



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

AUTOR: ALEXANDER HIDALGO

TUTOR: ING. DAVID CARRERA Ph.D.

OPOSITORA: ING. PAULINA GUEVARA

SECRETARIO ACADÉMICO: DR. MARCELO MEJÍA

Universidad de
las Fuerzas
Armadas -ESPE

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

Ingeniería Geográfica y del
Medio Ambiente

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



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



ANTECEDENTES

1892

Teodoro Wolf

- "Geografía y Geología del Ecuador"



Abundancia y variedad de aguas termales y minerales existentes en las región interandina, lastimosamente el uso que se hace de ellas es nulo.

1949 – 1968

Dr. José E. Muñoz

- "Aguas Minerales del Ecuador y nociones de hidrología general"
- "Guía de Aguas Minerales del Ecuador"

Información sobre las principales aplicaciones y propiedades terapéuticas que poseen.

1994

Universidad Central del Ecuador

- información físico-químico y microbiológico de aguas termales de cuatro provincias (Carchi, Imbabura, Pichincha y Cotopaxi)

ANTECEDENTES

2010

Instituto Geofísico -EPN

- Geochemical and Isotopic Characterization of volcanic and geothermal fluids discharged from Ecuadorian volcanic arc.

2013

IINAMHI

- *Aguas Termominerales en el Ecuador.*

Venezuela, Colombia y Perú existen estudios sobre caracterizaciones hidrogeoquímicas; tienen como objetivo mostrar las composiciones químicas y su posibilidad de ser explotadas como balnearios turísticos.

Cuba: control y monitoreo de la calidad del agua, utilizando SOFTWARES específicos basados en modelos hidrogeoquímicos que permiten predecir la composición química a partir de valores de la conductividad eléctrica (Hernández, 2002),

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Lamentablemente hasta ahora, salvo casos aislados, no se ha hecho nada por conocer e investigar las aguas termales y minerales del Ecuador (Paladines, 2011).

No se encontró 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)

JUSTIFICACIÓN

- 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.



● Evaluación preliminar de la calidad del agua de estas fuentes geotermales para consumo humano y uso agrícola.

● Creación de modelos hidrogeoquímicos que simulen y pronostiquen su composición química a partir de los valores de conductividad eléctrica,

● Caracterización hidrogeoquímica de las de aguas geotermales, la cual explicó procesos hidrogeoquímicos mediante técnicas gráficas hidroquímicas como Diagramas de Piper, Diagramas de Stiff y Diagramas de Schoeller – Berkaloff.

OBJETIVOS

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

Determinar los parámetros físicos y químicos: pH, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ B^- , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , CO_3^{2-} , (para aguas con $\text{pH} > 8.2$), Residuo Seco Evaporado, Residuo Seco Calcinado en las aguas geotermales del callejón interandino en el Ecuador.

2

Caracterizar desde el punto de vista hidrogeoquímico a las fuentes de agua de origen geotermal utilizando técnicas gráficas hidroquímicas.

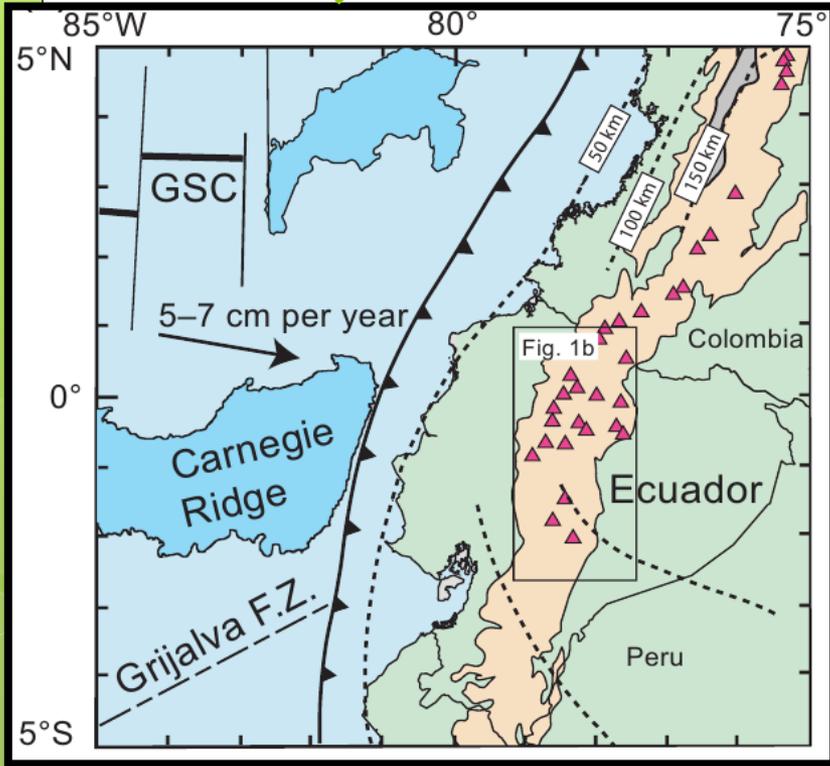
3

Encontrar relaciones matemáticas que permitan estimar la composición química del agua mediante mediciones de conductividad eléctrica.

4

Conocer la calidad del agua de las fuentes según sus características físico-químicas para identificar el aprovechamiento y uso más idóneo del recurso.

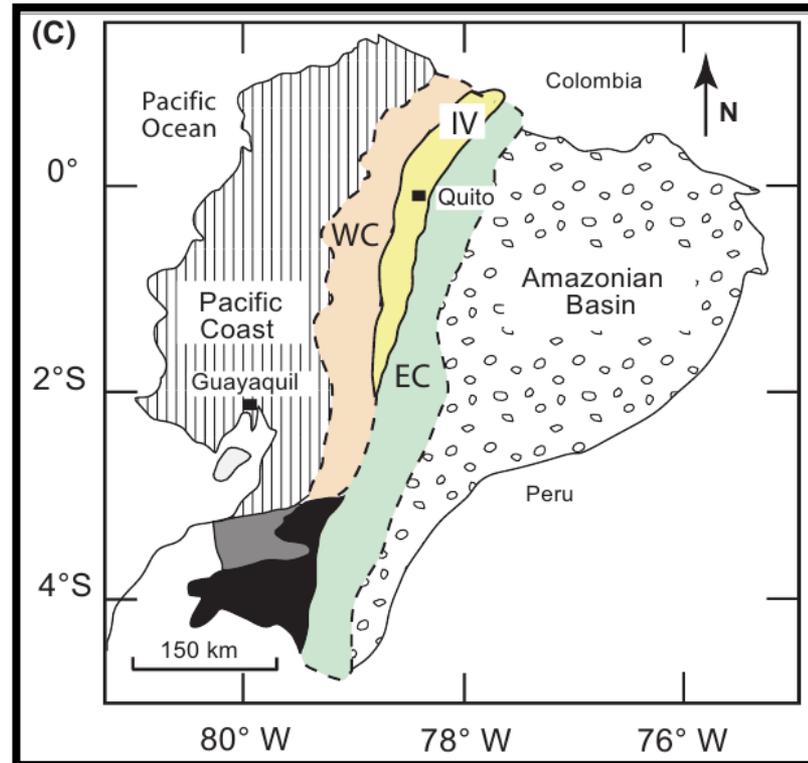
Las aguas termales y minerales en el país, genéticamente están relacionadas con aparatos volcánicos jóvenes y sistemas de fallas y fisuras.



Gutscher et al., (1999)

Marco Geológico

- Frente Volcánico → Cordillera Occidental
- Arco Principal → Valle Interandino
- Arco Posterior → Cuenca Amazónica
- Arco Saraguro → Al sur de los 2°S existe impresionantes remanentes de actividad volcánica del Mioceno



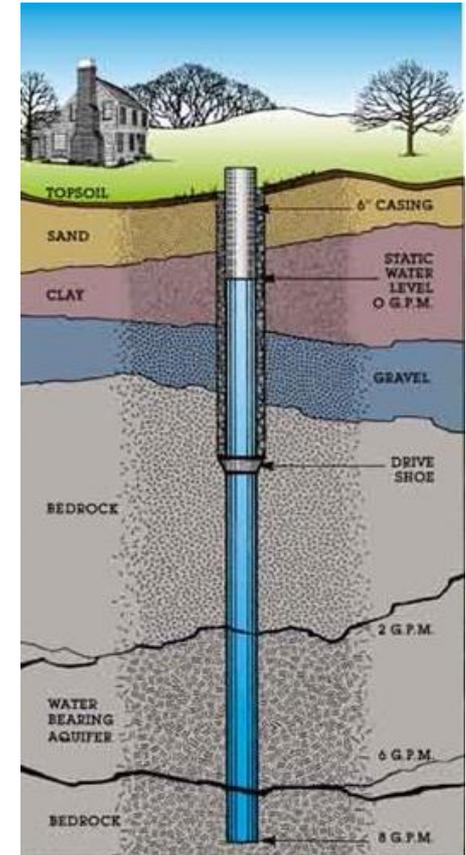
Aspden et al., (1992)

Hidrogeoquímica

La evolución de la calidad del agua permite detectar cambios en las características químicas con el fin de detectar tendencias químicas

Equilibrio químico con los minerales que la componen, el suelo y la roca que la limitan, y esto hace que el agua sature el suelo con sólidos diluido

Aspectos geoquímicos del agua en sí y su relación con las rocas de la corteza terrestre y su geología local o regional



La CE 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.

Concentración iónica se han encontrado correlaciones altamente significativas con los iones más abundantes.

Fagundo *et al.*, (2001), han estudiado la relación entre la litología y la naturaleza de las ecuaciones de dependencia matemática entre la concentración iónica y la conductividad eléctrica.

Regiones donde la composición química de las aguas se hacen constantes, es posible controlara mediante mediciones de conductividad eléctrica

HIDROGEOQUIM: Sistema Automatizado para el procesamiento de datos hidroquímicos.

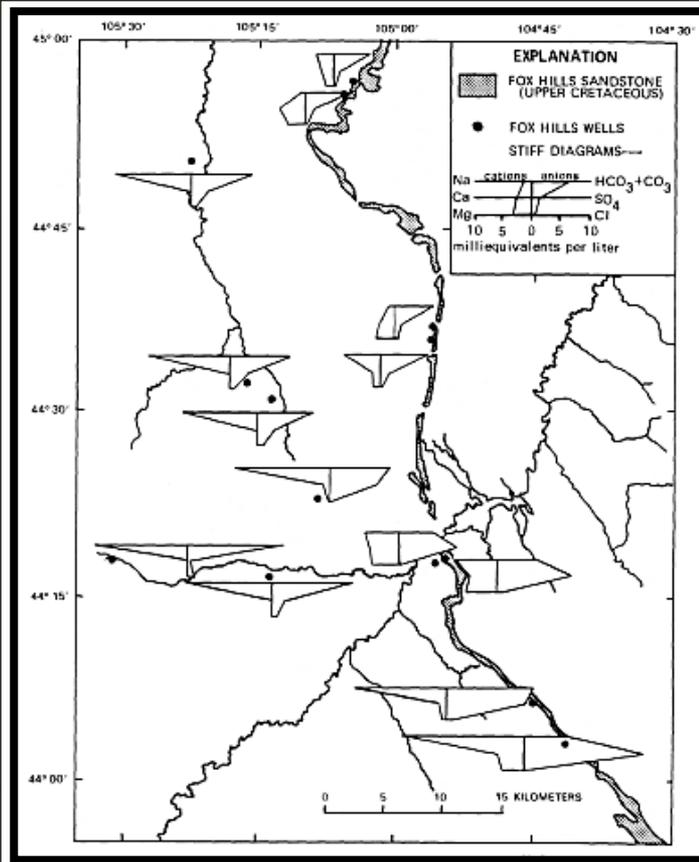
- Es un sistema de procesamiento de datos hidroquímicos, implementado en Windows, con ficheros de datos similares o transformables entre sí a través del propio software, que permite obtener propiedades químico-físicas de las aguas y la variación temporal de diferentes variables (Fagundo *et al.*, 2005).

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

- 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.
- 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

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4 + b_5x^5$$

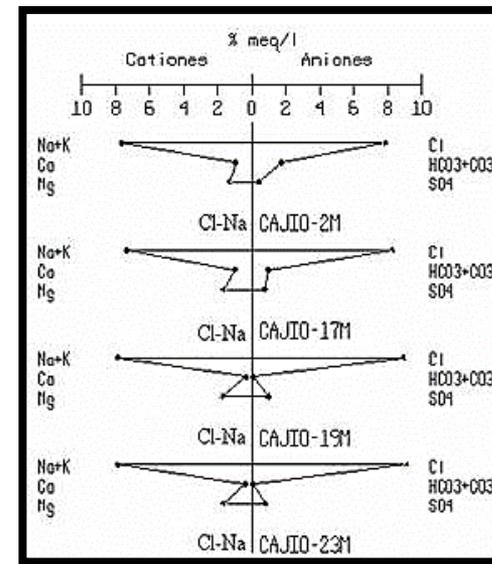
Donde $y=C_i$ y $x=CE$.

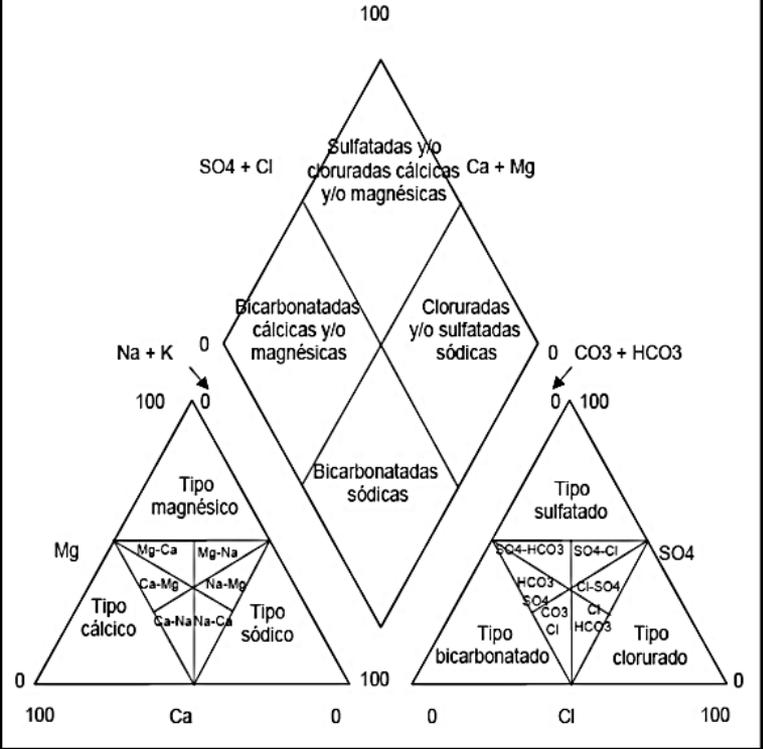


Diagramas de Stiff

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

Son utilizadas con el propósito de clasificación de agua y resultan fácilmente demostrativas al insertarlas en mapas hidroquímicos

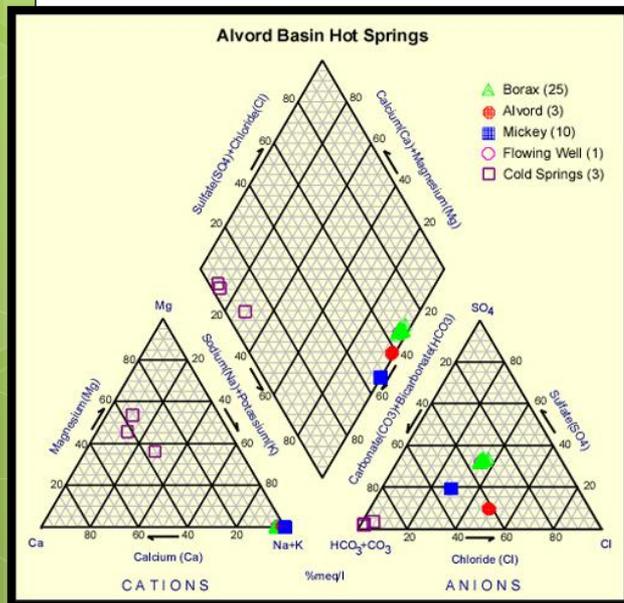


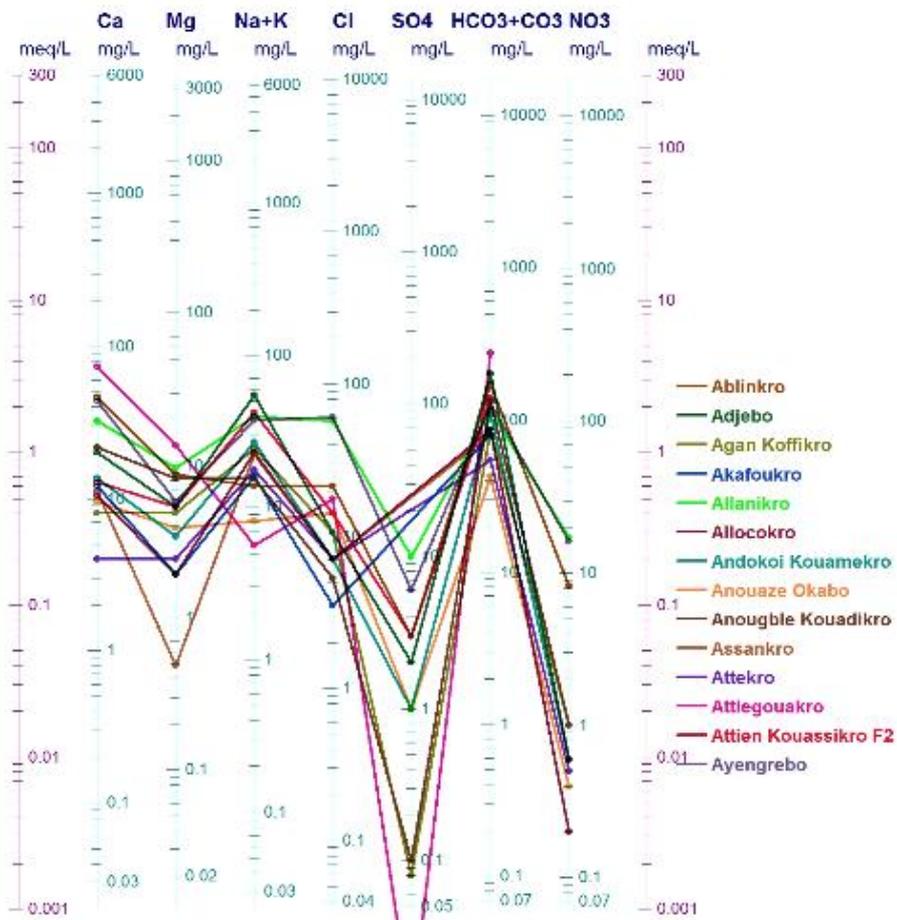


Diagramas de Piper

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.

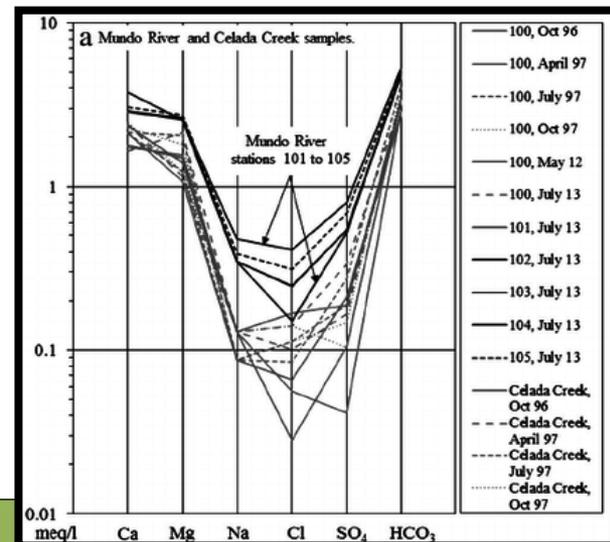
Las concentraciones de los iones dadas en meq/L se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes respectivamente. En cada triángulo se reúnen solo tres aniones y tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión (Helsel & Hirsch, 2002).





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).

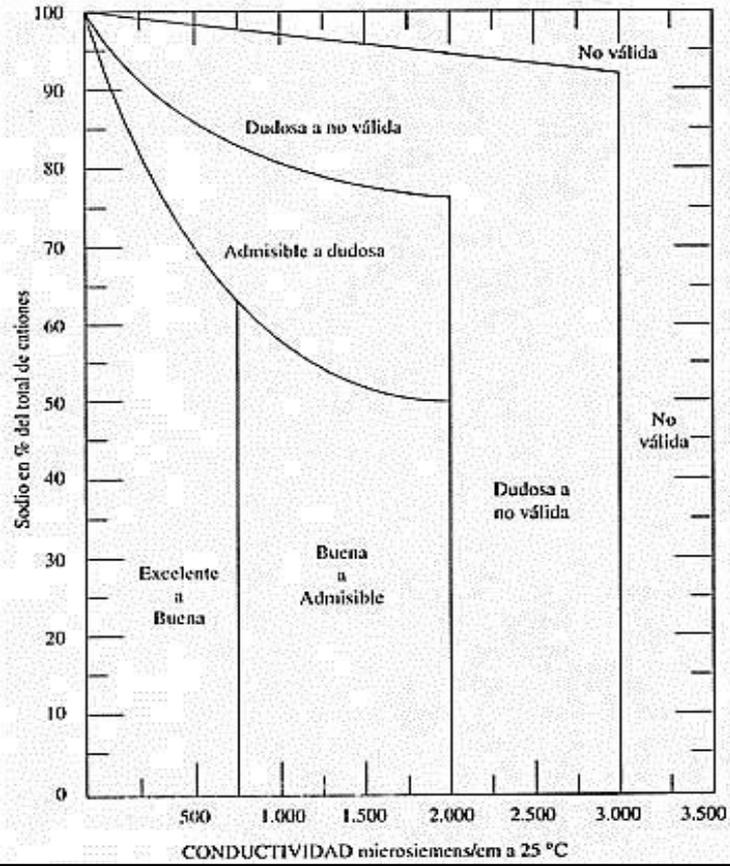


Calidad de agua para Riego

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.

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

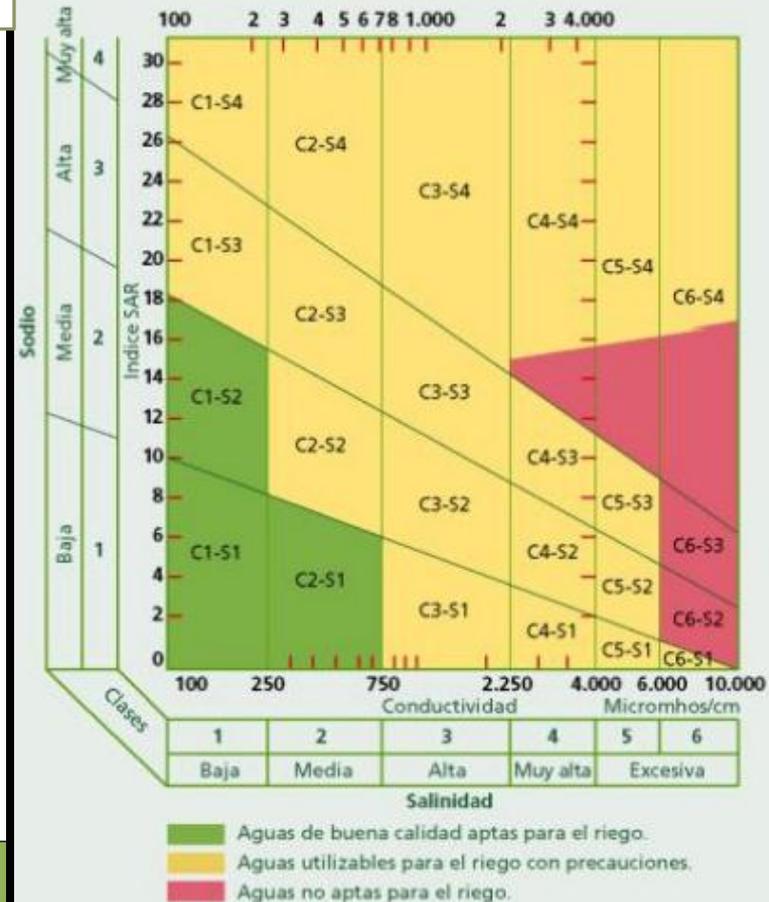


Norma Wilcox

Considera como índices para la clasificación de aguas el porcentaje de sodio respecto al total de cationes y la Conductividad Eléctrica.

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

Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego. (U.S. Soil Salinity Laboratory).



Calidad de agua para consumo humano y doméstico

Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico

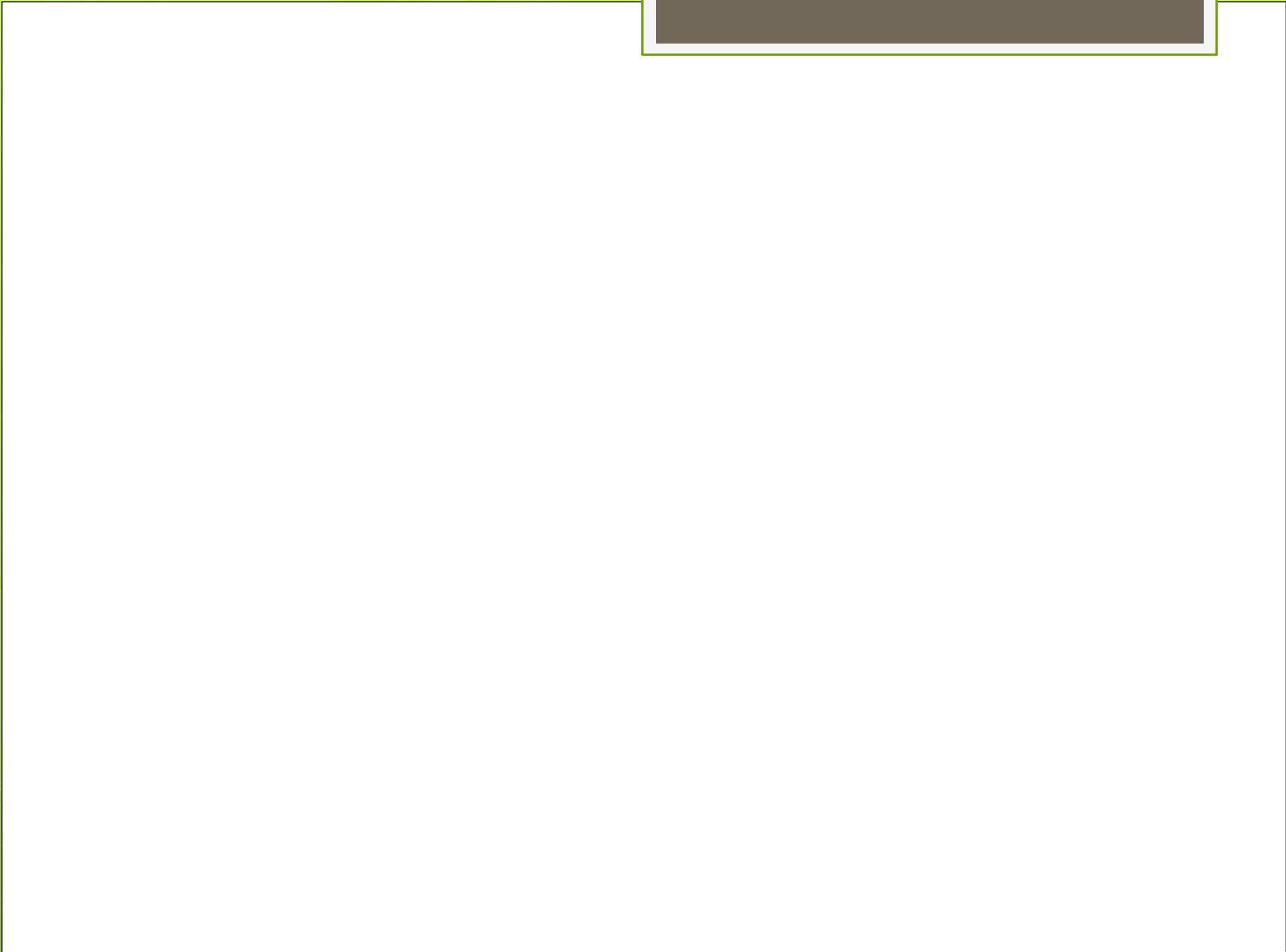
Parámetros	Expresado Como	Unidad	Límite Máximo Permissible
Potencial de Hidrógeno	pH	-	6 a 9
Conductividad	CE	µs/cm	250
Sólidos totales disueltos	STD	mg/L	1000
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	mg/L	500
Cloruros	Cl ⁻	mg/L	250
Nitratos	N-Nitrato	mg/L	50

Fuente: (TULSMA, 2015)

Directrices de la OMS para la calidad del agua potable

Sustancia	Unidad	Concentración máxima permissible
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	1500
Sulfatos	mg/L	500
Cloruros	mg/L	600
pH	mg/L	6.5 – 9.2

Fuente: (Organización Mundial de la Salud, 1993)



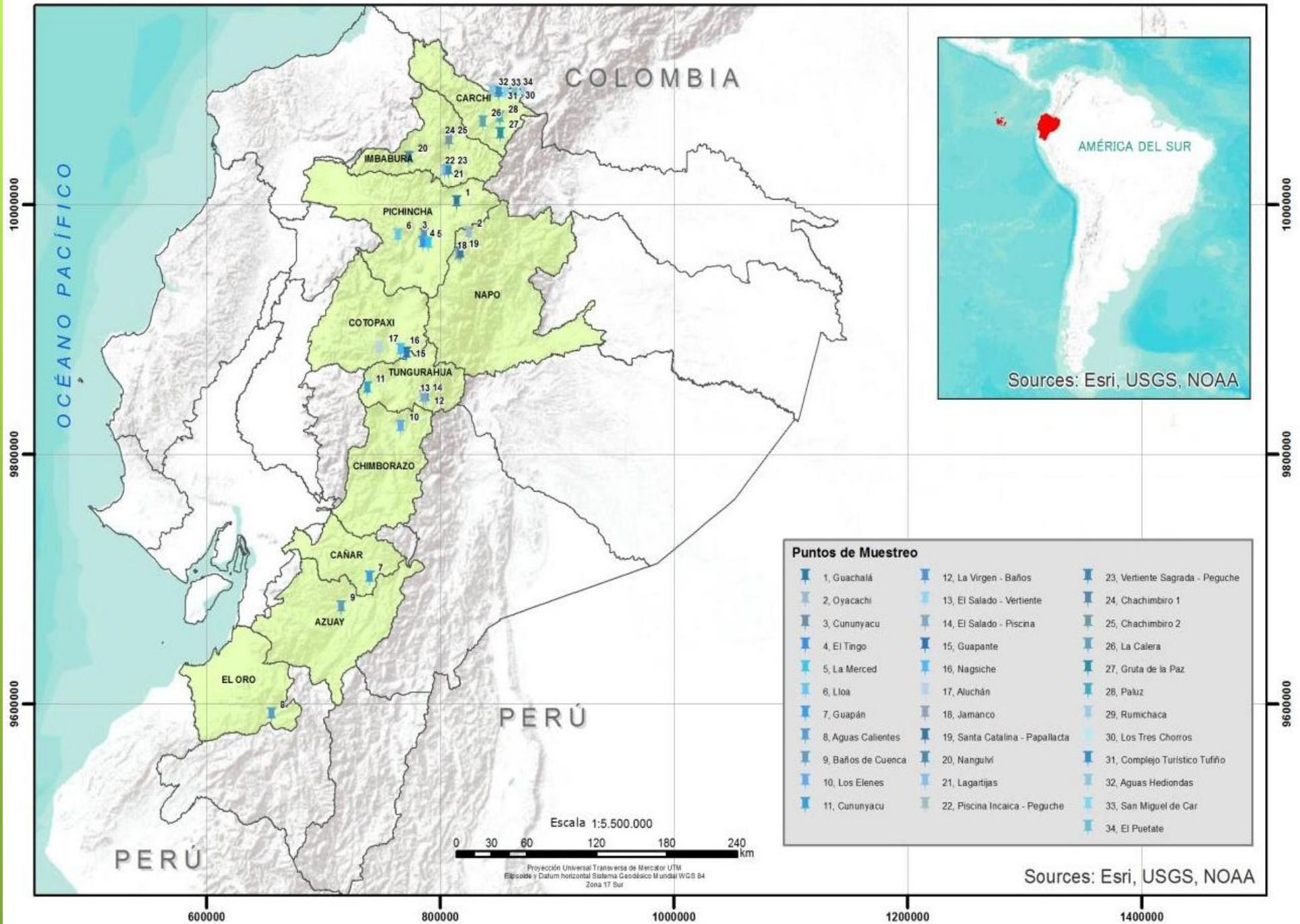
METODOLOGÍA



# 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
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 Tufiño	Carchi	18N	182150	0088453
32	Aguas Hediondas	Carchi	18N	176531	0089613
33	San Miguel de Car	Carchi	18N	188046	0088903
34	El Puetate	Carchi	17S	18N	195466

SITIOS DE MUESTREO

MAPA DE LOS PUNTOS DE MUESTREO DE AGUAS GEOTERMALES DEL CALLEJÓN INTERANDINO EN ECUADOR

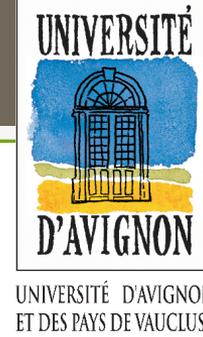


Toma de Muestras de agua



**Determinación de los
parámetros físico – químicos**

#	Parámetro	Método/Equipo	Referencia
1	Temperatura	Termométrico, Termómetro de Mercurio Promolab®.	(EPA, 1983) Método 170.1
2	pH	pHmetro portátil Thermo Scientific Orion 3-Star.	NMX-AA-008-SCFI-2000
3	Conductividad eléctrica	Conductímetro 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	Espectrofotetría, Espectrofotómetro Hach DR 5000	(HACH, 2000) Método 8190
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	Gravimetría utilizando mufla Lindberga	(APHA, 1995)



Elaboración de diagramas hidroquímicos

Determinación de la Calidad de Agua

- Análisis de Agua para consumo humano
- Análisis de agua para uso agrícola

Elaboración de Mapas

Modelación Hidrogeoquímica

- Recopilación e Inventario de Datos
- HIDROGEOQUIM
- SAMA

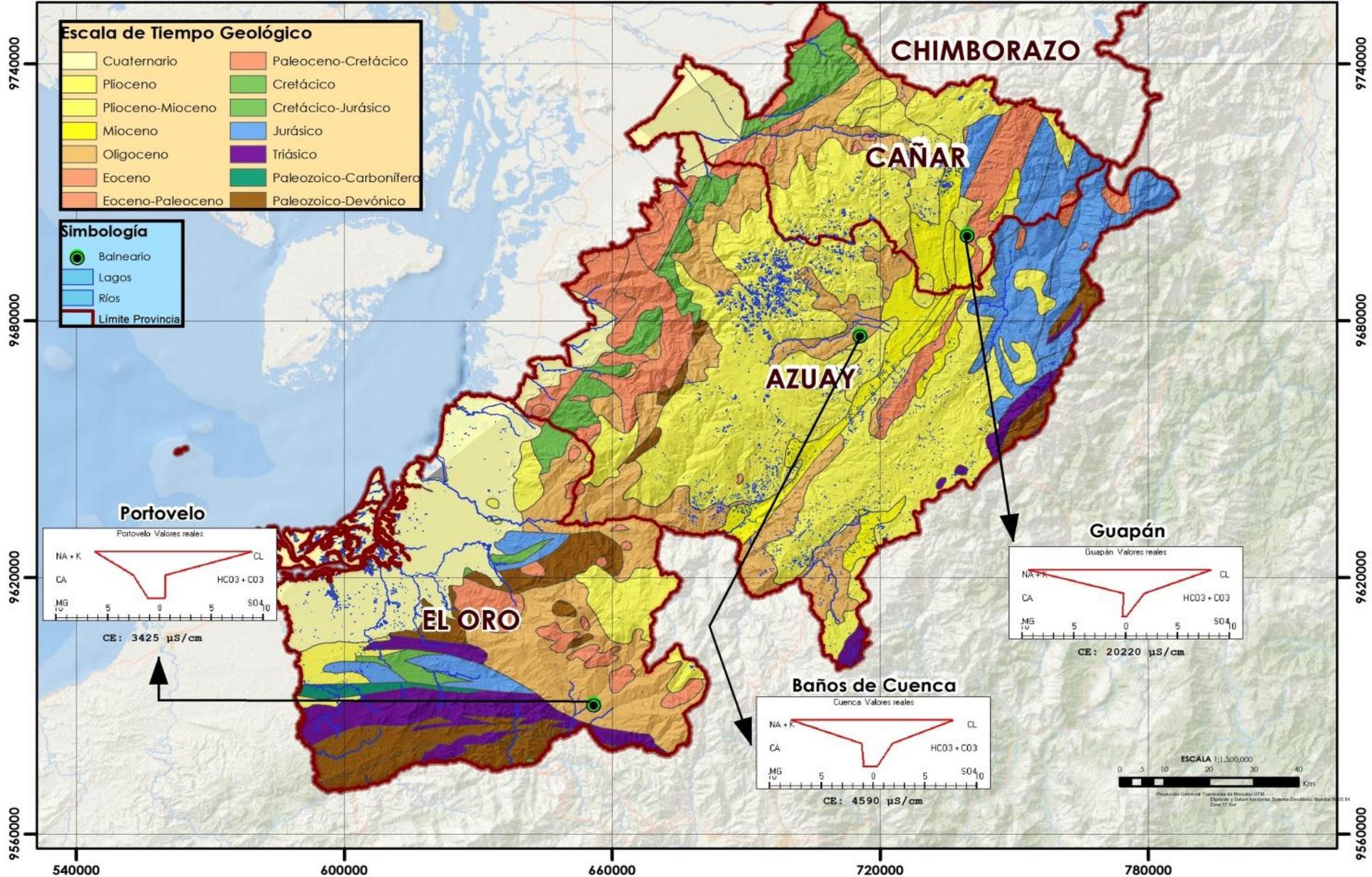


RESULTADOS Y DISCUSIÓN

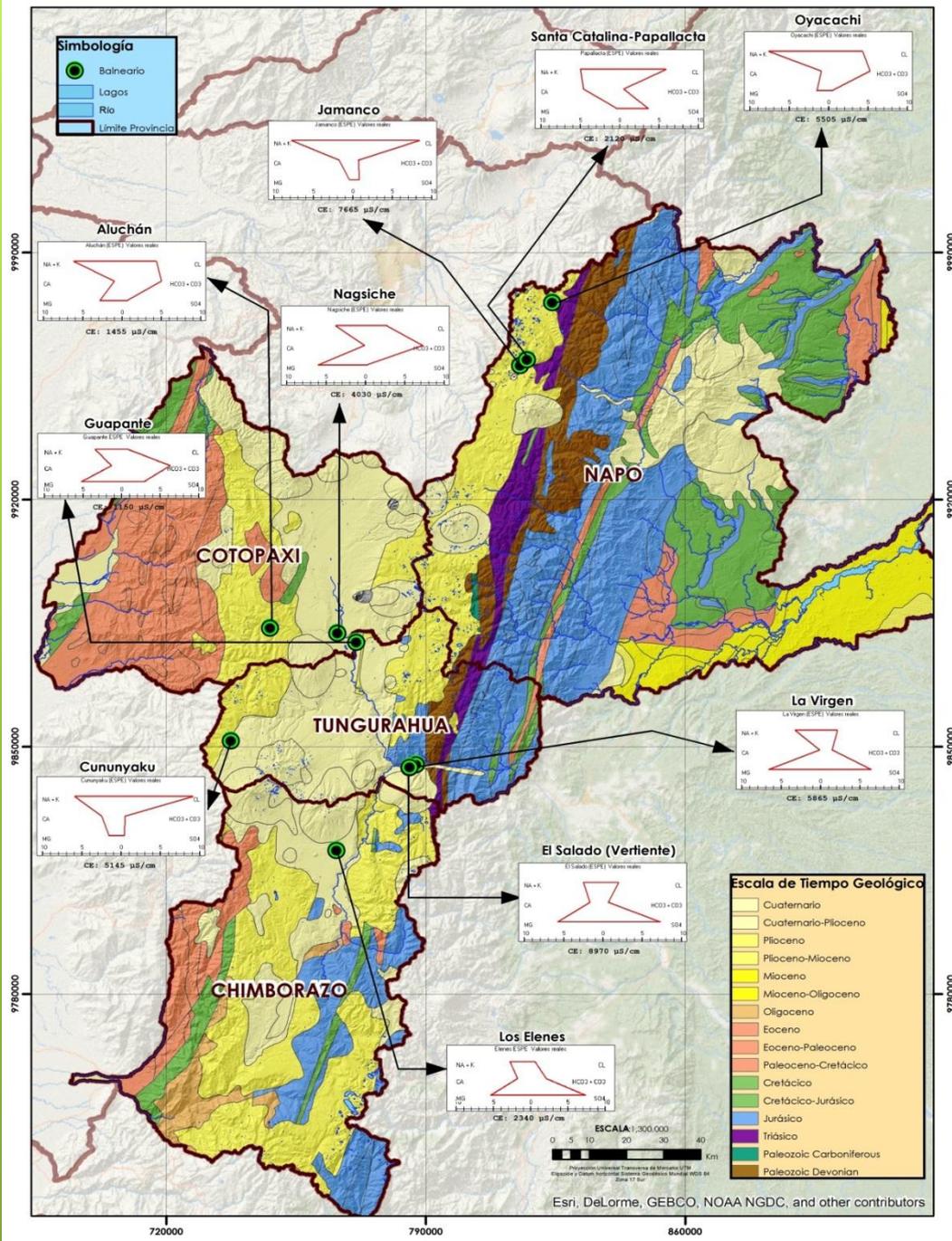


ZONA SUR

MAPA HIDROGEOQUÍMICO DE LA ZONA SUR CON DIAGRAMAS DE STIFF

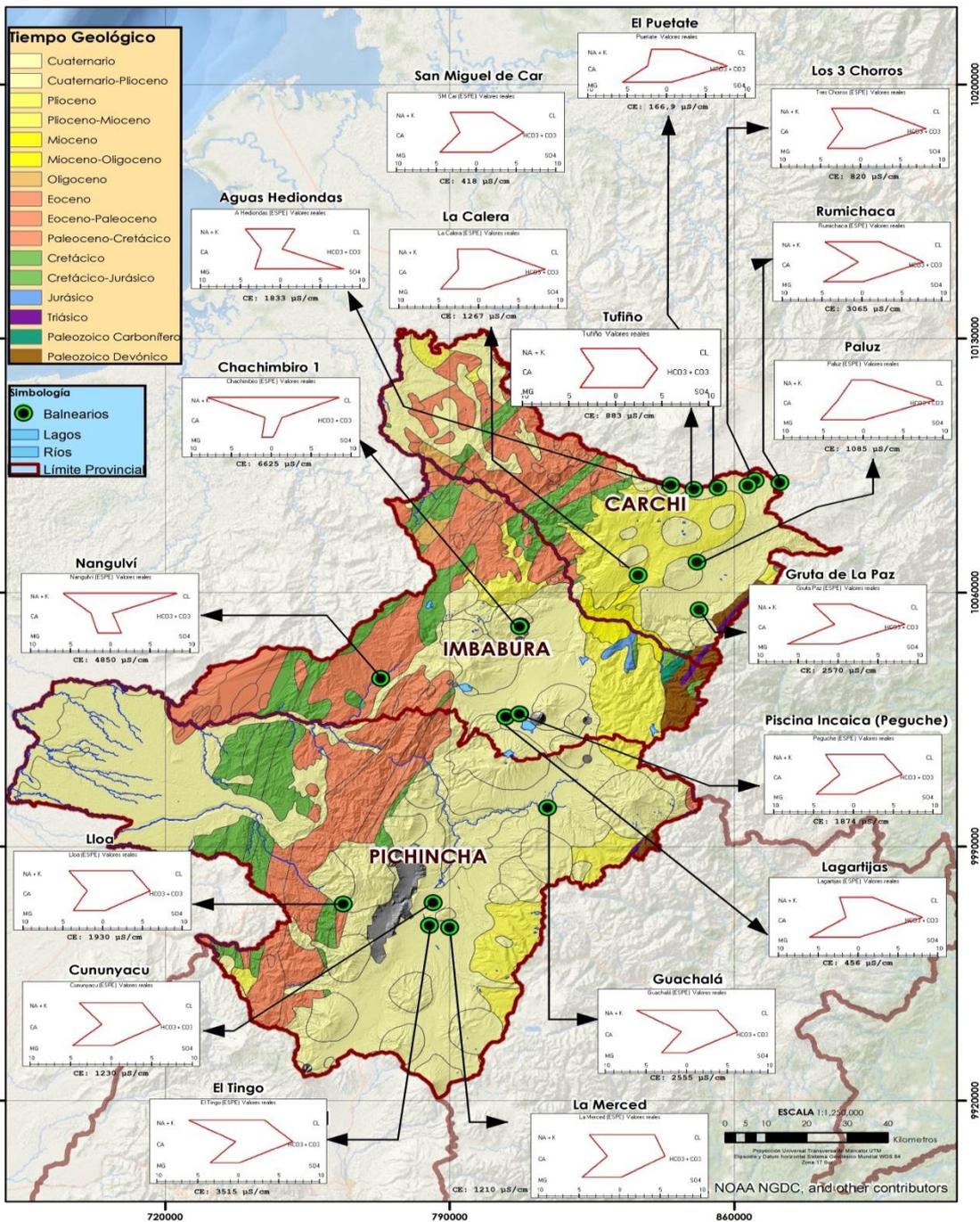


MAPA HIDROEQUÍMICO DE LA ZONA CENTRO CON DIAGRAMAS DE STIFF



ZONA CENTRO

MAPA HIDROGEOQUÍMICO DE LA ZONA NORTE CON DIAGRAMAS DE STIFF



ZONA NORTE

CONCLUSIONES



- 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 2do y 3er 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.



Paper 1

Paper No	WRE1846		
Paper Title	Hydrogeochemical Analysis of volcanic and geothermal fluids in the Andes from Ecuador using hydrochemical plots (Stiff, Piper and Schoeller-Berkaloff diagrams)		
Paper Status	Accepted		
Operations	Recommend reviewers	Edit Paper Information	Edit Co-Authors Information
	Update the Paper	Download The File	

