



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO  
AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO  
AMBIENTE**

**TEMA: MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA Y CONTROL DE  
CALIDAD DE FUENTES DE AGUA DE ORIGEN GEOTÉRMICO  
MEDIANTE EL SOFTWARE LIBRE HIDROGEOQUIM**

**AUTOR: HIDALGO HIDALGO ALEXANDER MARCELO**

**TUTOR: ING. CARRERA DAVID. PH. D.**

**SANGOLQUÍ**

**2016**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “**MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA Y CONTROL DE CALIDAD DE FUENTES DE AGUA DE ORIGEN GEOTÉRMICO MEDIANTE EL SOFTWARE LIBRE HIDROGEOQUIM**” realizado por el señor **HIDALGO HIDALGO ALEXANDER MARCELO**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **HIDALGO HIDALGO ALEXANDER MARCELO** para que lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 20 de mayo del 2016**

**Atentamente,**

Ing. David Carrera V., Ph. D.

**TUTOR**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **HIDALGO HIDALGO ALEXANDER MARCELO**, con cédula de identidad N° 1722823778, declaro que este trabajo de Titulación “**MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA Y CONTROL DE CALIDAD DE FUENTES DE AGUA DE ORIGEN GEOTÉRMICO MEDIANTE EL SOFTWARE LIBRE HIDROGEOQUIM**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

**Sangolquí, 20 de mayo del 2016**

-----  
Sr. Alexander Marcelo Hidalgo

C.C. 1722823778



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **HIDALGO HIDALGO ALEXANDER MARCELO**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA Y CONTROL DE CALIDAD DE FUENTES DE AGUA DE ORIGEN GEOTÉRMICO MEDIANTE EL SOFTWARE LIBRE HIDROGEOQUIM**” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

**Sangolquí, 20 de mayo del 2016**

-----  
Sr. Alexander Marcelo Hidalgo

C.C. 1722823778

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a Dios por todas las bendiciones que me ha dado a lo largo de mi vida y por darme la fortaleza para seguir adelante con mis proyectos de vida.

A mis padres, Marcelo y Elizabeth por el amor y el apoyo incondicional que siempre me han brindado, por darme una vida en la cual mi única preocupación ha sido estudiar y porque siempre me han enseñado a superar cualquier adversidad con constancia y esfuerzo.

A mis amadas hermanas, Carolina y Sarahí porque son mi inspiración y el empujón anímico de cada uno de mis días para seguir superándome y con quienes siempre puedo contar.

Finalmente a mi abuelita Carmita quien me ha sabido educar como a su hijo propio, y quien con su generosidad y amor ha hecho de mí una persona de bien.

## **AGRADECIMIENTOS**

A La Universidad de Las Fuerzas Armadas – ESPE, por darme la oportunidad de estudiar y forjarme para ser un profesional de calidad.

A mi familia por ser mi inspiración y principal apoyo, por darme ánimo a cumplir mis objetivos y guiarme por el buen camino, con su paciencia y amor.

Al Dr. David Carrera por ser mi tutor de tesis, quien con sus conocimientos, experiencia y motivación contribuyó al desarrollo de este trabajo y es un referente de ejemplo y admiración.

A Maite por su apoyo incondicional, su cariño y preocupación en las diferentes actividades que hemos realizado.

## ÍNDICE

1. GENERALIDADES .....	1
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4. OBJETIVO GENERAL .....	4
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
1.6. METAS .....	4
1.7. MARCO TEÓRICO .....	5
1.7.2. Arco Volcánico del Ecuador.....	6
1.7.3. Aguas Termominerales.....	7
1.7.4. Génesis de las aguas termominerales.....	8
1.7.5. Aguas Termominerales en el Ecuador.....	8
1.7.6. Hidrogeoquímica .....	9
1.7.7. La conductividad eléctrica del agua y su relación con la composición química. ....	9
1.7.8. HIDROGEOQUIM: Sistema Automatizado para el procesamiento de datos hidroquímicos. ....	9
1.7.8.1. Entrada de Datos.....	10
1.7.8.2. Cálculos Numéricos .....	10
1.7.9. SAMA: Sistema Automatizado para el Monitoreo de la Calidad las Aguas.....	10
1.7.9.1. Regresión por tanteo: .....	11
1.7.9.2. Regresión automática:.....	11
1.7.10. Representación gráfica de la composición química de las aguas.....	12
1.7.10.1. Diagramas de Stiff.....	12
1.7.10.2. Diagramas de Piper .....	13
1.7.10.3. Diagramas de Schoeller - Berkaloff.....	14
1.7.11. Calidad del agua .....	15
1.7.11.1. Calidad de agua para riego .....	16
1.7.11.2. Norma Wilcox.....	16

1.7.11.3.	Norma Riverside.....	17
1.7.11.4.	Relación de Adsorción de Sodio (RAS).....	18
1.7.11.5.	Relación de Adsorción de Sodio Ajustado.....	19
1.7.12.	Calidad de agua para consumo humano y doméstico.....	20
1.7.12.1.	Estándares de Calidad del agua potable según la OMS .....	21
2.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
2.1.	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA.....	23
2.1.1.	Descripción del Área de Estudio .....	23
2.1.2.	Toma de Muestras de agua.....	25
2.1.3.	Determinación de los parámetros físico – químicos.....	26
2.1.4.	Elaboración de diagramas hidroquímicos .....	29
2.1.5.	Elaboración de Mapas.....	29
2.2.	MODELACION HIDROGEOQUÍMICA.....	30
2.2.1.	Recopilación e Inventario de Datos .....	30
2.2.2.	Softwares Utilizados .....	30
2.2.2.1.	HIDROGEOQUIM: Sistema Automatizado para el procesamiento de datos hidroquímicos.....	30
2.2.2.2.	SAMA: Sistema Automatizado para el Monitoreo de la Calidad las Aguas.....	31
2.3.	DETERMINACION DE LA CALIDAD DE AGUA .....	31
2.3.1.	Análisis de Agua para consumo humano .....	31
2.3.2.	Análisis de agua para uso agrícola .....	31
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	33
3.1.	Parámetros físicos y químicos de las aguas geotermales muestreadas .....	33
3.2.	Composición iónica de las aguas geotermales muestreadas.....	34
3.3.	Comprobación de la exactitud de los resultados .....	36
3.4.	Clasificación de las aguas geotermales por su composición química.....	39
3.4.1.	Por los Iones Dominantes.....	39
3.4.1.1.	Cloruradas Sódicas.....	39
3.4.1.2.	Bicarbonatadas Sódicas .....	40
3.4.1.3.	Bicarbonatadas Magnésicas .....	40
3.4.1.4.	Sulfatadas Magnésicas.....	41
3.4.1.5.	Sulfatadas Sódicas.....	42
3.5.	Análisis de agua para uso agrícola .....	43



3.6.	Clasificación del agua de riego.....	45
3.6.1.	Norma Wilcox.....	45
3.6.1.1.	Cloruradas Sódicas.....	45
3.6.1.2.	Bicarbonatadas Sódicas .....	47
3.6.1.3.	Sulfatadas Magnésicas.....	48
3.6.1.4.	Bicarbonatadas Magnésicas .....	49
3.6.1.5.	Sulfatadas Sódicas.....	50
3.6.2.	Norma Riverside.....	51
3.7.	Caracterización Hidrogeoquímica.....	57
3.7.1.	Zona Sur .....	58
3.7.1.1.	Características hidrogeológicas de las aguas geotermales en la Zona Sur,.....	58
3.7.1.2.	Características generales de la composición iónica de las aguas de los balnearios de la Zona Sur .....	58
3.7.1.3.	Variación espacial de la composición química de las aguas geotermales en la Zona Sur .....	59
3.7.1.4.	Representación gráfica mediante Diagramas de Stiff.....	60
3.7.1.5.	Estimación de la composición química de las aguas mediante mediciones de conductividad eléctrica y modelos de correlación matemática .....	62
3.7.1.6.	Índices de similitud para la validación de los modelos de correlación matemática .....	63
3.7.2.	Zona Centro.....	65
3.7.2.1.	Características hidrogeológicas de las aguas geotermales en la Zona Centro .....	65
3.7.2.2.	Características generales de la composición iónica de las aguas de los balnearios de la Zona Centro .....	67
3.7.2.3.	Variación espacial de la composición química de las aguas geotermales en la Zona Centro.....	69
3.7.2.4.	Representación gráfica mediante Diagramas de Stiff.....	71
3.7.2.5.	Estimación de la composición química de las aguas mediante mediciones de conductividad eléctrica y modelos de correlación matemática .....	75
3.7.2.6.	Índices de similitud para la validación de los modelos de correlación matemática .....	78
3.7.3.	Zona Norte.....	79

3.7.3.1.	Características hidrogeológicas de las aguas geotermales en la Zona Norte .....	79
3.7.3.2.	Características generales de la composición iónica de las aguas de los balnearios de la Zona Norte .....	81
3.7.3.3.	Variación espacial de la composición química de las aguas geotermales en la Zona Norte.....	84
3.7.3.4.	Representación gráfica mediante Diagramas de Stiff.....	86
3.7.3.5.	Estimación de la composición química de las aguas mediante mediciones de conductividad eléctrica y modelos de correlación matemática .....	92
3.7.3.6.	Índices de similitud para la validación de los modelos de correlación matemática .....	95
3.8.	Calidad de agua para Consumo Humano y doméstico .....	97
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	101
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	104

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de las aguas según la norma Riverside.....	18
<b>Tabla 2.</b> Valores Correspondientes a las relaciones de $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{HCO}_3^-$ y $\text{CO}_3^{2-}$ .....	19
<b>Tabla 3.</b> Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico .....	21
<b>Tabla 4.</b> Directrices de la OMS para la calidad del agua potable .....	22
<b>Tabla 5.</b> Ubicación de los balnearios visitados .....	23
<b>Tabla 6.</b> Metodología utilizada en la determinación de parámetros físico-químicos	27
<b>Tabla 7.</b> Parámetros físicos de las muestras de aguas geotermales.....	33
<b>Tabla 8.</b> Composición Iónica de las aguas geotermales muestreadas .....	35
<b>Tabla 9.</b> Resultados de Nitratos, fosfatos y boro de las aguas geotermales muestreadas .....	36
<b>Tabla 10.</b> Porcentajes permisibles de diferencia en los resultados analíticos .....	37
<b>Tabla 11.</b> Porcentaje de Error de los resultados analíticos.....	37
<b>Tabla 12.</b> Índices RAS, $\text{RAS}_{Aj}$ y % Na.....	43
<b>Tabla 13.</b> Interpretación de la calidad de agua de riego según su salinidad y contenido de sodio .....	54
<b>Tabla 14.</b> Parámetros físico-químicos de tres muestras de agua geotermal de los Balnearios de la Zona Sur.....	59
<b>Tabla 15.</b> Modelos de correlación matemática obtenidos por ecuaciones de ajuste de 2do y 3er grado para la estimación de la composición química de los balnearios en la Zona Sur .....	63
<b>Tabla 16.</b> Índices de similitud obtenidos y validación de los modelos de correlación matemática de los balnearios de la Zona Sur .....	64
<b>Tabla 17.</b> Parámetros físico-químicos de tres muestras de agua geotermal de los Balnearios de la Zona Centro .....	67
<b>Tabla 18.</b> Coefficientes de Correlación .....	75
<b>Tabla 19.</b> Modelos de correlación matemática obtenidos por ecuaciones de ajuste de 2do y 3er grado para la estimación de la composición química de los balnearios en la Zona Centro .....	76

<b>Tabla 20.</b> Índices de similitud obtenidos y validación de los modelos de correlación matemática de los balnearios de la Zona Centro .....	78
<b>Tabla 21.</b> Parámetros físico-químicos de tres muestras de agua geotermal de los Balnearios de la Zona Norte. ....	81
<b>Tabla 22.</b> Modelos de correlación matemática obtenidos por ecuaciones de ajuste de 2do y 3er grado para la estimación de la composición química de los balnearios en la Zona Sur .....	92
<b>Tabla 23.</b> Índices de similitud para la validación de los modelos de correlación matemática.....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa estructural y fisiográfico del Ecuador modificado .....	6
<b>Figura 2.</b> Diagrama de Stiff de una muestra de agua de la laguna de Castiñeiras, Galicia.....	12
<b>Figura 3.</b> Diagramas de Stiff para mostrar las diferencias zonales en la calidad del agua.....	13
<b>Figura 4.</b> Diagrama de Piper de muestras de agua subterránea del Rio Columbia, Oregon. ....	14
<b>Figura 5.</b> Diagrama de Schoeller –Berkaloff de los puntos de muestreo en la zona de Muradiye-Çaldiran, Turquía. ....	15
<b>Figura 6.</b> Diagrama de Wilcox.....	17
<b>Figura 7.</b> Diagrama de Riverside .....	17
<b>Figura 8.</b> Mapa de Ubicación de los Sitios de Muestreo .....	25
<b>Figura 9.</b> Toma de muestras y medición de temperatura “ <i>in situ</i> ”.....	26
<b>Figura 10.</b> Determinaciones de parámetros físicos-químicos en laboratorio.....	27
<b>Figura 11.</b> (A) Diagrama de Piper de aguas Cloruradas Sódicas, (B) Diagrama de Schoeller-Berkaloff de Aguas Cloruradas Sódicas .....	39
<b>Figura 12.</b> (A) Diagrama de Piper de aguas Bicarbonatadas Sódicas, (B) Diagrama de Schoeller-Berkaloff de Aguas Bicarbonatadas Sódicas. ....	40
<b>Figura 13.</b> (A) Diagrama de Piper de aguas Bicarbonatadas Magnésicas, (B) Diagrama de Schoeller-Berkaloff de Aguas Bicarbonatadas Magnésicas. ....	41
<b>Figura 14.</b> (A) Diagrama de Piper de aguas Sulfatadas Magnésicas, (B) Diagrama de Schoeller-Berkaloff de Aguas Sulfatdas Magnésicas.....	42
<b>Figura 15.</b> (A) Diagrama de Piper de aguas Sulfatadas Sódicas, (B) Diagrama de Schoeller-Berkaloff de Aguas Sulfatadas Sódicas. ....	43
<b>Figura 16.</b> Diagrama de Wilcox de muestras de aguas Cloruradas Sódicas .....	46
<b>Figura 17.</b> Diagrama de Wilcox de muestras de aguas Bicarbonatadas Sódicas.....	47
<b>Figura 18.</b> Diagrama de Wilcox de muestras de aguas Sulfatadas Magnésicas .....	49
<b>Figura 19.</b> Diagrama de Wilcox de muestras de aguas Bicarbonatadas Magnésica ..	50
<b>Figura 20.</b> Diagrama de Wilcox de muestras de aguas Bicarbonatadas Magnésicas	51
<b>Figura 21.</b> Diagrama de Riverside de muestras de aguas geotermales .....	52

<b>Figura 22.</b> Diagrama de Riverside de muestras de aguas geotermales .....	53
<b>Figura 23.</b> Mapa de Ubicación de Zonas de Estudio .....	57
<b>Figura 24.</b> Mapa Hidrogeoquímico de la Zona Sur .....	60
<b>Figura 25.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario Agua Caliente – Portovelo .....	61
<b>Figura 26.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario Baños de Cuenca .....	61
<b>Figura 27.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario Guapán .....	62
<b>Figura 28.</b> Mapa hidrogeoquímico de la Zona Centro .....	70
<b>Figura 29.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario Los Elenes .....	71
<b>Figura 30.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario La Virgen.....	71
<b>Figura 31.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario El Salado .....	72
<b>Figura 32.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario Guapante.....	72
<b>Figura 33.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario Nagsiche .....	73
<b>Figura 34.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Aluchán.....	73
<b>Figura 35.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Oyacachi .....	73
<b>Figura 36.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Jamanco .....	74
<b>Figura 37.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Papallacta.....	74
<b>Figura 38.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario Cununyaku .....	75
<b>Figura 39.</b> Mapa hidrogeoquímico de la Zona Norte.....	85

<b>Figura 40.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Guachalá.....	86
<b>Figura 41.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de El Tingo.....	86
<b>Figura 42.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de El Cununyacu .....	87
<b>Figura 43.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de La Merced.....	87
<b>Figura 44.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Lloa.....	88
<b>Figura 45.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Las Lagartijas .....	88
<b>Figura 46.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Peguche.....	88
<b>Figura 47.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de La Calera .....	88
<b>Figura 48.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de La Gruta de la Paz .....	89
<b>Figura 49.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Paluz .....	89
<b>Figura 50.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Rumichaca .....	90
<b>Figura 51.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Los Tres Chorros .....	90
<b>Figura 52.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de San Miguel de Car .....	90
<b>Figura 53.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Aguas Hediondas.....	91
<b>Figura 54.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Chachimbiro .....	91
<b>Figura 55.</b> Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Nangulví .....	92

<b>Figura 56.</b> Contenido de pH en aguas de origen geotermal y límites permisibles.....	97
<b>Figura 57.</b> Contenido de Solidos Totales Disueltos en aguas de origen geotermal y límites permisibles.....	98
<b>Figura 58.</b> Contenido de Cloruros en aguas de origen geotermal y límites permisibles .....	99
<b>Figura 59.</b> Contenido de Sulfatos en aguas de origen geotermal y límites permisibles .....	100
<b>Figura 60.</b> Contenido de Nitratos en aguas de origen geotermal y límites permisible.....	100



**ÍNDICE DE CUADROS**

<b>Cuadro 1.</b> Características hidrogeológicas de la Zona Sur .....	58
<b>Cuadro 2.</b> Características hidrogeológicas de la Zona Centro.....	66
<b>Cuadro 3.</b> Características hidrogeológicas de la Zona Norte.....	80

## RESUMEN

La formación de varias fuentes de agua geotermales en los Andes ecuatorianos son producto de una intensa actividad volcánica debido la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa continental Sudamericana. El propósito de este trabajo fue describir la hidroggeoquímica de las aguas de origen geotermal, su clasificación química y su relación con la compleja geología del Ecuador, utilizando diferentes diagramas hidroquímicos (Stiff, Schoeller-Berkaloff y Piper). Las aguas geotermales pueden ser divididas en dos grupos, las que están asociadas a una extinta actividad volcánica producida en el Cenozoico (Oligoceno, Mioceno y Plioceno) las cuales responden al tipo de aguas  $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$  y las que están asociadas a una joven actividad volcánica del Cuaternario que responden al tipo  $\text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$

## PALABRAS CLAVE

- **HIDROGEOQUÍMICA**
- **AGUAS GEOTERMALES**
- **DIAGRAMAS DE STIFF & PIPER**
- **GRÁFICO DE SCHOLLER**

## ABSTRACT

The formation of several sources of hot springs in the Andes from Ecuador is the result of intense volcanic activity due to the subduction of the Nazca oceanic plate under the South American continental plate. The aims of this study were to describe the hydrogeochemistry water geothermal origin, their chemical classification and their relationship with the complex geology of Ecuador, using different hydro chemical diagrams (Stiff, Piper and Schoeller-Berkaloff). Geothermal waters can be divided into two groups, the first group were associated with an extinct volcanic activity produced in the Cenozoic, these were qualified to the type of water  $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ , the second group were associated with a young activity Quaternary volcanic, the kind of water were  $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$ .

## KEYWORDS:

- **HYDROGEOCHEMISTRY**
- **THERMAL WATERS**
- **STIFF & PIPER DIAGRAMS**
- **SCHOELLER PLOT**

## **CAPITULO I**

### **1. GENERALIDADES**

#### **1.1. ANTECEDENTES**

En el Ecuador el científico alemán Teodoro Wolf en su obra “Geografía y Geología del Ecuador” publicada en 1892 enfatizó la abundancia y variedad de manantiales de aguas termales y minerales existentes en el país, especialmente en las regiones andina e interandina, sin embargo, lastimosamente el uso que se hace de ellas es nulo. Hoy en día las fuentes de aguas termales benefician a diversas comunidades en el mundo, debido a sus características terapéuticas y recreacionales. Además, brinda agua potable (envasada) o también para uso doméstico y agrícola (Moreno, Díaz, Caraballo, Chacón, & Baptista, 2007).

Burbano, Becerra y Pasquel (2014) afirman que en el Ecuador existen zonas donde el agua subterránea es el único recurso accesible para abastecer a poblaciones o para la irrigación de cultivos además, constituye un recurso esencial para la seguridad alimentaria y a la vez, es vital para el funcionamiento de los ecosistemas.

La carencia de conocimiento técnico y científico sobre este recurso hídrico puede provocar usos irracionales, contaminación e incluso la pérdida total del mismo. Los trabajos de investigación desarrollados hasta el momento en el Ecuador sobre hidrogeoquímica son esfuerzos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), en el cual se detalla información sobre las Unidades Hidrogeológicas del Ecuador, determinadas mediante un inventario de 5000 puntos de agua, pozos excavados, perforados y vertientes a nivel nacional y en las cuales se definen sus elementos principales: geometría, heterogeneidad geológica, productividad acuífera, piezometría y profundidad del agua, calidad química, recarga media interanual (Burbano, Becerra, & Pasquel, 2014).

En lo correspondiente a estudios de aguas subterráneas termales publicadas hay que remontarse al año 1968 donde el Dr. José E. Muñoz publicó la primera Guía de Aguas Minerales del Ecuador en la cual se realizó un inventario de 85 fuentes hidrominerales, en la cual existe información sobre las principales aplicaciones y

propiedades terapéuticas que poseen, además, información acerca de sus parámetros físico –químicos.

En los últimos años el INAMHI realizó un inventario a nivel nacional de 100 fuentes termominerales con sus respectivos análisis de parámetros físico- químico y la clasificación según su composición química en el año 2013. La investigación hecha por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), es una caracterización geoquímica de fuentes de aguas termales en el Ecuador, publicada en el 2010 en este trabajo se evidencia la composición química e isotópica de 56 muestra de aguas termales y su contenido de gases como CO<sub>2</sub> y He que emanan estos acuíferos.

En países sudamericanos como Venezuela, Colombia y Perú que poseen una compleja litología similar a la del Ecuador existen estudios sobre caracterizaciones hidrogeoquímicas las cuales tuvieron como objetivo mostrar las composiciones químicas y su posibilidad de ser explotadas como balnearios turísticos.

En Cuba específicamente en el Municipio Especial Isla de la Juventud donde el 100% de las fuentes de aguas subterráneas abastecen a la isla de agua potable existen varios estudios donde el control y monitoreo de la calidad del agua se lo realiza utilizando SOFTWARES específicos basados en modelos hidrogeoquímicos los cuales permiten predecir la composición química a partir de valores de la conductividad eléctrica (Hernández, 2002), por lo tanto si existe algún tipo de variación en iones como el Cl<sup>-</sup> les permite tomar las medidas necesarias para mitigar algún tipo de deterioro o contaminación en fuentes intrusionadas (Leonarte, 2005).

## **1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Han pasado 124 años desde que el científico alemán Teodoro Wolf, escribió sobre la bondad y propiedades de las aguas termales y minerales del país. Lamentablemente hasta ahora, salvo casos aislados, no se ha hecho mucho por conocer e investigar las aguas termales y minerales del Ecuador (Paladines, 2011).

Pese a que existe la iniciativa por parte de instituciones para investigar e inventariar las fuentes de agua de origen geotermal en el Ecuador, hay poca información secundaria sobre el tema en la cual se muestran e ilustran sencillamente

análisis químicos e información técnica en tablas. Es escasa la información sobre el origen de la composición química y los procesos hidrogeoquímicos que expliquen esta composición.

Los estudios de control de calidad de aguas geotermales acerca de toxicidad ya sea por contenido de elementos trazas o emanación de gases son escasos, y la falta de difusión de la misma puede provocar que la ingestión continua de estas aguas produzca envenenamiento tanto para el ser humano como para las plantas y animales (IG-EPN, 2015).

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

El Plan Nacional de Buen Vivir (2013 – 2017), Objetivo 7, Política 7.6 habla sobre aumentar la eficiencia en el uso de las fuentes hídricas y mejorar la sustentabilidad de los reservorios de aguas subterráneas, además, desarrollar e implementar un inventario hídrico nacional dinámico que considere aguas subterráneas el cual permita cuantificar oferta y demanda de agua según los usos socioeconómicos, razón por la cual, el presente estudio tuvo como fin conocer el comportamiento de aguas subterráneas termales mediante la creación de modelos hidrogeoquímicos que simulen y pronostiquen su composición química a partir de los valores de conductividad eléctrica, en base a datos encontrados en inventarios de puntos de aguas geotermales actualizados al 2012, adicionalmente, de los valores y datos medidos en el Laboratorio de Medio Ambiente de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, de 34 muestras de agua geotermales recolectadas a lo largo del callejón Interandino en los años 2014 y 2015.

Asimismo, este trabajo se enfocó en la caracterización hidrogeoquímica de las fuentes de aguas de origen geotermal, la cual explicó el origen de su composición química y procesos hidrogeoquímicos involucrados, mediante técnicas gráficas hidroquímicas como Diagramas de Piper, Diagramas de Stiff y Diagramas de Schoeller – Berkaloff.

Finalmente, se realizó una evaluación preliminar de la calidad del agua de estas fuentes geotermales para consumo humano y uso agrícola, cuyo beneficio principal sea una gestión integral de estas fuentes, promoviendo una explotación racional,

sostenible y sustentable de las mismas, y el desarrollo del turismo comunitario en los balnearios que utilizan este tipo de agua.

#### **1.4. OBJETIVO GENERAL**

- Emplear el software libre HIDROGEOQUIM basado en modelos hidrogeoquímicos para la determinación del origen, composición química, y procesos hidrogeoquímicos involucrados en fuentes de agua de origen geotérmico utilizados por balnearios ubicados a lo largo del callejón interandino.

#### **1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar los parámetros físicos y químicos: pH, CE,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{B}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , (para aguas con pH > 8.2), Residuo Seco Evaporado, Residuo Seco Calcinado en las aguas geotermales del callejón interandino en el Ecuador.
- Caracterizar desde el punto de vista hidrogeoquímico a las fuentes de agua de origen geotermal utilizando técnicas gráficas hidroquímicas.
- Encontrar relaciones matemáticas que permitan estimar la composición química del agua mediante mediciones de conductividad eléctrica.
- Conocer la calidad del agua de las fuentes según sus características físico-químicas para identificar el aprovechamiento y uso más idóneo del recurso.

#### **1.6. METAS**

- Una base de datos con los resultados de análisis de laboratorio de los 34 balnearios.
- Diez mapas hidrogeoquímicos uno por provincia estudiada con información a escala 1:50 000.
- Treinta cuatro modelos de correlación matemática entre las concentraciones iónicas y la conductividad eléctrica, uno por cada balneario.

- Cuarenta y cuatro gráficos hidroquímicos de Stiff, Piper y Schoeller – Berkaloff.
- Siete diagramas para clasificar las aguas de riego según Riverside y Wilcox.

## **1.7. MARCO TEÓRICO**

### **1.7.1. Marco geológico regional**

Las actuales características morfo-estructurales del Ecuador continental son especialmente influenciadas por la interacción de la placa oceánica de Nazca con la placa continental Sur-Americana. Tres divisiones fisiográficas pueden ser notadas; el Oriente, los Andes y la Costa; cada una de ellas tiene particularidades geológicas y tectónicas (Herrera, 2013).

Los Andes ecuatorianos se destacan por tres subdivisiones fisiográficas; la Cordillera Real, la Cordillera Occidental y la Depresión o Valle Interandino:

La Cordillera Real presenta relieves que superan los 4000 msnm y está constituida por cinturones de rocas metamórficas del Paleozoico e intrusiones granitoides del Mesozoico, que se encuentran separados longitudinalmente por fallas regionales que representarían suturas de acreción (Aspden & Litherland, 1992) (Litherland , Aspden, & Jemielita, 1994).

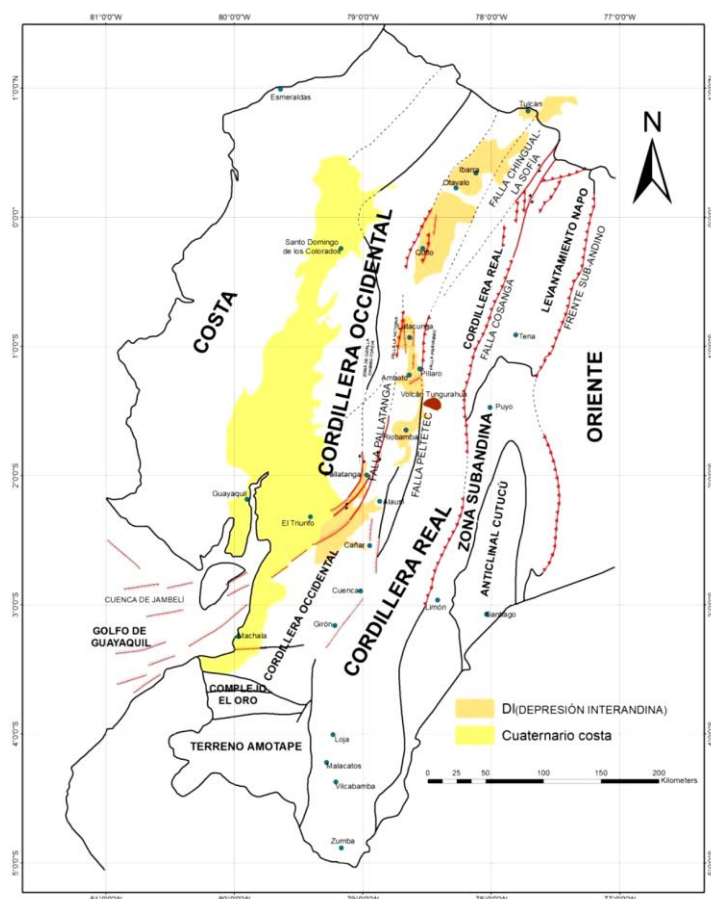
La Cordillera Occidental es otra cadena montañosa paralela que está constituida principalmente por basaltos con afinidad de plateau oceánico y rocas ultramáficas del Cretácico temprano a tardío además de secuencias turbidíticas que en conjunto constituyen terrenos acrecionados a Sur-América entre el Cretácico tardío a Eoceno (Hughes & Pilatasig, 2002).

La Depresión Interandina está constituida por varias cuencas sedimentarias que se componen de rocas Pliocénicas a recientes en las cuales se evidencia la actividad volcánica y tectónica; la Depresión Interandina limita con la Cordillera Real y Cordillera Occidental a través de estructuras regionales (fallas Peltetec y Pallatanga-Pujilí- Calacalí respectivamente), que serían suturas dejada por grandes eventos de



acreción hacia el continente americano durante el Jurásico al Terciario temprano (Litherland , Aspden, & Jemielita, 1994) (Hughes & Pilatasig, 2002).

En la Figura 1 se indica el mapa estructural y fisiográfico del Ecuador:



**Figura 1.** Mapa estructural y fisiográfico del Ecuador modificado

**Fuente:** (Winkler , Villagómez, Spikings, Abegglen, Tobler, & Eguez, 2005)

### 1.7.2. Arco Volcánico del Ecuador

El proceso de la geodinámica reciente estaría materializado por el volcanismo continental al menos desde el Mioceno tardío al Plioceno temprano; a partir de ésta época el volcanismo en el Sur del Ecuador habría desaparecido, mientras que al Norte continuó hasta la actualidad (Hall & Beate, 1991). Cuatro grupos de volcanes alineados han sido clasificados de acuerdo a sus características morfológicas, estilo eruptivo y sus variaciones petrográficas y químicas:

Sobre el basamento de la Cordillera Occidental yacen los volcanes del frente volcánico, los cuales están separados de 30 a 35 km a lo largo del frente y con altitudes entre los 4600 a 5000 msnm; la actividad eruptiva del Pleistoceno tardío al Holoceno. Las rocas jóvenes muestran en su composición 60-66% de SiO<sub>2</sub> y 0.9 a 1.5% de K<sub>2</sub>O, fenocristales de plagioclasa, anfíbol, ortopiroxeno y poca biotita y cuarzo (Hall, Samaniego, Le Penne, & Johnson, 2008). Algunos volcanes situados en este frente serían; Cotacachi, Cuicocha, Guagua Pichincha, Rucu Pichincha, Ninahuilca, Ilinizas, Quilotoa.

En la Cordillera Real y sobre su basamento se alojan estrato-volcanes que alcanzan alturas entre 5700-5900 msnm, estos volcanes han tenido mayor actividad durante el Holoceno que aquellos de la Cordillera Occidental, la composición de las rocas más jóvenes están entre andesitas de alto sílice y calco-alcalinas, entre 56-61% de SiO<sub>2</sub> y 1-2% de K<sub>2</sub>O, con fenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno, Óxidos de Fe-Ti y ocasionalmente olivino. Además un agrupamiento importante de centros de composición riolítica se extenderían desde la caldera de Chacana al norte a la caldera de Chalupas al sur (Hall & Mothes, 2008). Algunos volcanes situados en este frente serían; Tungurahua, Cotopaxi, Sangay, Reventador.

En distintas partes del Valle Interandino (Depresión Interandina) se sitúan varios estrato-volcanes con alturas entre 3800 a 4700 msnm; de la mayoría de ellos solo el Imbabura ha mostrado actividad eruptiva Holocénica (Ruiz, 1993), depósitos de avalanchas de escombros del Pleistoceno tardío han sido identificados en el Mojanda-Fuya Fuya y el Imbabura. La petrografía de este grupo muestra andesitas básicas de dos piroxenos con plagioclasa y ocasionalmente anfíbol, en la química se puede ver 57-60% de SiO<sub>2</sub> y 0.5-1.0% de K<sub>2</sub>O (Hall, Samaniego, Le Penne, & Johnson, 2008). Entre los edificios volcánicos se puede nombrar el Pasochoa, Rumiñahui, Igualata, Llimpi-Huisla, Mojanda-Fuya Fuya, Imbabura.

### **1.7.3. Aguas Termominerales**

Para Muñoz (1949) las aguas termominerales son aquellas que han surgido del suelo y que debido a sus propiedades físicas y químicas se le atribuye aplicaciones terapéuticas o medicinales motivo por el cual también se las conoce como aguas mineromedicinales. Gran parte de las aguas minerales son al mismo tiempo termales;

estas aguas termales se encuentran en las capas profundas de la corteza terrestre, bajo ciertas condiciones de temperatura, fuerza y cantidad que pueden ser constantes.

Se consideran termales en relación con la temperatura. Aquellas aguas subterráneas que en su punto de emergencia poseen una temperatura mayor que la temperatura media anual del ambiente, esta diferencia debe ser superior a 5°C (Custodio & Llamas, 2001).

#### **1.7.4. Génesis de las aguas termominerales**

Para Muñoz (1949) existen 3 posibles teorías sobre el origen de las aguas termominerales:

- Origen vadoso o geotermal, en la infiltración de las aguas lluvias y aguas superficiales (ríos, lagos, torrentes) forman “venas líquidas” en la red de fisuras que presenta internamente la litósfera, y una vez acumuladas y debido a condiciones bajas de presión y temperatura estas ascienden rápidamente conservando su calor hasta la superficie. La temperatura va a ser más alta mientras más profundo sea el lecho del que provenga.
- Origen profundo o juvenil, este tipo de aguas se forman a expensas de exhalaciones gaseosas de los magmas internos, los mismos que contienen hidrógeno y oxígeno; con esto se puede explicar la existencia de muchas fuentes de aguas termominerales en zonas volcánicas.
- Origen mixto, es decir las aguas geotermales pueden provenir de una mezcla que en ciertas ocasiones es proporcional de “agua de origen juvenil” y “agua de origen vadoso”.

#### **1.7.5. Aguas Termominerales en el Ecuador**

Las aguas termales y minerales en el país, genéticamente están relacionadas con aparatos volcánicos jóvenes y sistemas de fallas y fisuras. Estas aguas proceden del interior de la tierra, en donde por procesos geodinámicos y termodinámicos se encuentran a temperaturas muy elevadas y con un alto grado de mineralización. El agua al llegar a una zona de fallamiento y/o diaclasamiento asciende rápidamente emanando a la superficie en forma de manantiales (Burbano, Becerra, & Pasquel, 2013).

### **1.7.6. Hidrogeoquímica**

La hidrogeoquímica estudia los aspectos geoquímicos del agua en sí y su relación con las rocas de la corteza terrestre. La evolución geoquímica del agua subterránea está íntimamente ligada a su circulación a través del terreno. Por lo tanto, la evolución de la calidad del agua deberá permitir detectar cambios en las características químicas con el fin de evaluar las tendencias químicas (Manzano & Naranjo, 2012).

### **1.7.7. La conductividad eléctrica del agua y su relación con la composición química.**

La conductividad eléctrica se correlaciona con la sumatoria de la concentración de los iones mayoritarios disueltos en aguas. Con respecto a la concentración iónica se han encontrado correlaciones altamente significativas con los iones más abundantes, lo que ha limitado aparentemente el uso de ecuaciones de regresión en el control de las aguas en forma extensiva (Leonarte, 2005).

Fagundo *et al.*, (2001), han estudiado la relación entre la litología (así como otros factores) y la naturaleza de las ecuaciones de dependencia matemática entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica, demostrando que en una región determinada, donde muchos de los factores que determinan el modo de adquisición de la composición química de las aguas se hacen constantes, es posible controlar la composición química mediante mediciones de conductividad eléctrica,

### **1.7.8. HIDROGEOQUIM: Sistema Automatizado para el procesamiento de datos hidroquímicos.**

Es un sistema de procesamiento de datos hidroquímicos, implementado en Windows, con ficheros de datos similares o transformables entre sí a través del propio software, que permite obtener propiedades químico-físicas de las aguas y la variación temporal de diferentes variables (Fagundo , González, Suárez, Fagundo-Sierra, Melián , & Álvarez, 2005)

A continuación se describen los detalles relacionados con este sistema tomado del Manual de Usuario del software desarrollado por (Fagundo , González, Suárez, Fagundo-Sierra, Melián , & Álvarez, 2005):

### 1.7.8.1. Entrada de Datos

Los ficheros que son utilizados con esta opción tienen la siguiente estructura:

- Muestra
- Fecha
- Hora
- Temperatura
- pH
- Conductividad Eléctrica
- $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$ , Dureza ( $\text{CaCO}_3$ ).

### 1.7.8.2. Cálculos Numéricos

Concentraciones en % meq/L.- Muestra los datos originales en % meq/L, lo cual permite realizar estudios geoquímicos. Esta información es útil para clasificar las aguas y constituye la base de algunos tipos de representaciones gráficas.

### 1.7.9. SAMA: Sistema Automatizado para el Monitoreo de la Calidad las Aguas

El SAMA propone modelos matemáticos que están en concordancia con los modelos físicos de adquisición de la composición química de las aguas: la línea recta que pasa por el origen de coordenadas, para cuando un solo factor es el dominante en este modo de adquisición, por ejemplo, la litología; la ecuación de segundo grado con intercepto cero, cuando más de un factor influye en el proceso de adquisición de la composición química de las aguas o tienen lugar mezclas de agua. También se pueden utilizar ecuaciones de 3<sup>ro</sup> a 5<sup>to</sup> grado para algunos casos especiales. (Álvarez, Vinardell, Fagundo, Reguera, & Cardoso, 1990).

A continuación se describen los detalles relacionados con este sistema tomado del Manual de Usuario del software desarrollado por Álvarez *et al.* (1990):

Para el cálculo de la regresión se determinan las relaciones entre la Concentración iónica y la CE sobre la base de un polinomio desde 1<sup>ro</sup> hasta 5<sup>to</sup> grado que pasa por el origen de coordenadas:

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4 + b_5x^5 \quad (1)$$

Donde  $y=C_i$  y  $x=CE$ .

Se pueden estudiar el  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $NaK$ .

### 1.7.9.1. Regresión por tanteo:

El usuario escoge la variable que quieren procesar y el grado del polinomio para realizar el ajuste.

### 1.7.9.2. Regresión automática:

El sistema busca las ecuaciones de mejor ajuste sobre la base de una prueba de Fisher:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (2)$$

Compara la varianza de cada pareja de ecuaciones sucesivas y cuando no hay diferencia significativa entre el orden  $n$  y el  $n+1$  se selecciona el orden  $n$ . En ambos casos se muestra el gráfico, los coeficientes de la ecuación de mejor ajuste, el coeficiente de correlación. Una vez procesadas todas las variables se puede crear un fichero con los coeficientes de la ecuación de mejor ajuste para cada ion, que se denomina fichero del modelo.

Como criterio de bondad del ajuste se tomó en cuenta el índice de similitud (IS) definido por la ecuación [3]

$$IS = \sum_{i=1}^n (R_{1i} R_{2i}) \quad (3)$$

Dónde:

$$R_{1i} = \frac{C_{im}}{C_{ir}} \text{ si } C_{im} < C_{ir}$$

$$R_{1i} = \frac{C_{ir}}{C_{im}} \text{ si } C_{ir} < C_{im}$$

$$R_{2i} = C_{im} / \sum_{i=1}^n C_{ir}$$

Siendo:

$C_{ir}$ = Concentración Iónica real

$C_{im}$ = Concentración Iónica estimada por modelación

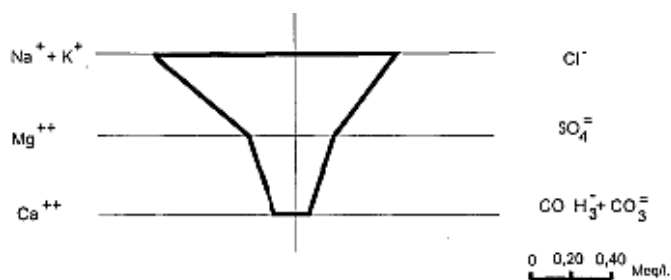
$\sum_{i=1}^n C_{ir}$ = Suma de las concentraciones de todos los iones

### 1.7.10. Representación gráfica de la composición química de las aguas

La representación gráfica de los datos hidroquímicos constituye una herramienta de trabajo muy eficiente en la interpretación de las propiedades de un agua, así como para hacer comparaciones. También permite ver con facilidad el comportamiento y evolución de un agua en un territorio determinado y a través del tiempo (Leonarte, 2005).

#### 1.7.10.1. Diagramas de Stiff

Según Stiff (1951) es una representación bidimensional de las concentraciones de los iones mayoritarios expresados en miliequivalentes por litro (meq/L). Los cationes se los ubica hacia la izquierda y los aniones hacia la derecha en semirrectas paralelas, uniendo los extremos generando un polígono (Figura 2). Los polígonos irregulares que se forman representan el tipo de agua y la anchura de los polígonos puede ser usada para aproximar el contenido total de iones.

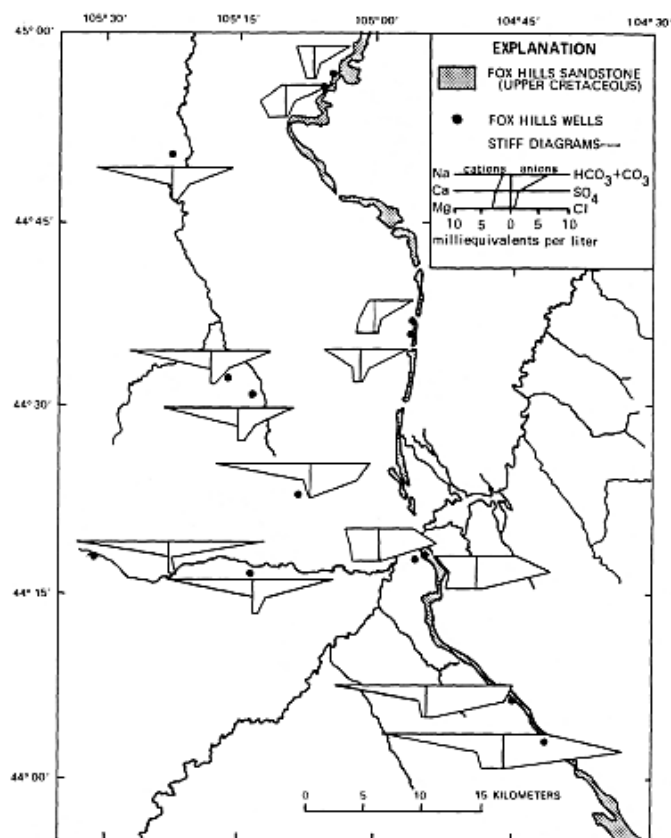


**Figura 2.** Diagrama de Stiff de una muestra de agua de la laguna de Castiñeiras, Galicia.

**Fuente:** (Martínez, 1998)

Estos diagramas permiten establecer diferencias y semejanzas en muestras de aguas y cambios en la composición iónica en aguas subterráneas. También son utilizadas con el propósito de clasificación de agua y resultan fácilmente demostrativas al insertarlas en mapas hidroquímicos (Helsel & Hirsch, 2002). En la Figura 3 se indica una comparación de 14 muestras de agua subterránea de Fox Hills

en Wyoming, Estado Unidos utilizando diagramas de Stiff dispuestos en un mapa del área de estudio.



**Figura 3.** Diagramas de Stiff para mostrar las diferencias zonales en la calidad del agua.

**Fuente:** (Henderson, 1985)

### 1.7.10.2. Diagramas de Piper

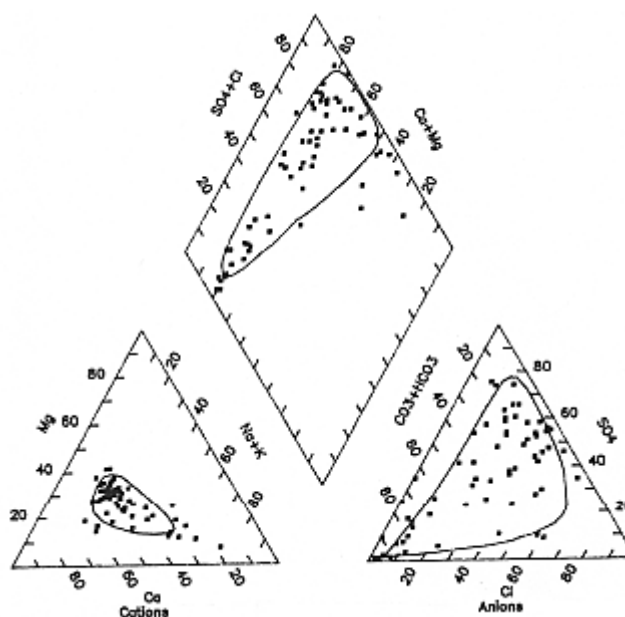
Según Piper (1944) estos diagramas están formados por dos triángulos equiláteros, uno para los cationes y otro para los aniones, los datos de los diagramas triangulares se proyectan en el rombo central en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes.

Las concentraciones de los iones dadas en meq/L se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes respectivamente. En cada triángulo se reúnen solo tres aniones y tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión (Helsel & Hirsch, 2002).



Existen cuatro conclusiones básicas que se derivan de los múltiples análisis de utilizar los diagramas de Piper, clasificación en diferentes familias de agua según su composición iónica, identificación de mezclas de aguas para un mismo pozo, existencia de intercambio iónico, precipitación y solución de las muestras de agua (Hounslow, 1995).

La colección de estos tres diagramas en el formato que se muestra en la Figura 4 se llama un diagrama de Piper.



**Figura 4.** Diagrama de Piper de muestras de agua subterránea del Rio Columbia, Oregon.

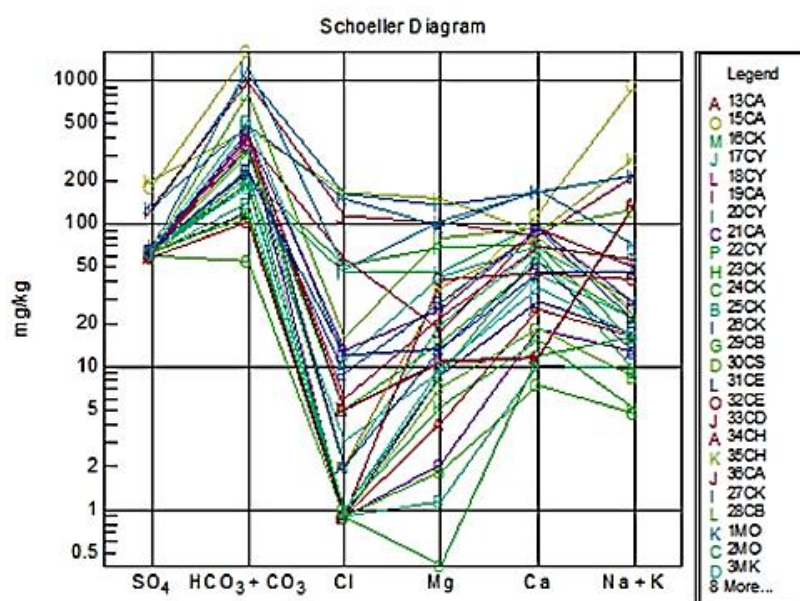
**Fuente:** (Miller & Gonthier, 1984)

### 1.7.10.3. Diagramas de Schoeller - Berkaloff

Se los conoce también como diagramas de columnas verticales logarítmicas, se disponen varias semirrectas verticales paralelas igualmente espaciadas. A cada semirrecta se le asocia un anión o un catión y se representa a partir de un origen (en general a la misma altura para todas las semirrectas) segmentos proporcionales a la concentración en meq/L. Los diferentes puntos obtenidos se unen dando una línea quebrada (Custodio & Llamas, 2001).

La ordenación normal de las columnas de iones es de izquierda a derecha  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ . La inclinación de la recta que une los puntos representativos de dos iones mide su relación, son apropiados para estudiar evoluciones temporales de aguas en un mismo punto.

En la Figura 5 se muestra un Diagrama de Schoeller Berkaloff de las muestras de agua subterránea del campo geotermal de Muradiye-Çaldiran en Turquía.



**Figura 5.** Diagrama de Schoeller –Berkaloff de los puntos de muestreo en la zona de Muradiye-Çaldiran, Turquía.

**Fuente:** (Duzen & Ozler, 2015)

### 1.7.11. Calidad del agua

La calidad del agua se refiere a las condiciones en que se encuentra con respecto a características físicas, químicas y biológicas, en su estado natural o después de ser alteradas por el accionar humano (Lenntech, 2006). Para Barrenechea (2004) el término calidad del agua es relativo y solo tiene importancia universal si está relacionado con el uso del recurso. Esto quiere decir que una fuente de agua suficientemente limpia que permita la vida de los peces puede no ser apta para la natación y un agua útil para el consumo humano puede resultar inadecuada para la industria.

### 1.7.11.1. Calidad de agua para riego

La calidad de agua usada para irrigación es determinante para la producción y calidad en la agricultura, mantenimiento de la productividad del suelo de manera sostenible y protección del medio ambiente (Wallace & Batchelor, 1997).

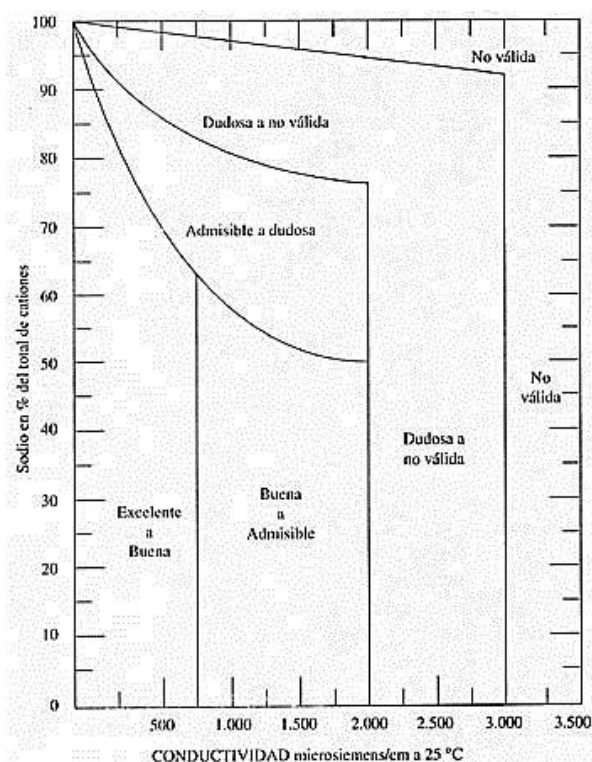
Para evaluar de una manera global la calidad del agua de riego la comunidad científica ha propuesto diversos sistemas de clasificación en base a uno o más riesgos o categorías de problemas. Estas clasificaciones tratan, de caracterizar el agua de riego desde el punto de vista práctico.

### 1.7.11.2. Norma Wilcox

Considera como índices para la clasificación de aguas el porcentaje de sodio respecto al total de cationes y la Conductividad Eléctrica o CE (USDA Salinity Laboratory Staff, 1954). El porcentaje de sodio se calcula con la siguiente formula [4]:

$$\%Na = 100 \left( \frac{Na^+ + K^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \right) \quad (4)$$

La Figura 6 corresponde al diagrama de Wilcox que expresa la salinidad del agua como CE a 25°C y unidades micro siemens/cm.



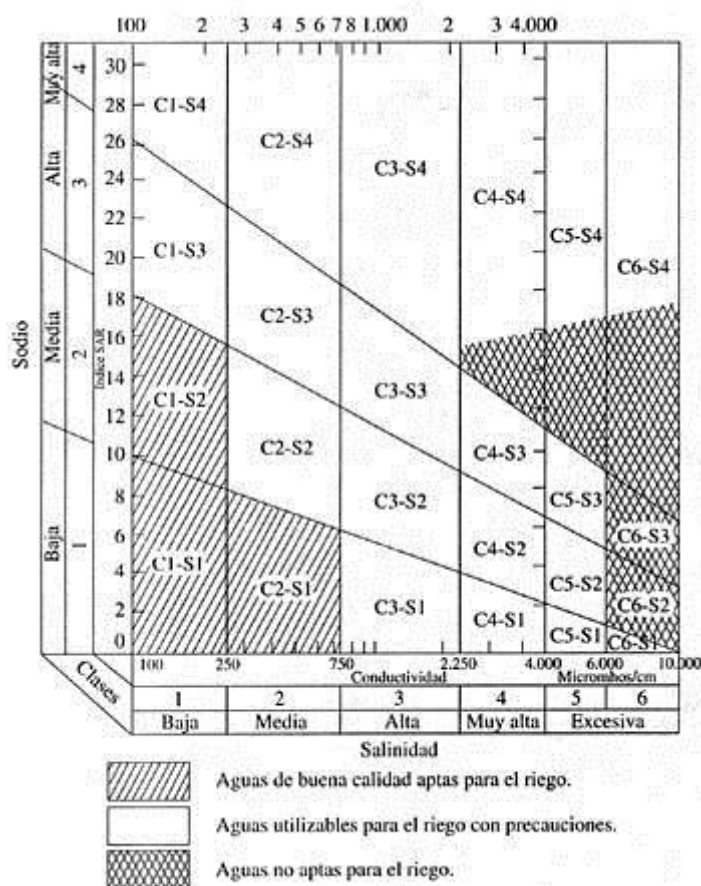
**Figura 6.** Diagrama de Wilcox

**Fuente:** (USDA Salinity Laboratory Staff, 1954)

**1.7.11.3. Norma Riverside**

Establece la clase de agua en función del riesgo de salinización, mediante la C.E. y peligro de alcalinización, mediante la concentración relativa del sodio con respecto al calcio y magnesio denominado Relación de Adsorción de Sodio o RAS. (Custodio & Llamas, 2001)

En la Figura 7 se pueden apreciar las diferentes categorías de agua enunciadas según las letras C y S, afectadas de un subíndice numérico cuyo valor aumenta en relación con el del índice respectivo a medida que los subíndices toman valores más altos, la calidad del agua es peor (USDA Salinity Laboratory Staff, 1954).



**Figura 7.** Diagrama de Riverside

**Fuente:** (USDA Salinity Laboratory Staff, 1954)

En la Tabla 1 se muestra la categorización de la norma Riverside tomando en cuenta los valores de salinidad y conductividad:

**Tabla 1.**

**Clasificación de las aguas según la norma Riverside**

<b>Tipos</b>	<b>Calidad y normas de uso</b>
C <sub>1</sub>	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad.
C <sub>2</sub>	Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.
C <sub>3</sub>	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C <sub>4</sub>	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C <sub>5</sub>	Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.
C <sub>6</sub>	Agua de salinidad excesiva, no aconsejable para riego.
S <sub>1</sub>	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
S <sub>2</sub>	Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario.
S <sub>3</sub>	Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego.
S <sub>4</sub>	Agua con contenido muy alto de sodio. No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.

**Fuente:** (USDA Salinity Laboratory Staff, 1954)

#### **1.7.11.4. Relación de Adsorción de Sodio (RAS)**

Es un parámetro que expresa la posibilidad de que el  $\text{Na}^+$  se adsorba en el complejo de intercambio del suelo y la presencia de otros cationes, en especial el  $\text{Ca}^{2+}$  reduce esta posibilidad. (Ortega & Orellana, 2007). Se basa en una fórmula

empírica que relaciona los contenidos de sodio, calcio y magnesio, expresados en meq/L (Ayers & Westcot, 1976). El RAS queda expresado en la siguiente fórmula [5]:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (5)$$

Este índice ha sido uno de los procedimientos más utilizados para predecir y evaluar el riesgo de alcalinización y problemas de infiltración que se originan por el uso de aguas de riego de elevado contenido de  $Na^+$  (Vidal, 1993).

#### 1.7.11.5. Relación de Adsorción de Sodio Ajustado

Para Vidal (1993) la expresión del índice RAS presenta ciertos inconvenientes, debido a que no toma en cuenta la formación de posibles precipitados de sales poco solubles como son los carbonatos de calcio y magnesio, y el sulfato de calcio que se producen al concentrarse el agua de riego una vez incorporada al terreno de cultivo. Estos precipitados retiran cationes de calcio y de magnesio de la solución del suelo, aumentando como resultado el valor del RAS.

Ayers y Westcot (1976) modificó este índice y definió al RAS ajustado dado por la siguiente expresión [6]:

$$RAS_{Aj} = RAS * (1 + (8,4 - pHc)) \quad (6)$$

Donde pHc o pH calculado se expresa [7]:

$$pHc = (pK_2 - pK_c) + p(Ca^{2+} + Mg^{2+}) + p(AIK) \quad (7)$$

Los valores de  $(pK_2 - pK_c)$ ,  $p(Ca^{2+} + Mg^{2+})$  y  $p(AIK)$  se calculan mediante la Tabla 2:

**Tabla 2.**

**Valores Correspondientes a las relaciones de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $HCO_3^-$  y  $CO_3^{2-}$**

Suma $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $Na^+$ (meq/L)	Valor de $(pK_2 - pK_c)$	Suma $Ca^{2+}$ y $Mg^{2+}$ (meq/L)	Valor de $p(Ca^{2+} + Mg^{2+})$	Suma $HCO_3^-$ y $CO_3^{2-}$ (meq/L)	Valor de $p(AIK)$
0,05	2,0	0,05	4,6	0,05	4,3



Suma $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ (meq/L)	Valor de ( $pK_2 - pK_c$ )	Suma $\text{Ca}^{2+}$ y $\text{Mg}^{2+}$ , (meq/L)	Valor de $p(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$	Suma $\text{HCO}_3^-$ y $\text{CO}_3^{2-}$ (meq/L)	Valor de $p(\text{AIK})$
0,10	2,0	0,10	4,3	0,10	4,0
0,15	2,0	0,15	4,1	0,15	3,8
0,20	2,0	0,20	4,0	0,20	3,7
0,25	2,0	0,25	3,9	0,25	3,6
0,30	2,0	0,30	3,8	0,30	3,5
0,40	2,0	0,40	3,7	0,40	3,4
0,50	2,1	0,50	3,6	0,50	3,3
0,75	2,1	0,75	3,4	0,75	3,1
1	2,1	1	3,3	1	3,0
1,25	2,1	1,25	3,2	1,25	2,9
1,5	2,1	1,5	3,1	1,5	2,8
2,00	2,2	2,00	3,0	2,00	2,7
2,5	2,2	2,5	2,9	2,5	2,6
3,00	2,2	3,00	2,8	3,00	2,5
4,00	2,2	4,00	2,7	4,00	2,4
5,00	2,2	5,00	2,6	5,00	2,3
6,00	2,2	6,00	2,5	6,00	2,2
8,00	2,3	8,00	2,4	8,00	2,1
10,00	2,3	10,00	2,3	10,00	2,0
12,50	2,3	12,50	2,2	12,50	1,9
15,00	2,3	15,00	2,1	15,00	1,8
20,00	2,4	20,00	2,0	20,00	1,7
30,00	2,4	30,00	1,8	30,00	1,5
50,00	2,5	50,00	1,6	50,00	1,3
80,00	2,5	80,00	1,4	80,00	1,1

**Fuente:** (Ayers & Westcot, 1976).

### 1.7.12. Calidad de agua para consumo humano y doméstico

El deterioro de la calidad del agua para consumo humano es la consecuencia de todas las actividades antrópicas que se desarrollan en el planeta, los principales problemas son la eutrofización, que es el resultado de un aumento de los niveles de nutrientes (generalmente fósforo y nitrógeno) y afecta sustancialmente a los usos del agua. Las mayores fuentes de nutrientes provienen de la escorrentía agrícola y de las aguas residuales domésticas (también fuente de contaminación microbiana), de efluentes industriales y emisiones a la atmósfera procedentes de la combustión de combustibles fósiles y de los incendios forestales (World Water Assessment Programme, 2009).

La calidad del agua se determina mediante directrices o estándares las cuales son emitidas por instituciones reguladoras en cada país. En el Ecuador el Ministerio del Medio Ambiente (MAE) publicó el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio del Ambiente en el Libro VI, anexo 1, en el que se detalla la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de efluentes: Recurso Agua.

Según el TULSMA, en su última reforma emitida en el Acuerdo Ministerial 140 publicado el 4 de noviembre del 2015, se entiende por agua para consumo humano y uso doméstico aquella que se emplea en actividades como:

- Bebida y preparación de alimentos para consumo.
- Satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios.

Los límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico, se mencionan en la Tabla 3, recalcando que solo se mencionan los parámetros que son objeto de este estudio.

**Tabla 3.**

**Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico**

<b>Parámetros</b>	<b>Expresado Como</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite Máximo Permisible</b>
Potencial de Hidrógeno	pH	-	6 a 9
Conductividad	CE	μs/cm	250
Sólidos totales disueltos	STD	mg/L	1000
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	500
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	mg/L	250
Nitratos	N-Nitrato	mg/L	50

**Fuente:** (TULSMA, 2015)

**1.7.12.1. Estándares de Calidad del agua potable según la OMS**

La Organización Mundial de la Salud (OMS), establece unas directrices para la calidad del agua potable que son el punto de referencia internacional para el establecimiento de estándares y seguridad del agua potable. Las últimas directrices publicadas por la OMS son las acordadas en Génova en el año 1993 y se detallan en



la Tabla 4, es importante mencionar que únicamente se nombran los parámetros que son objeto de este estudio.

**Tabla 4.**

**Directrices de la OMS para la calidad del agua potable**

<b>Sustancia</b>	<b>Unidad</b>	<b>Concentración máxima permisible</b>
Solidos Totales Disueltos	mg/L	1500
Calcio	mg/L	200
Magnesio	mg/L	150
Sulfatos	mg/L	500
Cloruros	mg/L	600
pH	mg/L	6.5 – 9.2

**Fuente: (Organización Mundial de la Salud, 1993)**

## CAPITULO II

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.1. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

##### 2.1.1. Descripción del Área de Estudio

Se visitaron 31 balnearios ubicados a lo largo del Callejón Interandino del Ecuador, se recorrieron cerca de 3215 kilómetros y se recolectaron 34 muestras de agua de fuentes termales. Para la designación de los 33 sitios de muestreo se tomó en cuenta las altas concentraciones de minerales que poseen las fuentes de agua de origen geotérmico que utilizan los balnearios, descritos en el libro “Aguas Termominerales en el Ecuador” publicado por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología en el año 2013.

Además se consideró en su mayoría balnearios que son atractivos turísticos con administración municipal de los diferentes gobiernos cantonales, que son de afluencia masiva e inclusive balnearios administrados por comunidades indígenas organizadas y que gracias al turismo obtienen ingresos monetarios y generan fuentes de trabajo para el desarrollo de las mismas.

En la Tabla 5 se detalla los 34 sitios de muestreo con sus respectivas coordenadas en proyección UTM:

**Tabla 5.**

**Ubicación de los balnearios visitados**

# Muestra	Balneario	Provincia	Zona	Coordenadas (UTM – WGS 84)	
				ESTE	NORTE
1	Guachalá (El Pisque)	Pichincha	17S	814093	10000735
2	Oyacachi	Napo	17S	824139	9976126
3	Cununyacu	Pichincha	17S	785965	9974556
4	El Tingo	Pichincha	17S	785053	9968292
5	La Merced	Pichincha	17S	790013	9967696
6	Lloa	Pichincha	17S	790013	9967696

CONTINÚA



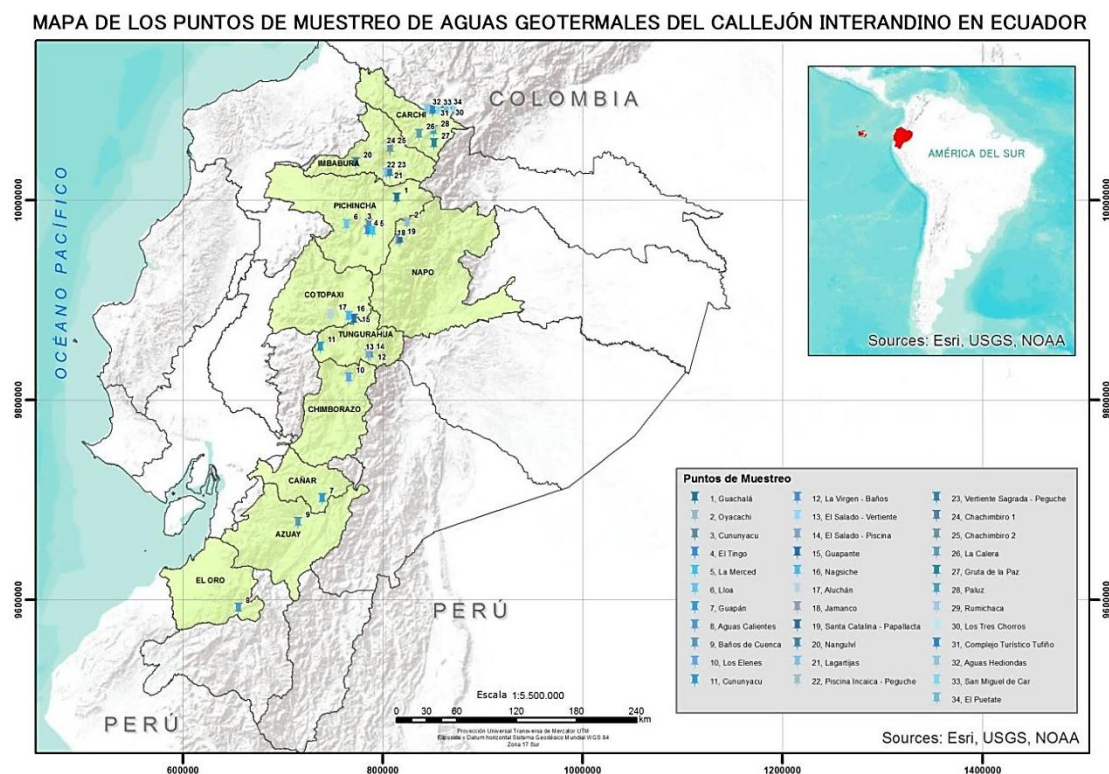
# Muestra	Balneario	Provincia	Zona	Coordenadas (UTM – WGS 84)	
				ESTE	NORTE
7	Guapán	Cañar	17S	739441	9700283
8	Agua Caliente – Portovelo	El Oro	17S	655787	9590583
9	Baños de Cuenca	Azuay	17S	715430	9676754
10	Los Elenes	Chimborazo	17S	765936	9820936
11	Cununyaku (Tungurahua)	Tungurahua	17S	737473	9851990
12	La Virgen (Baños)	Tungurahua	17S	787391	9845229
13	El Salado VT (Baños)	Tungurahua	17S	785649	9844425
14	El Salado Piscina (Baños)	Tungurahua	17S	785713	9844544
15	Guapante	Tungurahua	17S	771281	9879916
16	Nagsiche	Cotopaxi	17S	766225	9882496
17	Aluchán	Cotopaxi	17S	748051	9883963
18	Jamanco	Napo	17S	815447	9958273
19	Santa Catalina (Papallacta)	Napo	17S	817341	9959970
20	Nangulví	Imbabura	17N	773072	0036349
21	Lagartijas	Imbabura	17N	803773	0025723
22	Peguche (Piscina Incaica)	Imbabura	17N	807221	0026545
23	Peguche (Vertiente Sagrada)	Imbabura	17N	807133	0026602
24	Chachimbiro 1	Imbabura	17N	807376	0050803
25	Chachimbiro 2	Imbabura	17N	807181	0050648
26	La Calera	Carchi	18N	168420	0064758
27	Gruta de la Paz	Carchi	18N	183412	0055231
28	Paluz	Carchi	18N	182904	0068362
29	Rumichaca	Carchi	18N	203337	0090277
30	Los Tres Chorros (Neptuno)	Carchi	18N	197294	0090919
31	Complejo Turístico	Carchi	18N	182150	0088453

CONTINÚA



# Muestra	Balneario	Provincia	Zona	Coordenadas (UTM – WGS 84)	
				ESTE	NORTE
	Tufiño				
32	Aguas Hediondas	Carchi	18N	176531	0089613
33	San Miguel de Car	Carchi	18N	188046	0088903
34	El Puetate	Carchi	17S	18N	195466

En la Figura 8 se muestra la ubicación geográfica de los sitios de muestreo localizados en 10 provincias del Ecuador: Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo y Napo, Cañar, Azuay y El Oro.



**Figura 8.** Mapa de Ubicación de los Sitios de Muestreo

### 2.1.2. Toma de Muestras de agua

Para la toma de muestras se utilizó la metodología recomendada por Custodio y Llamas (2001):

La recolección de las muestras de agua se procuró realizarla justo en el punto de emergencia de cada una de las fuentes termales y sin la presencia de precipitación. Se utilizaron botellas plásticas nuevas de polietileno de 500 mL y previamente a la toma, fueron lavadas con la misma agua a muestrear. Se tomó entre 1 litro y 1 litro y medio de muestra de agua (Figura 9).

Para evitar cualquier tipo de alteración en el pH, alcalinidad, dureza y calcio las botellas fueron correctamente cerradas y llenadas en su totalidad. Los autores también recalcan que las muestras deben ser analizadas lo antes posible.

Finalmente las botellas fueron debidamente etiquetadas tomando en cuenta el número de muestra, fuente, ubicación, fecha y determinaciones “*in situ*”, que en este caso fue la temperatura del agua medida con un termómetro de mercurio.



**Figura 9.** Toma de muestras y medición de temperatura “*in situ*”.

### 2.1.3. Determinación de los parámetros físico – químicos

Los parámetros físico-químicos medidos para estas muestras de agua fueron: temperatura, con un termómetro de mercurio, medido en campo. En el laboratorio de Medio Ambiente de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE se realizaron los

análisis de pH con un pHmetro Thermo Scientific Orion 3-Star y Conductividad Eléctrica con un Conductivímetro HACH HQ14d, las mediciones de Sólidos Totales Disueltos (STD) y Residuo Seco Calcinado (RSC) se realizaron de acuerdo al APHA (1995).

Los análisis de laboratorio para obtener los aniones y cationes relevantes de las primeras 24 muestras se realizaron en Havoc, un laboratorio acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano, mientras que, los análisis de las 10 muestras restantes se analizaron en el laboratorio de Medio Ambiente de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE (Figura 10).



**Figura 10.** Determinaciones de parámetros físico-químicos en laboratorio

En la Tabla 6 se detalla los equipos y metodología empleados en la determinación de los parámetros físico-químico de las muestras de aguas termales.

**Tabla 6.**

**Metodología utilizada en la determinación de parámetros físico-químicos**

#	Parámetro	Método/Equipo	Referencia
1	Temperatura	Termométrico, Termómetro de Mercurio Promolab®.	(EPA, 1983) Método 170.1

CONTINUÍA



#	Parámetro	Método/Equipo	Referencia
2	pH	pHmetro portátil Thermo Scientific Orion 3-Star.	NMX-AA-008-SCFI-2000
3	Conductividad eléctrica	Conductivímetro Portátil marca Hach HQ14d	(APHA, 1995) Método 2510B.
4	Sodio y potasio	Ionómetro de Laboratorio inoLab® pH/ION 7320	(WTW, 2012) Medición Ión Selectivo
5	Calcio	Volumétrico, titulación con EDTA 0.01 M, Indicador: Murexida	(APHA, 1998) Método 3500-Ca B.
6	Magnesio	Dureza, Volumétrico, titulación con EDTA 0,01M, Indicador: Negro de Eriocromo	(APHA, 1998) Método 2340 C
		Magnesio: método por cálculo	(DINAMA, 1996) Código 12101
7	Carbonatos (Para aguas con pH > 8.2)	Alcalinidad, Volumétrico, titulación con ácido sulfúrico 0.02 N, Indicador: Fenolftaleína, Naranja de Metilo	(EPA, 1983) Método 310.1
8	Bicarbonatos	Volumétricos titulación con ácido sulfúrico 0,02N, Indicador: Fenolftaleína, Naranja de Metilo	(EPA, 1983) Método 310.1
9	Cloruros	Titulación con nitrato de plata 0.0191N. Indicador: Dicromato de potasio	NTE INEN 0976 (1984)
10	Boro	Método de la Curcumina	(APHA, 1998) Method 4500-B B
11	Fosfatos	Espectrofotometría, Espectrofotómetro Hach DR 5000	(HACH, 2000) Método 8190

CONTINÚA



#	Parámetro	Método/Equipo	Referencia
12	Sulfatos	Espectrofotetría, Espectrofotómetro Hach DR 5000	(EPA, 1983) Method 375.4
13	Nitratos	Espectrofotetría, Espectrofotómetro Hach DR 5000	(HACH, 2000) Método 8051
14	Residuo seco evaporado (RSE) o sólidos totales disueltos (STD)	Gravimetría utilizando estufa Hot – Plate modelo Type 2200 Thermoline	(APHA, 1995) Método 2540B
15	Residuo seco calcinado (RSE)	Gravimetría utilizando mufla Lindberg	(APHA, 1995) Método 2540E

Cabe recalcar que para los análisis de RSE o STD se utilizó la estufa del laboratorio de Medio Ambiente de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE mientras que para los análisis de RSC se utilizó la mufla del laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. La determinación  $\text{CO}_3^{2-}$  se realizó a una sola muestra de agua debido a que el pH fue mayor a 8.2: la muestra de Cununyaku en Tungurahua.

#### 2.1.4. Elaboración de diagramas hidroquímicos

Todos los diagramas fueron realizados con el software libre Diagrammes versión 6.5 desarrollado por el Laboratorio de Hidrogeología de la Université d'Avignon. Se graficaron diagramas triangulares de Piper, poligonales de Stiff y diagramas de columnas verticales logarítmicas de Schoeller Berkloff con el objetivo de clasificar químicamente a las muestras de agua.

La interfaz del programa y el procedimiento de la elaboración de los mencionados diagramas se muestran en el Anexo1.

#### 2.1.5. Elaboración de Mapas

Los mapas fueron elaborados en el software ArcGIS® con la aplicación ArcMap™ versión 9.3 con cartografía base del Instituto Geográfico Militar (IGM) descargada del geo portal de la misma institución y cartografía geológica del



Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico (INIGEMM) también descargada del geo portal de la misma institución. Además se agregaron los diagramas poligonales de Stiff que permitieron apreciar con rapidez la variación de las relaciones entre cationes y aniones de las muestras y la disposición espacial de las familias hidrogeoquímicas.

## **2.2. MODELACION HIDROGEOQUÍMICA**

### **2.2.1. Recopilación e Inventario de Datos**

Se recopiló información de cuatro investigaciones sobre aguas subterráneas termales en el Ecuador con énfasis en los parámetros físico – químicos como: pH, temperatura, conductividad eléctrica y composición iónica. El primero fue un esfuerzo del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), la toma de muestras se realizó en el año 2012 denominado “Aguas Termominerales en el Ecuador”, el segundo fue desarrollado por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), la toma de muestras fue hecha en el año 2009, fue una caracterización geoquímica de 56 fuentes de aguas termales donde se evidenció la composición química e isotópica. Y el tercero fue un estudio realizado por la Facultad de Ciencias químicas de la Universidad Central Del Ecuador del año 1994 donde existe información físico- químico y microbiológico de aguas termales de cuatro provincias (Carchi, Imbabura, Pichincha y Cotopaxi). Finalmente, se utilizó la información levantada en campo de 34 muestras de aguas geotermales que se midieron en el Laboratorio de Medio Ambiente de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE obtenida en el presente estudio.

### **2.2.2. Softwares Utilizados**

Para realizar la modelación hidrogeoquímica se utilizó el software HIDROGEOQUIM y uno de los programas que integran este sistema informático denominado SAMA.

#### **2.2.2.1. HIDROGEOQUIM: Sistema Automatizado para el procesamiento de datos hidroquímicos.**

Su objetivo es procesar datos hidroquímicos con vistas a encontrar propiedades químico-físicas de las aguas que permitan su caracterización espacial desde el punto

de vista hidroquímico y obtener relaciones o índices geoquímicos que faciliten la interpretación de los procesos de interacción de las aguas con el medio físico-geográfico y geológico por donde se mueven; obtener información de carácter hidrológico e hidrogeológico y por último, evaluar la variación temporal de diferentes variables, lo cual brinda información, en forma indirecta, de las características del drenaje en la cuenca (Fagundo , González, Suárez, Fagundo-Sierra, Melián , & Álvarez, 2005).

#### **2.2.2.2. SAMA: Sistema Automatizado para el Monitoreo de la Calidad las Aguas.**

Este software determina ecuaciones de dependencia matemática entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica según un modelo de regresión matemática de 1ro a 5to grado que pasa por el origen de coordenadas. Las ecuaciones de mejor ajuste pueden ser calculadas por tanteo o en forma automática sobre la base de la prueba de Fisher (también pueden introducirse por teclado ecuaciones calculadas mediante otros software). Se estima la composición química a partir de valores de conductividad, comparándose los resultados reales con los obtenidos por correlación matemática mediante un índice de similitud y diagramas hidroquímicos de Stiff. (Álvarez, Vinardell, Fagundo, Reguera, & Cardoso, 1990).

### **2.3. DETERMINACION DE LA CALIDAD DE AGUA**

#### **2.3.1. Análisis de Agua para consumo humano**

Todo estudio sobre el recurso hídrico debe tener un apartado especial sobre la calidad del agua y su posible uso, con los datos obtenidos de los parámetros físico-químicos se procedió al análisis de agua utilizando los límites permisibles propuestos por el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) del Libro VI, Anexo 1 que hace referencia a aguas para consumo humano y uso doméstico. Además se utilizó como otro criterio de comparación las normas de Potabilidad de la Organización Mundial de Salud (OMS).

#### **2.3.2. Análisis de agua para uso agrícola**

Con los datos obtenidos del laboratorio y utilizando las norma Wilcox y Riverside del laboratorio de Salinidad de Suelos de los Estados Unidos se determinó

si las muestras de agua son aptas para riego. Estas normas se basan en la relación de la adsorción de sodio (RAS) y la salinidad de agua.

## CAPITULO III

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Parámetros físicos y químicos de las aguas geotermales muestreadas

En la Tabla 7 se presentan los valores obtenidos de los parámetros físicos – químicos de las muestras de aguas geotermales recogidas, en sus respectivas unidades.

**Tabla 7.**

#### Parámetros físicos de las muestras de aguas geotermales

#	Nombre de la Muestra	Temp °C	pH	CE (μS/cm)	STD (ppm)	RSC (ppm)
1	Guachalá	39	6,39	2555	1424,00	260,00
2	Oyacachi	50	6,60	5505	3184,00	2056,00
3	Cununyacu	26	7,05	1230	660,00	172,00
4	El Tingo	40	7,03	3515	3848,00	972,00
5	La Merced	35	6,50	1210	1912,00	196,00
6	Lloa	29	5,96	1930	1076,00	152,00
7	Guapán	60	7,06	20220	11308,00	10124,00
8	Agua Caliente - Portovelo	52	8,09	3425	4012,00	1840,00
9	Baños de Cuenca	62	7,15	4590	4512,00	2028,00
10	Los Elenes	21	6,91	2340	1576,00	952,00
11	Cununyaku (Tungurahua)	47	8,30	5145	3408,00	1816,00
12	La Virgen (Baños)	53	6,47	5865	4232,00	2712,00
13	El Salado VT (Baños)	40	6,26	7155	6128,00	4156,00
14	El Salado Piscina (Baños)	45	6,60	8970	7932,00	5476,00
15	Guapante	25	7,20	1150	1008,00	540,00
16	Nagsiche	27	6,80	4030	2616,00	1480,00
17	Aluchán	43	6,99	1455	1008,00	732,00
18	Jamanco	61	6,73	7665	4772,00	4060,00
19	Santa Catalina (Papallacta)	56	7,14	2120	1376,00	980,00

CONTINÚA



#	Nombre de la Muestra	Temp °C	pH	CE (μS/cm)	STD (ppm)	RSC (ppm)
20	Nangulví	50	7,39	4850	3016,00	2624,00
21	Lagartijas	18	6,06	456	284,00	116,00
22	Peguche (Piscina Incaica)	23	6,51	1874	1132,00	712,00
23	Peguche (Vertiente Sagrada)	23	6,56	2177	1332,00	900,00
24	Chachimbiro 1	52	7,65	6625	4128,00	3528,00
25	Chachimbiro 2	60	6,42	6795	4076,00	3432,00
26	La Calera	34	6,33	1267	852,00	552,00
27	Gruta de la Paz	40	6,88	2570	1748,00	1232,00
28	Paluz	21	6,22	1085	764,00	508,00
29	Rumichaca	34	7,09	3065	2032,00	1444,00
30	Los 3 Chorros (Neptuno)	25	6,03	819,5	588,00	456,00
31	Complejo Turístico Tufiño	25	6,58	883	640,00	484,00
32	Aguas Hediondas	58	4,96	1833	1572,00	1288,00
33	San Miguel de Car	23	6,21	418	376,00	240,00
34	El Puetate	18	6,68	166,9	208,00	128,00

### 3.2. Composición iónica de las aguas geotermales muestreadas

La composición de cationes y aniones prioritarios de las aguas termales muestreadas en meq/L, ubicadas a lo largo del Callejón Interandino en el Ecuador, se indica en la Tabla 8:

Tabla 8.

## Composición Iónica de las aguas geotermales muestreadas

Muestra	CATIONES (meq/L)					ANIONES (meq/L)				
	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	∑ meq/L	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	∑ meq/L
1	1,11	14,58	1,82	7,96	25,48	0,00	9,58	16,07	0,00	25,64
2	0,82	38,86	4,81	7,75	52,23	2,12	22,82	27,90	0,00	52,84
3	0,31	4,57	1,48	5,95	12,32	0,17	4,79	7,54	0,00	12,50
4	0,58	19,35	1,24	11,23	32,40	0,21	10,70	21,97	0,00	32,88
5	0,28	4,48	1,94	5,89	12,59	0,13	5,63	7,21	0,00	12,97
6	0,35	7,92	3,80	7,19	19,26	0,56	7,04	11,15	0,00	18,75
7	2,33	194,00	3,81	7,91	208,05	0,00	165,00	35,08	0,00	200,08
8	0,87	19,98	8,60	3,89	33,34	1,63	30,96	1,97	0,00	34,55
9	1,39	27,72	4,25	3,39	36,75	1,50	29,58	7,21	0,00	38,29
10	0,18	6,90	4,59	13,90	25,57	18,29	1,41	5,25	0,00	24,95
11	0,12	30,00	12,67	7,77	50,55	2,00	46,00	2,30	0,09	50,38
12	1,53	17,82	0,73	39,83	59,91	20,10	22,25	15,08	0,00	57,44
13	1,43	15,71	14,07	40,50	71,71	17,85	28,20	23,31	0,00	69,36
14	1,77	20,79	15,31	53,00	90,87	67,38	18,37	6,50	0,00	92,25
15	0,26	3,65	1,48	5,93	11,32	1,94	1,15	8,52	0,00	11,62
16	0,98	14,70	0,56	25,08	41,32	0,33	10,72	29,20	0,00	40,25
17	0,17	8,13	1,32	3,83	13,46	0,79	6,05	6,90	0,00	13,74
18	3,55	53,87	12,84	3,21	73,48	6,19	64,01	5,41	0,00	75,61
19	0,15	10,23	9,61	0,75	20,74	7,81	12,68	1,08	0,00	21,57
20	0,20	27,90	11,49	7,51	47,10	6,98	41,32	1,18	0,00	49,48
21	0,12	0,96	0,70	2,80	4,57	0,04	0,84	3,70	0,00	4,59
22	0,35	5,97	3,09	8,40	17,81	0,28	6,48	10,33	0,00	17,09
23	0,59	7,17	2,30	10,78	20,86	0,11	8,17	12,30	0,00	20,58
24	5,39	42,10	4,90	6,96	59,34	1,19	52,97	8,20	0,00	62,36
25	4,68	41,91	4,19	6,79	57,58	1,17	48,78	9,38	0,00	59,33
26	0,74	3,19	3,71	7,07	14,71	0,65	1,81	12,09	0,00	14,55
27	1,91	6,79	1,38	17,78	27,86	0,07	4,48	23,22	0,00	27,78
28	0,12	1,43	3,41	5,77	10,73	0,07	1,10	9,45	0,00	10,62
29	2,46	11,63	1,49	14,82	30,41	0,14	7,30	24,44	0,00	31,87
30	0,70	2,49	2,01	3,74	8,95	0,38	1,19	7,13	0,00	8,70
31	0,62	3,03	2,26	3,68	9,59	2,93	2,56	4,43	0,00	9,93
32	1,45	6,50	4,38	5,80	18,13	14,64	3,35	0,40	0,00	18,39
33	0,27	1,15	0,90	2,00	4,32	0,78	0,90	2,48	0,00	4,16
34	0,03	0,31	0,43	1,00	1,77	0,09	0,32	1,37	0,00	1,78

En la Tabla 9 se muestran los resultados de los análisis de nitratos, fosfatos y boro, compuestos también analizados durante la ejecución de este proyecto:

**Tabla 9.**

**Resultados de Nitratos, fosfatos y boro de las aguas geotermales muestreadas**

Muestra	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (mg/L)	Boro (mg/L)	Muestra	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (mg/L)	Boro (mg/L)
1	<0,3	0,50	0,82	18	<0,3	2,07	19,78
2	0,40	2,00	3,32	19	<0,3	0,68	3,98
3	<0,3	1,00	0,15	20	<0,3	0,79	3,96
4	<0,3	1,30	6,85	21	<0,3	0,69	<0,5
5	<0,3	1,10	0,12	22	<0,3	0,78	2,44
6	<0,3	1,60	2,15	23	<0,3	1,04	3,29
7	0,60	1,10	2,3	24	0,70	2,26	30,12
8	<0,3	<0,5	3,95	25	3,45	7,80	11,94
9	<0,3	2,20	0,34	26	0,65	5,80	0,57
10	<0,3	1,50	0,13	27	0,60	7,30	3,43
11	<0,3	<0,5	0,45	28	0,75	6,20	0,00
12	<0,3	1,90	10,48	29	0,95	6,25	1,45
13	<0,3	2,10	5,78	30	1,70	6,00	0,64
14	<0,3	1,20	8,54	31	1,00	6,50	0,20
15	0,30	<0,5	0,96	32	4,60	7,90	1,78
16	<0,3	2,20	5,2	33	1,05	4,10	0,48
17	<0,3	1,10	4,64	34	2,10	5,00	2,12

### 3.3. Comprobación de la exactitud de los resultados

Para la comprobación de la exactitud de los resultados analíticos se utilizó el control de acuerdo a la metodología de APHA (1995), Mediante la siguiente formula [8]:

$$\% \text{ Error} = \left[ \frac{\sum_{L}^{meq} \text{cationes} - \sum_{L}^{meq} \text{aniones}}{\sum_{L}^{meq} \text{cationes} + \sum_{L}^{meq} \text{aniones}} \right] * 10 \quad (8)$$

Dónde:

Cationes:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  (meq/L)

Aniones:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$

La Tabla 10 indica los porcentajes admisibles para cada rango en la suma de aniones y cationes:

**Tabla 10.**

**Porcentajes permisibles de diferencia en los resultados analíticos**

Suma de Cationes (meq/L)	% Diferencia Aceptable
0,0 – 3,0	± 0,2 %
3,0 – 10,0	± 2 %
10 – 800	± 2,5 %

Fuente: (APHA, 1995)

Una vez realizado este control se llegó a comprobar que los resultados de los análisis obtenidos están dentro de los porcentajes admisibles como se observa en la Tabla 11.

**Tabla 11.**

**Porcentaje de Error de los resultados analíticos**

#	Nombre de la Muestra	$\Sigma$ Cationes (meq/L)	$\Sigma$ Aniones (meq/L)	% error
1	Guachalá	25,48	25,64	0,31
2	Oyacachi	52,23	52,84	0,57
3	Cununyacu	12,32	12,50	0,71
4	El Tingo	32,40	32,88	0,73
5	La Merced	12,59	12,97	1,48
6	Lloa	19,26	18,75	1,35
7	Guapán	208,05	200,08	1,95
8	Agua Caliente – Portovelo	33,34	34,55	1,78
9	Baños de Cuenca	36,75	38,29	2,05
10	Los Elenes	25,57	24,95	1,24

CONTINUÍA





#	Nombre de la Muestra	$\Sigma$ Cationes (meq/L)	$\Sigma$ Aniones (meq/L)	% error
11	Cununyaku (Tungurahua)	50,55	50,38	0,16
12	La Virgen (Baños)	59,91	57,44	2,11
13	El Salado VT (Baños)	71,71	69,36	1,67
14	El Salado Piscina (Baños)	90,87	92,25	0,75
15	Guapante	11,32	11,62	1,28
16	Nagsiche	41,32	40,25	1,31
17	Aluchán	13,46	13,74	1,04
18	Jamanco	73,48	75,61	1,43
19	Santa Catalina (Papallacta)	20,74	21,57	1,97
20	Nangulví	47,10	49,48	2,46
21	Lagartijas	4,57	4,59	0,17
22	Peguche (Piscina Incaica)	17,81	17,09	2,07
23	Peguche (Vertiente Sagrada)	20,86	20,58	0,67
24	Chachimbiro 1	59,34	62,36	2,48
25	Chachimbiro 2	57,58	59,33	1,50
26	La Calera	14,71	14,55	0,58
27	Gruta de la Paz	27,86	27,78	0,15
28	Paluz	10,73	10,62	0,53
29	Rumichaca	30,41	31,87	2,34
30	Los 3 Chorros (Neptuno)	8,95	8,70	1,41
31	Complejo Turístico Tufiño	9,59	9,93	1,71
32	Aguas Hediondas	18,13	18,39	0,72
33	San Miguel de Car	4,32	4,16	1,91
34	El Puetate	1,77	1,78	0,19

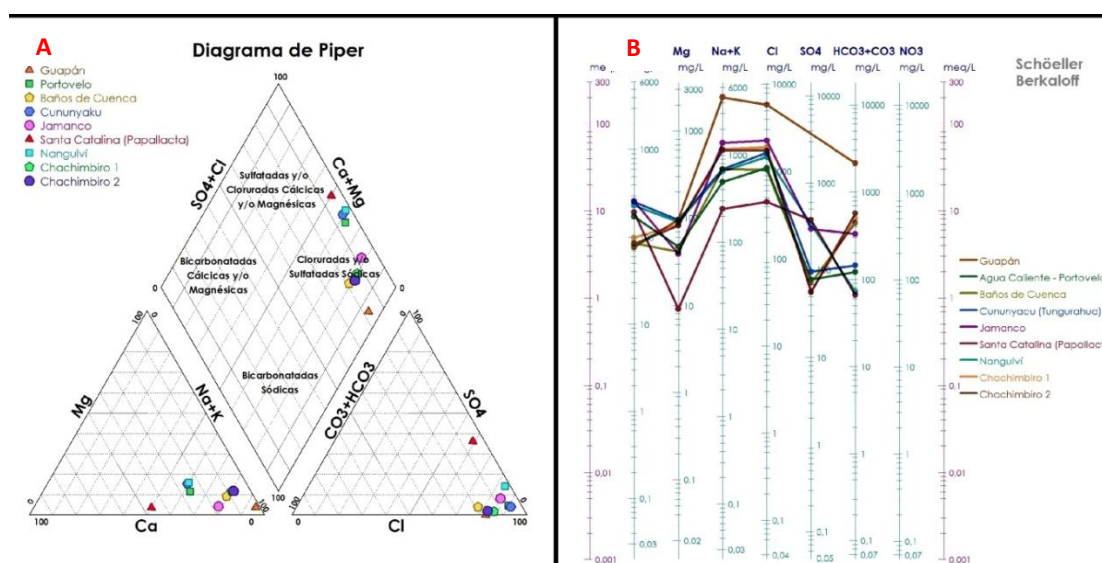
### 3.4. Clasificación de las aguas geotermales por su composición química

#### 3.4.1. Por los Iones Dominantes

Mediante la utilización de diagramas de hidroquímicos de Piper y Schoeller-Berkaloff las aguas geotermales muestreadas se clasificaron de la siguiente manera:

##### 3.4.1.1. Cloruradas Sódicas

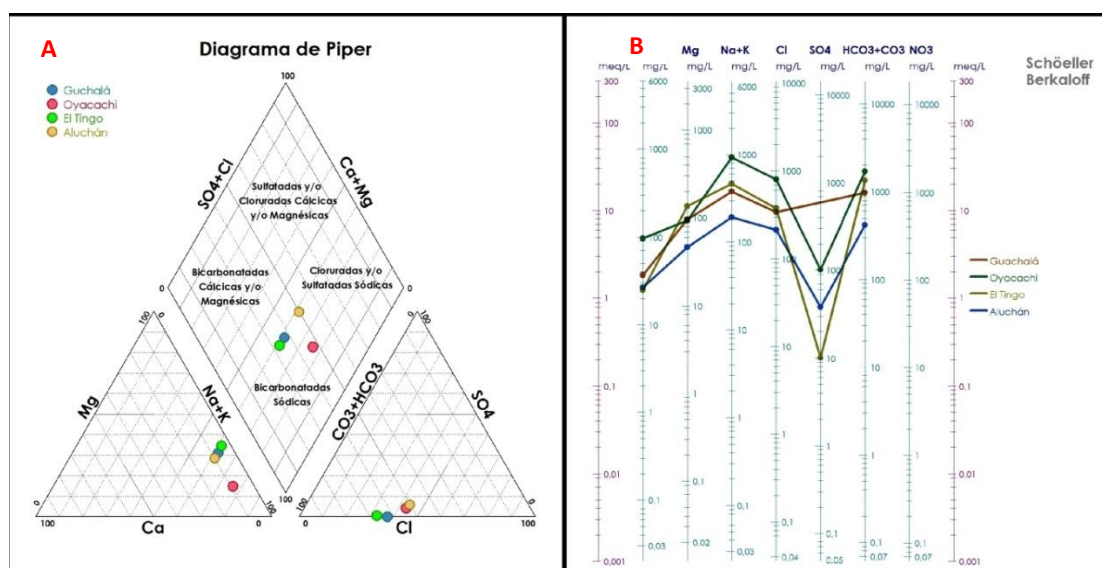
Las muestras de aguas geotermales de esta familia pertenecieron a los balnearios de Chachimbiro 1, Chachimbiro 2, Nangulví, Jamanco, Santa Catalina (Papallacta), Cununyaku (Tungurahua), Guapán, Baños de Cuenca y Portovelo. Los diagramas de Piper y Schoeller realizados (Figura 11A) confirman la composición de estas aguas, que aparecen proyectadas a la derecha del romboide. El diagrama de Schoeller-Berkaloff (Figura 11B) presentó a Guapán con la más alta concentración de iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , las muestras presentaron altos valores de temperatura y conductividad eléctrica que varían entre los 62- 50°C y 20220- 3425  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente, también altos valores de STD > 4000 mg/L con el caso especial de Guapán (11308 mg/L), esta fuerte mineralización es el resultado de una prolongada interacción roca-agua y en algunos casos han sufrido procesos de evaporación (Inguaggiato, Hidalgo, Beate, & Bourquin, 2010). Según Custodio & Llamas (2001), estas aguas se caracterizan por tener un mayor grado de evolución y permanencia en el acuífero.



**Figura 11.** (A) Diagrama de Piper de aguas Cloruradas Sódicas, (B) Diagrama de Schoeller-Berkaloff de Aguas Cloruradas Sódicas

### 3.4.1.2. Bicarbonatadas Sódicas

Las muestras de aguas geotermales de esta familia pertenecieron a los balnearios de Aluchán, Oyacachi, Guachalá y El Tingo. Los diagramas de Piper y Schoeller realizados (Figura 12A) confirman la composición de estas aguas, que aparecen proyectadas en parte inferior del romboide. El diagrama de Schoeller-Berkaloff (Figura 12B) presentó a Oyacachi con la más alta concentración de iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Na}^+$ , las muestras presentaron valores de temperatura y conductividad eléctrica superiores a  $40^\circ\text{C}$  y valores entre los 5505- 1455  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente. Por lo general estas aguas poseen un pH neutro o ligeramente ácido (6,39 – 7,05), tienen una mineralización que varía entre 3848 -1008 mg/L. Para Custodio & Llamas (2001), estas aguas se caracterizan por ser hipertermales por su origen profundo con un menor grado de evolución.

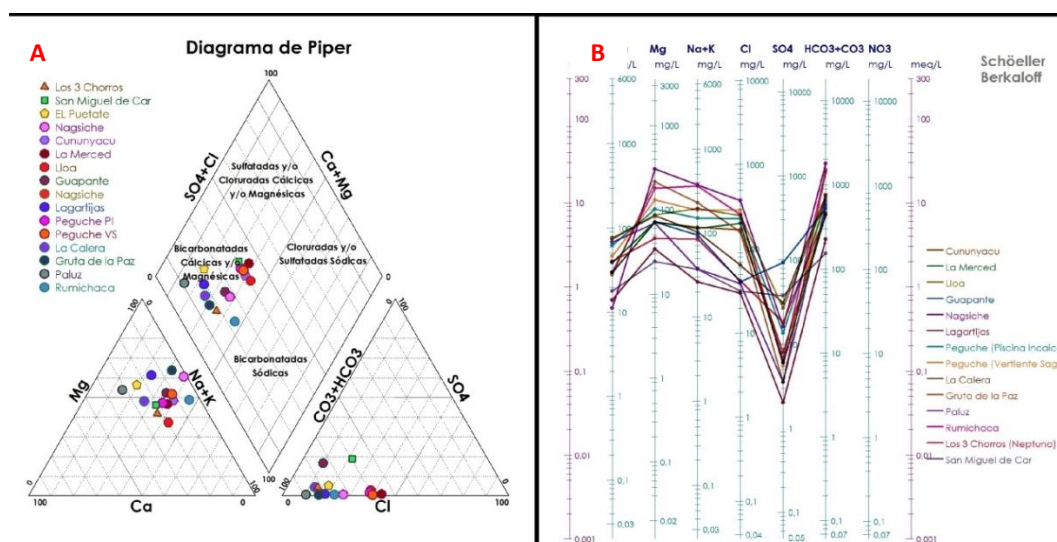


**Figura 12.** (A) Diagrama de Piper de aguas Bicarbonatadas Sódicas, (B) Diagrama de Schoeller-Berkaloff de Aguas Bicarbonatadas Sódicas.

### 3.4.1.3. Bicarbonatadas Magnésicas

Las muestras de aguas geotermales de esta familia pertenecieron a los balnearios de Cununyacu, La Merced, Lloa, Lagartijas, Peguche, La Calera, Gruta de la Paz, Paluz, Rumichaca, Los Tres Chorros, San Miguel de Car, El Puetate, Guapante y Nagsiche. Los diagramas de Piper y Schoeller realizados (Figura 13A) confirman la composición de estas aguas, que aparecen proyectadas a la izquierda del romboide, mientras que el diagrama de Schoeller Berkaloff (Figura 13B) presentó a Nagsiche

con la más alta concentración de iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , las muestras registraron valores bajos de temperatura y conductividad eléctrica inferiores a  $40^\circ\text{C}$  y valores entre  $4030 - 168,9 \mu\text{S/cm}$  respectivamente, por lo tanto poseen bajos de mineralización que varía entre  $2616-208\text{mg/L}$ . Para Custodio & Llamas (2001), estas aguas son probablemente de acuíferos poco profundos, de zonas donde hay acumulación de sedimentos y serían aguas con un menor grado de evolución y menor tiempo de permanencia en el acuífero.

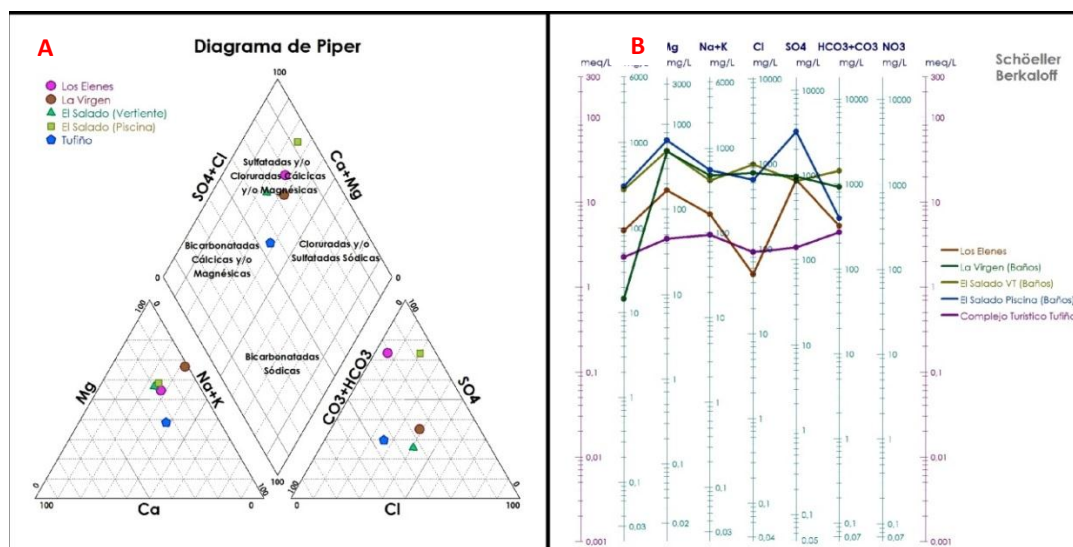


**Figura 13.** (A) Diagrama de Piper de aguas Bicarbonatadas Magnésicas, (B) Diagrama de Schoeller-Berkaloff de Aguas Bicarbonatadas Magnésicas.

#### 3.4.1.4. Sulfatadas Magnésicas

Las muestras de aguas geotermales de esta familia pertenecen a los balnearios de El Salado VT (Baños), El Salado Piscina (Baños), La Virgen (Baños), Los Elenes, y Tufiño. Los diagramas de Piper y Schoeller realizados (Figura 14A) confirman la composición de estas aguas, que aparecen proyectadas en la parte superior del romboide, mientras que el diagrama de Schoeller Berkaloff (Figura 14B) presenta a El Salado (Piscina) con la más alta concentración de iones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , las muestras registran valores de temperatura que varían entre  $53 - 21^\circ\text{C}$  y conductividad eléctrica entre  $8970 - 883 \mu\text{S/cm}$  respectivamente, presentan valores de mineralización entre  $7932 - 640\text{mg/L}$  y valores de pH entre básicos y ligeramente ácidos. Para Toth (1984) estas aguas deben su evolución y predominancia del ion  $\text{SO}_4^{2-}$  por consecuencia de largos recorridos en los cuales han atravesado principalmente yesos

y al mayor tiempo de permanencia en los acuíferos razón por la cual existen altos valores de mineralización.



**Figura 14.** (A) Diagrama de Piper de aguas Sulfatadas Magnésicas, (B) Diagrama de Schoeller-Berkaloff de Aguas Sulfatdas Magnésicas.

### 3.4.1.5. Sulfatadas Sódicas

La muestra de agua geotermal de esta familia pertenece al balneario de Aguas Hediondas, como se muestra en el Diagrama de Piper (Figura 15A), presenta una temperatura de 58°C, CE de 1833  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , debido pH ácido (4,96) y a que estas aguas tienen un olor característico a huevos podridos que se hace perceptible en el aire, estas tienen un alto contenido sulfuro de hidrogeno  $\text{H}_2\text{S}$  y se las puede clasificar como aguas sulfuradas. Según Suárez & Fagundo (1994), en estas aguas se existen una clase de algas que forman conglomerados lentos denominados “biogleas”. También se encuentran microorganismos aerobios que consumen azufre, denominados “sulfurarias”, las cuales son bacterias saprofitas autótrofas.





#	Nombre de la Muestra	CE (μS/cm)	RAS	RAS Aj	% Na
3	Cununyacu	1230	2,37	5,69	39,65
4	El Tingo	3515	7,75	24,02	61,51
5	La Merced	1210	2,27	5,66	37,82
6	Lloa	1930	3,38	9,46	42,95
7	Guapán	20220	80,15	248,47	94,37
8	Agua Caliente – Portovelo	3425	8,00	16,79	62,54
9	Baños de Cuenca	4590	14,18	32,61	79,2
10	Los Elenes	2340	2,27	5,90	27,7
11	Cununyaku (Tungurahua)	5145	9,39	20,65	59,58
12	La Virgen (Baños)	5865	3,96	13,06	32,3
13	El Salado VT (Baños)	7155	3,01	10,83	23,9
14	El Salado Piscina (Baños)	8970	3,56	11,03	24,83
15	Guapante	1150	1,90	4,74	34,54
16	Nagsiche	4030	4,10	14,37	37,95
17	Aluchán	1455	5,07	11,66	61,74
18	Jamanco	7665	19,01	47,53	78,15
19	Santa Catalina (Papallacta)	2120	4,49	7,64	50,03
20	Nangulví	4850	9,05	18,10	59,65
21	Lagartijas	456	0,72	1,37	23,43
22	Peguche (Piscina Incaica)	1874	2,49	6,98	35,5
23	Peguche (Vertiente Sagrada)	2177	2,80	7,85	37,25
24	Chachimbiro 1	6625	17,29	43,22	80,02
25	Chachimbiro 2	6795	17,89	44,72	80,93
26	La Calera	1267	1,37	3,85	26,74
27	Gruta de la Paz	2570	2,19	7,02	31,21
28	Paluz	1085	0,67	1,74	14,46

CONTINÚA



#	Nombre de la Muestra	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	RAS	RAS Aj	% Na
29	Rumichaca	3065	4,07	13,03	46,35
30	Los 3 Chorros (Neptuno)	819,5	1,47	3,38	35,69
31	Complejo Turístico Tufiño	883	1,76	3,86	38,05
32	Aguas Hediondas	1833	2,88	4,03	43,85
33	San Miguel de Car	418	0,96	1,72	32,9
34	El Puetate	166,9	0,37	0,44	19,39

Un vistazo general permitió apreciar que las muestras de agua geotermales que presentaron altos valores de CE tuvieron un índice RAS superior a 10 y según Ayers & Westcot (1976) son aguas con riesgo de alcalinización o sodificación que generan una progresiva disminución de la permeabilidad del suelo.

### 3.6. Clasificación del agua de riego

Las normas utilizadas tienen por objeto evaluar de manera global la calidad del agua de riego y caracterizarlas desde un punto de vista práctico:

#### 3.6.1. Norma Wilcox

Los diagramas de esta norma muestran en el eje de las abscisas la salinidad del agua representada en la CE en unidades de ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) mientras que en el eje de las ordenadas se representa la proporción de  $\text{Na}^+$  con relación al total de catión en porcentaje.

Para evitar la redundancia en la discusión, se ha dispuesto el análisis de la calidad de agua para riego según su clasificación por iones dominantes, debido a la similitud de las propiedades físico-químicas que presentaron las aguas de la siguiente manera:

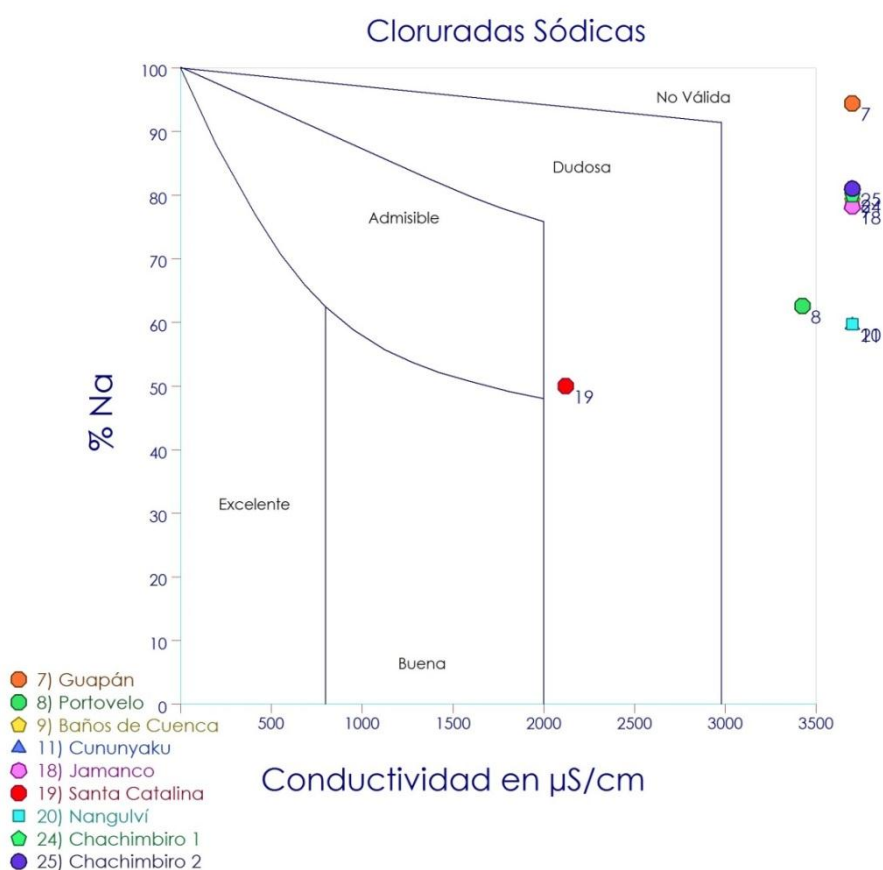
##### 3.6.1.1. Cloruradas Sódicas

Como se observa en la Figura 16 las muestras de aguas geotermales de esta familia cayeron en la clasificación de No Valida debido a que estas poseen una CE superior a 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  por lo tanto son aguas con un alto nivel de salinidad y que



según Vidal (1993) la presencia de sales muy solubles como el NaCl es perjudicial para los cultivos, también se observó que todas las muestras presentan porcentajes de  $\text{Na}^+$  superiores al 50 % por lo tanto un alto contenido de  $\text{Na}^+$  es perjudicial debido a que este elemento tiende a acumularse en los primeros centímetros de profundidad, donde sus agregados experimentan procesos de hinchamiento que logran taponar los poros del suelo reduciendo de esta manera su permeabilidad superficial (Ayers & Westcot, 1976).

La excepción es la muestra 19 (Santa Catalina-Papallacta) que presenta una clasificación de Dudosa pero que debido a su composición iónica esta agua presenta los mismos problemas descritos con anterioridad, por lo tanto se puede decir que las aguas Cloruradas Sódicas no son válidas como agua de riego según la norma Wilcox.

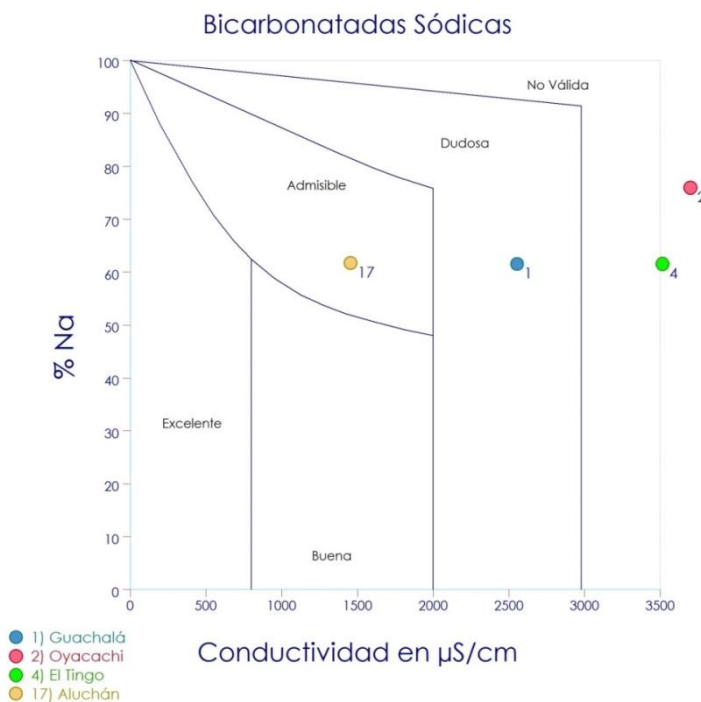


**Figura 16.** Diagrama de Wilcox de muestras de aguas Cloruradas Sódicas

### 3.6.1.2. Bicarbonatadas Sódicas

Como se aprecia en la Figura 17 las muestras que pertenecen a los balnearios de Oyacachi y El Tingo cayeron en la clasificación de No Válida debido a su alta salinización representada por su CE que supera los 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , debido a que la presencia de sales solubles como el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  tienden a permanecer en solución provocando una progresiva concentración de sales. Una alta concentración conduce a un incremento de la presión osmótica (PO) de la solución del suelo, mientras mayor sea la salinización mayor es la PO que las raíces de las plantas han de superar para extraer el agua disminuyendo la disponibilidad del agua para planta y apareciendo como resultado los síntomas del déficit hídrico (Vidal, 1993). Se observó que todas las muestras superan el 50 % en su contenido de  $\text{Na}^+$  y como se mencionó anteriormente esto es un síntoma de pérdida de estructura del suelo volviéndolo impermeable.

También se puede apreciar que la muestra de Guachalá cayó en la clasificación de Dudosa lo cual indica que tampoco es apta como agua de riego mientras que la muestra de Aluchán cayó en la clasificación de Admisible la cual podría utilizarse como agua de riego tomando en consideración su alto contenido de  $\text{Na}^+$ .

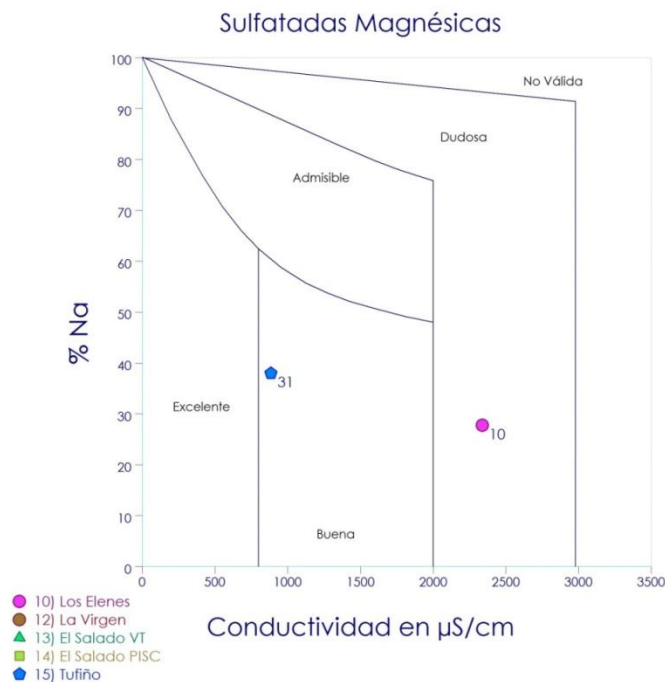


**Figura 17.** Diagrama de Wilcox de muestras de aguas Bicarbonatadas Sódicas

### 3.6.1.3. Sulfatadas Magnésicas

Como se observa en la Figura 18 las muestras de los balnearios de El Salado y La Virgen cayeron en la clasificación de No Válida debido a su alta salinización representado por su CE que supera los 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ya que la presencia de sales muy solubles como  $\text{MgSO}_4$  es perjudicial para los cultivos. La excesiva acumulación de sales en la zona radicular del suelo afecta a la absorción hídrica del cultivo mediante mecanismos osmóticos aumentando el consumo de energía para la extracción del agua y provocando pérdidas de rendimiento y déficit hídrico para el cultivo (Ayers & Westcot, 1987). A pesar que ninguna de las muestras supera el 50 % de contenido en  $\text{Na}^+$  hay q que tomar en cuenta que en aguas con altos contenidos en sulfatos existen limitaciones en el desarrollo radicular y en la producción, que se agrava con la utilización de abonos ricos en sulfatos (Pavón , 2003).

También se observó que la muestra del balneario Los Elenes cayó en la clasificación de Dudosa lo cual indica que tampoco es apta como agua de riego mientras que la muestra de Tufiño cayó en la clasificación de Buena, la cual podría utilizarse como agua de riego tomando en consideración su alto contenido de  $\text{Mg}^{2+}$  en especial cuando existe cultivos con síntomas de amarilleo de las hojas debido a que el magnesio forma parte de la clorofila, interviene en la formación de hidratos de carbono, aumenta la resistencia de la planta a un medio adversa y facilita la fijación del nitrógeno atmosférico (Jiménez, 2002).



**Figura 18.** Diagrama de Wilcox de muestras de aguas Sulfatadas Magnésicas

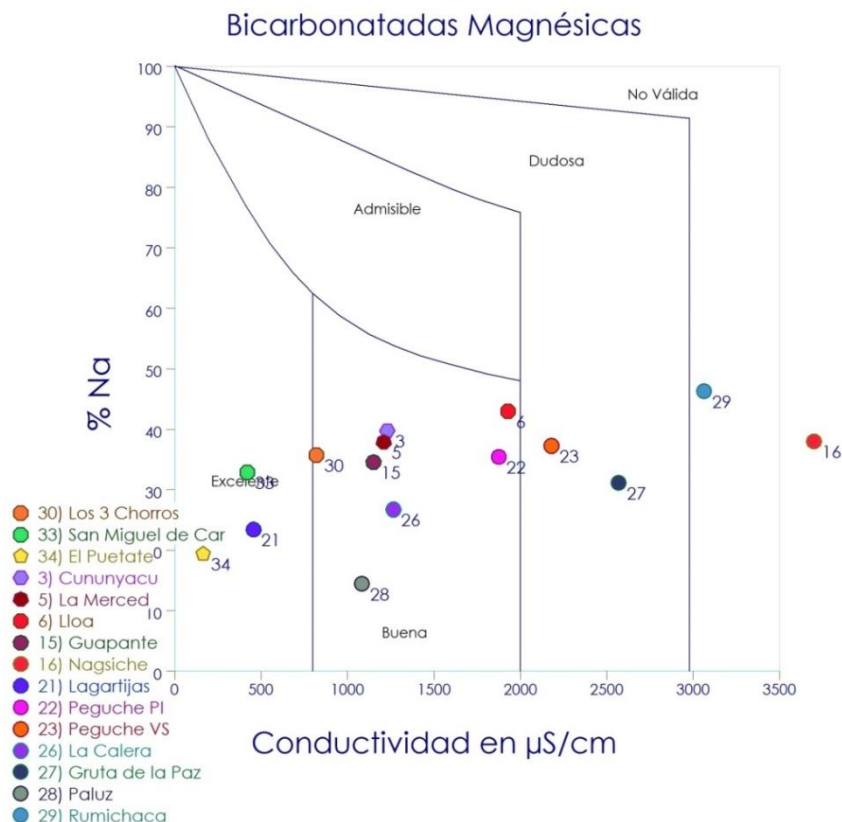
#### 3.6.1.4. Bicarbonatadas Magnésicas

Como se aprecia en la Figura 19 todas las muestras tienen un porcentaje menor al 50% de contenido en  $Na^+$ , ya que el catión dominante es el  $Mg^{2+}$  a pesar de que este ion es beneficioso para las plantas, un exceso de concentración pueden afectar a cultivos dependiendo del grado de tolerancia de los mismos.

En cuanto a su clasificación se observó que las muestras 16 y 29 se las considera como No Valida debida a sus altos valores de CE, además las muestras 23 y 27 cayeron en la clasificación de Dudosa por lo tanto estas aguas no son aptas para riego.

Por otra parte la muestras 3, 5, 6, 15, 22, 26,28, y 30 cayeron en la clasificación de Buena por lo que podrían ser utilizadas como agua de riego siempre y cuando se tomen en cuenta los el riesgo de alcalinización por la alta concentración de iones como  $HCO_3^-$  y  $Mg^{2+}$ .

Finalmente, se pude observar que las muestras 21, 33 y 34 cayeron en la clasificación de Excelente por lo que pueden ser utilizados como agua de riego.

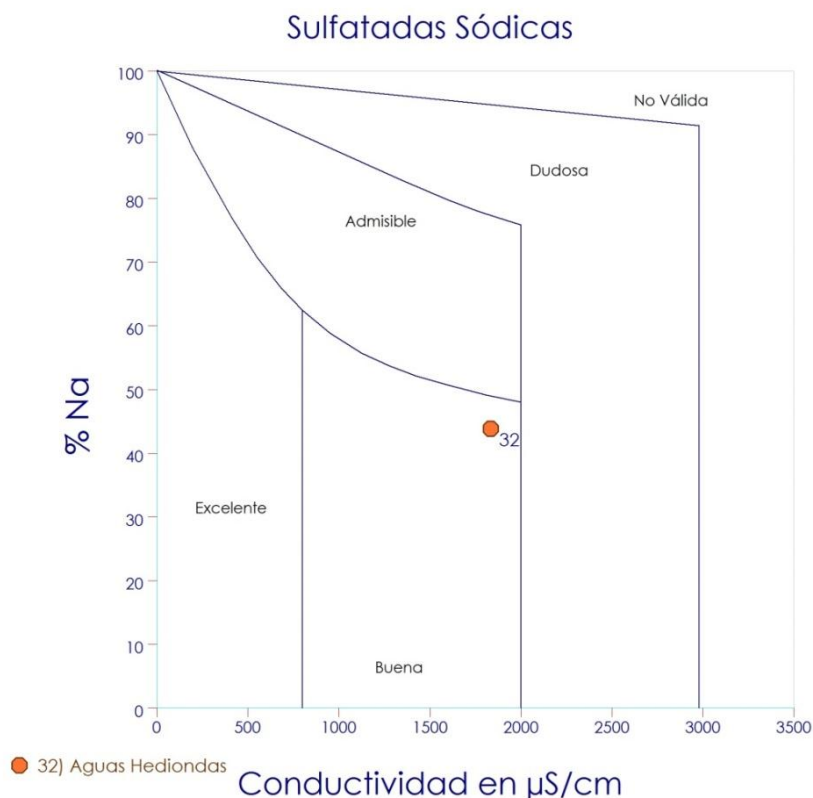


**Figura 19.** Diagrama de Wilcox de muestras de aguas Bicarbonatadas Magnésica

### 3.6.1.5. Sulfatadas Sódicas

Como se aprecia en la Figura 20 la muestra de agua de Aguas Hediondas cayó en la clasificación de Buena debido a que posee un contenido de  $\text{Na}^+$  menor al 50 % además su CE es de 1833  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Además, su alto contenido en azufre resulta beneficioso en la fertilización de cultivos dependiendo de los requerimientos de los cultivos, al tipo de suelo en el cual crecen así como a la cantidad de biomas acumulada por las plantas. Según Wainwright (1984) el azufre tiene efectos favorables como incremento en la resistencia de cultivos al frío e incremento en la tolerancia a la sequía incluso ayuda al control de ciertos patógenos del suelo. A pesar del resultado hay que recalcar que una alta concentración de ion sulfato es perjudicial para el desarrollo radicular de los cultivos.



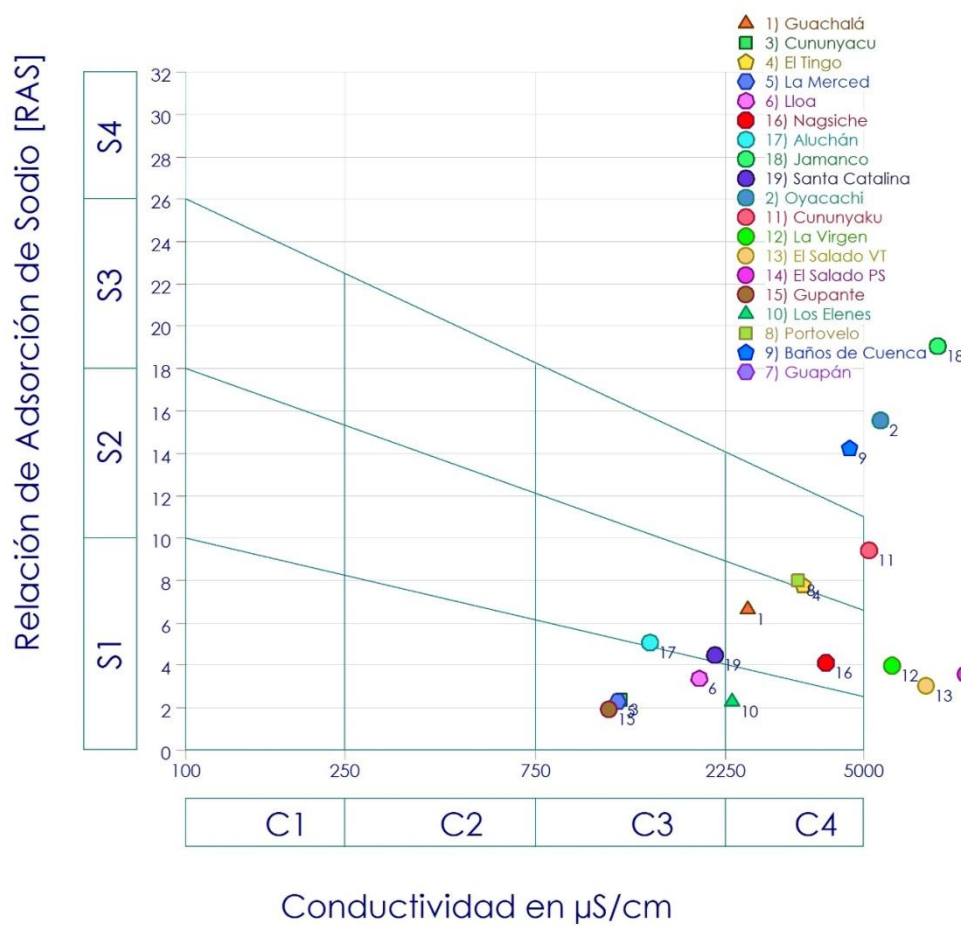
**Figura 20.** Diagrama de Wilcox de muestras de aguas Bicarbonatadas Magnésicas

De las 34 muestras recolectadas el 44,12% fueron aguas denominadas “No Válidas” según el criterio de la norma Wilcox, siendo las aguas Cloruradas Sódicas las más abundantes, el 14,71% cayeron en la clasificación de “Dudosa” por lo que estas aguas y las anteriores no son aptas para uso agrícola; apenas el 2,94% se la considera como “Admisible”, mientras que el 24,41% se las considera como “Buena” siendo las aguas Bicarbonatadas Magnésicas las más abundantes, finalmente, el 8,82% tuvieron la clasificación de “Excelente” y pertenecieron a los balnearios de Lagartijas, San Miguel de Car y El Puetate esto debido a su bajos valores de Conductividad eléctrica y Sodicidad. Las tres últimas clasificaciones podrían considerarse aptas para uso agrícola.

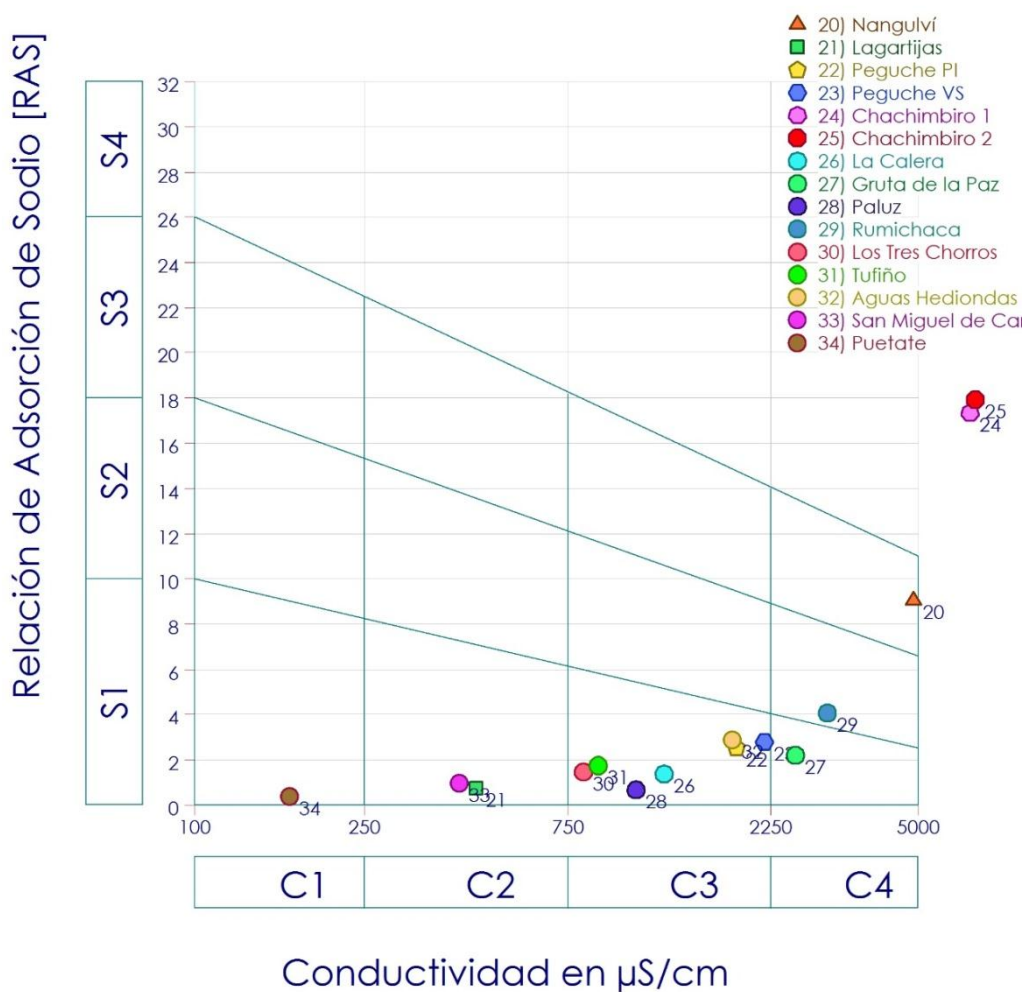
### 3.6.2. Norma Riverside

Para la clasificación de aguas de riego según esta norma, se toma en cuenta la conductividad expresada en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a  $25^{\circ}\text{C}$  y la relación de adsorción de sodio (RAS). Con estos valores y mediante los diagramas de las Figuras 21 y 22 se determina la calidad del agua.

El análisis se ha dispuesto de manera general para todas las muestras para evitar la redundancia en la discusión.



**Figura 21.** Diagrama de Riverside de muestras de aguas geotermales



**Figura 22.** Diagrama de Riverside de muestras de aguas geotermales

En la Tabla 13 se resume la clasificación según la norma Riverside y su respectiva interpretación. La clasificación resaltada en color verde pertenecen a aguas de buena calidad aptas para el riego y representa el 8,82 % de las aguas muestreadas.

La clasificación resaltada en color amarillo pertenece a aguas utilizables para el riego con precauciones, deben usarse solo en suelos muy permeables o con buen drenaje y en cultivos tolerables a la salinidad y no sensibles al sodio y representan el 70,58% de las muestras de agua.

Finalmente la clasificación resaltada en rojo son aguas no aptas para el riego debido a su alta salinidad y alto riesgo de acumulación de sodio.



**Tabla 13.****Interpretación de la calidad de agua de riego según su salinidad y contenido de sodio**

Balnearios	Clasificación	Interpretación Salinidad	Interpretación Contenido en Na <sup>+</sup>
34) El Puetate	C <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos, Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad.	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos, Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
21) Lagartijas, 33) San Miguel de Car	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>	Agua de salinidad media, apta para el riego, En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos, Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
3) Cununyacu, 5) La Merced, 6) Lloa, 15) Guapante 22) Peguche (Piscina Incaica) 23) Peguche (Vertiente Sagrada) 26) La Calera 28) Paluz 30) Los 3 Chorros 31) Tufiño 32) Aguas Hediondas	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos, Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
17) Aluchán 19) Santa Catalina Papallacta	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy	Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad, Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo,

CONTINÚA



		tolerantes a la salinidad.	corrigiendo en caso necesario.
10) Los Elenes Gruta de la Paz	27) $C_4S_1$	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego, Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos, Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
1)Guachalá 16) Nagsiche Rumichaca	29) $C_4S_2$	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego, Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.	Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad, Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario.
4) El Tingo 8) Portovelo Nangulví	20) $C_4S_3$	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego, Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.	Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo, Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo, También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego.
9) Baños de Cuenca	$C_4S_4$	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego, Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.	Agua con contenido muy alto de sodio, No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.
12) La Virgen (Baños)	$C_5S_2$	Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.	Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad, Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario.

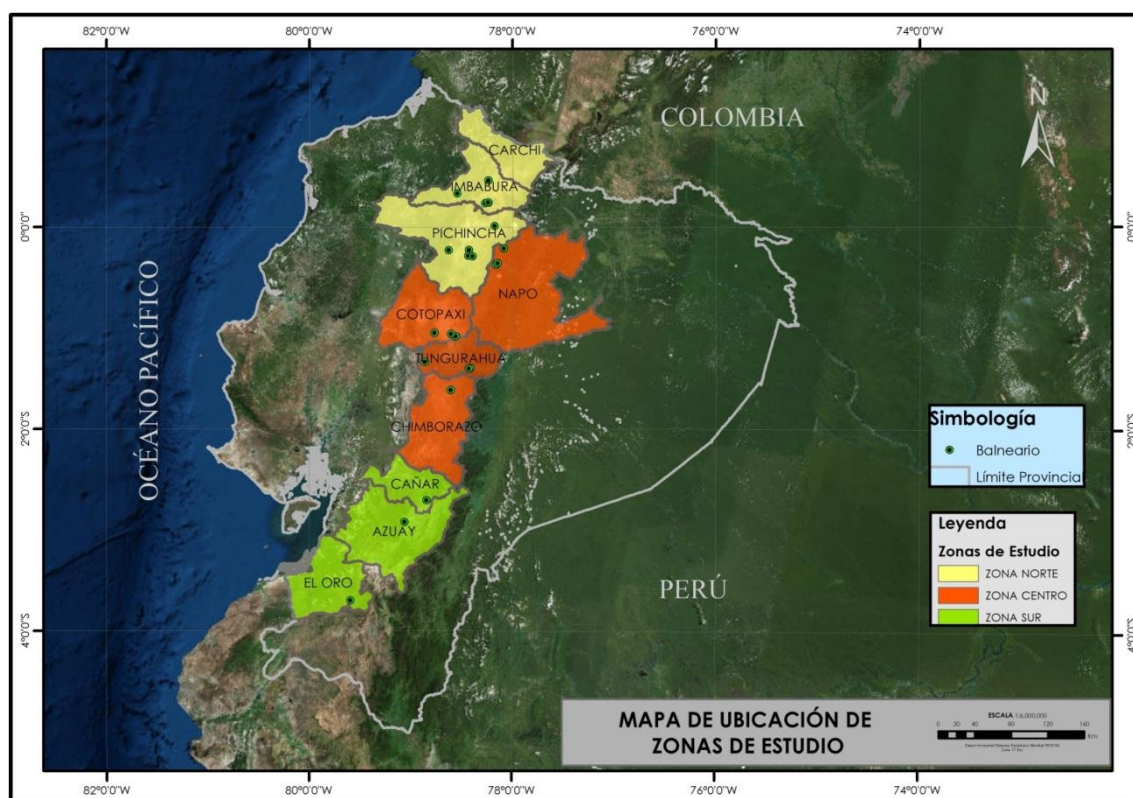


11) Cununyaku	$C_5S_3$	Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.	Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo, Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo, También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego.
2) Oyacachi	$C_5S_4$	Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.	Agua con contenido muy alto de sodio, No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.
13) El Salado (Vertiente) 14) El Salado (Piscina) 18) Jamanco 24) Chachimbiro 1 25) Chachimbiro 2 7) Guapán	$C_6S_2$	Agua de salinidad excesiva, no aconsejable para riego.	Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad, Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario.

Una vez determinada la calidad del agua para riego utilizando dos normas se observó que la norma Riverside es más completa debido a que establece 6 grados de riesgo de salinidad y 4 grado de riesgo por alcalinización proporcionando un total de 24 categorías en las cuales se aconseja el tipo de suelo en las que pueden ser utilizadas. Sin embargo, la principal semejanza entre las dos normas radicó en que las aguas Bicarbonatadas Magnésicas son aptas para el uso agrícola en ambos casos mientras que las aguas Cloruradas Sódicas no lo fueron.

### 3.7. Caracterización Hidrogeoquímica

Para un mejor análisis e interpretación de los datos hidrogeoquímicos se agrupó a las provincias del área de estudio en tres zonas: Zona Norte (Carchi, Imbabura y Pichincha), Zona Centro (Cotopaxi, Napo, Tungurahua y Chimborazo) y la Zona Sur (Cañar, Azuay y El Oro), esto debido a su semejanza entre la geología y para evitar la redundancia en la discusión (Figura 23).



**Figura 23.** Mapa de Ubicación de Zonas de Estudio

### 3.7.1. Zona Sur

#### 3.7.1.1. Características hidrogeológicas de las aguas geotermales en la Zona Sur,

En el Cuadro 1 se indican las características hidrogeológicas donde tienen su basamento las aguas geotermales de los balnearios de Agua Caliente - Portovelo, Baños de Cuenca y Guapán.

#### Cuadro 1.

#### Características hidrogeológicas de la Zona Sur

	<b>El Oro</b>	<b>Azuay</b>	<b>Cañar</b>
	<b>Aguas-Calientes (Portovelo)</b>	<b>Baños De Cuenca</b>	<b>Guapán</b>
<b>Unidad</b>	Formación Celica (Kc)	Formación Turi (PI T)	Formación Azogues (MPIY)
<b>Litología Predominante</b>	Tobas andesíticas y dacíticas muy meteorizadas y lavas andesíticas	Tobas, areniscas, conglomerados	Arcillas, tobas, areniscas, conglomerados
<b>Permeabilidad</b>	Muy Baja	Baja a Media	Media
<b>Tipo de Permeabilidad</b>	Porosidad por fisuración	Intergranular	Intergranular
<b>Periodo</b>	Oligoceno	Plioceno	Mio-Plioceno

Fuente (INAMHI, 2014)

#### 3.7.1.2. Características generales de la composición iónica de las aguas de los balnearios de la Zona Sur

En la Tabla 14 se presenta los valores de los principales parámetros físico químicos medidos en sus respectivas unidades, recopilados de diferentes estudios realizados en los años 2009, 2012 y 2015 por el IG – EPN, el INAMHI y la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE respectivamente. En dicha tabla se muestra la composición química de las aguas de los balnearios en la Zona Sur en meq/L.

A través de la Tabla 14 se percibió que el mayor aporte en aniones le corresponde al ion cloruro y en cationes el ion sodio. Se las considera aguas hipotermales ya que los valores de temperatura son mayores a 40 °C según el

criterio del INAMHI (2013). Además sus altos valores de conductividad eléctrica indica la fuerte mineralización que existe en estas aguas, Los valores de pH entre 6,80y 8,09 son valores característicos de aguas subterráneas según Custodio y Llamas (2001).

**Tabla 14.**

**Parámetros físico-químicos de tres muestras de agua geotermal de los Balnearios de la Zona Sur**

El Oro												
#	Nombre de la Muestra	Temp °C	pH	Conduct, (μS /cm)	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub> <sup>3-</sup>
1	Portovelo (IG EPN)	52,4	7,94	2930	0,35	19,07	7,63	0,01	5,19	22,27	0,45	0,00
2	Portovelo (INAMHI)	45,1	7,30	2900	0,46	17,62	7,06	0,08	5,70	22,37	0,33	0,00
3	Portovelo (ESPE)	52	8,09	3425	0,87	19,98	8,60	3,89	1,63	30,96	1,97	0,00
Azuay												
4	Baños de Cuenca (INAMHI)	71,6	7,10	3900	1,46	25,03	3,25	6,47	4,87	24,19	10,77	0,00
5	Baños de Cuenca (IG EPN)	74,5	6,83	4130	1,39	28,20	9,78	1,98	4,79	23,72	10,50	0,00
6	Baños de Cuenca (ESPE)	62	7,15	4590	1,39	27,72	4,25	3,39	1,50	29,58	7,21	0,00
Cañar												
7	Guapán (IG EPN)	46,9	6,79	16500	3,19	158,34	4,51	5,71	1,32	136,15	41,40	0,00
8	Guapán (INAMHI)	55	7,50	16440	3,01	129,09	2,38	9,93	0,18	132,53	34,74	0,00
9	Guapán (ESPE)	60	7,06	20220	2,33	194,00	3,81	7,91	0,00	165,00	35,08	0,00

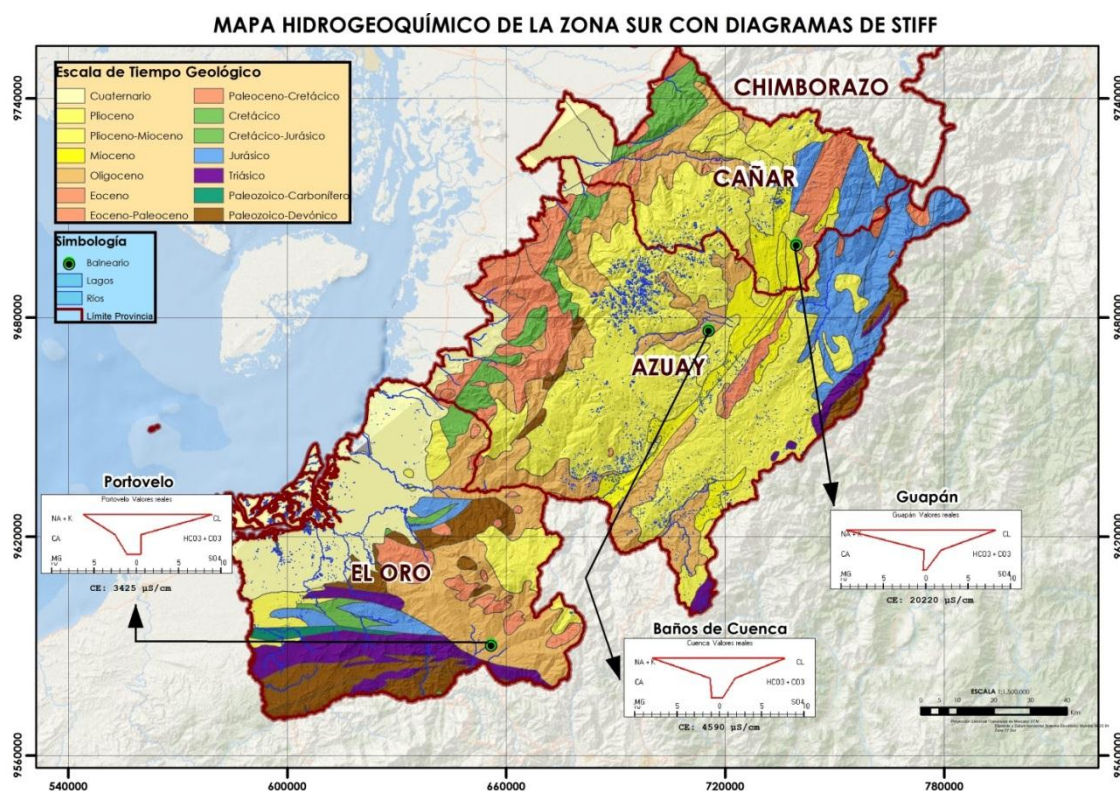
**3.7.1.3. Variación espacial de la composición química de las aguas geotermales en la Zona Sur**

Los resultados de la variación espacial de la composición química de las aguas en la zona sur del Ecuador se muestra en la Figura 24, Las aguas de esta zona tienen contenidos relativos mayoritarios del anión Cl<sup>-</sup> y los cationes Na<sup>+</sup>, lo cual indica que son aguas del tipo Cloruradas Sódicas, caracterizadas por ser acuíferos antiguos de mayor profundidad lo cual resalta la geología remanente de la extinta actividad



volcánica en la época del Mioceno en esta zona (Aspden & Litherland, 1992), asimismo estas aguas poseen una alta salinidad resultado de una prolongada interacción roca- agua, este factor se relaciona con la permeabilidad de la litología existente en la zona la cual es muy baja, como consecuencia de esta característica, el tiempo de interacción del agua con los minerales es más lento y, por tanto, la cantidad de minerales disueltos es mayor (Leonarte, 2005).

Para Suarez & Fagundo (1994) las aguas cloruradas terrestres de elevada mineralización se originan por disolución de halita (NaCl) ya que este mineral es el más elevado en rocas sedimentarias, lo cual se relaciona con la litología predominante de areniscas y conglomerados que existe en la Zona Sur.

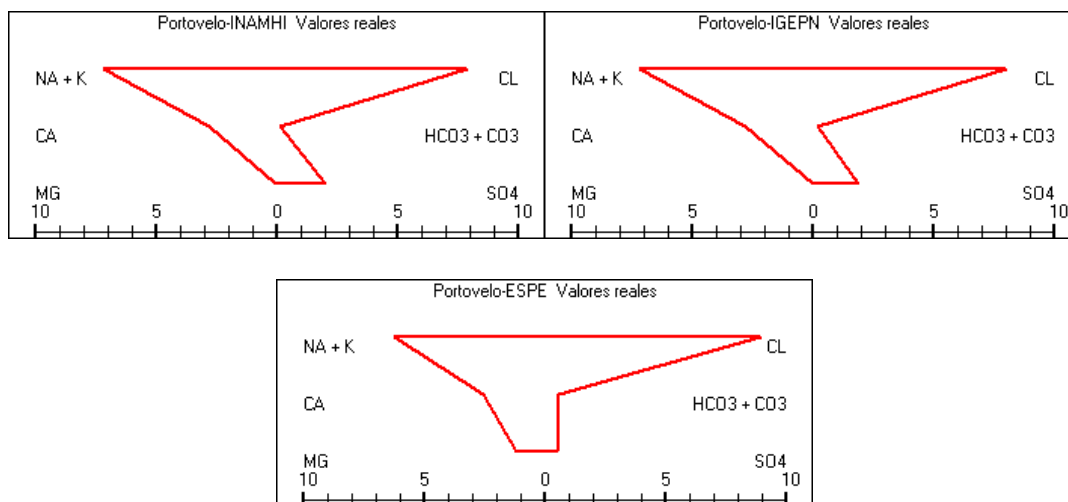


**Figura 24.** Mapa Hidrogeoquímico de la Zona Sur

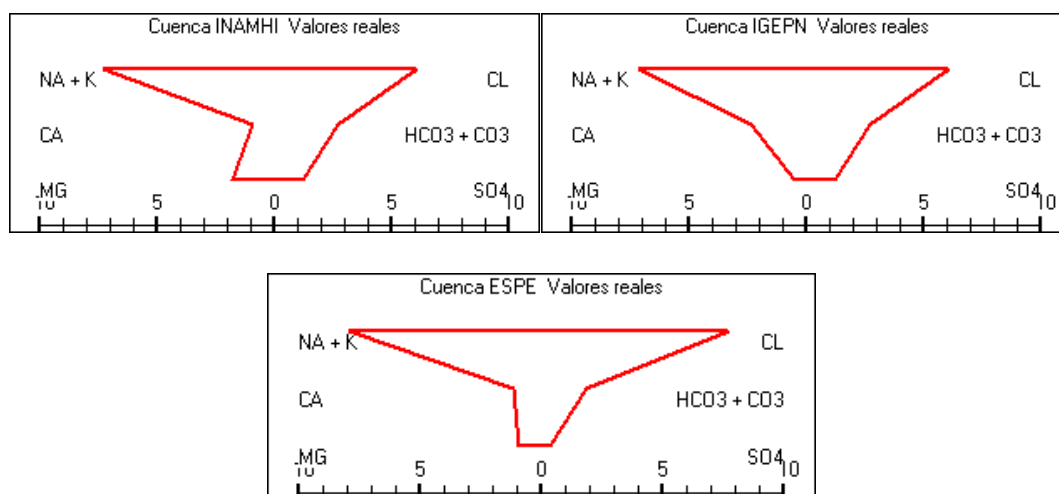
#### 3.7.1.4. Representación gráfica mediante Diagramas de Stiff

La composición iónica de agua geotermal del balneario se refleja en los diagramas de Stiff y se observó que son muy similares uno del otro y tuvieron forma de “T” (Figura 25, 26, 27) y según Hounslow (1995) esta forma es característica del

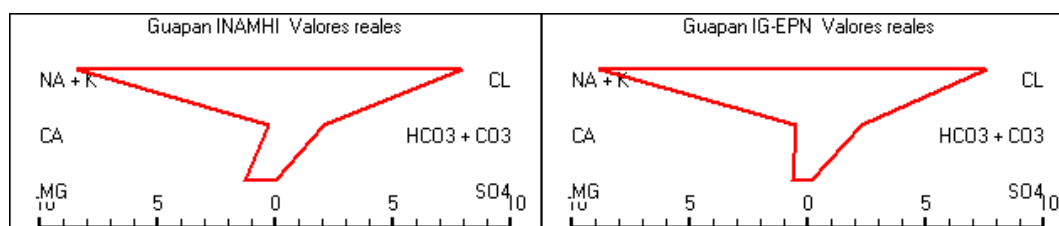
agua de mar debido a su alta salinización, pero en este estudio esta forma se le ha asociado a aguas alto contenido de mineralización y altas temperatura.



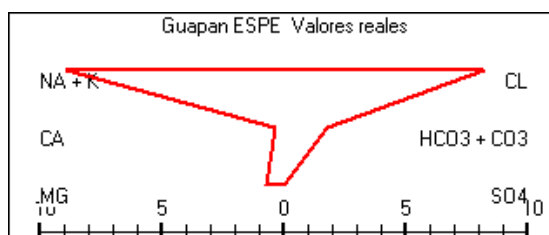
**Figura 25.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermiales del Balneario Agua Caliente – Portovelo



**Figura 26.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermiales del Balneario Baños de Cuenca







**Figura 27.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario Guapán

### 3.7.1.5. Estimación de la composición química de las aguas mediante mediciones de conductividad eléctrica y modelos de correlación matemática

Los modelos de correlación matemática permiten realizar un seguimiento de la calidad de las aguas mediante las simples mediciones sistemáticas de la conductividad eléctrica, Los fundamentos del método han sido publicados por Fagundo y colaboradores en varios trabajos (Fagundo-Sierra, Fagundo, González, & Suárez, 2001).

Los datos para la obtención de los modelos fueron procesados mediante SAMA, El modelo empleado fue el siguiente:

- Ecuación polinómica de segundo y tercer grado que pasa por el origen de coordenadas  $y = b_1X + b_2X^2$ ,  $y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$  ya que estos mostraban los mejores valores de coeficiente de correlación, y según Bisquerra (1989) cuando existen valores de “r” entre 0,8 se habla de una correlación “Muy Alta, Además se procedió a la validación del modelo tomando como criterio de bondad del ajuste el Índice de Similitud (IS).

Los modelos de correlación matemática por ecuaciones de ajuste de tercer grado para la estimación de la composición química del agua geotermal de los balnearios de la Zona Sur se muestran en la Tabla 15:

Tabla 15.

**Modelos de correlación matemática obtenidos por ecuaciones de ajuste de 2do y 3er grado para la estimación de la composición química de los balnearios en la Zona Sur**

Balneario	$y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$	r	Correlación
Portovelo	$HCO_3^- = -0,0024 CE + 8,8597*10^{-7}CE^2 - 2,6756*10^{-12} CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Cl^- = 0,0125CE - 5,2770*10^{-6}CE^2 + 1,2739*10^{-9} CE^3$	0,97	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = 0,0138CE - 5,2720*10^{-6}CE^2 + 4,0129*10^{-10} CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Ca^{2+} = 0,0009CE + 1,0088*10^{-6}CE^2 - 1,5891*10^{-10} CE^3$	0,92	Muy Alta
	$Mg^{2+} = -0,0037CE + 5,3952*10^{-7}CE^2 + 2,6122*10^{-10} CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = 0,0048CE + 1,6275*10^{-6}CE^2 - 3,4953*10^{-10} CE^3$	0,80	Muy Alta
Balneario	$y = b_1X + b_2X^2$	r	Correlación
Baños de Cuenca	$HCO_3^- = 0,0098 CE - 1,8032*10^{-6}CE^2$	0,98	Muy Alta
	$Cl^- = 0,0036CE + 5,8588*10^{-7}CE^2$	0,92	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = 0,0069CE - 1,4313*10^{-6}CE^2$	0,97	Muy Alta
	$Ca^{2+} = 0,0035CE - 5,2135*10^{-7}CE^2$	0,23	Baja
	$Mg^{2+} = -0,0050CE - 9,5350*10^{-7}CE^2$	0,50	Moderada
	$Na^+ + K^+ = 0,0104CE - 8,8030*10^{-6}CE^2$	0,80	Muy Alta
Balneario	$y = b_1X + b_2X^2$	r	Correlación
Guapán	$HCO_3^- = 0,0048 CE - 1,5284*10^{-7}CE^2$	0,50	Moderada
	$Cl^- = 0,0081CE + 1,3844*10^{-9}CE^2$	0,99	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = 0,0002CE - 1,1987*10^{-8}CE^2$	0,64	Alta
	$Ca^{2+} = 0,0003CE - 5,2135*10^{-9}CE^2$	0,23	Baja
	$Mg^{2+} = -0,0009CE - 2,2869*10^{-8}CE^2$	0,42	Baja
	$Na^+ + K^+ = 0,0053CE + 2,1614*10^{-6}CE^2$	0,90	Muy Alta

### 3.7.1.6. Índices de similitud para la validación de los modelos de correlación matemática

Luego de determinar las ecuaciones de regresión matemática entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica, se crean dos tipos de ficheros de datos: uno con aquellos datos que se utilizarán para determinar las ecuaciones matemáticas mediante los diferentes modelos y otro con datos nuevos (de los últimos

años), con el objetivo de validar los correspondientes modelos matemáticos. Mediante el uso de test estadísticos se determina si existen diferencias significativas entre los diferentes modelos, seleccionándose los mejores y más sencillos.

Los índices de similitud entre la concentración iónica real y la concentración iónica estimada por modelación se muestran en la tabla 16:

**Tabla 16.**

**Índices de similitud obtenidos y validación de los modelos de correlación matemática de los balnearios de la Zona Sur**

<b>Balneario</b>	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup></b>	<b>Índice de Similitud</b>
Portovelo	1,95	31,41	1,71	8,61	3,84	21,10	0,97
Baños de Cuenca	7,29	28,95	1,65	5,38	2,69	29,31	0,94
Guapán	35,83	168,34	0,01	3,90	8,04	200,48	0,99

La Zona Sur se caracterizó porque presentaron aguas del tipo Cloruradas Sódicas lo cual es un reflejo de su geología remanente del Mioceno por lo que son aguas con mayor tiempo de interacción roca – agua con altas temperaturas y altos valores de STD, los diagramas de Stiff muestran una forma de “T” típico de aguas excesivamente mineralizadas, en cuanto a los modelos de regresión matemática, se determinaron ecuaciones de 2<sup>do</sup> y 3<sup>er</sup> grado el 16,67% presentó una correlación “Baja”, el 11,11% “Moderada”, el 5,56% “Alta” y finalmente, el 66,67% una correlación “Muy Alta” debido a la variabilidad de los valores de la composición química a través de los años, los índices de similitud no son menores de 0,9 por lo que las formulas determinadas son aptas para la estimación de la composición iónica de futuras muestras,

### **3.7.2. Zona Centro**

#### **3.7.2.1. Características hidrogeológicas de las aguas geotermales en la Zona Centro**

En el Cuadro 2 se observa las características hidrogeológicas donde tienen su basamento las aguas geotermales de los balnearios de las provincias de Chimborazo, Tungurahua Cotopaxi y Napo:

## Cuadro 2.

## Características hidrogeológicas de la Zona Centro

	<b>Chimborazo</b>	<b>Tungurahua</b>		
	<b>Los Elenes</b>	<b>La Virgen y El Salado</b>	<b>Guapante</b>	<b>Cununyaku</b>
<b>Unidad</b>	Depósito Aluvial (Da)	Lavas del Tungurahua (Q T)	Depósito Aluvial (Da)	Volcánicos Pisayambo (MP I P)
<b>Litología Predominante</b>	Arcillas, Areniscas y Conglomerados	Basalto, Toba, Esquistos cristalinos	Gravas, Arenas, Material Laharítico	Andesita, Basalto, Piroclastos, Aglomerados
<b>Permeabilidad</b>	Alta	Baja a Media	Media a Alta	Muy Baja
<b>Tipo de Permeabilidad</b>	Intergranular	Fisuración	Intergranular	Fisuración
<b>Periodo</b>	Cuaternario	Cuaternario	Cuaternario	Mio-Plioceno
	<b>Cotopaxi</b>		<b>Napo</b>	
	<b>Aluchán</b>	<b>Nagsiche</b>	<b>Oyacachi,</b>	<b>Santa Catalina (Papallacta), Jamanco</b>
<b>Unidad</b>	Volcánicos Pisayambo (MP I P)	Depósito Aluvial (Da)	Volcánicos Indiferenciados	Volcánicos Pisayambo (MP I P)
<b>Litología Predominante</b>	Flujos de Lava, Toba Andesita, Piroclastos, Aglomerados	Gravas, Arenas, Material Laharítico	Piroclastos, lava	Andesita, Basalto, Piroclastos, Aglomerados
<b>Permeabilidad</b>	Muy Baja	Media a Alta	Baja a Media	Muy Baja
<b>Tipo de Permeabilidad</b>	Fisuración	Intergranular	Fisuración	Fisuración
<b>Periodo</b>	Mio-Plioceno	Cuaternario	Cuaternario	Mio-Plioceno

### 3.7.2.2. Características generales de la composición iónica de las aguas de los balnearios de la Zona Centro

En la Tabla 17 se presentan los valores de los principales parámetros físico-químicos medidos en sus respectivas unidades recopilados de diferentes estudios realizados en los años 1994, 2009, 2012 y 2015 por la Universidad Central, el IG – EPN, el INAMHI y la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE respectivamente. En dicha tabla se muestra la composición química de las aguas de los balnearios en la Zona Centro en meq/L.

En la Zona Centro se registraron valores de temperatura en un amplio rango desde 21 a 61°C, los balnearios de Los Elenes, Guapante y Nagsiche presentan temperaturas menores a 30°C por lo que son consideradas hipotermales, mientras que el resto de balnearios presentaron temperaturas superiores a 40°C y se consideran aguas hipertermales según el criterio del INAMHI (2013). Los valores de pH varían entre 6,2 a 8,3 y CE entre 950 a 8970  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los valores de STD están entre 1008 hasta 7932 mg/L del balneario de El Salado lo que indica una mineralización fuerte según el criterio de Maraver *et al.* (2003).

En la Tabla 17 se muestra de manera general que las aguas son muy estables con pocos cambios en la composición iónica con el tiempo.

**Tabla 17.**

#### Parámetros físico-químicos de tres muestras de agua geotermal de los Balnearios de la Zona Centro

Chimborazo												
#	Nombre de la Muestra	Temp °C	pH	Conduct, ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>
1	Los Elenes (IG EPN)	20,1	7,50	1804,00	0,27	8,09	4,24	9,93	15,01	0,70	7,20	0,00
2	Los Elenes (INAMHI)	22,7	7,80	1938,00	0,30	6,91	4,20	10,71	18,74	0,81	6,07	0,00
3	Los Elenes (ESPE)	21	6,91	2340,00	0,18	6,90	4,59	13,90	18,29	1,41	5,25	0,00
Tungurahua												
4	Guapante (IG EPN)	24,3	7,13	950,00	0,34	4,16	1,52	4,94	1,84	0,67	8,80	0,00

CONTINÚA



5	Guapante (INAMHI)	25	7,7	1000,00	0,29	3,18	1,51	4,84	2,39	0,64 3	6,52	0,00
6	Guapante (ESPE)	25	7,20	1150,00	0,26	3,65	1,48	5,93	1,94	1,15	8,52	0,00
7	La Virgen (IG EPN)	52,7	6,43	4780,00	1,99	21,77	10,24	33,23	31,88	11,0 1	26,20	0,00
8	La Virgen (INAMHI)	52,8	7,50	5090,00	1,86	18,64	3,97	40,72	23,74	11,4 6	21,21	0,00
9	La Virgen (ESPE)	53	6,47	5865,00	1,53	17,82	0,73	39,83	20,10	22,2 5	15,08	0,00
10	El Salado (IG-EPN)	45,6	6,40	6770,00	2,12	24,19	19,60	66,98	63,24	22,5 9	25,60	0,00
11	El Salado (INAMHI)	55	7,30	6560,00	1,66	17,32	7,14	65,94	68,88	18,8 7	20,39	0,00
12	El Salado (ESPE)	45	6,60	8970,00	1,77	20,79	15,31	53,00	67,38	18,3 7	6,50	0,00
13	Cununyaku (IG-EPN)	47	8,37	4300,00	0,20	27,87	14,94	0,08	5,53	36,3 7	1,00	0,00
14	Cununyaku (INAMHI)	40,3	8,10	4530,00	0,16	24,38	13,64	0,04	7,90	36,6 3	0,66	0,00
15	Cununyaku (ESPE)	47	8,30	5145,00	0,12	30,00	12,67	7,77	2,00	46,0 0	2,30	0,09
<b>Cotopaxi</b>												
16	Aluchán (UCE)	42,8	6,86	1157,00	0,20	11,30	1,98	0,43	1,36	3,16	8,32	0,00
17	Aluchán (INAMHI)	44,8	8,20	1269,00	0,26	7,88	1,75	2,22	2,71	2,82	6,69	0,00
18	Aluchán (ESPE)	43	6,99	1455,00	0,17	8,13	1,32	3,83	0,79	6,05	6,90	0,00
19	Nagsiche (UCE)	22,4	7,45	2680,00	1,07	18,70	3,52	20,33	0,96	6,64	32,07	0,00
20	Nagsiche (ESPE)	27	6,80	4030,00	0,98	14,70	0,56	25,08	0,33	10,7 2	29,20	0,00
<b>Napo</b>												
21	Oyacachi (IG EPN)	46,5	6,53	4850,00	0,85	42,56	4,94	4,53	1,77	18,4 3	33,00	0,00
22	Oyacachi (INAMHI)	50,1	7,2	5000,00	0,97	37,53	3,61	6,82	2,11	19,2 9	29,76	0,00
23	Oyacachi (ESPE)	50	6,60	5505,00	0,82	38,86	4,81	7,75	2,12	22,8 2	27,90	0,00
24	Jamanco (IG EPN)	60,8	6,23	6820,00	1,09	49,43	14,68	0,67	6,27	52,8 0	7,45	0,00
25	Jamanco (INAMHI)	74	7,80	7470,00	1,45	47,95	12,82	1,21	5,96	60,8 1	6,80	0,00

CONTINÚA



26	Jamanco (ESPE)	61	6,73	7665,00	3,55	53,87	12,84	3,21	6,19	64,0 1	5,41	0,00
27	Papallacta (IG EPN)	54,2	7,08	2170,00	0,16	12,28	8,31	0,14	7,75	11,3 2	1,65	0,00
28	Papallacta (INAMHI)	53	7,60	2890,00	0,16	12,08	11,21	0,40	8,96	16,6 2	1,36	0,00
29	Papallacta (ESPE)	56	7,14	2120,00	0,15	10,23	9,61	0,75	7,81	12,6 8	1,08	0,00

### 3.7.2.3. Variación espacial de la composición química de las aguas geotermales en la Zona Centro

Los resultados de la variación espacial sobre la composición química de las aguas en la zona centro se muestran en la Figura 28. Las aguas en esta zona se clasifican en 4 tipos de familia:

Bicarbonatadas Magnésicas (Guapante y Nagsiche), típicas de aguas que son probablemente poco profundas de zonas donde hay acumulación de sedimentos y baja evolución química (Custodio & Llamas, 2001) y que coinciden con su baja mineralización, temperatura y litología sedimentaria del cuaternario.

Sulfatadas Magnésicas (El Salado, La Virgen y Los Elenes), las altas concentraciones de sulfatos se debe la presencia de esquistos cristalinos existentes en la litología predominante en esta zona, Cloruradas Sódica (Papallacta, Cununyaku y Jamanco) y Bicarbonatadas Sódicas (Aluchán y Oyacachi). Las fuentes de aguas termales en esta zona están ubicadas dentro de la Cordillera Real y asociadas a la actividad volcánica producida en el periodo Cuaternario por los estrato- volcanes existentes caracterizados por sus flujos de lava y piroclastos de composición basálticas a riolítica (Aspden & Litherland, 1992), en el caso de los balnearios La Virgen y El Salado (Volcán Tungurahua), Cununyaku, (Volcán Chimborazo), Jamanco, Papallacta y Oyacachi (Formación Volcánicos Pisayambo).



MAPA HIDROGEOQUÍMICO DE LA ZONA CENTRO CON DIAGRAMAS DE STIFF

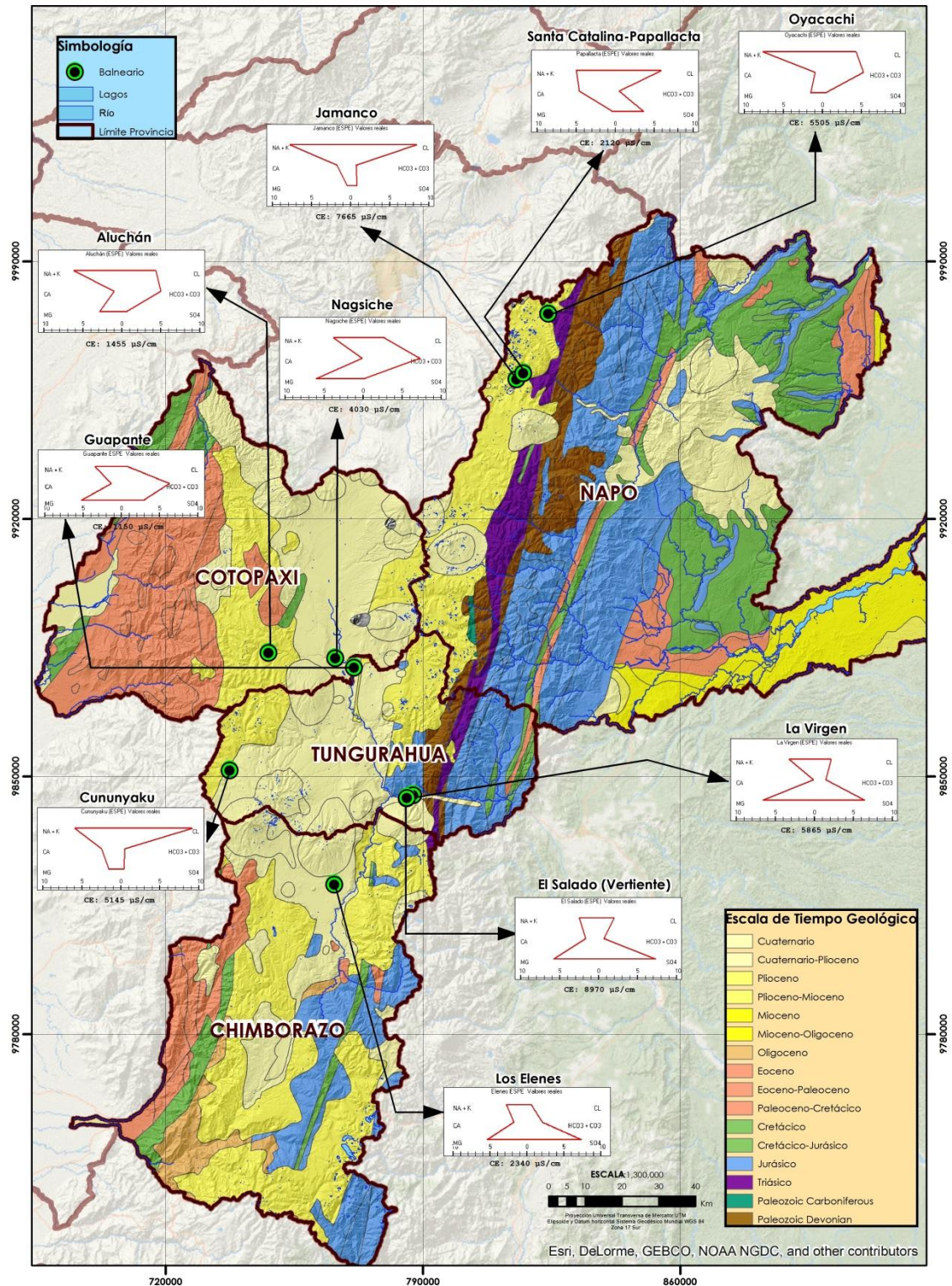
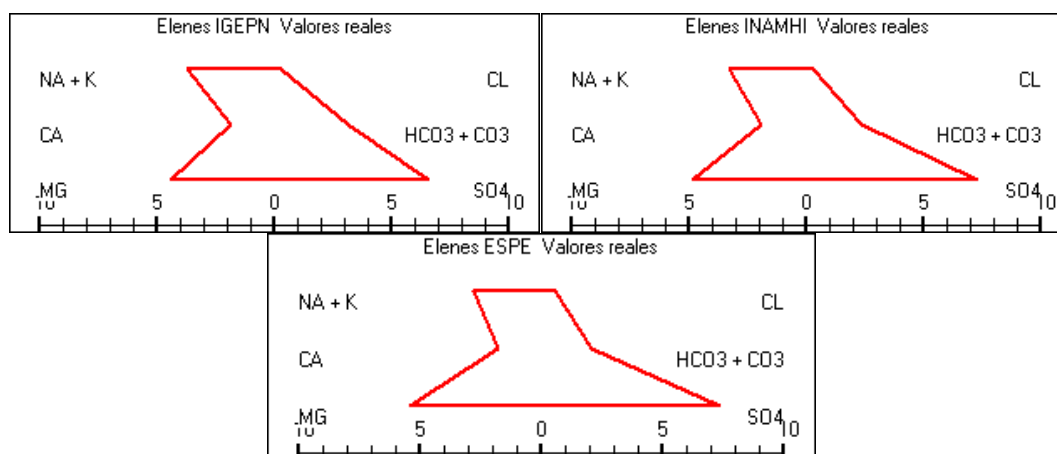


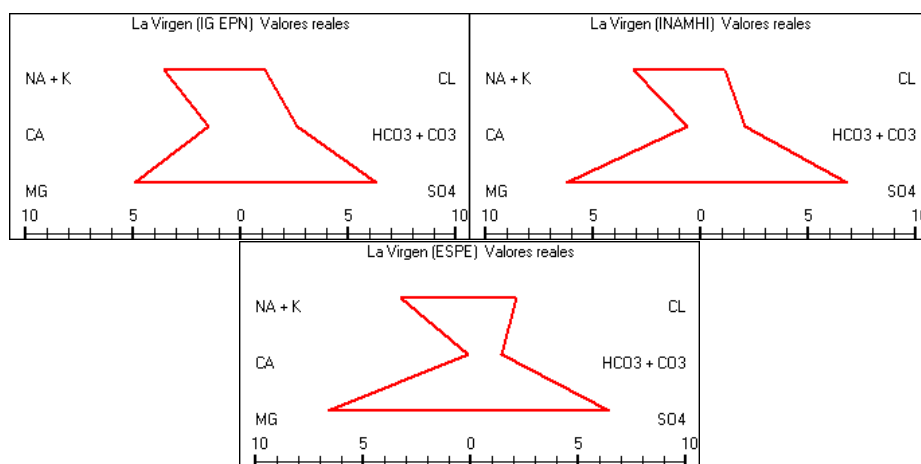
Figura 28. Mapa hidrogeoquímico de la Zona Centro

### 3.7.2.4. Representación gráfica mediante Diagramas de Stiff

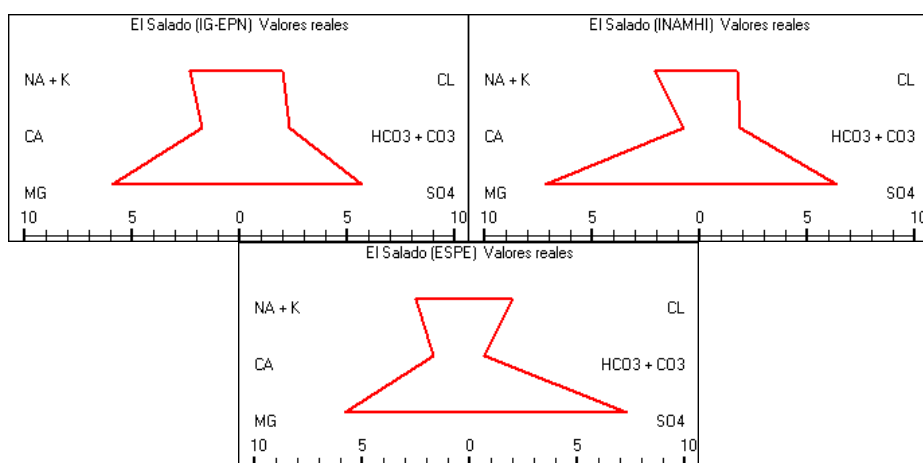
La composición iónica de las aguas geotermales de los balnearios se ven reflejadas en los diagramas de Stiff, para las aguas Sulfatadas Magnésicas tienen forma de “L” (Figura 29, 30, 31) y según Hounslow (1995) esta forma es característica de aguas que en su recorrido han atravesado esquistos cristalinos que se relaciona con la litología predominante donde tienen su basamento estos balnearios.



**Figura 29.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario Los Elenes

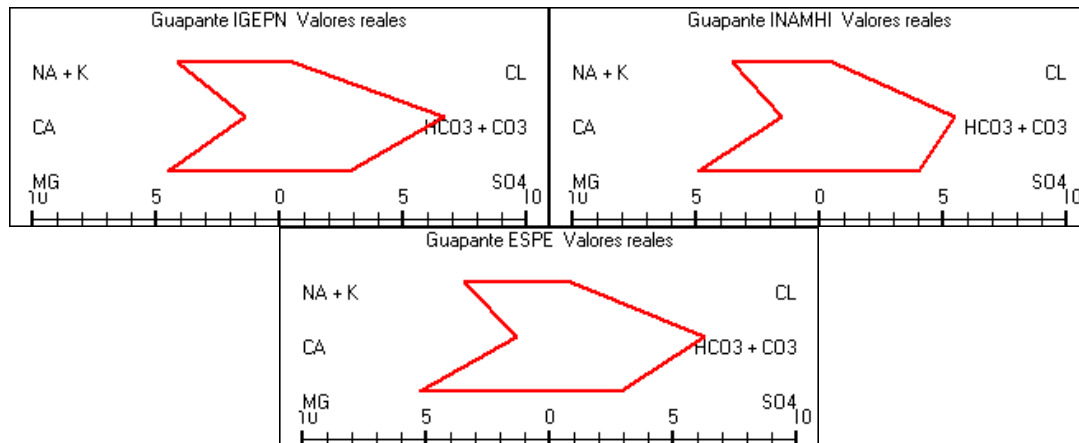


**Figura 30.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario La Virgen

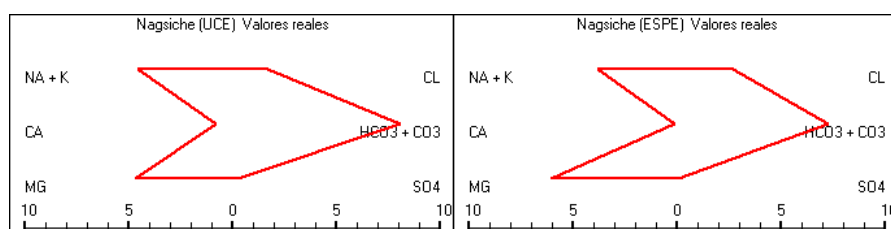


**Figura 31.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermiales del Balneario El Salado

Las aguas Bicarbonatadas Magnésicas tienen forma de punta de flecha (Figura 32, 33) y según Hounslow (1995) esta forma es característica de aguas que en su recorrido han atravesado basaltos lo cual se relaciona con la litología predominante donde tienen su basamento estos balnearios.

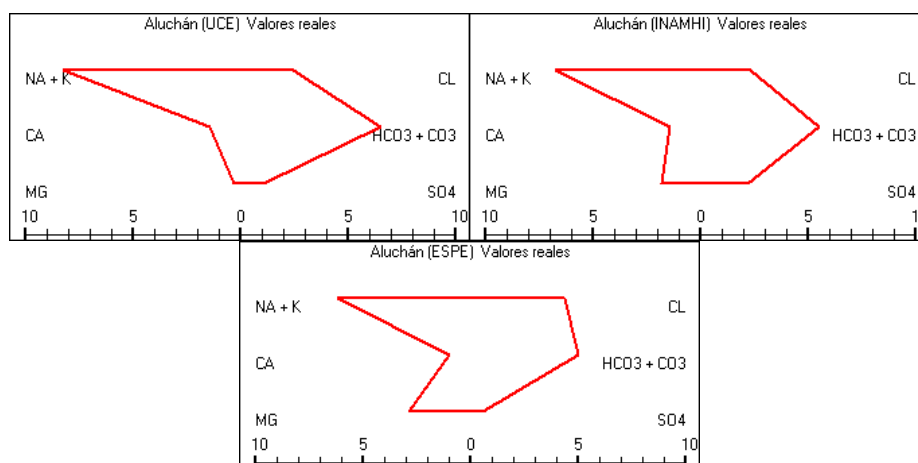


**Figura 32.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermiales del Balneario Guapante

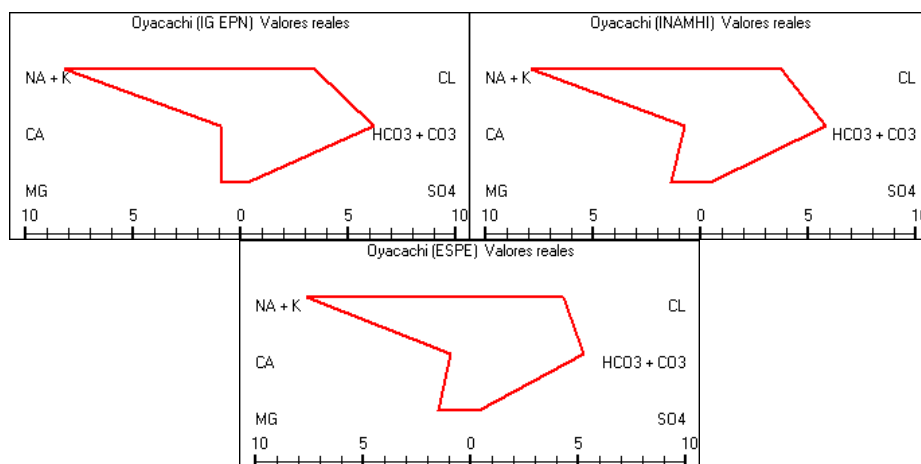


**Figura 33.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario Nagsiche

Las aguas Bicarbonatadas Sódicas tienen forma de polígono irregular (Figura 34, 35) y según Hounslow (1995) esta forma es característica de aguas que en su recorrido han atravesado rocas ígneas riolíticas lo cual se relaciona con la litología predominante donde tienen su basamento estos balnearios.



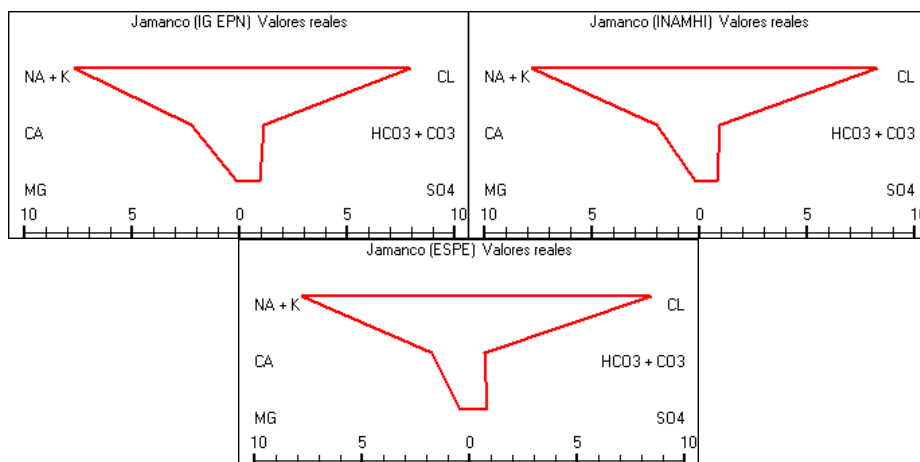
**Figura 34.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Aluchán



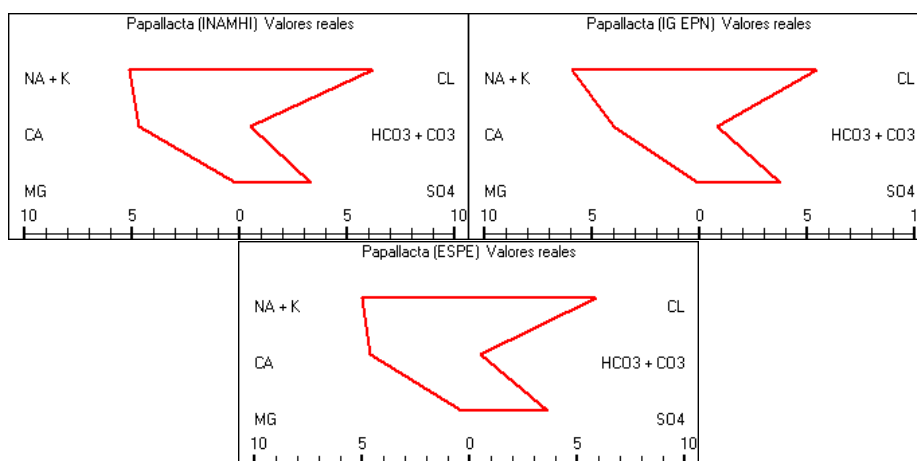
**Figura 35.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Oyacachi

Para las aguas Cloruradas Sódicas tuvieron forma de “T” (Figura 36, 37, 38) y según Hounslow (1995) esta forma es característica del agua de mar debido a su alta salinización, en este estudio esta forma se le ha asociado a aguas alto contenido de

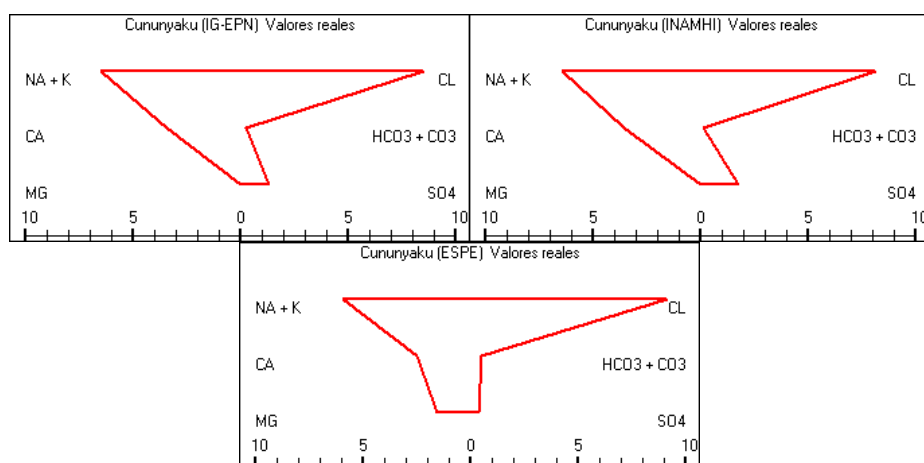
mineralización, altas temperatura y mayor tiempo de permanencia en el subsuelo que se relaciona con su geología antigua del Mioceno.



**Figura 36.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermiales del Balneario de Jamanco



**Figura 37.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermiales del Balneario de Papallacta



**Figura 38.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermiales del Balneario Cununyaku

### 3.7.2.5. Estimación de la composición química de las aguas mediante mediciones de conductividad eléctrica y modelos de correlación matemática

Los datos para la obtención de los modelos fueron procesados mediante SAMA. El modelo empleado fue el siguiente:

- Ecuación polinómica de segundo y tercer grado que pasa por el origen de coordenadas  $y = b_1X + b_2X^2$ ,  $y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$  ya que estos mostraban los mejores valores de coeficiente de correlación, Además se procedió a la validación del modelo tomando como criterio de bondad del ajuste el Índice de Similitud (IS).
- La interpretación del coeficiente de correlación se detalla en la Tabla 18

**Tabla 18.**  
**Coefficientes de Correlación**

r=1	Correlación Perfecta
0,8 < r < 1	Correlación Muy Alta
0,6 < r < 0,8	Correlación Alta
0,4 < r < 0,6	Correlación Moderada
0,2 < r < 0,4	Correlación Baja
0 < r < 0,2	Correlación Muy Baja
r=0	Correlación Nula

**Fuente:** (Bisquerra, 1989)



Los modelos de correlación matemática por ecuaciones de ajuste de segundo y tercer grado para la estimación de la composición química del agua geotermal de los balnearios de la Zona Centro se muestran en la Tabla 19, además la correspondiente interpretación de los coeficientes de correlación

**Tabla 19.**

**Modelos de correlación matemática obtenidos por ecuaciones de ajuste de 2do y 3er grado para la estimación de la composición química de los balnearios en la Zona Centro**

Balneario	$y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$	r	Correlación
Los Elenes	$HCO_3^- = 0,0584CE - 5,0659*10^{-5}CE^2 + 1,1405*10^{-8}CE^3$	0,98	Muy Alta
	$Cl^- = 0,0022CE - 2,0994*10^{-6}CE^2 + 6,0140*10^{-10}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = -0,1684CE + 0,0002CE^2 - 4,1908*10^{-8}CE^3$	0,91	Muy Alta
	$Ca^{2+} = 0,0128CE - 9,6748*10^{-6}CE^2 + 2,1548*10^{-9}CE^3$	0,97	Muy Alta
	$Mg^{2+} = 0,0116CE - 6,5504*10^{-6}CE^2 + 1,7851*10^{-9}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = 0,0688CE - 6,0426*10^{-5}CE^2 + 1,3818*10^{-8}CE^3$	0,93	Muy Alta
Balneario	$y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$	r	Correlación
Guapante	$HCO_3^- = 0,1977CE - 0,0004CE^2 + 1,6653*10^{-7}CE^3$	0,90	Muy Alta
	$Cl^- = 0,0104CE - 2,0007*10^{-5}CE^2 + 1,0278*10^{-8}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = -0,0357CE + 7,4059*10^{-5}CE^2 - 3,6098*10^{-8}CE^3$	0,90	Muy Alta
	$Ca^{2+} = 0,0047CE - 4,6307*10^{-6}CE^2 + 1,4535*10^{-9}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Mg^{2+} = 0,0348CE - 5,7056*10^{-5}CE^2 + 2,7151*10^{-8}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = 0,0841CE - 0,0002CE^2 + 6,7705*10^{-8}CE^3$	0,90	Muy Alta
Balneario	$y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$	r	Correlación
La Virgen	$HCO_3^- = 0,0700CE - 2,2341*10^{-5}CE^2 + 1,8482*10^{-9}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Cl^- = 0,0469CE - 1,8065*10^{-5}CE^2 + 1,8277*10^{-9}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = 0,1364CE - 4,6846*10^{-5}CE^2 + 4,1228*10^{-9}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Ca^{2+} = 0,0949CE - 3,3726*10^{-5}CE^2 + 2,9957*10^{-9}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Mg^{2+} = -0,1085CE + 4,4014*10^{-5}CE^2 - 4,1514*10^{-9}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = 0,0623CE - 2,0511*10^{-5}CE^2 + 1,7827*10^{-8}CE^3$	0,99	Muy Alta
Balneario	$y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$	r	Correlación
El Salado	$HCO_3^- = -0,0273CE + 8,8886*10^{-6}CE^2 - 6,4239*10^{-10}CE^3$	0,98	Muy Alta
	$Cl^- = -0,0629CE + 1,7611*10^{-5}CE^2 - 1,1561*10^{-9}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = 0,4183CE - 0,0001CE^2 + 6,7375*10^{-9}CE^3$	0,96	Muy Alta
	$Ca^{2+} = -0,0327CE + 9,0894*10^{-6}CE^2 - 5,8490*10^{-10}CE^3$	0,50	Moderada
		0,91	Muy Alta

CONTINÚA



	$Mg^{2+} = 0,2095CE - 5,1006*10^{-5}CE^2 + 3,1561*10^{-9} CE^3$ $Na^+ + K^+ = 0,0312CE - 7,0667*10^{-6}CE^2 + 4,3169*10^{-10} CE^3$	0,42	Muy Alta
<b>Balneario</b>	<b><math>y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3</math></b>	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
Cununyaku	$HCO_3^- = 0,0068CE - 3,0765*10^{-6}CE^2 + 3,5695*10^{-10} CE^3$	0,96	Muy Alta
	$Cl^- = 0,0374CE - 1,3004*10^{-5}CE^2 + 1,4512*10^{-9} CE^3$	0,99	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = -0,0296CE + 1,4350*10^{-5}CE^2 - 1,6531*10^{-9} CE^3$	0,92	Muy Alta
	$Ca^{2+} = 0,0201CE - 6,1826*10^{-6}CE^2 + 5,3319*10^{-10} CE^3$	0,97	Muy Alta
	$Mg^{2+} = 0,0143CE - 7,7249*10^{-6}CE^2 + 1,0172*10^{-9} CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = 0,0614CE - 2,3121*10^{-5}CE^2 + 2,3905*10^{-9} CE^3$	0,90	Muy Alta
<b>Balneario</b>	<b><math>y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3</math></b>	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
Aluchán	$HCO_3^- = 0,0786CE - 0,0001CE^2 + 3,7014*10^{-8} CE^3$	0,97	Muy Alta
	$Cl^- = 0,0614CE - 9,5254*10^{-5}CE^2 + 3,8386*10^{-8} CE^3$	0,99	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = -0,0688CE + 0,0001CE^2 - 4,3315*10^{-8} CE^3$	0,98	Muy Alta
	$Ca^{2+} = 0,0069CE - 6,0094*10^{-6}CE^2 + 1,2671*10^{-9} CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Mg^{2+} = -0,0401CE + 5,6868*10^{-5}CE^2 - 1,8926*10^{-8} CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = 0,1459CE - 0,0002CE^2 + 7,1436*10^{-8} CE^3$	0,98	Muy Alta
<b>Balneario</b>	<b><math>y = b_1X + b_2X^2</math></b>	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
Nagsiche	$HCO_3^- = 0,0213CE - 3,4968*10^{-6}CE^2$	0,99	Muy Alta
	$Cl^- = 0,0021CE + 1,3514*10^{-7}CE^2$	0,99	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = 0,0009CE - 2,0468*10^{-6}CE^2$	0,99	Muy Alta
	$Ca^{2+} = 0,0036CE - 8,6998*10^{-7}CE^2$	0,99	Muy Alta
	$Mg^{2+} = 0,0103CE - 1,0093*10^{-6}CE^2$	0,99	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = 0,01429CE - 2,5823*10^{-6}CE^2$	0,99	Muy Alta
<b>Balneario</b>	<b><math>y = b_1X + b_2X^2</math></b>	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
Jamanco	$HCO_3^- = 0,0039CE - 4,1941*10^{-7}CE^2$	0,90	Muy Alta
	$Cl^- = 0,0029CE + 6,9722*10^{-7}CE^2$	0,99	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = 0,0019CE - 1,4402*10^{-7}CE^2$	0,50	Moderada
	$Ca^{2+} = 0,0061CE - 5,8773*10^{-7}CE^2$	0,96	Muy Alta
	$Mg^{2+} = -0,0021CE + 3,1896*10^{-7}CE^2$	0,82	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = 0,0085CE - 1,8476*10^{-7}CE^2$	0,60	Alta
<b>Balneario</b>	<b><math>y = b_1X + b_2X^2</math></b>	<b>r</b>	<b>Correlación</b>

CONTINÚA





Oyacachi	$HCO_3^- = 0,0181CE - 2,3936*10^{-6}CE^2$	0,90	Muy Alta
	$Cl^- = 0,0009CE + 5,7266*10^{-7}CE^2$	0,99	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = 0,0004CE - 6,3990*10^{-10}CE^2$	0,70	Alta
	$Ca^{2+} = 0,0012CE - 6,8552*10^{-8}CE^2$	0,21	Baja
	$Mg^{2+} = -0,0015CE + 5,3859*10^{-7}CE^2$	0,90	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = 0,0191CE - 2,1708*10^{-6}CE^2$	0,50	Moderada
<b>Balneario</b>	$y = b_1X + b_2X^2$	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
Papallacta	$HCO_3^- = 0,0011CE - 2,1226*10^{-7}CE^2$	0,24	Baja
	$Cl^- = 0,0052CE + 1,7950*10^{-7}CE^2$	0,95	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = 0,0051CE - 7,1030*10^{-7}CE^2$	0,99	Muy Alta
	$Ca^{2+} = 0,0051CE - 4,2749*10^{-7}CE^2$	0,90	Muy Alta
	$Mg^{2+} = 0,0004CE - 1,0395*10^{-7}CE^2$	0,90	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = 0,0083CE - 1,4165*10^{-6}CE^2$	0,51	Moderada

### 3.7.2.6. Índices de similitud para la validación de los modelos de correlación matemática

Los índices de similitud entre la concentración iónica real y la concentración iónica estimada por modelación se muestran en la Tabla 16, asimismo se puede apreciar que los índices son superiores a 0,9 lo que indica una alta similitud.

**Tabla 20.**

#### Índices de similitud obtenidos y validación de los modelos de correlación matemática de los balnearios de la Zona Centro

Balneario	$HCO_3^-$	Cl	$SO_4^{2-}$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$Na^+ + K^+$	Índice de Similitud
Los Elenes	5,46	1,43	18,57	4,72	14,37	7,35	0,95
Guapante	8,26	1,12	1,93	1,46	5,76	3,76	0,96
La Virgen	15,51	22,88	20,68	0,71	41,07	19,76	0,99
El Salado	6,55	18,50	66,82	15,14	52,79	22,35	0,98
Cununyaku	2,24	45,76	2,31	12,62	7,59	29,77	0,99
Aluchán	6,62	5,84	0,82	1,28	3,76	7,90	0,95
Nagsiche	29,58	10,86	0,33	0,56	25,41	15,88	1
Jamanco	6,06	59,05	5,92	12,69	1,98	51,54	0,90
Oyacachi	27,41	22,59	2,13	4,61	7,89	38,85	0,97
Papallacta	1,35	11,78	7,67	8,83	0,45	11,25	0,91

En la Zona Centro existen aguas de cuatro diferentes familias: Sulfatadas Magnésicas cuyos diagramas de Stiff tuvieron forma de “L”, Bicarbonatadas Magnésicas con diagramas ten forma de punta de flecha, Bicarbonatadas Sódicas tuvieron forma de un polígono irregular y finalmente Cloruradas Sódicas que tuvieron forma de “T”, estas formas de los diagramas de Siff se relacionan con la litología predominante donde tienen basamento los balnearios y por la cual han recorrido las aguas para adquirir sus composiciones.

Los modelos de regresión matemática fueron obtenidos por ecuaciones de ajuste de 2<sup>do</sup> y 3<sup>er</sup> grado, el 3,33% de las ecuaciones tuvieron un correlación “Baja”, el 6,67% tuvieron correlación Moderada, el 3,33% tuvieron una correlación “Alta” y el 86,67% con una correlación “Muy Alta“, esto debido a la variabilidad de los valores de composición iónica de estas aguas a través del tiempo, finalmente, los Índices de Similitud superaron el 0,9 por lo que las ecuaciones determinadas son aptas para la estimación de la concentración iónica para futuras muestras, sin embargo, para las ecuaciones de iones que posean correlación “Baja” se recomienda realizar la determinación en laboratorio de dicho ion.

### **3.7.3. Zona Norte**

#### **3.7.3.1. Características hidrogeológicas de las aguas geotermales en la Zona Norte**

En el Cuadro 3 se observa las características hidrogeológicas donde tienen su basamento las aguas geotermales de los balnearios de la Zona Norte:

**Cuadro 3.**  
**Características hidrogeológicas de la Zona Norte**

	<b>Pichincha</b>			<b>Imbabura</b>
	<b>Guachalá</b>	<b>Lloa</b>	<b>Cununyacu, El Tingo y La Merced</b>	<b>Nangulví</b>
<b>Unidad</b>	Volcánicos Cayambe (Qy)	Lavas del Pichincha (QP)	Cangahua (Qc)	Granodiorita (gd)
<b>Litología Predominante</b>	Flujos de Lava andesíticas a riolíticas	Tobas, Aglomerados, Flujos de Lava andesíticas a dacíticas	Piroclastos, Ceniza Volcánica, Tobas Flujos de Lava basálticas a riolíticas	Granodiorita, Diorita
<b>Permeabilidad</b>	Baja a Media	Baja a Media	Baja	Practicamente Impermeable
<b>Tipo de Permeabilidad</b>	Fisuración	Fisuración	Intergranular	Intergranular
<b>Periodo</b>	Cuaternario	Cuaternario	Cuaternario	Cenozoico
	<b>Imbabura</b>		<b>Carchi</b>	
	<b>Chachimbiro</b>	<b>Largatijas y Peguche</b>	<b>Aguas Hediondas</b>	<b>San Miguel de Car, Tufiño, El Puetate, Los Tres Chorros, Rumichaca, Paluz, Gruta de la Paz</b>
<b>Unidad</b>	Volcánicos de Yanahurco (Pl-Pr)	Cangahua (Qc)	Volcánicos Chiles (Vch)	Depósitos Piroclásticos (Qpr)
<b>Litología Predominante</b>	Lavas dacíticas y piroclastos	Piroclastos, Ceniza Volcánica, Tobas, Flujos de Lava andesíticas a riolíticas	Andesita, Basalto, Brechas Volcánicas, Cenizas	Piroclastos, Ceniza, Lapilli
<b>Permeabilidad</b>	Baja a Media	Baja	Baja a Media	Baja
<b>Tipo de Permeabilidad</b>	Fisuración	Intergranular	Fisuración	Intergranular
<b>Periodo</b>	Cuaternario- Plioceno	Cuaternario	Cuaternario	Cuaternario

### 3.7.3.2. Características generales de la composición iónica de las aguas de los balnearios de la Zona Norte

En la Tabla 21 se presentan los valores de los principales parámetros físico químicos medidos en sus respectivas unidades recopilados de diferentes estudios realizados en los años 1994, 2009, 2012 y 2015 por la Universidad Central, el IG – EPN, el INAMHI y la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE respectivamente. En dicha tabla se muestra la composición química de las aguas de los balnearios en la Zona Norte en meq/L.

En esta zona se concentra el mayor número de muestras (20) debido a la presencia de volcanes que tienen su basamento en la Cordillera Occidental, del Valle Interandino. Se registraron valores de temperatura entre (18 – 60°C), los balnearios de el Puetate y Lagartijas con temperaturas menores a 20°C se las considera como aguas Frías, los balnearios de Rumichaca y La Calera con temperaturas entre los 30 y 40°C se las llama agua Termal, Gruta de la Paz, Chachimbiro, Nangulví y aguas Hediondas se las considera agua Hipertermal ya que su temperatura supera los 40°C, finalmente, el resto de balnearios son aguas Hipotermal ya que su temperatura es menor a 30°C. Con valores de pH entre 4.96 a 7.65 y CE desde 440 a 7010  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Relativamente los valores de pH <6 (Lloa y Aguas Hediondas) indican una posible interacción con gases ácidos (Inguaggiato, Hidalgo, Beate, & Bourquin, 2010).

**Tabla 21.**  
**Parámetros físico-químicos de tres muestras de agua geotermal de los Balnearios de la Zona Norte.**

#	Nombre de la Muestra	Temp °C	pH	Conduct, ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>
1	Guachalá (UCE)	33,4	6,6	2400	1,07	19,13	1,50	6,50	0,42	5,53	20,90	0,0 0
2	Guachalá (IG-EPN)	37	6,33	2100	1,07	14,94	1,84	6,80	0,47	4,90	18,95	0,0 0
3	Guachalá (ESPE)	39	6,39	2555,00	1,11	14,58	1,82	7,96	0,00	9,58	16,07	0,0 0
4	Cununyacu (UCE)	26,3	7,10	1110,00	0,33	5,96	1,59	4,93	1,26	1,76	11,20	0,0 0

CONTINÚA



#	Nombre de la Muestra	Temp °C	pH	Conduct, (µS /cm)	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>
5	Cununyacu (ESPE)	26	7,05	1230,00	0,31	4,57	1,48	5,95	0,17	4,79	7,54	0,00
6	El Tingo (UCE)	39	7,10	3490,00	0,77	22,17	1,67	12,70	0,24	9,03	29,36	0,00
7	El Tingo (IG-EPN)	42,1	7,00	3160,00	0,70	22,36	1,37	13,93	1,11	8,33	28,80	0,00
8	El Tingo (INAMHI)	42,8	7,90	2820,00	0,65	14,62	1,20	10,43	0,21	7,06	21,09	0,00
9	El Tingo (ESPE)	40	7,03	3515,00	0,58	19,35	1,24	11,23	0,21	10,70	21,97	0,00
10	La Merced (UCE)	34	6,80	1160,00	0,36	5,74	2,03	4,76	1,06	1,88	10,64	0,00
11	La Merced (IG-EPN)	32,5	6,67	1085,00	0,36	5,18	1,98	4,47	0,45	1,70	9,80	0,00
12	La Merced (INAMHI)	34,8	7,30	1096,00	0,33	2,82	1,60	5,21	0,40	1,89	9,18	0,00
13	La Merced (ESPE)	35	6,50	1210,00	0,28	4,48	1,94	5,89	0,13	5,63	7,21	0,09
14	Lloa (UCE)	33	6,00	3490,00	1,13	23,91	3,96	6,92	0,11	10,12	27,93	0,00
15	Lloa (INAMHI)	34,1	7,20	2440,00	0,67	9,27	2,81	11,64	0,11	6,71	18,37	0,00
16	Lloa (ESPE)	29	5,96	1930,00	0,35	7,92	3,80	7,19	0,56	7,04	11,15	0,00
17	Nangulví (UCE)	48,5	7,31	5100	0,22	13,04	10,50	0,48	1,67	28,12	1,98	0,00
18	Nangulví (INAMHI)	47,6	7,7	4330	0,33	28,02	12,46	1,61	13,65	30,76	1,22	0,00
19	Nangulví (ESPE)	50	7,39	4850,00	0,20	27,90	11,49	7,51	6,98	41,32	1,18	0,00
20	Lagartijas (UCE)	20	5,80	440,00	0,13	0,79	1,34	3,16	0,23	1,61	3,80	0,00
21	Lagartijas (INAMHI)	21	6,40	464,00	0,14	1,02	1,29	2,58	0,15	0,34	3,63	0,00
22	Lagartijas (ESPE)	18	6,06	456,00	0,12	0,96	0,70	2,80	0,04	0,84	3,70	0,00
23	Peguche (INAMHI)	22,3	7,70	1827,00	0,43	8,95	2,41	8,47	0,28	6,43	9,74	0,00

CONTINÚA



#	Nombre de la Muestra	Temp °C	pH	Conduct, (µS /cm)	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>
24	Peguche (ESPE)	23	6,51	1874,00	0,35	5,97	3,09	8,40	0,28	6,48	10,33	0,00
25	Chachimbiro (UCE)	41,7	7,11	7010,00	3,78	44,13	5,95	3,71	0,53	46,20	12,32	0,00
26	Chachimbiro (IG - EPN)	51,2	6,90	5650,00	3,01	42,19	4,32	3,64	0,69	45,45	4,10	0,00
27	Chachimbiro (INAMHI)	55	7,60	6650,00	4,12	37,71	4,42	4,84	0,70	51,93	6,71	0,00
28	Chachimbiro (ESPE)	52	7,65	6625,00	5,39	42,10	4,90	6,96	1,19	52,97	8,20	0,00
29	La Calera (UCE)	34	7,1	1084	0,34	2,45	3,81	3,78	0,52	0,91	13,20	0,00
30	La Calera (INAMHI)	31,5	7	1074	0,45	2,61	3,02	4,64	1,63	0,60	6,40	0,00
31	La Calera (ESPE)	34	6,33	1267,00	0,74	3,19	3,71	7,07	0,65	1,81	12,09	0,00
32	Gruta de la Paz (UCE)	35	7,80	2110,00	0,56	2,72	7,60	12,85	0,32	4,06	25,17	0,00
33	Gruta de la Paz (INAMHI)	50	7,10	2520,00	1,51	7,43	2,61	14,31	0,32	4,13	14,78	0,00
34	Gruta de la Paz (ESPE)	40	6,88	2570,00	1,91	6,79	1,38	17,78	0,07	4,48	23,22	0,00
35	Paluz (UCE)	21	7,20	928,00	0,22	0,90	5,83	4,98	0,07	1,02	10,56	0,00
36	Paluz (INAMHI)	22	7,60	1002,00	0,10	1,50	3,86	4,84	0,38	0,45	5,79	0,00
37	Paluz (ESPE)	21	6,22	1085,00	0,12	1,43	3,41	5,77	0,07	1,10	9,45	0,00
38	Rumichaca (UCE)	41	8,00	2680,00	1,61	9,78	5,91	14,52	0,23	7,48	27,61	0,00
39	Rumichaca (INAMHI)	39	7,50	2840,00	2,22	11,94	1,21	11,69	0,49	6,69	14,63	0,00
40	Rumichaca (ESPE)	34	7,09	3065,00	2,46	11,63	1,49	14,82	0,14	7,30	24,44	0,00
41	Los Tres Chorros (UCE)	30	6,90	837,00	0,48	2,59	2,45	4,05	0,34	1,38	8,93	0,00
42	Neptuno (INAMHI)	22,3	6,60	418,00	0,26	1,17	1,02	1,86	0,23	0,36	2,93	0,00

CONTINÚA



#	Nombre de la Muestra	Temp °C	pH	Conduct, (µS /cm)	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>
43	Los Tres Chorros (Neptuno)	25	6,03	819,50	0,70	2,49	2,01	3,74	0,38	1,19	7,13	0,00
44	Aguas Hediondas (UCE)	48	5,80	1310,00	0,56	5,22	3,94	3,19	20,07	2,00	0,00	0,00
45	Aguas Hediondas (IG -EPN)	52,5	4,60	1850,00	1,03	8,75	4,54	3,95	16,99	3,49	0,00	0,00
46	Aguas Hediondas (INAMHI)	51	5,70	1773,00	1,04	6,36	4,02	5,24	14,63	3,35	0,00	0,00
47	Aguas Hediondas (ESPE)	58	4,96	1833,00	1,45	6,50	4,38	5,80	14,64	3,35	0,40	0,00
48	San Miguel de Car (UCE)	22	6,80	370,00	0,26	1,09	1,20	0,95	0,19	0,51	3,45	0,00
49	San Miguel de Car (ESPE)	23	6,21	418,00	0,27	1,15	0,90	2,00	0,78	0,90	2,48	0,00

### 3.7.3.3. Variación espacial de la composición química de las aguas geotermales en la Zona Norte

Los resultados de la variación espacial de la composición química de las aguas en la zona sur del Ecuador se muestran en la Figura 39. Se determinaron 4 familias: Bicarbonatadas Sódicas (Guachalá, y El Tingo), Cloruradas Sódicas (Chachimbiro y Nangulví), Sulfatadas Sódicas (Aguas Hediondas) y Bicarbonatadas Magnésicas el resto de muestras caracterizadas por su baja salinización. Las fuentes de la provincia de Pichincha están asociadas a la Caldera Chacana el centro volcánico riolítico cuaternario más grande del Ecuador (Villares, 2010), mientras que en la provincia de Carchi está asociada al volcán Chiles (Aguas Hediondas) además el olor característico de estas aguas se deben a las bacterias, que atacan y reducen los sulfatos, provocando la formación sulfuro de hidrógeno gas (H<sub>2</sub>S) y a los depósitos piroclásticos de los volcanes extintos que existen en la provincia, en Imbabura a los depósitos volcánicos de los volcanes Yanahurco (Chachimbiro) e Imbabura (Peguche).



MAPA HIDROGEOQUÍMICO DE LA ZONA NORTE CON DIAGRAMAS DE STIFF

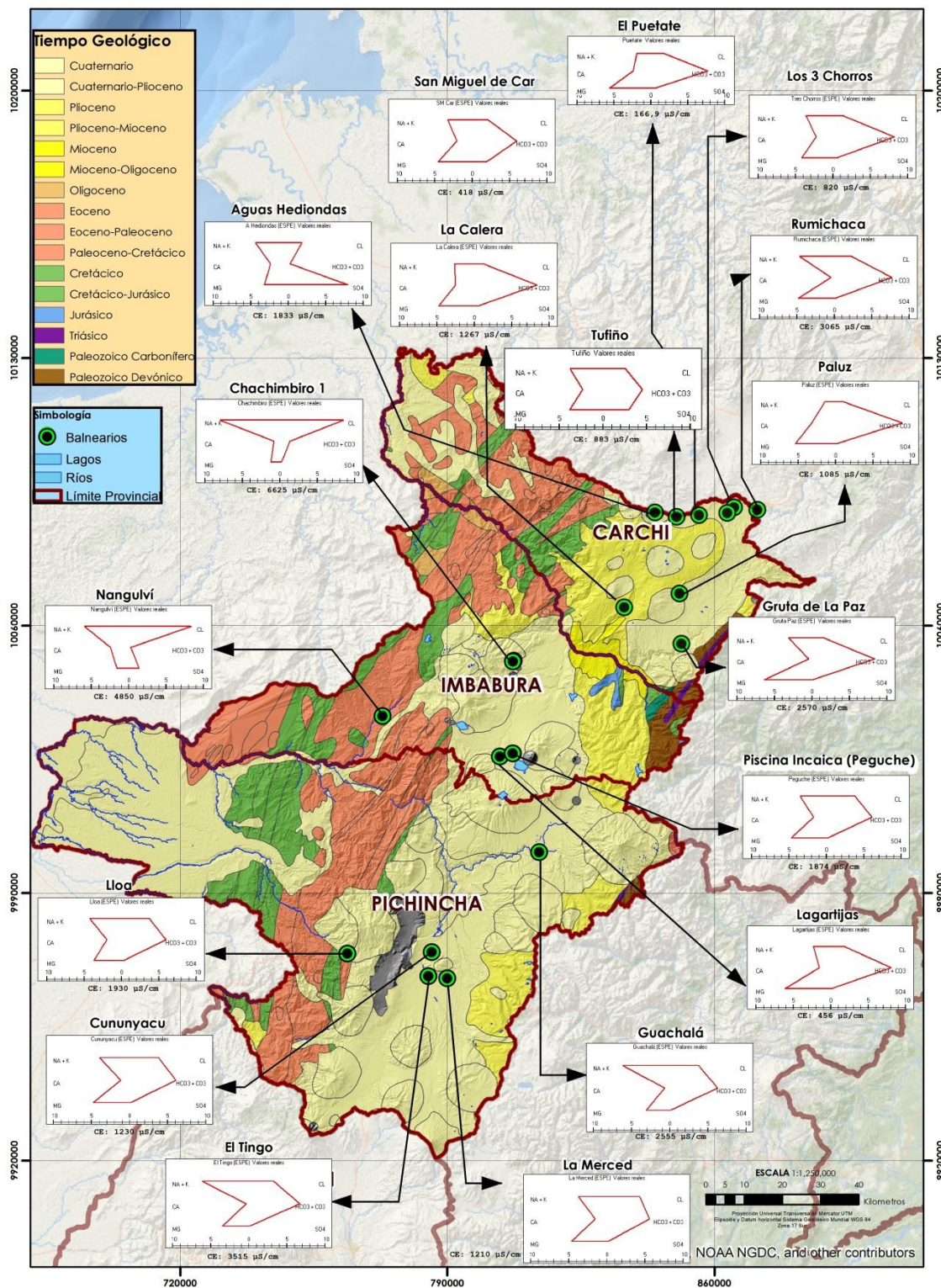
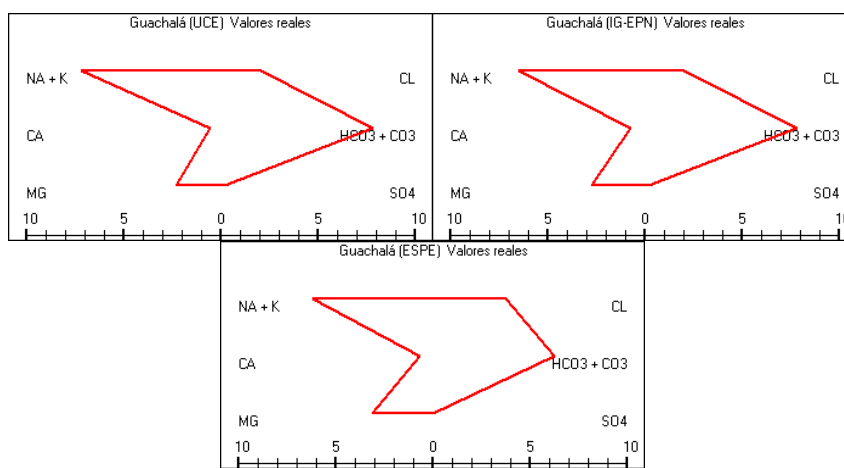


Figura 39. Mapa hidrogeoquímico de la Zona Norte

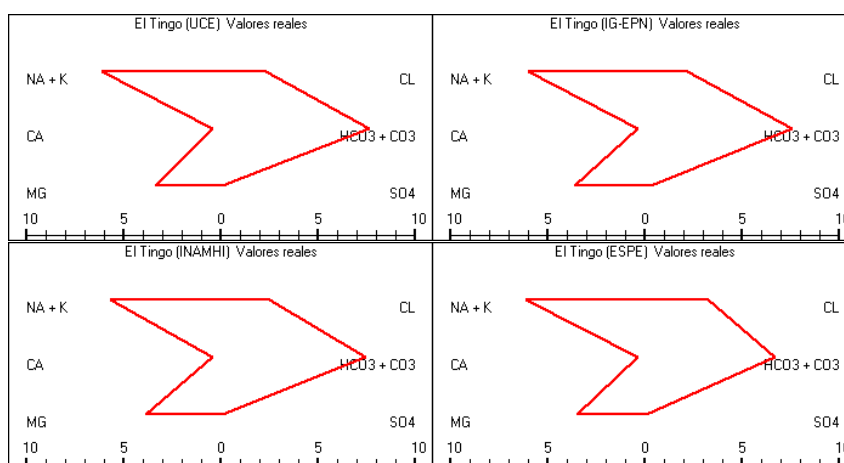


### 3.7.3.4. Representación gráfica mediante Diagramas de Stiff

La composición iónica de agua geotermal del balneario se ve reflejada en los diagramas de Stiff, para las aguas Bicarbonatadas Sódicas tuvieron forma de polígono irregular (Figura 40, 41) y según Hounslow (1995) esta forma es característica de aguas que en su recorrido han atravesado rocas ígneas riolíticas lo cual se relaciona con la litología predominante donde tienen su basamento estos balnearios.



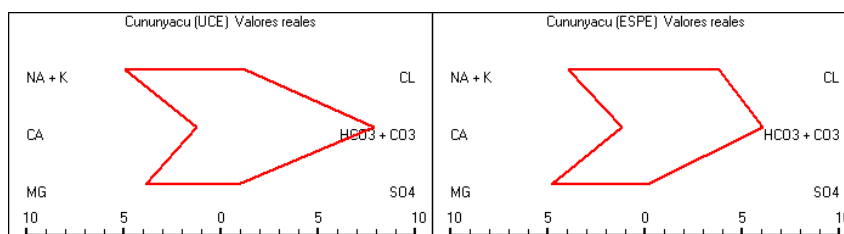
**Figura 40.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Guachalá



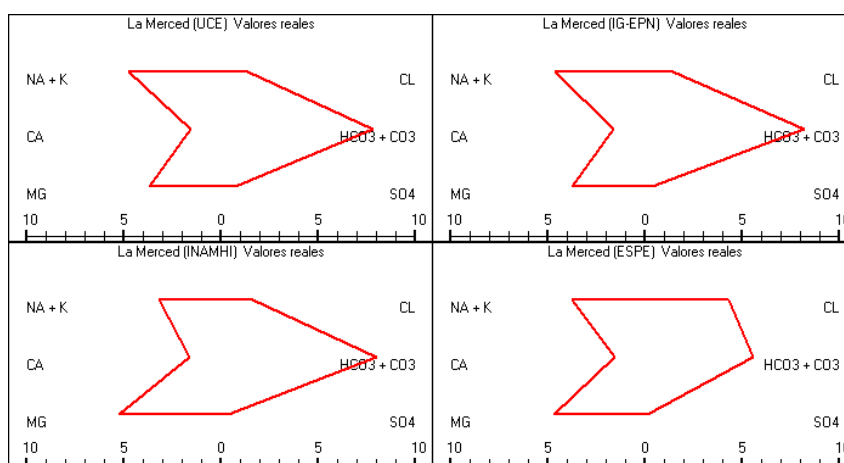
**Figura 41.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de El Tingo

Las aguas Bicarbonatadas Magnésicas tuvieron forma de punta de flecha (Figura 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52) y según Hounslow (1995) esta forma es

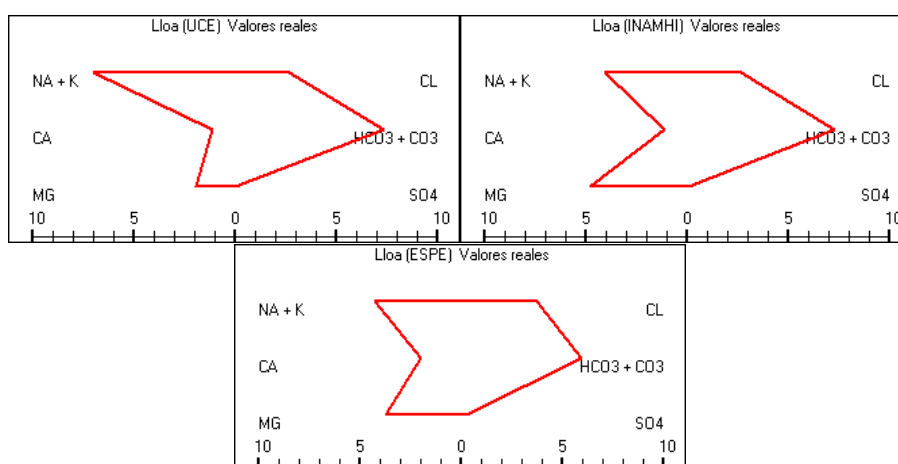
característica de aguas que en su recorrido han atravesado rocas ígneas básicas lo cual se relaciona con la litología predominante donde tienen su basamento estos balnearios.



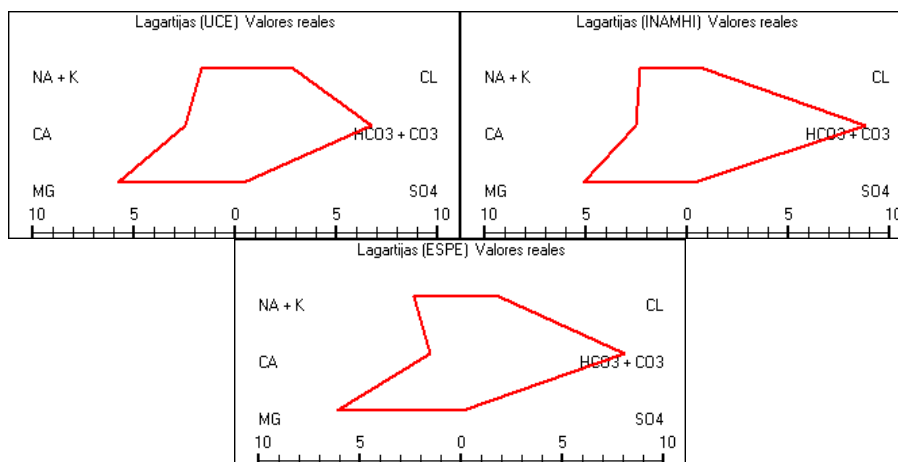
**Figura 42.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermiales del Balneario de El Cununyacu



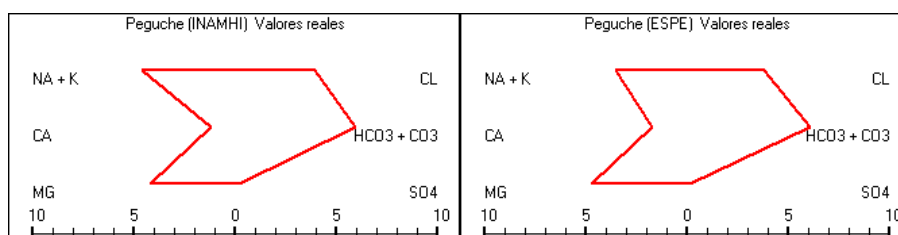
**Figura 43.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermiales del Balneario de La Merced



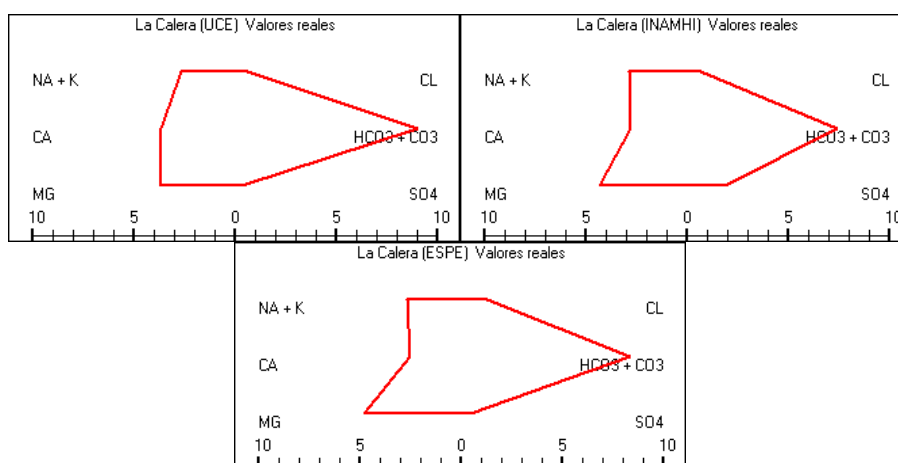
**Figura 44.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Lloa



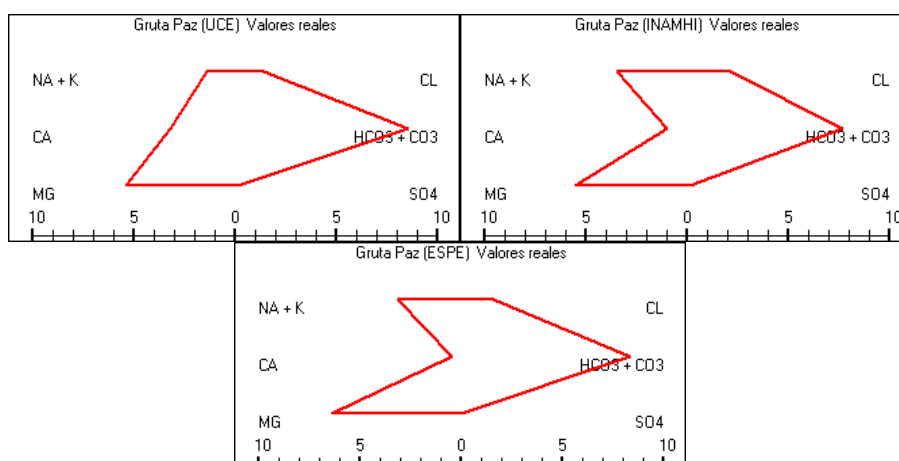
**Figura 45.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Las Lagartijas



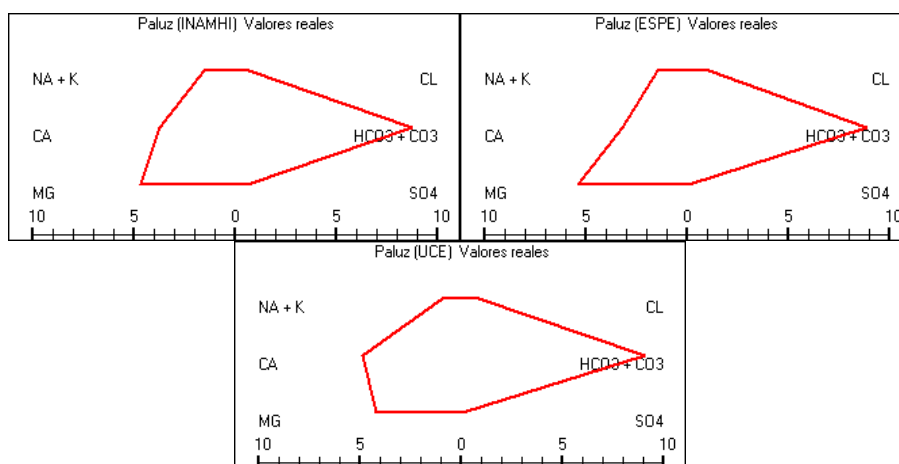
**Figura 46.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Peguche



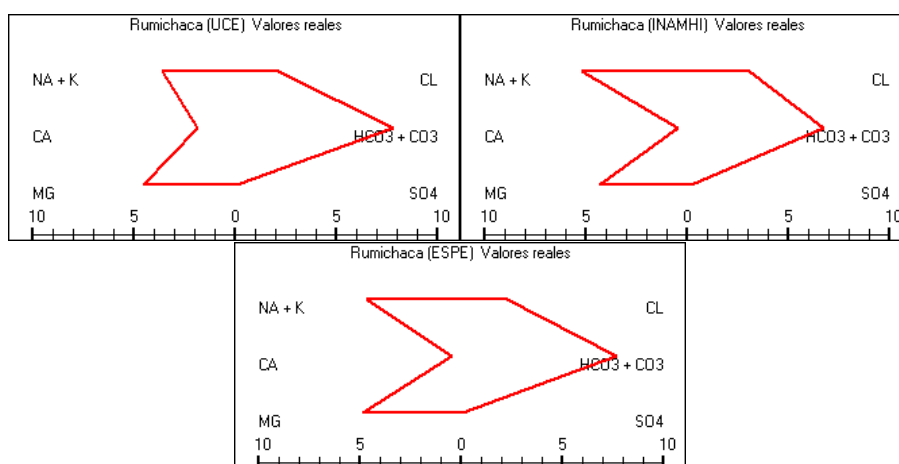
**Figura 47.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de La Calera



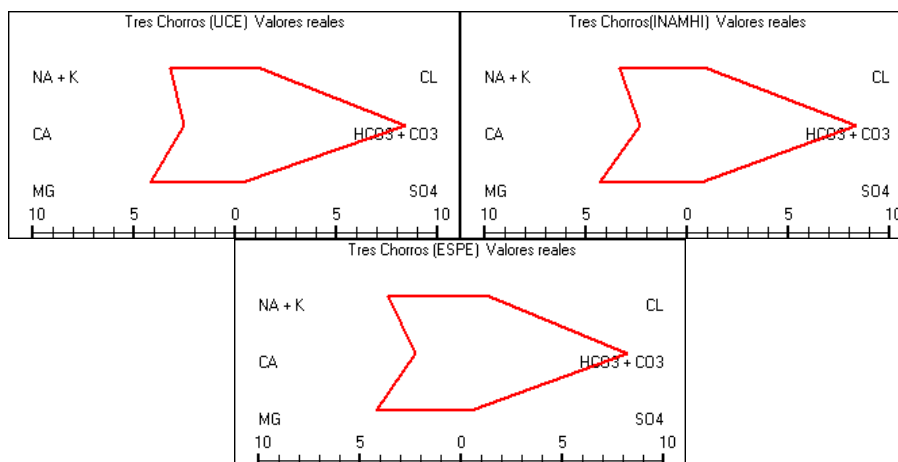
**Figura 48.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermiales del Balneario de La Gruta de la Paz



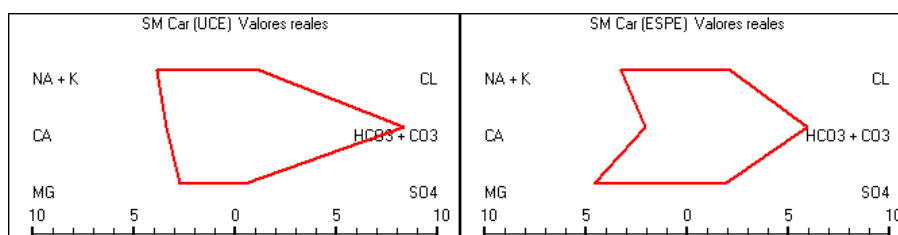
**Figura 49.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermiales del Balneario de Paluz



**Figura 50.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Rumichaca

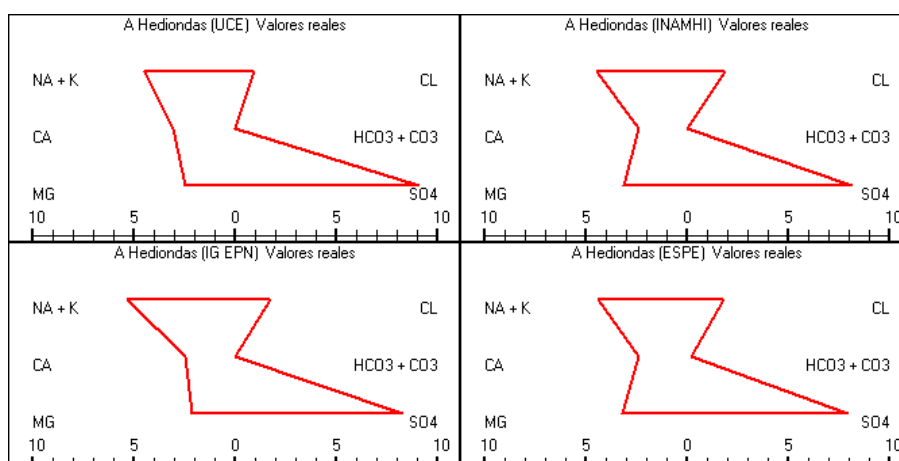


**Figura 51.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Los Tres Chorros



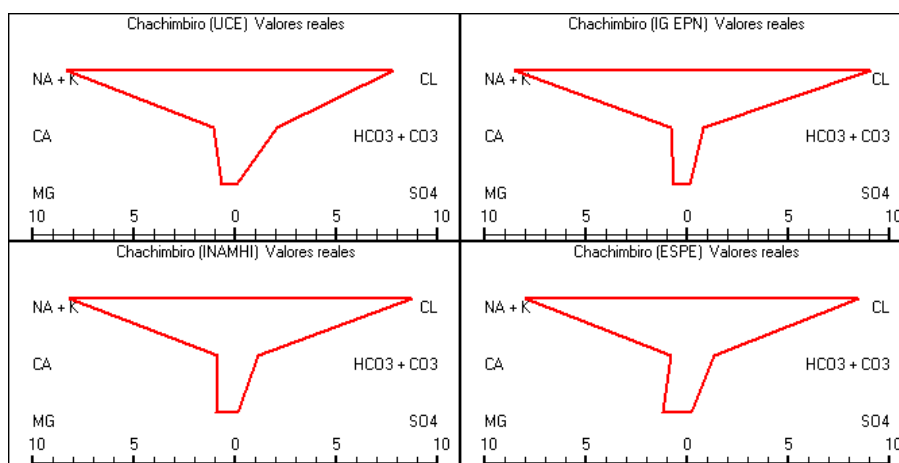
**Figura 52.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de San Miguel de Car

Para las aguas Sulfatadas Sódicas los diagramas de Stiff poseen forma similar a la de un “reloj de arena” (Figura 53) este sistema hidrotermal puede ser considerado con fase vapor dominante en zonas de intensa actividad volcánica y en donde se formó un manantial ácido a partir de  $H_2SO_4$ , procedente de la oxidación del  $H_2S$  provocando que el contenido del ion sulfato sea elevado (Custodio & Llamas, 2001).

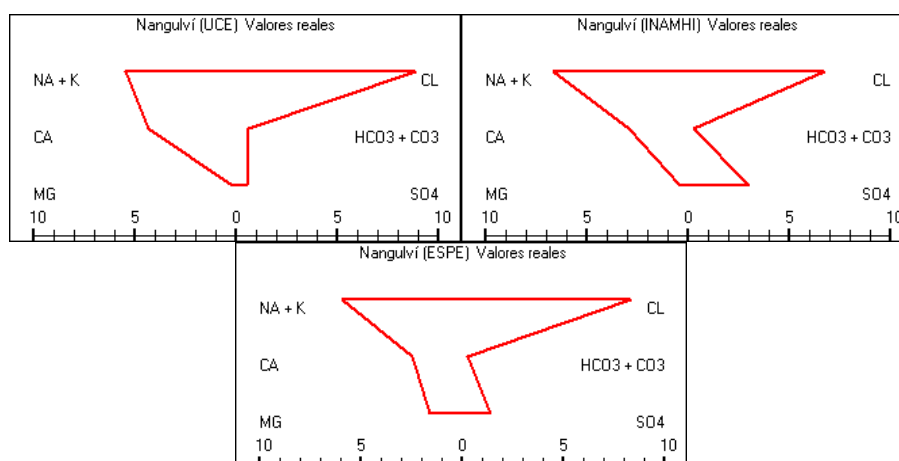


**Figura 53.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermiales del Balneario de Aguas Hediondas

Las aguas Cloruradas Sódicas tuvieron forma de “T” (Figura 55y 56) y según Hounslow (1995) esta forma es característica del agua de mar debido a su alta salinización, en este estudio esta forma se le ha asociado a aguas alto contenido de mineralización, altas temperatura y mayor tiempo de permanencia en el subsuelo que se relaciona con su geología antigua del Cenozoico.



**Figura 54.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermiales del Balneario de Chachimbiro



**Figura 55.** Diagramas de Stiff de las muestras de aguas geotermales del Balneario de Nangulví

### 3.7.3.5. Estimación de la composición química de las aguas mediante mediciones de conductividad eléctrica y modelos de correlación matemática

Los datos para la obtención de los modelos fueron procesados mediante SAMA. El modelo empleado fue el siguiente:

- Ecuación polinómica de segundo y tercer grado que pasa por el origen de coordenadas  $y = b_1X + b_2X^2$ ,  $y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$  ya que estos mostraban los mejores valores de coeficiente de correlación, Además se procedió a la validación del modelo tomando como criterio de bondad del ajuste el Índice de Similitud (IS).

Los modelos de correlación matemática por ecuaciones de ajuste de segundo y tercer grado para la estimación de la composición química del agua geotermal de los balnearios de la Zona Centro se muestran en la Tabla 22, además la correspondiente interpretación de los coeficientes de correlación.

**Tabla 22.**  
**Modelos de correlación matemática obtenidos por ecuaciones de ajuste de 2do y 3er grado para la estimación de la composición química de los balnearios en la Zona Norte**

Balneario	$y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$	r	Correlación
Guachalá	$HCO_3^- = -0,097 CE + 9,7316 \cdot 10^{-5} CE^2 - 2,2191 \cdot 10^{-8} CE^3$	0,95	Muy Alta
		0,98	Muy Alta



	$Cl^- = 0,0764CE - 6,6910 \cdot 10^{-5}CE^2 + 1,5026 \cdot 10^{-8}CE^3$ $SO_4^{2-} = -0,0068CE + 6,5043 \cdot 10^{-6}CE^2 - 1,5018 \cdot 10^{-9}CE^3$ $Ca^{2+} = 0,0135CE - 1,0702 \cdot 10^{-5}CE^2 + 2,2190 \cdot 10^{-9}CE^3$ $Mg^{2+} = 0,0413CE - 3,2890 \cdot 10^{-5}CE^2 + 6,9981 \cdot 10^{-9}CE^3$ $Na^+ + K^+ = -0,1285CE + 0,0001CE^2 - 2,6623 \cdot 10^{-8}CE^3$	0,99 0,92 0,93 0,94	Muy Alta Muy Alta Muy Alta Muy Alta
<b>Balneario</b>	<b><math>y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3</math></b>	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
El Tingo	$HCO_3^- = -0,0684CE + 4,9380 \cdot 10^{-5}CE^2 - 7,9157 \cdot 10^{-9}CE^3$ $Cl^- = 0,0055CE - 2,3363 \cdot 10^{-6}CE^2 + 4,4423 \cdot 10^{-10}CE^3$ $SO_4^{2-} = -0,011CE + 7,4042 \cdot 10^{-6}CE^2 - 1,1834 \cdot 10^{-9}CE^3$ $Ca^{2+} = -0,0005CE + 6,0071 \cdot 10^{-7}CE^2 - 9,8511 \cdot 10^{-11}CE^3$ $Mg^{2+} = -0,0302CE + 2,2304 \cdot 10^{-5}CE^2 - 3,6253 \cdot 10^{-9}CE^3$ $Na^+ + K^+ = -0,0614CE + 4,2489 \cdot 10^{-5}CE^2 - 6,6159 \cdot 10^{-9}CE^3$	0,72 0,91 0,90 0,61 0,84 0,90	Alta Muy Alta Muy Alta Alta Muy Alta Muy Alta
<b>Balneario</b>	<b><math>y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3</math></b>	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
La Merced	$HCO_3^- = -0,0268CE + 8,0229 \cdot 10^{-5}CE^2 - 4,3558 \cdot 10^{-8}CE^3$ $Cl^- = 0,0386CE - 8,5045 \cdot 10^{-5}CE^2 + 4,6641 \cdot 10^{-8}CE^3$ $SO_4^{2-} = -0,0203CE + 3,7337 \cdot 10^{-5}CE^2 - 1,6792 \cdot 10^{-8}CE^3$ $Ca^{2+} = 0,0018CE - 1,1981 \cdot 10^{-7}CE^2 - 7,2026 \cdot 10^{-11}CE^3$ $Mg^{2+} = 0,0202CE - 3,0564 \cdot 10^{-5}CE^2 + 1,4517 \cdot 10^{-8}CE^3$ $Na^+ + K^+ = -0,0194CE + 4,0395 \cdot 10^{-5}CE^2 - 1,7261 \cdot 10^{-8}CE^3$	0,62 0,90 0,42 0,22 0,70 0,30	Alta Muy Alta Moderada Baja Alta Baja
<b>Balneario</b>	<b><math>y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3</math></b>	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
Lloa	$HCO_3^- = -0,0099CE + 1,1836 \cdot 10^{-5}CE^2 - 1,9199 \cdot 10^{-9}CE^3$ $Cl^- = 0,0128CE - 7,1049 \cdot 10^{-6}CE^2 + 1,2225 \cdot 10^{-9}CE^3$ $SO_4^{2-} = 0,0026CE - 1,7953 \cdot 10^{-6}CE^2 + 3,0062 \cdot 10^{-10}CE^3$ $Ca^{2+} = 0,0098CE - 6,0609 \cdot 10^{-6}CE^2 + 1,0195 \cdot 10^{-9}CE^3$ $Mg^{2+} = -0,0145CE + 1,5281 \cdot 10^{-5}CE^2 - 3,0252 \cdot 10^{-9}CE^3$ $Na^+ + K^+ = 0,0152CE - 9,8707 \cdot 10^{-6}CE^2 + 2,1631 \cdot 10^{-9}CE^3$	0,99 0,99 0,99 0,99 0,99 0,99	Muy Alta Muy Alta Muy Alta Muy Alta Muy Alta Muy Alta
<b>Balneario</b>	<b><math>y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3</math></b>	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
Nangulví	$HCO_3^- = 0,0052CE - 2,2261 \cdot 10^{-6}CE^2 + 2,4942 \cdot 10^{-10}CE^3$ $Cl^- = -0,0995CE + 4,7227 \cdot 10^{-5}CE^2 - 5,1915 \cdot 10^{-9}CE^3$ $SO_4^{2-} = 0,0106CE - 7,4028 \cdot 10^{-8}CE^2 - 3,7813 \cdot 10^{-10}CE^3$ $Ca^{2+} = 0,0070CE - 8,3353 \cdot 10^{-7}CE^2 - 2,2926 \cdot 10^{-11}CE^3$ $Mg^{2+} = -0,0635CE + 2,7558 \cdot 10^{-5}CE^2 - 2,9427 \cdot 10^{-9}CE^3$ $Na^+ + K^+ = -0,0604CE + 3,2919 \cdot 10^{-5}CE^2 - 4,0089 \cdot 10^{-9}CE^3$	0,90 0,70 0,99 0,97 0,70 0,90	Muy Alta Alta Muy Alta Muy Alta Alta Muy Alta
<b>Balneario</b>	<b><math>y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3</math></b>	<b>r</b>	<b>Correlación</b>

CONTINÚA





Lagartijas	$HCO_3^- = 0,0315CE - 6,9582*10^{-5}CE^2 + 3,9648*10^{-8} CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Cl^- = 0,0588CE - 0,0001CE^2 + 9,5861*10^{-9} CE^3$	0,99	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = 0,0056CE - 1,2611*10^{-5}CE^2 + 2,1877*10^{-9} CE^3$	0,61	Alta
	$Ca^{2+} = 0,0151CE - 3,4813*10^{-5}CE^2 - 1,4938*10^{-8} CE^3$	0,31	Baja
	$Mg^{2+} = 0,0429CE - 9,4717*10^{-5}CE^2 + 3,0363*10^{-8} CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = -0,0035CE + 7,7575*10^{-6}CE^2 + 1,1238*10^{-8} CE^3$	0,99	Muy Alta
<b>Balneario</b>	$y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
Chachimbiro	$HCO_3^- = 0,0175CE - 5,9769*10^{-6}CE^2 + 5,2964*10^{-10} CE^3$	0,96	Muy Alta
	$Cl^- = -0,0374CE + 1,5389*10^{-5}CE^2 - 1,2932*10^{-9} CE^3$	0,90	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = -0,0029CE + 1,0097*10^{-6}CE^2 - 8,2171*10^{-11} CE^3$	0,70	Alta
	$Ca^{2+} = 0,0079CE - 2,3535*10^{-6}CE^2 - 1,8999*10^{-10} CE^3$	0,92	Muy Alta
	$Mg^{2+} = -0,0185CE + 6,1987*10^{-6}CE^2 - 4,9443*10^{-10} CE^3$	0,81	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = 0,0398CE - 9,4679*10^{-6}CE^2 + 6,7719*10^{-10} CE^3$	0,50	Moderada
<b>Balneario</b>	$y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
La Calera	$HCO_3^- = -0,0723CE + 0,0001CE^2 - 5,6805*10^{-8} CE^3$	0,43	Moderada
	$Cl^- = -0,0058CE + 8,0011*10^{-6}CE^2 - 1,7266*10^{-9} CE^3$	0,98	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = 0,0188CE - 2,8359*10^{-5}CE^2 + 1,0932*10^{-8} CE^3$	0,50	Moderada
	$Ca^{2+} = -0,0026CE + 1,0939*10^{-5}CE^2 - 5,1243*10^{-9} CE^3$	0,50	Moderada
	$Mg^{2+} = 0,0119CE - 2,1198*10^{-5}CE^2 + 1,2813*10^{-8} CE^3$	0,96	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = 0,0075CE - 9,9393*10^{-6}CE^2 + 5,1437*10^{-9} CE^3$	0,94	Muy Alta
<b>Balneario</b>	$y = b_1X + b_2X^2$	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
Gruta de La Paz	$HCO_3^- = 0,0312CE - 9,2770*10^{-6}CE^2$	0,54	Moderada
	$Cl^- = 0,0030CE - 4,9965*10^{-7}CE^2$	0,70	Alta
	$SO_4^{2-} = 0,0006CE - 1,9659*10^{-7}CE^2$	0,61	Alta
	$Ca^{2+} = 0,0173CE - 6,5210*10^{-6}CE^2$	0,99	Muy Alta
	$Mg^{2+} = 0,0043CE + 8,1533*10^{-7}CE^2$	0,81	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = -0,0075CE + 4,3002*10^{-6}CE^2$	0,99	Muy Alta
<b>Balneario</b>	$y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
Paluz	$HCO_3^- = 0,2341CE - 0,0004CE^2 + 2,0926*10^{-7} CE^3$	0,71	Alta
	$Cl^- = 0,03042CE - 5,8841*10^{-5}CE^2 + 2,9152*10^{-8} CE^3$	0,72	Alta
	$SO_4^{2-} = -0,0140CE + 2,8628*10^{-5}CE^2 - 1,4356*10^{-8} CE^3$	0,70	Alta
	$Ca^{2+} = 0,0717CE - 0,0001CE^2 + 4,7428*10^{-8} CE^3$	0,96	Muy Alta
	$Mg^{2+} = 0,0330CE - 5,5621*10^{-5}CE^2 + 2,7619*10^{-8} CE^3$	0,96	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = -0,0123CE + 2,6151*10^{-5}CE^2 - 1,2385*10^{-8}CE^3$	0,90	Muy Alta
<b>Balneario</b>	$y = b_1X + b_2X^2$	<b>r</b>	<b>Correlación</b>

CONTINÚA



Rumichaca	$HCO_3^- = 0,0743CE - 2,4082*10^{-5}CE^2$	0,99	Muy Alta
	$Cl^- = 0,0052CE - 9,2845*10^{-7}CE^2$	0,31	Baja
	$SO_4^{2-} = 0,0005CE - 1,5677*10^{-7}CE^2$	0,41	Moderada
	$Ca^{2+} = 0,0123CE - 3,9245*10^{-6}CE^2$	0,81	Muy Alta
	$Mg^{2+} = 0,0076CE - 9,7541*10^{-7}CE^2$	0,21	Baja
	$Na^+ + K^+ = 0,0028CE + 6,0281*10^{-7}CE^2$	0,81	Muy Alta
<b>Balneario</b>	$y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
Los Tres Chorros	$HCO_3^- = 0,1168CE - 0,0004CE^2 + 3,2487*10^{-7}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Cl^- = 0,0103CE - 3,4781*10^{-5}CE^2 + 2,9235*10^{-8}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = -0,0025CE + 1,1442*10^{-5}CE^2 - 9,4022*10^{-9}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Ca^{2+} = 0,0302CE - 0,0001CE^2 + 8,1084*10^{-8}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Mg^{2+} = 0,0199CE - 5,5995*10^{-5}CE^2 + 4,5356*10^{-8}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = -0,8487CE + 0,0031CE^2 - 2,4381*10^{-6}CE^3$	0,98	Muy Alta
<b>Balneario</b>	$y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
Aguas Hediondas	$HCO_3^- = 0,0015CE - 2,1627*10^{-6}CE^2 + 7,4033*10^{-10}CE^3$	0,41	Moderada
	$Cl^- = -0,0011CE + 2,9409*10^{-6}CE^2 - 7,2925*10^{-10}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = 0,0923CE - 9,1665*10^{-5}CE^2 + 2,5070*10^{-8}CE^3$	0,93	Muy Alta
	$Ca^{2+} = 0,0147CE - 1,4531*10^{-5}CE^2 + 4,2549*10^{-9}CE^3$	0,95	Muy Alta
	$Mg^{2+} = -0,0181CE + 2,6617*10^{-5}CE^2 - 8,3379*10^{-9}CE^3$	0,81	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = 0,0814CE - 0,0001CE^2 + 3,5223*10^{-8}CE^3$	0,63	Alta
<b>Balneario</b>	$y = b_1X + b_2X^2 + b_3X^3$	<b>r</b>	<b>Correlación</b>
San Miguel de Car	$HCO_3^- = 0,0427CE - 0,0001CE^2 + 4,7337*10^{-8}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Cl^- = -0,0028CE + 7,1031*10^{-6}CE^2 - 1,1499*10^{-8}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$SO_4^{2-} = -0,0108CE + 2,7165*10^{-5}CE^2 + 2,4163*10^{-8}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Ca^{2+} = 0,0142CE - 3,5899*10^{-5}CE^2 + 1,6773*10^{-8}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Mg^{2+} = -0,0108CE + 2,7165*10^{-5}CE^2 - 2,4162*10^{-8}CE^3$	0,99	Muy Alta
	$Na^+ + K^+ = 0,0087CE - 2,2134*10^{-5}CE^2 + 2,2276*10^{-8}CE^3$	0,99	Muy Alta

### 3.7.3.6. Índices de similitud para la validación de los modelos de correlación matemática

Los índices de similitud entre la concentración iónica real y la concentración iónica estimada por modelación se muestran en la Tabla 23, asimismo se puede apreciar que los índices son superiores a 0,9 lo que indica una alta similitud.

**Tabla 23.**  
**Índices de similitud para la validación de los modelos de correlación matemática**

Balneario	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Índice de Similitud
Guachalá	16,09	9,06	0,02	1,73	7,60	15,71	0,98
El Tingo	25,58	9,88	0,26	1,43	11,99	21,48	0,90
La Merced	7,65	4,70	0,39	1,88	5,36	4,97	0,90
Lloa	11,31	7,14	0,57	3,85	7,28	8,39	0,99
Nangulví	1,37	34,32	6,28	10,96	4,23	22,61	0,92
Lagartijas	3,81	0,83	0,13	1,13	2,88	1,11	0,94
Chachimbiro	7,68	49,52	0,85	4,68	5,32	43,96	0,90
La Calera	12,48	1,86	0,65	3,79	7,13	4,05	0,98
Gruta de La Paz	20,39	4,66	0,19	1,71	17,64	9,86	0,92
Paluz	8,93	1,01	0,14	3,63	5,86	1,67	0,96
Rumichaca	3,39	15,25	0,46	1,57	30,16	31,12	0,92
Los Tres Chorros	12,04	2,04	0,67	3,40	6,42	26,79	0,91
Aguas Hediondas	0,16	3,73	16,87	4,75	5,35	14,18	0,99
San Miguel de Car	2,24	0,81	1,79	0,81	1,79	1,28	0,81

En la Zona Norte existen aguas de cuatro diferentes familias: Sulfatadas Sódicas cuyos diagramas de Stiff tienen forma de “reloj de arena”, Bicarbonatadas Magnésicas con diagramas ten forma de punta de flecha, Bicarbonatadas Sódicas tuvieron forma de un polígono irregular y finalmente Cloruradas Sódicas que tuvieron forma de “T”, estas formas de los diagramas de Siff se relacionan con la litología predominante donde tuvieron basamento los balnearios y por la cual han recorrido las aguas para adquirir sus composiciones.

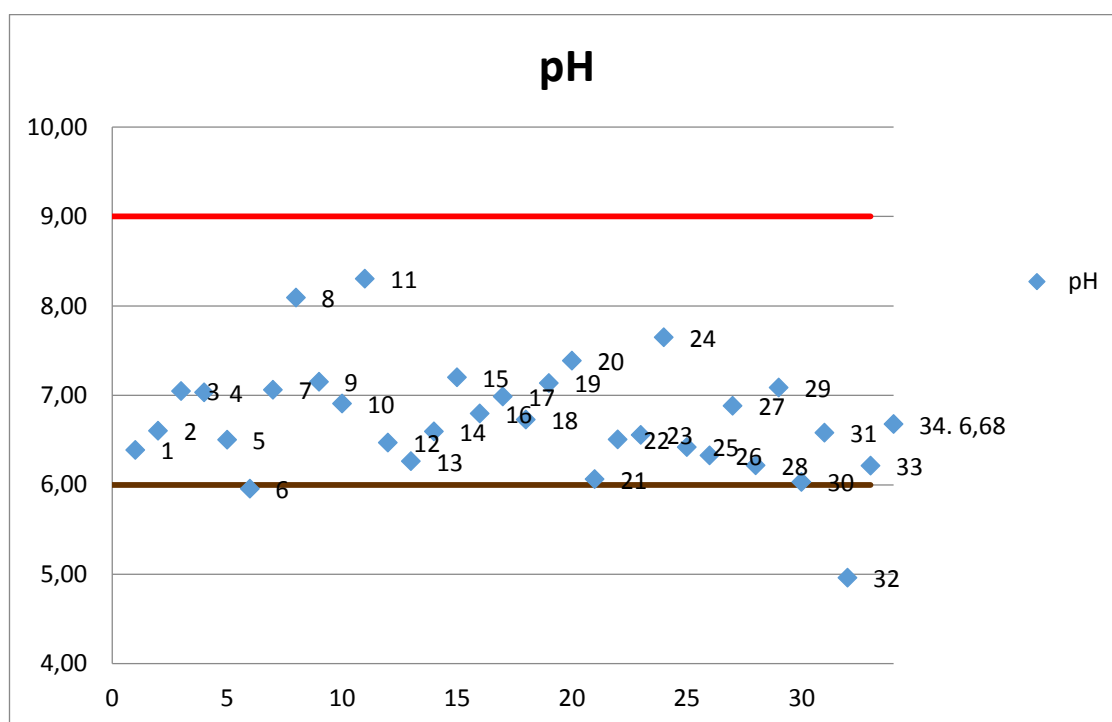
Los modelos de regresión matemática fueron obtenidos por ecuaciones de ajuste de 2<sup>do</sup> y 3<sup>er</sup> grado, el 4,76% de las ecuaciones tuvieron una correlación “Baja”, el 8,83% tuvieron correlación Moderada, el 16,67% tuvieron una correlación “Alta” y el 70,24% con una correlación “Muy Alta“, esto debido a la variabilidad de los valores de composición iónica de estas aguas a través del tiempo, finalmente, los Índices de Similitud superaron el 0,8 por lo que las ecuaciones determinadas son aptas para la estimación de la concentración iónica para futuras muestras, sin

embargo, para las ecuaciones de iones que posean correlación “Baja” se recomienda realizar la determinación de dicho ion en laboratorio.

### 3.8. Calidad de agua para Consumo Humano y doméstico

Tomando en cuenta los parámetros límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico del TULSMA Libro VI, anexo I establecidos por el MAE y las directrices para la calidad del agua potable establecidos por la OMS se obtuvieron los siguientes resultados.

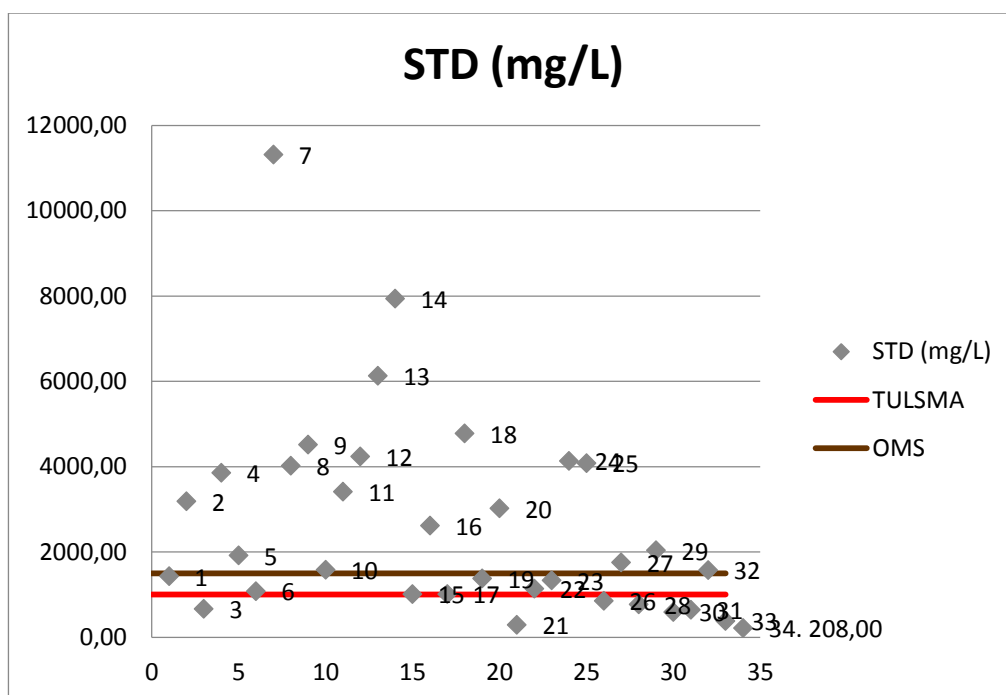
El nivel óptimo de pH sugerido por la OMS en las Directrices para la calidad del Agua potables establecidas en Génova, 1993 y los límites sugeridos por el TULSMA, son entre 6 a 9 como se observa en la Figura 56, a excepción de la muestra de Aguas Hediondas que presentó un pH ácido el resto de muestras cumplen con los límites permisibles.



**Figura 56.** Contenido de pH en aguas de origen geotermal y límites permisibles

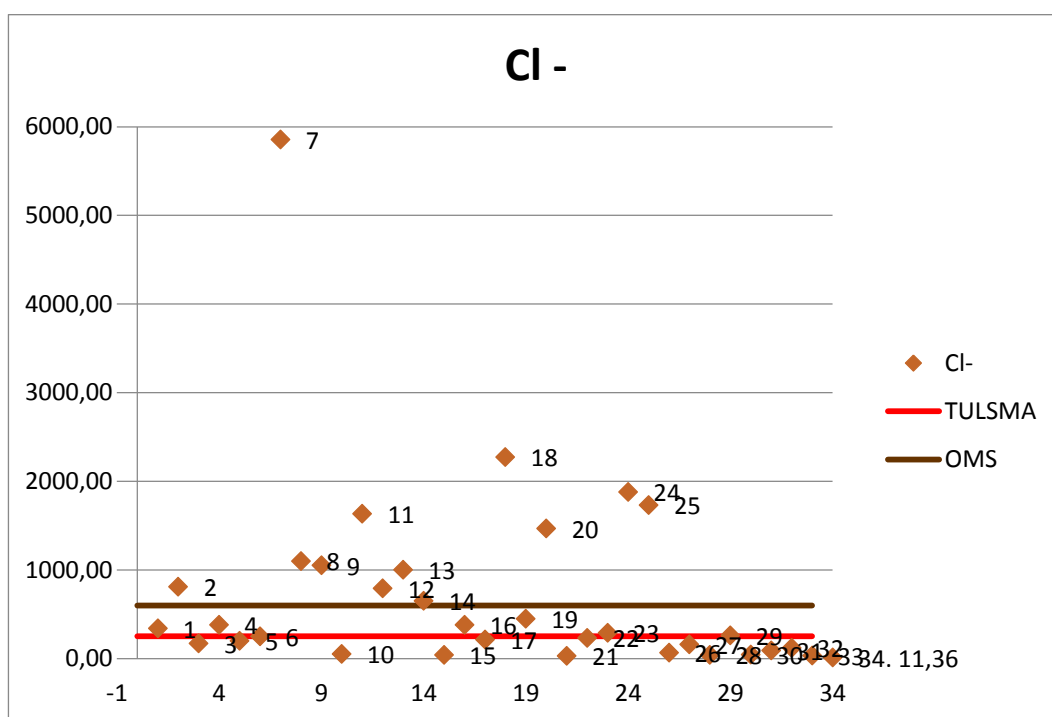
El nivel máximo de STD sugerido por la OMS en las Directrices para la calidad del Agua potables establecidas en Génova, 1993 es de 1500 mg/L mientras que los límites sugeridos por el TULSMA, es de 1000 mg/L, en la Figura 58 se observa que

el 55,88% de las muestras no cumplen con los límites permisibles ni de la OMS como la del TULSMA. Para la OMS (2006) un contenido elevado de cloruros puede dañar las conducciones y estructuras metálicas y perjudicar el crecimiento vegetal, no así en las aguas de consumo humano donde no representan más inconvenientes que el gusto desagradable del agua, además de no plantear problemas de potabilidad.



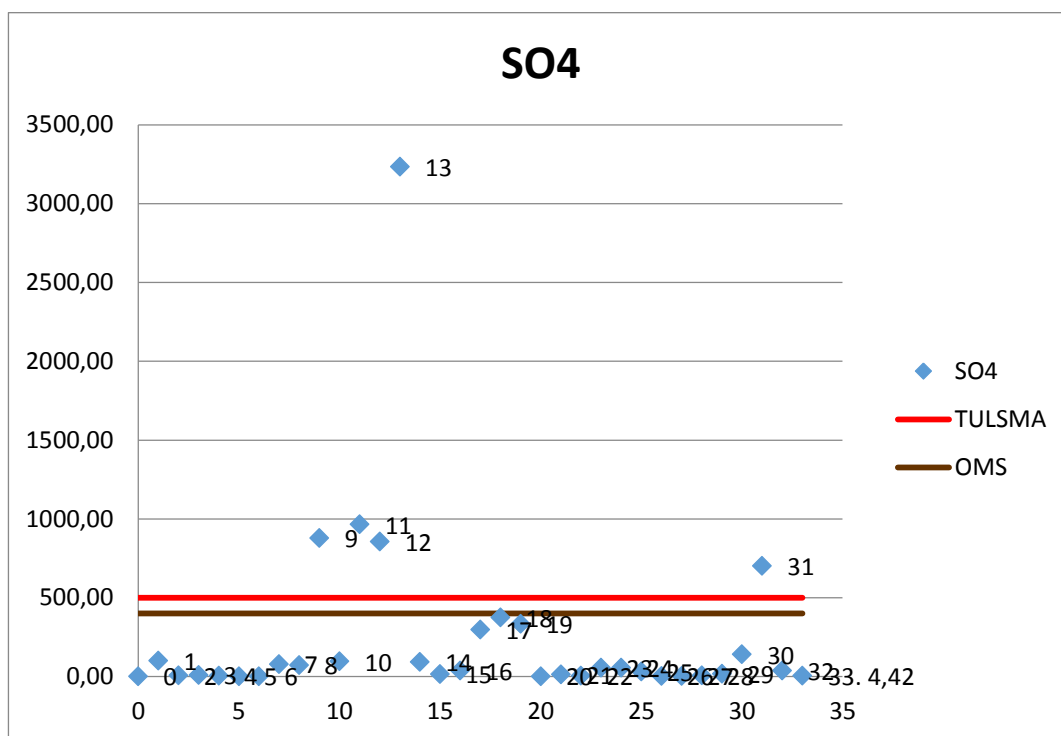
**Figura 57.** Contenido de Solidos Totales Disueltos en aguas de origen geotermal y límites permisibles

El nivel máximo de cloruros sugerido por la OMS en las Directrices para la calidad del Agua potables establecidas en Génova, 1993 es de 600 mg/L mientras que los límites sugeridos por el TULSMA, es de 250mg/L, en la Figura 58 se observa que el 55,88% de las muestras no cumplen con los límites permisibles ni de la OMS como la del TULSMA. Para la OMS (2006) un contenido elevado de cloruros puede dañar las conducciones y estructuras metálicas y perjudicar el crecimiento vegetal, no así en las aguas de consumo humano donde no representan más inconvenientes que el gusto desagradable del agua, además de no plantear problemas de potabilidad.



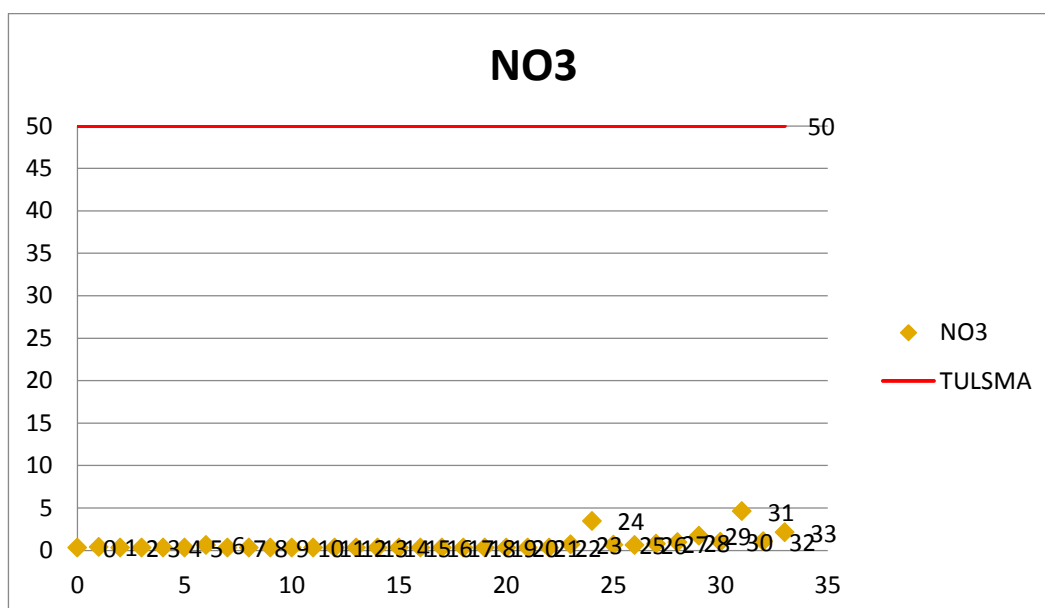
**Figura 58.** Contenido de Cloruros en aguas de origen geotermal y límites permisibles

El nivel máximo de Sulfatos sugerido por la OMS en las Directrices para la calidad del Agua potables establecidas en Génova, 1993 y los límites sugeridos por el TULSMA, es de 250mg/L y 600mg/L respectivamente, en la Figura 59 se observa que el 14,71% de las aguas muestreadas superan los límites permisibles, para Lenntech (2016) una alta concentración de sulfato en agua potable tiene un efecto laxativo cuando se combina con calcio y magnesio, los dos componentes más comunes de la dureza del agua. Las personas que no están acostumbradas a beber agua con niveles elevados de sulfato pueden experimentar diarrea y deshidratación.



**Figura 59.** Contenido de Sulfatos en aguas de origen geotermal y límites permisibles

El límite permisible según el TULSMA es de 50 mg/L como se observa en la Figura 60, el 100% de las muestras no superan este límite. Una exposición corta a agua potable con un nivel de nitrato superior al estándar es un problema potencial para la salud, especialmente para los bebés (Lenntech, 2016).



**Figura 60.** Contenido de Nitratos en aguas de origen geotermal y límites permisible

## CAPÍTULO IV

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las fuentes de agua termal en el Ecuador pueden ser divididas en dos grupos, las que están asociadas a una extinta actividad volcánica producida en el Cenozoico (Oligoceno, Mioceno y Plioceno) y las que están asociadas a una joven actividad volcánica del Cuaternario. Las primeras se caracterizan por ser aguas generalmente Cloruradas Sódicas (Guapán, Los Elenes, Baños de Cuenca, Cununyaku y Nagulví), registran altas temperaturas y mineralización y sus gráficos de Stiff tuvieron forma de “T”. Para las fuentes de agua del Cuaternario se destacan por ser: Bicarbonatadas Magnésicas y Bicarbonatadas Sódicas, Sulfatadas Sódicas y Sulfatadas Magnésicas y están relacionadas a la compleja geología de depósitos vulcano clásticos de rocas ígneas (basaltos y riolitas) y metamórficas (esquistos) característicos de la Cordillera Real y el Valle Interandino de donde emergen estas aguas, sus diagramas de Stiff tuvieron forma de punta de flecha ( $Mg^{2+}$ - $HCO_3^-Na^+$ - $HCO_3^-$ ) y polígonos irregulares ( $Mg^{2+}$ - $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$ - $SO_4^{2-}$ ).
- Los modelos de regresión matemática fueron obtenidos por ecuaciones de ajuste de 2<sup>do</sup> y 3<sup>er</sup> grado, el 5,56% de las ecuaciones tuvieron una correlación “Baja”, el 8,02% tuvieron correlación Moderada, el 10,49% tuvieron una correlación “Alta” y el 75,93% con una correlación “Muy Alta”, esto debido a la variabilidad de los valores de composición iónica de estas aguas a través del tiempo, finalmente, los Índices de Similitud superan el 0,9 por lo que las ecuaciones determinadas son aptas para la estimación de la concentración iónica para futuras muestras, sin embargo, para las ecuaciones de iones que posean correlación “Baja” se recomienda realizar la determinación de dicho ion en laboratorio.
- De las 34 muestras recolectadas el 44,12% son aguas denominadas “No Válidas” según el criterio de la norma Wilcox, siendo las aguas Cloruradas Sódicas las más abundantes, el 14,71% cayeron en la clasificación de “Dudosa” por lo que estas aguas y las anteriores no son aptas para uso



agrícola; apenas el 2,94% se la considera como “Admisible”, mientras que el 24,41% se las considera como “Buena” siendo las aguas Bicarbonatadas Magnésicas las más abundantes, finalmente, el 8,82% tuvieron la clasificación de “Excelente” y pertenecen a los balnearios de Lagartijas, San Miguel de Car y El Puetate esto debido a su bajos valores de Conductividad Eléctrica y Sodicidad. Las tres últimas clasificaciones podrían considerarse aptas para uso agrícola.

- Con respecto a la Norma Riverside el 8,82% de las aguas muestreadas de son buena calidad aptas para el riego, el 70,58% de las muestras de agua son utilizables para el riego con precauciones, deben usarse solo en suelos muy permeables o con buen drenaje y en cultivos tolerables a la salinidad y no sensibles al sodio, finalmente, el 20,60% son aguas no aptas para el riego debido a su alta salinidad y alto riesgo de acumulación de sodio.
- En cuanto al análisis de calidad del agua para el consumo humano con respecto al pH se puede concluir que 97% de las aguas muestreadas se encuentran dentro de los límites permisibles para agua de consumo humano establecido por el TULSMA y las directrices para la calidad del agua potable establecidos por la OMS, con respecto a los STD el 52,94% cumplen con los límites permisibles, para los Cloruros el 44,12% de las aguas muestreadas cumplen con los límites permisibles, con respecto a los Sulfatos el 14,71% superan los límites permisibles y finalmente con respecto a los nitratos el 100% cumplen con las normas y directrices establecidas. Es necesario mencionar que las aguas para consumo humano requieren más evaluación, por ejemplo, microorganismos y metales pesados, por consiguiente antes de utilizar del agua será necesario completar el análisis.
- Se recomienda realizar los estudios bacteriológicos de los manantiales termales con el objetivo de identificar las nuevas bacterias hipertermófilas y microorganismos alóctonos capaces de soportar temperaturas extremas existentes en estas aguas.
- Se recomienda estudiar los fangos y barros termales, ya que en países de Europa se los utiliza de manera terapéutica y cosmética resultando eficaces en

la lucha contra las arrugas, puesto que proporciona magnesio, cobre y zinc (productores de colágeno y elastina) y silicio.

- Se recomienda realizar el análisis de la composición isotópica y de los gases que emanen estas fuentes termales con el objetivo de entender mejor los procesos de interacción entre gas- agua y determinar los procesos geoquímicos que han sufrido estas aguas a través del tiempo.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, E., Vinardell, I., Fagundo, J. R., Reguera, E., & Cardoso, M. E. (1990). Control de la calidad de las aguas mediante un sistema automatizado. *Estudios Geológicos*, 409-414.
- Aspden, J. A., & Litherland, M. (1992). The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics*, 187-204.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1976). *Water Quality for Agriculture*. Roma, Italia: FAO.
- Ayers, R., & Westcot, D. (1987). La calidad del agua y su uso en la agricultura. *Riego y Drenaje*, 176.
- Bisquerra, R. (1989). *Introducción Conceptual al análisis multivariable*. Barcelona: PPU.
- Burbano, N., Becerra, S., & Pasquel, E. (2013). *Aguas Termominerales en el Ecuador*. Quito, Ecuador: INAMHI.
- Burbano, N., Becerra, S., & Pasquel, E. (2014). *Introducción a la Hidrogeología del Ecuador* (Segunda ed.). Quito, Ecuador: INAMHI.
- Custodio, E., & Llamas, M. (2001). *Hidrología Subterránea. Tomo I*. Barcelona, España: Ediciones Omega.
- Duzen, H., & Ozler, H. (2015). Investigation of Hydrogeological and Hydrogeochemical Properties of Muradiye-Caldiran(Van) Geothermal Field, Eastern Turkey. *World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium*, 627-634.
- Fagundo, J. R., González, M., Suárez, J., Fagundo-Sierra, C., Melián, E., & Álvarez, G. (2005). Hidrogeoquim. *Contribucion a la Educación y Protección Ambiental ISCTN*, 58-67.
- Fagundo-Sierra, J., Fagundo, J. R., González, P., & Suárez, M. (2001). Modelación de las Aguas Naturales. *ISCTN: Contribución a la Educación y Protección Ambiental, II*.

- Hall, M. L., & Beate, B. (1991). *El Volcanismo Plio-cuaternario en los Andes del Ecuador* (Vol. IV). Quito: Corp. Edit. Nacional.
- Hall, M., & Mothes, P. (2008). The Chacana Caldera Complex - Ecuador. *Workshop on collapse Caldera - Abstract*.
- Hall, M., Samaniego, P., Le Pennec, J.-L., & Johnson, J. (2008). Ecuadorian Andes Volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1-6.
- Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (2002). Statistical Methods in Water Resources. En U. G. Survey, *Hydrologic Analysis and Interpretation* (págs. 17-64). Reston.
- Henderson, T. (1985). Geochemistry of ground-water in two sandstone aquifer systems in Northern Great Plains in parts of Montana and Wyoming. *U.S. Geological survey Professional Paper*, 84.
- Hernández, M. (2002). *Caracterización Hidrogeoquímica de la Cuenca Hidrogeológica Sur de Pinar del Río*. Facultad de Geografía.
- Herrera, F. (Mayo de 2013). Caracterización de los Depósitos de Avalanchas de Escombros en el tramo Píllaro - Patate. Quito.
- Hounslow, A. W. (1995). *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*. Oklahoma: Lewis Publishers.
- Hughes, R., & Pilatasig, L. (2002). Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, 29-48.
- IG-EPN. (24 de Febrero de 2015). *Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional*. Obtenido de Vertientes Termales en el Ecuador y el riesgo/peligro de morir por efecto de los gases burbujeantes:  
<http://www.igepn.edu.ec/interactuamos-con-usted/952-vertientes-termales-en-el-ecuador-y-el-riesgo-peligro-de-morir-por-efecto-de-los-gases-burbujeantes>

- Inguaggiato, S., Hidalgo, S., Beate, B., & Bourquin, J. (2010). Geochemical and Isotopic Characterization of volcanic and geothermal fluids discharged from Ecuadorian volcanic arc. *Geofluids*, 1-17.
- Jiménez, A. (2002). *Mejora de una finca en el Término Municioal de Daimiel*. Castilla: Universidad de Castilla - La Mancha.
- Lenntech. (2006). *Lenntech BV*. Obtenido de Purificación del aire y tratamiento del agua: <http://www.lenntech.es/home-esp.htm>
- Lenntech. (2016). *Lenntech - Nitratos*. Recuperado el 2, de <http://www.lenntech.es/nitratos.htm>
- Leonarte, T. (2005). Calidad de las aguas subterráneas de Gerona y La Fé. *Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, VI*, 45-58.
- Litherland, M., Aspden, J. A., & Jemielita, R. A. (1994). The metamorphic belts of Ecuador, Overseas memoir 11. *British Geological survey*.
- Manzano, R., & Naranjo, H. (2012). *Caracterización hidrogeológica de la Unidad Machala*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Martínez, A. (1998). Interpretación Ambiental de Datos hidrogeoquímicos de la Laguna Continental de Castiñeiras (Pontevedra, SW Galicia). *Geographicalia*, 101-109.
- Miller, T., & Gonthier, J. (1984). Oregon ground-water quality and its relation to hydrogeological factors- a statistical approach. *U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report*, 88.
- Moreno, C., Díaz, J. C., Caraballo, H., Chacón, K., & Baptista, J. G. (2007). Caracterización Hidrogeoquímica de las Fuentes de Aguas Termales del Estado Trujillo - Venezuela. *Academia, VI*, 92-105.
- Organización Mundial de la Salud. (1993). *Guidelines for Drinking-Water Quality* (Segunda ed., Vol. I). Ginebra.
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la calidad del agua potable* (Tercera ed., Vol. I).

- Ortega, S., & Orellana, G. (2007). El riego con aguas de mala calidad en la agricultura urbana. Aspectos a considerar I. Aguas salinas o alcalinas. *Ciencias Técnicas Agropecuarias* , 41-44.
- Paladines, A. (2011). Aguas termales, minerales y naturales de manantial en el Ecuador. En A. Paladines, *Geología y Recursos del Ecuador*.
- Pavón , A. (2003). *Instalación de Riego por Goteo en una Parcela de Maíz* . Castilla: Universidad de Castilla - La Mancha.
- Ruiz, A. G. (1993). Estudio Geovulcanológico del Complejo Volcánico Imbabura. *Tesis de grado, Ingeniería Geológica*, 317.
- Suárez, M., & Fagundo, J. R. (s.f.). Papel del agua mineral en el organismo y características terapéuticas de las aguas minerales. 1-11.
- USDA Salinity Laboratory Staff. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *USDA Handbook*, 60-160.
- Vidal, M. (1993). La Calidad Agronómica de las Aguas de Riego. *Agricultura: Revista Agropecuaria*(734), 351-361.
- Wainwright, M. (1984). Sulfur Oxidation in Soils. *Adv Agron*, 349-396.
- Wallace, J. S., & Batchelor, C. H. (1997). Managing Water Resources for Crop Production. *biological Science*(352), 937-947.
- Winkler , W., Villagómez, D., Spikings, D., Abegglen, P., Tobler, S., & Egeuz, A. (2005). The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the Interandean depression in the Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 5-19.
- World Water Assesment Programme. (2009). *Tercer Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo*.