Colonia Tierras Baratas I ,# 1	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin tratamiento	Sub - Suelo
91	Socorro Flores	14.02397	-89.54042	Calle Principal	Casa de Habitación	Letrina de fosa, sin	Sub- Suelo

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
				Colonia Tierras Baratas I ,Pasaje El Tamarindo #1		tratamiento	
92	Beneficio Cantarrana	13.97690	-89.58420	Colonia 10 de octubre, carretera que conduce a Sonsonate	Beneficio de café. Agroindustria	Poseen clarificador de flujo horizontal, sin embargo tienen el problema que la canaleta de aguas negras pasa a través del terreno del beneficio, por lo que el agua escurrida de los patios, desemboca en la quebrada La Barranca, y posteriormente en quebrada Sta. Lucía.	Río Suquiapa

No	NOMBRE	COORDENADAS		UBICACIÓN	ACTIVIDAD	TRATAMIENTO EXISTENTE	SITIO DE DESCARGA EFLUENTE
		NORTE	ESTE				
93	Peletería San Miguel	13.99180	-89.52830	Cantón Natividad, Santa Ana.	Agroindustria	Descarga de agua a la quebrada conocida como “Quebrada Seca”, con fuerte mal olor y producción de abundante espuma	Río Suquiapa
94	Tenería Dipolsa S.A. de C.V.	14.00440	-89.53670	Carretera a Metapán. Ubicada después de urbanización San Ernesto.	Tenería	Aguas residuales	Río Suquiapa
95	Beneficio El Sauce	14.01180	-89.53900	Carretera a Metapán Km 68, al lado derecho de la vía.	Agroindustria	Aguas residuales	Río Suquiapa
96	Tenería La Sirenita	13.99350	-89.52340	Carrt. San Luis, Cantón Natividad.	Tenería	Aguas residuales Quebrada Chigüillo.	Río Suquiapa

### 3.7.1.2. METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN DE CALIDAD DE AGUA

En esta sección se describe la metodología de evaluación de la calidad de agua que se ha utilizado en la presente investigación, la cual se ha realizado por medio del cálculo del índice de calidad de agua canadiense (CCMEW-WQI) y evaluaciones de aptitud de usos de agua, sin embargo se describe además el cálculo del índice de calidad de agua de Brown ya que más adelante en los apartados 3.8.5 y 3.8.6 se reportan resultados de evolución temporal de la calidad de agua en donde se ha utilizado este índice para su categorización debido a que es el índice con el que usualmente reporta la calidad de agua el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales en sus diagnósticos anuales.

#### A. ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA (ICA BROWN Y CCME-WQI).

- **ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA. ICA (BROWN)**

Para calcular el Índice de Brown se utiliza un productorio exponencialmente ponderado de los subíndices (ICA), según la ecuación:

Ec. 34

$$ICA = \prod_{i=1 \rightarrow 9} Sub_i^{w_i}$$

Donde:

- $w_i$ : Pesos relativos asignados a cada parámetro ( $Sub_i$ )
- $Sub_i$ : Subíndice del parámetro  $i$ .

La interpretación del resultado se expresa en la tabla 18.

Tabla 18 Interpretación del valor de índice de calidad de agua de Brown

Fuente: Diagnóstico de la calidad de aguas superficiales DGOA/MARN, 2007.

Calidad de Agua	Valor ICA
Excelente	91 a 100
Buena	71 a 90
Regular	51 a 70



<b>Calidad de Agua</b>	<b>Valor ICA</b>
Mala	26 a 50
Pésima	0 a 25

Para la determinación del ICA se deben medir 9 parámetros fisicoquímicos, los cuales son:

- Coliformes Fecales (en NMP/100 ml)
- pH (en unidades de pH)
- Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días (DBO5 en mg/ L)
- Nitratos (NO3 en mg/L)
- Fosfatos (PO4 en mg/L)
- Cambio de la Temperatura (en °C)
- Turbidez (en FAU)
- Sólidos disueltos totales (en mg/ L)
- Oxígeno disuelto (OD en % saturación)

Cada parámetro es cuantificado de acuerdo a los protocolos de muestreo adecuados en las unidades de medida propios. Para cada parámetro existe un gráfico que representa en el eje de las ordenadas la concentración de la muestra y en el eje de las abscisas su respectivo Subíndice ICA (Sub  $i$ ). Dichos subíndices son leídos de acuerdo a la gráfica correspondiente que los intercepta y son exponencialmente ponderados de acuerdo a los correspondientes pesos relativos de cada parámetro.

Tabla 19 Ponderaciones y pesos de subparámetros para la evaluación del ICA-Brown

Fuente: Diagnóstico de la calidad de aguas superficiales DGOA/MARN, 2007

<b>Parámetro Sub<math>i</math></b>	<b>Peso relativo (<math>w_i</math>)</b>
Coliformes Fecales	0.15
pH	0.12
DBO <sub>5</sub>	0.10
Nitratos	0.10

Parámetro Sub <sub>i</sub>	Peso relativo (w <sub>i</sub> )
Fosfatos	0.10
Temperatura	0.10
Turbidez	0.08
Sólidos disueltos Totales	0.08
Oxígeno Disuelto	0.17

El cálculo final del ICA consiste en el productorio exponencialmente ponderado de los subíndices (ICA) previamente leídos de las gráficas de su correspondiente concentración por parámetro.

- **ÍNDICE CANADIENSE DE CALIDAD DE AGUAS (CCME WQI)**

El índice de calidad de agua del CCME toma la forma:

Ec. 35

$$CCMEWQI = 100 - \left( \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$$

A continuación se definen las variables que componen al índice de calidad de agua CCME-WQI:

$F_1$  representa el porcentaje de las variables que se apartan de sus objetivos al menos una vez, con relación al número total de variables medidas:

Ec. 36

$$F_1 = \left( \frac{\text{Número de variables que fallan}}{\text{Número total de variables}} \right) \times 100$$

$F_2$  representa el porcentaje de tests individuales que fallan:

Ec. 37

$$F_2 = \left( \frac{\text{Número de tests que fallan}}{\text{Número total de tests}} \right) \times 100$$

$F_3$  es una función límite asintótica que escala la suma normalizada de las excursiones respecto de los objetivos (*nse*) en el intervalo entre 0 y 100.

Ec. 38

$$F_3 = \left( \frac{nse}{0,01nse + 0,01} \right)$$

La cantidad colectiva por la cual los tests individuales están fuera de conformidad es calculada sumando los desvíos de los tests individuales respecto de sus objetivos, dividido el número total de test realizados. La variable *nse* se expresa como:

Ec. 39

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^n desvío_i}{\text{Número de tests}}$$

Para el caso en que el valor del test excede el objetivo:

Ec. 40

$$desvío_i = \left( \frac{\text{Test que falla}_i}{\text{Objetivo}_j} \right) - 1$$

Para los casos en que el valor del test no debe caer por debajo del objetivo:

Ec. 41

$$desvío_i = \left( \frac{\text{Objetivo}_j}{\text{Test fallado}_i} \right) - 1$$

Para los casos en que el objetivo es cero:

Ec. 42

$$desvío_i = \text{Test fallado}_i$$

Los desvíos son equivalentes al número de veces que una concentración (medición) es mayor que (o menor que) el objetivo.

El criterio para clasificar aguas de diferente calidad se describen a continuación en la tabla 20.

Tabla 20 Criterio para clasificación de calidad de aguas

Fuente: (Ali Khan, Paterson, & Khan, 2004)

<b>Clasificación</b>	<b>Valor-WQI</b>	<b>Descripción</b>
Excelente	95-100	Agua está protegido con una virtual ausencia de amenaza; condiciones muy cercanas a los niveles naturales; estos valores de índice se pueden obtener si todas las mediciones están dentro de los objetivos prácticamente todo el tiempo.
Muy Buena	89-94	La calidad del agua está protegida con una ligera presencia de amenaza; condiciones próximas a niveles naturales.
Buena	80-88	Agua está protegida con pequeño grado de amenaza; las condiciones a veces se apartan de los niveles naturales o deseables.
Regular	65-79	Agua está protegida, pero en presencia de amenaza o afectación; las condiciones a menudo se apartan de los niveles naturales o deseables.
Marginal	45-64	Agua frecuentemente amenazada; condiciones casi siempre se apartan de niveles deseables o naturales.
Mala	0-44	Agua amenazada; condiciones se apartan de niveles deseables o naturales.

## **B. EVALUACIÓN DE APTITUDES DE USO DE AGUA (NORMATIVAS NACIONALES.)**

Las evaluaciones de las aptitudes de uso de agua son: Agua cruda para potabilizar, Agua para riego, Agua apta para el contacto humano.

- **EVALUACIÓN DE APTITUD DE USO DE AGUA CRUDA PARA POTABILIZAR.**

Según el Decreto No. 51 (Norma Nacional publicada en el Diario Oficial el 16 de noviembre de 1987) los rangos para parámetros de calidad de agua deseable para agua cruda para potabilizar por métodos convencionales se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 21 Normativa de agua cruda para potabilizar, Decreto 51, El Salvador.

Fuente: Diagnóstico de la calidad de aguas superficiales DGOA/MARN, 2007.

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>RANGO</b>
DBO <sub>5</sub>	mg/L	De 3 a 4
Coliformes fecales	NMP/100 ml	<5,000
Oxígeno Disuelto	mg/L	4 - 6.5
pH	U de pH	6.5 a 9.2
Cloruros	mg/L	50 a 250
Color aparente	unidades de Co-Pt	20 a 150
Turbidez	FAU	10 a 250
Fenoles	mg/L	<0.005

- **EVALUACION DE APTITUD DE USO DE AGUA PARA RIEGO.**

La calidad de agua usada para riego es determinante para la producción y calidad en la agricultura, mantenimiento de la productividad del suelo de manera sostenible y protección del medio ambiente. Por otro lado, es importante hacer notar que el alto uso de fertilizantes y plaguicidas para aumentar o mantener el rendimiento de los productos agrícolas, incide directamente en el deterioro de la calidad de los recursos hídricos. Según el Decreto No. 51 (Diario Oficial el 16 de noviembre de 1987) los rangos para parámetros de calidad de agua deseables para riego se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22 Normativa de agua para riego, Decreto 51, El Salvador.

Fuente: Diagnóstico de la calidad de aguas superficiales DGOA/MARN, 2007.

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>RANGO</b>
Conductividad	$\mu$ Siemens/cm	250 a 750
RAS*	Adim	0-10
Sodio	meq/L	0 a 138
Boro	mg/L	0.5 a 2.0
Cloruros	mg/L	<195

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>RANGO</b>
Sulfatos	mg/L	<200
pH	U de pH	6.5 a 8.4

\*Cálculo del RAS (Relación de Adsorción de Sodio): El RAS brinda una idea de la cantidad de sodio presente en el agua de riego en relación con otros cationes y se calcula mediante la siguiente ecuación. A partir de ese dato se puede estimar la reducción de la infiltración en el sistema.

Ec. 43

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

### 3.7.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se resumen los resultados de las evaluaciones tanto del índice de calidad de agua como de las evaluaciones de aptitudes de uso de agua para potabilizar y para riego, de forma tabular y en mapas, para poder contrastar la información con su ubicación espacial.

#### 3.7.2.1. CALIDAD DE AGUA

El proceso de evaluación de la calidad de agua en cada sitio debe de contemplar la medición de una matriz de parámetros de cada una de las tipologías de contaminación antes mencionadas.

Los resultados de esta evaluación pueden observarse claramente de manera tabular o geográfica en la Tabla 23 y en los mapas 22, 23 y 24 respectivamente, en general la calidad de las aguas subterráneas presenta calidad buena en los pozos profundos sin embargo en el mapa 22 puede apreciarse que existe una parte del acuífero somero que tiene una interacción directa entre el recurso superficial y subterráneo en donde la calidad de agua de

los pozos excavados es regular y no posee aptitud de uso de agua para riego o potabilización.

También dentro de las evaluaciones de calidad de agua en nuestro país, se contempla el cumplimiento de las normativas nacionales del Decreto 51 (1987): para Riego y para Agua cruda para Potabilización, los resultados de dichas evaluaciones se pueden apreciar de manera puntual en la Tablas 24 y 25 respectivamente y en los mapas 25 y 26 respectivamente, en dichas tablas se resalta en color amarillo los parámetros fuera de norma.

Para el caso de los sitios muestreados sobre el río Suquiapa (A01SUQUI, A04SUQUI Y A23SQUI), el promedio de calificación a partir del índice de calidad de agua canadiense CCME-WQI fue de 31.9 por lo que posee una calificación de “Mala” lo cual es bastante cercano a la realidad debido a que la contaminación ha sido verificada en estudios precedentes y éstos coinciden con los resultados del índice de calidad de agua de Brown evaluado por el MARN en años anteriores.

Para el caso de las muestras tomadas en el Lago de Coatepeque en el año 2012 los resultados promedios del índice CCME-WQI para los sitios (Centro, Fuente Termal, Puerto Madero y Balneario Constitución) fue de 54.85, lo cual lo califica como “Regular”, es importante notar que esta agua no es apta para potabilizar ni para riego debido al alto contenido de sales provenientes de aguas termales y de origen volcánico, siendo los parámetros boro, cloruros, sulfatos entre otros los que en general fueron fallidos.

Para el caso de las aguas de pozos en promedio el índice CCME-WQI nos brinda resultados generales de agua tipo “Buena a excelente” siendo el valor promedio de 94.43, sin embargo al realizar una estratificación de estos resultados podemos entender mejor las características que la categorizan, de tal forma que tenemos que para los pozos de ANDA (SA-01, SA-02, SA-03, SA-08, SA-09, SA-10, SA-11, SA-12, SA-13 y SA-14) el valor promedio del índice fue de 98.97, siendo el único pozo con un valor fuera de norma el pozo SA-09 con valores de nitratos de 81.87 ppm fuera de norma. Para el caso de los pozos

profundos en general el valor promedio del índice fue de 98.61 que además de los pozos de ANDA incluye otros pozos de comunidades tales como Planta de Bombeo Colonia Panadez, Colonia Avilús, Colonia Jardines de Tecana, Finca Piedra Pacha, entre otras. Para el caso de los pozos excavados, en general el promedio del índice CCMEWQI fue de 90.5, sin embargo para el caso de los pozos SA-04, SA-18, SA-19, SAGRANJA y SAN-01 que corresponden al acuífero libre, poroso de interacción directa y superficial, el índice promedio fue de 81.12, siendo los parámetros Coliformes fecales, Conductividad, Sodio, pH los que en general fueron fallidos, y este es el área donde puede haber riesgo de contaminación por uso de esta agua con fines directos o indirectos de consumo humano.



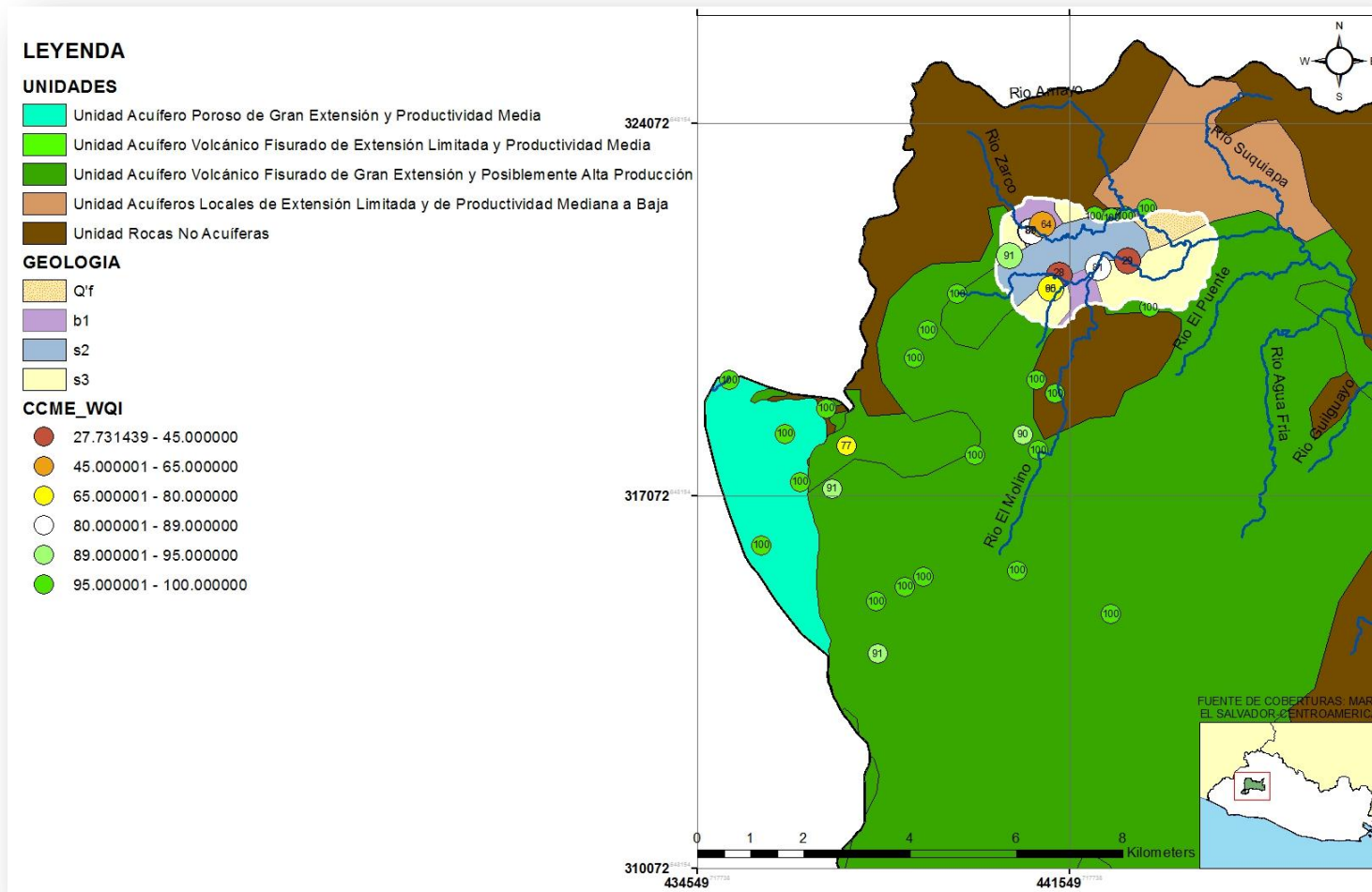
## A. ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA (CCME-WQI)

Tabla 23 Evaluación de índice de calidad de agua canadiense (CCME-WQI) en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

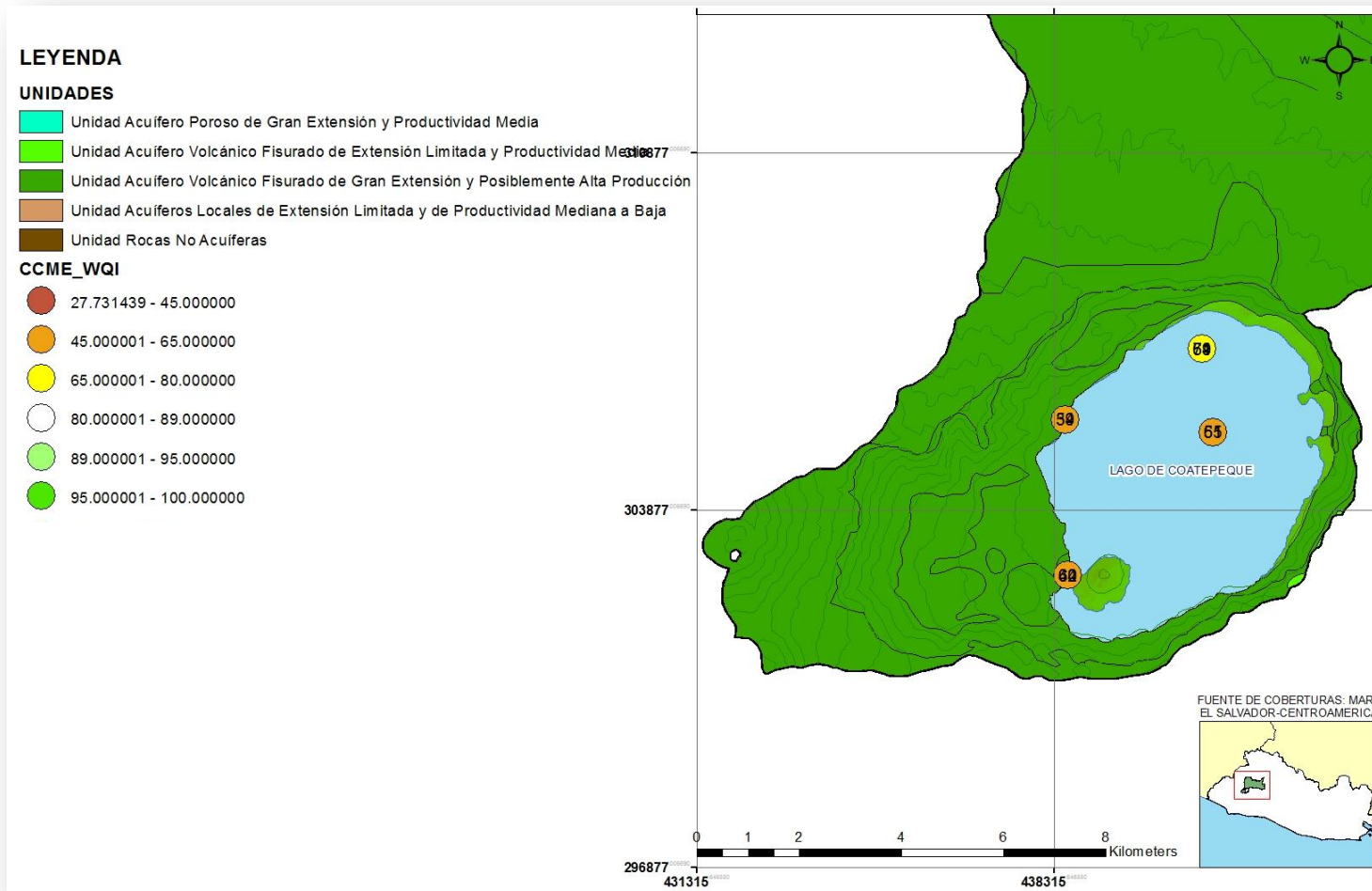
Fuente: Elaboración propia.

Station Name	Fecha	Latitud	Longitud	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	Suma de las pruebas fallidas	Suma de Excursiones Normalizadas (nse)	CCME WQI	Clasificación
A01SUQUI	30/04/2011	14.01320	-89.54236	53.3	53.3	99.9	13883.67	925.58	27.7	Mala
A04SUQUI	30/04/2011	14.01618	-89.53097	50.0	50.0	99.9	10238.19	731.30	29.4	Mala
A23SUQUI	27/04/2011	14.03769	-89.30642	35.7	35.7	93.7	207.39	14.81	38.6	Mala
CENTRO	21/09/2012	13.86936	-89.54197	57.1	57.1	26.7	5.11	0.37	50.9	Marginal
L2-CONSTITUCION	27/09/2012	13.88413	-89.54395	53.8	53.8	20.3	3.31	0.25	54.5	Marginal
L2-F-TERMAL	14/09/2012	13.84400	-89.56812	46.2	46.2	24.5	4.22	0.32	59.7	Marginal
L2-PTO-MADERO	14/09/2012	13.87165	-89.56870	53.8	53.8	21.5	3.55	0.27	54.3	Marginal
SA-01	14/03/2008	13.95947	-89.56958	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-02	14/03/2008	13.98178	-89.55742	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-03	14/03/2008	13.99467	-89.54667	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-04	14/03/2008	14.01017	-89.54422	11.1	11.1	5.7	0.54	0.06	90.4	Muy Buena
Sa04-12MX	09/10/2012	14.01013	-89.54428	41.7	41.7	10.0	1.33	0.11	65.5	Regular
SA-05	14/03/2008	14.02253	-89.53664	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-06	14/03/2008	14.02219	-89.53372	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-07	14/03/2008	14.02381	-89.52747	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-08	26/03/2008	13.99228	-89.54353	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-09	26/03/2008	13.98536	-89.54906	11.1	11.1	8.3	0.82	0.09	89.7	Muy Buena

Station Name	Fecha	Latitud	Longitud	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	Suma de las pruebas fallidas	Suma de Excursiones Normalizadas (nse)	CCME WQI	Clasificación
SA-10	26/03/2008	13.98275	-89.54636	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-11	26/03/2008	13.96225	-89.55001	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-12	26/03/2008	13.95492	-89.53367	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-13	26/03/2008	13.95694	-89.57453	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-14	26/03/2008	13.96111	-89.56628	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-15	27/03/2008	13.98542	-89.59047	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-16	27/03/2008	13.99447	-89.60025	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-17	27/03/2008	13.94800	-89.57428	11.1	11.1	1.1	0.10	0.01	90.9	Muy Buena
SA-18	27/03/2008	14.01994	-89.54775	11.1	11.1	16.7	1.80	0.20	86.8	Buena
Sa18MX-12	09/10/2012	14.01997	-89.54770	7.7	7.7	15.8	2.44	0.19	88.9	Buena
SA-19	27/03/2008	14.01567	-89.55153	11.1	11.1	3.2	0.30	0.03	90.7	Muy Buena
SA-20	27/03/2008	13.98972	-89.58334	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-21	31/03/2008	13.97608	-89.58219	11.1	11.1	1.4	0.13	0.01	90.9	Muy Buena
SA-22	31/03/2008	14.00300	-89.56578	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-23	31/03/2008	13.99833	-89.56803	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-24	09/04/2008	13.96644	-89.59456	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SA-25	09/04/2008	13.97722	-89.58789	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
Sagranjamx-12	09/10/2012	14.01373	-89.53600	8.3	8.3	30.2	5.19	0.43	81.3	Buena
SAN-01	20/06/2005	14.02199	-89.54576	42.9	42.9	12.7	1.01	0.14	64.0	Marginal
SAN-02	20/06/2005	14.02347	-89.53134	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SAN-04	20/06/2005	14.00794	-89.52701	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SAN-08	17/02/2005	14.01025	-89.56059	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	100.0	Excelente
SAN-09	17/02/2005	13.98428	-89.57982	28.6	28.6	1.2	0.09	0.01	76.7	Regular

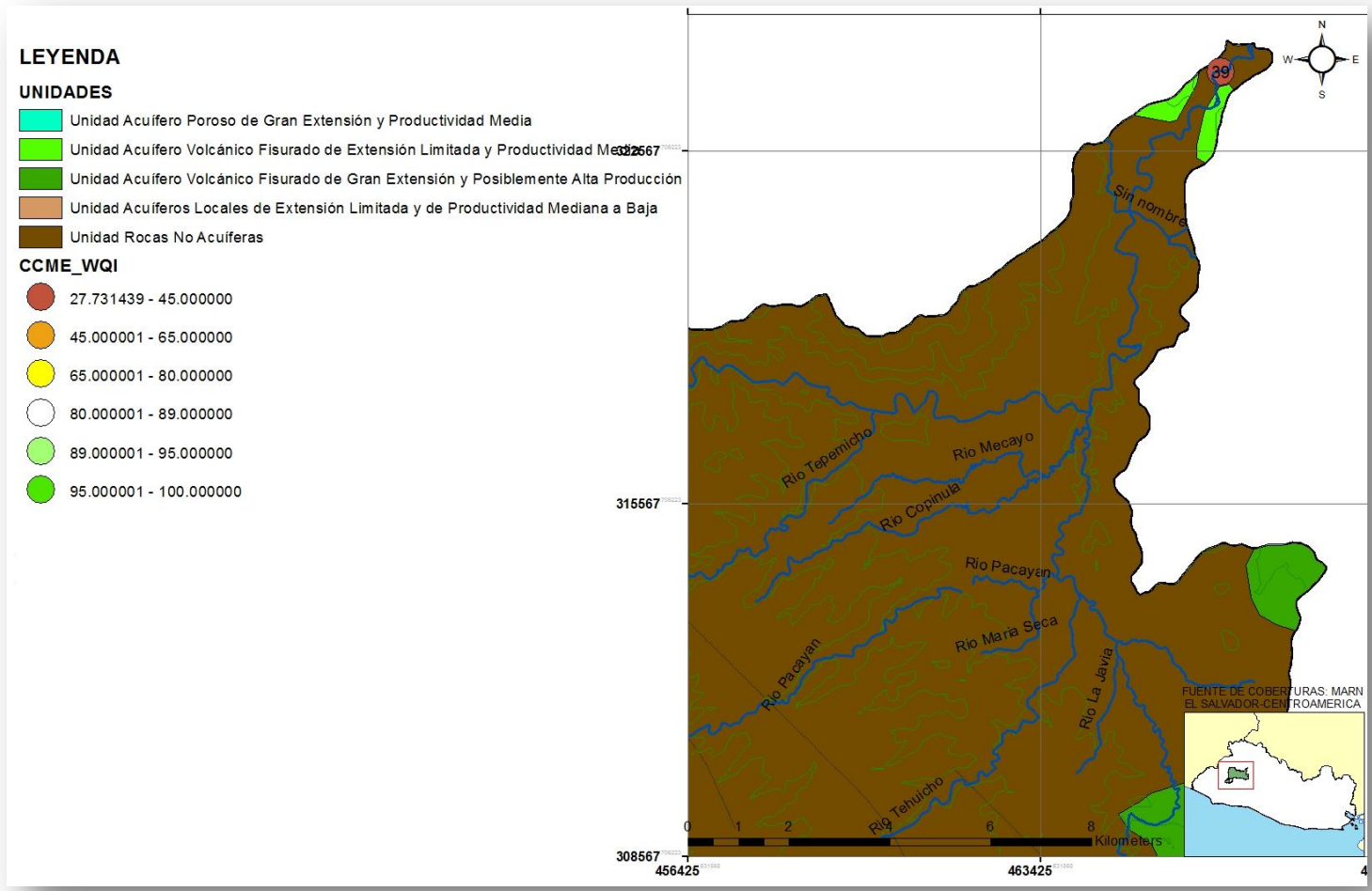


Mapa 22 Índice de calidad de agua canadiense (CCME-WQI) en el área del acuífero de Santa Ana  
Fuente: Elaboración propia.



Mapa 23 Índice de calidad de agua canadiense (CCME-WQI) en el área de recarga (Lago de Coatepeque)

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 24 Índice de calidad de agua canadiense (CCME-WQI) en el área de descarga del río Suquiapa  
 Fuente: Elaboración propia.

## B. APTITUD DE RIEGO

En la tabla 24 se muestra la evaluación de aptitud de uso de agua para riego, normado en el decreto 51, 1987 de la república de El Salvador. En color amarillo se muestran los valores fuera de norma además puede apreciarse el resultado de la evaluación en el mapa 25 con su ubicación espacial.

Tabla 24 Evaluación de aptitud de uso de agua para riego en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

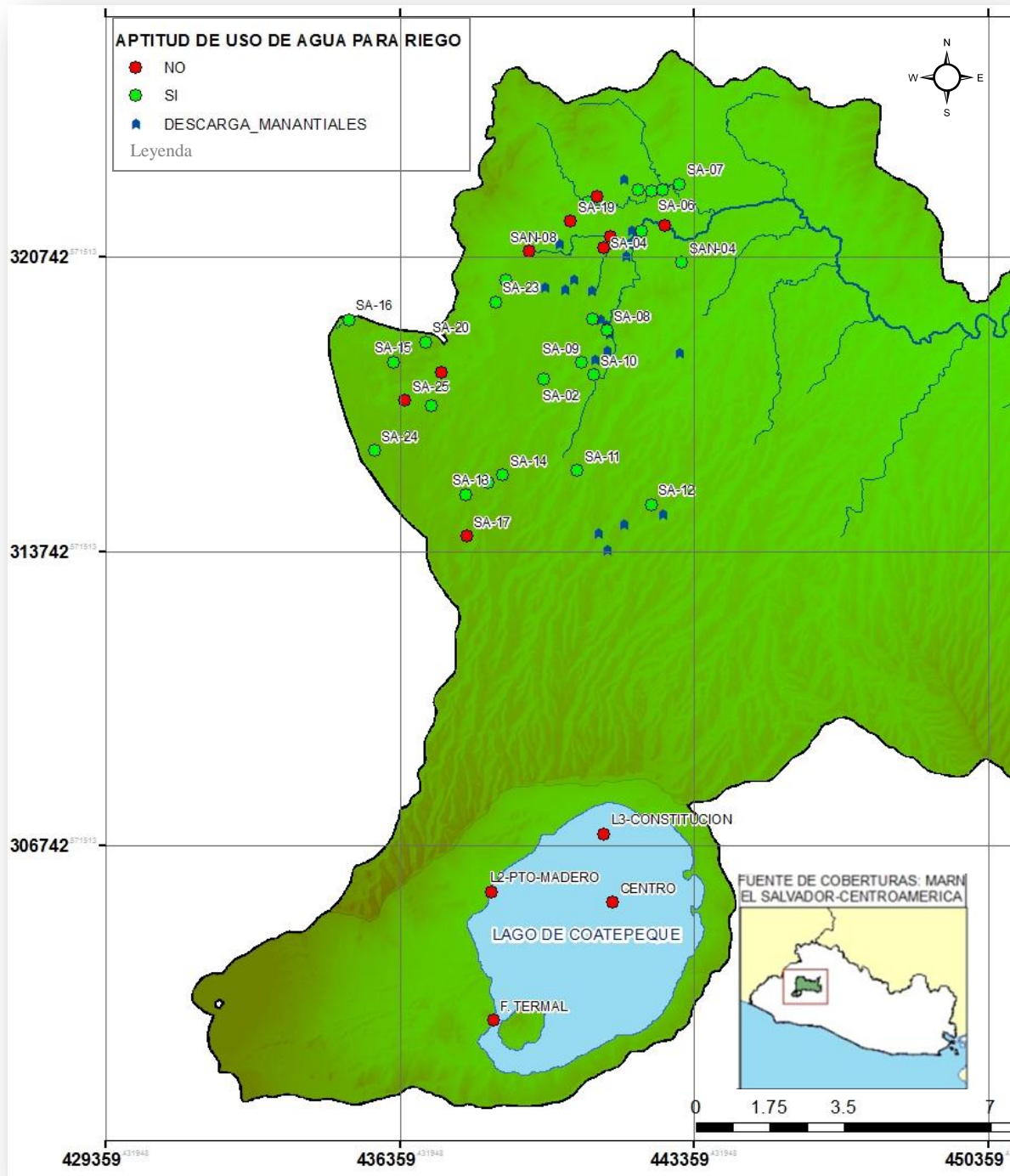
Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios. Evaluación de cumplimiento: Elaboración propia

MUESTRAS	Fecha	Latitud	Longitud	Boro	Cloruros	Coliformes fecales	Conductividad	P_Sodio	pH	RAS	Sulfatos	APTITUD
Unidad				mg/L	mg/L	NMP/100 ml	uS/cm	%	u de pH	adim	mg/L	
Norma				2	195	1000	750	60	6.5 a 8.4	0 a 10	196.93	
A01SUQUI	30/04/2011	14.01320	-89.54236	0.1	31.218	13824400	570.2	28.0016317	5.44	1.203118358	37.9	NO
A04SUQUI	30/04/2011	14.01618	-89.53097		31.556	10210000	494.2	31.71567536	6.14	1.264336048	38.2	NO
A23SUQUI	27/04/2011	14.03769	-89.30642		26.03	202525	416	34.15065913	7.3405	1.301502583	39.625	NO
CENTRO	21/09/2012	13.86936	-89.54197	2.05	307.01		2595	75.1637557	6.83	11.9786238	270	NO
F. TERMAL	08/08/2006	13.84400	-89.56812	1.2	307.01		2600	68.0750264	7.02	8.4399845	270	NO
L1-CENTRO-COAT	14/09/2012	13.86936	-89.54197	2.7	304.76	2	1646	60.9975674	9	6.30302801	205.78	NO
L1-CONSTITUCION	14/09/2012	13.88413	-89.54395	2.4	305.79	2	1618	59.446776	9.1	5.83518315	201.03	NO
L1-F-TERMAL	14/09/2012	13.84400	-89.56812	3.6	363.64	17000	1769	65.1986434	8.8	7.2260555	183.44	NO
L1-PTO-MADERO	14/09/2012	13.87165	-89.56870	0.4	307.86	35000	1610	60.6369865	9.1	6.17330513	205.6	NO
L2-CENTRO-COAT	21/09/2012	13.86936	-89.54197	2.85	302.69	2	1575.5	67.7288941	9.1	8.2690074	205.38	NO
L2-CONSTITUCION	21/09/2012	13.88413	-89.54395	2.9	302.69	2	1580	67.1293016	9.1	8.02791399	214.38	NO
L2-F-TERMAL	21/09/2012	13.84400	-89.56812	2.9	333.68	400	1689	69.8077725	8.6	9.03680125	194.84	NO
L2-PTO-MADERO	21/09/2012	13.87165	-89.56870	3	301.66	200	1587.5	68.6862019	9.1	8.69284371	208.44	NO
L3-CONSTITUCION	27/09/2012	13.88413	-89.54395	0.32	307.86	2	1562	55.7349242	8.22	4.91734703	21.74	NO

MUESTRAS	Fecha	Latitud	Longitud	Boro	Cloruros	Coliformes fecales	Conductividad	P_Sodio	pH	RAS	Sulfatos	APTITUD
Unidad				mg/L	mg/L	NMP/100 ml	uS/cm	%	u de pH	adim	mg/L	
Norma				2	195	1000	750	60	6.5 a 8.4	0 a 10	196.93	
SA-01	14/03/2008	13.95947	-89.56958	0.07	22.72	2	337	30.5024842	7.5	1.02581719	32.28	SI
SA-02	14/03/2008	13.98178	-89.55742	0.09	20.97	1	339	30.2813012	7.24	0.99478168	25.98	SI
SA-03	14/03/2008	13.99467	-89.54667		20.97	1	335	31.9351097	7.32	1.07969013	25.68	SI
SA-04	14/03/2008	14.01017	-89.54422	1.01	55.93	2.2	688.8	19.0188453	7.81	0.73317545	71.2	SI
Sa04-12MX	09/10/2012	14.01013	-89.54428	0.102	69.03	79	1028	21.1498824	6.86	0.89724233	73.72	NO
SA-05	14/03/2008	14.02253	-89.53664	0.33	31.46	1	347	20.9346284	6.83	0.62225834	20.04	SI
SA-06	14/03/2008	14.02219	-89.53372	0.24	13.98	3.6	244	21.9101294	6.77	0.55523162	4.39	SI
SA-07	14/03/2008	14.02381	-89.52747	0.22	15.73	1	436	19.6730101	7.32	0.67980106	8.87	SI
SA-08	26/03/2008	13.99228	-89.54353	0.71	87.38	2	480	46.7179664	7.16	1.94920376	24.84	SI
SA-09	26/03/2008	13.98536	-89.54906	0.1	20.97	2	348	30.465914	7.13	0.86345569	33.84	SI
SA-10	26/03/2008	13.98275	-89.54636	0.24	17.48	2	305	21.3317105	7.34	0.61799336	23.88	SI
SA-11	26/03/2008	13.96225	-89.55001	1.8	16.6	2	295	27.4058959	7.34	0.7807423	12.96	SI
SA-12	26/03/2008	13.95492	-89.53367	1.15	45.44	2	376	47.1646839	7.56	1.74587658	15.54	SI
SA-13	26/03/2008	13.95694	-89.57453	0.42	20.97	2	333	22.4648477	7.3	0.66529165	38.04	SI
SA-14	26/03/2008	13.96111	-89.56628	0.13	16.6	2	313	19.0349239	7.67	0.55166518	33.54	SI
SA-15	27/03/2008	13.98542	-89.59047	0.19	10.49	2	266	18.7030364	6.97	0.47196944	26.1	SI
SA-16	27/03/2008	13.99447	-89.60025	0.13	6.99	1	169.9	29.8359662	7.09	0.63237257	9.36	SI
SA-17	27/03/2008	13.94800	-89.57428	0.13	8.74	1100	233	22.5285625	7.57	0.55532239	19.8	NO
SA-18	27/03/2008	14.01994	-89.54775	0.26	31.46	2800	474	13.4026894	7.32	0.46327123	22.8	NO
Sa18MX-12	09/10/2012	14.01997	-89.54770	0.151	49.81	110	595	21.2297883	7.16	0.88626098	27.67	SI
SA-19	27/03/2008	14.01567	-89.55153	0.18	20.97	1300	620	10.0901203	7.1	0.39989761	12.66	NO
SA-20	27/03/2008	13.98972	-89.58334		8.74	8	262	19.0889704	6.66	0.48179922	19.26	SI
SA-21	31/03/2008	13.97608	-89.58219	0.19	26.22	50	577	10.8043343	6.88	0.3959825	27.48	SI
SA-22	31/03/2008	14.00300	-89.56578	0.18	22.72	2	392	14.5908968	6.69	0.45516378	28.56	SI

MUESTRAS	Fecha	Latitud	Longitud	Boro	Cloruros	Coliformes fecales	Conductividad	P_Sodio	pH	RAS	Sulfatos	APTITUD
Unidad				mg/L	mg/L	NMP/100 ml	uS/cm	%	u de pH	adim	mg/L	
Norma				2	195	1000	750	60	6.5 a 8.4	0 a 10	196.93	
SA-23	31/03/2008	13.99833	-89.56803	0.13	10.49	2	247	25.7907162	7.18	0.67343489	12.66	SI
SA-24	09/04/2008	13.96644	-89.59456	0.07	13.98	2	305	24.0354629	6.86	0.71244059	18.42	SI
SA-25	09/04/2008	13.97722	-89.58789	0.1	5.24	2	159.7	69.5434704	7.87	2.49388778	2.04	NO
Sagranjamx-12	09/10/2012	14.01373	-89.53600	0.176	40.2	140	537	31.5352783	6.55	1.3278183	57.45	SI
SAN-01	20/06/2005	14.02199	-89.54576		65.4875		910	30.9185232	6.24	1.710673085	61.1825	NO
SAN-02	20/06/2005	14.02347	-89.53134		20.8725		417.25	37.07392725	6.655	1.730484638	28.6625	SI
SAN-04	20/06/2005	14.00794	-89.52701		2.93		280	18.16132213	6.64	0.487395253	14.34	SI
SAN-08	17/02/2005	14.01025	-89.56059		46.95		505.5	578.390754	7.03	2.44905418	49.25	NO
SAN-09	17/02/2005	13.98428	-89.57982		55.1		812.3333333	23.41520378	6.47	1.179597105	46.598	NO





Mapa 25 Aptitud de uso de agua para riego en el área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia.

### C. APTITUD DE AGUA CRUDA PARA POTABILIZAR

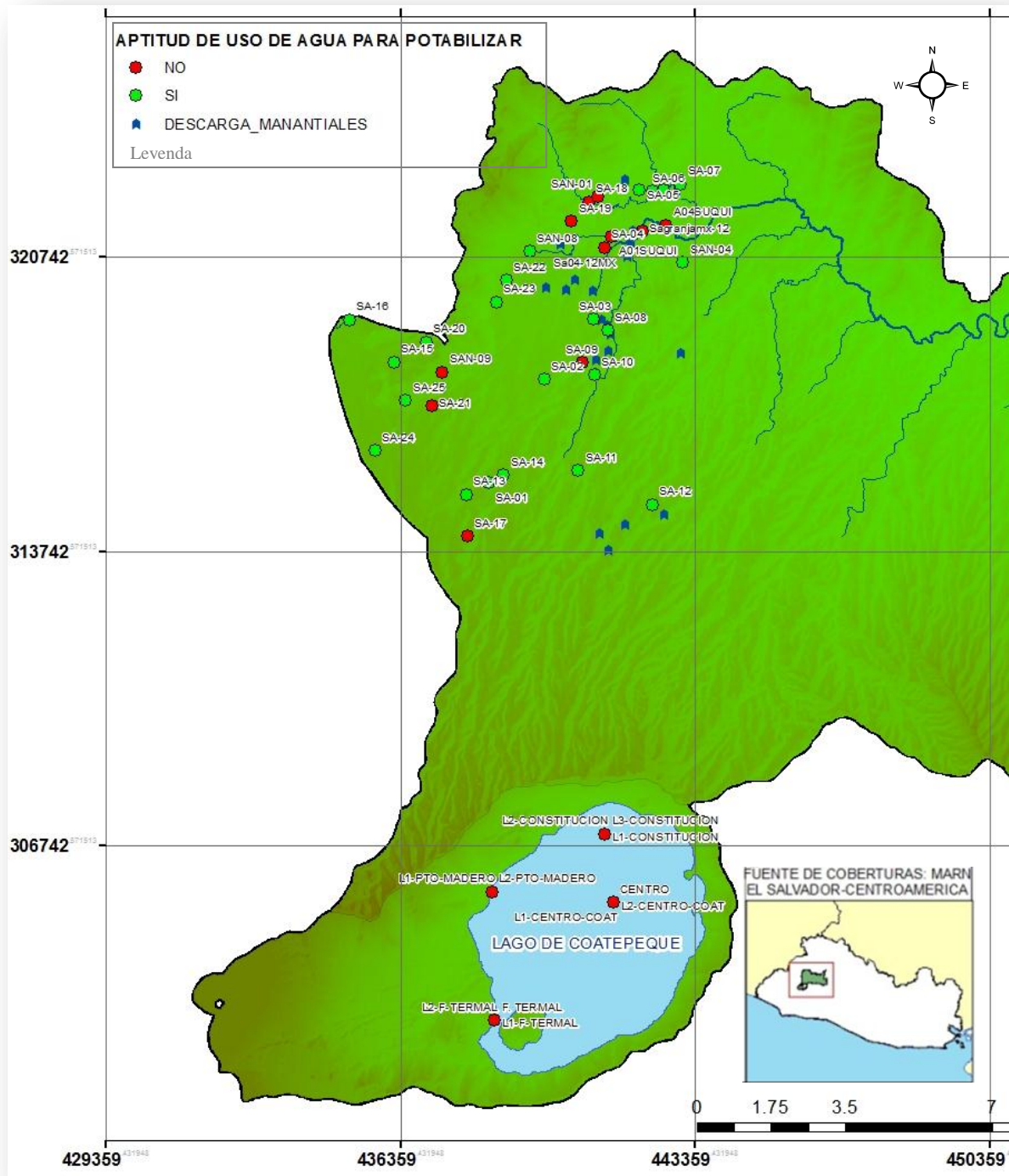
En la tabla 25 se muestra la evaluación de aptitud de uso de agua cruda para potabilizar, normado en el decreto 51, 1987 de la república de El Salvador. En color amarillo se muestran los valores fuera de norma y además puede apreciarse el resultado de la evaluación en el mapa 26 con su ubicación espacial.

Tabla 25 Evaluación de aptitud de uso de agua cruda para potabilizar en base de datos geoquímica del área geográfica de interés

MUESTRAS	Fecha	Latitud	Longitud	Cloruros	Cobre	Coliformes fecales	Color aparente	DBO5	Fenoles	Nitratos	Oxígeno Disuelto	pH	TDS	Turbidez	APTITUD
Unidad				mg/L Cl-	mg/L Cu	NMP/100 ml	Unidades Pt-Co	mg/L O2	mg/L Fenol	mg/L NO3-	mg/L O2	u de pH	mg/L	UNT	
Norma				50 a 250	1	1000	150	4	3.5	45	4 a 6.5	6.5 a 9.2	600	250	
A01SUQUI	30/04/2011	14.01320	-89.54236	31.218	0.018	13824400	939.875	202	4.025	16.836	1.726666667	5.44	1030	670	NO
A04SUQUI	30/04/2011	14.01618	-89.53097	31.556	0.0085	10210000	465	105.54	4.225	16.2	2.8	6.14	408.3	280	NO
A23SUQUI	27/04/2011	14.03769	-89.30642	26.03	0.035	202525	604.25	11.5	4.35	15.725	3.79	7.3405	364.5	35	NO
CENTRO	21/09/2012	13.86936	-89.54197	307.01	0.01		14.5	5	5	4.95	7.277	6.83	1083	7.5	NO
F. TERMAL	08/08/2006	13.84400	-89.56812	307.01	0.01		12	7	4	4	7.02	7.02	1072	34.2	NO
L1-CENT-COA	14/09/2012	13.86936	-89.54197	304.76		2	31.5	2		1.45	6.92	9	1056	7.66	NO
L1-CONSTIT	14/09/2012	13.88413	-89.54395	305.79		2	34	1		0.9	6.66	9.1	1075	10.75	NO
L1-F-TERMAL	14/09/2012	13.84400	-89.56812	363.64		17000	46	2		1.75	5.6	8.8	1165	9.47	NO
L1-PTO-MAD	14/09/2012	13.87165	-89.56870	307.86		35000	36	2		1.4	5.73	9.1	1049.5	7.22	NO
L2-CENT-COA	21/09/2012	13.86936	-89.54197	302.69		2	8.5	2		1.45	5.11	9.1	1068	1.215	NO
L2-CONSTIT	21/09/2012	13.88413	-89.54395	302.69		2	8.5	1		1.55	5.11	9.1	1056.5	1.2	NO
L2-F-TERMAL	21/09/2012	13.84400	-89.56812	333.68		400	26	2		2.15	3.39	8.6	1119.5	3.41	NO
L2-PTO-MAD	21/09/2012	13.87165	-89.56870	301.66		200	14	1		2.9	4.27	9.1	1036	1.155	NO
L3-CONSTIT	27/09/2012	13.88413	-89.54395	307.86		2	3.5	2		1.5	8.02	8.22	1100	1.17	NO
SA-01	14/03/2008	13.95947	-89.56958	22.72		2				19.86		7.5	216.5		SI
SA-02	14/03/2008	13.98178	-89.55742	20.97		1				22.08		7.24	261		SI
SA-03	14/03/2008	13.99467	-89.54667	20.97		1				28.85		7.32	247		SI

MUESTRAS	Fecha	Latitud	Longitud	Cloruros	Cobre	Coliformes fecales	Color aparente	DBO5	Fenoles	Nitratos	Oxígeno Disuelto	pH	TDS	Turbidez	APTITUD
Unidad				mg/L Cl-	mg/L Cu	NMP/100 ml	Unidades Pt-Co	mg/L O2	mg/L Fenol	mg/L NO3-	mg/L O2	u de pH	mg/L	UNT	
Norma				50 a 250	1	1000	150	4	3.5	45	4 a 6.5	6.5 a 9.2	600	250	
SA-04	14/03/2008	14.01017	-89.54422	55.93		2.2				69.39		7.81	532		NO
Sa04-12MX	09/10/2012	14.01013	-89.54428	69.03		79		4.08		58.07	4.02	6.86	618.5	0.05	NO
SA-05	14/03/2008	14.02253	-89.53664	31.46		1				25.19		6.83	306.5		SI
SA-06	14/03/2008	14.02219	-89.53372	13.98		3.6				14.39		6.77	246.5		SI
SA-07	14/03/2008	14.02381	-89.52747	15.73		1						7.32	347.5		SI
SA-08	26/03/2008	13.99228	-89.54353	87.38		2				20.97		7.16	350.5		SI
SA-09	26/03/2008	13.98536	-89.54906	20.97		2				81.87		7.13	303.5		NO
SA-10	26/03/2008	13.98275	-89.54636	17.48		2				19.42		7.34	260		SI
SA-11	26/03/2008	13.96225	-89.55001	16.6		2				35.14		7.34	243		SI
SA-12	26/03/2008	13.95492	-89.53367	45.44		2				5.73		7.56	302.5		SI
SA-13	26/03/2008	13.95694	-89.57453	20.97		2				19.95		7.3	303		SI
SA-14	26/03/2008	13.96111	-89.56628	16.6		2				19.78		7.67	268.5		SI
SA-15	27/03/2008	13.98542	-89.59047	10.49		2				25.47		6.97	253		SI
SA-16	27/03/2008	13.99447	-89.60025	6.99		1				1.36		7.09	209.5		SI
SA-17	27/03/2008	13.94800	-89.57428	8.74		1100				16.02		7.57	232		NO
SA-18	27/03/2008	14.01994	-89.54775	31.46		2800				4.89		7.32	394		NO
Sa18MX-12	09/10/2012	14.01997	-89.54770	49.81		110	10	2.2		26.69	1.89	7.16	505.5	0.15	NO
SA-19	27/03/2008	14.01567	-89.55153	20.97		1300				5.42		7.1	443.5		NO
SA-20	27/03/2008	13.98972	-89.58334	8.74		8				13.24		6.66	258		SI
SA-21	31/03/2008	13.97608	-89.58219	26.22		50				50.94		6.88	491		NO
SA-22	31/03/2008	14.00300	-89.56578	22.72		2				26.07		6.69	348.5		SI
SA-23	31/03/2008	13.99833	-89.56803	10.49		2				15.49		7.18	231.5		SI
SA-24	09/04/2008	13.96644	-89.59456	13.98		2				20.09		6.86	264		SI
SA-25	09/04/2008	13.97722	-89.58789	5.24		2				0.15		7.87	164.5		SI
Sagraña-12	09/10/2012	14.01373	-89.53600	40.2		140		0.19		29.3	1.05	6.55	377.5	0.37	NO
SAN-01	20/06/2005	14.02199	-89.54576	65.4875						79.15		6.24	446.75		NO
SAN-02	20/06/2005	14.02347	-89.53134	20.8725						23.2175		6.655	230.125		SI

MUESTRAS	Fecha	Latitud	Longitud	Cloruros	Cobre	Coliformes fecales	Color aparente	DBO5	Fenoles	Nitratos	Oxígeno Disuelto	pH	TDS	Turbidez	APTITUD
Unidad				mg/L Cl-	mg/L Cu	NMP/100 ml	Unidades Pt-Co	mg/L O2	mg/L Fenol	mg/L NO3-	mg/L O2	u de pH	mg/L	UNT	
Norma				50 a 250	1	1000	150	4	3.5	45	4 a 6.5	6.5 a 9.2	600	250	
SAN-04	20/06/2005	14.00794	-89.52701	2.93						16.99		6.64	160.3333333		SI
SAN-08	17/02/2005	14.01025	-89.56059	46.95						11.465		7.03	291.5		SI
SAN-09	17/02/2005	13.98428	-89.57982	55.1						22.214		6.47	445.4		NO



Mapa 26 Aptitud de uso de agua cruda para potabilizar en el área geográfica de interés  
 Fuente: Elaboración propia.

### **3.7.3. MEDIDAS DE MITIGACION**

En base a los datos obtenidos del diagnóstico realizado, se observa que los niveles de contaminantes que se encuentran dentro del área de estudio, son originados por razones antropogénicas en el caso de las aguas superficiales y mayoritariamente por razones naturales en el caso de las aguas subterráneas, específicamente en la zona urbana. Es importante mencionar que las aguas del río Suquiapa pasan por zonas densamente pobladas, con una serie de problemas de control de contaminación que van desde las descargas puntuales de aguas negras e industriales, hasta la contaminación dispersa que producen los desechos sólidos de las zonas urbanas; así como también no se descarta la contaminación local debida a la utilización de pesticidas en la zona.

Según lo anterior, se propone limpieza rutinaria de los pozos y remoción del fondo en el caso de los pozos excavados, para el caso del agua superficial se propone la remoción de la materia en suspensión, la cual contiene generalmente contaminantes adheridos (metales pesados y residuos orgánicos). Adicionalmente, se estaría controlando los parámetros de Turbidez y Sólidos totales suspendidos que han resultado altos. Por otro lado, para el control de los niveles de Nitrógeno Amoniacal, Nitritos y Nitratos, es de suma importancia también el control de las excretas avícolas y porcinas en la zona, es decir recolección y disposición de éstas previo a su secado.

Además, para el manejo de los niveles de Nitratos encontrados, se requiere de la implementación de técnicas de agricultura orgánica, para evitar la utilización de agroquímicos.

#### **3.7.3.1. TIPOS DE MEDIDAS A PROPONER**

##### **A. VIGILANCIA POR PARTE DE AUTORIDADES COMPETENTES**

Para el caso de las aguas superficiales (manantiales y ríos), la primera medida a proponer sería que las autoridades competentes brindaran una mejor vigilancia a las

industrias que realizan descargas puntuales, así como verificación del cumplimiento de los caudales y las concentraciones de descargas a cuerpos receptores permitidas en el permiso ambiental, así como las medias de tratamiento o de compensación debidas a la actividad.

Para el caso de las descargas difusas o dispersas, se sabe que los sedimentos y minerales arrastrados por las tormentas y escorrentías desde las tierras de cultivo, los suelos sin protección y fuentes antropogénicas también deben de controlarse, por ello, se sugiere que las instituciones competentes promuevan actividades forestales y buenas prácticas agrícolas. También se recomienda que las autoridades locales promuevan la organización de las comunidades para la realización de actividades de descontaminación del recurso, tales como dragado en los cuerpos de agua, ya que los contaminantes suelen adherirse a las partículas finas del sedimento y carga orgánica, por lo que al eliminarlo del fondo de los ríos se estaría mejorando notablemente la calidad del agua para diversos usos.

## **B. INFRAESTRUCTURA FÍSICA**

Se propone un sistema de tratamiento que incluya tratamiento preliminar y primario para la remoción de los sólidos flotantes y suspendidos sobre el cuerpo de agua, probablemente se pueda localizar en la salida de la ciudad donde la carga de contaminantes es máxima.

## **C. IMPLEMENTACIÓN DE LA AGRICULTURA ORGÁNICA**

La implementación de la agricultura orgánica es una estrategia de desarrollo que sirve para cambiar algunas de las limitaciones encontradas en la producción convencional, más que una tecnología de producción es una estrategia de desarrollo que consiste en cultivar la tierra manteniendo o incrementando la fertilidad del suelo mediante un estilo de manejo racional de los recursos naturales, sin la utilización de agroquímicos o minimizando la cantidad de ellos. Esta se fundamenta no solamente en un mejor manejo del suelo y un fomento al uso de insumos locales, sino también en un mayor valor agregado y establecimiento de una cadena de comercialización más justa para los productores.

La agricultura orgánica es uno de los numerosos métodos de producción inocuos para el medio ambiente, los sistemas de agricultura orgánica se basan en normas de producción concretas y precisas que tienen por objeto conseguir agro-ecosistemas que sean social y ecológicamente sostenibles. El cambio de una agricultura tradicional a una agricultura orgánica es difícil pero esta tiene como incentivos un mejor manejo de los recursos naturales y mejores precios en el mercado por productos orgánicos, cuya demanda se incrementa en los mercados internacionales.

#### **D. MEDIDAS DE CONTROL DE CONTAMINACIÓN PARA AGRICULTORES DE LA ZONA.**

Con respecto a la contaminación por parámetros fisicoquímicos, existen medidas sencillas que se pueden implementarse para evitar la contaminación de las aguas:

1. Manejo de rastrojos: Es importante incorporar los rastrojos al suelo para mejorar la textura del suelo y aumentar la retención de la humedad en el mismo.
2. Eliminar práctica de quema de cultivos: Consiste simplemente en eliminar la práctica de quemar los residuos de cosechas anteriores, con la cual se deja expuesto el terreno a los impactos externos.
3. Aplicación racional del nitrógeno: Para evitar el uso excesivo de fertilizantes, la tasa de fertilizante nitrogenado aplicado deberá calcularse en función del "balance de nitrógeno de los cultivos". En él se tienen en cuenta las necesidades de las plantas y la cantidad de nitrógeno en el suelo.
4. Cubierta vegetal: En la medida de lo posible, el suelo no cultivado debe estar cubierto de vegetación. Con ello se impide la acumulación de nitrógeno soluble mediante la absorción del nitrógeno mineralizado y se evita la lixiviación durante el período de lluvia.
5. Controlar el período entre cosechas: Los desechos orgánicos producidos por la recolección se mineralizan fácilmente en nitrógeno lixiviable, entre las medidas que se pueden adoptar para reducir este nitrógeno figuran la plantación de cultivos de "abono



verde", y el aplazamiento de las labores de aradura para incorporar la paja, raíces y hojas en el suelo.

6. Mejorar en lo posible otras técnicas de cultivo: Para conseguir los máximos rendimientos con un mínimo de efectos negativos en la calidad del agua es preciso mejorar prácticas tan diversas como la lucha contra las malas hierbas, plagas y enfermedades, el encalado, la utilización equilibrada de fertilizantes minerales, etc.

Para el caso de las aguas superficiales, las fitotecnologías que utiliza macrófitas flotantes son una alternativa efectiva en la remediación de cuerpos de agua contaminados. Las macrófitas acuáticas se han utilizado en las últimas décadas para la remoción de metales pesados, compitiendo con otros tratamientos. El principal mecanismo de remoción de metales es la adsorción por las raíces. Por ejemplo en el caso del arsénico, la familia Pteridaceae ha demostrado ser la más efectiva ya que estos helechos actúan como hiperacumuladores.

### **3.8. ANÁLISIS Y EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LOS DATOS HIDROGEOQUÍMICOS**

En este apartado se abordará el efecto temporal sobre los datos geoquímicos evaluados en estudios precedentes, para correlacionar y entender su evolución y tendencias. También, se ha tratado en este apartado la incorporación del efecto estacional, es decir, las diferencias geoquímicas entre muestras tomadas en época seca y lluviosa, otro aspecto evaluado es la variación de la calidad de agua respecto al tiempo.

#### **3.8.1. SERIES TEMPORALES**

El quimismo de las aguas depende de muchos factores, dos de éstos son el tiempo y la estacionalidad, para el caso de las aguas superficiales, teóricamente esto puede tener un efecto significativo, hecho que teóricamente no es el caso para las aguas subterráneas pues dependerá del sistema y las condiciones. Sin embargo en cualquiera de los 2 escenarios es

importante corroborar su interacción, efecto y/o evolución. A continuación se presentan definiciones importantes en el análisis de este apartado.

- Serie temporal: Una serie temporal es una secuencia de datos, observaciones o valores, medidos en determinados momentos y ordenados cronológicamente. Los datos pueden estar espaciados a intervalos iguales o desiguales. Para el análisis de las series temporales se usan métodos que ayudan a interpretarlas y que permiten extraer información representativa sobre las relaciones subyacentes entre los datos (extrapolar, interpolar, predecir o generalizar comportamiento) (Massart, Vandeginste, & Buydens, 1997)

### **3.8.2. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS TEMPORAL**

Los productos obtenidos en este apartado son análisis tabulares y gráficos de series de tiempo de diferentes tipos de muestras, tipos de variables, etc. La construcción de las tablas y gráficos conlleva básicamente procedimientos de recolección, ordenamiento y presentación de la información, para ello se ha hecho uso de 2 software: Microsoft Excel y StatGraphics Centurion XV para el caso del análisis de la prueba t con factor de estacionalidad (Época seca y lluviosa). El estadístico de prueba para el análisis correlacional de épocas del año es el t-student, a continuación se describe su aplicación.

- Prueba t student: El Test-T es una prueba en la que el estadístico utilizado tiene una distribución t de Student si la hipótesis nula es cierta. Se aplica cuando la población estudiada sigue una distribución normal pero el tamaño muestral es demasiado pequeño como para que el estadístico en el que está basada la inferencia esté normalmente distribuido, utilizándose una estimación de la desviación típica en lugar del valor real. La prueba t es utilizada en análisis discriminante. (Massart, Vandeginste, & Buydens, 1997). La fórmula del estadístico t, se presenta en la ecuación siguiente:

Ec. 44

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}},$$

- t: Estadístico t student
- $\bar{x}$ : Media muestral
- n: Número de datos
- $\mu_0$ : Media poblacional.
- s: desviación estándar

Los resultados, análisis y discusión se presentan a continuación.

### 3.8.3. ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS EVOLUTIVOS DE CAUDALES SUPERFICIALES DEL RÍO SUQUIAPA.

La primera variable a la cual se le realizó el análisis temporal fue el caudal, en esta sección se muestra para distintos sitios su evolución en cuerpos de agua superficial del área geográfica de interés. En las figuras 90, 91 y 92 y en la Tabla 26 se muestra el caudal para los sitios A01SUQUI, A04SUQUI y A23SUQUI respectivamente para 5 años distintos, en los cuáles se observa un comportamiento estable, es importante notar que todos los caudales se realizaron en época seca, sin embargo se aprecia que para las 3 gráficas existe una inflexión negativa en el año 2007, probablemente debido a régimen de lluvia menos abundante para ese año hidrológico.

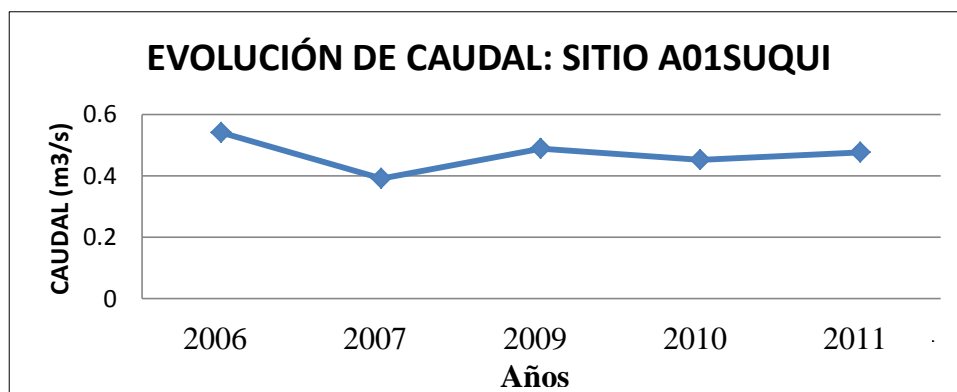


Figura 90 Gráfico temporal de caudal para sitio superficial de agua (A01SUQUI)

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

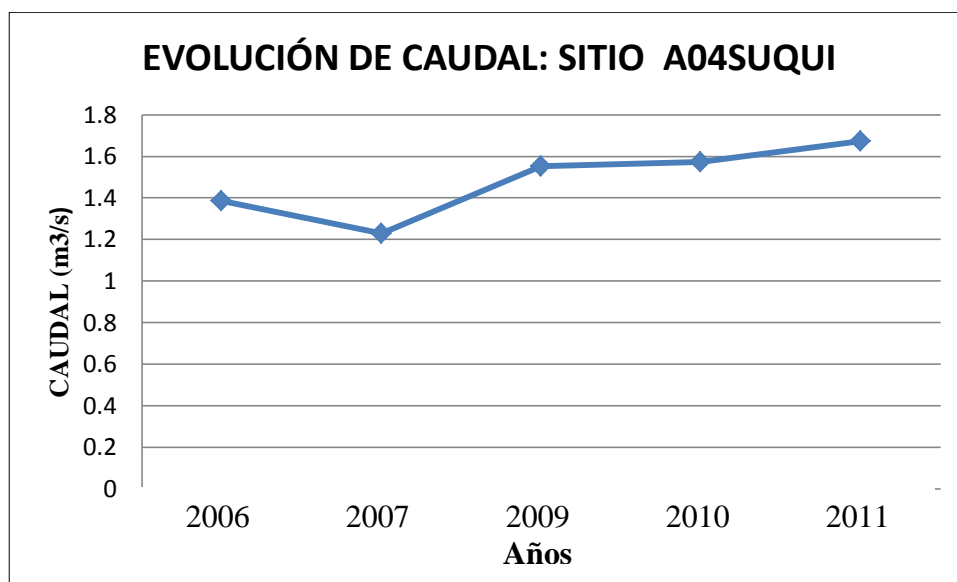


Figura 91 Gráfico temporal de caudal para sitio superficial de agua (A04SUQUI)

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

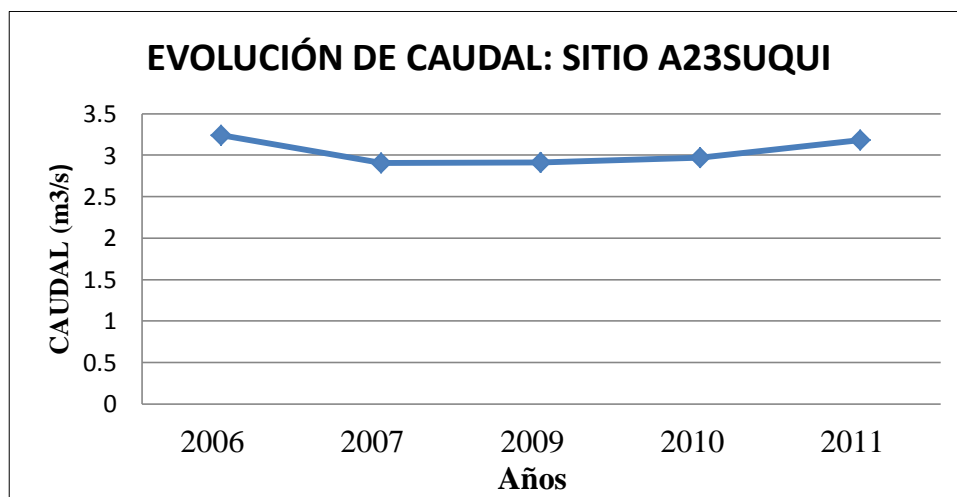


Figura 92 Gráfico temporal de caudal para sitio superficial de agua (A23SUQUI)

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

Las mediciones de caudal del canal principal del río Suquiapa se muestran en la Tabla 26, en ella puede apreciarse además la ubicación de los sitios de manera tabular.

Tabla 26 Evolución de mediciones de caudales del canal principal del río Suquiapa.

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

Sitios	UBICACIÓN	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)				
		2006	2007	2009	2010	2011
A01SUQUI	Río Sucio, Subcuenca río Suquiapa contiguo a Beneficio El Sauce, Santa Ana	0.54	0.391	0.488	0.452	0.476
A04SUQUI	Río Aranchacal, Subcuenca río Suquiapa, Hacienda San Francisco, Santa Ana	1.386	1.23	1.553	1.573	1.674
A23SUQUI	Río Suquiapa, San Pablo Tacachico, La Libertad	3.243	2.906	2.915	2.97	3.18

En la Tabla 27 se muestra la evolución histórica de mediciones hidrodinámicas (Caudal, Velocidad, Áreas, Anchos, profundidades, etc.) de los ríos tributarios al río Suquiapa –Aranchacal, desde 1998 hasta 2000 realizados por el SNET.

Tabla 27 Evolución de mediciones de caudales de ríos tributarios

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

FECHA	UBICACIÓN	Hora	Área	Ancho	Perímetro	Velocidad	Radio	Profundidad	Caudal
			(m <sup>2</sup> )	(m.)	mojado (m)	media (m/s)	Hidráulico (m)	media (m)	(m <sup>3</sup> /s)
<b>RÍO GUILGUAYO</b>									
01/12/1998	Finca Sn. Antonio 20 mts. Aguas arriba. Caret. Sn. Pablo Tacachico	12:30/12:36	0.2935	3.1000	3.3000	0.2900	0.0889	0.0947	0.0854
06/07/1999	( 8 - R ) 20 Mts. De paso de Carret. Sn. Pablo Tacachico. Sta. Ana	08:53/09:05	0.5062	2.7500	3.1200	0.2200	0.1622	0.1841	0.1106
26/01/2000	( 8 - R ) Desemb. 20 Mts. Agua. Arriba. Carret. Sta. Ana Sn Pablo T.	11:38/11:44	0.3075	3.0000	3.2100	0.2200	0.0958	0.1025	0.0676
<b>RÍO ARANCHACAL</b>									
30/06/1996	Had. Sn. Fco. 1000 Mts. Aguas abajo Carret. Sta. Ana - Metapán	11:40/11:50	4.0830	12.5000	13.1600	0.4600	0.3103	0.3266	1.8782
02/12/1998	( R - 2 ) Benef. El Sauce 80 Mts. Aguas arrib. Carret. a Metapán	10:00/10:12	2.4725	8.5000	9.0800	0.2700	0.2723	0.2909	0.6614
30/06/1999	( 2 - R ) 100 Mts. Aguas arriba de Pte. Carret. Sta. Ana Metapán	09:12/09:28	2.6425	7.9000	8.5600	0.3500	0.3087	0.3345	0.9127
19/01/2000	( 2 - R ) 200 Mts. Aguas arriba de Pte. Carret. Sta. Ana Metapán	11:43/12:00	1.4915	8.3000	8.6600	0.2800	0.1722	0.1797	0.4219
15/11/2000	por Had. El Jardín 15 Mts. Aguas arrib. Paso calle Had. El Jardín	08:25/08:33	6.9600	18.7000	19.4400	0.3200	0.3580	0.3722	2.1994
<b>RÍO EL PUENTE</b>									
12/11/1998	(R-6) Cton. Natividad Crio. El Carmen Bajo Pte. Carret. Had. El Jardín	13:15/13:21	0.2480	2.4000	2.6000	0.1100	0.0954	0.1033	0.0273
01/07/1999	(6-R) 4 Mts. Aguas abajo de Pte. Calle Had. El Jardín a Sta. Ana	09:08/09:14	0.1432	1.6500	1.8300	0.1400	0.0783	0.0868	0.0195
01/07/1999	(6-A-R) Col. El Chilín 3 Mts. Aguas arrib. del callejón El Pitarrillo	10:27/10:43	7.4350	14.8000	15.8000	0.3700	0.4706	0.5024	2.7226
02/07/1999	(5-R) 5 mts. Aguas arriba de Calle privada de Had. El Jardín	10:17/10:31	8.6160	18.2500	19.1900	0.3100	0.4490	0.4721	2.6633
20/01/2000	(6-R) Desembocadura en paso de calle a Had. El Jardín	12:18/12:24	0.0799	1.0600	1.2200	0.1600	0.0655	0.0754	0.0128
14/11/2000	(07- Puente) Desemb. 50 Mts. Aguas abajo Pte. Calle Had. El Jardín	08:28/08:33	0.1154	1.1100	1.3180	0.0900	0.0876	0.1040	0.0111
<b>RÍO EL MOLINO</b>									
11/11/1998	(R-3 Benef. La China) 40 Mts. Aguas abajo Pte. Benef. La China a Col. Esperanz.	11:55/12:04	0.9425	3.8000	4.3000	0.3100	0.2192	0.2480	0.2938
29/06/1999	(R-3 Benef. La China) 40 Mts. Aguas abajo Pte. Benef. La China a Col. Esperanz.	08:58/09:10	1.1805	4.2000	4.7600	0.4300	0.2480	0.2811	0.5115
19/01/2000	(3-R Benef. La China) 50 Mts. Aguas abajo Pte. Benef. La China a Col. Esperanz.	10:40/10:50	1.2027	4.1500	4.7300	0.3100	0.2543	0.2898	0.3761

FECHA	UBICACIÓN	Hora	Área	Ancho	Perímetro	Velocidad	Radio	Profundidad	Caudal
			sección	sección	mojado	media	Hidráulico	media	
			(m <sup>2</sup> )	(m.)	(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> /s)
<b>RÍO ZARCO</b>									
12/11/1998	(R-4) Desmb. Had. Sn Cayetano 700 Mts. Aguas arriba de junta con río Sauce	11:54/12:05	2.5575	7.2000	7.9200	0.2400	0.3229	0.3552	0.6216
29/06/1999	(4-R) 900 Mts. Aguas abajo de Carretera Sta. Ana - Metapán	10:09/10:16	2.1095	6.3000	6.9800	0.2200	0.3022	0.3348	0.4622
<b>RÍO SUQUIAPA</b>									
13/11/1998	(R-14) Cton. Sn Felipe 100 Mts. Aguas arriba de junta con Qda. El Volador	12:00/12:16	13.7025	23.5000	24.6600	0.3100	0.5557	0.5831	4.2760
01/12/1998	(R-9) Had. Sn. Luis 300 Mts. Aguas abajo de planta Hidroeléctrica Sn. Luis	11:43/11:54	4.1830	17.1000	17.5800	0.6700	0.2379	0.2446	2.8001
08/07/1999	(11-R) 25 Mts. Aguas abajo de puente de calle a Cton. Nancistepeque	11:34/11:50	11.8450	18.0000	19.3200	0.4500	0.6131	0.6581	5.3340
08/07/1999	(10-A-R) 150 Mts. Aguas abajo de Desembocadura de Quebrada El Remanso	10:13/10:25	9.4005	15.7000	16.9000	0.5400	0.5562	0.5988	5.0803
07/07/1999	(9-R) 200 Mts. Aguas abajo de la planta eléctrica	09:15/09:50	18.9500	18.0000	20.1100	0.2300	0.9423	1.0528	4.3902
13/07/1999	(14-R) Por Qda. El Limite 50 Mts. Aguas arriba del vado a Cton. Valle Nuevo	10:08/10:24	14.2838	24.2500	25.4300	0.4000	0.5617	0.5890	5.6924
14/07/1999	(16-R) 50 Mts. Aguas abajo de Puente de Carret. Sn. Pablo Tacachico - Las Pavas	11:48/12:00	11.6525	21.5000	22.5800	0.4600	0.5161	0.5420	5.3539
14/07/1999	(15-A-R) 100 Mts. Aguas arriba de junta con Qda. Las Minas	09:50/10:10	13.8525	22.3000	23.5400	0.3900	0.5885	0.6212	5.4609
27/01/2000	(10-A-R) El Remanse, 50 Mts. Aguas abajo de Qda. El Remanse	11:15/11:46	7.4060	14.4000	15.4290	0.3333	0.4800	0.5143	2.4684
08/02/2000	(14-R) Por Qda. El Limite, 50 Mts. Aguas arriba del vado a Cton. Valle Nuevo	10:35/10:56	13.6825	26.5000	27.5400	0.2800	0.4968	0.5163	3.8088

### 3.8.4. ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS QUÍMICOS EVOLUTIVOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ACUIFERO DE SANTA ANA.

En la tabla 28 y Figura 93 se muestra la evolución temporal del anión cloruro (Cl) en 4 pozos del acuífero de Santa Ana. Claramente puede apreciarse una tendencia gráfica en 10 de los 12 puntos que conforman las mediciones.

Tabla 28 Evolución temporal de cloruros en pozos

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

POZOS	Cl (meq/L)	Cl (meq/L)	Cl (meq/L)
	2005	2006	2012
SAN01	2.2496	2.4942	0.3961
SAN02	0.4781	0.6533	0.7458
SAN04	0.0843	1.2471	0.0793
SAN09	1.6753	1.4846	1.2606

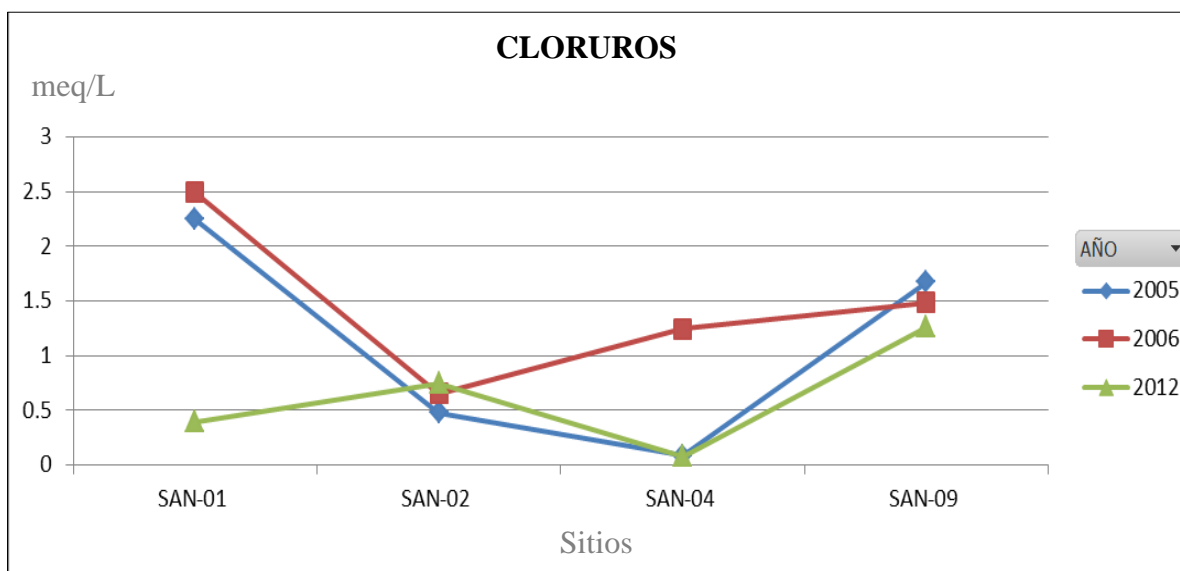


Figura 93 Gráfico evolutivo de cloruros en pozos del Acuífero de Santa Ana

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

En la tabla 29 y Figura 94 se muestra la evolución temporal del anión sulfato en 4 pozos del acuífero de Santa Ana, puede apreciarse que el comportamiento sigue una



tendencia de tal forma que los pozos SAN-01 en todos los años muestreados poseen más sulfatos que el pozo SAN-09 y éstos que el SAN-02 y SAN-04 respectivamente.

Tabla 29 Evolución temporal de sulfatos en pozos

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

POZOS	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (meq/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (meq/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (meq/L)
	2005	2006	2012
SAN01	0.7235	1.6656	1.9827
SAN02	0.4528	0.6454	0.8359
SAN04	0.2863	0.6350	0.3231
SAN09	0.7843	1.4887	1.0096

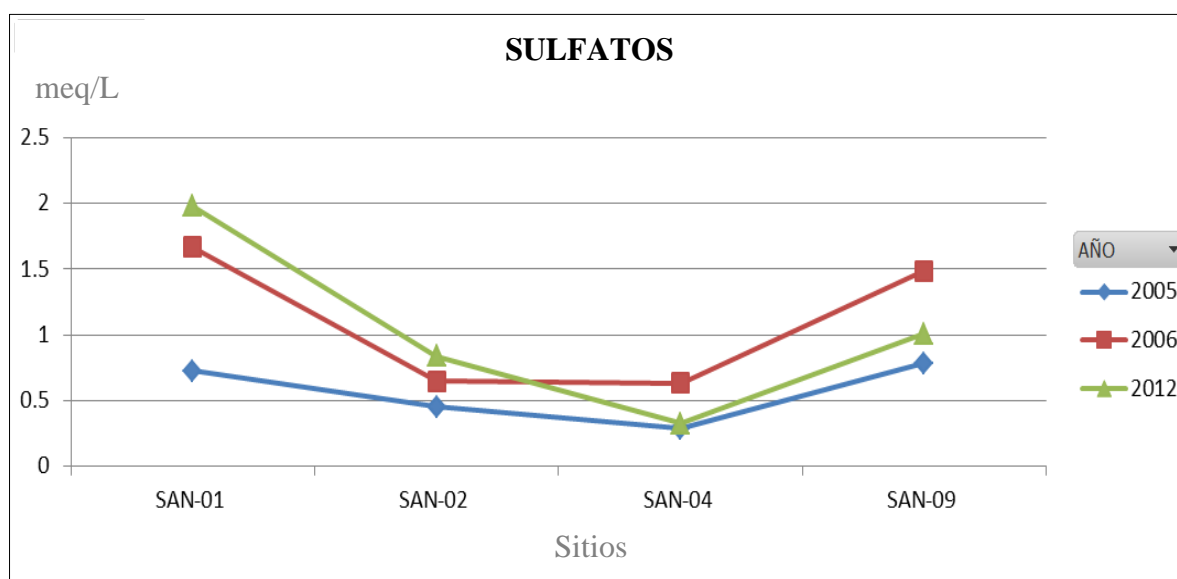


Figura 94 Gráfico evolutivo de sulfatos en pozos del Acuífero de Santa Ana

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

En la tabla 30 y Figura 95 se muestra la evolución temporal del anión bicarbonato en 4 pozos excavados del acuífero de Santa Ana, puede apreciarse que el comportamiento sigue una tendencia de tal forma que los pozos SAN-09 en todos los años muestreados poseen más bicarbonato que el pozo SAN-01 y éstos que el SAN-02 y SAN-04, respectivamente.

Tabla 30 Evolución temporal de bicarbonatos en pozos

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

POZOS	HCO <sup>3-</sup> (meq/L)	HCO <sup>3-</sup> (meq/L)	HCO <sup>3-</sup> (meq/L)
	2005	2006	2012
SAN01	3.8959	3.5184	3.4447
SAN02	2.1975	2.4476	2.9505
SAN04	1.9113	1.8358	2.1526
SAN09	4.8540	3.3655	4.5722

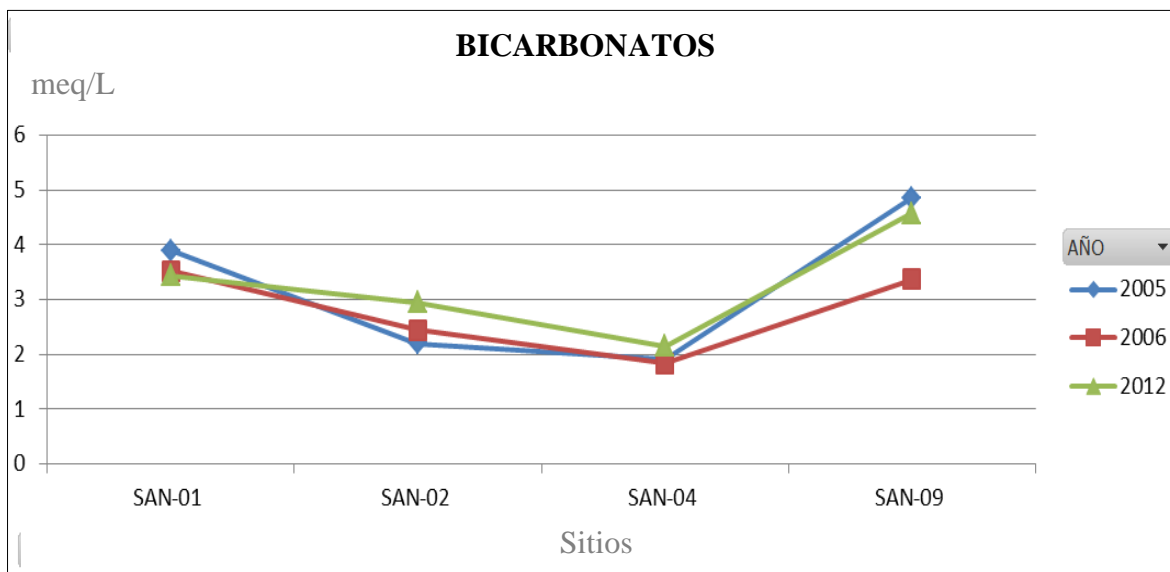


Figura 95 Gráfico evolutivo de bicarbonatos (ppm) en pozos del Acuífero de Santa Ana

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

En la tabla 31 y Figura 96 se muestra la evolución temporal del catión calcio en 4 pozos excavados del acuífero de Santa Ana, puede apreciarse que el comportamiento sigue una tendencia de tal forma que los pozos SAN-01 en todos los años muestreados a excepción de 2012 poseen más calcio que el pozo SAN-09 y éstos que el SAN-02 y SAN-04 respectivamente.

Tabla 31 Evolución temporal de calcio en pozos

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

POZOS	Ca <sup>2+</sup> (meq/L)	Ca <sup>2+</sup> (meq/L)	Ca <sup>2+</sup> (meq/L)
	2005	2006	2012
SAN01	4.1966	4.2365	3.1457
SAN02	1.5988	1.8383	1.8867
SAN04	1.2989	1.5190	1.4711
SAN09	3.9835	3.3573	3.6372

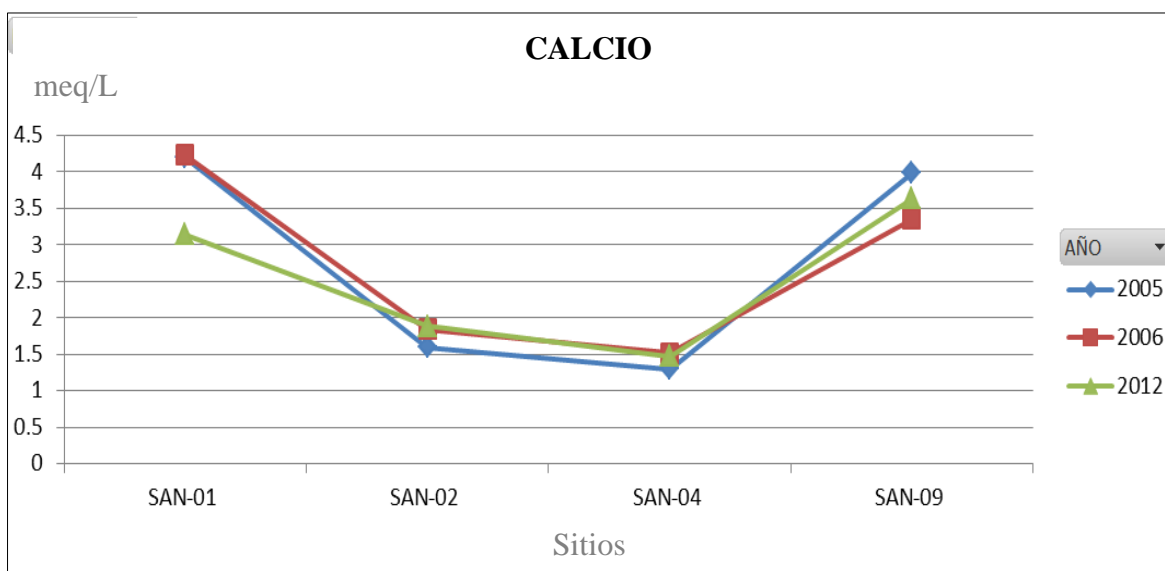


Figura 96 Gráfico evolutivo de calcio en pozos del Acuífero de Santa Ana

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

En la tabla 32 y Figura 97 se muestra la evolución temporal del catión sodio en 4 pozos excavados del acuífero de Santa Ana, puede apreciarse que en el año 2006 los valores de sodio son más elevados que el resto, este puede ser una contaminación local de ese año ya que no podría ser efecto diluvito debido a que no ha ocurrido este efecto con los otros iones mayoritarios, el resto de series posee la tendencia antes descrita: mayor sodio en el pozo SAN-01 que en el pozo SAN-09 y éstos mayor que el SAN-02 y SAN-04 respectivamente.

Tabla 32 Evolución temporal de sodio en pozos

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

POZOS	Na <sup>+</sup> (meq/L)	Na <sup>+</sup> (meq/L)	Na <sup>+</sup> (meq/L)
	2005	2006	2012
SAN01	3.5848	5.5000	1.6217
SAN02	1.9935	4.7217	1.2683
SAN04	0.7083	4.5870	0.6609
SAN09	1.7148	4.8348	1.9030

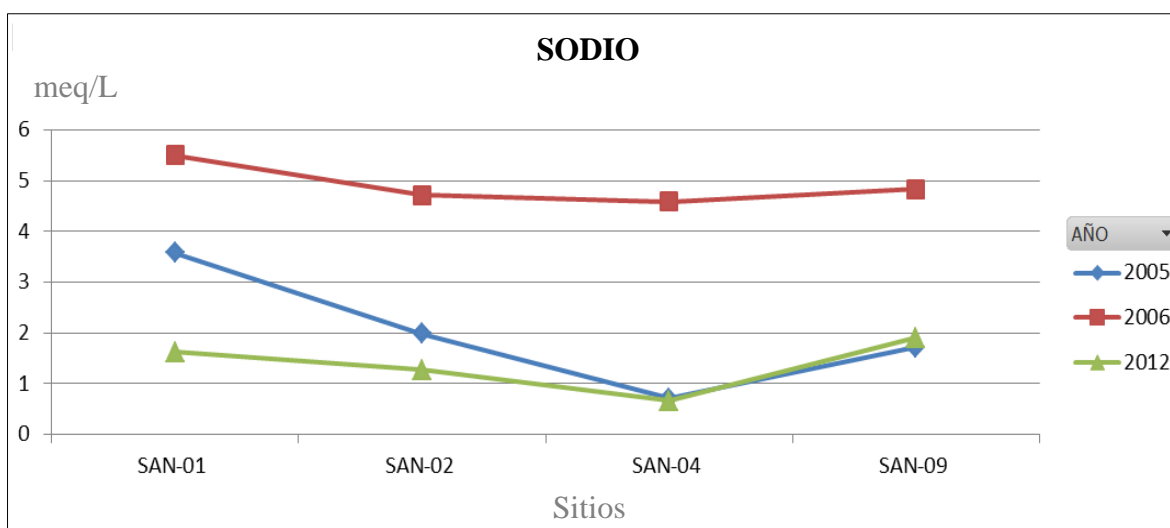


Figura 97 Gráfico evolutivo de sodio en pozos del Acuífero de Santa Ana

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

El Magnesio en la tabla 33 y figura 98 muestra el mismo comportamiento que en los componentes antes analizados solo que son datos más dispersos. La serie posee una tendencia de mayor a menor cantidad de magnesio de la siguiente forma: SAN-01>SAN-09 >SAN-02>SAN-04.

Tabla 33 Evolución temporal de magnesio en pozos

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

POZOS	Mg <sup>2+</sup> (meq/L)	Mg <sup>2+</sup> (meq/L)	Mg <sup>2+</sup> (meq/L)
	2005	2006	2012
SAN01	2.4574	1.8379	1.6783
SAN02	1.2193	1.3583	1.9704

POZOS	Mg <sup>2+</sup> (meq/L)	Mg <sup>2+</sup> (meq/L)	Mg <sup>2+</sup> (meq/L)
	2005	2006	2012
SAN04	0.8597	0.4796	0.9708
SAN09	2.2509	1.4389	1.9457

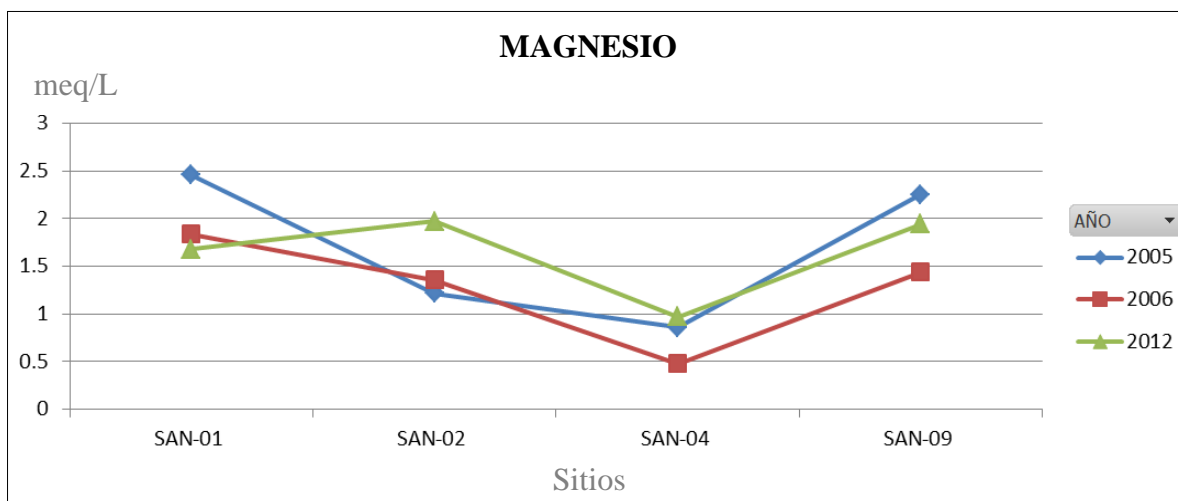


Figura 98 Gráfico evolutivo de magnesio en pozos del Acuífero de Santa Ana

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

### 3.8.5. ANÁLISIS TEMPORAL DE LA CALIDAD DE AGUA DE SITIOS DE CONTROL SUPERFICIALES, SOBRE EL RÍO SUQUIAPA

En la Figura 99 se muestra la evolución temporal del índice de calidad de agua, en general observamos agua con calidad categorizada como “pésima”, siendo el año 2007 donde por efectos de la época de muestreo (Lluvia) se presenta una leve mejoría que la lleva a obtener una calificación de “mala”

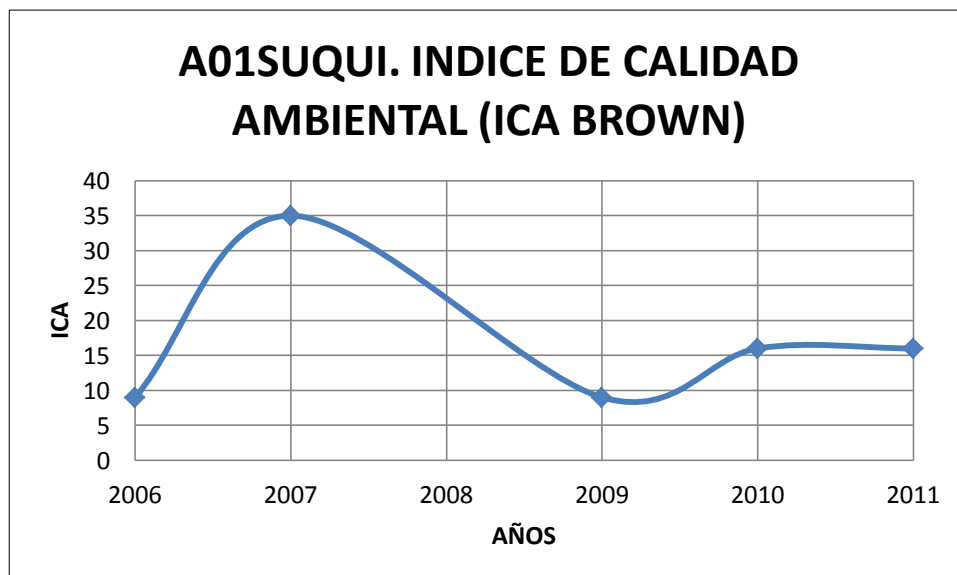


Figura 99 Gráfico evolutivo de calidad de agua superficial (ICA-Brown) en sitio A01SUQUI

Fuente: Compilación de datos de informes MARN.

El mismo efecto dilutivo observado en la Figura 99 puede apreciarse en la Figura 100, para el sitio A04SUQUI en donde las aguas en general son clasificadas como “malas” a excepción del año 2007 en donde por los efectos antes mencionados posee una categoría de “regular”.

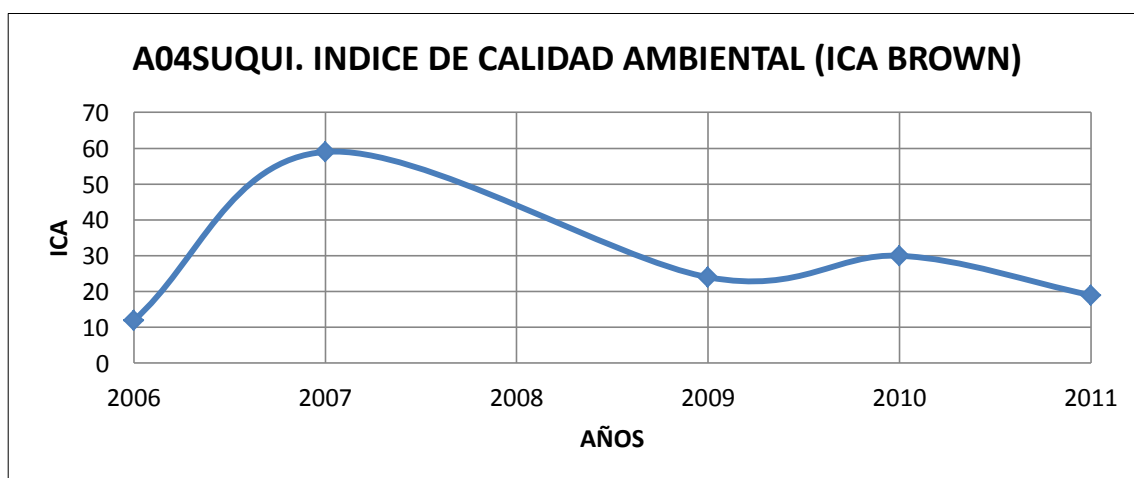


Figura 100 Gráfico evolutivo de calidad de agua superficial (ICA-Brown) en sitio A04SUQUI

Fuente: Compilación de datos de informes MARN

En la Figura 101 se aprecia agua categorizada como “mala” en todos los años a excepción de 2009, en donde se tiene agua clasificada como “regular”, es importante destacar que el sitio A23SUQUI es la desembocadura del río, así que esa es la calidad de agua del recurso utilizado para Riego en Atiocoyo.

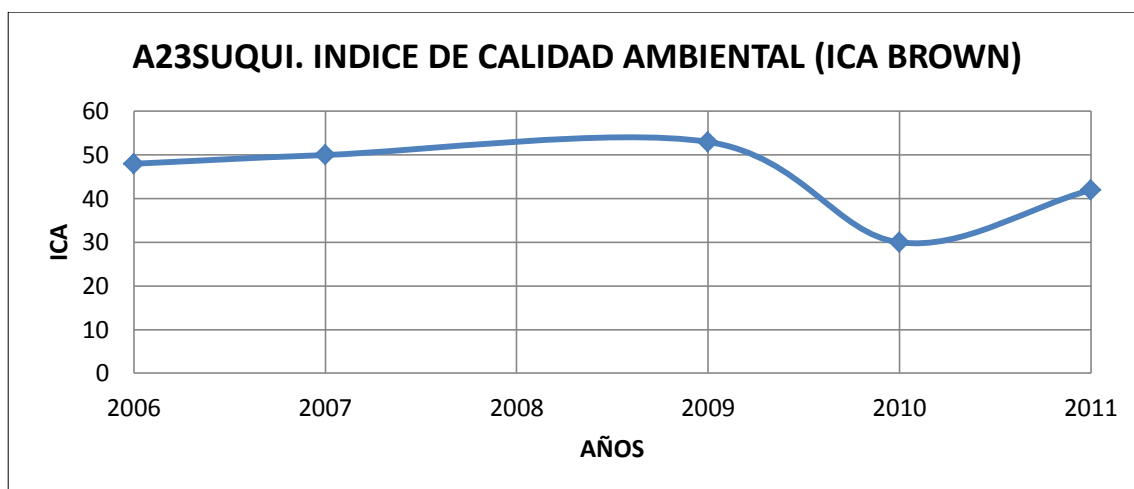


Figura 101 Gráfico evolutivo de calidad de agua superficial (ICA-Brown) en sitio A23SUQUI

Fuente: Compilación de datos de informes MARN.

### 3.8.6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS EVOLUTIVOS DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL

En esta sección se discuten los resultados de la evolución de calidad de agua superficial, a partir del análisis de los parámetros fisicoquímicos del índice de calidad de agua de Brown (Ver metodología de cálculo en sección 3.7.1.2.A), los parámetros analizados son los que se definen en la Tabla 6 y los resultados se presentan en las tablas 34 y 35, en donde puede observarse que la contaminación por coliformes fecales sobre el río Suquiapa es crítica, al igual que las condiciones de  $DBO_5$  y oxígeno disuelto en especial en el sitio A01SUQUI. Los parámetros hidrodinámicos y el índice de calidad de agua del río Suquiapa presente en la Tabla 35 se muestra en general, agua con calificación mala y pésima e inaptitud de uso, los parámetros hidrodinámicos son congruentes con los resultados obtenidos en el año 2013.

Tabla 34 Evolución temporal de la calidad de agua superficial de parámetros fisicoquímicos

Fuente: Compilación de datos de informes MARN

ID SITIO MUESTREO	AÑO	UBICACIÓN	FECHA MUESTREO	COORDENADA NORTE	COORDENADA OESTE	pH (u pH)	TMx (°C)	OXIGENO DISUELTO (ppm)	PORCENTAJE DE SATURACION OD (%)	TURBIDEZ (FAU)	FOSFATOS (ppm)	NITRATOS (ppm)	DBO5 (ppm)	TDS_ppm	COLIFORMES FECALES (NMP/100 ml)
NORMA RIEGO (DECRETO 51)						6.5 - 8.4 U									≤ 1000 NMP/100ml
AGUA CRUDA POTAB (DECRETO 51)						6.5-9.2 U		0-6.5 mg/l		0-250 UNT		≤ 45 mg/l	0 -4 gm/l	0-600 mg/l	≤ 1000 NMP/100ml
NORMA CONT HUM (DECRETO 51 Y OMS)								≥ 7 mg/l		≤ 10 UNT					≤ 1000 NMP/100ml
A01SUQUI	2006	Río Sucio, contiguo a Beneficio El Sauce, Santa Ana	11/01/2006	14.012404	-89.542736	5.440	23.700	0.000	0.000	670.000	2.575	9.400	728	1030.000	5000000
A01SUQUI	2007	Río Sucio, contiguo a Beneficio El Sauce, Santa Ana	30/05/2007	14.012404	-89.542736	7.580	24.900	3.200	37.890	8.000	2.900	27.200	14	280.000	22000
A01SUQUI	2009	Río Sucio, contiguo a Beneficio El Sauce, Santa Ana	24/03/2009	14.013200	-89.542360	7.032	24.500	0.000	0.000	105.000	8.160	11.050	112	365.000	1600000
A01SUQUI	2010	Río Sucio, contiguo a Beneficio El Sauce, Santa Ana	13/04/2010	14.013200	-89.542360	6.700	27.000	1.230	16.038	37.300	4.900	34.500	68	384.000	300000
A01SUQUI	2011	Río Sucio, contiguo a Beneficio El Sauce, Santa Ana	30/04/2011	14.01320	-89.54236	6.890	26.100	0.750	9.642	53.000	7.600	2.030	88	408.70	2800000
A04SUQUI	2006	Río Aranchacal, Hacienda San Francisco, Santa Ana	11/01/2006	14.014914	-89.530874	6.140	23.500	0.000	0.000	280.000	0.120	4.800	386	578.000	5000000
A04SUQUI	2007	Río Aranchacal, Hacienda San Francisco, Santa Ana	30/05/2007	14.014914	-89.530874	8.080	24.100	3.700	43.810	8.000	1.760	33.800	10	269.000	160000
A04SUQUI	2009	Río Aranchacal, Hacienda San Francisco, Santa Ana	24/03/2009	14.016180	-89.530970	7.002	24.500	4.720	62.083	19.500	3.120	17.400	60	324.000	300000
A04SUQUI	2010	Río Aranchacal, Hacienda San Francisco, Santa Ana	13/04/2010	14.016180	-89.530970	6.830	27.000	4.560	59.457	13.600	2.700	11.000	22	357.500	240000
A04SUQUI	2011	Río Aranchacal, Hacienda San Francisco, Santa Ana	30/04/2011	14.01618	-89.53097	6.950	28.200	1.900	25.340	18.950	4.450	14.000	50	513.00	350000
A23SUQUI	2006	Río Suquiapa, San Pablo Tacachico, La Libertad	12/01/2006	14.039140	-89.305486	7.790	23.700	5.000	58.421	16.500	2.455	10.600	4	334.000	5000
A23SUQUI	2009	Río Suquiapa, San Pablo Tacachico, La Libertad	20/03/2009	14.037690	-89.306420	7.772	24.900	7.400	94.462	1.000	2.150	20.150	2	345.000	2800
A23SUQUI	2010	Río Suquiapa, San Pablo Tacachico, La Libertad	09/04/2010	14.037690	-89.306420	6.990	27.400	3.790	51.156	93.200	1.605	10.050	11	389.000	800000
A23SUQUI	2011	Río Suquiapa, San Pablo Tacachico, La Libertad	27/04/2011	14.03769	-89.30642	6.810	28.300	4.050	54.759	29.300	1.750	22.100	12	390.00	2300



Tabla 35 Índice de calidad de agua superficial (Brown) y resumen de parámetros hidrodinámicos correspondientes

ID SITIO MUESTREO	AÑO	UBICACIÓN	FECHA MUESTREO	COORDENADA NORTE	COORDENADA OESTE	INDICE DE CALIDAD AMBIENTAL (ICA)	CALIFICACION - ICA	APTITUD AGUA CRUDA PARA POTABILIZAR	APTITUD PARA RIEGO	APTITUD ACTIVIDADES RECREATIVAS CON	NIVEL MEDIO (m)	VELOCIDAD MEDIA (m/s)	AREA MOJADA (m2)	CAUDAL MEDIO (m3/s)
A01SUQUI	2006	Río Sucio, contiguo a Beneficio El Sauce, Santa Ana	11/01/2006	14.012404	-89.542736	9	PESIMA	NO	NO	NO	0.232	0.281	1.924	0.540
A01SUQUI	2007	Río Sucio, contiguo a Beneficio El Sauce, Santa Ana	30/05/2007	14.012404	-89.542736	35	MALA	NO	NO	NO	0.370	0.248	1.850	0.391
A01SUQUI	2009	Río Sucio, contiguo a Beneficio El Sauce, Santa Ana	24/03/2009	14.013200	-89.542360	9	PESIMA	NO	NO	NO	0.337	0.230	2.125	0.488
A01SUQUI	2010	Río Sucio, contiguo a Beneficio El Sauce, Santa Ana	13/04/2010	14.013200	-89.542360	16	PESIMA	NO	NO	NO	0.217	0.305	1.484	0.452
A01SUQUI	2011	Río Sucio, contiguo a Beneficio El Sauce, Santa Ana	30/04/2011	14.013200	-89.542360	16	Pésima	NO	NO	NO				0.476
A04SUQUI	2006	Río Aranchacal, Hacienda San Francisco, Santa Ana	11/01/2006	14.014914	-89.530874	12	PESIMA	NO	NO	NO	0.419	0.308	4.496	1.386
A04SUQUI	2007	Río Aranchacal, Hacienda San Francisco, Santa Ana	30/05/2007	14.014914	-89.530874	59	REGULAR	NO	NO	NO	0.420	0.332	3.990	1.230
A04SUQUI	2009	Río Aranchacal, Hacienda San Francisco, Santa Ana	24/03/2009	14.016180	-89.530970	24	PESIMA	NO	NO	NO	0.401	0.379	4.098	1.553
A04SUQUI	2010	Río Aranchacal, Hacienda San Francisco, Santa Ana	13/04/2010	14.016180	-89.530970	30	MALA	NO	NO	NO	0.439	0.177	20.234	3.573
A04SUQUI	2011	Río Aranchacal, Hacienda San Francisco, Santa Ana	30/04/2011	14.016180	-89.530970	19	Pésima	NO	NO	NO				
A23SUQUI	2006	Río Suquiapa, San Pablo Tacachico, La Libertad	12/01/2006	14.039140	-89.305486	48	MALA	NO	NO	NO	0.660	0.174	18.590	3.243
A23SUQUI	2007	Río Suquiapa, San Pablo Tacachico, La Libertad						NO			0.560	0.185	12.824	2.906
A23SUQUI	2009	Río Suquiapa, San Pablo Tacachico, La Libertad	20/03/2009	14.037690	-89.306420	53	REGULAR	NO	NO	NO	0.542	0.221	13.217	2.915
A23SUQUI	2010	Río Suquiapa, San Pablo Tacachico, La Libertad	09/04/2010	14.037690	-89.306420	30	MALA	NO	NO	NO	0.660	0.3	15.65	4.697
A23SUQUI	2011	Río Suquiapa, San Pablo Tacachico, La Libertad	27/04/2011	14.037690	-89.306420	42	Mala	NO	NO	NO				3.818

### 3.8.7. ANÁLISIS TEMPORAL DE LA CALIDAD DE AGUA DE SITIOS DE ÁREA DE RECARGA, LAGO DE COATEPEQUE

Los resultados de los análisis de agua de las muestras recolectadas en los dos sitios de control muestran que en noviembre del 2006 existió un afloramiento de la cianobacteria *Microcystis aeruginosa* y que al momento de la colecta de agua en el campo, ésta estaba en su etapa de final del proceso de afloramiento. Esta especie produce toxinas dañinas al hombre y los animales, para este caso la toxina es llamada microcistina. A continuación se resume la evaluación del índice de calidad de agua realizado y las diferentes clasificaciones de Aptitud de Uso. (Ministerio de Medio Ambiente, 2006).

En la Tabla 36 se puede apreciar que de acuerdo a la evaluación de calidad de agua del Índice de Brown y de aptitudes de uso de agua conforme al decreto 51, las aguas muestreadas en el Lago de Coatepeque en el año 2006 poseen categorización “buena” para el sostenimiento de vida acuática pero no poseen aptitudes de uso para potabilización, riego o contacto humano como se puede apreciar en las Tablas 36, 37 y 38 respectivamente.

Tabla 36 Evaluación del Índice de Calidad de agua del Lago de Coatepeque y aptitudes de uso.

Fuente: Compilación de datos de informes MARN.

Sitio	FECHA	ICA	Calificación	POTABILIZACION	RIEGO	CONTACTO HUMANO
Coatepeque_1_Centro	11/07/2006	75	Buena	NO	NO	NO
Coatepeque_2_Centro	01/11/2006	75	Buena	NO	NO	NO

Tabla 37 Evaluación de Aptitud de uso de agua cruda para potabilizar a través de decreto 51, del Lago de Coatepeque.

Fuente: Compilación de datos de informes MARN.

Parámetros	Fecha	Cloruros	Cobre	Coliformes fecales	Color aparente	Demanda Bioquímica de Oxígeno	Fenoles	Nitratos	Oxígeno Disuelto	pH	Sólidos Totales Disueltos	Turbidez	Zinc
Unidad		mg/L Cl-	mg/L Cu	NMP/100 ml	Unidades Pt-Co	mg/L O2	mg/L Fenol	mg/L NO3-	mg/L O2	u de pH	mg/L	UNT	mg/L Zn
<b>Norma. Límite máximo permitido (LMP)</b>		50 a 250	1	1000	150	4	3.5	45	4 a 6.5	6.5 a 9.2	600	250	5
Coatepeque_1_Centro	11/07/06	296.5	0.01	5	5.1	1	7	4.5	6.1	8.77	1114	2	0.04
Coatepeque_2_Centro	01/11/06	288.17	NR	2	3	2	1	6.65	6.1	8.69	1034	2	NR

Tabla 38 Evaluación de Aptitud de uso de agua para riego a través de decreto 51, del Lago de Coatepeque

Fuente: Compilación de datos de informes MARN.

Parámetros	Fecha	Boro	Cloruros	Coliformes fecales	Conductividad	CRS	% Sodio	pH	RAS	Sulfatos
Unidad		mg/L	mg/L	NMP/100 ml	uS/cm	meq/L	%	u de pH	adim	mg/L
<b>Norma. Límite máximo permitido (LMP)</b>		2	195	1000	750	1.25	60	6.5 a 8.4	0 a 10	196.93
Coatepeque_1_Centro	11/07/06	2.35	296.5	5	1.71	-1.6149048	64.287834	8.77	7.44569657	275
Coatepeque_2_Centro	01/11/06	0.1	288.17	2	2.2	-2.1248118	73.6791876	8.69	11.0235237	270

### 3.8.8. ANÁLISIS TEMPORAL DE CORRELACIÓN ENTRE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA TOMADAS EN ÉPOCA LLUVIOSA Y ÉPOCA SECA, RESPECTIVAMENTE.

En esta sección se describe si existe efecto estacional debido a la incidencia de lluvia y si este efecto puede ser significativo para la interpretación de los análisis geoquímicos de aguas subterráneas. En la Figura 102 muestra el promedio mensual de lluvia para el año 2013 y en la Figura 3 el Promedio en general para el municipio.

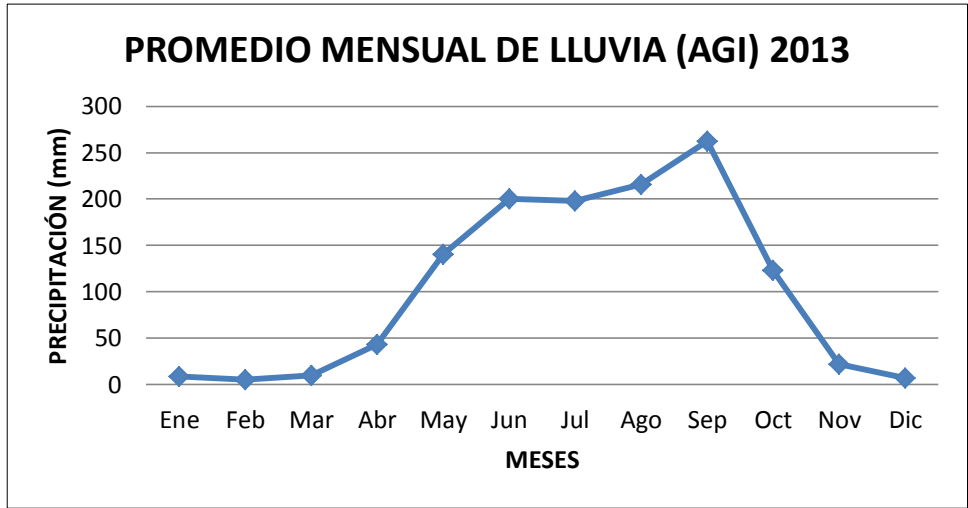


Figura 102 Promedio mensual de lluvia en área geográfica de interés, año 2013

Fuente: Compilación de datos de informes MARN.

En las Figuras 103, 104 y 105 se reportan los datos evolutivos anuales de lluvia para los meses de Abril, Mayo y Junio respectivamente, en donde puede apreciarse que el año 2010 hubo más precipitación que el resto de años analizados.

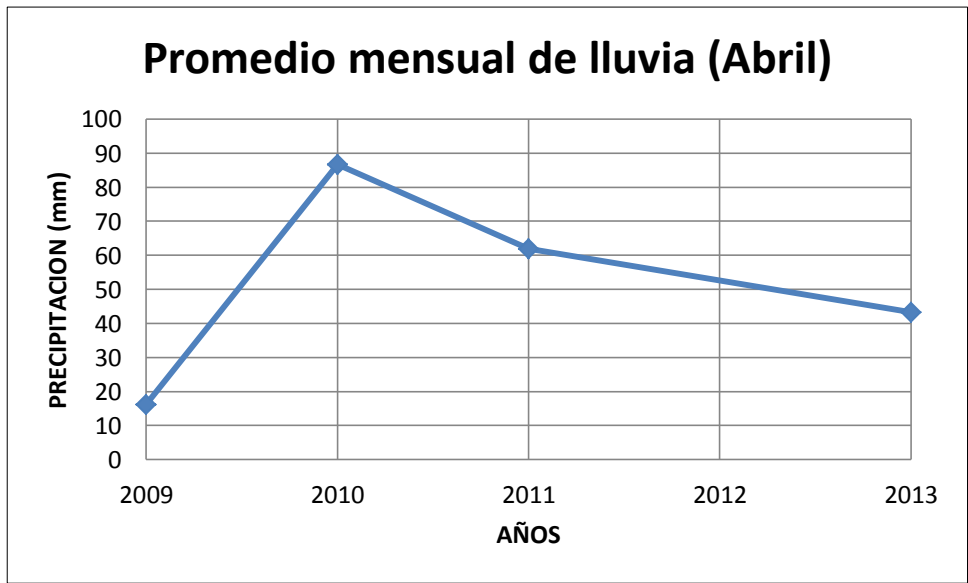


Figura 103 Evolución temporal de lluvia en el mes de abril (AGI)

Fuente: Compilación de datos de informes MARN.

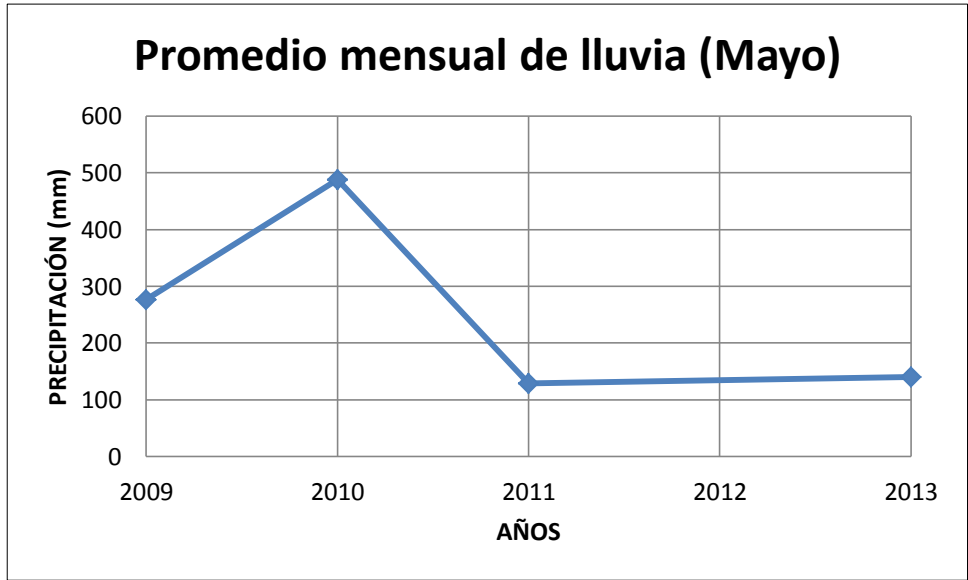


Figura 104 Evolución temporal de lluvia en el mes de mayo (AGI)

Fuente: Compilación de datos de informes MARN.

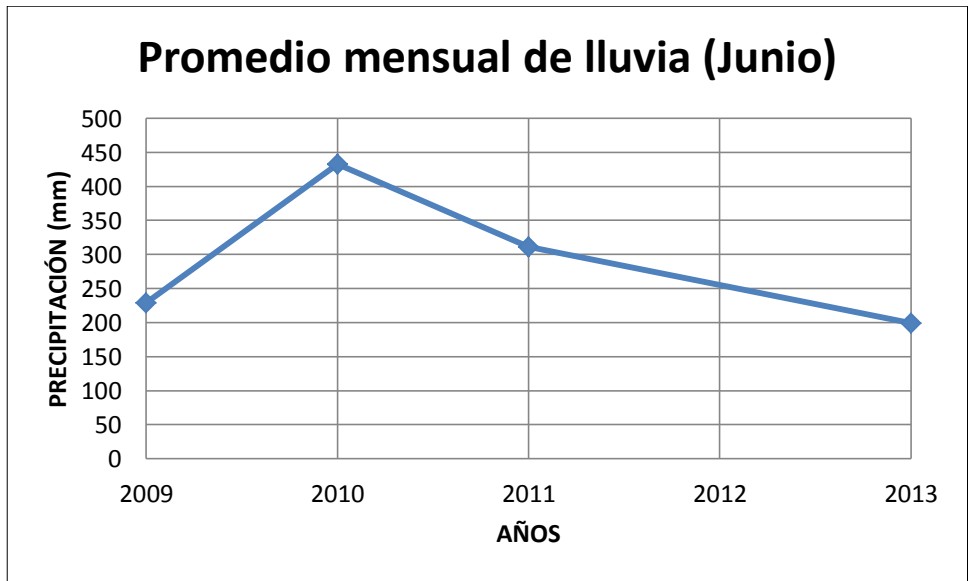


Figura 105 Evolución temporal de lluvia en el mes de junio (AGI)

Fuente: Compilación de datos de informes MARN.

En la siguiente sección se realizará un análisis estadístico para determinar si existe efecto de lluvia en algunas muestras tomadas en el mismo sitio pero en régimen estacional distinto.

### 3.8.8.1. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DEL SITIO SAN-02, TOMADAS EN ÉPOCA LLUVIOSA Y ÉPOCA SECA

Se ha tomado como ejemplo para esta sección, un pozo ubicado en el área geográfica del acuífero productivo. En la Tabla 39 y Figuras 106, 107, 108 y 109 se muestra que no existe diferencia significativa entre muestras tomadas en época seca y época lluviosa para el pozo SAN-02.

Tabla 39 Análisis comparativo de muestras de agua de pozo SAN-02 de diferentes épocas del año

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

<b>SAN-02</b>	<b>Unidades</b>	<b>EPOCA SECA</b>	<b>EPOCA LLUVIOSA</b>
Fecha	dd/mm/aaaa	23/03/2012	21/07/2006
Latitud	° Decimales	14.23472	14.23472
Longitud	° Decimales	-89.531343	-89.531343
pH	NMP/100ml	6.6	6.71
CONDUCTIVIDAD	upH	595	361
ALCALINIDAD	uS/cm	18.1	149.33
CALCIO	mg/L	37.81	36.84
MAGNESIO	mg/L	23.95	16.51
POTASIO	mg/L	6.17	1.8
SODIO	mg/L	23	97.8
FOSFATOS	mg/L	1.225	0.9
SULFATOS	mg/L	4.15	31
CLORUROS	mg/L	26.44	23.16
NITRATOS	mg/L	23.6	16.51
SOLIDOS DISUELTOS	mg/L	231.5	193
BICARBONATO	mg/L	18.1	149.33
DUREZA TOTAL	mg/L	193	16

SAN-02	Unidades	EPOCA SECA	EPOCA LLUVIOSA
SILICIO	mg/L	92.25	121.41
TEMPERATURA	°C	29.1	26.3
FLUOR	mg/L	0.32	0.345
NITRÓGENO	mg/L	0.19	0.225

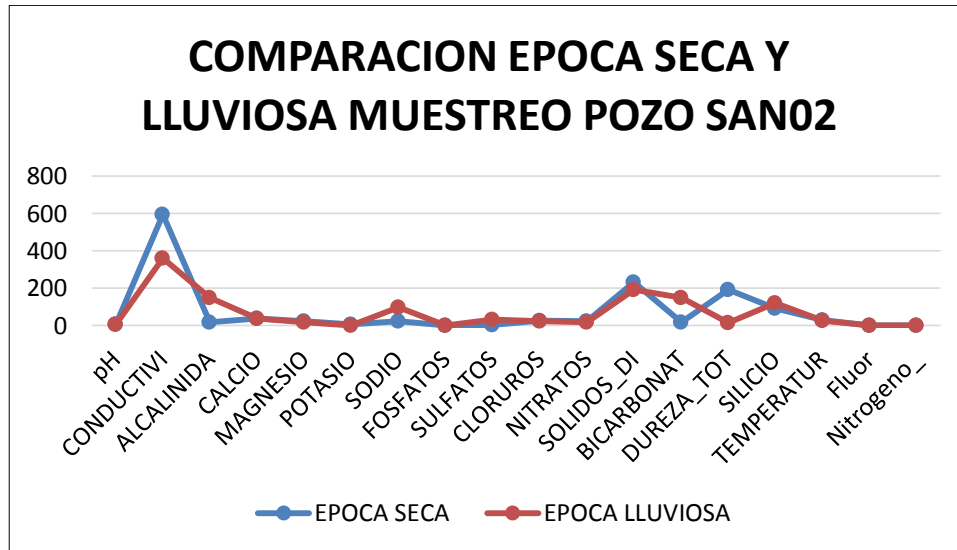


Figura 106 Comparación de series de datos entre muestras de agua subterránea del pozo SAN-02 en diferentes épocas del año

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

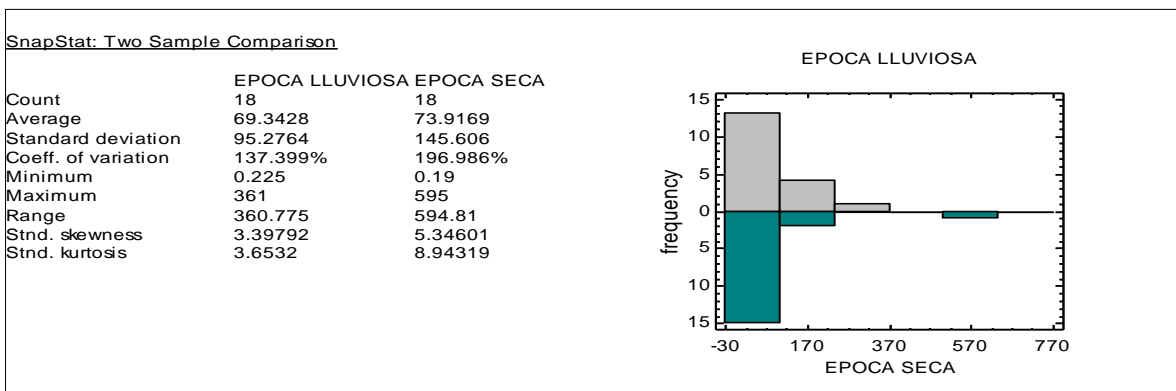


Figura 107 Estadísticas básicas e histograma de muestras de aguas tomadas en diferentes épocas del pozo SAN-02

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

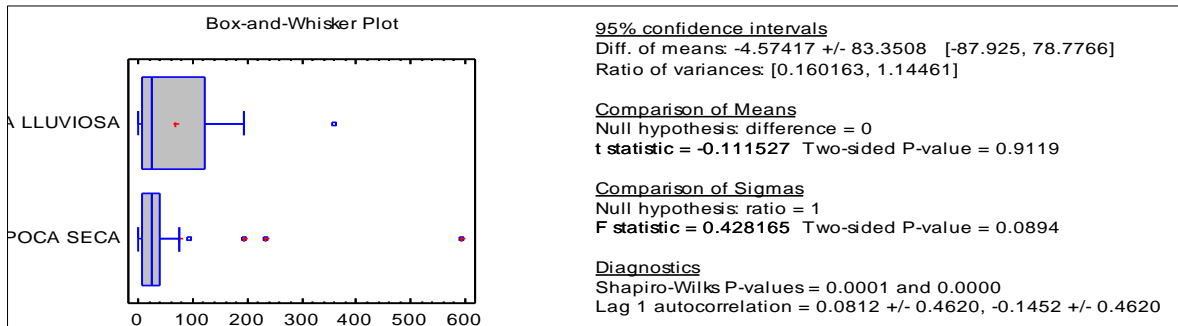


Figura 108 Gráfico de Box-Plot y comparación de medias del pozo SAN-02

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

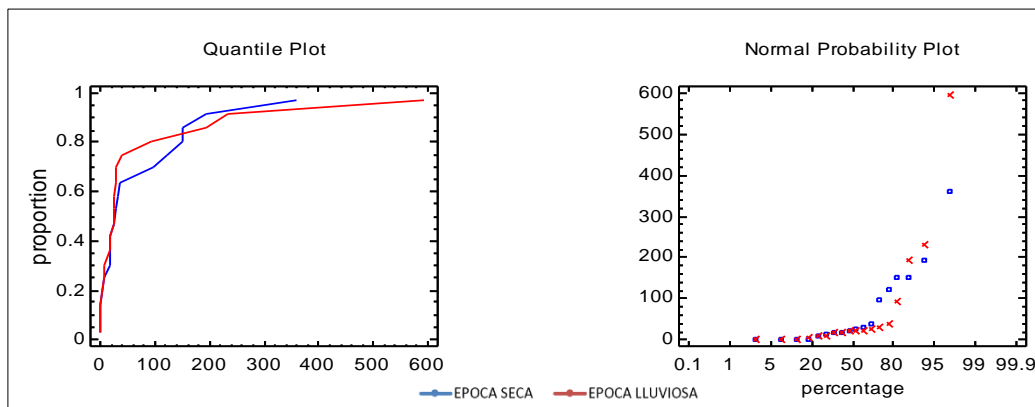


Figura 109 Gráfico de cuantiles y probabilidad normal de muestras de agua en diferentes épocas para el pozo SAN-02

Fuente: Compilación de datos de informes MARN y datos propios.

Los 18 valores de época lluviosa tienen una media de 69.3428 y una desviación estándar de 95.2764, mientras que los 18 valores de época seca tienen una media de 73.9169 y una desviación estándar de 145.606. Dado que el valor P (0.9119) para la prueba t es mayor o igual a 0,05, no hay una diferencia estadísticamente significativa entre los medios en el nivel de significación del 5%., éstos resultados suponen que las varianzas de las dos muestras son iguales. Esto se basó en la prueba F, que tiene un P-valor (0.0894) mayor que o igual a 0.05. El diagrama de caja y bigotes muestra que hay 2 puntos exteriores y 3 lejanos..



### **3.9. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICOS Y GEOESPACIAL DE DATOS.**

Actualmente existen herramientas de estadística bayesiana que ayudan a resolver algunos de los problemas planteados anteriormente, y aportan en diferentes aspectos tales como: Reducción de variables, análisis multivariable, escalado de datos, agrupamiento (Clúster), correlación, construcción de vectores que caracterizan las variables (Factores principales análisis de loadings), construcción de vectores que caracterizan las observaciones (Factores principales análisis de scores), ploteo multivariado, árboles de clasificación, variogramas espaciales (Para análisis de anisotropía), geoestadística (Presentación de información estadística en sistemas de información geográfica), análisis temporal a partir de indicadores estadísticos (Índices de calidad de agua), gráficos 3D de variables puras y vectores estadísticos, etc. En este apartado se desarrollan diversas herramientas que permiten aportar muchos elementos a la evaluación hidrogeológica de la investigación.

#### **3.9.1. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

En primer lugar se describen matrices de gráficos de factores principales que nos permiten apreciar agrupaciones o clústers a partir de gráficos de dispersión con etiquetas de acuerdo a diferentes atributos geoespaciales del sistema tales como: geología-estratigrafía, estructuras geológicas, tipo de acuífero, tipo de suelo y vulnerabilidad del terreno (Método Drastic). Luego se describe el Dendogramas de las variables químicas y el Dendogramas de las observaciones o sitios de muestreo, con el fin de clasificarlas y agruparlas. Después se ha realizado una técnica estructurada de análisis que se conoce como arboles de clasificación de la base de datos en cuanto a los mismos atributos antes mencionados: geología-estratigrafía, estructuras geológicas, tipo de acuífero, tipo de suelo y vulnerabilidad del terreno (Método Drastic) que nos permite establecer intervalos de las variables químicas en los que se cumplen los diferentes atributos.

Además, se ha realizado un análisis de 3D de factores principales (En el eje “Z”) y se han ubicado en ejes geográficos “X” e “Y” para luego compararse con gráficos 3D de

variables geoquímicas puras en los mismos ejes de coordenadas geográficas y finalmente se presentan 13 variogramas espaciales que representan los componentes principales que a su vez representan al 80% de la información geoquímica recopilada y a partir de ellos mostrar la anisotropía que posee el terreno. Lo anterior conlleva a un mejor conocimiento del territorio en estudio y mejorar o revalidar el modelo conceptual hidrogeológico.

### **3.9.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

En este apartado se detalla la aplicación de técnicas cualimétricas y quimiométricas de análisis de información y minería de datos tales como: Análisis de componentes principales, clasificación a través de Dendogramas o clúster no jerárquicos, Árboles de clasificación, variogramas, entre otros.

El objetivo de realizar diferentes tipos de técnicas estadísticas a la matriz de datos es para definir, caracterizar, clasificar y comparar la química superficial y subterránea de los distintos sitios de muestreo, con el fin de comprender el comportamiento de los fenómenos hidrogeoquímicos e hidroquímicos cuantificados.

A continuación se detallan las técnicas que describen las nuevas metodologías de análisis realizadas en el área geográfica de interés.

#### **3.9.2.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA**

En esta sección se detallan los estadísticos descriptivos básicos de la base de datos geoquímica de la presente investigación. En la Tabla 40 pueden observarse medidas de tendencia central (media, mediana, percentiles), medidas de dispersión (varianza, desviación típica, mínimo, máximo) y medidas de forma (asimetría, curtosis), etc.

Tabla 40 Estadística descriptiva básica de la base de datos geoquímica

Parámetros	Mínimo	Máximo	1° Cuartil	Mediana	3° Cuartil	Media	Varianza (n)	Desviación típica (n)	Coefficiente de variación	Asimetría (Pearson)	Curtosis (Pearson)	Límite inferior de la media (95%)	Límite superior de la media (95%)
pH	0	9.1	0	6.845	7.32	5.116511	11.655992	3.41408728	0.667268615	-0.744599459	-1.248449612	4.397438367	5.835583856
CONDUCTIVI	0	2600	235.75	389	627.5	533.0822	301622.145	549.20137	1.030237639	1.77526178	3.253210742	417.4098026	648.7546418
ALCALINIDA	0	345.28	85.32	130.965	228.6325	149.5292	10818.6803	104.012885	0.695602397	0.071739518	-1.009192739	127.6220989	171.4363455
CALCIO	0	86.5	17.91	27.845	38.17	30.05178	559.373995	23.6510887	0.787011299	0.758409812	0.09515304	25.07040155	35.03315401
MAGNESIO	0	84.85	8.635	18.23	24.2575	22.344	546.784771	23.3834294	1.046519397	1.572257103	1.596138138	17.41899798	27.26900202
POTASIO	0	148	0.675	6.835	14.1	11.77178	348.434542	18.6664014	1.585690944	4.788602353	29.91995854	7.840272988	15.70328257
SODIO	0	545	5.87	22.345	41.175	64.26383	12850.0917	113.358245	1.763950871	2.432254515	5.007094695	40.3883968	88.13926986
FOSFATOS	0	8.16	0	0.2175	0.675	0.817111	2.38821221	1.54538416	1.891277871	3.054853444	9.701492496	0.491623348	1.142598874
SULFATOS	0	270	9	26.04	44.875	46.47311	4120.38848	64.1902522	1.381234238	2.117316518	3.500615964	32.95340378	59.99281844
CLORUROS	0	363.64	5.6775	20.97	48.7175	59.095	9506.43937	97.5009711	1.64990221	2.11296753	2.867798019	38.55941167	79.63058833
NITRATOS	0	87.3	1.37	11.07	22.28	15.52744	332.399388	18.2318235	1.174167685	1.898432253	4.143061124	11.68747016	19.36741873
NITRITOS	0	1.34	0	0	0.015875	0.049344	0.0325627	0.18045137	3.656974459	5.312105306	30.71952316	0.011337899	0.08735099
SOLIDOS_TO	0	1191	0	253	438.75	309.6778	130476.174	361.214858	1.16642163	1.196354587	0.420528838	233.5989496	385.756606
SOLIDOS_DI	0	1165	183.25	302.75	479.125	364.7244	105576.723	324.92572	0.890880019	1.11208127	0.472528555	296.28881	433.1600789
BORO	0	3.6	0	0	0.1875	0.365767	0.6748512	0.82149328	2.245948989	2.554081846	5.277506948	0.192744311	0.538789022
HIERRO	0	0.17	0	0	0.03	0.027156	0.00242489	0.0492432	1.813374692	1.691851204	1.423425442	0.016783987	0.037527124
MANGANESO	0	4.83	0	0	0	0.063444	0.2596848	0.50959278	8.032110384	9.102116656	82.06189068	-0.043885641	0.17077453
BICARBONAT	0	420.9	104.005	150	202.6175	146.4148	9256.43066	96.2103459	0.657108165	0.055588647	-0.249955669	126.1510201	166.6785355
CARBONATO	0	0	0	0	0	0	0	0				0	0
DUREZA_TOT	0	406.4	100.08	150.51	259.9075	169.0216	15665.0082	125.159931	0.740496857	0.302413242	-0.851854723	142.660456	195.3826551
NIQUEL	0	0.0083	0	0	0	0.000624	3.1218E-06	0.00176687	2.829514965	2.97901022	8.051082672	0.000252306	0.000996582
SILICIO	0	121.41	0	6.29	40.515	28.84233	1296.48091	36.0066787	1.248396873	0.994492658	-0.34314822	21.25863111	36.42603556
ARSENICO	0	0.0068	0	0	0	0.00093	3.1792E-06	0.00178303	1.917241121	1.710193881	1.584453492	0.000554459	0.001305541
MERCURIO	0	0.0021	0	0	0	6.56E-05	9.2702E-08	0.00030447	4.644469858	5.345425451	29.15650487	1.42812E-06	0.000129683

Parámetros	Mínimo	Máximo	1° Cuartil	Mediana	3° Cuartil	Media	Varianza (n)	Desviación típica (n)	Coefficiente de variación	Asimetría (Pearson)	Curtosis (Pearson)	Límite inferior de la media (95%)	Límite superior de la media (95%)
CROMO	0	0.0353	0	0	0	0.000621	1.7865E-05	0.00422673	6.805106055	7.188075632	52.15982844	-0.000269119	0.001511341
PLOMO	0	0.01	0	0	0	0.000301	1.5101E-06	0.00122887	4.081102406	6.022442931	41.52679115	4.22883E-05	0.000559934
O18	-7.7	0	0	0	0	-1.61667	8.64605556	2.94041758	-1.818814999	-1.285029628	-0.310844359	-2.235975421	-0.997357912
DEUTERIO	-51.1	0	0	0	0	-10.8433	388.792233	19.7178151	-1.818427463	-1.283555722	-0.316878694	-14.99628616	-6.690380502
Nitrogeno	0	91.5	0	0	3.3275	5.258222	189.827751	13.7777992	2.620239049	4.016704758	18.6768173	2.356351512	8.160092933
Turbidez	0	670	0	0	1.16625	15.98744	5910.5675	76.8802153	4.808787016	7.313395144	56.76801068	-0.205014285	32.17990317
Color_Apar	0	2402.5	0	0	9.625	71.83889	84597.8213	290.857046	4.048740878	6.283855613	44.30400118	10.57877536	133.0990024
Flúor	0	0.945	0	0	0.24625	0.116722	0.04346787	0.20848949	1.786202196	1.706072038	2.19144456	0.072810308	0.160634137
Litio	0	0.047	0	0	0	0.001467	6.2582E-05	0.00791089	5.39379043	5.226111825	25.41033509	-0.00019952	0.003132854
DBO	0	728	0	0	2	17.77967	7585.47915	87.0946563	4.898553943	6.881684162	49.70521161	-0.564150688	36.12348402
DQO	0	1296.5	0	0	5.0975	31.47689	22571.4624	150.238019	4.772962783	7.185999505	54.79643823	-0.166140691	63.11991847
Nitrogeno_	0	22.6	0	0	0.25875	1.325111	15.87518	3.98436695	3.006817252	3.605170711	12.74147596	0.48592645	2.164295772
SOLIDOS_SE	0	355	0	0	0	4.066667	1383.97844	37.2018608	9.147998549	9.325680515	84.9828406	-3.768763984	11.90209732
SULFUROS_	0	0.424	0	0	0	0.009567	0.00270575	0.05201683	5.437299813	6.570951154	45.34729032	-0.001389084	0.020522417
CROMO_HEXA	0	0.07	0	0	0	0.001556	6.6469E-05	0.00815286	5.241124665	7.088957005	53.88993308	-0.000161594	0.003272706
SOLIDOS_SU	0	342.18	0	0	2	12.34844	1822.46122	42.6902942	3.45713943	5.723735308	38.11498744	3.357043674	21.33984522
OXIGENO_DI	0	8.02	0	0	1.185	1.248522	5.20773258	2.2820457	1.827797424	1.59610573	1.098058096	0.767879306	1.729165138
FOSFORO_TO	0	15	0	0	0.1062	0.90403	5.92782921	2.43471337	2.693177629	3.627294779	14.46038627	0.391232323	1.416827677

### 3.9.2.2. ESTADÍSTICA BAYESIANA

En esta sección se describen los resultados acerca de técnicas de estadística bayesiana tales como: análisis de componentes principales, Dendogramas, árboles de clasificación, variogramas espaciales, entre otros.

Se han seleccionado 13 componentes principales representativos a la información total de la base de datos global (Los 13 vectores representan aproximadamente el 80% de la información)

El análisis factorial para la creación de variables de mezcla (*pool*) permite, dado un conjunto de variables pertenecientes a distintas dimensiones, encontrar el factor común que es responsable de la correlación entre varios indicadores (compuestos por una combinación lineal de variables en cada dimensión; i.e *pool index*) y estimar el patrón, las asociaciones y la variabilidad compartida dentro de las dimensiones. De esta manera, confeccionando variables mezcla de variables correlacionadas se reduce la dimensionalidad del problema. Además, el análisis factorial permite: Identificar el número más pequeño de factores que mejor explica la correlación entre indicadores; identificar, a través de la rotación en el espacio  $n$ -dimensional ( $n$  = número de variables) la solución más plausible; proveer una interpretación de los factores comunes. (Sharma, 1996)

El Análisis factorial fue aplicado a cada una de estas dimensiones para poder tener variables de mezcla (*pool*) representativas de las dimensiones evitando que se analicen variables pertenecientes a distintas dimensiones. Con la primera corrida del Análisis factorial exploratorio se han identificado (con la rotación de los factores), las variables más correlacionadas en cada factor de cada dimensión.

Las variables han sido seleccionadas de manera de excluir en un factor una variable ya encontrada en el factor previo, según criterios de consistencia con los objetivos de la investigación y según el análisis de las varianzas.

Para la confección de las variables mezcla, las variables entraron en la combinación lineal de los factores principales y con dichos factores y en base al conocimiento de otras variables cualitativas asociadas a cada observación se han obtenido explicaciones hidrogeoquímicas que representan clúster (agrupamientos) que aportan nuevas regla y decisiones a tomar en cuenta para la actualización del modelo conceptual hidrogeológico.

Otra técnica bayesiana que se ha utilizado en esta investigación es el análisis de clúster jerárquico de conglomerados a través de Dendogramas de variables (Parámetros hidroquímicos) y Objetos (Sitios de muestreo), con lo cual se han encontrado correlaciones directas. También se ha llevado a cabo un análisis multivariado de correspondencias múltiples a través de árboles de clasificación y reglas de integración de las variables en cuanto a las magnitudes dentro del área geográfica de interés. Finalmente se ha utilizado la técnica de variogramas espaciales para poder definir la anisotropía del sistema. A continuación se presentan los resultados de cada una de las técnicas antes mencionadas

## **A. FACTORES PRINCIPALES Y VARIABLES QUIMICAS**

En esta sección se evidenció la correspondencia de los componentes principales como vectores graficados individualmente versus los ejes “X” e “Y” y algunas de las variables cuantitativas de tipo geoquímico A continuación a la izquierda de cada figura de la 110 a la 122 se presentan los 13 componentes principales respecto a su propia ubicación espacial “X” e “Y” (superficies paramétricas representados en los gráficos tipo A), y a la derecha de esas figuras se representan distintas superficies paramétricas de especies puras (superficies paramétricas del 1 al 9 dependiendo de cada caso), observándose que claramente corresponden o resumen dicha información. Es importante recordar que en la sección de teoría de este apartado se definió que la metodología de componentes principales permite reducir variables, conservar la variabilidad de la información, agrupar variables y observaciones a partir de atributos o variables cualitativa que se deban y puedan definir de manera visual. A manera de referencia se ha sobrepuesto sobre los gráficos de componentes principales el mapa del área geográfica de interés y a continuación se resumen dichas comparaciones.

En la figura 110 se visualiza una comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 1 y oxígeno disuelto. En la figura 111 la comparación del componente principal 2 y Potasio. En la figura 112 la comparación del componente principal 3 y Sodio, Cloruros, Conductividad Eléctrica, Magnesio, Sulfatos, Sólidos disueltos y Boro. En la figura 113 la comparación del componente principal 4 y Nitratos y Fosfatos. En la figura 114 la comparación del componente principal 5 y la referencia espacial. XYZ: Longitud-Latitud y Elevación. En la figura 115 se visualiza una comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 6 y Bicarbonatos. En la figura 116 la comparación del componente principal 7 y nivel freático. En la figura 117 la comparación del componente principal 8 y Hierro. En la figura 118 la comparación del componente principal 9 y Cobre y Flúor. En la figura 119 la comparación del componente principal 10 y Dureza total, Alcalinidad, Oxígeno<sub>18</sub> y Deuterio. En la figura 120 la comparación del componente principal 11 y Silicio, Arsénico, Mercurio, Cromo, Cromo y Níquel. En la figura 121 la del componente principal 12 y Calcio. En la figura 122 la del componente principal 13 y Litio, DBO, DQO, Salinidad, Dióxido de Carbono, Nitrógeno amoniacal, Sólidos sedimentables, Sulfuros y Nitritos. A continuación se presentan las figuras antes detalladas.

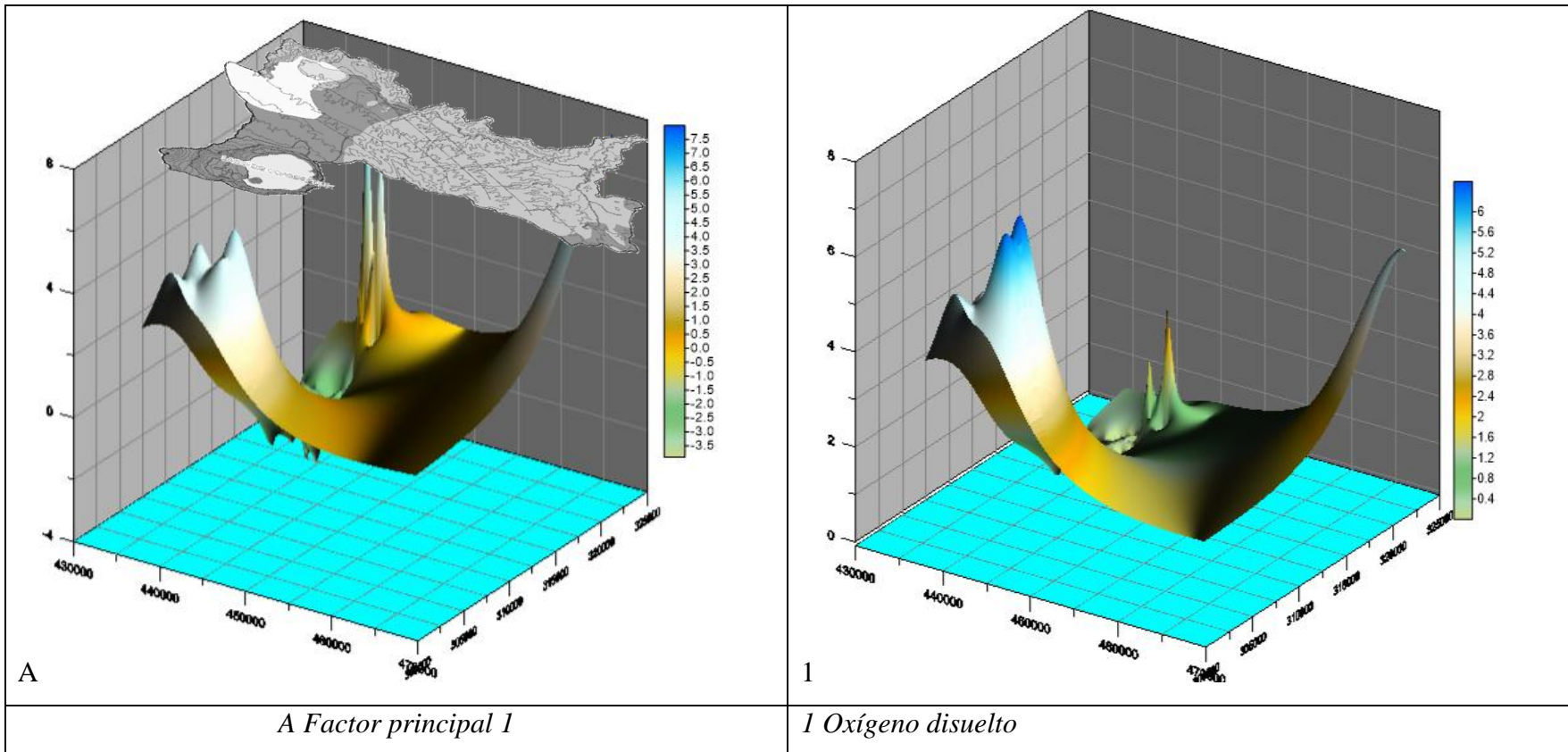


Figura 110 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 1 y Oxígeno

Fuente: Elaboración propia.



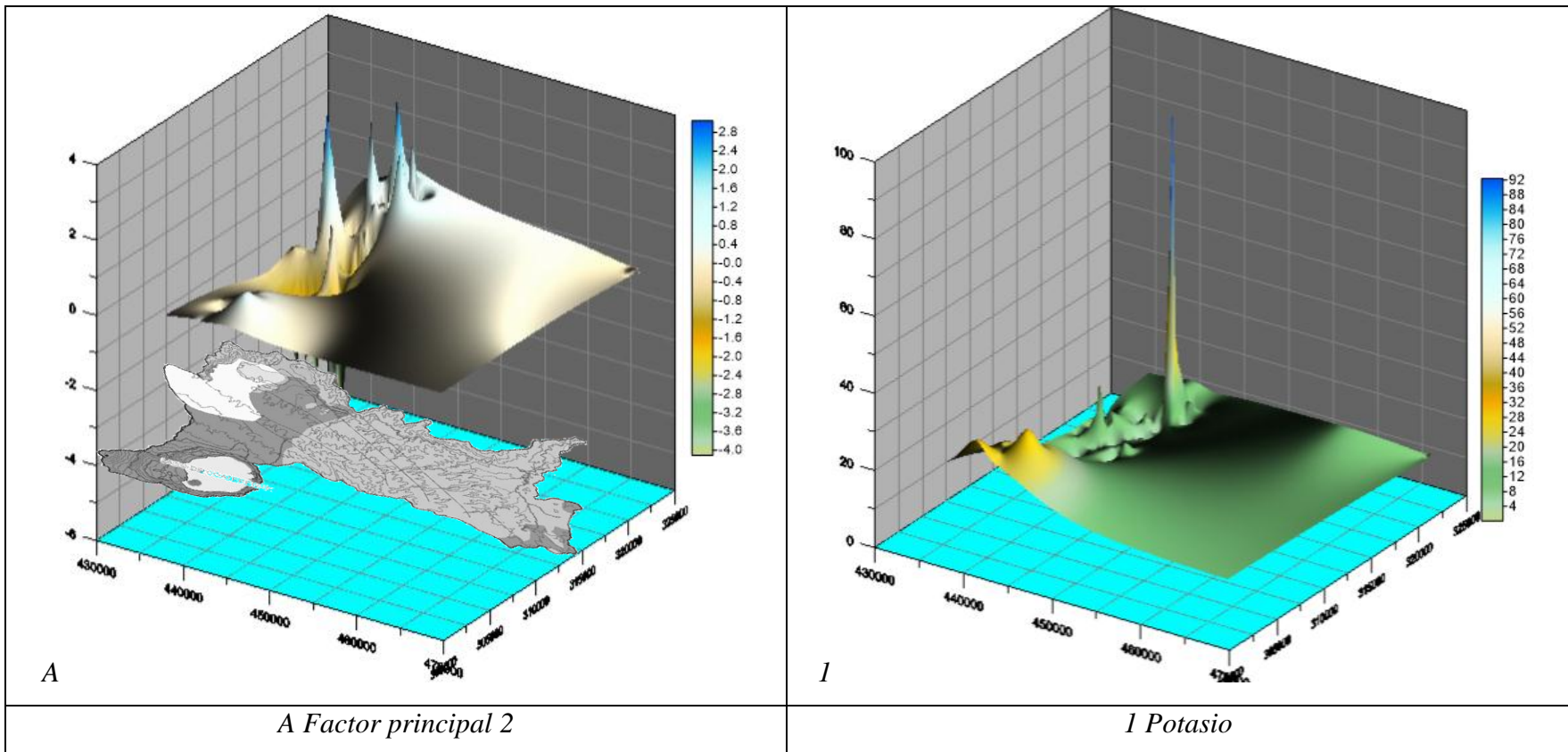


Figura 111 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 2 y Potasio

Fuente: Elaboración propia.

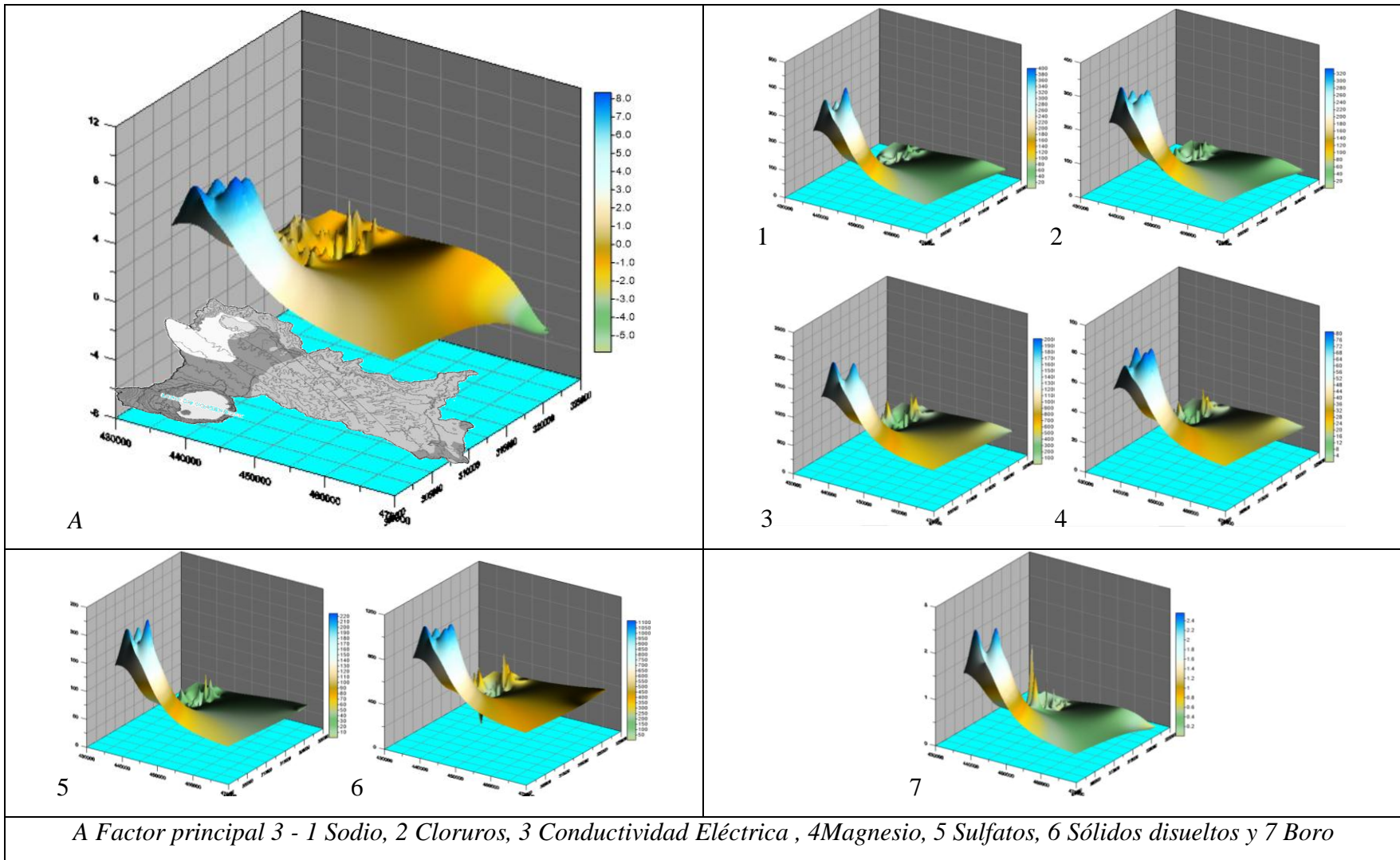


Figura 112 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 3 y algunas especies químicas

Fuente: Elaboración propia.

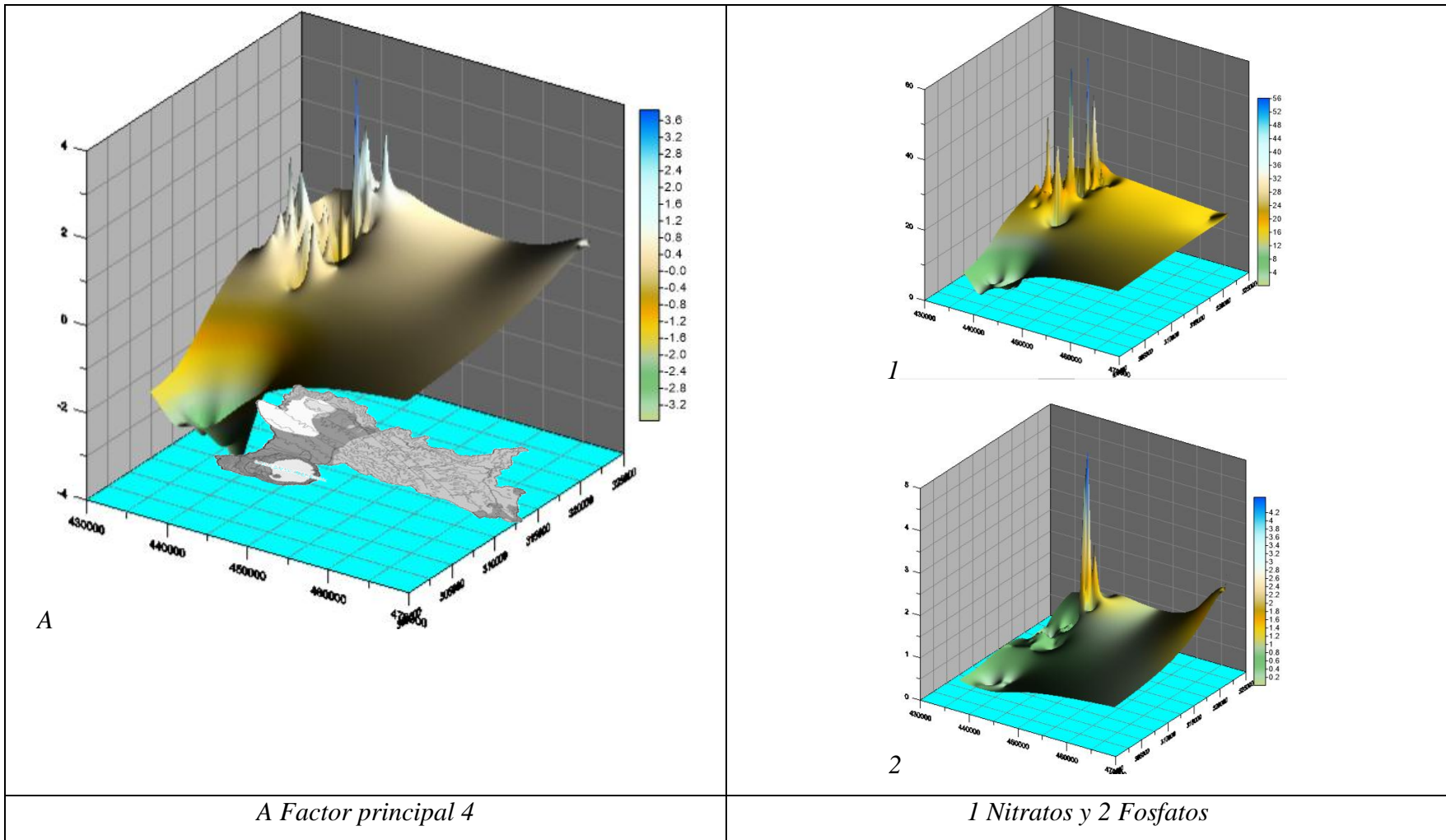


Figura 113 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 4 y algunas especies químicas  
 Fuente: Elaboración propia.

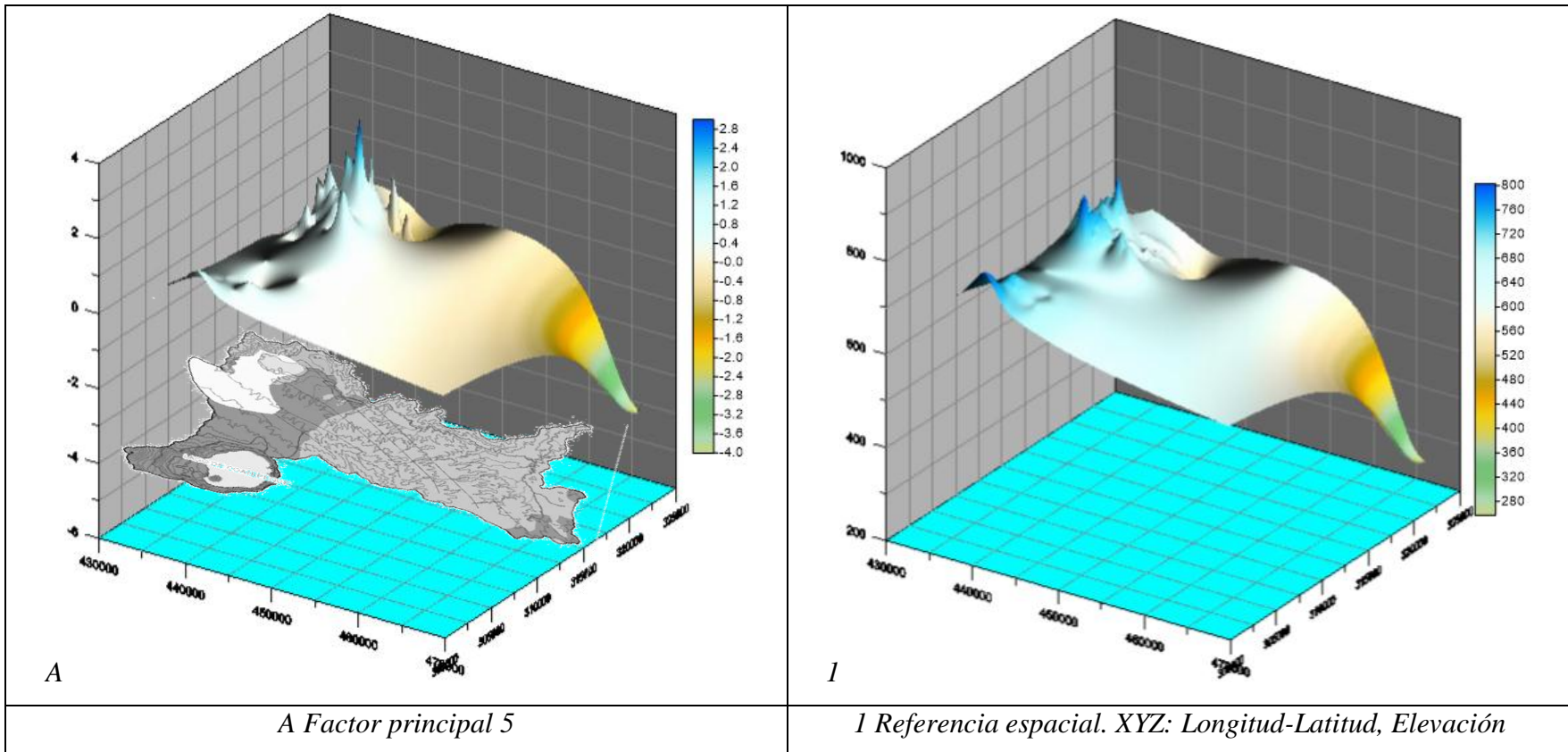


Figura 114 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 5 y referencia espacial

Fuente: Elaboración propia.



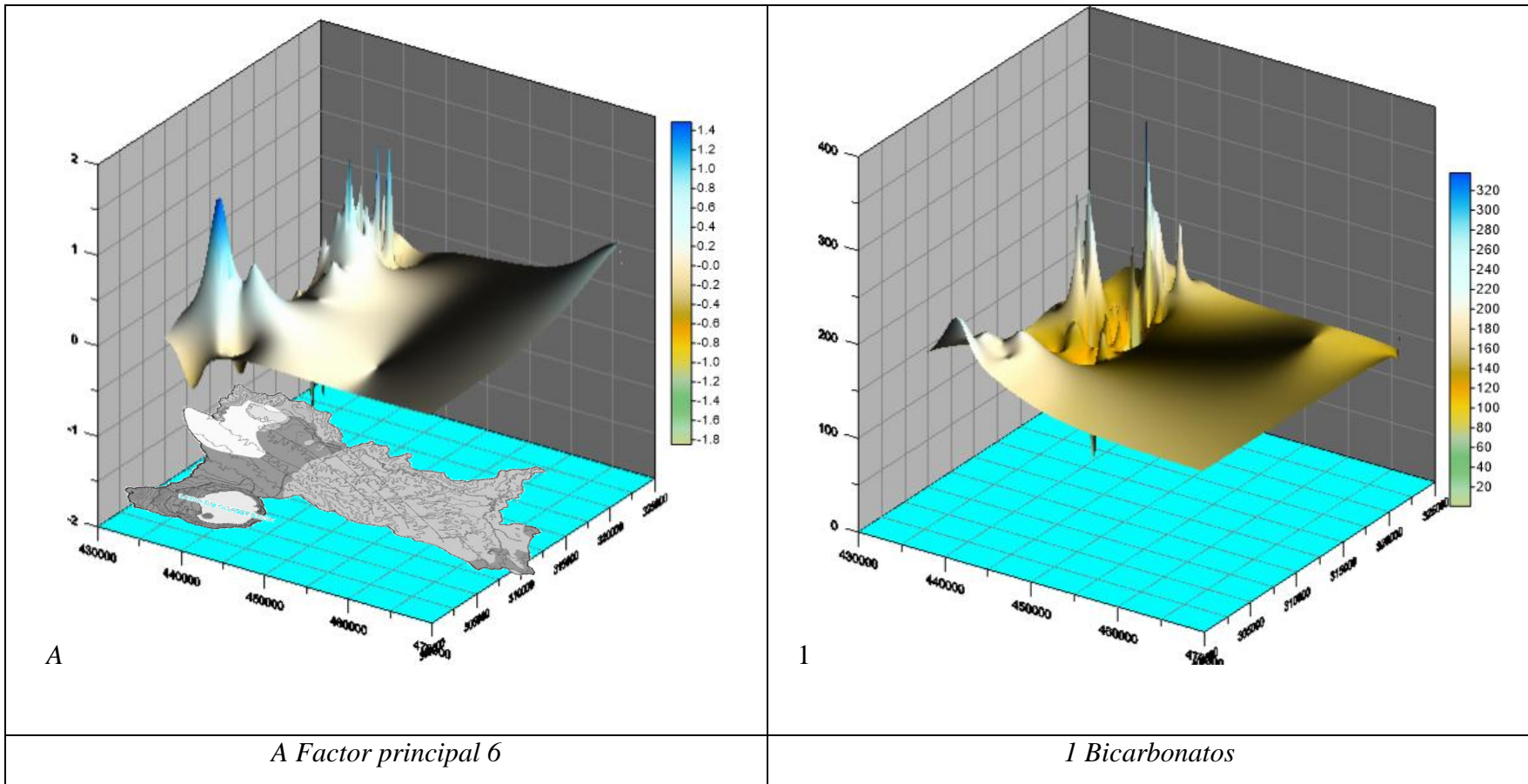


Figura 115 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 6 y Bicarbonatos

Fuente: Elaboración propia.

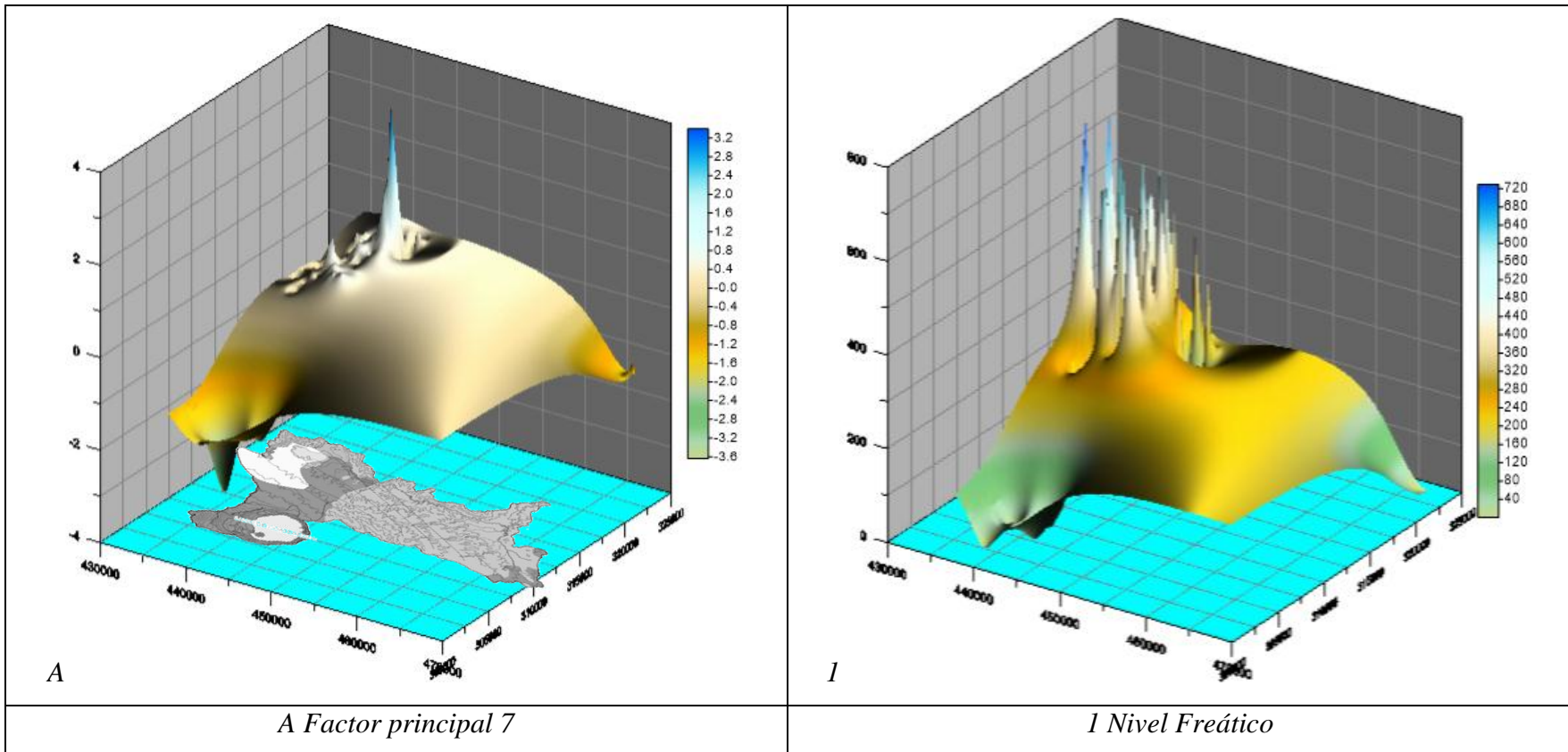


Figura 116 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 7 y Nivel freático

Fuente: Elaboración propia.

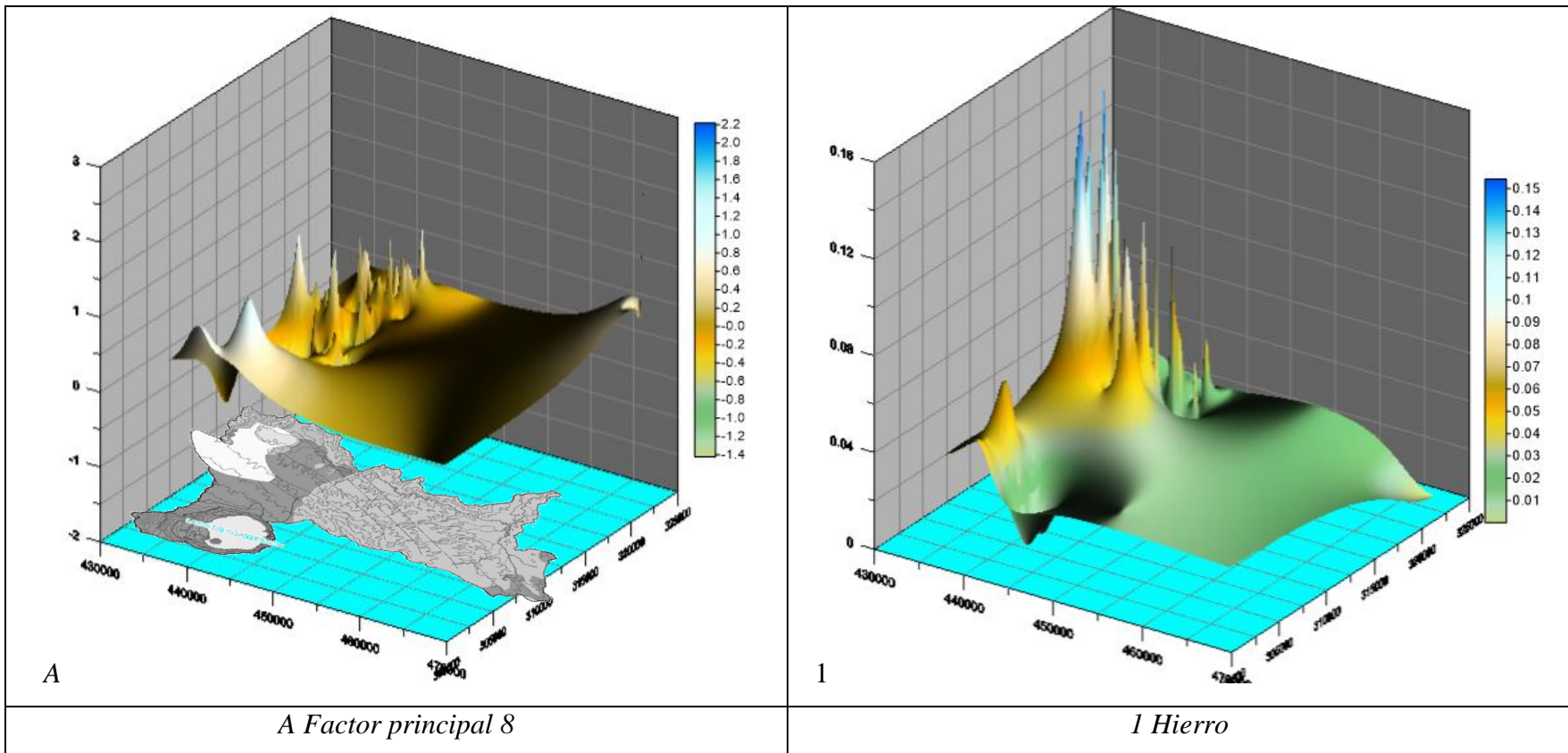


Figura 117 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 8 y Hierro

Fuente: Elaboración propia.

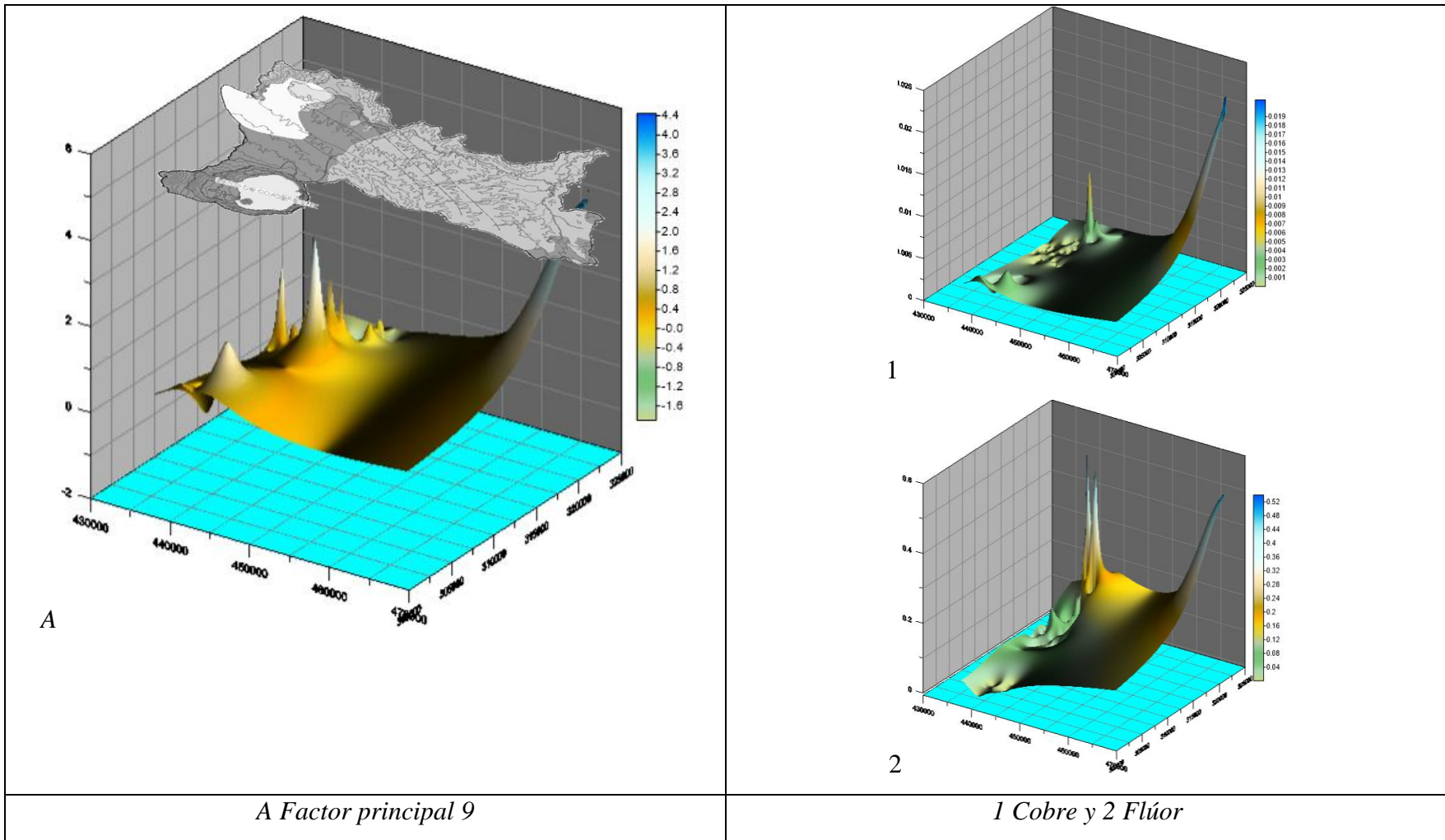


Figura 118 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 9 y algunas especies químicas

Fuente: Elaboración propia.



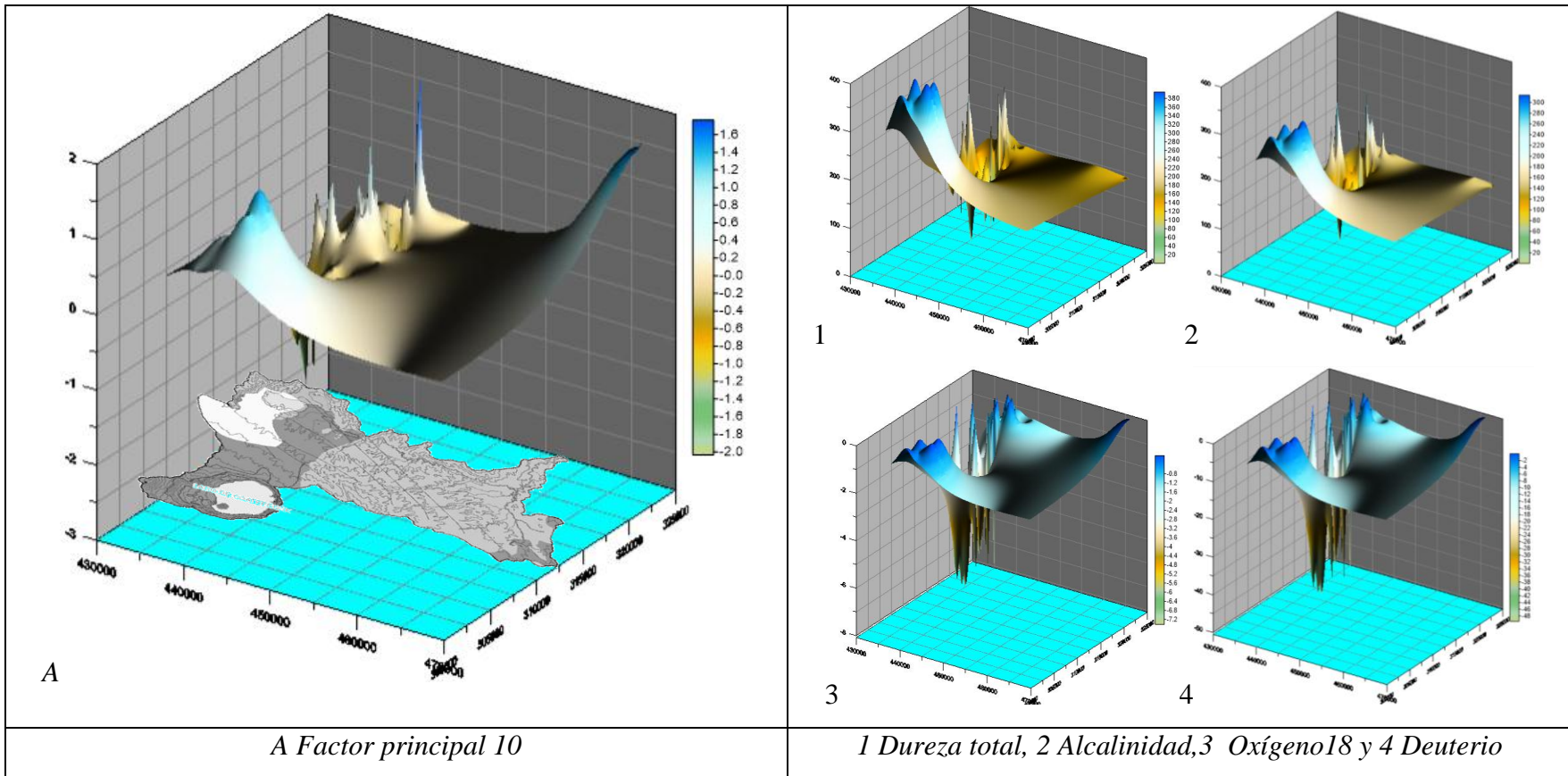


Figura 119 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 10 y algunas especies químicas

Fuente: Elaboración propia.

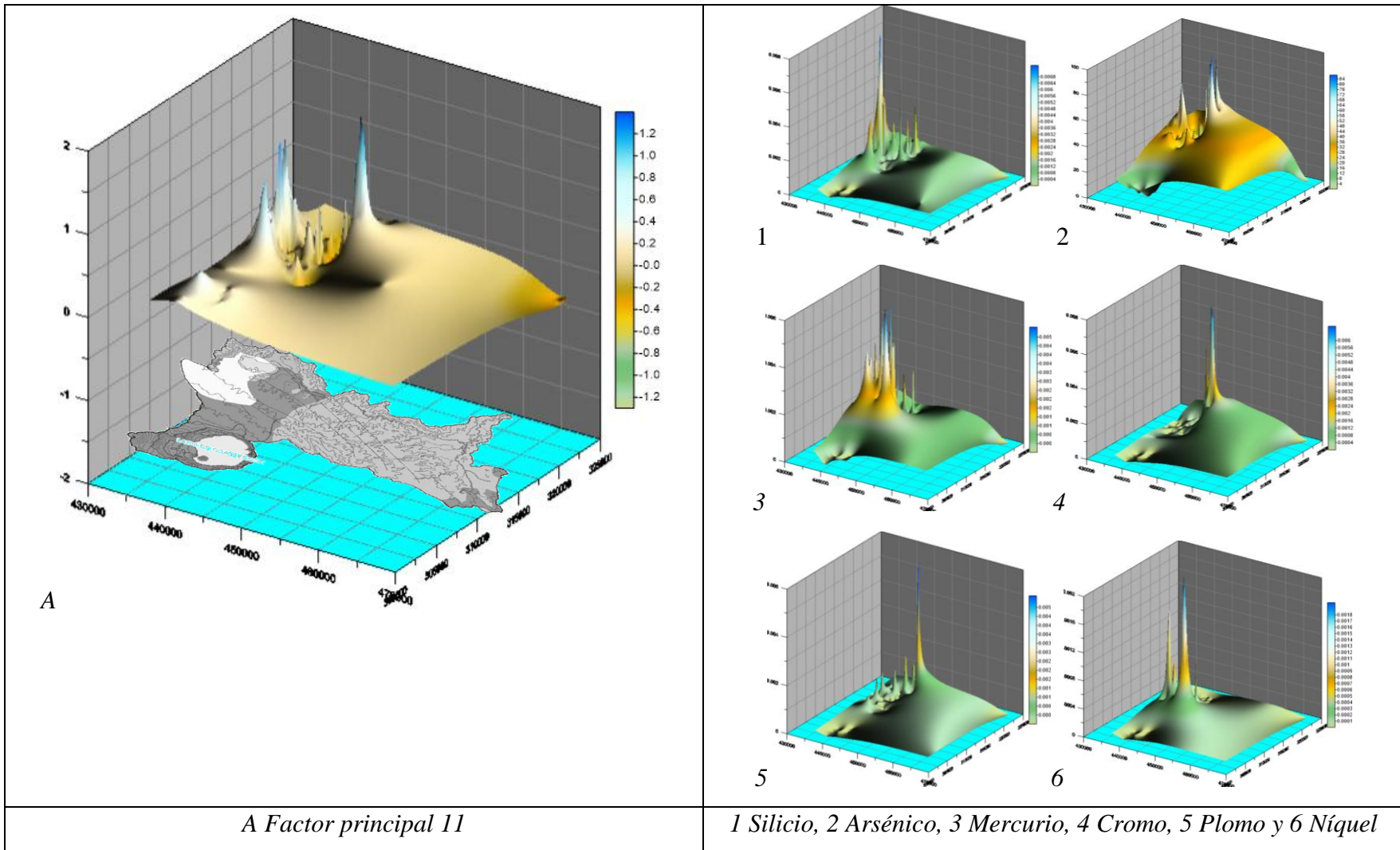


Figura 120 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 11 y algunas especies químicas

Fuente: Elaboración propia.

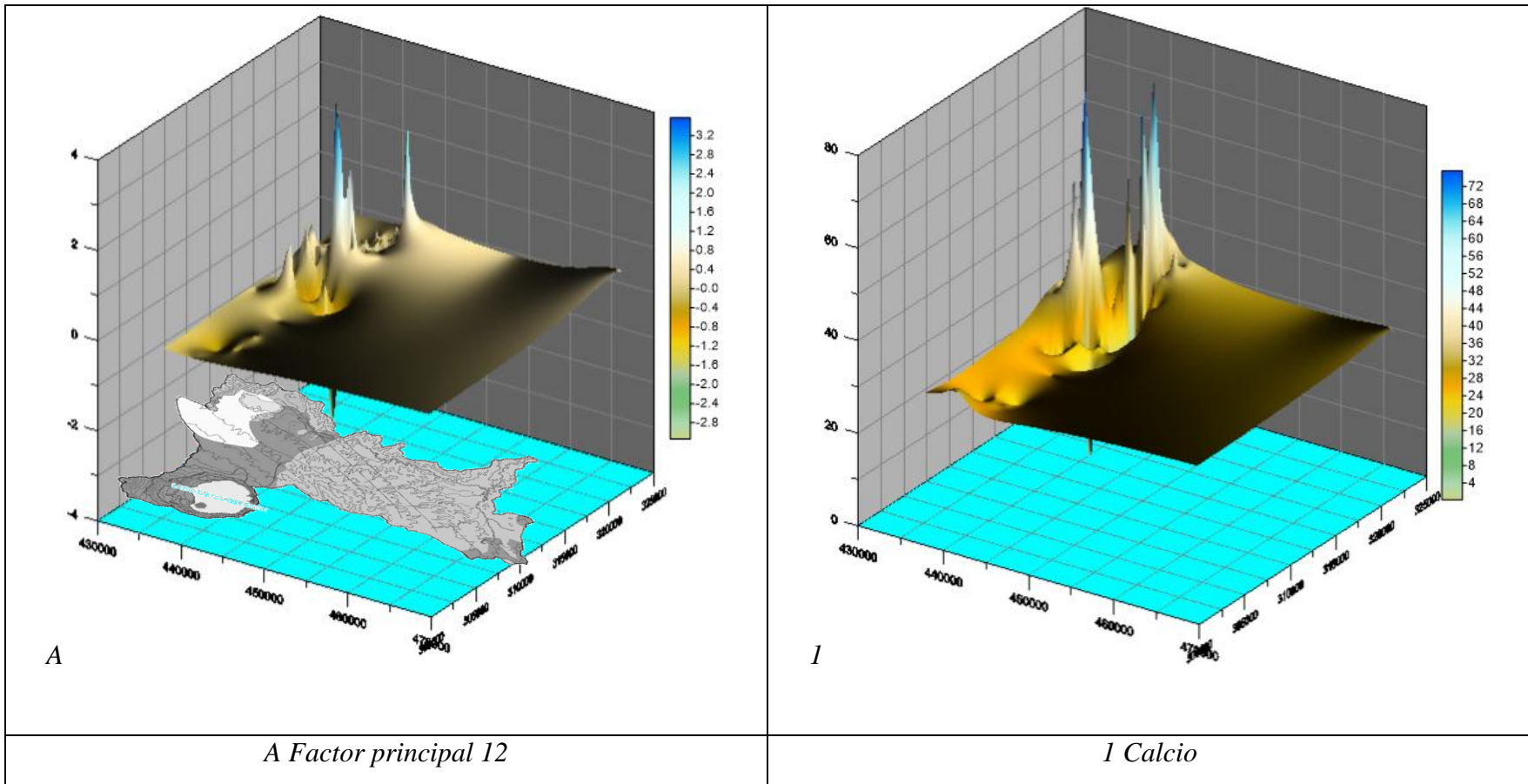
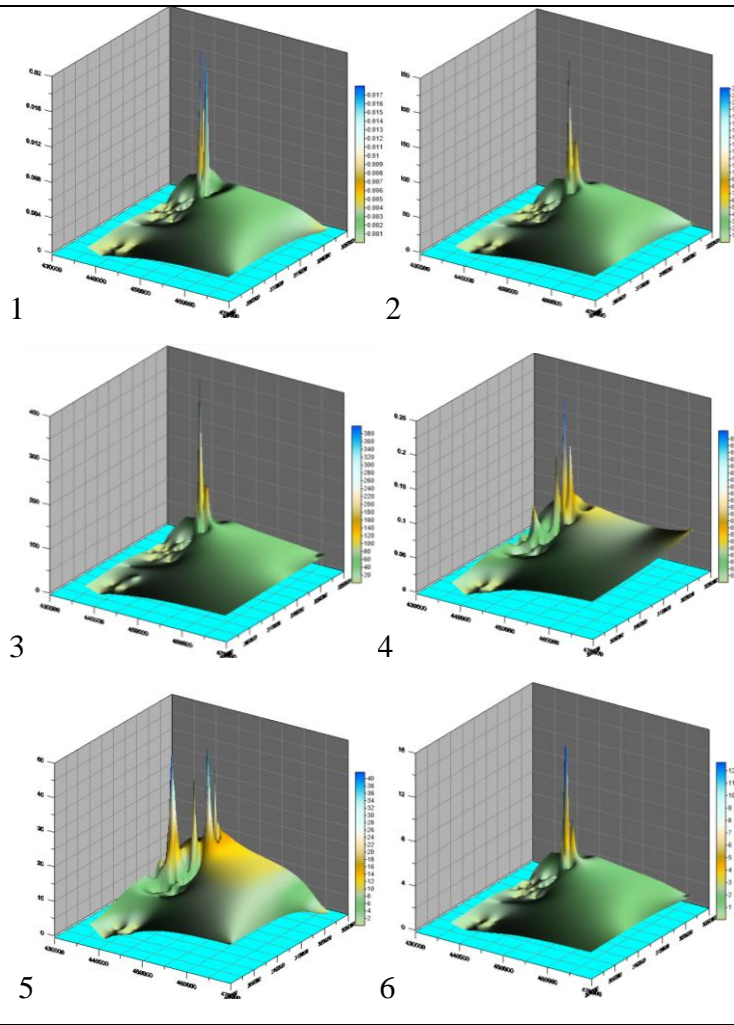
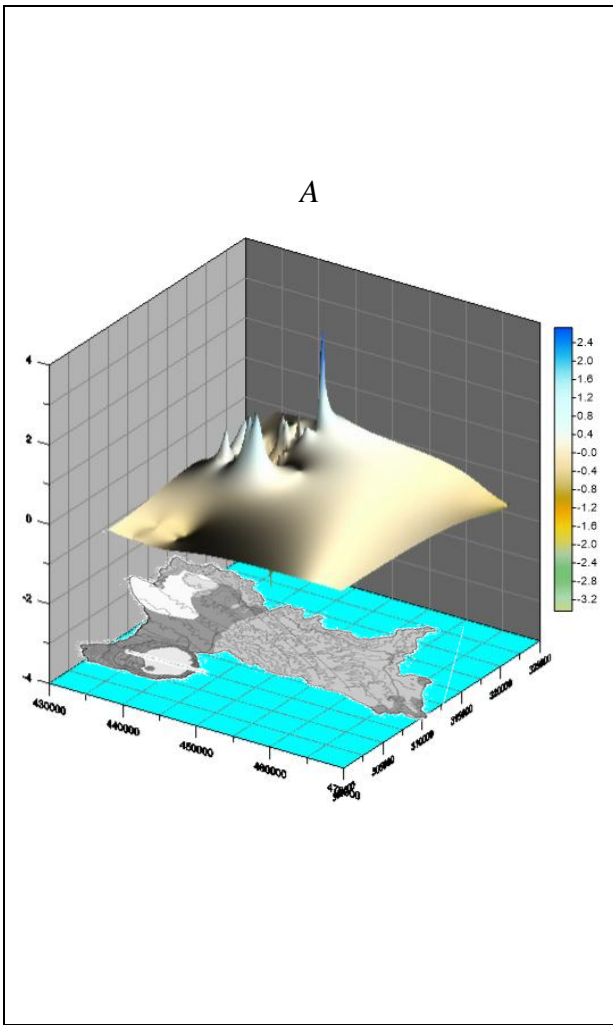


Figura 121 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 12 y Calcio

Fuente: Elaboración propia.





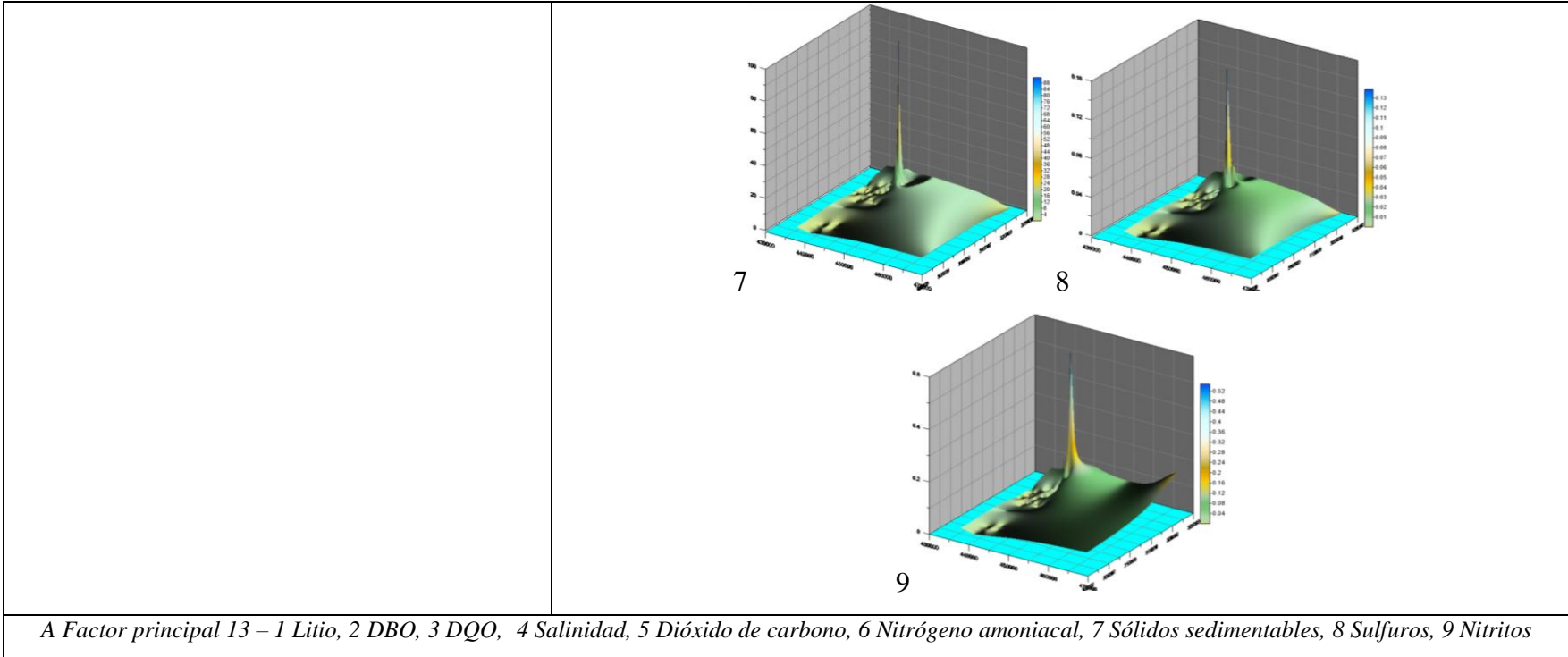


Figura 122 Comparación gráfica entre las superficies paramétricas del componente principal 13 y algunas especies químicas

Fuente: Elaboración propia.

## **B. MATRIX PLOT (FACTORES PRINCIPALES)**

Considerando los objetivos de la investigación se ha procedido al análisis estadístico con distintos métodos para identificar un conjunto de variables que más ayuden a explicar la correlación estadística de las variables (Parámetros fisicoquímicos en agua) y agrupamiento de las observaciones (Sitios) respecto a variables cualitativas como tipo de agua, uso de suelo, pedología, tipos de acuíferos, litografía del sitio, posición espacial, incidencia de estructuras geológicas (fallas), etc.

En la sección anterior se evidenció la correspondencia de los componentes principales como vectores graficados individualmente versus los ejes “X” e “Y” y algunas de las variables cuantitativas de tipo geoquímico.

Otra característica importante de la técnica de componentes principales no solo es resumir la información sino también explicar otras variables cualitativas del sistema, para ello se puede hacer uso de gráficos de componentes principales versus otros componentes principales y etiquetar con diferentes colores los scores de los atributos para así encontrar parejas de componentes principales que forman clúster o agrupaciones que pueden explicar a través de su etiquetado, las variables cualitativas que se han categorizado.

En las figuras de la 123 a la 128 se presentan los gráficos de dispersión en matrices de los 13 componentes principales representativos a la información total de la base de datos global.

Las matrices de gráficos de dispersión nos permiten evaluar en diversas configuraciones de componentes principales y elegir visualmente el par de componentes que mejor describe la situación planteada en la etiqueta, eso se realiza por orientación o agrupamiento de los datos en el gráfico de dispersión. Para cada gráfico de matriz se presenta a la derecha el par de componentes que mejor describe el atributo y el gráfico de dispersión que se ha seleccionado de la matriz como modelo explicativo de la variable cualitativa.

En la Figura 123 se presenta la matriz de gráficos de dispersión de los 13 factores principales y en la etiqueta se distinguen los tipos de muestras de agua de acuerdo a su localización: agua del Lago de Coatepeque, agua de pozo profundo, de pozo somero y agua de río, debajo de la leyenda del gráfico al lado derecho del mismo se puede apreciar que el atributo cualitativo se agrupa y se diferencian 4 clúster cuando los ejes graficados son el componente principal 1 y el componente principal 2. Es por ello que podemos afirmar que la combinación de esos componentes modela el atributo cualitativo de tipo de muestra de agua.

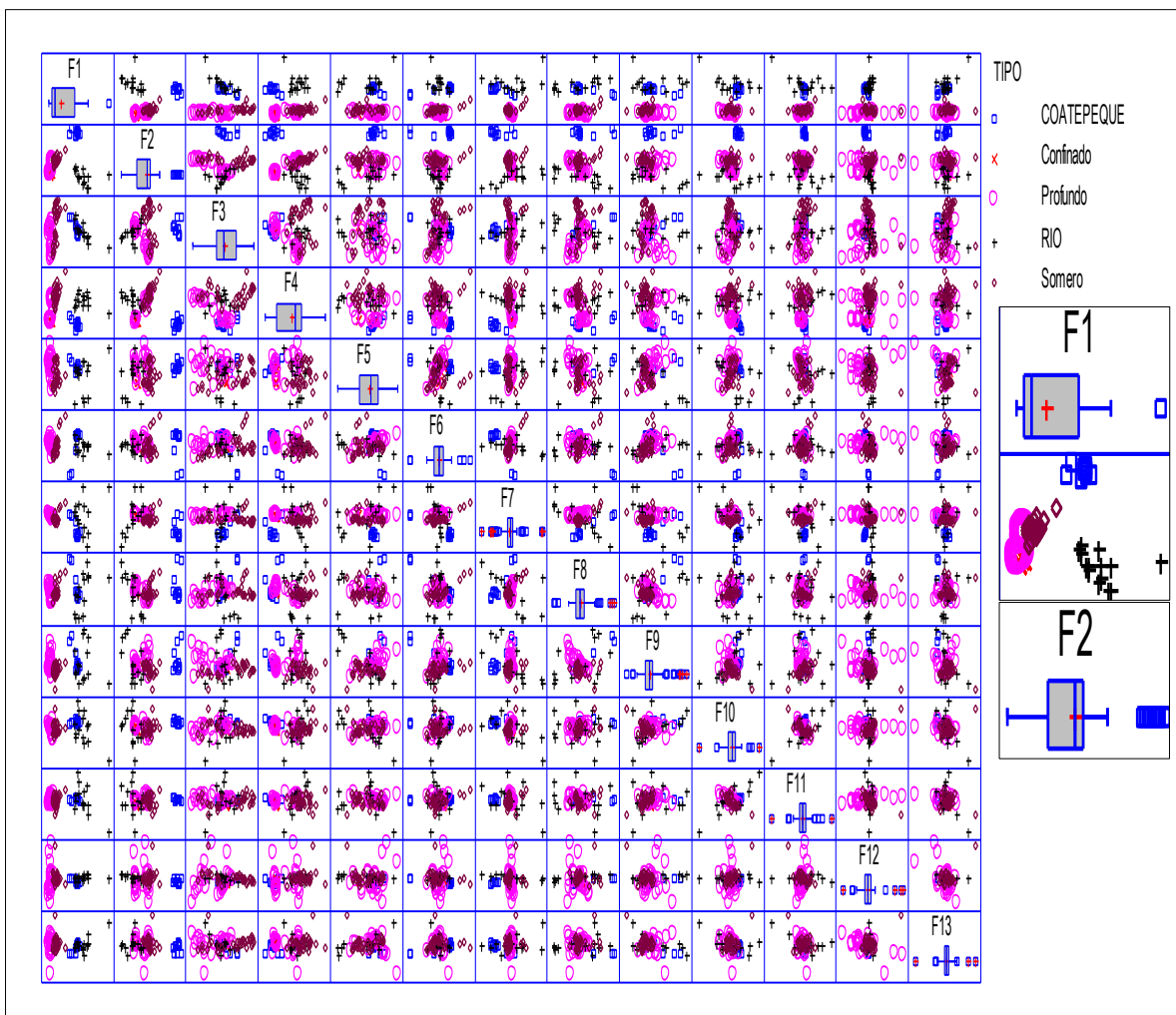


Figura 123 Gráfico de matrix plot de componentes principales, etiquetas en base a tipo de muestras de agua de la base de datos geoquímica del AGI

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 124 se presenta la matriz de gráficos de dispersión de los 13 factores principales y en la etiqueta se distingue la geología (ver definiciones de miembros geológicos en la sección 3.1.2.2). Debajo de la leyenda del gráfico al lado derecho del mismo se puede apreciar que el atributo cualitativo se agrupa y se diferencian 5 clúster cuando los ejes graficados son el componente principal 2 y el componente principal 5. Es por ello que podemos afirmar que la combinación de esos componentes modela el atributo cualitativo de geología.

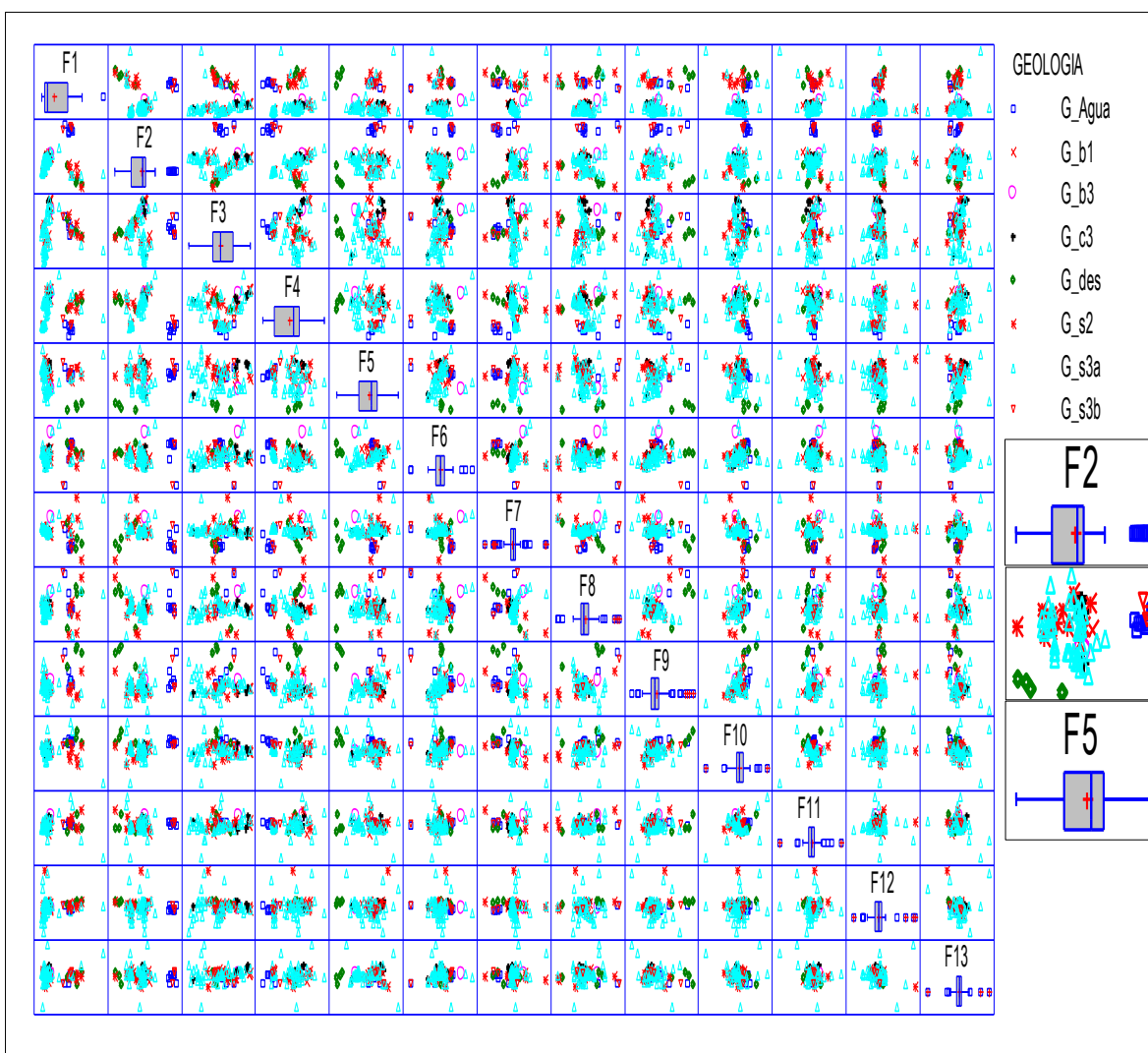


Figura 124 Gráfico de matrix plot de componentes principales, etiquetas en base a geología de la base de datos geoquímica del AGI

Fuente: Elaboración propia.



En la Figura 125 se presenta la matriz de gráficos de dispersión de los 13 factores principales y en la etiqueta se distinguen estructuras geovolcanológicas debajo de la leyenda del gráfico al lado derecho del mismo se puede apreciar que el atributo cualitativo se agrupa y se diferencian 4 clúster cuando los ejes graficados son el componente principal 2 y el componente principal 3. Es por ello que podemos afirmar que la combinación de esos componentes modela el atributo cualitativo: punto de muestreo cercano a estructuras geovolcanológicas.

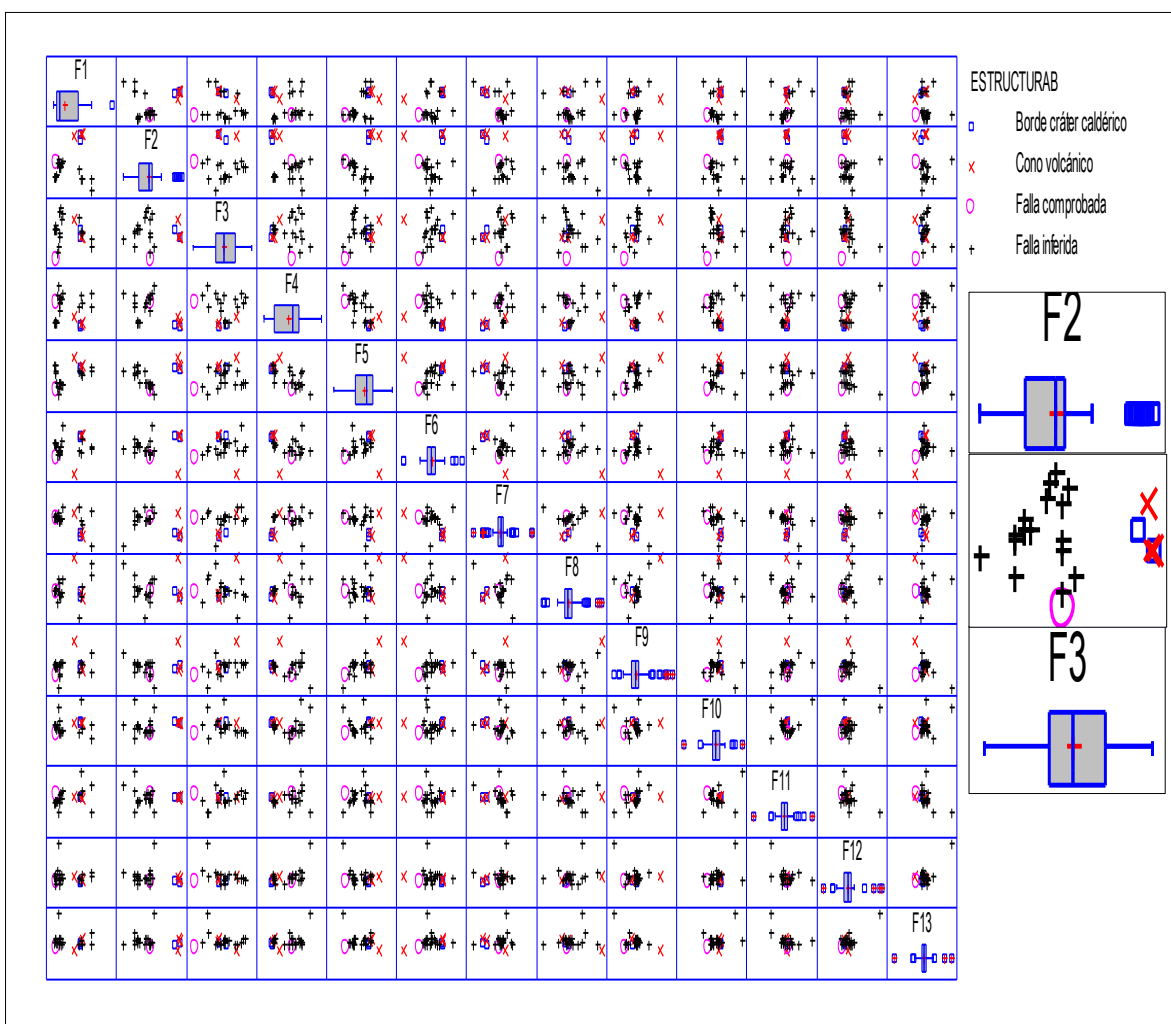


Figura 125 Gráfico de matrix plot de componentes principales, etiquetas en base a estructuras geológicas de la base de datos geoquímica del AGI

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 126 se presenta la matriz de gráficos de dispersión de los 13 factores principales y en la etiqueta se distinguen tipos de acuíferos debajo de la leyenda del gráfico al lado derecho del mismo se puede apreciar que el atributo cualitativo se diferencia y se alinean formando disposiciones ordenadas o clúster cuando los ejes graficados son el componente principal 2 y el componente principal 12.

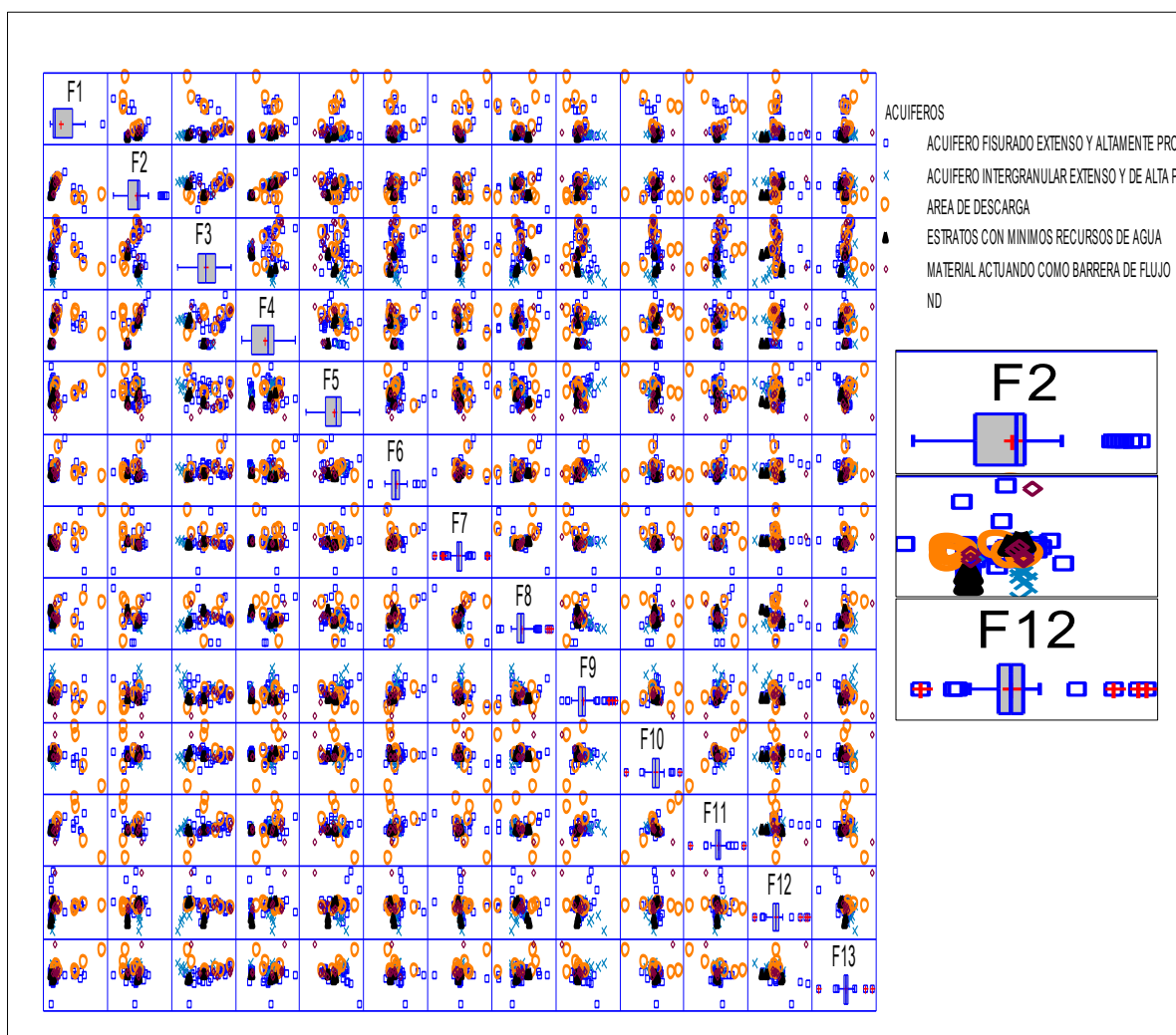


Figura 126 Gráfico de matrix plot de componentes principales, etiquetas en base a tipo de acuíferos de la base de datos geoquímica del AGI

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 127 se presenta la matriz de gráficos de dispersión de los 13 factores principales y en la etiqueta se distinguen atributos pedológicos debajo de la leyenda del gráfico al lado derecho del mismo se puede apreciar que el atributo cualitativo se agrupa y se diferencian 4 clúster cuando los ejes graficados son el componente principal 1 y el componente principal 5. Es por ello que podemos afirmar que la combinación de esos componentes modela el atributo cualitativo: pedología del área geográfica de interés.

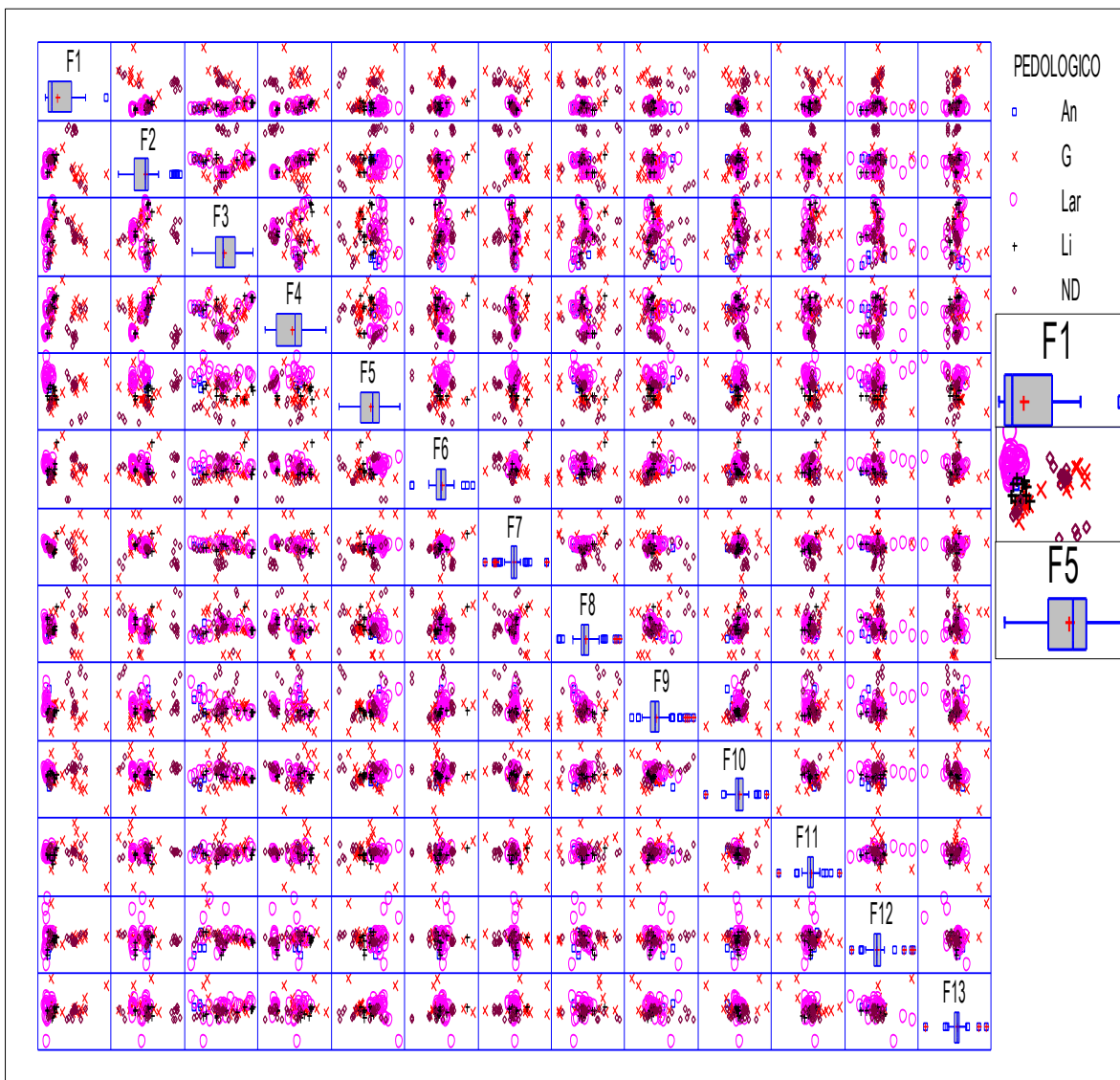


Figura 127 Gráfico de matrix plot de componentes principales, etiquetas en base a pedología de la base de datos geoquímica del AGI

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 128 se presenta la matriz de gráficos de dispersión de los 13 factores principales y en la etiqueta se distinguen los sitios con el tipo de vulnerabilidad correspondiente de acuerdo a la metodología DRASTIC debajo de la leyenda del gráfico al lado derecho del mismo se puede apreciar que el atributo cualitativo se agrupa y se diferencian 4 clúster cuando los ejes graficados son el componente principal 1 y el componente principal 3. Es por ello que podemos afirmar que la combinación de esos componentes modela el atributo cualitativo: vulnerabilidad acuífera.

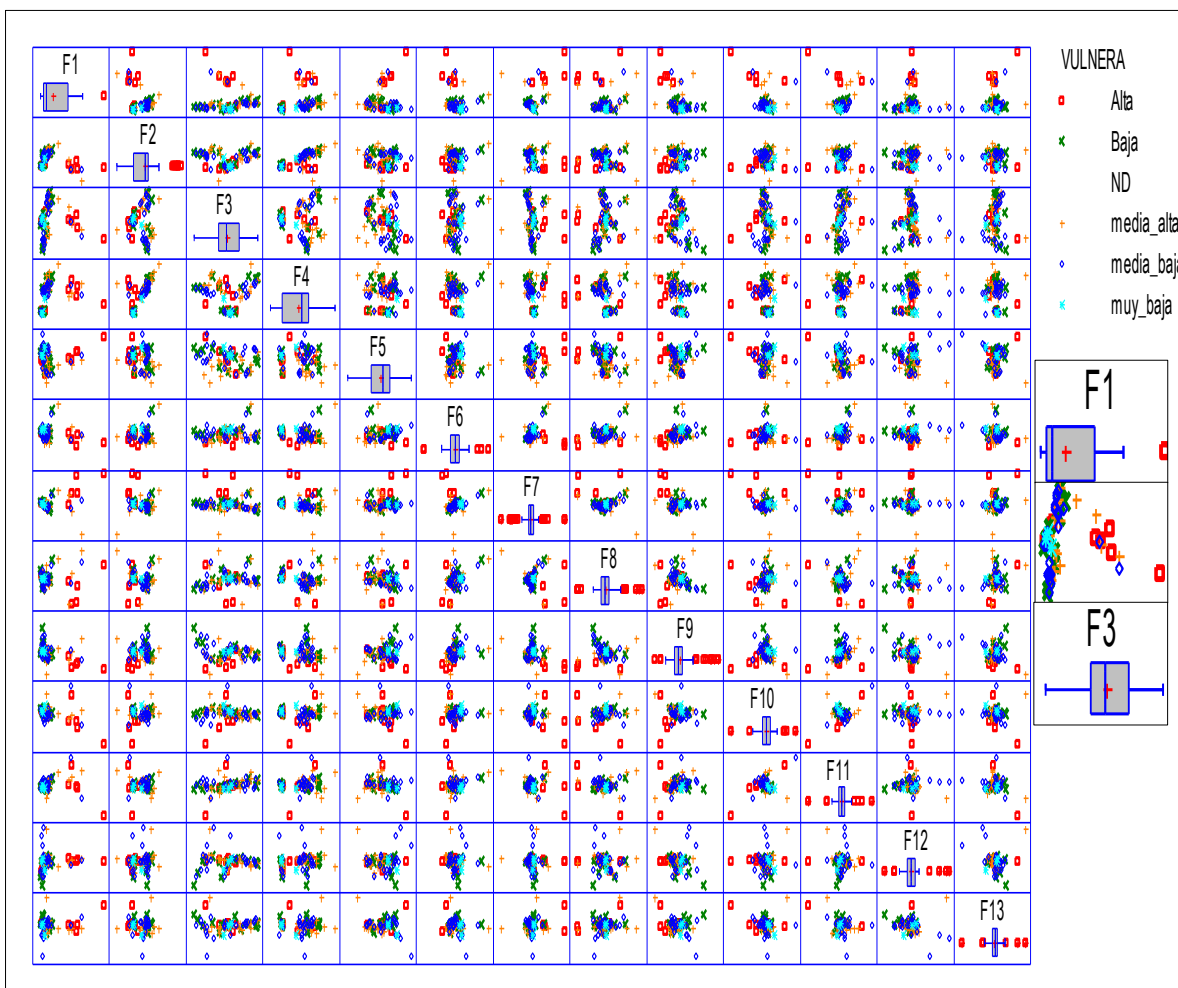


Figura 128 Gráfico de matrix plot de componentes principales, etiquetas en base a vulnerabilidad acuífera de la base de datos geoquímica del AGI

Fuente: Elaboración propia. Datos: (MARN-BID 1209-OC-ES No.03, 2008)

### C. DENDROGRAMAS.

El análisis de clúster jerárquico de conglomerados o Dendogramas se ha realizado para objetos ó sitios de muestreo (ver figura 129) y para variables ó Parámetros hidroquímicos (ver figura 130), con dichos análisis se han encontrado correlaciones directas y dependencias, ya que los elementos mas cercanos poseen distancias estadísticas de similitud mas cortas y pueden agruparse. De esta forma los resultados del Dendogramas de la figura 129 muestran agrupación de observaciones en 4 clases que se detallan a continuación:

Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
SA-01	SA-26	SAN-09	SA04-12MX
SA-02	SA-27	SAN-02	SAGRANJAMX-12
SA-03	SA-28	SAN-01	Sa18MX-12
SA-04	SA-29	SAN-04	A01SUQUI
SA-05	SA-30	SAN-01	A01SUQUI
SA-06	SA-31	SAN-02	A01SUQUI
SA-07	SA-32	SAN-08	A01SUQUI
SA-08	SA-33	SAN-09	A01SUQUI
SA-09	1	SAN-08	A04SUQUI
SA-10	2	SAN-09	A04SUQUI
SA-11	3	SAN-02	A04SUQUI
SA-12	4	SAN-01	A04SUQUI
SA-13	5	SAN-09	A04SUQUI
SA-14	6	SAN-04	A23SUQUI
SA-15	7	SAN-01	A23SUQUI
SA-16	8	SAN-02	A23SUQUI
SA-17	9	SAN-04	A23SUQUI
SA-18	10	SAN-09	L1-CENTRO-COAT
SA-19	11		L1-CONSTITUCION
SA-20			L1-F-TERMAL
SA-21			L1-PTO-MADERO
SA-22			L2-CENTRO-COAT
SA-23			L2-CONSTITUCION
SA-24			L2-F-TERMAL
SA-25			L2-PTO-MADERO

Y en la figura 130 se muestra el Dendogramas de variables que proporciona visualmente correlaciones entre los parámetros químicos.

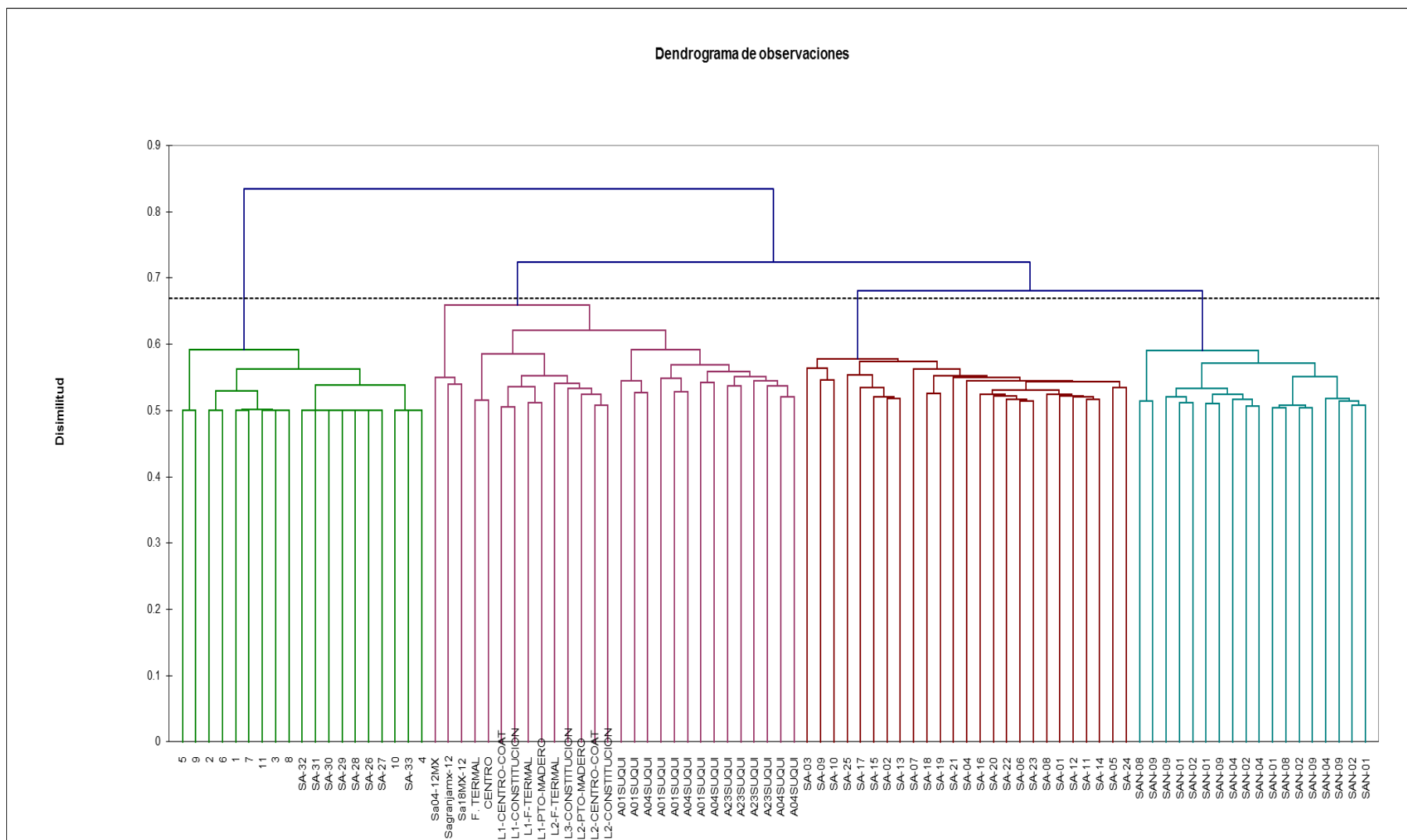


Figura 129 Dendrogramas de sitios de muestreo de la base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia.

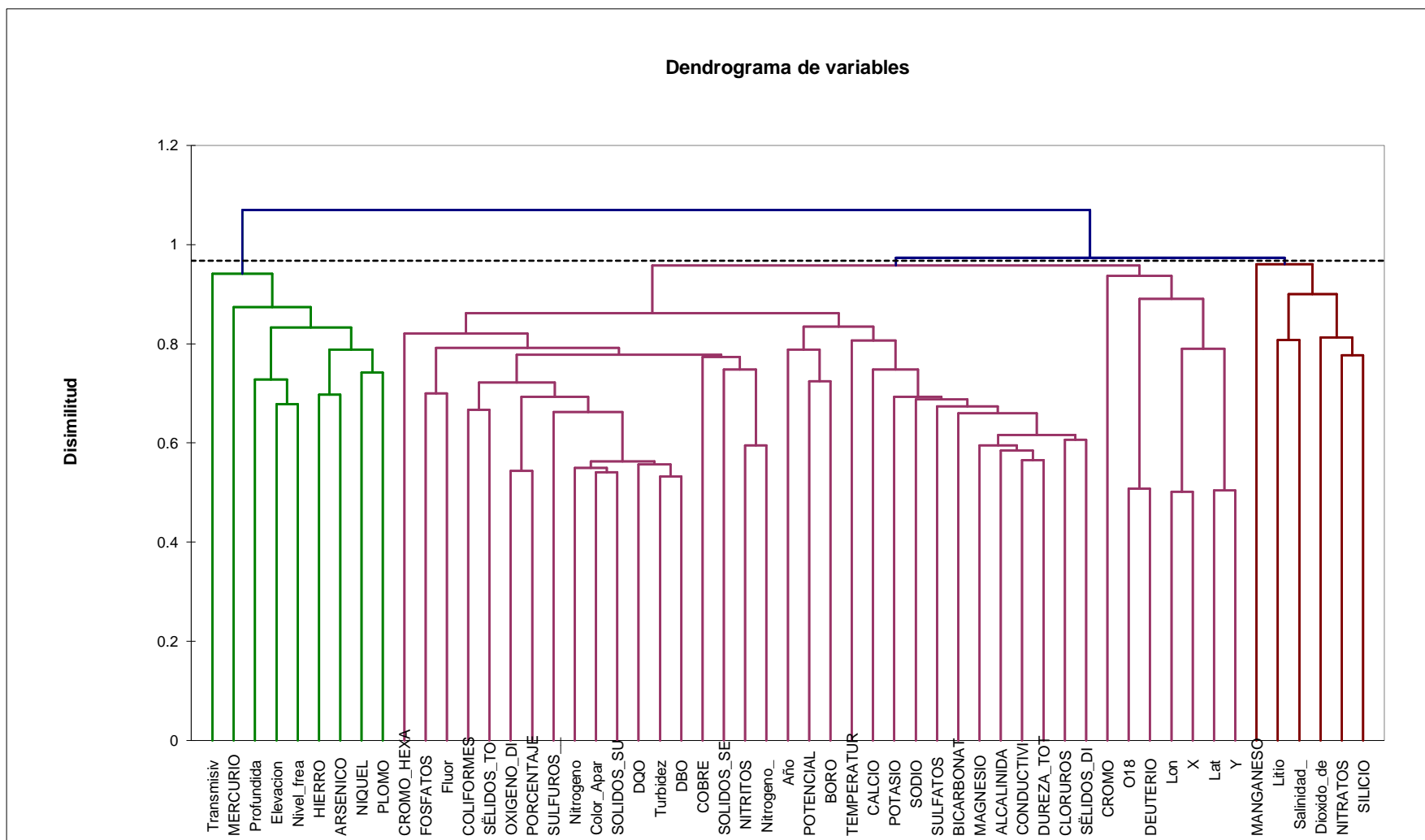


Figura 130 Dendrogramas de variables de la base de datos geoquímica del área geográfica de interés

Fuente: Elaboración propia.

## **D. ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN**

En esta sección se realiza un análisis multivariado de correspondencias múltiples a través de árboles de clasificación y reglas de integración de las variables en cuanto a las magnitudes geoquímicas del área geográfica de interés y otros atributos cualitativos del sistema como tipo de agua, uso de suelo, pedología, tipos de acuíferos, litografía del sitio, posición espacial, incidencia de estructuras geológicas (fallas), etc.

Para esta sección se presenta una figura tipo mapa conceptual, llamado árbol de clasificación y una tabla que resume los criterios o reglas de clasificación de esa agua, de acuerdo a rangos de cumplimiento. De esta forma en la Figura 131 y Tabla 41 se presentan criterios que de acuerdo al atributo cualitativo tipo de muestra de agua y se definen rangos de parámetros geoquímicos que describen esa característica. En la Figura 132 y Tabla 42 se presentan criterios que de acuerdo al atributo cualitativo estratigrafía y se definen rangos de parámetros geoquímicos que describen esa característica. En la Figura 133 y Tabla 43 se describen las categorías de estructuras geológicas a partir de las variables geoquímicas del área geográfica de interés. En la Figura 134 y Tabla 44 se describen las reglas de clasificación a partir del atributo cualitativo tipo de acuífero, En la Figura 135 y Tabla 45 se presentan las clasificaciones por uso de suelo y en la Figura 136 y Tabla 46 los criterios de clasificación por vulnerabilidad acuífera. A continuación se presentan los productos antes mencionados.



• **ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN POR TIPO DE MUESTRA DE AGUA**

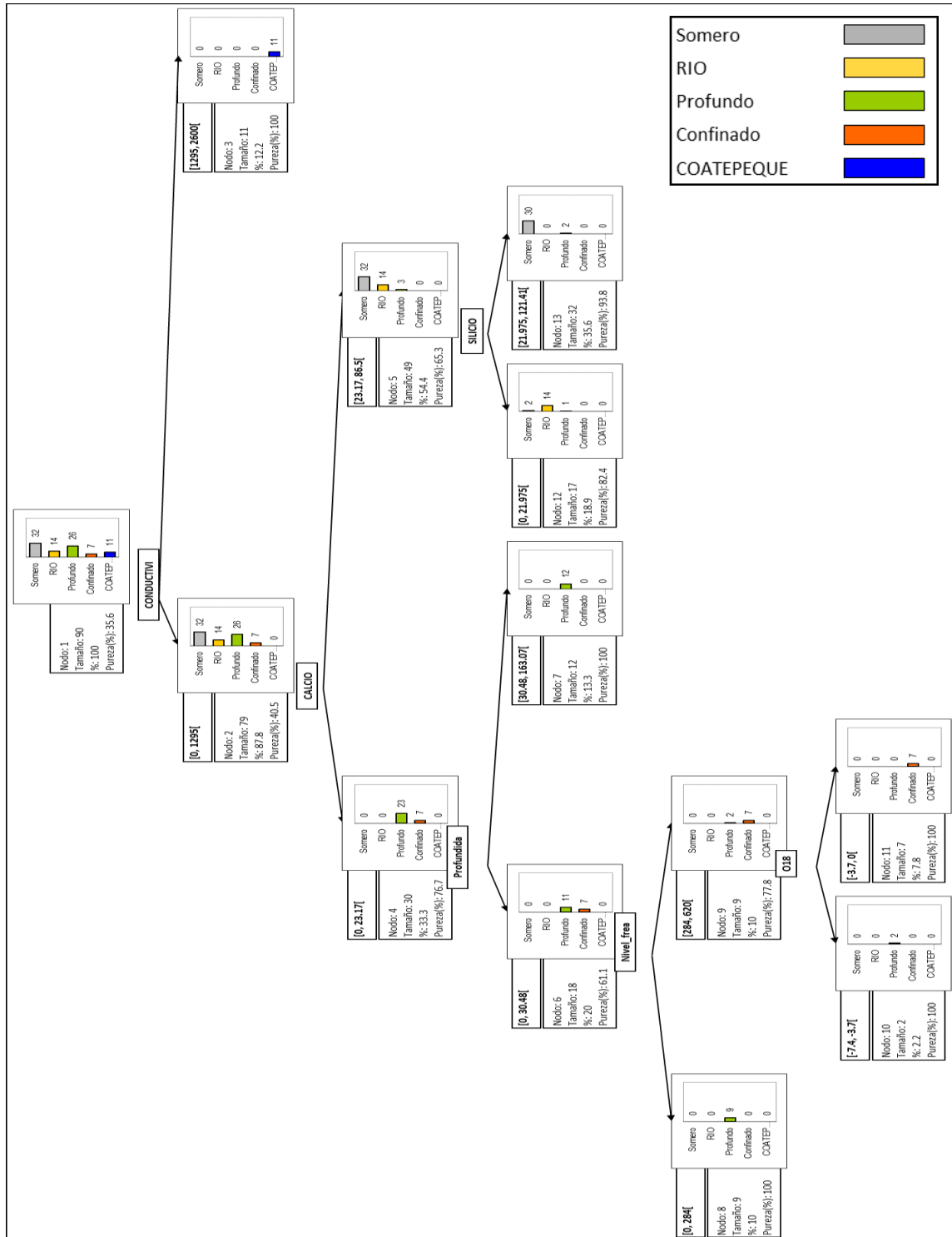


Figura 131 Árbol de clasificación de la base de datos geoquímica del AGI, variable de decisión por tipo de muestras

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41 Reglas de clasificación por tipo de muestras

Fuente: Elaboración propia.

<b>PREDICCIÓN (TIPO DE MUESTRA)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Integración</b>	<b>Reglas</b>
Somero	32	40.51%	Si CONDUCTIVI en [0, 1295[ entonces Tipo_de_po = Somero en el 40.5% de los casos
COATEPEQUE	11	100.00%	Si CONDUCTIVI en [1295, 2600[ entonces Tipo_de_po = COATEPEQUE en el 100% de los casos
Profundo	23	76.67%	Si CALCIO en [0, 23.17[ y CONDUCTIVI en [0, 1295[ entonces Tipo_de_po = Profundo en el 76.7% de los casos
Somero	32	65.31%	Si CALCIO en [23.17, 86.5[ y CONDUCTIVI en [0, 1295[ entonces Tipo_de_po = Somero en el 65.3% de los casos
Profundo	11	61.11%	Si Profundida en [0, 30.48[ y CALCIO en [0, 23.17[ y CONDUCTIVI en [0, 1295[ entonces Tipo_de_po = Profundo en el 61.1% de los casos
Profundo	12	100.00%	Si Profundida en [30.48, 163.07[ y CALCIO en [0, 23.17[ y CONDUCTIVI en [0, 1295[ entonces Tipo_de_po = Profundo en el 100% de los casos
Profundo	9	100.00%	Si Nivel_frea en [0, 284[ y Profundida en [0, 30.48[ y CALCIO en [0, 23.17[ y CONDUCTIVI en [0, 1295[ entonces Tipo_de_po = Profundo en el 100% de los casos
Confinado	7	77.78%	Si Nivel_frea en [284, 620[ y Profundida en [0, 30.48[ y CALCIO en [0, 23.17[ y CONDUCTIVI en [0, 1295[ entonces Tipo_de_po = Confinado en el 77.8% de los casos
Profundo	2	100.00%	Si O18 en [-7.4, -3.7[ y Nivel_frea en [284, 620[ y Profundida en [0, 30.48[ y CALCIO en [0, 23.17[ y CONDUCTIVI en [0, 1295[ entonces Tipo_de_po = Profundo en el 100% de los casos
Confinado	7	100.00%	Si O18 en [-3.7, 0[ y Nivel_frea en [284, 620[ y Profundida en [0, 30.48[ y CALCIO en [0, 23.17[ y CONDUCTIVI en [0, 1295[ entonces Tipo_de_po = Confinado en el 100% de los casos
RÍO	14	82.35%	Si SILICIO en [0, 21.975[ y CALCIO en [23.17, 86.5[ y CONDUCTIVI en [0, 1295[ entonces Tipo_de_po = RÍO en el 82.4% de los casos
Somero	30	93.75%	Si SILICIO en [21.975, 121.41[ y CALCIO en [23.17, 86.5[ y CONDUCTIVI en [0, 1295[ entonces Tipo_de_po = Somero en el 93.8% de los casos

• **ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN (POR GEOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA)**

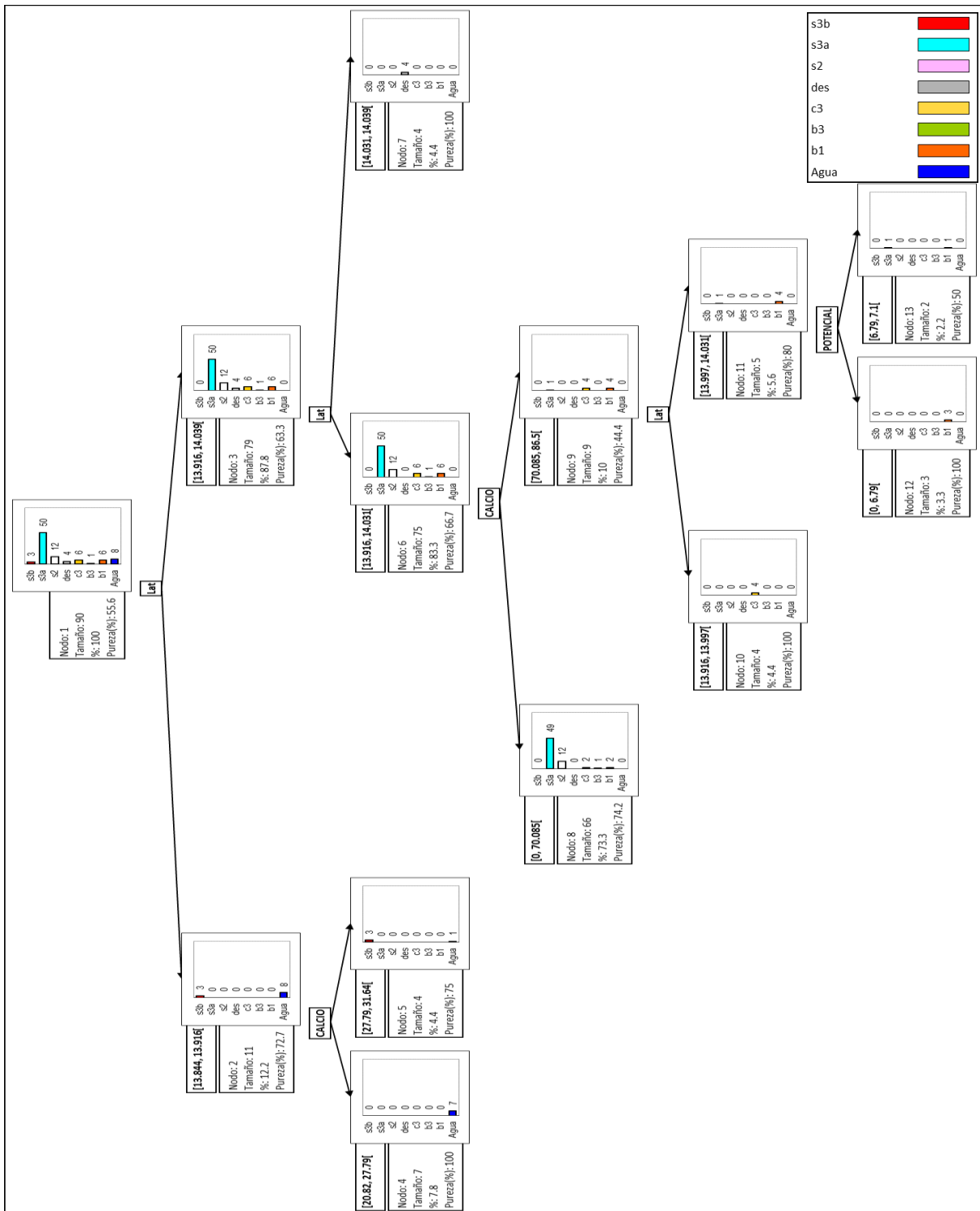


Figura 132 Árbol de clasificación de la base de datos geoquímica del AGI, variable de decisión por geología

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 42 Reglas de clasificación por estratigrafía

Fuente: Elaboración propia.

<b>PREDICION (ESTRAGRAFIA)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Integración</b>	<b>Reglas</b>
Agua	8	72.73%	Si Lat en [13.844, 13.916[ entonces 2CODIGO_1 = Agua en el 72.7% de los casos
s3a	50	63.29%	Si Lat en [13.916, 14.039[ entonces 2CODIGO_1 = s3a en el 63.3% de los casos
Agua	7	100.00%	Si CALCIO en [20.82, 27.79[ y Lat en [13.844, 13.916[ entonces 2CODIGO_1 = Agua en el 100% de los casos
s3b	3	75.00%	Si CALCIO en [27.79, 31.64[ y Lat en [13.844, 13.916[ entonces 2CODIGO_1 = s3b en el 75% de los casos
s3a	50	66.67%	Si Lat en [13.916, 14.031[ entonces 2CODIGO_1 = s3a en el 66.7% de los casos
des	4	100.00%	Si Lat en [14.031, 14.039[ entonces 2CODIGO_1 = des en el 100% de los casos
s3a	49	74.24%	Si CALCIO en [0, 70.085[ y Lat en [13.916, 14.031[ entonces 2CODIGO_1 = s3a en el 74.2% de los casos
b1	4	44.44%	Si CALCIO en [70.085, 86.5[ y Lat en [13.916, 14.031[ entonces 2CODIGO_1 = b1 en el 44.4% de los casos
c3	4	100.00%	Si Lat en [13.916, 13.997[ y CALCIO en [70.085, 86.5[ entonces 2CODIGO_1 = c3 en el 100% de los casos
b1	4	80.00%	Si Lat en [13.997, 14.031[ y CALCIO en [70.085, 86.5[ entonces 2CODIGO_1 = b1 en el 80% de los casos
b1	3	100.00%	Si POTENCIAL en [0, 6.79[ y Lat en [13.997, 14.031[ y CALCIO en [70.085, 86.5[ entonces 2CODIGO_1 = b1 en el 100% de los casos
b1	1	50.00%	Si POTENCIAL en [6.79, 7.1[ y Lat en [13.997, 14.031[ y CALCIO en [70.085, 86.5[ entonces 2CODIGO_1 = b1 en el 50% de los casos

## • ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN POR ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

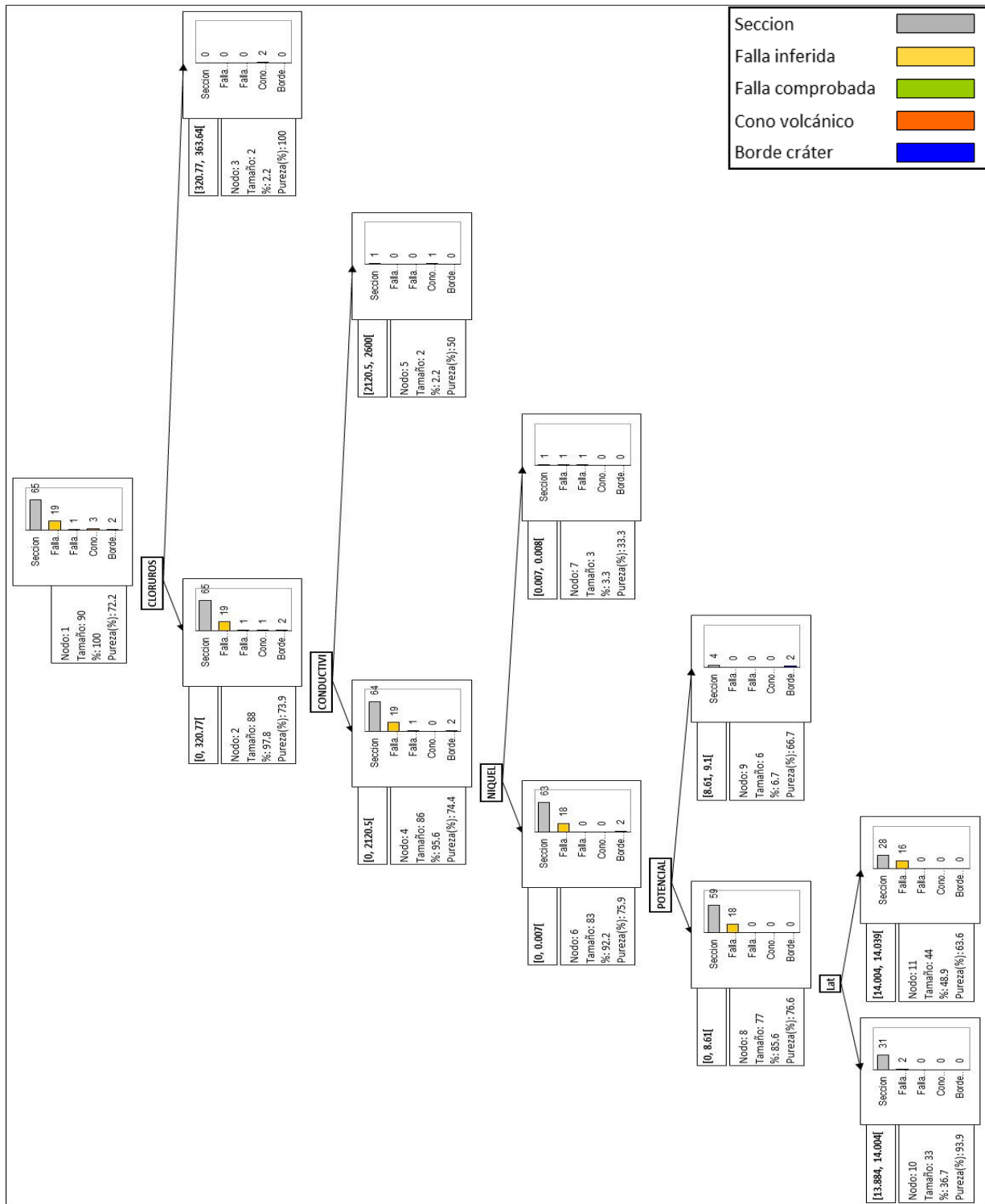


Figura 133 Árbol de clasificación de la base de datos geoquímica del AGI, variable de decisión por estructuras geológicas

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43 Reglas de clasificación por estructuras geológicas

Fuente: Elaboración propia.

<b>PREDICION (ESTRUCTURAS GEOLOGICAS)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Integración</b>	<b>Reglas</b>
Sección	65	73.86%	Si CLORUROS en [0, 320.77[ entonces 3Categoria = Sección en el 73.9% de los casos
Cono volcánico	2	100.00%	Si CLORUROS en [320.77, 363.64[ entonces 3Categoria = Cono volcánico en el 100% de los casos
Sección	64	74.42%	Si CONDUCTIVI en [0, 2120.5[ y CLORUROS en [0, 320.77[ entonces 3Categoria = Sección en el 74.4% de los casos
Cono volcánico	1	50.00%	Si CONDUCTIVI en [2120.5, 2600[ y CLORUROS en [0, 320.77[ entonces 3Categoria = Cono volcánico en el 50% de los casos
Sección	63	75.90%	Si NIQUEL en [0, 0.007[ y CONDUCTIVI en [0, 2120.5[ y CLORUROS en [0, 320.77[ entonces 3Categoria = Sección en el 75.9% de los casos
Falla comprobada	1	33.33%	Si NIQUEL en [0.007, 0.008[ y CONDUCTIVI en [0, 2120.5[ y CLORUROS en [0, 320.77[ entonces 3Categoria = Falla comprobada en el 33.3% de los casos
Sección	59	76.62%	Si POTENCIAL en [0, 8.61[ y NIQUEL en [0, 0.007[ y CONDUCTIVI en [0, 2120.5[ y CLORUROS en [0, 320.77[ entonces 3Categoria = Sección en el 76.6% de los casos
Sección	4	66.67%	Si POTENCIAL en [8.61, 9.1[ y NIQUEL en [0, 0.007[ y CONDUCTIVI en [0, 2120.5[ y CLORUROS en [0, 320.77[ entonces 3Categoria = Sección en el 66.7% de los casos
Sección	31	93.94%	Si Lat en [13.884, 14.004[ y POTENCIAL en [0, 8.61[ y NIQUEL en [0, 0.007[ y CONDUCTIVI en [0, 2120.5[ y CLORUROS en [0, 320.77[ entonces 3Categoria = Sección en el 93.9% de los casos
Sección	28	63.64%	Si Lat en [14.004, 14.039[ y POTENCIAL en [0, 8.61[ y NIQUEL en [0, 0.007[ y CONDUCTIVI en [0, 2120.5[ y CLORUROS en [0, 320.77[ entonces 3Categoria = Sección en el 63.6% de los casos



Tabla 44 Reglas de clasificación por tipo de acuífero

Fuente: Elaboración propia.

<b>PREDICION (TIPO DE ACUIFERO)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Integración</b>	<b>Reglas</b>
ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO	63	74.12%	Si MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO en el 74.1% de los casos
ACUIFERO INTERGRANULAR EXTENSO Y DE ALTA PRODUCTIVIDAD	4	80.00%	Si MERCURIO en [0, 0.002[ entonces 4CATEGO = ACUIFERO INTERGRANULAR EXTENSO Y DE ALTA PRODUCTIVIDAD en el 80% de los casos
ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO	52	78.79%	Si Lat en [13.844, 14.018[ y MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO en el 78.8% de los casos
ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO	11	57.89%	Si Lat en [14.018, 14.039[ y MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO en el 57.9% de los casos
ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO	46	85.19%	Si Salinidad_ en [0, 0.005[ y Lat en [13.844, 14.018[ y MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO en el 85.2% de los casos
ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO	6	50.00%	Si Salinidad_ en [0.005, 0.51[ y Lat en [13.844, 14.018[ y MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO en el 50% de los casos
AREA DE DESCARGA	5	100.00%	Si CONDUCTIVI en [430, 561[ y Salinidad_ en [0.005, 0.51[ y Lat en [13.844, 14.018[ y MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = AREA DE DESCARGA en el 100% de los casos
ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO	6	85.71%	Si CONDUCTIVI en [561, 1028[ y Salinidad_ en [0.005, 0.51[ y Lat en [13.844, 14.018[ y MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO en el 85.7% de los casos
ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO	5	100.00%	Si SODIO en [0, 67.45[ y CONDUCTIVI en [561, 1028[ y Salinidad_ en [0.005, 0.51[ y Lat en [13.844, 14.018[ y MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO en el 100% de los casos



<b>PREDICCIÓN (TIPO DE ACUIFERO)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Integración</b>	<b>Reglas</b>
ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO	1	50.00%	Si SODIO en [67.45, 95.6[ y CONDUCTIVI en [561, 1028[ y Salinidad_ en [0.005, 0.51[ y Lat en [13.844, 14.018[ y MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO en el 50% de los casos
MATERIAL ACTUANDO COMO BARRERA DE FLUJO	7	63.64%	Si FOSFATOS en [0, 0.46[ y Lat en [14.018, 14.039[ y MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = MATERIAL ACTUANDO COMO BARRERA DE FLUJO en el 63.6% de los casos
ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO	7	87.50%	Si FOSFATOS en [0.46, 2.455[ y Lat en [14.018, 14.039[ y MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO en el 87.5% de los casos
MATERIAL ACTUANDO COMO BARRERA DE FLUJO	7	77.78%	Si ARSENICO en [0, 0.002[ y FOSFATOS en [0, 0.46[ y Lat en [14.018, 14.039[ y MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = MATERIAL ACTUANDO COMO BARRERA DE FLUJO en el 77.8% de los casos
ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO	2	100.00%	Si ARSENICO en [0.002, 0.007[ y FOSFATOS en [0, 0.46[ y Lat en [14.018, 14.039[ y MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO en el 100% de los casos
MATERIAL ACTUANDO COMO BARRERA DE FLUJO	6	100.00%	Si SILICIO en [0, 79.475[ y ARSENICO en [0, 0.002[ y FOSFATOS en [0, 0.46[ y Lat en [14.018, 14.039[ y MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = MATERIAL ACTUANDO COMO BARRERA DE FLUJO en el 100% de los casos
ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO	2	66.67%	Si SILICIO en [79.475, 100.78[ y ARSENICO en [0, 0.002[ y FOSFATOS en [0, 0.46[ y Lat en [14.018, 14.039[ y MERCURIO en [0, 0[ entonces 4CATEGO = ACUIFERO FISURADO EXTENSO Y ALTAMENTE PRODUCTIVO en el 66.7% de los casos



Tabla 45 Reglas de clasificación por tipo de suelo

Fuente: Elaboración propia.

<b>PREDICCIÓN (TIPO DE SUELO)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Integración</b>	<b>Reglas</b>
LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS	39	88.64%	Si Y en [302593.137, 320071.76[ entonces 5NOMBRE = LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS en el 88.6% de los casos
GRUMOSOLES	25	54.35%	Si Y en [320071.76, 324129.739[ entonces 5NOMBRE = GRUMOSOLES en el 54.3% de los casos
GRUMOSOLES	25	65.79%	Si CALCIO en [0, 54.23[ y Y en [320071.76, 324129.739[ entonces 5NOMBRE = GRUMOSOLES en el 65.8% de los casos
LITOSOLES	7	87.50%	Si CALCIO en [54.23, 86.5[ y Y en [320071.76, 324129.739[ entonces 5NOMBRE = LITOSOLES en el 87.5% de los casos
GRUMOSOLES	25	80.65%	Si Elevación en [0, 602[ y CALCIO en [0, 54.23[ y Y en [320071.76, 324129.739[ entonces 5NOMBRE = GRUMOSOLES en el 80.6% de los casos
LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS	4	57.14%	Si Elevación en [602, 650[ y CALCIO en [0, 54.23[ y Y en [320071.76, 324129.739[ entonces 5NOMBRE = LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS en el 57.1% de los casos
GRUMOSOLES	25	92.59%	Si Lat en [14.008, 14.031[ y Elevación en [0, 602[ y CALCIO en [0, 54.23[ y Y en [320071.76, 324129.739[ entonces 5NOMBRE = GRUMOSOLES en el 92.6% de los casos
LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS	4	100.00%	Si Lat en [14.031, 14.039[ y Elevación en [0, 602[ y CALCIO en [0, 54.23[ y Y en [320071.76, 324129.739[ entonces 5NOMBRE = LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS en el 100% de los casos
GRUMOSOLES	23	95.83%	Si Nivel_frea en [-12.16, 560.135[ y Lat en [14.008, 14.031[ y Elevación en [0, 602[ y CALCIO en [0, 54.23[ y Y en [320071.76, 324129.739[ entonces 5NOMBRE = GRUMOSOLES en el 95.8% de los casos
GRUMOSOLES	2	66.67%	Si Nivel_frea en [560.135, 584.89[ y Lat en [14.008, 14.031[ y Elevación en [0, 602[ y CALCIO en [0, 54.23[ y Y en [320071.76, 324129.739[ entonces 5NOMBRE = GRUMOSOLES en el 66.7% de los casos



Tabla 46 Reglas de clasificación por vulnerabilidad acuífera

Fuente: Elaboración propia.

<b>PREDICION (VULNERABILIDAD ACUIFERA)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Integración</b>	<b>Reglas</b>
media_baja	44	51.16%	Si Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = media_baja en el 51.2% de los casos
Alta	4	100.00%	Si Nitrógeno_ en [12.9, 22.6[ entonces 6CLASVUL = Alta en el 100% de los casos
media_baja	32	72.73%	Si Y en [302593.137, 320071.76[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = media_baja en el 72.7% de los casos
media_alta	19	45.24%	Si Y en [320071.76, 324129.739[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = media_alta en el 45.2% de los casos
media_baja	27	84.38%	Si Lat en [13.844, 13.988[ y Y en [302593.137, 320071.76[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = media_baja en el 84.4% de los casos
media_baja	5	41.67%	Si Lat en [13.988, 14.001[ y Y en [302593.137, 320071.76[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = media_baja en el 41.7% de los casos
media_baja	27	93.10%	Si ARSENICO en [0, 0.005[ y Lat en [13.844, 13.988[ y Y en [302593.137, 320071.76[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = media_baja en el 93.1% de los casos
Baja	3	100.00%	Si ARSENICO en [0.005, 0.006[ y Lat en [13.844, 13.988[ y Y en [302593.137, 320071.76[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = Baja en el 100% de los casos
Baja	2	66.67%	Si ALCALINIDA en [0, 37.28[ y ARSENICO en [0, 0.005[ y Lat en [13.844, 13.988[ y Y en [302593.137, 320071.76[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = Baja en el 66.7% de los casos
media_baja	26	100.00%	Si ALCALINIDA en [37.28, 329.35[ y ARSENICO en [0, 0.005[ y Lat en [13.844, 13.988[ y Y en [302593.137, 320071.76[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = media_baja en el 100% de los casos
media_alta	17	50.00%	Si CALCIO en [0, 54.23[ y Y en [320071.76, 324129.739[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = media_alta en el 50% de los casos
Baja	6	75.00%	Si CALCIO en [54.23, 86.5[ y Y en [320071.76, 324129.739[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = Baja en el 75% de los casos
Alta	3	33.33%	Si CONDUCTIVI en [0, 108.5[ y CALCIO en [0, 54.23[ y Y en

<b>PREDICION (VULNERABILIDAD ACUIFERA)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Integración</b>	<b>Reglas</b>
			[320071.76, 324129.739[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = Alta en el 33.3% de los casos
media_alta	14	56.00%	Si CONDUCTIVI en [108.5, 1028[ y CALCIO en [0, 54.23[ y Y en [320071.76, 324129.739[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = media_alta en el 56% de los casos
media_baja	2	66.67%	Si Nivel_frea en [0, 552.155[ y CONDUCTIVI en [0, 108.5[ y CALCIO en [0, 54.23[ y Y en [320071.76, 324129.739[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = media_baja en el 66.7% de los casos
media_alta	3	50.00%	Si Nivel_frea en [552.155, 620[ y CONDUCTIVI en [0, 108.5[ y CALCIO en [0, 54.23[ y Y en [320071.76, 324129.739[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = media_alta en el 50% de los casos
media_alta	14	60.87%	Si CROMO en [0, 0.01[ y CONDUCTIVI en [108.5, 1028[ y CALCIO en [0, 54.23[ y Y en [320071.76, 324129.739[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = media_alta en el 60.9% de los casos
Alta	1	50.00%	Si CROMO en [0.01, 0.035[ y CONDUCTIVI en [108.5, 1028[ y CALCIO en [0, 54.23[ y Y en [320071.76, 324129.739[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = Alta en el 50% de los casos
media_alta	2	100.00%	Si Lat en [14.01, 14.018[ y CALCIO en [54.23, 86.5[ y Y en [320071.76, 324129.739[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = media_alta en el 100% de los casos
Baja	6	100.00%	Si Lat en [14.018, 14.022[ y CALCIO en [54.23, 86.5[ y Y en [320071.76, 324129.739[ y Nitrógeno_ en [0, 12.9[ entonces 6CLASVUL = Baja en el 100% de los casos

## **E. VARIOGRAMAS ESPACIALES (GEOESTADÍSTICA)**

En este apartado se muestran los variogramas espaciales de los 13 factores principales estudiados en esta investigación con el objetivo de establecer el carácter anisotrópico del terreno. A continuación se presentan, desde la Figura 137 hasta la Figura 149, los mapas de isofactores principales y los variogramas correspondientes con una breve explicación al lado derecho de dichos gráficos.

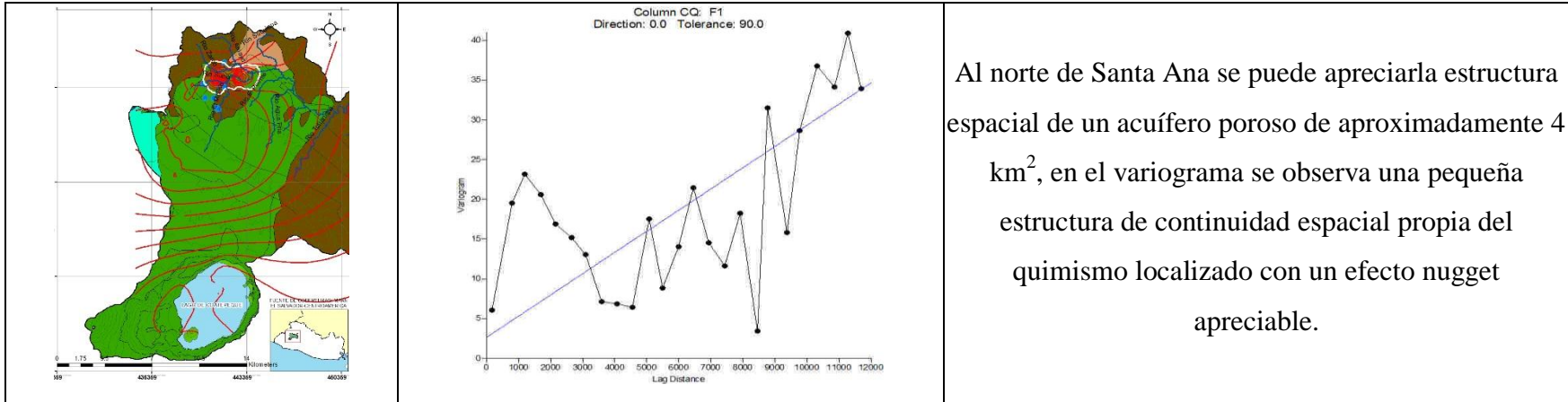


Figura 137 Variograma espacial del Factor Principal 1

Fuente: Elaboración propia.

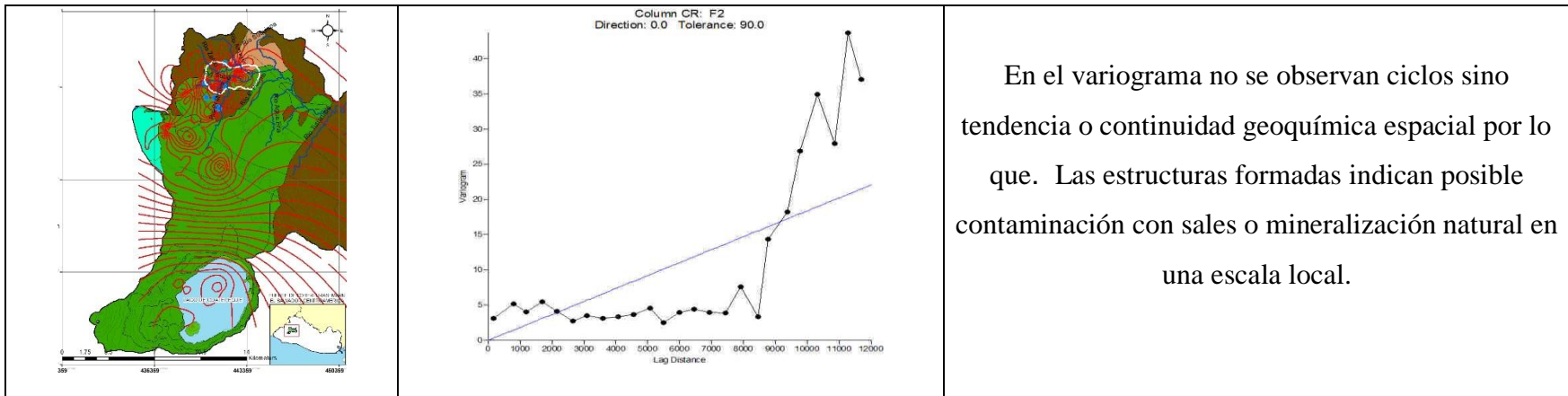


Figura 138 Variograma espacial del Factor Principal 2

Fuente: Elaboración propia.

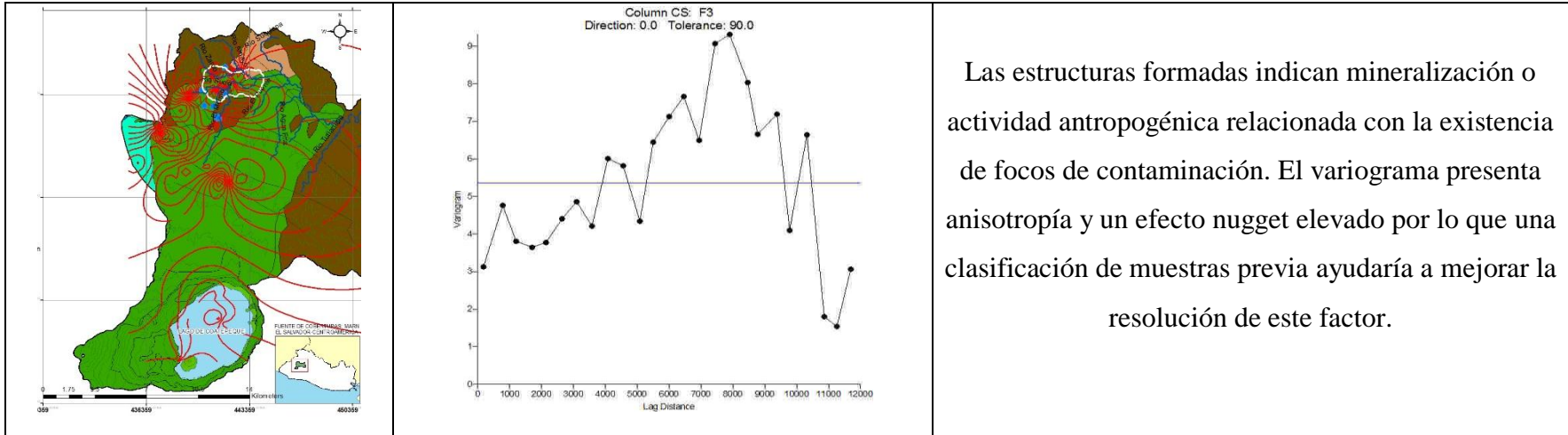


Figura 139 Variograma espacial del Factor Principal 3

Fuente: Elaboración propia.

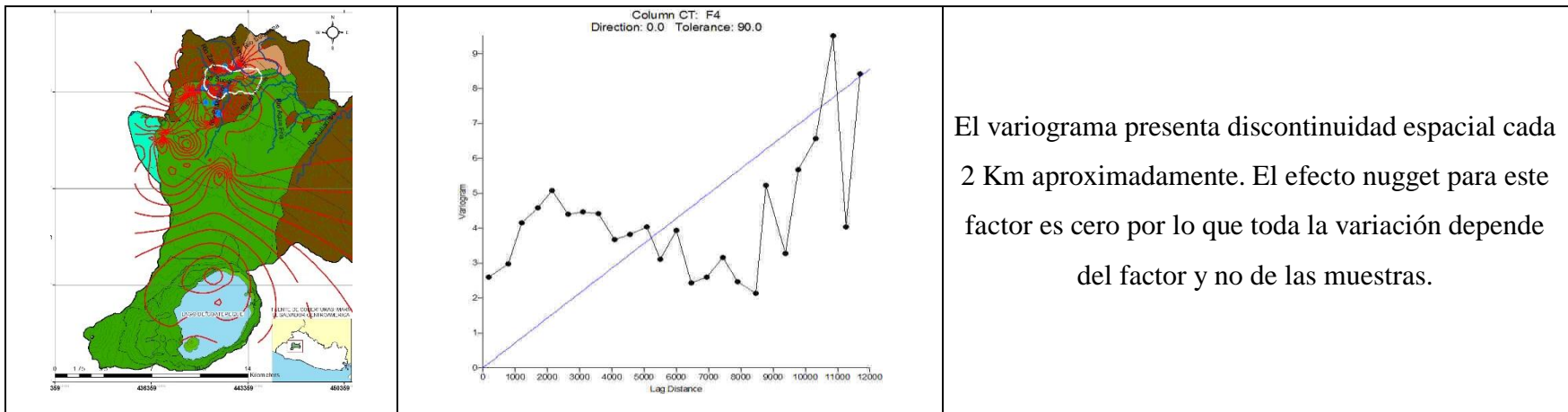
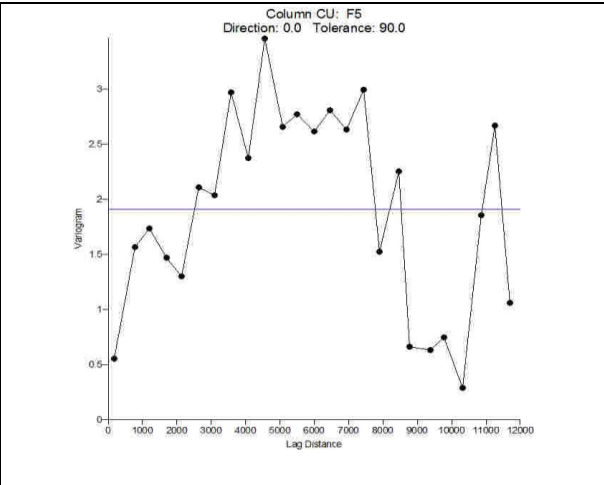
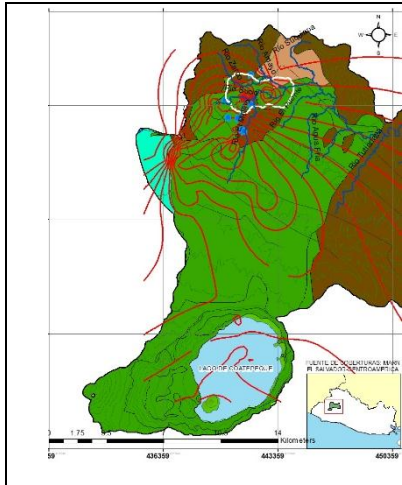


Figura 140 Variograma espacial del Factor Principal 4

Fuente: Elaboración propia.

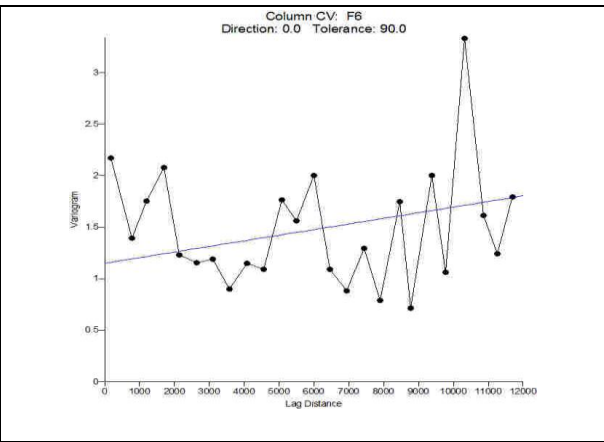
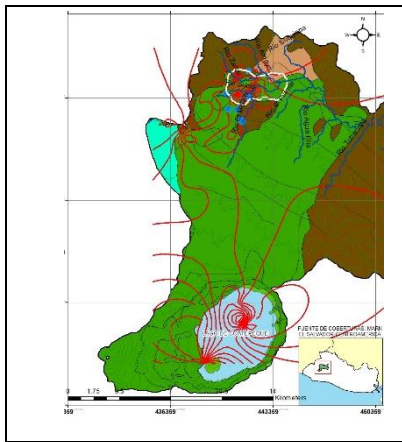




El variograma muestra aleatoriedad en los datos de este factor el cual está relacionado con la dirección de flujo.

Figura 141 Variograma espacial del Factor Principal 5

Fuente: Elaboración propia



El variograma muestra aleatoriedad en los datos de este factor el cual está relacionado con la contaminación por fosfatos. El efecto nugget es apreciable.

Figura 142 Variograma espacial del Factor Principal 6

Fuente: Elaboración propia

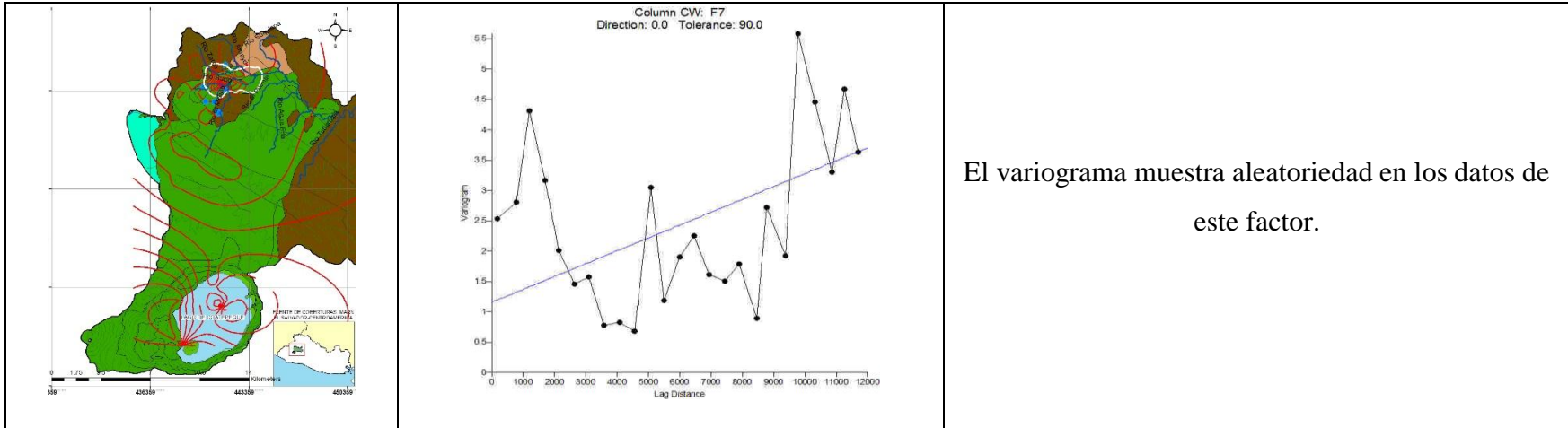


Figura 143 Variograma espacial del Factor Principal 7

Fuente: Elaboración propia

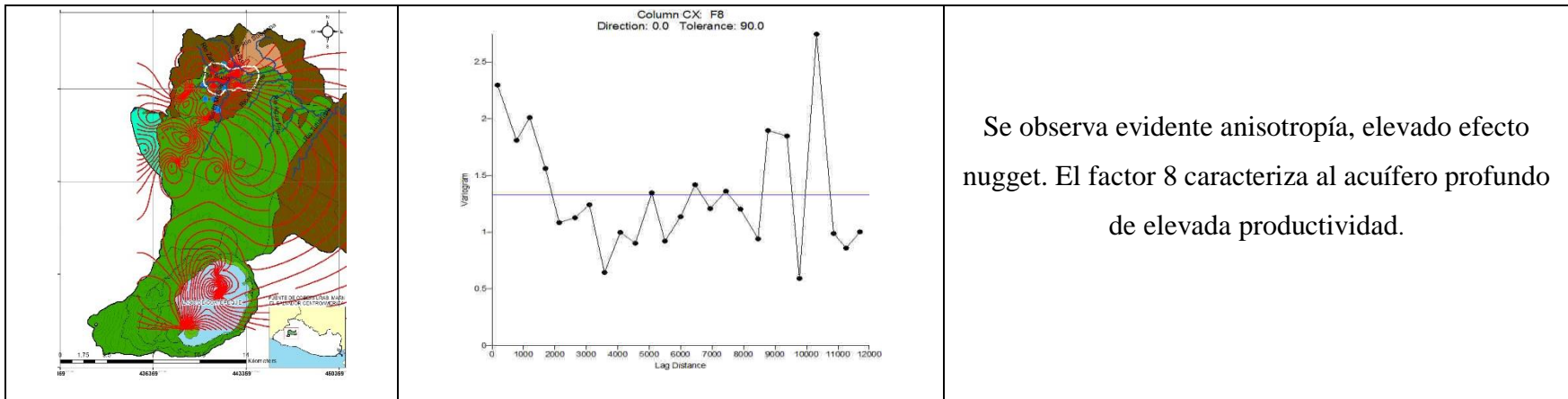


Figura 144 Variograma espacial del Factor Principal 8

Fuente: Elaboración propia

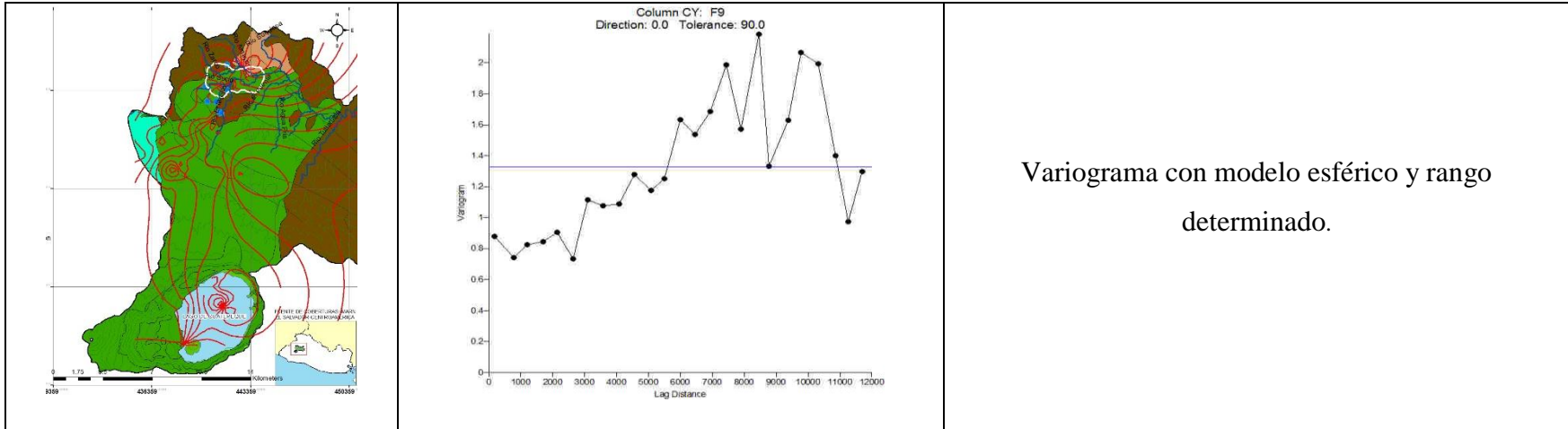


Figura 145 Variograma espacial del Factor Principal 9

Fuente: Elaboración propia

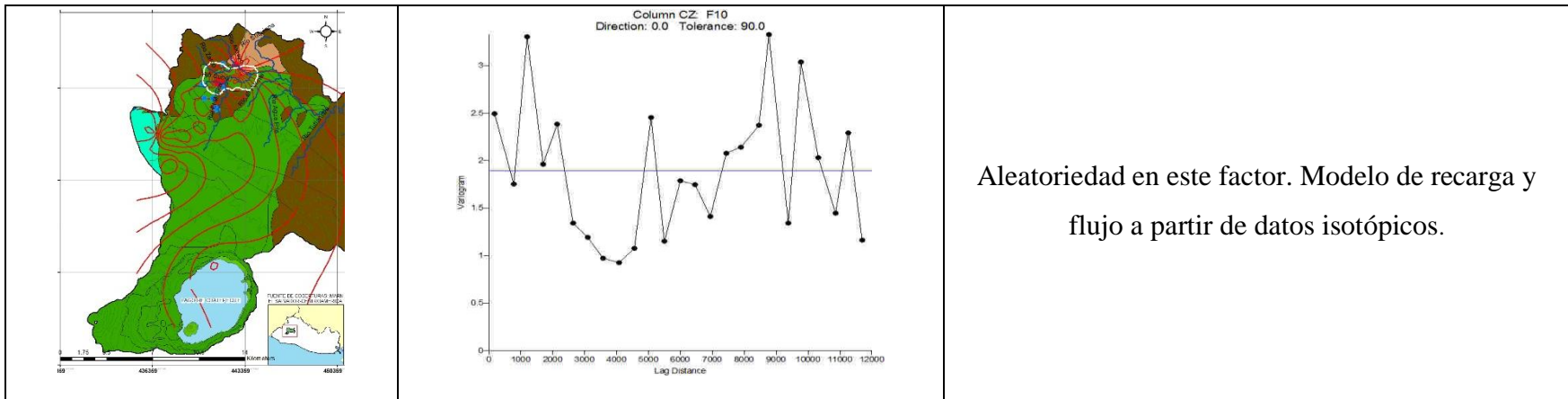


Figura 146 Variograma espacial del Factor Principal 10

Fuente: Elaboración propia

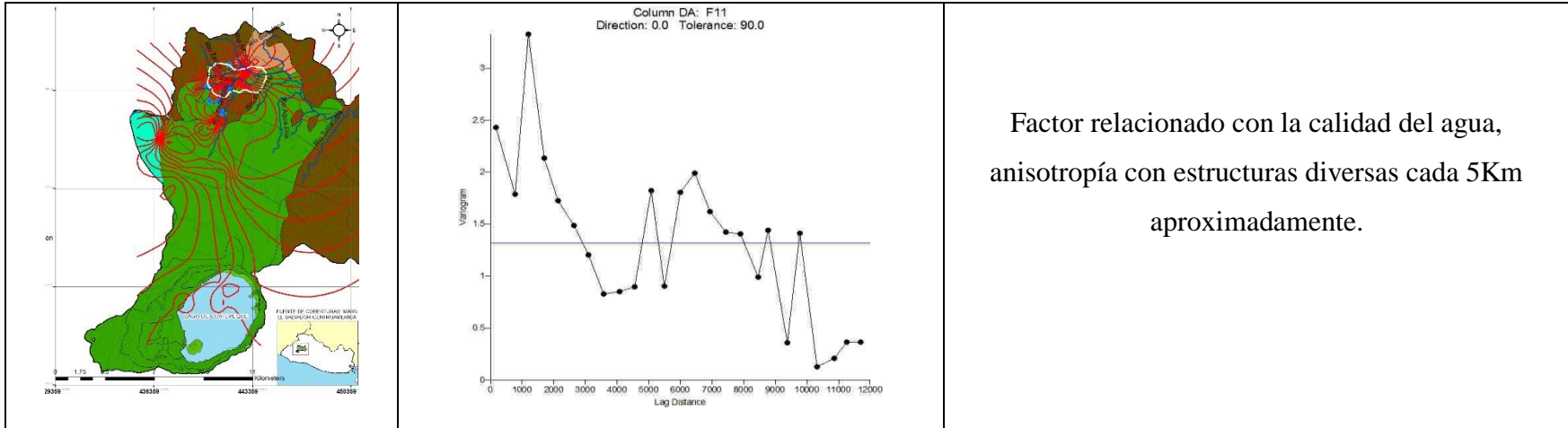


Figura 147 Variograma espacial del Factor Principal 11

Fuente: Elaboración propia

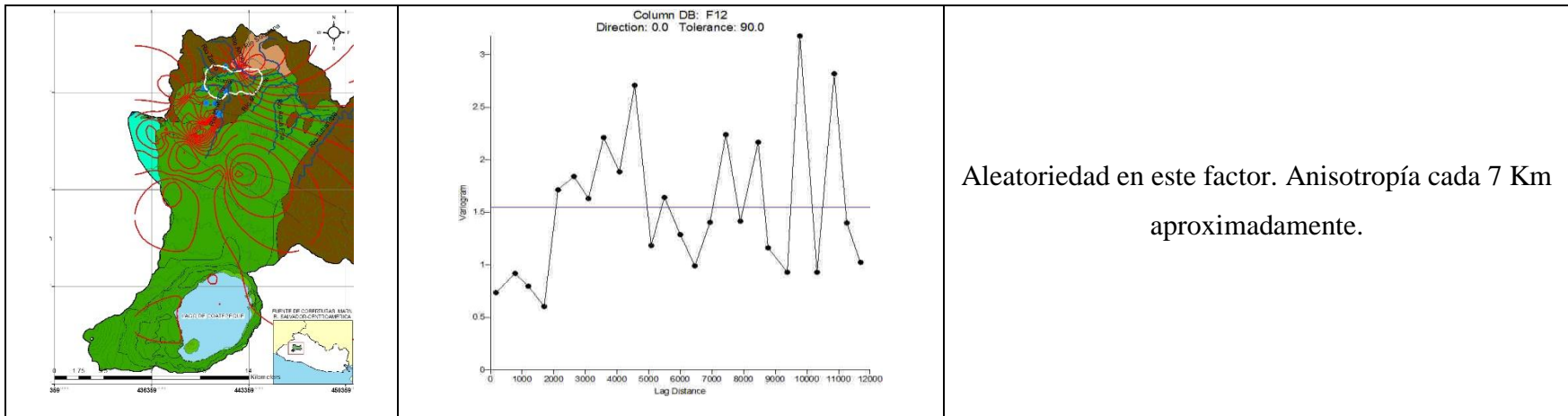


Figura 148 Variograma espacial del Factor Principal 12

Fuente: Elaboración propia

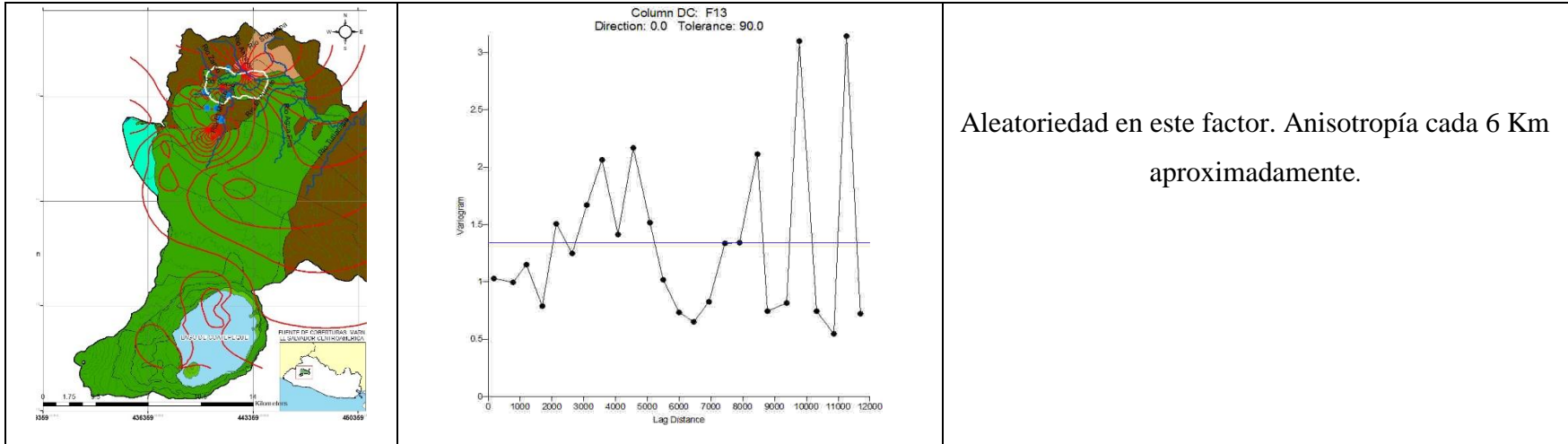


Figura 149 Variograma espacial del Factor Principal 13

Fuente: Elaboración propia

### **3.10. RELACIÓN ENTRE AGUA SUPERFICIAL-SUBTERRÁNEA.**

En este apartado se realiza un análisis de aforos diferenciales para poder establecer la relación entre el agua superficial y subterránea en el área geográfica de interés y de manera específica las zonas en donde el río es efluente o influente. En la presente investigación se evaluaron los parámetros hidrodinámicos de los ríos Aranchacal, Suquiapa y sus tributarios utilizando la técnica de aforo por vadeo a través de molinete, el caudal calculado es el parámetro que de mejor manera nos puede ayudar a establecer la relación existente antes planteada. A continuación se detalla en las siguientes secciones el fundamento teórico de la técnica, luego la metodología utilizada y finalmente el análisis de los resultados con los datos obtenidos.

#### **3.10.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

La metodología utilizada se lleva a cabo con una serie de pruebas de campo que consisten en realización de aforos antes y en cada tributario del cuerpo de agua en estudio, se seleccionó una extensión de la corriente que cumplía ciertas características como por ejemplo que fuese un lecho de corriente estable libre de rocas, plantas y otras obstrucciones que pudieron crear turbulencia, un perfil plano del lecho de la corriente para eliminar los componentes verticales de velocidad, y un tramo recto con las curvas de velocidad paralelas.

Para la etapa del cálculo de las descargas individuales en cada subsección se utilizó la metodología de cálculo para un aforo descrita en en la sección 3.2.1.1.A

#### **3.10.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Los resultados de la aplicación de esta técnica permiten conocer el aporte del acuífero al agua superficial y viceversas, en cuanto a incidencia difusa y e incidencia distribuida entre puntos de unión entre el canal principal del río y tributarios.

Otra interacción importante y directa del agua subterránea al agua superficial es el aporte de los manantiales al río principal, este caudal le ayuda a mejorar su calidad y recuperación por dilución. Los resultados de los aforos se presentan en formatos de fichas hidrológicas e hidráulicas en la sección 3.2.1.3.

### 3.10.2.1. ANÁLISIS DE AFOROS DIFERENCIALES.

Tabla 47 Resumen de datos hidrodinámicos en los sitios de agua superficial.

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

Sitio	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Área de sección transversal (m <sup>2</sup> )	Ancho de la sección (m)
A01SUQUI	0.609	2.45	10
A02VERTI	0.0631	0.284	1.5
A03SUQUI	0.6523	3.183	9
A04APANT	0.3461	1.163	4.1
A05SUQUI	1.1004	4.125	10.5
A06SAUCE	0.1796	0.859	1.8
A07CARCA	0.0949	0.416	1.5
A08SUQUI	1.2072	5.18	13
A09MOLIN	0.1543	0.952	5
A10SUQUI	1.8103	5.115	13
A11ZARCO	0.538	2.34	6.5
A12SUQUI	2.498	10.7	17
A13VERTI	0.05096	0.764	2
A14SUQUI	2.5562	11.43	16
A15PUENTE	0.55932	1.73	6
A16SUQUI	3.2726	5.035	12
A17GUILG	0.1272	0.578	2.5
A18SUQUI	3.5682	1.53	7

Tabla 48 Cálculo de caudal diferencial en los sitios de agua superficial.

Fuente: Elaboración propia

<b>Sitio</b>	<b>Q medido (Caudal) (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q acumulado (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q diferencial (Aporte de aguas subterráneas) (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Distancia (m)</b>
A01SUQUI	0.609			0
A02VERTI	0.0631	0.6718	-0.0195	17.77
A03SUQUI	0.6523			208.95
A04APANT	0.3461	0.9984	0.102	228.91
A05SUQUI	1.1004			254.96
A06SAUCE	0.1796			334.26
A07CARCA	0.0949378	1.3749378	0.1677736	387.27
A08SUQUI	1.2071642			587.62
A09MOLIN	0.154339	1.3615032	0.4488381	721.25
A10SUQUI	1.8103413			3,502.85
A11ZARCO	0.5379648	2.3483061	-0.049	3,5028.57
A12SUQUI	2.4982			5,234.63
A13VERTI	0.0509586	2.5491586	0.0070195	5,263.54
A14SUQUI	2.5561781			8,095.20
A15PUENTE	0.5593177	3.1154958	0.1570802	8,159.21
A16SUQUI	3.272576			8,984.12
A17GUILG	0.1271593	3.3997353	0.1684527	9,890.50
A18SUQUI	3.568188			10,036.98
		Sumatoria	1.1816	



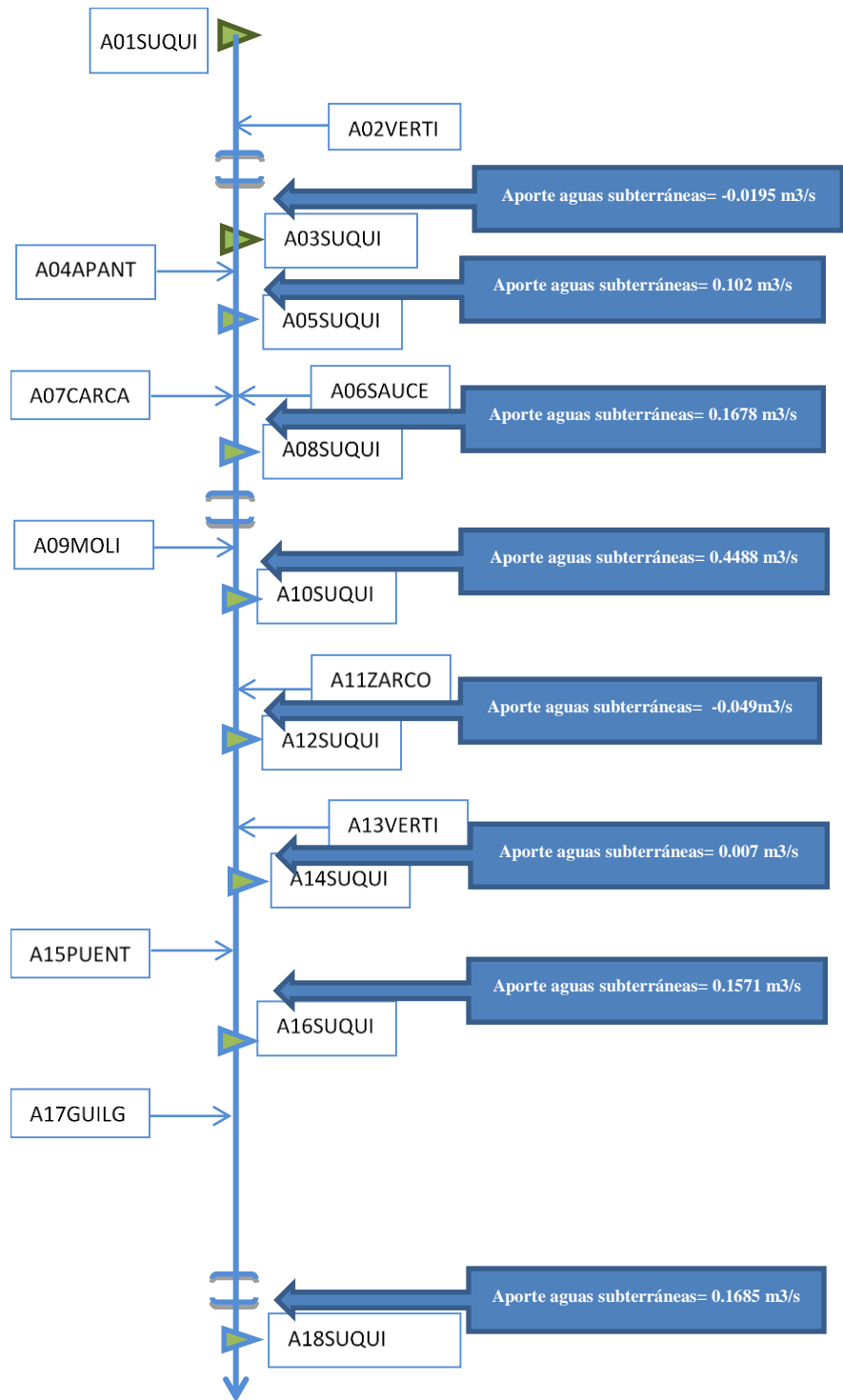


Figura 150 Aporte de aguas subterráneas al río Suquia

Fuente: Elaboración propia

El aporte promedio de las aguas subterráneas al río es de 122.83 L/s. La variación de dicho aporte se muestra a continuación:

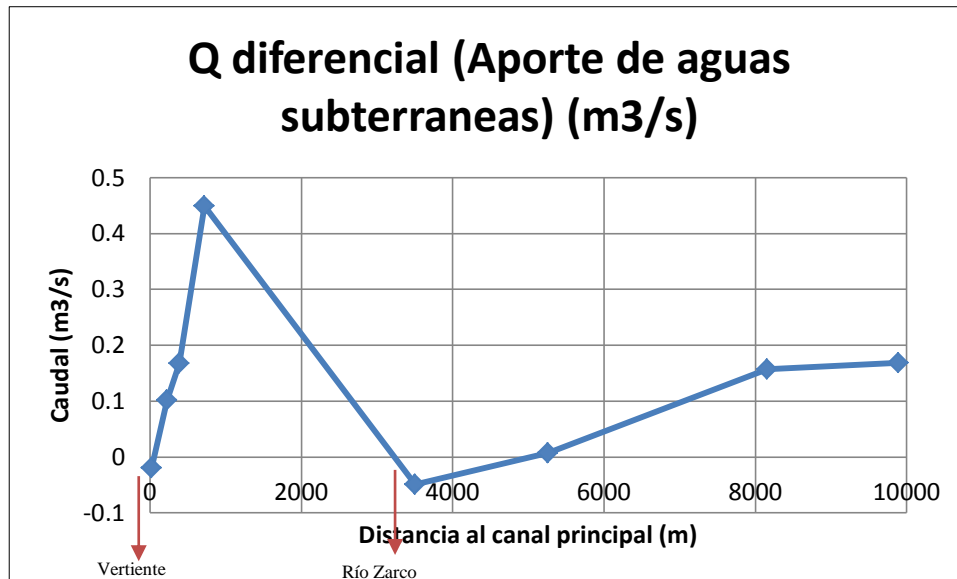


Figura 151 Resultados de caudales diferenciales

Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 150 y 151, a través de la técnica de aforos diferenciales, puede observarse que existen 2 zonas en las que el río Aranchacal es influente al acuífero: en la parte alta, luego del primer tributario (Vertiente) con un caudal influente de 20 L/s y luego del río Zarco a 3.5 Km del sitio inicial con un caudal influente de 49 L/s; en el resto de zonas, el río es efluente del acuífero.

#### IV. MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO E HIDROGEOQUÍMICO

A continuación se resumen algunos aspectos relacionados al modelo conceptual:

- La dirección de flujo de agua subterránea de acuerdo a los niveles isofreáticas de todos los pozos evaluados es en dirección de sur-norte y oeste-este con un gradiente hidráulico que varía de x a y.
- El acuífero tiene un área aproximada de 60 km<sup>2</sup>, la recarga en el volcán y caldera Coatepeque tiene una superficie aproximada de 100 km<sup>2</sup>, y el área de descarga del acuífero a lo largo del río Aranchacal se estima en 7.2 km<sup>2</sup>.
- El mapa geológico del área geográfica de interés y el sistema de flujo encontrado al evaluar los niveles isofreáticos del acuífero Aranchacal muestra que los miembros s3'a y s2 provenientes de erupciones volcánicas precedentes se encuentran contrapuestos a materiales terciarios de la formación bálsamo b1 y b3, formando una barrera de flujo al agua subterránea que permite por carga hidráulica la formación de un área porosa somera de interacción directa entre el agua superficial y subterránea en un superficie geográfica de 7.2096 Km<sup>2</sup> entre latitudes Lambert de 320000 m y 323000 m y longitudes Lambert de 440000 m y 444000 m respectivamente.
- Respecto a su constitución y de acuerdo a la litología, en general y a excepción de la parte somera, el acuífero está formado principalmente de coberturas de lava fracturadas andesíticas y basálticas de buena permeabilidad en la parte superior (aproximadamente 40 m de espesor), luego se encuentran estratos de materiales piroclásticos y aluviales que pueden alcanzar los 60 metros de espesor, en donde tendríamos un acuífero a una profundidad aproximada de 100 metros. (MARN-BID 1209-OC-ES No.03, 2008)
- Se estimó una regresión polinómica de nivel freático vs distancia para los perfiles AB y CD del Mapa 27, que se presentan en las figuras 152 y 153 de esta investigación, y se detallan a continuación:
  - 1) Para el Perfil AB,  $Y = 5.108215E-22x^6 - 1.515405E-17x^5 + 1.213087E-13x^4 + 4.077837E-10x^3 - 8.813300E-06x^2 + 3.758297E-03x + 7.774518E+02$ ,  $R^2 = 0.9957040$ . Dónde "Y" es el nivel freático en metros y la distancia "x" en metros

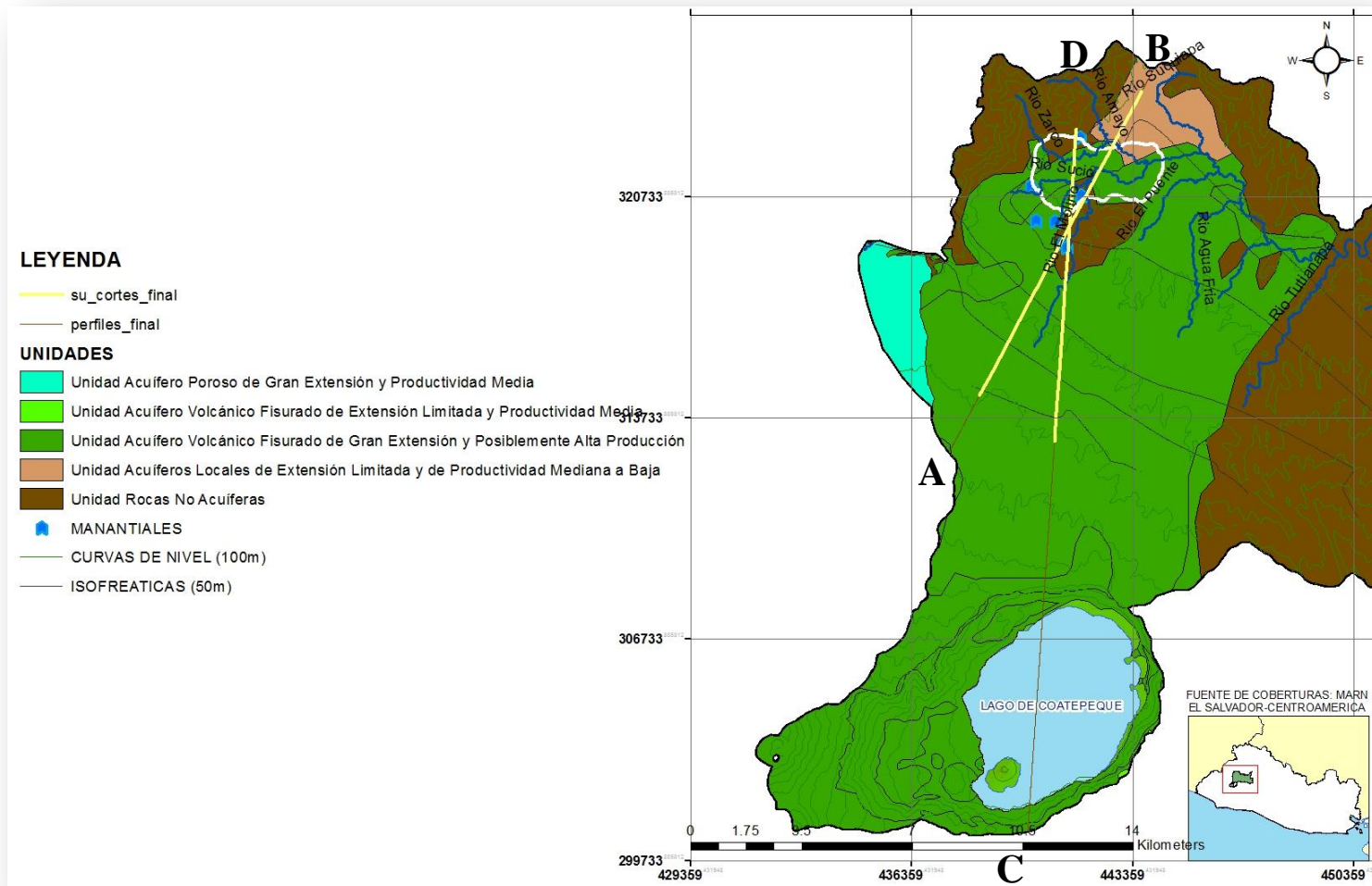
que va desde 2,000 a 11,000 m aproximadamente que es donde existen datos de pozos (puntos verdes en dichas figuras).

2) Para el Perfil CD,  $Y = 2.982164E-21x^6 - 2.790143E-16x^5 + 1.071278E-11x^4 - 2.158498E-07x^3 + 2.406196E-03x^2 - 1.410315E+01x + 3.489173E+04$ ,  $R^2 = 0.9633528$ . Dónde “Y” es el nivel freático y la distancia “x” en metros en un intervalo que van desde 12,000 a 22,500 m Lambert.

- De acuerdo a los minerales y especies químicas en fase sólida encontrados en pozos del acuífero de Santa Ana, podemos afirmar que el área de recarga se localiza al sur del área geográfica de interés en la zona volcánica Ilamatepec y Caldera Coatepeque. La relación cloro-boro (meq/L Cl = 34 meq/L B) también reafirma esta afirmación.
- Respecto a la recarga acuífera de acuerdo a las formaciones geológicas que la constituyen s3'a y s2 se sabe que en condiciones forestadas pueden al menos infiltrar un 30% de la lluvia anual. (MARN-BID 1209-OC-ES No.03, 2008)
- Los límites del acuífero se localizan, de acuerdo a estudios Geológicos y Geofísicos precedentes, al norte en los materiales terciarios del Bálsamo b1, que forman una barrera al flujo. Al oeste también por una barrera del material del bálsamo b'1 (Cerro de Santa Lucía) al este por otra barrera del Bálsamo b1 y b3, Cerro de Tecana. Estas barreras se dan en el sector de la ciudad y en el lado sur el acuífero se extiende hacia el área de recarga. (MARN-BID 1209-OC-ES No.03, 2008)
- La zona intermedia del acuífero alcanza valores de espesores de 90 metros al sur de la ciudad, de 50 metros al iniciarse el área urbana, y de 5 metros al norte de la ciudad. Esta cercanía al nivel freático vuelve vulnerable la parte baja de la ciudad y ofrece riesgo a la contaminación, dado que ahí se localizan la mayoría de fuentes contaminantes. Los materiales de la zona vadosa son piroclásticos s3'a. (MARN-BID 1209-OC-ES No.03, 2008).
- Se han establecido 4 tipos de acuíferos o unidades hidrogeológicas:
  - 1- El acuífero fisurado de gran extensión y posiblemente alta producción compuesto por estratos geológicos tales como: s2, s5'a, c3.
  - 2- El acuíferos granular porosos de extensión limitada y productividad de mediana a baja que lo componen estratos geológicos tales como: Q'f

- 3- Las rocas no acuíferas compuesto por estratos geológicos tales como: c1, c2, b1, b2, b3.
- 4- El acuífero libre, poroso de interacción directa superficial que se compone del estrato geológico s3 y s2 (Alta productividad), Qf (Productividad mediana) y que tiene una barrera no acuífera (b1) al sur de ésta estructura que a la vez corta transversalmente el flujo subsuperficial formando una barrera lateral que retarda el flujo subterráneo previo a la descarga teniendo además incidencia en la calidad del recurso.

En el Mapa 27, se muestran los cortes y perfiles que se analizarán posteriormente a través de las figuras 152 y 153.



Mapa 27 Cortes y Perfiles para modelo conceptual en el área geográfica de interés.

Fuente: Elaboración propia.

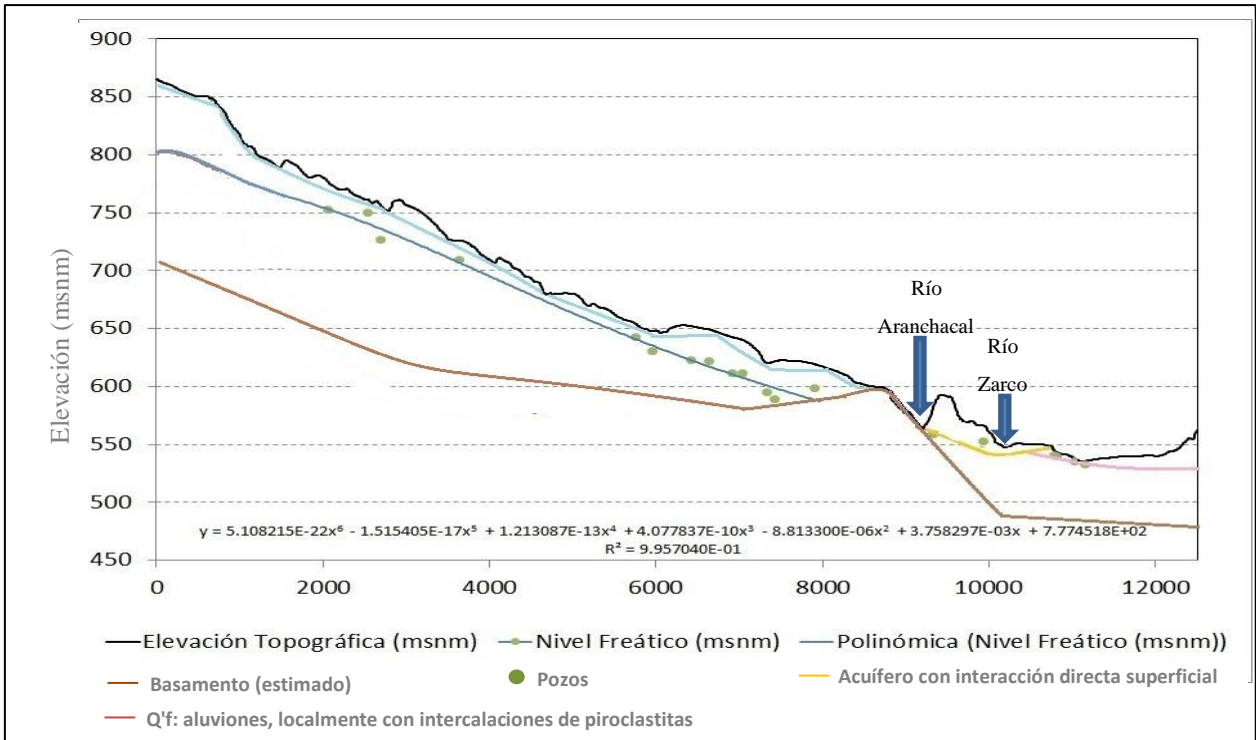


Figura 152 Corte de Perfil AB  
 Fuente: Elaboración propia.

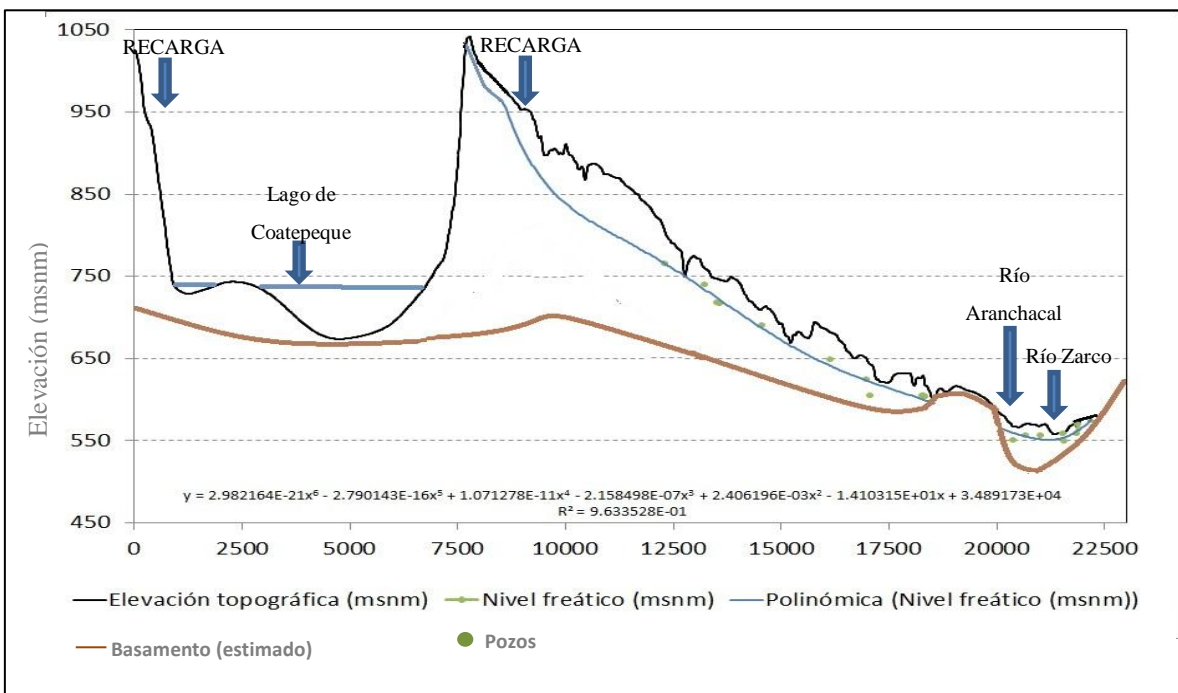


Figura 153 Corte de perfil CD  
 Fuente: Elaboración propia.

## V. CONCLUSIONES

- Respecto a la caracterización geológica, se ha realizado un análisis detallado por cada una de las 3 formaciones geológicas presentes en el área geográfica de interés: Formaciones San Salvador, Cuscatlán y Bálsamo y se ha detallado la caracterización mineralógica de los sitios de muestreo de la base de datos hidrogeoquímica de la investigación.
- El gráfico de dispersión de Cloro vs Boro ( $\text{meq/L Cl} = 34 \text{ meq/L B}$ ) confirmó una relación directa entre las aguas del Lago de Coatepeque y el Acuífero de Santa Ana y la teoría de que existe enlace subterráneo.
- La dispersión mecánica predomina en el sentido del flujo; siendo el valor promedio del coeficiente de dispersión hidrodinámico longitudinal del cuerpo de agua en estudio de  $113.9 \text{ m}^2/\text{s}$ . El fenómeno de dispersión aporta una variación del 20-30% al valor del tiempo medio de residencia.
- Para los sitios del río Suquiapa (A01SUQUI, A04SUQUI Y A23SQUI) el promedio de calificación a partir del índice de calidad de agua canadiense (CCME-WQI) fue de 31.9 por lo que posee una calificación de tipo “Mala”.
- Para el caso de las muestras tomadas en el Lago de Coatepeque los resultados promedios del índice CCME-WQI para los sitios (Centro, Fuente Termal, Puerto Madero y Balneario Constitución) fue de 54.85 lo cual las califica como agua “Regular”, es importante hacer notar que esta agua no es apta para potabilizar ni para riego debido al alto contenido de sales provenientes de aguas volcánicas.
- Para el caso de las aguas de pozos en promedio el índice CCME-WQI nos brinda resultados generales de agua tipo “Buena a excelente” siendo el valor promedio de 94.43.



- Para los pozos de ANDA (SA-01, SA-02, SA-03, SA-08, SA-09, SA-10, SA-11, SA-12, SA-13 y SA-14) el valor promedio del índice fue de 98.97, siendo el único pozo con un valor fuera de norma el pozo SA-09 con valores de nitratos de 81.87 ppm fuera de norma.
- Para el caso de los pozos profundos en general el valor promedio del índice CCME-WQI fue de 98.61
- Para el caso de los pozos excavados en general el promedio del índice CCMEWQI fue de 90.5
- Para el caso de los pozos SA-04, SA-18, SA-19, SAGRANJA, SAN-01 que corresponden al acuífero libre, poroso de interacción directa y superficial el índice promedio fue de 81.12 siendo los parámetros Coliformes fecales, Conductividad, Sodio y pH, los que en general fueron fallidos, y este es el área donde puede haber riesgo de contaminación por uso de esta agua con fines directos o indirectos de consumo humano.
- La técnica estadística de componentes principales permitió resumir la información química en 13 factores o variables independientes, los variogramas espaciales de dichos factores permitieron definir el área hidrogeológica de interacción superficial y subterránea.
- No existe un control real respecto a los vertidos y descargas de las fuentes contaminantes del municipio de Santa Ana y si bien la afectación del acuífero solo ha alcanzado la zona vadosa somera y superficial de las cercanías a la naciente del río Aranchacal (Un área aproximada de 7 Km<sup>2</sup>), donde los niveles freáticos alcanzan a penas entre 2 a 10 metros de profundidad; esto no quiere decir que a futuro una afectación mayor no pueda alcanzar al acuífero productivo si no se establecen pronto las medidas de protección recomendadas.

- Existen 2 zonas en las que el río Aranchacal es influente al acuífero: en la parte alta, luego del primer tributario (Vertiente) con un caudal influente de 20 L/s y luego del río Zarco a 3.5 Km del sitio inicial con un caudal influente de 49 L/s, en el resto de zonas el río es efluente del acuífero. El caudal que este aporta en todo el recorrido estudiado es de 1.051 m<sup>3</sup>/s.
- La dirección de flujo de agua subterránea de acuerdo a los niveles isofreáticos de todos los pozos evaluados es en dirección de sur-norte y oeste-este con un gradiente hidráulico que varía de x a y.
- Se han establecido 4 tipos de acuíferos o unidades hidrogeológicas: 1- El acuífero fisurado de gran extensión y posiblemente alta producción compuesto por estratos geológicos tales como: s2, s5'a, c3; 2- El acuífero granular poroso de extensión limitada y productividad de mediana a baja que lo componen estratos geológicos tales como: Q'f; 3- Las rocas no acuíferas compuesto por estratos geológicos tales como: c1, c2, b1, b2, b3; y 4- El acuífero libre, poroso de interacción directa superficial que se compone del estrato geológico s3 y s2 (Alta productividad), Qf (Productividad mediana) y que tiene una barrera no acuífera (b1) al sur de ésta estructura que a la vez corta transversalmente el flujo subsuperficial formando una barrera lateral que retarda el flujo subterráneo previo a la descarga teniendo además incidencia en la calidad del recurso.

## **VI. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO**

A continuación se detallan las recomendaciones de la presente investigación y el trabajo futuro en la zona de estudio.

### **RECOMENDACIONES PARA LA DESCONTAMINACION Y REMEDIACION DEL RECURSO HÍDRICO**

Se recomienda que las autoridades competentes puedan vigilar de mejor forma que las industrias que descargan aguas residuales al medio receptor cumplan la normativa vigente y puedan descargar aguas tratadas, y si fuese necesario, recomendarles los tratamientos requeridos dependiendo de la matriz de descarga (tratamiento por neutralización, Tratamiento biológico, Coagulación/precipitación, Ecuilización, Filtración, Adsorción de resinas poliméricas, etc.)

Para la descontaminación del recurso superficial (manantiales y ríos) la primera recomendación es una mejor vigilancia en las descargas puntuales y para el caso de las descargas difusas o dispersas, se sabe que los sedimentos y minerales arrastrados por las tormentas y escorrentías desde las tierras de cultivo, los suelos sin protección y fuentes antropogénicas también deben de controlarse por lo que se sugiere la promoción de actividades forestales, prácticas agrícolas, modificaciones hidrológicas y actividades de dragado en los cuerpos de agua ya que los contaminantes suelen adherirse a las partículas finas del sedimento, por lo que al eliminar el sedimento transportado por el agua de los ríos se estaría mejorando notablemente la calidad del agua para diversos usos. Se propone además un sistema de tratamiento que incluya tratamiento preliminar y primario para la remoción de los sólidos flotantes y suspendidos sobre el cuerpo de agua, probablemente se pueda localizar en la salida de la ciudad donde la carga de contaminantes es máxima. También para el caso de las aguas superficiales, las fitotecnologías que utilizan macrófitas flotantes son una alternativa efectiva en la remediación de cuerpos de agua contaminados. Las macrófitas acuáticas se han utilizado en las últimas décadas para la remoción de metales pesados, compitiendo con otros tratamientos, el principal mecanismo de remoción

de metales es la adsorción por las raíces, por ejemplo en el caso del arsénico, la familia Pteridaceae ha demostrado ser la más efectiva ya que estos helechos actúan como hiperacumuladores.

Además se recomienda la implementación de la agricultura orgánica como estrategia de desarrollo la cuál sirve para cambiar algunas de las limitaciones encontradas en la producción convencional, que consiste en cultivar la tierra manteniendo o incrementando la fertilidad del suelo mediante un estilo de manejo racional de los recursos naturales, sin la utilización de agroquímicos o minimizando la cantidad de ellos. Esta se fundamenta no solamente en un mejor manejo del suelo y un fomento al uso de insumos locales, sino también en un mayor valor agregado; se recomienda control de contaminación de aguas subterráneas a partir de medidas sencillas que se pueden implementar:

1. Manejo de rastrojos: Es importante incorporar los rastrojos al suelo para mejorar la textura del suelo y aumentar la retención de la humedad en el mismo.
2. Eliminar práctica de quema de cultivos: Consiste simplemente en eliminar la práctica de quemar los residuos de cosechas anteriores, con la cual se deja expuesto el terreno a los impactos externos.
3. Aplicación racional del nitrógeno: Para evitar el uso excesivo de fertilizantes, la tasa de fertilizante nitrogenado aplicado deberá calcularse en función del "balance de nitrógeno de los cultivos". En él se tienen en cuenta las necesidades de las plantas y la cantidad de nitrógeno en el suelo.
4. Cubierta vegetal: En la medida de lo posible, el suelo no cultivado debe estar cubierto de vegetación. Con ello se impide la acumulación de nitrógeno soluble mediante la absorción del nitrógeno mineralizado y se evita la lixiviación durante los períodos de lluvia.
5. Controlar el período entre cosechas: Los desechos orgánicos producidos por la recolección se mineralizan fácilmente en nitrógeno lixiviable, entre las medidas que se pueden adoptar para reducir este nitrógeno figuran la plantación de cultivos de "abono verde", y el aplazamiento de las labores de aradura para incorporar la paja, raíces y hojas en el suelo.

Para conseguir los máximos rendimientos con un mínimo de efectos negativos en la calidad del agua es preciso mejorar prácticas tan diversas como la lucha contra las malas hierbas, plagas y enfermedades, el encalado, la utilización equilibrada de fertilizantes minerales, etc.

## **RECOMENDACIONES PARA TRABAJO FUTURO**

Para verificar los resultados de los aforos diferenciales se recomienda el uso de trazadores químicos para determinar más parámetros hidrodinámicos y corroborar localización y medida de los caudales aportados por afloramientos de aguas subterráneas a lo largo del cauce de ríos siempre, es importante notar en este punto que se recomienda inspeccionar físicamente el recorrido del cauce ya que para que la técnica sea válida no deben existir zonas muertas de agregación (embalses o pozas).

Dado que las evaluaciones en aspectos hidrogeológicos, hidroquímicos, geológicos, hídricos, estadísticos, etc. Se han realizado, se propone realizar para el área de estudio una modelación hidráulica y de solutos del acuífero y una modelación fisicoquímica del río Suquiapa. Ya que con los datos actuales ya es posible su realización para una gestión integral del recurso.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados. (2008). *Mapa Hidrogeológico de la República de El Salvador*. San Salvador: ANDA.
- Ali Khan, A., Paterson, R., & Khan, H. (2004). Modification and Application of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for the Communication of Drinking Water Quality Data. *Water Qual. Res. J. Canada*, 2004 • Volume 39, No. 3, 285–293.
- Appelo, C., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution 2nd edition*. Amsterdam: Balkema Publishers.
- Bandeira, J. (2004). *Desenvolvimento de técnicas nucleares para estudos de hidrología urbana*. Belo Horizonte: Universidad Federal de Minas Gerais.
- Bryan, K. (1979). Classification of springs. *Journal of Geology*, 15.
- Custodio, E., & Llamas, M. (2001). *Hidrogeología subterránea (Voll)*. Barcelona: Omega.
- Delleur, J. W. (2000). *The Handbook of Groundwater Engineering*. Heidelberg: Springer.
- Dirección General de Estadística y Censos. (2007). *VI Censo de población y vivienda 2007*. San Salvador: Ministerio de Economía.
- Dirección General de Observatorio Ambiental (DGOA/MARN). (s.f.).  
<http://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/clima/perfiles+climatologicos/>.  
Recuperado el 15 de Junio de 2014, de SNET:  
<http://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/clima/perfiles+climatologicos/>
- Dirección General de Observatorio Ambiental. (2009). *Informe anual de Calidad de Agua de los ríos de El Salvador*. San Salvador: MARN.
- Dirección General de Observatorio Ambiental. (2009). *Modelación de Metales Pesados en Equilibrio subcuenca del Río Sucio (Distrito de Riego Atiocoyo Sur)*. San Salvador: MARN.

- Espinoza Rivas, L., Merino, A., & Zavaleta, R. (2013). *Caracterización hidrodinámica y dispersión de contaminantes de la parte alta del río Suquiapa, Santa Ana (Tesis inédita)*. Ciudad Universitaria, San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Fogler, H. S. (2008). *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. Michigan: Pearson Education.
- López Araujo, D., & Retana Peña, J. (2007). *Reconocimiento hidrogeológico de la zona norte del departamento de Santa Ana y área aledaña del departamento de Chalatenango*. Antiguo Cuscatlán: UCA.
- Manzano Orellana, M. (2004). *Hidrogeoquímica de aguas subterráneas*. Cartagena, España: Universidad Politécnica de Cartagena.
- MARN-BID 1209-OC-ES No.03. (2008). *Diagnóstico de la Calidad de Aguas Subterráneas, Modelo de Flujo y Evaluación de Riesgo a la Contaminación en tres zonas prioritarias : A) Zapotitán-Opico, B) Subcuenca Río Apanchacal (Santa Ana) y Subcuenca Río Grande de San Miguel*. San Salvador: Hidrodesarrollo.
- Massart, D. L., Vandeginste, B. G., & Buydens, L. M. (1997). *Hanbook of Chemometrics and Qualimetrics*. Amsterdam: Elsevier.
- Mijailov, L. (1985). *Hidrogeología*. Moscú: Mir.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2009). *Modelación de metales pesados en equilibrio*. San salvador: MARN.
- Misión geológica alemana. (1967-1971). *Mapa Geológico de El Salvador*. S.S.
- Moreno, M. D. (2003). *Toxicología Ambiental: Evaluación de riesgo para la salud humana*. Madrid: McGraw Hill.
- Organización de Estados Americanos (OEA). (2000). *Santa Ana*. Recuperado el 3 de Septiembre de 2014, de <http://www.oas.org/USDE/publications/Unit/oea34s/ch088.htm>
- Pinto Rodríguez, O. (2009). *Hidroquímica y contaminación*. Madrid: Universidad complutense de Madrid.

- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (1981). *Plan Maestro para el Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos (PLAMDARH). Recursos y Demandas Potenciales en la Región "A", Documento Básico No. 12, Volumen 1*. San Salvador: Gobierno de El Salvador y PNUD.
- Pullinger, C. (1998). *Evolution of the Santa Ana volcanic complex, El Salvador (M.S, thesis)*. Michigan: Michigan Technological University.
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales. (2002). *Estrategias de Descontaminación de los ríos Acelhuate, Sucio y Suquiapa. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador*. San Salvador: DGOA/MARN.
- SIGET. (2007). *Proyectos de Energía Renovable, a través de la utilización del recurso hídrico. El Salvador, Centroamérica*. Recuperado el 20 de Junio de 2013, de <http://www.naruc.org/international/Documents/EL%20SALVADOR-%20Arias%20Illustrated%20RE%20SPANISH1.pdf>
- SNET. (2004). Recuperado el 5 de Agosto de 2013, de <http://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00079/doc00079-%20b.pdf>
- Sushil, K., Singh, M., & Beck, B. (2003). Dispersion Coefficient of Streams from Tracer Experiment Data. *Journal of Environmental Engineering*, 129:6/539.
- UNESCO. (1998). *International Glossary of Hydrology*. Geneva: WHO.



## ANEXOS

### ANEXO 1. HOJAS DE AFOROS DE AGUA SUPERFICIAL.

Tabla 49 Hoja de cálculo de aforo por vadeo para el sitio A01SUQUI

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. (m)	REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC (ft/s)	VELOC (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	m	V	m	V					
2	0.50	0.37	3	40	---	---	0.22	0.183	---	---	-	-	0.50	0.113	0.0031
3	1.00	0.32	4	40	---	---	0.19	0.238	---	---	-	-	0.50	0.173	0.0111
4	1.50	0.38	7	40	---	---	0.23	0.404	---	---	0.382	0.116	0.50	0.175	0.0171
5	2.00	0.38	8	40	---	---	0.23	0.459	---	---	0.459	0.140	0.50	0.190	0.0250
6	2.50	0.36	8	40	---	---	0.22	0.459	---	---	-	-	0.50	0.185	0.0259
7	3.00	0.34	7	40	---	---	0.20	0.404	---	---	-	-	0.50	0.175	0.0230
8	3.50	0.38	5	40	---	---	0.23	0.293	---	---	0.293	0.089	0.50	0.180	0.0191
9	4.00	0.38	11	40	---	---	0.23	0.624	---	---	0.617	0.188	0.50	0.190	0.0266
10	4.50	0.32	21	40	---	---	0.19	1.175	---	---	-	-	0.50	0.175	0.0480
11	5.00	0.30	29	40	---	---	0.18	1.616	---	---	1.600	0.488	0.50	0.155	0.0659
12	5.50	0.26	54	40	---	---	0.16	2.994	---	---	2.994	0.913	0.50	0.140	0.0984
13	6.00	0.28	44	40	---	---	0.17	2.443	---	---	2.443	0.745	0.50	0.135	0.1119
14	6.50	0.22	23	40	sup	1.286	---	---	---	---	1.282	0.391	0.50	0.125	0.0710
15	7.00	0.16	7	40	sup	0.404	---	---	---	---	0.404	0.123	0.50	0.095	0.0245
16	7.50	0.12	4	40	sup	0.238	---	---	---	---	0.238	0.073	0.50	0.070	0.0068
17	8.00	0.14	20	40	sup	1.120	---	---	---	---	1.112	0.339	0.50	0.065	0.0135
18	8.50	0.12	6	40	sup	0.349	---	---	---	---	0.349	0.106	0.50	0.065	0.0145
														<b>2.450</b>	<b>0.6087</b>

Tabla 50 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A02VERTI.

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	M	V	m	V					
1		0.22		40											
2	0.15	0.22	9	40	sup	0.514	---	---	---	---	0.514	0.157	0.15	0.033	0.0026
3	0.30	0.21	9	40	sup	0.514	---	---	---	---	0.514	0.157	0.15	0.032	0.0051
4	0.45	0.21	16	40	sup	0.900	---	---	---	---	0.900	0.274	0.15	0.032	0.0068
5	0.60	0.22	16	40	sup	0.900	---	---	---	---	0.885	0.270	0.15	0.032	0.0088
6	0.75	0.22	17	40	sup	0.955	---	---	---	---	0.955	0.291	0.15	0.033	0.0093
7	0.90	0.21	16	40	sup	0.900	---	---	---	---	0.891	0.272	0.15	0.032	0.0091
8	1.05	0.20	17	40	sup	0.955	---	---	---	---	0.955	0.291	0.15	0.031	0.0087
9	1.20	0.17	12	40	sup	0.679	---	---	---	---	0.679	0.207	0.15	0.028	0.0069
10	1.35	0.12	6	40	sup	0.349	---	---	---	---	0.335	0.102	0.15	0.022	0.0034
11	1.50										1.600	0.488	0.15	0.009	
														<b>0.284</b>	<b>0.0631</b>

Tabla 51 Hoja de cálculo de aforos por vadeo para sitio A03SUQUI

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	M	V	m	V					
2	0.50	0.22	2	40	sup	0.128	---	---	---	---	0.128	0.039	0.50	0.055	0.0011
3	1.00	0.47	2	40	---	---	0.28	0.128	---	---	0.123	0.037	0.50	0.173	0.0067
4	1.50	0.42	2	41.8	---	---	0.25	0.123	---	---	0.123	0.037	0.50	0.223	0.0085
5	2.00	0.58	8	40	---	---	0.35	0.459	---	---	0.439	0.134	0.50	0.250	0.0222
6	2.50	0.47	10	41.2	---	---	0.28	0.553	---	---	0.553	0.169	0.50	0.263	0.0405
7	3.00	0.38	16	40	---	---	0.23	0.900	---	---	0.900	0.274	0.50	0.213	0.0470
8	3.50	0.40	17	40.9	---	---	0.24	0.934	---	---	0.934	0.285	0.50	0.195	0.0545
9	4.00	0.40	17	40	---	---	0.24	0.955	---	---	0.955	0.291	0.50	0.200	0.0576
10	4.50	0.39	16	40.7	---	---	0.23	0.885	---	---	0.885	0.270	0.50	0.198	0.0554
11	5.00	0.40	20	40	---	---	0.24	1.120	---	---	1.120	0.341	0.50	0.198	0.0603
12	5.50	0.38	24	40	---	---	0.23	1.341	---	---	1.341	0.409	0.50	0.195	0.0731
13	6.00	0.34	21	40.2	---	---	0.20	1.170	---	---	1.169	0.356	0.50	0.180	0.0689
14	6.50	0.33	17	40	---	---	0.20	0.955	---	---	0.453	0.138	0.50	0.168	0.0542
15	7.00	0.26	7	41	---	---	0.16	0.394	---	---	0.394	0.120	0.50	0.148	0.0303
16	7.50	0.22	17	40	sup	0.955	---	---	---	---	0.933	0.284	0.50	0.120	0.0247
17	8.00	0.26	17	40.6	---	---	0.16	0.941	---	---	0.993	0.303	0.50	0.120	0.0347
18	8.50	0.31	5	40	---	---	0.19	0.293	---	---	0.293	0.089	0.50	0.143	0.0268
19	9.00	0.27	3	40	---	---	0.16	0.183	---	---	0.183	0.056	0.50	0.145	0.0105
														<b>3.183</b>	<b>0.6523</b>

Tabla 52 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A04APANT

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	M	V	m	V					
1															
2	0.50	0.26	16	40	---	---	0.16	0.900	---	---	0.900	0.274	0.50	0.065	0.0089
3	1.00	0.28	19	40	---	---	0.17	1.065	---	---	1.065	0.325	0.50	0.135	0.0404
4	1.50	0.30	17	40	---	---	0.18	0.955	---	---	0.955	0.291	0.50	0.144	0.0443
5	2.00	0.32	16	40	---	---	0.19	0.900	---	---	0.900	0.274	0.50	0.154	0.0435
6	2.50	0.44	21	40.5	---	---	0.26	1.161	---	---	1.161	0.354	0.50	0.190	0.0597
7	3.00	0.38	25	40	---	---	0.23	1.396	---	---	1.396	0.426	0.50	0.205	0.0799
8	3.50	0.30	23	40	---	---	0.18	1.286	---	---	1.286	0.392	0.50	0.170	0.0695
9	4.00	0.10		40							-	-	0.50	0.100	
														<b>1.163</b>	<b>0.3461</b>

Tabla 53 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A05SUQUI

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	M	V	m	V					
1															
2	1.00	0.22	3	41.3	sup	0.178	---	---	---	---	0.178	0.054	1.00	0.110	0.0030
3	2.00	0.47	15	40	---	---	0.28	0.845	---	---	0.845	0.258	1.00	0.345	0.0538
4	3.00	0.42	22	40	---	---	0.25	1.230	---	---	1.230	0.375	1.00	0.445	0.1407
5	4.00	0.58	19	40.4	---	---	0.35	1.055	---	---	1.054	0.321	1.00	0.500	0.1741
6	5.00	0.47	20	40	---	---	0.28	1.120	---	---	1.120	0.341	1.00	0.525	0.1740
7	6.00	0.38	8	40	---	---	0.23	0.459	---	---	0.459	0.140	1.00	0.425	0.1023
8	7.00	0.40	10	40	---	---	0.24	0.569	---	---	0.569	0.173	1.00	0.390	0.0611
9	8.00	0.40	18	40	---	---	0.24	1.010	---	---	1.070	0.326	1.00	0.400	0.0963
10	9.00	0.39	16	40.6	---	---	0.23	0.887	---	---	0.900	0.274	1.00	0.395	0.1142
11	10.00	0.40	20	41.3	---	---	0.24	1.085	---	---	1.104	0.336	1.00	0.395	0.1187
12	10.50	0.38	12	40	---	---	0.23	0.679	---	---	0.658	0.201	0.50	0.195	0.0524
														<b>4.125</b>	<b>1.1004</b>

Tabla 54 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A06SAUCE-1

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (cm)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	M	V	m	V					
1		0.60													
2	11.00	0.60	15	40	---	---	0.36	0.845	---	---	0.845	0.258	0.11	0.066	0.0085
3	22.00	0.70	15	40	---	---	0.42	0.845	---	---	0.845	0.258	0.11	0.072	0.0184
4	33.00	0.64	15	40	---	---	0.38	0.845	---	---	0.845	0.258	0.11	0.074	0.0190
5	44.00	0.66	15	40.4	---	---	0.40	0.836	---	---	0.845	0.258	0.11	0.072	0.0183
6	55.00	0.72	16	40	---	---	0.43	0.900	---	---	0.895	0.273	0.11	0.076	0.0201
7	66.00	0.64	17	40	---	---	0.38	0.955	---	---	0.934	0.285	0.11	0.075	0.0211
8	77.00	0.64	16	40	---	---	0.38	0.900	---	---	0.900	0.274	0.11	0.070	0.0199
9	88.00	0.65	14	40	---	---	0.39	0.789	---	---	0.789	0.240	0.11	0.071	0.0183
10	99.00	0.62	14	40.9	---	---	0.37	0.772	---	---	0.789	0.240	0.11	0.070	0.0166
														<b>0.645</b>	<b>0.1602</b>

Tabla 55 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A07SAUCE-2

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQIA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	M	V	m	V					
1															
2	10.00	0.30	2	55.3	---	---	0.18	0.098	---	---	0.097	0.030	0.10	0.015	0.0002
3	20.00	0.32	2	40	---	---	0.19	0.128	---	---	0.128	0.039	0.10	0.031	0.0011
4	30.00	0.32	3	40	---	---	0.19	0.183	---	---	0.177	0.054	0.10	0.032	0.0015
5	40.00	0.30	5	40.7	---	---	0.18	0.289	---	---	0.291	0.089	0.10	0.031	0.0022
6	50.00	0.28	6	40	---	---	0.17	0.349	---	---	0.349	0.106	0.10	0.029	0.0028
7	60.00	0.26	8	40	---	---	0.16	0.459	---	---	0.450	0.137	0.10	0.027	0.0033
8	70.00	0.23	10	40	sup	0.569	---	---	---	---	0.569	0.173	0.10	0.025	0.0038
9	80.00	0.26	12	40	---	---	0.16	0.679	---	---	0.679	0.207	0.10	0.025	0.0047
														<b>0.214</b>	<b>0.0196</b>

Tabla 56 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A07CARCAG

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQIA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	M	V	m	V					
1	0.15	0.24	8	40.6	sup	0.452	---	---	---	---	0.452	0.138	0.15	0.018	0.0012406
2	0.30	0.30	19	40	---	---	0.18	1.065	---	---	1.065	0.325	0.15	0.041	0.0093652
3	0.45	0.32	20	40.4	---	---	0.19	1.109	---	---	1.109	0.338	0.15	0.047	0.0154089
4	0.60	0.32	17	40	---	---	0.19	0.955	---	---	0.955	0.291	0.15	0.048	0.0150995
5	0.75	0.33	16	40	---	---	0.20	0.900	---	---	0.900	0.274	0.15	0.049	0.0137785
6	0.90	0.32	15	40	---	---	0.19	0.845	---	---	0.845	0.258	0.15	0.049	0.0129594
7	1.05	0.30	15	40	---	---	0.18	0.845	---	---	0.845	0.258	0.15	0.047	0.0119707
8	1.20	0.31	9	41.6	---	---	0.19	0.495	---	---	0.495	0.151	0.15	0.046	0.0093387
9	1.35	0.33	5	40	---	---	0.20	0.293	---	---	0.293	0.089	0.15	0.048	0.0057658
10	1.50			40									0.15	0.025	
														<b>0.416</b>	<b>0.0949378</b>



Tabla 57 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A08SUQUI

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	m	V	m	V					
1															
2	1.00	0.29	4	40	---	---	0.17	0.238	---	---	0.236	0.072	1.00	0.145	0.0052655
3	2.00	0.43	19	40	---	---	0.26	1.065	---	---	1.065	0.325	1.00	0.360	0.0715075
4	3.00	0.38	16	41.8	---	---	0.23	0.862	---	---	0.900	0.274	1.00	0.405	0.1189273
5	4.00	0.35	19	40	---	---	0.21	1.065	---	---	1.062	0.324	1.00	0.365	0.1071814
6	5.00	0.34	21	41.2	---	---	0.20	1.142	---	---	1.175	0.358	1.00	0.345	0.1160231
7	6.00	0.33	21	40	---	---	0.20	1.175	---	---	1.175	0.358	1.00	0.335	0.1182883
8	7.00	0.45	22	40.9	---	---	0.27	1.204	---	---	1.212	0.369	1.00	0.390	0.1414028
9	8.00	0.44	10	40	---	---	0.26	0.569	---	---	0.554	0.169	1.00	0.445	0.1202248
10	9.00	0.40	9	40.7	---	---	0.24	0.505	---	---	0.504	0.154	1.00	0.420	0.0687669
11	10.00	0.50	12	40	---	---	0.30	0.679	---	---	0.676	0.206	1.00	0.450	0.0812390
12	11.00	0.63	11	40	---	---	0.38	0.624	---	---	0.614	0.187	1.00	0.565	0.1122271
13	12.00	0.64	15	40.2	---	---	0.38	0.840	---	---	0.845	0.258	1.00	0.635	0.1417358
14	13.00			40							-	-	1.00	0.320	
														<b>5.180</b>	<b>1.2071642</b>

Tabla 58 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A09MOLIN-1

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQIA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	M	V	m	V					
1				40							-				
2	0.25	0.03	7	40	sup	0.404	---	---	---	---	0.395	0.120	0.25	0.004	0.0002307
3	0.50	0.10	9	40.6	sup	0.507	---	---	---	---	0.506	0.154	0.25	0.016	0.0022541
4	0.75	0.17	10	40	sup	0.569	---	---	---	---	0.569	0.173	0.25	0.034	0.0055321
5	1.00	0.21	8	40.1	sup	0.458	---	---	---	---	0.447	0.136	0.25	0.048	0.0074320
6	1.25	0.21	12	40	sup	0.679	---	---	---	---	0.679	0.207	0.25	0.053	0.0090963
7	1.50	0.26	9	40	---	---	0.16	0.514	---	---	0.514	0.157	0.25	0.059	0.0106826
8	1.75	0.21	7	41.7	sup	0.388	---	---	---	---	0.388	0.118	0.25	0.059	0.0080742
9	2.00	0.15	9	40	sup	0.514	---	---	---	---	0.514	0.157	0.25	0.045	0.0061845
10	2.25	0.16	10	40	sup	0.569	---	---	---	---	0.569	0.173	0.25	0.039	0.0063949
11	2.50	0.12	7	42.7	sup	0.379	---	---	---	---	0.379	0.116	0.25	0.035	0.0050579
12	2.75	0.11	7	40	sup	0.404	---	---	---	---	0.404	0.123	0.25	0.029	0.0034302
13	3.00	0.09	5	42	sup	0.280	---	---	---	---	0.280	0.085	0.25	0.025	0.0026057
														<b>0.444</b>	<b>0.0667828</b>

Tabla 59 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A09MOLIN-2

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	M	V	m	V					
1															
2	0.10	0.24	1	40.3	sup	0.073	---	---	---	---	0.729	0.222	0.10	0.012	0.0001326
3	0.20	0.23	15	40	sup	0.845	---	---	---	---	0.845	0.258	0.10	0.024	0.0032845
4	0.30	0.34	16	40	---	---	0.20	0.900	---	---	0.900	0.274	0.10	0.029	0.0075763
5	0.40	0.32	17	40	---	---	0.19	0.955	---	---	0.955	0.291	0.10	0.033	0.0093270
6	0.50	0.30	21	40.4	---	---	0.18	1.164	---	---	1.164	0.355	0.10	0.031	0.0100096
7	0.60	0.30	22	40.8	---	---	0.18	1.207	---	---	1.207	0.368	0.10	0.030	0.0108380
8	0.70	0.26	24	40.4	---	---	0.16	1.328	---	---	1.327	0.404	0.10	0.028	0.0108141
9	0.80	0.24	30	40	sup	1.671	---	---	---	---	1.671	0.509	0.10	0.025	0.0114261
10	0.90	0.21	32	40.5	sup	1.760	---	---	---	---	1.760	0.536	0.10	0.023	0.0117658
11	1.00	0.20	19	40	sup	1.065	---	---	---	---	1.065	0.325	0.10	0.021	0.0088257
														<b>0.254</b>	<b>0.0875562</b>

Tabla 60 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A10SUQUI.

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	M	V	m	V					
1															
2	1.00	0.22	17	40.9	sup	0.934	---	---	---	---	0.934	0.285	1.00	0.110	0.0156613
3	2.00	0.28	21	40.5	---	---	0.17	1.161	---	---	1.161	0.354	1.00	0.250	0.0798290
4	3.00	0.31	23	40.4	---	---	0.19	1.273	---	---	1.273	0.388	1.00	0.295	0.1094295
5	4.00	0.40	23	40	---	---	0.24	1.286	---	---	1.286	0.392	1.00	0.355	0.1384236
6	5.00	0.43	12	41	---	---	0.26	0.663	---	---	0.663	0.202	1.00	0.415	0.1232454
7	6.00	0.60	10	40.8	---	---	0.36	0.558	---	---	0.558	0.170	1.00	0.515	0.0958549
8	7.00	0.47	23	40.2	---	---	0.28	1.279	---	---	1.270	0.387	1.00	0.535	0.1498142
9	8.00	0.37	25	40	---	---	0.22	1.396	---	---	1.396	0.426	1.00	0.420	0.1712248
10	9.00	0.39	33	40	---	---	0.23	1.837	---	---	1.837	0.560	1.00	0.380	0.1872040
11	10.00	0.45	27	40	---	---	0.27	1.506	---	---	1.506	0.459	1.00	0.420	0.2139659
12	11.00	0.45	27	40.5	---	---	0.27	1.488	---	---	1.488	0.454	1.00	0.450	0.2053084
13	12.00	0.60	19	40.2	---	---	0.36	1.060	---	---	1.060	0.323	1.00	0.525	0.2038284
14	13.00	0.29	12	40.1	---	---	0.17	0.678	---	---	0.677	0.206	1.00	0.445	0.1178311
														<b>5.115</b>	<b>1.8103413</b>

Tabla 61 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A11ZARCO.

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	M	V	m	V					
1		0.36	1	40.2	---	---	0.22	0.073	---	---					
2	0.50	0.42	4	40	---	---	0.25	0.238	---	---	0.236	0.072	0.50	0.195	0.0092401
3	1.00	0.42	7	42.2	---	---	0.25	0.384	---	---	1.065	0.325	0.50	0.210	0.0199003
4	1.50	0.40	11	40	---	---	0.24	0.624	---	---	0.900	0.274	0.50	0.205	0.0314808
5	2.00	0.43	10	40.8	---	---	0.26	0.558	---	---	1.062	0.324	0.50	0.208	0.0373883
6	2.50	0.38	11	40	---	---	0.23	0.624	---	---	1.175	0.358	0.50	0.203	0.0364873
7	3.00	0.35	11	41.2	---	---	0.21	0.606	---	---	1.175	0.358	0.50	0.183	0.0342261
8	3.50	0.33	12	40	---	---	0.20	0.679	---	---	1.212	0.369	0.50	0.170	0.0333099
9	4.00	0.33	12	40.6	---	---	0.20	0.669	---	---	0.554	0.169	0.50	0.165	0.0339145
10	4.50	0.33	13	40.1	---	---	0.20	0.733	---	---	0.504	0.154	0.50	0.165	0.0352556
11	5.00	0.34	14	41	---	---	0.20	0.771	---	---	0.676	0.206	0.50	0.168	0.0383730
12	5.50	0.33	15	40	---	---	0.20	0.845	---	---	0.614	0.187	0.50	0.168	0.0412327
13	6.00	0.31	14	40	---	---	0.19	0.789	---	---	0.845	0.258	0.50	0.160	0.0398454
14	6.50	0.26	12	41.2	---	---	0.16	0.660	---	---	-	-	0.50	0.143	0.0314778
														<b>2.340</b>	<b>0.5379648</b>

Tabla 62 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A12SUQUI.

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2,0.6	TIEMPO (s)	No. REV 0.8	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL LEIDO
							0.2		0.6		0.8						
							m	V	M	V	m	V					
1																	
2	1.00	0.22	9	40			sup	0.514	---	---	---	---	0.514	0.157	0.157	1.00	0.0086147
3	2.00	0.40	11	40.6			---	---	0.24	0.615	---	---	0.616	0.188	0.188	1.00	0.0533403
4	3.00	0.51	11	40.3			---	---	0.31	0.620	---	---	0.616	0.188	0.189	1.00	0.0856211
5	4.00	0.60	12	40			---	---	0.36	0.679	---	---	0.679	0.207	0.207	1.00	0.1098590
6	5.00	0.77	8	40	6	41.1	0.15	0.459	---	---	0.616	0.459	0.459	0.140	0.140	1.00	0.1188004
7	6.00	0.84	8	40.2	7	40	0.17	0.457	---	---	0.672	0.457	0.459	0.140	0.139	1.00	0.1122940
8	7.00	0.85	7	44.1	8	40	0.17	0.368	---	---	0.68	0.368	0.347	0.106	0.112	1.00	0.1061561
9	8.00	0.74	11	40	14	40.7	---	---	0.44	0.624	---	---	0.617	0.188	0.190	1.00	0.1201752
10	9.00	0.64	15	40			---	---	0.38	0.845	---	---	0.845	0.258	0.257	1.00	0.1544447
11	10.00	0.70	15	40			---	---	0.42	0.845	---	---	0.845	0.258	0.257	1.00	0.1724808
12	11.00	0.80	16	40	24	40	0.16	0.900	---	---	0.64	0.900	0.902	0.275	0.274	1.00	0.1993758
13	12.00	0.72	24	40			---	---	0.43	1.341	---	---	1.341	0.409	0.409	1.00	0.2594921
14	13.00	0.85	16	40	33	40.4	0.17	0.900	---	---	0.68	0.900	0.902	0.275	0.274	1.00	0.2680280
15	14.00	0.76	16	40	28	40	0.15	0.900	---	---	0.608	0.900	0.884	0.269	0.274	1.00	0.2207589
16	15.00	0.60	15	40.6			---	---	0.36	0.832	---	---	0.845	0.258	0.254	1.00	0.1795011
17	16.00	0.55	13	41.2			---	---	0.33	0.713	---	---	0.729	0.222	0.217	1.00	0.1354646
18	17.00	0.30		40												1.00	
																<b>10.700</b>	<b>2.2993</b>

Tabla 63 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A13VERTI.

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	m	V	m	V					
1															
2	0.20	0.35	2	40	---	---	0.21	0.128	---	---	0.128	0.039	0.20	0.035	0.0006830
3	0.40	0.35	2	40	---	---	0.21	0.128	---	---	0.128	0.039	0.20	0.070	0.0027319
4	0.60	0.40	2	43.7	---	---	0.24	0.119	---	---	0.270	0.082	0.20	0.075	0.0028203
5	0.80	0.38	5	40	---	---	0.23	0.293	---	---	0.399	0.122	0.20	0.078	0.0048988
6	1.00	0.45	6	41.5	---	---	0.27	0.337	---	---	0.230	0.070	0.20	0.083	0.0079686
7	1.20	0.45	4	41.4	---	---	0.27	0.231	---	---	0.231	0.070	0.20	0.090	0.0077823
8	1.40	0.42	4	46.1	---	---	0.25	0.209	---	---	0.230	0.070	0.20	0.087	0.0058329
9	1.60	0.42	4	40	---	---	0.25	0.238	---	---	0.238	0.073	0.20	0.084	0.0057273
10	1.80	0.40	4	40	---	---	0.24	0.238	---	---	0.455	0.139	0.20	0.082	0.0059555
11	2.00	0.40	8	40	---	---	0.24	0.459	---	---	-	-	0.20	0.080	0.0084983
														<b>0.764</b>	<b>0.0509586</b>

Tabla 64 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A14SUQUI.

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	No. REV 0.8	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
							0.2		0.6		0.8						
							m	V	m	V	m	V					
1																	
2	1.00	0.59	1	40			---	---	0.35	0.073	---	---	0.073	0.022	1.00	0.295	0.0032783
3	2.00	0.64	2	40			---	---	0.38	0.128	---	---	0.128	0.039	1.00	0.615	0.0188352
4	3.00	0.60	1	50.5			---	---	0.36	0.061	---	---	0.061	0.019	1.00	0.620	0.0179054
5	4.00	0.54	2	40			---	---	0.32	0.128	---	---	0.128	0.039	1.00	0.570	0.0164614
6	5.00	0.62	2	40			---	---	0.37	0.128	---	---	0.128	0.039	1.00	0.580	0.0226354
7	6.00	0.58	2	40			---	---	0.35	0.128	---	---	0.128	0.039	1.00	0.600	0.0234160
8	7.00	0.60	3	40			---	---	0.36	0.183	---	---	0.183	0.056	1.00	0.590	0.0279819
9	8.00	0.64	4	41.2			---	---	0.38	0.232	---	---	0.232	0.071	1.00	0.620	0.0392142
10	9.00	0.80	6	40.7	9	40.7	0.16	0.343	---	---	0.64	0.343	0.343	0.105	1.00	0.720	0.0630596
11	10.00	0.76	13	40	14	40	0.15	0.734	---	---	0.608	0.734	0.734	0.224	1.00	0.780	0.1280480
12	11.00	0.77	20	40.4	22	40	0.15	1.109	---	---	0.616	1.109	1.109	0.338	1.00	0.765	0.2149432
13	12.00	0.85	25	40	28	40.6	0.17	1.396	---	---	0.68	1.396	1.396	0.426	1.00	0.810	0.3092377
14	13.00	0.93	28	40.4	32	40	0.19	1.546	---	---	0.744	1.546	1.546	0.471	1.00	0.890	0.3989976
15	14.00	1.00	33	40	30	40	0.20	1.837	---	---	0.8	1.837	1.837	0.560	1.00	0.965	0.4974712
16	15.00	1.10	26	40	17	40.4	0.22	1.451	---	---	0.88	1.451	1.451	0.442	1.00	1.050	0.5260946
17	16.00	0.82	17	40	14	40	0.16	0.955	---	---	0.656	0.955	0.932	0.284	1.00	0.960	0.3519723
																<b>11.430</b>	<b>2.5561781</b>



Tabla 65 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A15PUENTE.

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	M	V	m	V					
1															
2	0.50	0.14	4	40	sup	0.238	---	---	---	---	0.238	0.073	0.50	0.035	0.0012710
3	1.00	0.39	20	40	---	---	0.23	1.120	---	---	1.120	0.341	0.50	0.133	0.0274318
4	1.50	0.38	27	40.3	---	---	0.23	1.495	---	---	1.495	0.456	0.50	0.193	0.0767210
5	2.00	0.37	31	40	---	---	0.22	1.727	---	---	1.727	0.526	0.50	0.188	0.0920538
6	2.50	0.36	37	40	---	---	0.22	2.057	---	---	2.057	0.627	0.50	0.183	0.1052377
7	3.00	0.35	37	40	---	---	0.21	2.057	---	---	2.057	0.627	0.50	0.178	0.1113008
8	3.50	0.26	30	40.4	---	---	0.16	1.655	---	---	1.655	0.504	0.50	0.153	0.0862768
9	4.00	0.26	29	40	---	---	0.16	1.616	---	---	1.616	0.493	0.50	0.130	0.0648111
10	4.50	0.30	30	40	---	---	0.18	1.671	---	---	1.671	0.509	0.50	0.140	0.0701459
11	5.00	0.34	14	40	---	---	0.20	0.789	---	---	0.789	0.240	0.50	0.160	0.0600061
12	5.50	0.26	5	44.4	---	---	0.16	0.266	---	---	0.266	0.081	0.50	0.150	0.0241303
13	6.00	0.10		40							-	-	0.50	0.090	
														<b>1.730</b>	<b>0.5593177</b>

Tabla 66 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A16SUQUI.

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	No. REV 0.8	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL	
							0.2		0.6		0.8							
							m	V	M	V	m	V						
1		0.13	16	40			sup	0.900	---	---	---	---	0.9	0.274				
2	1.00	0.18	28	40			sup	1.561	---	---	---	---	1.561	0.476	1.00	0.155	0.0581309	
3	2.00	0.33	46	40			---	---	0.20	2.553	---	---	2.553	0.778	1.00	0.255	0.1598969	
4	3.00	0.52	42	40			---	---	0.31	2.333	---	---	2.333	0.711	1.00	0.425	0.3164766	
5	4.00	0.72	49	40			---	---	0.43	2.719	---	---	2.719	0.829	1.00	0.620	0.4773080	
6	5.00	0.76	37	40	53	40.2	0.15	2.057	---	---	0.608	2.057	2.057	0.627	1.00	0.740	0.5386092	
7	6.00	0.70	38	40			---	---	0.42	2.112	---	---	2.112	0.644	1.00	0.730	0.4638763	
8	7.00	0.65	30	40			---	---	0.39	1.671	---	---	1.671	0.509	1.00	0.675	0.3892354	
9	8.00	0.51	23	40.7			---	---	0.31	1.264	---	---	1.264	0.385	1.00	0.580	0.2594443	
10	9.00	0.34	18	40			---	---	0.20	1.010	---	---	1.070	0.326	1.00	0.425	0.1472686	
11	10.00	0.15	12	41.4			sup	0.657	---	---	---	---	0.657	0.200	1.00	0.245	0.0622362	
12	11.00	0.10	14	40.8			sup	0.774	---	---	---	---	0.774	0.236	1.00	0.125	0.0272648	
13	12.00	0.02		40									-	-	1.00	0.060		
																	<b>5.035</b>	<b>3.272576</b>

Tabla 67 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A17GUILGUAYO.

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

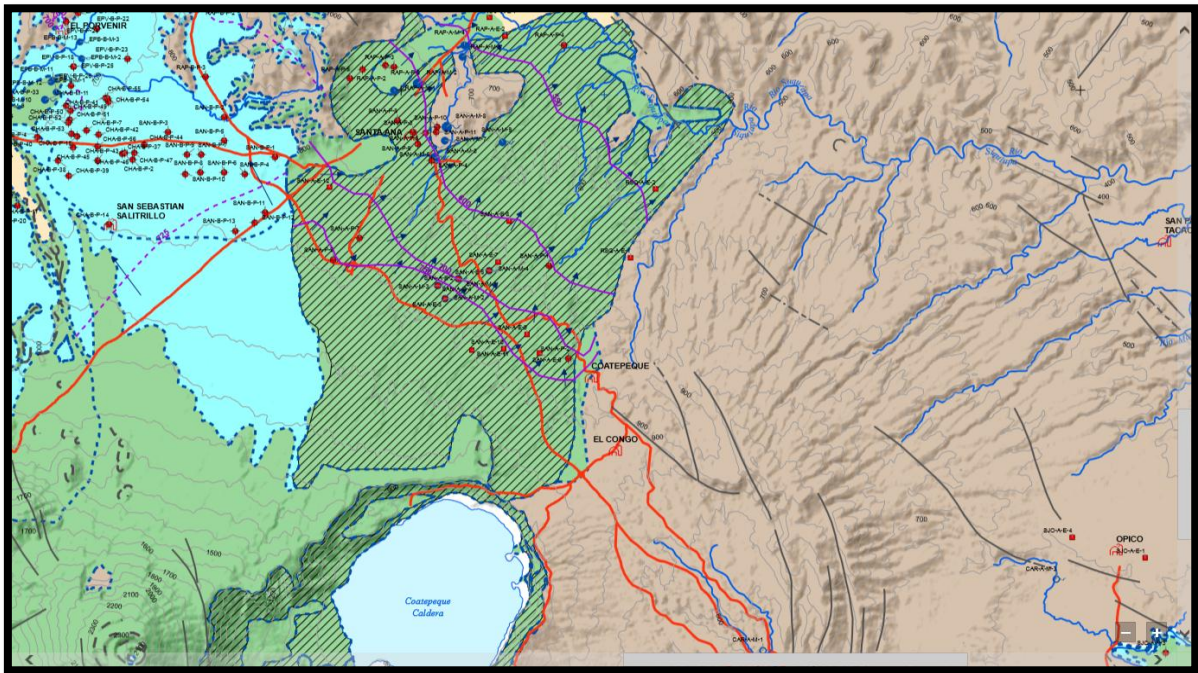
No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	M	V	m	V					
1				40							-				
2	0.25	0.33	14	40	---	---	0.20	0.789	---	---	0.789	0.240	0.25	0.041	0.0049631
3	0.50	0.32	19	40.6	---	---	0.19	1.050	---	---	1.048	0.319	0.25	0.081	0.0227724
4	0.75	0.28	22	40	---	---	0.17	1.230	---	---	1.230	0.375	0.25	0.075	0.0260609
5	1.00	0.28	17	40	---	---	0.17	0.955	---	---	0.955	0.291	0.25	0.070	0.0233126
6	1.25	0.27	14	40.9	---	---	0.16	0.772	---	---	0.772	0.235	0.25	0.069	0.0180982
7	1.50	0.26	9	42.3	---	---	0.16	0.487	---	---	0.487	0.148	0.25	0.066	0.0127156
8	1.75	0.25	7	40	---	---	0.15	0.404	---	---	0.404	0.123	0.25	0.064	0.0086521
9	2.00	0.22	5	43.4	sup	0.272	---	---	---	---	0.272	0.083	0.25	0.059	0.0060476
10	2.25	0.10	9	42.8	sup	0.481	---	---	---	---	0.481	0.147	0.25	0.040	0.0045917
11	2.50			40							-	-	0.25	0.013	
														<b>0.578</b>	<b>0.1271593</b>

Tabla 68 Hoja de cálculos de aforo por vadeo para sitio A18SUQUI.

Fuente: Datos recolectados en campo para tesis de pregrado EIQA/FIA/UES-2013

No	DISTANCIA (m)	PROF. OBS (m)	No. REV 0.2, 0.6	TIEMPO (s)	VELOCIDADES						VELOC LEIDA (ft/s)	VELOC PROM-L (m/s)	ANCHO TRAMO (m)	AREA PARCIAL	CAUDAL PARCIAL
					0.2		0.6		0.8						
					m	V	M	V	m	V					
1	0.50	0.12	27	40	sup	1.506	---	---	---	---		-	0.50	0.030	0.0137712
2	1.00	0.14	10	40	sup	0.569	---	---	---	---	0.236	0.072	0.50	0.065	0.0205553
3	1.50	0.37	30	40.3	---	---	0.22	1.659	---	---	1.065	0.325	0.50	0.128	0.0432940
4	2.00	0.29	41	40	---	---	0.17	2.278	---	---	0.900	0.274	0.50	0.165	0.0989950
5	2.50	0.26	52	40	---	---	0.16	2.884	---	---	1.062	0.324	0.50	0.138	0.1081647
6	3.00	0.22	67	40	sup	3.711	---	---	---	---	1.175	0.358	0.50	0.120	0.1206072
7	3.50	0.32	65	40.2	---	---	0.19	3.583	---	---	1.175	0.358	0.50	0.135	0.1500588
8	4.00	0.42	59	40.1	---	---	0.25	3.262	---	---	1.212	0.369	0.50	0.185	0.1929751
9	4.50	0.48	84	40.1	---	---	0.29	4.636	---	---	1.554	0.474	0.50	0.225	0.2708260
10	5.00	0.50	91	40	---	---	0.30	5.034	---	---	1.504	0.458	0.50	0.245	0.3610605
11	5.50	0.50	95	40	---	---	0.30	5.254	---	---	-	-	0.50	0.250	0.3919698
12	6.00	0.50	99	40	---	---	0.30	5.475	---	---	-	-	0.50	0.250	0.4087703
13	6.50	0.50	102	40	---	---	0.30	5.640	---	---	-	-	0.50	0.250	0.4234708
14	7.00	0.50	105	40	---	---	0.30	5.805	---	---	-	-	0.50	0.250	0.4360713
														<b>2.405</b>	<b>3.568188</b>

## ANEXO 2. MAPA HIDROGEOLÓGICO DE ANDA



### Leyenda Hidrogeológico

#### Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Gran Extensión y Posiblemente Alta Producción

Esta unidad la constituyen, principalmente, rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico, con ciertas intercalaciones de materiales piroclásticos. Entre las rocas volcánicas se pueden distinguir flujos y coladas de lavas que provienen de los centros de erupción volcánica. Dichos materiales pueden presentar conductividades hidráulicas de medianas a altas, como consecuencia de su porosidad secundaria (fallamiento existente).

#### Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Extensión Limitada y Productividad Media

Los materiales de esta unidad consisten en flujos y coladas de lavas (basálticas y andesíticas) que han sido eyectados de los centros de erupción volcánica pero que no han alcanzado grandes extensiones, los cuales pueden estar intercalados con materiales piroclásticos. Presentan conductividades hidráulicas medias. El espesor de estos materiales puede ser unos 10 a 20 m.

#### Unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media

Los materiales de esta unidad consisten principalmente en materiales piroclásticos aglomerados y retrabajados (pómez, lapillo, tobas), teniendo una distribución granulométrica que varía de fina a gruesa. Las conductividades hidráulicas pueden variar de medianas a bajas, como consecuencia al grado de cementación o compactación que pueden tener los granos de los materiales que la constituye. Esta unidad puede tener más de 50 m de espesor.

#### Unidad Acuíferos Locales de Extensión Limitada y de Productividad Mediana a Baja

Esta unidad está constituida, básicamente, por sedimentos aluviales (arenas, gravas, etc.) que han sido transportados por los ríos, desde la parte alta de los cerros hasta la planicie. Los materiales de esta unidad presentan una conductividad hidráulica de media a baja, la que depende de la granulometría, del grado de limpieza (contenido de limo y arcilla) y del grado de compactación que presentan los materiales. El espesor de estos materiales puede superar los 15 m.

#### Unidad Acuíferos Locales Generados por Sistemas de Fallas

Esta unidad la constituyen, principalmente, rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico, distinguiéndose flujos y coladas de lavas que provienen de procesos tectónico-volcánicos originados en la zona. Los materiales de esta unidad pueden presentar conductividades hidráulicas de mediana a bajas, como consecuencia de su porosidad secundaria (fallamiento existente), formando pequeños acuíferos locales. La manifestación de esta unidad se da por el afloramiento de manantiales que posteriormente contribuyen a la generación del caudal base de los sistemas de escorrentía superficial de la zona.

#### Unidad Rocas No Acuíferas

Los materiales de esta unidad están compuestos por flujos macizos de lavas, intercalados con tobas aglomeradas y brechosas, además de lahares cementados, presentando conductividades hidráulicas muy bajas o casi nulas, debido a su baja porosidad o a su alto grado de compactación y cementación. Se considera que constituyen el basamento de los acuíferos identificados en la zona de estudio. La profundidad a la que se encuentra esta unidad puede superar los 100 m.

#### Nivel Piezométrico

Acuífero Fisurado

Acuífero Poroso

Acuífero Confinado

Pozos Perforados

Pozos Excavados

#### Manantiales

0 l/s

1 - 9 l/s

10 - 49 l/s

50 - 175 l/s

176 - 1000 l/s

Manantiales fijos mineralizados

Manantiales termales mineralizados

Lineas de Flujo

#### Geología Falla

Cráter, caldera

Falla con componente de desplazamiento horizontal

Falla supuesta

Falla visible

Hidrogeoquímica (Diagrama de Stiff)

Límite de Acuífero

Acuífero bajo capa de cobertura

Mapa 28 Mapa Hidrogeológico ANDA

Fuente: Mapa Hidrogeológico de ANDA-COSUDE

**ANEXO 3. REPORTE DE CLASIFICACIÓN DE AGUAS DE LA BASE DE DATOS GEOQUÍMICA DEL ÁREA GEOGRÁFICA DE INTERÉS.**

Sample Date	30/04/2011		
Station	A01SUQUI		
Watertype	Ca-		
Temperature (°C)	26.10		
Conductivity	696.00	uS/cm	
Sum of Anions	4.59	meq/L	
Sum of Cations	43.04	meq/L	
Balance	80.73	%	
Total dissolved solids	1108.18	mg/L	
Total hardness	1989.52	mg/l CaCO <sub>3</sub>	
Alkalinity	166.71	mg/l CaCO <sub>3</sub>	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	41.40	1.80	1.80
K	8.88	0.227	0.227
Ca	765.00	19.09	38.18
Mg	19.19	0.79	1.58
Cl	36.54	1.03	1.03
SO <sub>4</sub>	9.00	0.09	0.19
NO <sub>3</sub>	2.03	0.03	0.03
HCO <sub>3</sub>	203.26	3.33	3.33

Sample Date	30/05/2007		
Station	A01SUQUI		
Watertype	Ca-Mg-Na-HCO <sub>3</sub>		
Temperature (°C)	24.90		
Conductivity	490.00	uS/cm	
Sum of Anions	5.17	meq/L	
Sum of Cations	7.55	meq/L	
Balance	18.66	%	
Total dissolved solids	430.02	mg/L	
Total hardness	270.06	mg/l CaCO <sub>3</sub>	
Alkalinity	145.16	mg/l CaCO <sub>3</sub>	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	32.70	1.42	1.42
K	9.01	0.230	0.230
Ca	74.50	1.86	3.72
Mg	20.40	0.84	1.68
Cl	31.77	0.90	0.90
SO <sub>4</sub>	48.00	0.50	1.00
NO <sub>3</sub>	27.20	0.35	0.35
HCO <sub>3</sub>	176.98	2.90	2.90

Sample Date	13/04/2010		
Station	A01SUQUI		
Watertype	Ca-HCO3		
Temperature (°C)	27.00		
Conductivity	464.00	uS/cm	
Sum of Anions	5.76	meq/L	
Sum of Cations	14.70	meq/L	
Balance	43.66	%	
Total dissolved solids	602.70	mg/L	
Total hardness	676.44	mg/l CaCO3	
Alkalinity	169.38	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	3.21	0.14	0.14
K	6.70	0.171	0.171
Ca	234.50	5.85	11.70
Mg	22.05	0.91	1.81
Cl	36.19	1.02	1.02
SO4	43.00	0.45	0.90
NO3	34.50	0.44	0.44
HCO3	206.52	3.38	3.38

Sample Date	11/01/2006		
Station	A01SUQUI		
Watertype	Ca-		
Temperature (°C)	23.70		
Conductivity	730.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.85	meq/L	
Sum of Cations	128.60	meq/L	
Balance	94.18	%	
Total dissolved solids	2786.77	mg/L	
Total hardness	6143.97	mg/l CaCO3	
Alkalinity	89.08	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	85.50	3.72	3.72
K	51.50	1.317	1.317
Ca	2402.50	59.95	119.89
Mg	34.97	1.44	2.88
Cl	33.92	0.96	0.96
SO4	45.00	0.47	0.94
NO3	9.40	0.12	0.12
HCO3	108.61	1.78	1.78

Sample Date	24/03/2009		
Station	A04SUQUI		
Watertype	Ca-Mg-HCO3		
Temperature (°C)	24.50		
Conductivity	388.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.98	meq/L	
Sum of Cations	7.28	meq/L	
Balance	29.25	%	
Total dissolved solids	365.10	mg/L	
Total hardness	279.61	mg/l CaCO3	
Alkalinity	118.16	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	25.70	1.12	1.12
K	12.90	0.330	0.330
Ca	82.00	2.05	4.09
Mg	18.17	0.75	1.50
Cl	16.28	0.46	0.46
SO4	43.50	0.45	0.91
NO3	17.40	0.22	0.22
HCO3	144.06	2.36	2.36

Sample Date	30/05/2007		
Station	A04SUQUI		
Watertype	Ca-Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	24.10		
Conductivity	480.00	uS/cm	
Sum of Anions	5.19	meq/L	
Sum of Cations	5.52	meq/L	
Balance	3.09	%	
Total dissolved solids	388.17	mg/L	
Total hardness	182.90	mg/l CaCO3	
Alkalinity	135.69	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	31.90	1.39	1.39
K	7.09	0.181	0.181
Ca	38.00	0.95	1.90
Mg	21.37	0.88	1.76
Cl	33.76	0.95	0.95
SO4	51.00	0.53	1.06
NO3	33.80	0.43	0.43
HCO3	165.44	2.71	2.71



Sample Date	11/01/2006		
Station	A04SUQUI		
Watertype	Ca-		
Temperature (°C)	23.50		
Conductivity	550.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.91	meq/L	
Sum of Cations	42.01	meq/L	
Balance	82.98	%	
Total dissolved solids	1052.97	mg/L	
Total hardness	1925.32	mg/l CaCO3	
Alkalinity	106.89	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	64.10	2.79	2.79
K	25.70	0.657	0.657
Ca	732.50	18.28	36.55
Mg	23.31	0.96	1.92
Cl	29.93	0.84	0.84
SO4	40.00	0.42	0.83
NO3	4.80	0.06	0.06
HCO3	130.33	2.14	2.14

Sample Date	30/04/2011		
Station	A04SUQUI		
Watertype	Ca-HCO3		
Temperature (°C)	28.20		
Conductivity	630.00	uS/cm	
Sum of Anions	4.04	meq/L	
Sum of Cations	14.13	meq/L	
Balance	55.49	%	
Total dissolved solids	495.42	mg/L	
Total hardness	578.64	mg/l CaCO3	
Alkalinity	128.37	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	40.50	1.76	1.76
K	6.47	0.165	0.165
Ca	197.50	4.93	9.86
Mg	20.74	0.85	1.71
Cl	38.77	1.09	1.09
SO4	9.00	0.09	0.19
NO3	14.00	0.18	0.18
HCO3	156.52	2.57	2.57

Sample Date	13/04/2010		
Station	A04SUQUI		
Watertype	Ca-Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	27.00		
Conductivity	423.00	uS/cm	
Sum of Anions	4.88	meq/L	
Sum of Cations	6.62	meq/L	
Balance	15.12	%	
Total dissolved solids	379.76	mg/L	
Total hardness	238.24	mg/l CaCO3	
Alkalinity	131.39	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	29.20	1.27	1.27
K	6.83	0.175	0.175
Ca	51.50	1.28	2.57
Mg	26.62	1.10	2.19
Cl	39.04	1.10	1.10
SO4	47.50	0.49	0.99
NO3	11.00	0.14	0.14
HCO3	160.20	2.63	2.63

Sample Date	12/01/2006		
Station	A23SUQUI		
Watertype	Ca-Na-Mg-HCO3		
Temperature (°C)	23.70		
Conductivity	460.00	uS/cm	
Sum of Anions	4.50	meq/L	
Sum of Cations	6.50	meq/L	
Balance	18.15	%	
Total dissolved solids	384.47	mg/L	
Total hardness	195.36	mg/l CaCO3	
Alkalinity	157.37	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	53.10	2.31	2.31
K	10.80	0.276	0.276
Ca	51.00	1.27	2.55
Mg	16.51	0.68	1.36
Cl	21.95	0.62	0.62
SO4	28.00	0.29	0.58
NO3	10.60	0.14	0.14
HCO3	191.87	3.14	3.14

Sample Date	20/03/2009		
Station	A23SUQUI		
Watertype	Mg-Na-Ca-HCO3-SO4		
Temperature (°C)	24.90		
Conductivity	366.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.69	meq/L	
Sum of Cations	4.58	meq/L	
Balance	10.67	%	
Total dissolved solids	293.35	mg/L	
Total hardness	144.95	mg/l CaCO3	
Alkalinity	101.57	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	31.50	1.37	1.37
K	11.50	0.294	0.294
Ca	26.00	0.65	1.30
Mg	19.43	0.80	1.60
Cl	17.08	0.48	0.48
SO4	43.00	0.45	0.90
NO3	20.15	0.26	0.26
HCO3	123.84	2.03	2.03

Sample Date	09/04/2010		
Station	A23SUQUI		
Watertype	Ca-		
Temperature (°C)	27.40		
Conductivity	310.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.71	meq/L	
Sum of Cations	49.18	meq/L	
Balance	85.98	%	
Total dissolved solids	1177.05	mg/L	
Total hardness	2393.30	mg/l CaCO3	
Alkalinity	93.40	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	24.30	1.06	1.06
K	10.40	0.266	0.266
Ca	925.00	23.08	46.16
Mg	20.21	0.83	1.66
Cl	24.60	0.69	0.69
SO4	47.50	0.49	0.99
NO3	10.05	0.13	0.13
HCO3	113.88	1.87	1.87

Sample Date	27/04/2011		
Station	A23SUQUI		
Watertype	Ca-HCO3		
Temperature (°C)	28.30		
Conductivity	528.00	uS/cm	
Sum of Anions	4.49	meq/L	
Sum of Cations	17.00	meq/L	
Balance	58.24	%	
Total dissolved solids	578.34	mg/L	
Total hardness	755.61	mg/l CaCO3	
Alkalinity	110.26	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	36.45	1.59	1.59
K	6.97	0.178	0.178
Ca	283.50	7.07	14.15
Mg	11.56	0.48	0.95
Cl	40.49	1.14	1.14
SO4	40.00	0.42	0.83
NO3	22.10	0.28	0.28
HCO3	134.43	2.20	2.20

Sample Date	08/08/2006		
Station	CENTRO		
Watertype	Na-Mg-Cl-SO4		
Temperature (°C)	32.00		
Conductivity	2595.00	uS/cm	
Sum of Anions	17.25	meq/L	
Sum of Cations	31.87	meq/L	
Balance	29.77	%	
Total dissolved solids	1428.07	mg/L	
Total hardness	356.23	mg/l CaCO3	
Alkalinity	135.67	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	545.00	23.71	23.71
K	40.20	1.028	1.028
Ca	14.50	0.36	0.72
Mg	77.71	3.20	6.39
Cl	307.01	8.66	8.66
SO4	270.00	2.81	5.63
NO3	4.95	0.06	0.06
HCO3	165.41	2.71	2.71

Sample Date	08/08/2006		
Station	F. TERMAL		
Watertype	Na-Mg-Cl-SO4		
Temperature (°C)	29.00		
Conductivity	2600.00	uS/cm	
Sum of Anions	17.43	meq/L	
Sum of Cations	24.68	meq/L	
Balance	17.24	%	
Total dissolved solids	1277.19	mg/L	
Total hardness	349.98	mg/l CaCO3	
Alkalinity	149.03	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	384.00	16.70	16.70
K	37.70	0.964	0.964
Ca	12.00	0.30	0.60
Mg	77.71	3.20	6.39
Cl	307.01	8.66	8.66
SO4	270.00	2.81	5.63
NO3	4.00	0.05	0.05
HCO3	181.71	2.98	2.98

Sample Date	14/09/2012		
Station	L1-CENTRO-COAT		
Watertype	Na-Mg-Cl-SO4		
Temperature (°C)	29.80		
Conductivity	1646.00	uS/cm	
Sum of Anions	16.39	meq/L	
Sum of Cations	21.87	meq/L	
Balance	14.33	%	
Total dissolved solids	1144.52	mg/L	
Total hardness	428.09	mg/l CaCO3	
Alkalinity	161.93	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	292.00	12.70	12.70
K	24.05	0.615	0.615
Ca	31.50	0.79	1.57
Mg	84.85	3.49	6.98
Cl	304.76	8.60	8.60
SO4	205.78	2.14	4.29
NO3	1.45	0.02	0.02
HCO3	197.43	3.24	3.24

Sample Date	14/09/2012		
Station	L1-CONSTITUCION		
Watertype	Na-Mg-Cl-SO4		
Temperature (°C)	29.40		
Conductivity	1618.00	uS/cm	
Sum of Anions	16.29	meq/L	
Sum of Cations	20.64	meq/L	
Balance	11.80	%	
Total dissolved solids	1114.47	mg/L	
Total hardness	421.19	mg/l CaCO3	
Alkalinity	162.12	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	267.00	11.61	11.61
K	24.03	0.615	0.615
Ca	34.00	0.85	1.70
Mg	81.66	3.36	6.72
Cl	305.79	8.63	8.63
SO4	201.03	2.09	4.19
NO3	0.90	0.01	0.01
HCO3	197.66	3.24	3.24

Sample Date	14/09/2012		
Station	L1-F-TERMAL		
Watertype	Na-Mg-Cl		
Temperature (°C)	43.00		
Conductivity	1769.00	uS/cm	
Sum of Anions	17.98	meq/L	
Sum of Cations	22.73	meq/L	
Balance	11.67	%	
Total dissolved solids	1231.65	mg/L	
Total hardness	408.13	mg/l CaCO3	
Alkalinity	177.50	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	320.38	13.94	13.94
K	25.15	0.643	0.643
Ca	46.00	1.15	2.30
Mg	71.21	2.93	5.86
Cl	363.64	10.26	10.26
SO4	183.44	1.91	3.82
NO3	1.75	0.02	0.02
HCO3	216.42	3.55	3.55

Sample Date	14/09/2012		
Station	L1-PTO-MADERO		
Watertype	Na-Mg-Cl-SO4		
Temperature (°C)	32.80		
Conductivity	1610.00	uS/cm	
Sum of Anions	16.08	meq/L	
Sum of Cations	21.73	meq/L	
Balance	14.94	%	
Total dissolved solids	1130.37	mg/L	
Total hardness	438.54	mg/l CaCO3	
Alkalinity	153.14	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	284.38	12.37	12.37
K	23.35	0.597	0.597
Ca	36.00	0.90	1.80
Mg	84.66	3.48	6.97
Cl	307.86	8.68	8.68
SO4	205.60	2.14	4.28
NO3	1.40	0.02	0.02
HCO3	186.71	3.06	3.06

Sample Date	21/09/2012		
Station	L2-CENTRO-COAT		
Watertype	Na-Mg-Cl-SO4		
Temperature (°C)	27.50		
Conductivity	1575.50	uS/cm	
Sum of Anions	16.21	meq/L	
Sum of Cations	23.97	meq/L	
Balance	19.33	%	
Total dissolved solids	1190.86	mg/L	
Total hardness	351.25	mg/l CaCO3	
Alkalinity	155.52	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	374.50	16.29	16.29
K	25.15	0.643	0.643
Ca	8.50	0.21	0.42
Mg	80.14	3.30	6.59
Cl	302.69	8.54	8.54
SO4	205.38	2.14	4.28
NO3	1.45	0.02	0.02
HCO3	189.62	3.11	3.11

Sample Date	21/09/2012		
Station	L2-CONSTITUCION		
Watertype	Na-Mg-Cl-SO4		
Temperature (°C)	27.90		
Conductivity	1580.00	uS/cm	
Sum of Anions	16.88	meq/L	
Sum of Cations	23.46	meq/L	
Balance	16.32	%	
Total dissolved solids	1217.00	mg/L	
Total hardness	352.07	mg/l CaCO3	
Alkalinity	179.52	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	362.75	15.78	15.78
K	24.60	0.629	0.629
Ca	8.50	0.21	0.42
Mg	80.34	3.31	6.61
Cl	302.69	8.54	8.54
SO4	214.38	2.23	4.47
NO3	1.55	0.02	0.02
HCO3	218.88	3.59	3.59

Sample Date	21/09/2012		
Station	L2-F-TERMAL		
Watertype	Na-Mg-Cl-HCO3		
Temperature (°C)	34.40		
Conductivity	1689.00	uS/cm	
Sum of Anions	18.79	meq/L	
Sum of Cations	25.69	meq/L	
Balance	15.52	%	
Total dissolved solids	1428.41	mg/L	
Total hardness	368.76	mg/l CaCO3	
Alkalinity	251.33	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	406.00	17.66	17.66
K	25.00	0.639	0.639
Ca	26.00	0.65	1.30
Mg	73.78	3.04	6.07
Cl	333.68	9.41	9.41
SO4	194.84	2.03	4.06
NO3	2.15	0.03	0.03
HCO3	306.43	5.02	5.02



Sample Date	21/09/2012		
Station	L2-PTO-MADERO		
Watertype	Na-Mg-Cl-SO4		
Temperature (°C)	28.80		
Conductivity	1587.50	uS/cm	
Sum of Anions	16.63	meq/L	
Sum of Cations	25.09	meq/L	
Balance	20.27	%	
Total dissolved solids	1242.16	mg/L	
Total hardness	361.16	mg/l CaCO3	
Alkalinity	173.47	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	396.00	17.23	17.23
K	24.50	0.627	0.627
Ca	14.00	0.35	0.70
Mg	79.21	3.26	6.52
Cl	301.66	8.51	8.51
SO4	208.44	2.17	4.34
NO3	2.90	0.04	0.04
HCO3	211.50	3.47	3.47

Sample Date	27/09/2012		
Station	L3-CONSTITUCION		
Watertype	Na-Mg-Cl-HCO3		
Temperature (°C)	30.10		
Conductivity	1562.00	uS/cm	
Sum of Anions	12.16	meq/L	
Sum of Cations	16.85	meq/L	
Balance	16.16	%	
Total dissolved solids	836.79	mg/L	
Total hardness	338.39	mg/l CaCO3	
Alkalinity	148.96	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	220.75	9.60	9.60
K	18.00	0.460	0.460
Ca	3.50	0.09	0.17
Mg	80.05	3.29	6.59
Cl	307.86	8.68	8.68
SO4	21.74	0.23	0.45
NO3	1.50	0.02	0.02
HCO3	181.62	2.98	2.98

Sample Date	14/03/2008		
Station	SA-01		
Watertype	Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	31.00		
Conductivity	337.00	uS/cm	
Sum of Anions	4.05	meq/L	
Sum of Cations	2.97	meq/L	
Balance	-15.49	%	
Total dissolved solids	309.44	mg/L	
Total hardness	80.30	mg/l CaCO3	
Alkalinity	124.08	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	27.56	1.20	1.20
K	6.36	0.163	0.163
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	19.50	0.80	1.60
Cl	22.72	0.64	0.64
SO4	32.28	0.34	0.67
NO3	19.86	0.25	0.25
HCO3	151.28	2.48	2.48

Sample Date	14/03/2008		
Station	SA-02		
Watertype	Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	35.00		
Conductivity	339.00	uS/cm	
Sum of Anions	4.00	meq/L	
Sum of Cations	2.73	meq/L	
Balance	-18.90	%	
Total dissolved solids	305.54	mg/L	
Total hardness	72.73	mg/l CaCO3	
Alkalinity	129.08	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	26.19	1.14	1.14
K	5.41	0.138	0.138
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	17.66	0.73	1.45
Cl	20.97	0.59	0.59
SO4	25.98	0.27	0.54
NO3	22.08	0.28	0.28
HCO3	157.38	2.58	2.58

Sample Date	14/03/2008		
Station	SA-03		
Watertype	Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	26.11		
Conductivity	335.00	uS/cm	
Sum of Anions	4.11	meq/L	
Sum of Cations	2.89	meq/L	
Balance	-17.33	%	
Total dissolved solids	310.98	mg/L	
Total hardness	75.32	mg/l CaCO3	
Alkalinity	130.58	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	28.56	1.24	1.24
K	5.69	0.146	0.146
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	18.29	0.75	1.51
Cl	20.97	0.59	0.59
SO4	25.68	0.27	0.54
NO3	28.85	0.37	0.37
HCO3	159.21	2.61	2.61

Sample Date	14/03/2008		
Station	SA-04		
Watertype	Mg-K-HCO3-Cl-SO4		
Temperature (°C)	33.33		
Conductivity	688.80	uS/cm	
Sum of Anions	7.94	meq/L	
Sum of Cations	5.46	meq/L	
Balance	-18.56	%	
Total dissolved solids	628.47	mg/L	
Total hardness	127.17	mg/l CaCO3	
Alkalinity	195.12	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	26.31	1.14	1.14
K	69.19	1.770	1.770
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	30.88	1.27	2.54
Cl	55.93	1.58	1.58
SO4	71.20	0.74	1.48
NO3	69.39	0.89	0.89
HCO3	237.90	3.90	3.90

Sample Date	09/10/2012		
Station	Sa04-12MX		
Watertype	K-Mg-HCO3-Cl		
Temperature (°C)	26.23		
Conductivity	1028.00	uS/cm	
Sum of Anions	9.92	meq/L	
Sum of Cations	8.46	meq/L	
Balance	-7.95	%	
Total dissolved solids	981.03	mg/L	
Total hardness	158.55	mg/l CaCO3	
Alkalinity	283.18	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	34.50	1.50	1.50
K	148.00	3.785	3.785
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	38.50	1.58	3.17
Cl	69.03	1.95	1.95
SO4	73.72	0.77	1.54
NO3	58.07	0.74	0.74
HCO3	345.26	5.66	5.66

Sample Date	14/03/2008		
Station	SA-05		
Watertype	Mg-Na-HCO3-Cl		
Temperature (°C)	41.11		
Conductivity	347.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.96	meq/L	
Sum of Cations	1.88	meq/L	
Balance	-35.51	%	
Total dissolved solids	335.01	mg/L	
Total hardness	47.15	mg/l CaCO3	
Alkalinity	115.07	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	16.81	0.73	0.73
K	8.20	0.210	0.210
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	11.45	0.47	0.94
Cl	31.46	0.89	0.89
SO4	20.04	0.21	0.42
NO3	25.19	0.32	0.32
HCO3	140.30	2.30	2.30

Sample Date	14/03/2008		
Station	SA-06		
Watertype	Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	48.33		
Conductivity	244.00	uS/cm	
Sum of Anions	2.89	meq/L	
Sum of Cations	1.40	meq/L	
Balance	-34.88	%	
Total dissolved solids	278.19	mg/L	
Total hardness	35.33	mg/l CaCO3	
Alkalinity	110.07	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	12.63	0.55	0.55
K	5.49	0.140	0.140
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	8.58	0.35	0.71
Cl	13.98	0.39	0.39
SO4	4.39	0.05	0.09
NO3	14.39	0.18	0.18
HCO3	134.20	2.20	2.20

Sample Date	14/03/2008		
Station	SA-07		
Watertype	Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	44.44		
Conductivity	436.00	uS/cm	
Sum of Anions	5.45	meq/L	
Sum of Cations	3.07	meq/L	
Balance	-27.90	%	
Total dissolved solids	453.44	mg/L	
Total hardness	87.43	mg/l CaCO3	
Alkalinity	240.15	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	21.69	0.94	0.94
K	8.01	0.205	0.205
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	21.23	0.87	1.75
Cl	15.73	0.44	0.44
SO4	8.87	0.09	0.18
NO3	0.00	0.00	0.00
HCO3	292.80	4.80	4.80

Sample Date	26/03/2008		
Station	SA-08		
Watertype	Na-Mg-Cl-HCO3		
Temperature (°C)	21.67		
Conductivity	480.00	uS/cm	
Sum of Anions	5.02	meq/L	
Sum of Cations	3.80	meq/L	
Balance	-13.77	%	
Total dissolved solids	379.90	mg/L	
Total hardness	73.34	mg/l CaCO3	
Alkalinity	85.05	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	49.81	2.17	2.17
K	6.64	0.170	0.170
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	17.81	0.73	1.47
Cl	87.38	2.46	2.46
SO4	24.84	0.26	0.52
NO3	20.97	0.27	0.27
HCO3	103.70	1.70	1.70

Sample Date	26/03/2008		
Station	SA-09		
Watertype	Na-Mg-HCO3-NO3-SO4		
Temperature (°C)	20.56		
Conductivity	348.00	uS/cm	
Sum of Anions	4.55	meq/L	
Sum of Cations	1.88	meq/L	
Balance	-41.62	%	
Total dissolved solids	375.55	mg/L	
Total hardness	41.72	mg/l CaCO3	
Alkalinity	110.07	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	19.56	0.85	0.85
K	7.56	0.193	0.193
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	10.13	0.42	0.83
Cl	20.97	0.59	0.59
SO4	33.84	0.35	0.71
NO3	81.87	1.05	1.05
HCO3	134.20	2.20	2.20

Sample Date	26/03/2008		
Station	SA-10		
Watertype	Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	18.90		
Conductivity	305.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.68	meq/L	
Sum of Cations	2.41	meq/L	
Balance	-20.79	%	
Total dissolved solids	319.15	mg/L	
Total hardness	77.38	mg/l CaCO3	
Alkalinity	121.07	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	16.19	0.70	0.70
K	6.40	0.164	0.164
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	18.79	0.77	1.55
Cl	17.48	0.49	0.49
SO4	23.88	0.25	0.50
NO3	19.42	0.25	0.25
HCO3	147.62	2.42	2.42

Sample Date	26/03/2008		
Station	SA-11		
Watertype	Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	21.70		
Conductivity	295.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.41	meq/L	
Sum of Cations	2.17	meq/L	
Balance	-22.36	%	
Total dissolved solids	306.99	mg/L	
Total hardness	59.67	mg/l CaCO3	
Alkalinity	103.06	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	18.56	0.81	0.81
K	6.52	0.167	0.167
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	14.49	0.60	1.19
Cl	16.60	0.47	0.47
SO4	12.96	0.14	0.27
NO3	35.14	0.45	0.45
HCO3	125.66	2.06	2.06

Sample Date	26/03/2008		
Station	SA-12		
Watertype	Na-Mg-HCO3-Cl		
Temperature (°C)	23.30		
Conductivity	376.00	uS/cm	
Sum of Anions	4.38	meq/L	
Sum of Cations	3.06	meq/L	
Balance	-17.73	%	
Total dissolved solids	372.20	mg/L	
Total hardness	52.01	mg/l CaCO3	
Alkalinity	130.08	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	39.25	1.71	1.71
K	12.40	0.317	0.317
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	12.63	0.52	1.04
Cl	45.44	1.28	1.28
SO4	15.54	0.16	0.32
NO3	5.73	0.07	0.07
HCO3	158.60	2.60	2.60

Sample Date	26/03/2008		
Station	SA-13		
Watertype	Mg-Na-HCO3-SO4		
Temperature (°C)	24.40		
Conductivity	333.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.90	meq/L	
Sum of Cations	2.56	meq/L	
Balance	-20.70	%	
Total dissolved solids	324.59	mg/L	
Total hardness	80.96	mg/l CaCO3	
Alkalinity	111.07	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	17.56	0.76	0.76
K	7.02	0.180	0.180
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	19.66	0.81	1.62
Cl	20.97	0.59	0.59
SO4	38.04	0.40	0.79
NO3	19.95	0.26	0.26
HCO3	135.42	2.22	2.22



Sample Date	26/03/2008		
Station	SA-14		
Watertype	Mg-Na-HCO3-SO4		
Temperature (°C)	28.30		
Conductivity	313.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.83	meq/L	
Sum of Cations	2.35	meq/L	
Balance	-23.92	%	
Total dissolved solids	324.05	mg/L	
Total hardness	76.84	mg/l CaCO3	
Alkalinity	120.07	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	14.88	0.65	0.65
K	6.65	0.170	0.170
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	18.66	0.77	1.54
Cl	16.60	0.47	0.47
SO4	33.54	0.35	0.70
NO3	19.78	0.25	0.25
HCO3	146.40	2.40	2.40

Sample Date	27/03/2008		
Station	SA-15		
Watertype	Mg-Na-HCO3-SO4		
Temperature (°C)	30.60		
Conductivity	266.00	uS/cm	
Sum of Anions	2.82	meq/L	
Sum of Cations	1.38	meq/L	
Balance	-34.40	%	
Total dissolved solids	269.53	mg/L	
Total hardness	36.24	mg/l CaCO3	
Alkalinity	82.05	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	11.13	0.48	0.48
K	6.62	0.169	0.169
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	8.80	0.36	0.72
Cl	10.49	0.30	0.30
SO4	26.10	0.27	0.54
NO3	25.47	0.33	0.33
HCO3	100.04	1.64	1.64

Sample Date	27/03/2008		
Station	SA-16		
Watertype	Na-Mg-HCO3		
Temperature (°C)	26.11		
Conductivity	169.90	uS/cm	
Sum of Anions	1.84	meq/L	
Sum of Cations	0.94	meq/L	
Balance	-32.27	%	
Total dissolved solids	211.38	mg/L	
Total hardness	18.78	mg/l CaCO3	
Alkalinity	71.04	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	10.81	0.47	0.47
K	3.79	0.097	0.097
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	4.56	0.19	0.38
Cl	6.99	0.20	0.20
SO4	9.36	0.10	0.20
NO3	1.36	0.02	0.02
HCO3	86.62	1.42	1.42

Sample Date	27/03/2008		
Station	SA-17		
Watertype	Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	23.90		
Conductivity	233.00	uS/cm	
Sum of Anions	2.60	meq/L	
Sum of Cations	1.60	meq/L	
Balance	-23.69	%	
Total dissolved solids	248.19	mg/L	
Total hardness	47.40	mg/l CaCO3	
Alkalinity	86.05	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	12.19	0.53	0.53
K	4.86	0.124	0.124
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	11.51	0.47	0.95
Cl	8.74	0.25	0.25
SO4	19.80	0.21	0.41
NO3	16.02	0.21	0.21
HCO3	104.92	1.72	1.72

Sample Date	27/03/2008		
Station	SA-18		
Watertype	Mg-HCO3-Cl		
Temperature (°C)	23.90		
Conductivity	474.00	uS/cm	
Sum of Anions	5.45	meq/L	
Sum of Cations	2.37	meq/L	
Balance	-39.42	%	
Total dissolved solids	416.42	mg/L	
Total hardness	74.78	mg/l CaCO3	
Alkalinity	200.12	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	15.94	0.69	0.69
K	7.01	0.179	0.179
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	18.16	0.75	1.49
Cl	31.46	0.89	0.89
SO4	22.80	0.24	0.48
NO3	4.89	0.06	0.06
HCO3	244.00	4.00	4.00

Sample Date	09/10/2012		
Station	Sa18MX-12		
Watertype	Mg-Na-HCO3-Cl		
Temperature (°C)	26.86		
Conductivity	595.00	uS/cm	
Sum of Anions	7.09	meq/L	
Sum of Cations	4.94	meq/L	
Balance	-17.92	%	
Total dissolved solids	708.87	mg/L	
Total hardness	138.22	mg/l CaCO3	
Alkalinity	237.15	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	33.50	1.46	1.46
K	26.90	0.688	0.688
Ca	10.00	0.25	0.50
Mg	27.50	1.13	2.26
Cl	49.81	1.40	1.40
SO4	27.67	0.29	0.58
NO3	26.69	0.34	0.34
HCO3	289.14	4.74	4.74

Sample Date	27/03/2008		
Station	SA-19		
Watertype	Mg-HCO3		
Temperature (°C)	34.44		
Conductivity	620.00	uS/cm	
Sum of Anions	7.84	meq/L	
Sum of Cations	2.93	meq/L	
Balance	-45.63	%	
Total dissolved solids	571.43	mg/L	
Total hardness	103.73	mg/l CaCO3	
Alkalinity	345.21	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	16.38	0.71	0.71
K	5.54	0.142	0.142
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	25.19	1.04	2.07
Cl	20.97	0.59	0.59
SO4	12.66	0.13	0.26
NO3	5.42	0.07	0.07
HCO3	420.90	6.90	6.90

Sample Date	27/03/2008		
Station	SA-20		
Watertype	Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	31.70		
Conductivity	262.00	uS/cm	
Sum of Anions	2.84	meq/L	
Sum of Cations	1.45	meq/L	
Balance	-32.23	%	
Total dissolved solids	269.77	mg/L	
Total hardness	37.10	mg/l CaCO3	
Alkalinity	101.06	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	11.31	0.49	0.49
K	8.62	0.220	0.220
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	9.01	0.37	0.74
Cl	8.74	0.25	0.25
SO4	19.26	0.20	0.40
NO3	13.24	0.17	0.17
HCO3	123.22	2.02	2.02

Sample Date	31/03/2008		
Station	SA-21		
Watertype	Mg-HCO3		
Temperature (°C)	40.60		
Conductivity	577.00	uS/cm	
Sum of Anions	7.29	meq/L	
Sum of Cations	3.31	meq/L	
Balance	-37.54	%	
Total dissolved solids	552.57	mg/L	
Total hardness	100.32	mg/l CaCO3	
Alkalinity	265.66	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	14.88	0.65	0.65
K	25.30	0.647	0.647
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	24.36	1.00	2.00
Cl	26.22	0.74	0.74
SO4	27.48	0.29	0.57
NO3	50.94	0.65	0.65
HCO3	323.91	5.31	5.31

Sample Date	31/03/2008		
Station	SA-22		
Watertype	Mg-HCO3		
Temperature (°C)	41.70		
Conductivity	392.00	uS/cm	
Sum of Anions	4.88	meq/L	
Sum of Cations	2.34	meq/L	
Balance	-35.06	%	
Total dissolved solids	386.00	mg/L	
Total hardness	72.64	mg/l CaCO3	
Alkalinity	164.60	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	13.94	0.61	0.61
K	11.18	0.286	0.286
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	17.64	0.73	1.45
Cl	22.72	0.64	0.64
SO4	28.56	0.30	0.60
NO3	26.07	0.33	0.33
HCO3	200.69	3.29	3.29

Sample Date	31/03/2008		
Station	SA-23		
Watertype	Na-Mg-HCO3		
Temperature (°C)	51.11		
Conductivity	247.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.18	meq/L	
Sum of Cations	1.38	meq/L	
Balance	-39.57	%	
Total dissolved solids	271.24	mg/L	
Total hardness	29.77	mg/l CaCO3	
Alkalinity	120.57	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	15.00	0.65	0.65
K	5.04	0.129	0.129
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	7.23	0.30	0.59
Cl	10.49	0.30	0.30
SO4	12.66	0.13	0.26
NO3	15.49	0.20	0.20
HCO3	147.01	2.41	2.41

Sample Date	09/04/2008		
Station	SA-24		
Watertype	Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	28.33		
Conductivity	305.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.51	meq/L	
Sum of Cations	1.87	meq/L	
Balance	-30.50	%	
Total dissolved solids	307.90	mg/L	
Total hardness	44.68	mg/l CaCO3	
Alkalinity	123.58	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	18.44	0.80	0.80
K	6.84	0.175	0.175
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	10.85	0.45	0.89
Cl	13.98	0.39	0.39
SO4	18.42	0.19	0.38
NO3	20.09	0.26	0.26
HCO3	150.67	2.47	2.47

Sample Date	09/04/2008		
Station	SA-25		
Watertype	Na-HCO3		
Temperature (°C)	29.44		
Conductivity	159.70	uS/cm	
Sum of Anions	1.53	meq/L	
Sum of Cations	1.63	meq/L	
Balance	3.07	%	
Total dissolved solids	200.53	mg/L	
Total hardness	9.47	mg/l CaCO3	
Alkalinity	66.54	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	31.31	1.36	1.36
K	2.99	0.076	0.076
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	2.30	0.09	0.19
Cl	5.24	0.15	0.15
SO4	2.04	0.02	0.04
NO3	0.15	0.00	0.00
HCO3	81.13	1.33	1.33

Sample Date	05/09/2005		
Station	SAN-01		
Watertype	Na-Mg-HCO3-Cl		
Temperature (°C)	26.90		
Conductivity	746.00	uS/cm	
Sum of Anions	7.86	meq/L	
Sum of Cations	7.06	meq/L	
Balance	-5.31	%	
Total dissolved solids	780.53	mg/L	
Total hardness	116.01	mg/l CaCO3	
Alkalinity	198.56	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	100.00	4.35	4.35
K	14.90	0.381	0.381
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	28.17	1.16	2.32
Cl	81.64	2.30	2.30
SO4	32.50	0.34	0.68
NO3	71.00	0.91	0.91
HCO3	242.09	3.97	3.97

Sample Date	20/06/2005		
Station	SAN-01		
Watertype	Mg-Na-HCO3-Cl		
Temperature (°C)	26.00		
Conductivity	910.00	uS/cm	
Sum of Anions	7.91	meq/L	
Sum of Cations	4.14	meq/L	
Balance	-31.32	%	
Total dissolved solids	711.30	mg/L	
Total hardness	130.01	mg/l CaCO3	
Alkalinity	191.34	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	35.10	1.53	1.53
K	0.00	0.000	0.000
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	31.57	1.30	2.60
Cl	77.85	2.20	2.20
SO4	37.00	0.39	0.77
NO3	87.30	1.12	1.12
HCO3	233.29	3.82	3.82

Sample Date	21/07/2006		
Station	SAN-01		
Watertype	Na-Mg-HCO3-Cl-SO4		
Temperature (°C)	26.90		
Conductivity	582.00	uS/cm	
Sum of Anions	7.98	meq/L	
Sum of Cations	7.09	meq/L	
Balance	-5.93	%	
Total dissolved solids	826.17	mg/L	
Total hardness	92.00	mg/l CaCO3	
Alkalinity	176.06	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	112.00	4.87	4.87
K	14.50	0.371	0.371
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	22.34	0.92	1.84
Cl	88.42	2.49	2.49
SO4	80.00	0.83	1.67
NO3	22.34	0.29	0.29
HCO3	214.66	3.52	3.52



Sample Date	23/03/2012		
Station	SAN-01		
Watertype	Mg-Na-HCO3-SO4		
Temperature (°C)	26.10		
Conductivity	701.00	uS/cm	
Sum of Anions	5.98	meq/L	
Sum of Cations	3.17	meq/L	
Balance	-30.73	%	
Total dissolved solids	561.44	mg/L	
Total hardness	84.01	mg/l CaCO3	
Alkalinity	172.37	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	29.40	1.28	1.28
K	7.90	0.202	0.202
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	20.40	0.84	1.68
Cl	14.04	0.40	0.40
SO4	95.23	0.99	1.98
NO3	11.09	0.14	0.14
HCO3	210.16	3.44	3.44

Sample Date	23/03/2012		
Station	SAN-02		
Watertype	Mg-Na-HCO3-SO4		
Temperature (°C)	29.10		
Conductivity	595.00	uS/cm	
Sum of Anions	4.84	meq/L	
Sum of Cations	3.14	meq/L	
Balance	-21.36	%	
Total dissolved solids	507.82	mg/L	
Total hardness	98.63	mg/l CaCO3	
Alkalinity	147.64	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	23.00	1.00	1.00
K	6.17	0.158	0.158
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	23.95	0.99	1.97
Cl	26.44	0.75	0.75
SO4	40.15	0.42	0.84
NO3	23.06	0.30	0.30
HCO3	180.01	2.95	2.95

Sample Date	21/07/2006		
Station	SAN-02		
Watertype	Na-Mg-HCO3		
Temperature (°C)	26.30		
Conductivity	361.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.98	meq/L	
Sum of Cations	5.90	meq/L	
Balance	19.49	%	
Total dissolved solids	655.01	mg/L	
Total hardness	67.99	mg/l CaCO3	
Alkalinity	122.48	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	97.80	4.25	4.25
K	10.80	0.276	0.276
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	16.51	0.68	1.36
Cl	23.16	0.65	0.65
SO4	31.00	0.32	0.65
NO3	16.51	0.21	0.21
HCO3	149.33	2.45	2.45

Sample Date	20/06/2005		
Station	SAN-02		
Watertype	Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	26.90		
Conductivity	390.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.47	meq/L	
Sum of Cations	2.12	meq/L	
Balance	-24.14	%	
Total dissolved solids	472.32	mg/L	
Total hardness	62.02	mg/l CaCO3	
Alkalinity	114.43	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	20.00	0.87	0.87
K	0.00	0.000	0.000
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	15.06	0.62	1.24
Cl	15.97	0.45	0.45
SO4	20.50	0.21	0.43
NO3	24.20	0.31	0.31
HCO3	139.52	2.29	2.29

Sample Date	05/09/2005		
Station	SAN-02		
Watertype	Na-Mg-HCO3		
Temperature (°C)	27.30		
Conductivity	323.00	uS/cm	
Sum of Anions	3.47	meq/L	
Sum of Cations	3.90	meq/L	
Balance	5.92	%	
Total dissolved solids	508.61	mg/L	
Total hardness	60.00	mg/l CaCO3	
Alkalinity	105.48	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	57.80	2.51	2.51
K	6.95	0.178	0.178
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	14.57	0.60	1.20
Cl	17.92	0.51	0.51
SO4	23.00	0.24	0.48
NO3	29.10	0.37	0.37
HCO3	128.61	2.11	2.11

Sample Date	23/03/2012		
Station	SAN-04		
Watertype	Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	28.10		
Conductivity	323.00	uS/cm	
Sum of Anions	2.70	meq/L	
Sum of Cations	1.59	meq/L	
Balance	-25.67	%	
Total dissolved solids	386.77	mg/L	
Total hardness	48.59	mg/l CaCO3	
Alkalinity	107.71	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	12.50	0.54	0.54
K	2.70	0.069	0.069
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	11.80	0.49	0.97
Cl	2.81	0.08	0.08
SO4	15.52	0.16	0.32
NO3	10.37	0.13	0.13
HCO3	131.33	2.15	2.15

Sample Date	20/06/2005		
Station	SAN-04		
Watertype	Mg-Na-HCO3		
Temperature (°C)	26.90		
Conductivity	300.00	uS/cm	
Sum of Anions	2.61	meq/L	
Sum of Cations	1.74	meq/L	
Balance	-20.15	%	
Total dissolved solids	426.56	mg/L	
Total hardness	48.02	mg/l CaCO3	
Alkalinity	101.30	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	17.60	0.77	0.77
K	0.00	0.000	0.000
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	11.66	0.48	0.96
Cl	2.00	0.06	0.06
SO4	13.00	0.14	0.27
NO3	20.40	0.26	0.26
HCO3	123.51	2.02	2.02

Sample Date	05/09/2005		
Station	SAN-04		
Watertype	Mg-HCO3		
Temperature (°C)	27.30		
Conductivity	217.00	uS/cm	
Sum of Anions	2.47	meq/L	
Sum of Cations	1.13	meq/L	
Balance	-37.19	%	
Total dissolved solids	386.55	mg/L	
Total hardness	38.01	mg/l CaCO3	
Alkalinity	89.97	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	5.57	0.24	0.24
K	4.70	0.120	0.120
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	9.23	0.38	0.76
Cl	3.98	0.11	0.11
SO4	14.50	0.15	0.30
NO3	20.20	0.26	0.26
HCO3	109.70	1.80	1.80

Sample Date	21/07/2006		
Station	SAN-08		
Watertype	Na-Mg-HCO3-Cl-SO4		
Temperature (°C)	26.40		
Conductivity	581.00	uS/cm	
Sum of Anions	8.16	meq/L	
Sum of Cations	5.89	meq/L	
Balance	-16.18	%	
Total dissolved solids	785.25	mg/L	
Total hardness	80.01	mg/l CaCO3	
Alkalinity	199.02	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	93.50	4.07	4.07
K	8.13	0.208	0.208
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	19.43	0.80	1.60
Cl	80.00	2.26	2.26
SO4	80.00	0.83	1.67
NO3	19.43	0.25	0.25
HCO3	242.66	3.98	3.98

Sample Date	17/02/2005		
Station	SAN-08		
Watertype	Mg-HCO3		
Temperature (°C)	24.70		
Conductivity	430.00	uS/cm	
Sum of Anions	4.00	meq/L	
Sum of Cations	1.79	meq/L	
Balance	-38.11	%	
Total dissolved solids	256.76	mg/L	
Total hardness	80.01	mg/l CaCO3	
Alkalinity	159.26	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	0.00	0.00	0.00
K	6.91	0.177	0.177
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	19.43	0.80	1.60
Cl	13.90	0.39	0.39
SO4	18.50	0.19	0.39
NO3	3.50	0.04	0.04
HCO3	194.18	3.18	3.18

Sample Date	21/07/2006		
Station	SAN-09		
Watertype	Na-Mg-HCO3-SO4-Cl		
Temperature (°C)	24.90		
Conductivity	572.00	uS/cm	
Sum of Anions	6.58	meq/L	
Sum of Cations	6.01	meq/L	
Balance	-4.51	%	
Total dissolved solids	742.76	mg/L	
Total hardness	72.03	mg/l CaCO3	
Alkalinity	168.41	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	95.60	4.16	4.16
K	15.60	0.399	0.399
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	17.49	0.72	1.44
Cl	52.63	1.48	1.48
SO4	71.50	0.74	1.49
NO3	17.49	0.22	0.22
HCO3	205.33	3.37	3.37

Sample Date	17/02/2005		
Station	SAN-09		
Watertype	Mg-HCO3-Cl		
Temperature (°C)	24.20		
Conductivity	800.00	uS/cm	
Sum of Anions	7.21	meq/L	
Sum of Cations	2.89	meq/L	
Balance	-42.77	%	
Total dissolved solids	432.12	mg/L	
Total hardness	122.02	mg/l CaCO3	
Alkalinity	221.20	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	0.00	0.00	0.00
K	17.10	0.437	0.437
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	29.63	1.22	2.44
Cl	64.53	1.82	1.82
SO4	39.50	0.41	0.82
NO3	11.40	0.15	0.15
HCO3	269.70	4.42	4.42

Sample Date	20/06/2005		
Station	SAN-09		
Watertype	Mg-Na-HCO3-Cl		
Temperature (°C)	24.30		
Conductivity	850.00	uS/cm	
Sum of Anions	8.30	meq/L	
Sum of Cations	4.08	meq/L	
Balance	-34.13	%	
Total dissolved solids	732.00	mg/L	
Total hardness	124.00	mg/l CaCO3	
Alkalinity	270.13	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	36.50	1.59	1.59
K	0.00	0.000	0.000
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	30.11	1.24	2.48
Cl	61.88	1.75	1.75
SO4	37.50	0.39	0.78
NO3	29.30	0.38	0.38
HCO3	329.35	5.40	5.40

Sample Date	05/09/2005		
Station	SAN-09		
Watertype	Mg-HCO3-Cl		
Temperature (°C)	25.20		
Conductivity	649.00	uS/cm	
Sum of Anions	7.34	meq/L	
Sum of Cations	2.62	meq/L	
Balance	-47.42	%	
Total dissolved solids	673.87	mg/L	
Total hardness	92.00	mg/l CaCO3	
Alkalinity	237.34	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	6.77	0.29	0.29
K	18.50	0.473	0.473
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	22.34	0.92	1.84
Cl	51.77	1.46	1.46
SO4	36.00	0.38	0.75
NO3	30.30	0.39	0.39
HCO3	289.37	4.74	4.74

Sample Date	23/03/2012		
Station	SAN-09		
Watertype	Mg-Na-HCO3-Cl		
Temperature (°C)	23.10		
Conductivity	787.00	uS/cm	
Sum of Anions	7.14	meq/L	
Sum of Cations	3.75	meq/L	
Balance	-31.15	%	
Total dissolved solids	647.07	mg/L	
Total hardness	97.39	mg/l CaCO3	
Alkalinity	228.79	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	37.60	1.64	1.64
K	6.17	0.158	0.158
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	23.65	0.97	1.95
Cl	44.69	1.26	1.26
SO4	48.49	0.51	1.01
NO3	22.58	0.29	0.29
HCO3	278.95	4.57	4.57

Sample Date	23/03/2012		
Station	SAN-09		
Watertype	Mg-Na-HCO3-Cl		
Temperature (°C)	23.10		
Conductivity	787.00	uS/cm	
Sum of Anions	7.14	meq/L	
Sum of Cations	3.75	meq/L	
Balance	-31.15	%	
Total dissolved solids	647.07	mg/L	
Total hardness	97.39	mg/l CaCO3	
Alkalinity	228.79	mg/l CaCO3	
Major ion composition	mg/l	mmol/l	meq/l
Na	37.60	1.64	1.64
K	6.17	0.158	0.158
Ca	0.00	0.00	0.00
Mg	23.65	0.97	1.95
Cl	44.69	1.26	1.26
SO4	48.49	0.51	1.01
NO3	22.58	0.29	0.29
HCO3	278.95	4.57	4.57



## ANEXO 4. REPORTE DE ESPECIACIÓN QUÍMICA: ALCALINIDAD

MINEQL+ Ver 4.6

### ALKALINITY SUMMARY REPORT

---

This report tabulates pH and alkalinity for each solution sample in a MINEQL data object. The report will only work correctly if the calculation was run using the default thermodynamic database for MINEQL+. New species that you may have added will not effect the alkalinity calculation.

Alkalinity can have different definitions. This report focuses on the main sources of alklinity in natural waters, namely: proton, carbonate, phosphate, and borate. Each form of alkalinity is defined below:

Type	Equation
Proton	$[\text{OH}(-)] - [\text{H}(+)]$
Carbonate	$[\text{HCO}_3(-)] + 2[\text{CO}_3(2-)]$
Phosphate	$[\text{HPO}_4(2-)] + 2[\text{PO}_4(3-)] - [\text{H}_3\text{PO}_4]$
Borate	$[\text{B}(\text{OH})_4(-)]$

Total alkalinity is the sum of all alkalinity types. The brackets used in the above equations refer to molar concentration.

Sampl	pH	Proton	Carbonate	Phosphate	Borate	Total
1	7.500	2.864E-07	4.824E-01	4.490E-06	1.170E-07	4.824E-01
2	7.240	1.175E-07	2.644E-01	3.170E-06	8.320E-08	2.644E-01
3	7.320	1.621E-07	3.186E-01	3.460E-06	1.200E-20	3.186E-01
4	7.810	6.345E-07	9.879E-01	1.400E-05	3.380E-06	9.880E-01
5	6.830	-7.990E-08	1.031E-01	3.160E-07	1.190E-07	1.031E-01
6	6.770	-1.107E-07	8.955E-02	3.200E-07	7.570E-08	8.955E-02
7	7.320	1.621E-07	3.186E-01	5.080E-19	2.440E-07	3.186E-01
8	7.160	7.680E-08	2.203E-01	2.870E-06	5.470E-07	2.203E-01
9	7.130	6.190E-08	2.053E-01	2.990E-06	7.190E-08	2.053E-01
10	7.340	1.743E-07	3.337E-01	3.040E-06	2.780E-07	3.337E-01
11	7.340	1.743E-07	3.337E-01	2.220E-06	2.090E-06	3.337E-01
12	7.560	3.385E-07	5.539E-01	2.500E-06	2.200E-06	5.539E-01
13	7.300	1.509E-07	3.036E-01	3.550E-06	4.450E-07	3.036E-01
14	7.670	4.496E-07	7.141E-01	4.910E-06	3.180E-07	7.141E-01
15	6.970	-1.300E-08	1.421E-01	6.550E-07	9.480E-08	1.421E-01
16	7.090	4.270E-08	1.872E-01	1.600E-06	8.530E-08	1.872E-01
17	7.570	3.471E-07	5.670E-01	3.820E-06	2.540E-07	5.670E-01
18	7.320	1.621E-07	3.186E-01	9.600E-07	2.880E-07	3.186E-01
19	7.100	4.760E-08	1.912E-01	2.090E-06	1.210E-07	1.912E-01
20	6.660	-1.730E-07	6.953E-02	1.980E-07	2.650E-21	6.953E-02
21	6.880	-5.560E-08	1.151E-01	2.580E-07	7.710E-08	1.151E-01
22	6.690	-1.547E-07	7.453E-02	1.320E-06	4.720E-08	7.454E-02
23	7.180	8.590E-08	2.303E-01	4.380E-07	1.050E-07	2.303E-01
24	6.860	-6.510E-08	1.101E-01	4.550E-07	2.710E-08	1.101E-01
25	7.870	7.325E-07	1.138E+00	2.050E-06	3.820E-07	1.138E+00
26	-0.000	-1.000E+00	1.520E-08	-9.930E-19	5.810E-28	-1.000E+00
27	-0.000	-1.000E+00	1.520E-08	-9.930E-19	5.810E-28	-1.000E+00
28	-0.000	-1.000E+00	1.520E-08	-9.930E-19	5.810E-28	-1.000E+00

29 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
30 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
31 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
32 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
33 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
34 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
35 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
36 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
37 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
38 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
39 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
40 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
41 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
42 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
43 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
44 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
45 7.480 2.709E-07 4.603E-01 3.660E-06 1.720E-20 4.603E-01  
46 6.600 -2.109E-07 6.052E-02 2.270E-06 2.310E-21 6.052E-02  
47 6.240 -5.575E-07 2.640E-02 6.485E-07 1.010E-21 2.640E-02  
48 6.640 -1.850E-07 6.643E-02 1.430E-06 2.530E-21 6.643E-02  
49 6.680 -1.608E-07 7.283E-02 4.460E-07 2.770E-21 7.283E-02  
50 6.710 -1.434E-07 7.804E-02 2.060E-06 2.970E-21 7.804E-02  
51 6.900 -4.600E-08 1.211E-01 1.920E-06 4.590E-21 1.211E-01  
52 6.580 -2.247E-07 5.782E-02 1.070E-06 2.200E-21 5.782E-02  
53 7.160 7.680E-08 2.203E-01 4.260E-19 8.320E-21 2.203E-01  
54 6.470 -3.093E-07 4.491E-02 1.300E-19 1.710E-21 4.491E-02  
55 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
56 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.920E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
57 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.920E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
58 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
59 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.920E-19 5.810E-28 -1.000E+00

60 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
61 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.930E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
62 -0.000 -1.000E+00 1.520E-08 -9.920E-19 5.810E-28 -1.000E+00  
63 6.860 -6.510E-08 1.101E-01 1.710E-05 3.950E-08 1.101E-01  
64 6.550 -2.463E-07 5.402E-02 1.210E-06 3.350E-08 5.402E-02  
65 7.160 7.680E-08 2.203E-01 3.270E-06 1.160E-07 2.203E-01  
66 5.440 -3.627E-06 4.190E-03 4.097E-07 1.480E-09 4.187E-03  
67 7.580 3.567E-07 5.801E-01 2.000E-05 2.160E-20 5.801E-01  
68 7.030 1.470E-08 1.632E-01 3.070E-05 6.180E-21 1.632E-01  
69 6.700 -1.495E-07 7.624E-02 1.090E-05 2.900E-21 7.625E-02  
70 6.890 -5.080E-08 1.181E-01 2.310E-05 4.490E-21 1.181E-01  
71 6.140 -7.101E-07 2.100E-02 9.169E-08 8.010E-22 2.100E-02  
72 8.080 1.202E-06 1.851E+00 1.590E-05 6.530E-20 1.851E+00  
73 7.000 1.000E-09 1.521E-01 1.130E-05 5.770E-21 1.522E-01  
74 6.830 -7.990E-08 1.031E-01 7.380E-06 3.910E-21 1.031E-01  
75 6.950 -2.230E-08 1.361E-01 1.480E-05 5.150E-21 1.361E-01  
76 7.790 6.048E-07 9.434E-01 1.950E-05 3.460E-20 9.434E-01  
77 7.770 5.760E-07 8.999E-01 1.690E-05 3.310E-20 9.000E-01  
78 6.990 -3.600E-09 1.491E-01 5.760E-06 5.640E-21 1.491E-01  
79 6.810 -9.000E-08 9.826E-02 4.840E-06 3.740E-21 9.826E-02  
80 9.000 1.010E-05 1.663E+01 5.985E-06 9.170E-05 1.663E+01  
81 9.100 1.270E-05 2.136E+01 3.193E-06 9.370E-05 2.136E+01  
82 8.800 6.348E-06 1.016E+01 7.114E-06 8.920E-05 1.016E+01  
83 9.100 1.270E-05 2.136E+01 2.212E-06 1.560E-05 2.136E+01  
84 9.100 1.270E-05 2.136E+01 2.002E-06 1.110E-04 2.136E+01  
85 9.100 1.270E-05 2.136E+01 3.344E-06 1.130E-04 2.136E+01  
86 8.600 4.007E-06 6.276E+00 4.051E-06 5.030E-05 6.276E+00  
87 9.100 1.270E-05 2.136E+01 5.135E-07 1.170E-04 2.136E+01  
88 8.220 1.664E-06 2.559E+00 4.861E-07 2.600E-06 2.559E+00  
89 7.020 9.500E-09 1.592E-01 6.020E-08 6.710E-07 1.592E-01  
90 6.830 -7.990E-08 1.031E-01 6.750E-08 7.410E-07 1.031E-01

## ANEXO 5: FOTOGRAFÍAS EN CAMPAÑAS DE MUESTREO



Medición de niveles piezométricos en pozos



Preservación de parámetros de campo en pozos

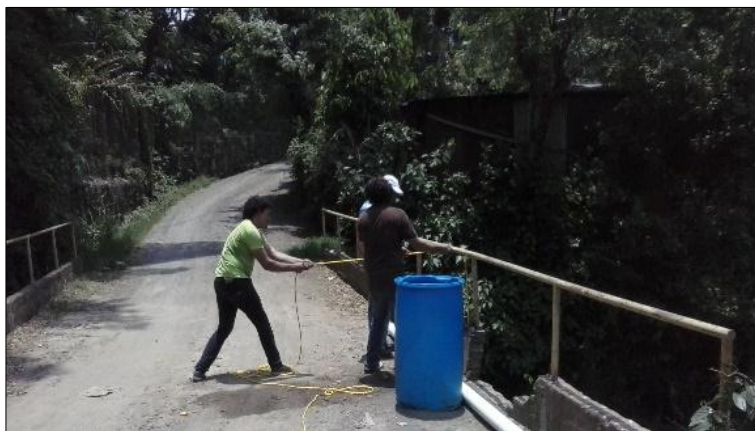




Medición de parámetros fisicoquímicos de pozos en campo



Bombeo de pozo para toma de muestras de agua.



Punto de inyección en la técnica de trazadores



Punto detector en estudio de dispersión, utilizando sal común como trazador



Muestreo y aforo en Sitio A01SUQUI



Medición de parámetros fisicoquímicos en sitio A01SUQUI





Muestreo y aforo en Sitio A02VERTI



Sitio A03SUQUI



Actividades de limpieza en sitio A04APANT





Aforo en sitio A04APANT



Aforo en sitio A08SUQUI



Medición de parámetros fisicoquímicos en sitio A08SUQUI



Medición de parámetros fisicoquímicos en sitio A08SUQUI



Aforo en sitio A09MOLIN



Aforo en sitio A10SUQUI





Evaluación para selección de sitio A11ZARCO



Evaluación para selección de sitio A13SUQUI



Evaluación para selección de sitio A17GUILGUAYO



Manantial utilizado con fines recreativos.



Manantial del acuífero de Santa Ana



Toma de muestras de agua en Lago de Coatepeque



Muestreo de agua en Lago de Coatepeque.