

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL
CUSCO

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA



TESIS

HIDROGEOQUIMICA DE AGUAS SUBTERRANEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL
RIO TAMBO

PRESENTADO POR:

Br. BORIS LAUREND SANTOS ROMERO

PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO GEOLOGO

ASESOR:

MGT. JOSE DIONICIO CARDENAS ROQUE

CUSCO - PERÚ

2024

NOMBRE DEL TRABAJO

**HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTER
RÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICR
OCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE L
A C**

AUTOR

Boris Santos Romero

RECUENTO DE PALABRAS

69935 Words

RECUENTO DE CARACTERES

373733 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

261 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

45.1MB

FECHA DE ENTREGA

Aug 1, 2024 8:00 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Aug 1, 2024 8:07 AM GMT-5

● 10% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 10% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 3% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)



DEDICATORIA

A Dios por haberme dado salud y sabiduría para poder lograr culminar esta etapa de mi vida, lo propio por guiar cada paso tanto en mi vida personal y profesional.

A mi señora madre Dina Romero, que siempre me motivo y apoyo a seguir y perseverar mis estudios con el fin de superarme en todo momento y alcanzar mis metas, una de estas y que se traduce hoy con la culminación de la presente tesis, agradezco por todo el apoyo incondicional que me ha brindado, espero que el señor colme de muchas bendiciones y años de vida. A mi hermana Gabriela Santos, que me alentó en todo momento a través de sus palabras y tiempo.

A mi novia Deisy Arriola, que conocí durante mi estadía en la universidad y quien a la fecha sigue a mi lado como mi compañera de vida, le agradezco por todo el soporte incondicional que me ha brindado, sus consejos valiosos, su paciencia y ánimos para concluir el presente trabajo, así como los desafíos y oportunidades que se presenten hacia el futuro.

A mi suegro señor Carlos Arriola, que en todo momento me brindo su apoyo para concretar este trabajo, y a mis cuñados Giancarlo Arriola y Aldair Arriola por sus palabras y motivación constante.

A mis perrhijos Bobby y Chiqui, que forman parte de nuestra familia.



AGREDECIMIENTOS

Agradezco al Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), por haberme facilitado y permitido el uso de información para la presente tesis, este fue afianzado a través del Proyecto GA47A: Estudio de Línea Base Geoambiental de la cuenca del río Tambo.

Al Ing. Lionel Fidel Smoll, por haberme brindando concejos y sugerencias de la parte metodológica que ayudaron a realizar la presente tesis, así mismo el apoyo impartido durante mi estadía en la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR) de INGEMMET.

Al Mgt. José Dionicio Cárdenas Roque por su orientación y guía durante mi estadía en la universidad, así como el asesoramiento de la presente tesis, sin su orientación y comentarios este trabajo no hubiese sido posible.

Al Mgt. Mauro Alberto Zegarra Carreón por todo el soporte durante todo el proceso de la presente tesis, y el conocimiento impartido durante la universidad.

Al Mgt. Edison Santiago Mattos Ojeda, Mgt. Luis Antonio Meléndez Morbeli, Ing. Vicente Enrique Blas Abregu y Ing. Victor Vidal Garate Góngora, que a través de sus observaciones y facilidades permitieron la culminación del trabajo de investigación.

Al MSc. Fluquer Peña Laureano que me apoyo desde el primer momento que ingrese al Programa Nacional de Hidrogeología de la DGAR, y quien me oriento en el mundo de la hidrogeología, muchas de esas experiencias vienen plasmadas en la presente tesis.

Al Ing. Wai Long y a la Ing. Shianny Vasquez por sus opiniones y debates ye ayudaron en la mejora del presente trabajo.

Finalmente, a todas las personas que me apoyaron y alentaron en la elaboración de la presente tesis.



ÍNDICE

CAPÍTULO I	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	MARCO REFERENCIAL	1
1.2.	ÁMBITO GEOGRÁFICO	1
1.3.	SITUACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.4.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.4.1.	PROBLEMA GENERAL	2
1.4.2.	PROBLEMA ESPECÍFICO	2
1.5.	JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.6.	OBJETIVOS	3
1.6.1.	OBJETIVO GENERAL	3
1.6.2.	OBJETIVO ESPECÍFICO	3
1.7.	ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	3
1.8.	HIPÓTESIS GENERAL	6
1.8.1.	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	6
1.8.2.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	7
1.9.	TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.9.1.	MÉTODO	8
1.9.2.	ETAPAS DE INVESTIGACIÓN	8
1.10.	UNIDAD DE ANÁLISIS	9
1.11.	POBLACIÓN DE ESTUDIO	9
1.12.	TAMAÑO DE LA MUESTRA	9
1.13.	SELECCIÓN DE LA MUESTRA	10
1.14.	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	10
1.15.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN	10
1.16.	LIMITACIONES	10
1.17.	BASES TEÓRICAS	11
1.17.1.	DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN LA NATURALEZA	11
1.17.2.	UNIDAD HIDROGRÁFICA	11
1.17.3.	MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA NATURALEZA	12
CAPÍTULO II	ASPECTOS GENERALES	50
2.1.	ÁREA DE ESTUDIO	50
2.2.	ACCESIBILIDAD	50
2.3.	HIDROGRAFÍA	50
2.4.	CLIMA	53
2.5.	VEGETACIÓN	53
2.6.	PENDIENTE	56
2.7.	SISTEMA DE DRENAJES	57
CAPÍTULO III	CONTEXTO TÉCTÓNICO, GEOMORFOLÓGICO, GEOLÓGICO Y ESTRUCTURAL	61
3.1.	GENERALIDADES	61
3.2.	GEOMORFOLOGÍA	63
3.2.1.	GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	63
3.2.2.	GEOMORFOLOGÍA LOCAL	64
3.3.	GEOLOGÍA REGIONAL	68
3.3.1.	GENERALIDADES	68
3.4.	GEOLOGÍA LOCAL	71
3.4.1.	ESTRATIGRAFÍA	71
3.4.2.	CENOZOICO	72
3.5.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	79
3.5.1.	ZONA NORESTE	79
3.5.2.	ZONA SUROESTE	80
3.6.	EVOLUCIÓN TECTONO-SEDIMENTARIA	80
3.7.	GEOLOGÍA ECONÓMICA	82



CAPÍTULO IV	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	83
4.1.	GENERALIDADES	83
4.2.	ACUÍFERO POROSO NO CONSOLIDADO	87
4.3.	ACUÍFERO FISURADO VOLCÁNICO	87
4.3.1.	ACUÍFERO FISURADO VOLCÁNICO LLALLAHUI	87
4.3.2.	ACUÍFERO FISURADO VOLCÁNICO MAURE	87
4.3.3.	ACUÍFERO FISURADO VOLCÁNICO PICHU	87
4.3.4.	ACUÍFERO FISURADO ESTRATOVOLCÁN SAN MIGUEL	87
4.4.	ACUÍFERO FISURADO SEDIMENTARIO	88
4.4.1.	ACUÍFERO FISURADO SEDIMENTARIO GRAMADAL	88
4.4.2.	ACUÍFERO FISURADO SEDIMENTARIO HUALLHUANI	88
4.4.3.	ACUÍFERO FISURADO SEDIMENTARIO LABRA	88
4.1.	ACUITARDO SEDIMENTARIO	88
4.1.1.	ACUITARDO SEDIMENTARIO CACHIOS	88
4.1.2.	ACUITARDO SEDIMENTARIO MURCO	90
4.2.	ACUITARDO VOLCÁNICO	90
4.2.1.	ACUITARDO VOLCÁNICO CAPILLUNE	90
4.2.2.	ACUITARDO VOLCÁNICO LATITA	90
4.2.3.	ACUITARDO VOLCÁNICO MAURE	90
4.2.4.	ACUITARDO VOLCÁNICO PÓRFIDO ANDESÍTICO	90
4.2.5.	ACUITARDO VOLCÁNICO SENCCA	90
4.3.	ACUITARDO VOLCÁNICO SEDIMENTARIO	91
4.3.1.	ACUITARDO VOLCÁNICO SEDIMENTARIO MAURE	91
CAPÍTULO V	ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICO	95
5.1.	INVENTARIO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES	95
5.2.	PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA	98
5.2.1.	pH	98
5.2.2.	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)	105
5.2.3.	TEMPERATURA	106
5.2.4.	SALINIDAD	111
5.2.5.	POTENCIAL DE OXIDACIÓN Y REDUCCIÓN (ORP)	115
5.3.	ANÁLISIS QUÍMICO DE RESULTADOS DE LABORATORIO	119
5.3.1.	TEMPORADA DE ESTIAJE	119
5.3.2.	TEMPORADA DE AVENIDA	119
5.4.	ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD DE DATOS (QA/QC)	120
5.4.1.	ANÁLISIS DE DUPLICADOS	120
5.4.2.	ANÁLISIS DE BLANCO DE CAMPO	122
5.4.3.	ANÁLISIS DE BLANCO VIAJERO	123
5.4.4.	ANÁLISIS DE ESTÁNDAR	124
5.4.5.	BALANCE IÓNICO	130
5.4.6.	INFERENCIAS Y ANÁLISIS DEL QA/QC	131
5.5.	FACIES HIDROQUÍMICAS	131
5.5.1.	DIAGRAMAS DE PIPER	131
5.5.2.	DIAGRAMA DE DUROV	134
5.6.	ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS	135
5.6.1.	$r_{Na/rCl}$	136
5.6.2.	$r_{Na/rK}$	138
5.6.3.	$r_{SO4/rCl}$	139
5.6.4.	$r_{Mg/rCl}$	140
5.6.5.	$r_{SO4/rCa}$	141
5.6.6.	$r_{Sr/rCa}$	142
5.6.7.	$r_{Cl/r(HCO3 + CO3)}$	143
5.6.8.	$r_{Cl/rF}$	144
5.6.9.	$r_{Cl/rB}$	145
5.7.	EVOLUCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES	146
5.7.1.	INDICADOR DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICO	146
5.7.2.	INDICADOR HIDROGEOQUÍMICO r_{Na+rK} vs $r_{Cl+rSO4}$	147



5.8.	PROCESOS DE INTERACCIÓN AGUA-ROCA	149
5.9.	MODELIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA.....	151
5.9.1.	CÁLCULO DE ESPECIAZACIÓN – SOLUBILIDAD E INDICES DE SATURACIÓN	151
5.9.2.	INTERPRETACIÓN DE ÍNDICES DE SATURACIÓN DE LANGELIER.....	152
5.9.3.	CORRELACIÓN DE ÍNDICES DE SATURACIÓN DE LANGELIER.....	153
5.10.	CLASIFICACIÓN DE AGUAS TERMALES	157
5.10.1.	DIAGRAMA DE LANGELIER - LUDWING.....	157
5.10.2.	DIAGRAMA TERNARIO r_{SO4} - r_{Cl} - r_{HCO3}	158
5.11.	TRAZADORES QUÍMICOS.....	159
5.11.1.	DIAGRAMA TERNARIO r_{Cl} - r_{Li} - r_{B}	159
5.11.2.	DIAGRAMA BINARIO r_{Cl} vs r_{B}	160
5.11.3.	GEOINDICADOR DE r_{Na} - r_{K} - r_{Mg}	161
5.12.	ANÁLISIS DE AGUAS PARA CONSUMO HUMANO	163
5.12.1.	CALIDAD DEL AGUA PARA USO POTABLE.....	163
5.13.	ANÁLISIS DE AGUAS PARA RIEGO DE VEGETALES.....	170
CAPÍTULO VI ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y MULTIVARIANTE		172
6.1.	PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO.....	172
6.2.	ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS	172
6.2.1.	ÉPOCA SECA.....	172
6.2.2.	ÉPOCA HÚMEDA.....	173
6.3.	HISTOGRAMAS DE DATOS.....	173
6.3.1.	TEMPORADA DE ESTIAJE.....	173
6.3.2.	TEMPORADA DE AVENIDA	174
6.4.	DIAGRAMA DE CAJAS.....	174
6.4.1.	TEMPORADA DE ESTIAJE.....	174
6.4.2.	TEMPORADA DE AVENIDA	174
6.5.	CORRELACIÓN DE PEARSON.....	182
6.6.	ANÁLISIS CLUSTER	185
6.7.	ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP).....	189
CAPÍTULO VII CONCLUSIONES.....		191
CAPÍTULO VIII RECOMENDACIONES.....		193
CAPÍTULO IX BIBLIOGRAFÍA.....		194



Lista de tablas

Tabla 1	Características hidrogeológicas de las formaciones geológicas.....	17
Tabla 2	Porosidad en los distintos tipos de sedimentos y rocas.....	20
Tabla 3	Permeabilidad de materiales.....	22
Tabla 4	Distribución aniones y cationes mayoritarios.....	24
Tabla 5	Distribución aniones y cationes minoritarios.....	24
Tabla 6	Valores composicionales representativos de las aguas naturales.....	24
Tabla 7	Pendientes representativas de la microcuenca Crucero.....	56
Tabla 8	Rango de pendientes medias.....	56
Tabla 9	Clasificación de unidades geomorfológicas de la microcuenca Crucero.....	65
Tabla 10	Caracterización hidrogeológica de la microcuenca Crucero.....	83
Tabla 11	Resumen de las estaciones de muestreo, temporadas de estiaje y avenida.....	95
Tabla 12	Resumen de parámetros físicoquímicos, temporadas de estiaje y avenida.....	98
Tabla 13	Entrega de muestras de agua al laboratorio institucional, temporada estiaje.....	119
Tabla 14	Entrega de muestras de agua al laboratorio institucional, temporada seca.....	119
Tabla 15	Elementos disueltos que superan el DPR.....	120
Tabla 16	Concentraciones reportadas en el análisis de duplicados.....	121
Tabla 17	Análisis de precisión con muestras duplicadas.....	121
Tabla 18	Concentraciones reportadas en el análisis de blancos de campo, temporada de estiaje.....	122
Tabla 19	Concentraciones reportadas en los blancos de campo, temporada de avenidas.....	123
Tabla 20	Concentraciones reportadas en el blanco viajero, temporada de avenidas.....	124
Tabla 21	Reporte y análisis de precisión de análisis de muestras estándares versus metales disueltos, temporada de avenida.....	126
Tabla 22	Concentraciones Reporte y análisis de precisión de análisis de muestras estándares versus metales disueltos, temporada de avenida.....	127
Tabla 23	Concentraciones Reporte y análisis de precisión de análisis de muestras estándares versus metales totales, temporada de avenida.....	128
Tabla 24	Concentraciones Reporte y análisis de precisión de análisis de muestras estándares versus metales totales, temporada de avenida.....	129
Tabla 25	Facies hidroquímicas predominantes en la microcuenca Crucero.....	132
Tabla 26	Análisis estadístico de datos en época seca y húmeda para la microcuenca Crucero.....	175
Tabla 27	Coefficientes de correlación de Pearson para los distintos parámetros en temporada de estiaje para la microcuenca Crucero.....	183
Tabla 28	Coefficientes de correlación de Pearson para los distintos parámetros en temporada de avenida para la microcuenca Crucero.....	184
Tabla 29	Matriz de Componentes Rotados, temporada de estiaje.....	185
Tabla 30	Matriz de Componentes Rotados, temporada de avenida.....	186



Lista de figuras

Figura 1	El agua en la hidrosfera.....	11
Figura 2	Características de las unidades hidrográficas.....	13
Figura 3	Codificación a nivel de cuenca, subcuenca e intercuencas.....	13
Figura 4	Zonas en el subsuelo según el comportamiento del agua que se infiltra Hidrográficas.....	14
Figura 5	Esquemática del ciclo hidrológico.....	15
Figura 6	Balance hidrológico en una cuenca cerrada para un intervalo de tiempo determinado. Ley de conservación de la masa.	15
Figura 7	Distintos tipos de unidades acuíferas según su disposición.....	17
Figura 8	Esquema del comportamiento de los distintos tipos de pozos según el potencial hidráulico.....	18
Figura 9	Potencial hidráulico de los diferentes tipos de acuíferos.....	19
Figura 10	Tipos de porosidad en los acuíferos: (A) Porosidad por disolución. (B) Porosidad intergranular. (C) Porosidad por fisuración.....	21
Figura 11	Tipos de dipolo característico de la molécula de agua.....	22
Figura 12	Secuencia de Chevorateb.....	25
Figura 13	Representatividad gráfica de iones de muestra de agua, donde (a) Diagrama de Collins, (b) Diagramas circulares, (c) Diagramas radiales y (d) Diagrama de Stiff.....	29
Figura 14	Diagrama de Stiff.....	30
Figura 15	Diagrama de Schoeller - Berkaloff.....	31
Figura 16	Diagrama de Piper.....	32
Figura 17	Diagrama de Piper para clasificación química de las aguas.....	33
Figura 18	Muestra las distribuciones de flujos obtenidos mediante ecuaciones.....	35
Figura 19	Sistemas de los flujos de agua subterránea.....	36
Figura 20	a) Sesgo positivo, b) Sesgo negativo.....	40
Figura 21	Distribución normal de los parámetros fisicoquímicos, temporada de estiaje.....	41
Figura 22	Diagrama de cajas.....	41
Figura 23	Gráfico de dispersión.....	43
Figura 24	Single linkage.....	44
Figura 25	Single linkage.....	44
Figura 26	Average linkage.....	44
Figura 27	Ejemplo de Dendograma.....	45
Figura 28	Ubicación del área de estudio.....	51
Figura 29	Mapa hidrográfico de la microcuenca Crucero.....	52
Figura 30	Mapa climatológico de la microcuenca Crucero.....	54
Figura 31	Diagrama para la clasificación de zonas de vida o formaciones vegetales del mundo.....	55
Figura 32	Mapa de cobertura vegetal para la microcuenca Crucero.....	58
Figura 33	Mapa de pendientes de la microcuenca Crucero.....	59
Figura 34	Mapa de sistemas de drenajes para la microcuenca Crucero.....	60
Figura 35	Presente configuración de la Cordillera de los Andes, donde los triángulos marcan los volcanes activos, el segmento de subducción de bajo ángulo (Flat Slap) y la dorsal oceánica.....	61
Figura 36	Mapa de Sudamérica que muestra el contexto geotectónico de los Andes con los hipocentros, zonas volcánicas y arcos volcánicos de los Andes Centrales.....	62
Figura 37	Corte cortical equilibrado a través de los Andes Centrales, donde se observa las diferentes unidades morfológicas y sus tasas de acortamiento (Herzoza, 2005).....	63
Figura 38	Unidades morfológicas de los Andes Centrales: los Andes Centrales, limitados al norte por la Deflexión de Huancabamba, están constituidos por la zona subandina y las cordilleras Oriental y Occidental; al Sur, los Andes Centrales están constituidos por la zona Subandina, Altiplano y las Cordilleras Occidental, Oriental y costero (Herzoza, 2005)	64
Figura 39	Mapa geomorfológico para la microcuenca Crucero.....	67
Figura 40	Mapa geológico y de unidades geomorfológicas de los Andes Centrales.....	68
Figura 41	Leyenda del mapa geológico regional de la microcuenca Crucero.....	69
Figura 42	Mapa geológico regional de la microcuenca Crucero.....	70
Figura 43	Cuadro estratigráfico resumen de las unidades litoestratigráficas en la región Arequipa.....	75
Figura 44	Mapa de geología local de la microcuenca Crucero.....	77
Figura 45	Sección geológica A-A' y B-B', cortando en dirección noreste a suroeste de la microcuenca Crucero.....	78
Figura 46	Geología estructural a escala regional para la microcuenca Crucero.....	79
Figura 47	Mapa geológico estructural por zonas estructurales y diagramas de dirección (rosas) de las principales fallas, perteneciente al sector Chucapaca y cuadrángulo de Pichacani.....	80



Figura 48	Diagramas de dirección (rosas) de las principales fallas para el sector Chucapaca y cuadrángulo de Pichacani.	82
Figura 49	Mapa de inventario de estaciones de aguas subterráneas en la microcuenca Crucero	84
Figura 50	Gráfica de área (Km ²) y porcentual de las unidades hidrogeológicas distribuidas en la microcuenca Crucero	85
Figura 51	Mapa de caracterización hidrogeológica de las unidades estratigráficas para la microcuenca Crucero.	86
Figura 52	Mapa de sistema acuífero fisurado sedimentario y volcánico para la microcuenca Crucero	89
Figura 53	Mapa de sistema acuitardo sedimentario, volcánico y volcano-sedimentario para la microcuenca Crucero	92
Figura 54	Modelo hidrogeológico conceptual de la sección geológica A-A' y B-B', cortando en dirección NE-SW en la microcuenca Crucero	93
Figura 55	Modelo hidrogeológico conceptual de la sección geológica A-A' y B-B', cortando en dirección NE-SW en la microcuenca Crucero	94
Figura 56	Mapa de inventario de estaciones de aguas subterráneas y superficiales para la microcuenca Crucero, temporada de estiaje 2015	96
Figura 57	Mapa de inventario de estaciones de aguas subterráneas y superficiales para la microcuenca Crucero, temporada de avenida 2016	97
Figura 58	Variación del pH en la microcuenca Crucero, temporadas de estiaje y avenida.	99
Figura 59	Variación del pH en aguas subterráneas y superficiales, ECA 3: Riego de vegetales (Estiaje, 2015)	101
Figura 60	Variación del pH en aguas subterráneas y superficiales, ECA 3: Bebida de animales (Estiaje, 2015)	102
Figura 61	Variación del pH en aguas subterráneas y superficiales, ECA 3: Riego de vegetales (Avenida, 2016)	103
Figura 62	Variación del pH en aguas subterráneas y superficiales, ECA 3: Bebida de animales (Avenida, 2016)	104
Figura 63	Variación de la conductividad eléctrica en la microcuenca Crucero, temporadas de estiaje y avenida	105
Figura 64	Variación de la CE en aguas subterráneas y superficiales, ECA 3: Riego de vegetales (Estiaje, 2015)	107
Figura 65	Variación de la CE en aguas subterráneas y superficiales, ECA 3: Bebida de animales (Estiaje, 2015)	108
Figura 66	Variación de la CE en aguas subterráneas y superficiales, ECA 3: Riego de vegetales (Avenida, 2016)	109
Figura 67	Variación de la CE en aguas subterráneas y superficiales, ECA 3: Bebida de animales (Avenida, 2016)	110
Figura 68	Variación de la temperatura en la microcuenca Crucero, temporadas de estiaje y avenida.	111
Figura 69	Variación de la salinidad en la microcuenca Crucero, temporadas de estiaje y avenida.	112
Figura 70	Variación de la salinidad en la microcuenca Crucero, temporadas de estiaje y avenida.	113
Figura 71	Variación de la salinidad en la microcuenca Crucero, temporadas de estiaje y avenida.	114
Figura 72	Variación del ORP versus el pH en la microcuenca Crucero, temporadas de estiaje y avenida.....	115
Figura 73	Variación del Eh versus el pH en la microcuenca Crucero, temporadas de estiaje y avenida.	116
Figura 74	Variación del ORP en la microcuenca Crucero, temporada de estiaje.....	117
Figura 75	Variación del ORP en la microcuenca Crucero, temporadas de avenida	118
Figura 76	Balance iónico de los resultados del muestreo en temporada de estiaje y avenida.....	130
Figura 77	Diagrama de Piper para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida).....	133
Figura 78	Diagrama de Durov para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida).....	135
Figura 79	Relación rNa versus rCl (a), y rNa/rCl versus rCl (b).....	137
Figura 80	Representación de relación rNa/rK versus rCl.....	138
Figura 81	Representación de relación rSO ₄ versus rCl.....	139
Figura 82	Representación de relación rSO ₄ /rCl versus rCl.....	140
Figura 83	Representación de relación rMg/rCl versus rCl.....	141
Figura 84	Representación de relación rCa versus rSO ₄	142
Figura 85	Representación de relación rSr versus rCa.....	143
Figura 86	Representación de relación rCl/r(HCO ₃ +CO ₃) versus rCa.....	144
Figura 87	Representación de relación rCl/rF versus rCl.....	145
Figura 88	Representación de relación rCl/rB versus rCl.....	146



Figura 89	Representación de relación pH versus Eh.	147
Figura 90	Representación de relación r_{Na+rK} versus r_{Cl+rSO_4}	148
Figura 91	Diagrama de Gibbs para aniones	150
Figura 92	Diagrama de Gibbs para cationes	151
Figura 93	Variación del IS para el mineral Albita, Montmorillonita, Dolomita y Calcita en época de estiaje y avenida 154	
Figura 94	Variación del IS para el mineral Goethita, Yeso, K-mica y Hematita en época de estiaje y avenida	155
Figura 95	Variación del IS para el mineral Jarosita-K y Cuarzo en época de estiaje y avenida, y la correlación de IS calculadas para las estaciones de agua subterránea y superficial en época seca y húmeda	156
Figura 96	Diagrama de Ludwig para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida).	157
Figura 97	Diagrama de ternario de Giggenbach para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida).	159
Figura 98	Diagrama de ternario Cl-Li-B para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida).	160
Figura 99	Diagrama binario rB y rCl para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida).	161
Figura 100	Diagrama binario rB y rCl para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida).	162
Figura 101	Diagrama logarítmico de potabilidad para aguas subterráneas, temporada de estiaje	166
Figura 102	Diagrama logarítmico de potabilidad para aguas superficiales, temporada de estiaje	167
Figura 103	Diagrama logarítmico de potabilidad para aguas subterráneas, temporada de avenida	168
Figura 104	Diagrama logarítmico de potabilidad para aguas subterráneas, temporada de avenida	169
Figura 105	Diagrama de Wilcox para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida).	171
Figura 106	Histogramas de parámetros fisicoquímicos y concentraciones de analitos como el bicarbonato, cloro, sulfato, sodio, calcio, magnesio y potasio ($mg L^{-1}$), temporada de estiaje.....	176
Figura 107	Histogramas del logaritmo natural de parámetros fisicoquímicos y concentraciones de analitos como el bicarbonato, cloro, sulfato, sodio, calcio, magnesio y potasio ($mg L^{-1}$), temporada de estiaje	177
Figura 108	Histogramas de parámetros fisicoquímicos y concentraciones de analitos como el bicarbonato, cloro, sulfato, sodio, calcio, magnesio y potasio ($mg L^{-1}$), temporada de avenida.....	178
Figura 109	Histogramas en logaritmo natural de parámetros fisicoquímicos y concentraciones de analitos como el bicarbonato, cloro, sulfato, sodio, calcio, magnesio y potasio ($mg L^{-1}$), temporada de avenida	179
Figura 110	Diagrama de cajas de estaciones de agua subterránea y superficial de la microcuenca Crucero, temporada de estiaje y avenida ($mg L^{-1}$).....	180
Figura 111	Diagrama de cajas en logaritmo de estaciones de agua subterránea y superficial de la microcuenca Crucero, temporada de estiaje y avenida	181
Figura 112	Gráfico de Sedimentación, temporada de estiaje.....	186
Figura 113	Gráfico de Sedimentación, temporada de estiaje.....	187
Figura 114	Gráfico de Dendograma, temporada de estiaje.....	188
Figura 115	Gráfico de Dendograma, temporada de avenida	188
Figura 116	Asociaciones Geoquímicas, temporada de estiaje.....	189
Figura 117	Asociaciones Geoquímicas, temporada de avenida	190



Lista de anexos

Anexo 1	Inventario de estaciones de agua subterránea y superficial en temporada de estiaje	200
Anexo 2	Inventario de estaciones de agua subterránea y superficial en temporada de avenida	201
Anexo 3	Resumen de parámetros fisicoquímicos de estaciones de agua inventariadas en temporada de estiaje	202
Anexo 4	Resumen de parámetros fisicoquímicos de estaciones de agua inventariadas en temporada de avenida	203
Anexo 5	Resumen de análisis de aniones y metales disueltos de estaciones de agua inventariadas en temporada	205
de estiaje		
Anexo 6	Resumen de análisis de metales disueltos de estaciones de agua inventariadas en temporada de estiaje	206
Anexo 7	Resumen de análisis de metales totales de estaciones de agua inventariadas en temporada de estiaje	207
Anexo 8	Resumen de análisis de metales totales de estaciones de agua inventariadas en temporada de estiaje	208
Anexo 9	Resumen de análisis de aniones y metales disueltos de estaciones de agua inventariadas en temporada	209
de avenida		
Anexo 10	Resumen de análisis de metales disueltos de estaciones de agua inventariadas en temporada de avenida	210
Anexo 11	Resumen de análisis de metales totales de estaciones de agua inventariadas en temporada de avenida	212
Anexo 12	Resumen de análisis de metales totales de estaciones de agua inventariadas en temporada de avenida	214



RESUMEN

El presente trabajo se ubica en la provincia de General Sánchez Cerro, departamento de Moquegua a 28 km del centro poblado de Ichuña. Hidrográficamente la microcuenca Crucero, se encuentra ubicado al suroeste de la subcuenca Ichuña, formando parte de la cuenca del río Tambo.

La microcuenca Crucero presenta escurrimientos superficiales conformado por el río Crucero y cursos tributarios como el río Chaje, Yanquiri y Laramacota los cuales drenan hacia el río Ichuña. La microcuenca Crucero presenta afloramientos rocosos del mesozoico que corresponden al Grupo Yura conformado por secuencias silicoclásticas y carbonatadas propias de un ambiente marino, sobreyaciendo casi concordante se tienen las unidades cenozoicas del Grupo Puno; formaciones Pichu, Capillune, Sencca y Llallahui, y Grupo Maure y Barroso, estas presentan litologías predominantes como lavas y cenizas volcánicas, aglomerados, areniscas tobáceas y conglomerados los cuales se relacionan a ambientes deposicionales del tipo fluvial, aluvial, lagunas y volcánico.

La distribución de las unidades hidrogeológicas en la microcuenca Crucero, en primer lugar, se conforman acuíferos origen volcánico, estos representan un 33 % del área total y se encuentran ubicados en mayor proporción al noreste de la microcuenca Crucero, relacionado principalmente a las unidades geológicas del Grupo Maure, la Formación Pichu y el estratovolcán San Miguel. En segundo lugar, se tienen los acuíferos fisurados de origen sedimentario donde representan el 15 % del área total, se ubican al suroeste de la microcuenca Crucero y se constituyen por las unidades del Grupo Yura; en tercer lugar, se exponen los acuíferos porosos no consolidados con un 7 %, estos materiales se conforman por los depósitos cuaternarios, y finalmente, se tienen como rocas impermeables conformado por los acuitados volcánicos y volcano sedimentarios, constituyen un 54 % del área total de la microcuenca Crucero.

Las estaciones de agua subterránea y superficial inventariados en la microcuenca Crucero determina la predominancia de cuatro tipos de facies hidroquímicas, siendo del tipo Bicarbonatada Cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$), corresponde aguas de infiltración que están conformadas por manantiales y ríos, provenientes altas partes altas y su recarga e interacción se relacionan a las unidades sedimentarias del Grupo Yura que aflora al sur y suroeste de la microcuenca Crucero, y en menor proporción a las secuencias volcano sedimentarias de la Formación Llallahui, Grupo Maure y Barroso; la segunda facie de tipo Sulfatada Cálcica ($\text{SO}_4\text{-Ca}$), se presenta en mayor proporción en los cursos y quebradas tributarios al río Crucero, estas aguas provienen en general de la recarga e interacción con las rocas volcano sedimentarias del Grupo Barroso y rocas intrusivas de composición andesítica ubicadas al norte y este de la microcuenca Crucero; la tercera facie es de tipo Sulfatada Sódica ($\text{SO}_4\text{-Na}$), se conforman las aguas provenientes de la fuente termal Calizaya (GW-005), donde se mantiene su característica hidroquímica hacia las fuentes monitoreadas aguas abajo en el río Crucero, así mismo interactúa con las areniscas cuarzosas de la Formación Huallhuani; finalmente se tiene la cuarta facie definida por ser de tipo Clorurada Sódica (Cl-Na), está conformada por las aguas provenientes de la fuente termal Jesús María (GW-035), las cuales aportan al río San Antonio y aguas abajo confluencia con el río Crucero forman el río Ichuña. Las aguas de esta facie interactúan con las rocas las rocas volcano sedimentarias del Grupo Maure.

Se determina que el sistema de flujo de agua subterránea predominante en la microcuenca Crucero es del tipo local, condicionado a zona de recarga durante procesos de precipitación local, mientras que en menor proporción se tienen estaciones que se relacionan a flujos regionales, esto conlleva a condicionarse para las estaciones de agua ligadas a la fuente termal Calizaya y Jesús María.

PALABRAS CLAVES: microcuenca, hidrogeológicas, fisurados, hidroquímicas



CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1. MARCO REFERENCIAL

Este trabajo forma parte del proyecto GA47A: Estudio de Línea Base Geoambiental de la cuenca del río Tambo, el cual se viene realizando el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). El análisis a realizar toma como unidad a la cuenca hidrográfica, con el objetivo de determinar relaciones que existen entre la litología de la zona y las características físico-químicas de las aguas superficiales y subterráneas, lo cual contribuye a las funciones del INGEMMET de dar a conocer y realizar diversos estudios geológicos de distintas especialidades del territorio peruano. De esta manera, el trabajo realizado servirá como herramienta de gestión de los recursos hídricos, así como en el aporte al conocimiento geológico del sector.

1.2. ÁMBITO GEOGRÁFICO

El presente trabajo se ubica en la provincia de General Sánchez Cerro, departamento de Moquegua a 28 km del centro poblado de Ichuña. Hidrográficamente la microcuenca Crucero, se encuentra ubicado al SW de la subcuenca Ichuña (ANA, 2015), formando parte de la cuenca del río Tambo.

1.3. SITUACIÓN DEL PROBLEMA

El conocimiento de las características físico-químicas calidad del agua (subterránea y superficial) y su relación con el entorno físico (geología, ocurrencias minerales, pasivos mineros, entre otros) es fundamental para el desarrollo de las actividades socio-económicas y prioritarias para el consumo humano. En el área de estudio se tienen manifestaciones de agua subterránea como manantiales y fuentes termales, los cuales interactúan directamente con las unidades geológicas en subsuelo y con los afloramientos circundantes al ámbito de estudio en campo, los cuales se encuentran conformados por las secuencias sedimentarias, volcánicas, volcano-sedimentarias e intrusivos meso-cenozoicos. Así mismo, se tiene como condicionante el contexto estructural (fallas y pliegues), resultando que se produzcan determinadas reacciones físico-químicas y de equilibrio químico; la cual se verá reflejada en las aguas superficiales. En este último punto, se tiene la incidencia del efecto antrópico que puede afectar negativamente la calidad de las aguas, pudiéndose obtener que determinados elementos tóxicos o dañinos para la salud puedan precipitar y/o estar en forma disuelta en las aguas tanto subterráneas como superficiales. Por ende, es necesario analizar las características químicas de las aguas en temporada de estiaje y avenidas para poder entender su comportamiento y la incidencia que se tendrá en cuanto a la movilidad de ciertos elementos traza frente a cambios de las condiciones ambientales y de estación (variabilidad climática). Todo lo mencionado, se tratará de analizar en la presente tesis.



1.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.4.1. PROBLEMA GENERAL

¿Cuál es la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo?

1.4.2. PROBLEMA ESPECÍFICO

- ¿Cuáles son las características geológicas e hidrogeológicas de las unidades geológicas en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo?
- ¿Qué comportamiento y distribución hidrogeoquímica presentan las aguas superficiales y subterráneas en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo?
- ¿Cuál es la variación de concentración de los elementos traza que presentan las aguas superficiales y subterráneas en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo?

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio se justifica dado que a partir del análisis fisicoquímico e hidrogeoquímico de las aguas subterráneas y superficiales inventariadas y recopiladas en la microcuenca Crucero, servirá de base para la comprensión del funcionamiento y las características químicas del agua, así como su calidad, lo cual nos permitirá asegurar la continuidad del abastecimiento de agua con una gestión adecuada del recurso hídrico.

Así mismo, cabe mencionar que el recurso hídrico en la microcuenca Crucero es fundamental y prioritario para el consumo humano y para el desarrollo de las actividades socio-económicas como la agricultura y ganadería, en el cual las aguas subterráneas y superficiales se encuentran influenciadas y condicionadas por el medio físico (geológico). En este medio se producen interacciones roca-agua, donde se generan procesos de precipitación y disolución de determinados minerales, los cuales adicionan o reducen determinados elementos a la composición química del agua. Estos cambios composicionales podrían estar relacionados a las unidades volcánicas, volcano-sedimentarias e intrusivas que afloran en la microcuenca Crucero, pudiendo generar variaciones en la concentración de elementos trazas ya sean permisibles o dañinos para la salud humana, en caso de las unidades sedimentarias, podrían aportar componentes mayoritarios y minoritarios en la química de las aguas subterráneas y superficiales del sector.



1.6. OBJETIVOS

1.6.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo.

1.6.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

- Describir las características geológicas e hidrogeológicas de las unidades litológicas presentes en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo.
- Definir el comportamiento fisicoquímico y distribución hidrogeoquímica de las aguas superficiales y subterráneas en la microcuenca Crucero.
- Identificar la variación de concentración de los elementos traza que presentan las aguas superficiales y subterráneas en la microcuenca Crucero.

1.7. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

El área de estudio presenta una reducida parte trabajos de carácter hidrológico e hidrogeológico; en algunos de ellos tienen más énfasis a la calidad del agua para consumo humano, pero en menor proporción analizan las relaciones físico-químicas e interacción roca-agua, así como las características hidrogeoquímicas de las aguas subterráneas y superficiales, que es el tema de la presente tesis.

"Prospección Geoquímica de Segunda Fase en la Cuenca Tambo: Subcuencas Medio Tambo, Coralque, Medio Alto Tambo, Ichuña y Alto Tambo" (Vargas et. al, 2017)

Los autores mencionan que en la prospección geoquímica realizada en la cuenca del río Tambo, se recolectaron 265 muestras de sedimento fluvial las cuales cuenta con 53 elementos. Así mismo indican que el pH de las aguas es mayormente básico y se tiene un carácter ácido al extremo oriental de la zona de estudio. La conductividad eléctrica oscila entre 21 uS/cm y 886 uS/cm, algunos valores superan 1,000 uS/cm llegando incluso a 10,390 uS/cm. Las distribuciones y anomalías geoquímicas descritas son de As, Co, Cu, Cr, Hg, Ni, Au, Ag, Pb y Zn, según analizado se identificaron 177 anomalías geoquímicas.

- Comentario: El presente trabajo nos ayudará a conocer las características geoquímicas de las muestras de sedimento, así como los parámetros físico-químicos de las aguas muestreadas en el año 2013.

"Fuentes naturales de drenaje ácido: cuenca del río Tambo (Puno – Moquegua)" (Cereceda et. al, 2016)



Indican que la caracterización hidroquímica de los ríos y quebradas en la subcuenca Ichuña constan de 126 estaciones que consideran la toma de parámetros físico-químicos y análisis químico de 42 elementos analizados por ICP MS/OES, recopilados en la época de estiaje. Las facies hidroquímicas definidas en las muestras de aguas fueron tres grupos predominantes, estos corresponden a facies bicarbonatadas cálcicas (42 %) y cuyos valores de pH son entre 7 a 9. El segundo grupo se conforma por aguas de composición sulfatada cálcica (45 %) y valores de pH entre 3 a 7.5 y los cuales están asociados a zonas de alteración hidrotermal con precipitación de sulfuros. El tercer grupo se representa por aguas cloruradas sódicas (13 %), estas se encuentran a lo largo del río Ichuña y parte del río Jesús María. El drenaje que lixivia los sulfuros tiene un carácter sulfatado y pH alcalino, este disminuye en su recorrido a través de los ríos Itapallone, Crucero, San Antonio y Jachata, por otro lado, las aguas que interactúan con areniscas que tienen venillas de goetita y hematita, así como lavas, tobas limolitas, areniscas y calizas tienen carácter bicarbonatado cálcico y pH ácido a neutro.

- **Comentario:** el presente trabajo muestra el comportamiento fisicoquímico del agua y su interacción con las rocas preexistentes.

“Caracterización litogeoquímica de las rocas Mesozoicas del Grupo Yura – Cuenca del río Tambo – Moquegua” (Chapilliquén, Maquera y Cereceda, 2016)

Los autores mencionan que mediante el análisis de facies se ha determinado que la sedimentación de las formaciones Cachíos, Labra y Gramadal, han sido formados en un ambiente marino, y para la Formación Hualhuani se interpreta propio de ambiente fluvial. La Formación Cachíos evoluciona de un ambiente de plataforma externa a una interna, mientras que la Formación Labra evoluciona de un ambiente de plataforma interna a un ambiente somero, luego se instala un ambiente de plataforma carbonatada (Formación Gramadal), para posteriormente dar paso a un ambiente fluvial de ríos distales o deltaicos (Formación Hualhuani). Así mismo indican que a través del diagrama binario La/Th versus Hf, la Formación Cachíos proviene de fuentes félsicas a básicas, la Formación Labra proviene de fuentes de tipo continental asociadas a un margen pasivo. La base y el tope de la Formación Hualhuani provienen de fuentes félsicas, compatibles con fuentes corticales asociadas a un ambiente geotectónico de arco continental, mientras que la parte intermedia de esta formación, proviene de una posible fuente sedimentaria de edad/reciclado típicas de fuentes de margen pasivo o la disección progresiva de un arco volcánico.

- **Comentario:** el presente artículo nos permite conocer los ambientes sedimentación de las unidades del Grupo Yura, así como su clasificación de areniscas, análisis de tierras raras (ligeras y pesadas), elementos litófilos constituyentes y su fuente de procedencia sedimentaria.

“Domos, diatremas y piroclástos del complejo volcánico Chucapaca, evidencias de sistemas epitermales” (Remigio F. , 2012)

El presente trabajo abarca el Complejo Volcánico Chucapaca (vulcanismo Sillapaca), el cual se compone de domos riolíticos el cual intruye al Grupo Yura y este es sobreyacido por las secuencias del Grupo Puno, Tacaza y Maure, así mismo indica que la intrusión del domo riolítico fue controlada por las estructuras generadas por las fases tectónicas Peruana e Inca. Se tienen estructuras polimetálicas conformadas por Ag, Pb y Zn. Así mismo analizando las tierras raras se tienen Nb, Ta y Eu típicos de zonas de subducción.



Comentario: el trabajo en mención nos permite conocer las características del complejo volcánico Chucapaca así como sus alrededores, de igual forma analiza las características químicas y petromineralógicas de las rocas volcánicas.

“Geology, geochemistry and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ ages of the Cerro Millo epithermal high-sulfidation gold prospect, southern Peru” (Hennig, Lehmann, Burgess y Nekouvagh, 2008)

Los autores mencionan que el cerro Millo presenta un sistema hidrotermal de alta sulfuración (HS) hospedada en rocas andesíticas del paleo-estratovolcán (Mioceno Tardío), encontrándose alteraciones como argílica avanzada (alunita), sílica y argílica (caolinita y esmectita), así mismo la alteración propolítica se desarrolla en unos 3 a 4 km de radio. La ocurrencia de alunita hipógena posee una edad de 10.8 +/- 0.9 Ma y dataciones en biotita (Ar/Ar) posee una edad de 11 +/- 0.5 Ma, y por otra parte se pudo realizar una datación en alunita datando una edad 8 +/- 0.9 Ma. El telescopio en las rocas analizadas muestra elevados contenidos de Hg, Sb y As.

- Comentario: el presente artículo nos ayuda a entender la cronología de las ocurrencias mineralizantes, así como la composición de elementos mayoritarios y metálicos.

“Geology and geochemistry of the Cerro Millo gold prospect, southern Peru” (Hennig, 2005)

El autor analiza indica que la zona de estudio cuenta como rocas más antiguas al Grupo Maure, el cual es sobreyacido por las secuencias volcánicas del Grupo Barroso, este mismo es sobreyacido por rocas piroclásticas y andesitas y traquiandesitas porfíricas. Los elementos parentales analizados indican que estas rocas volcánicas poseen una diferenciación y contaminación magmática relacionada a subducción. Así mismo se indica que el cerro Millo, muestra una alteración hidrotermal, mostrando patinas de hidróxidos de hierro en las rocas volcánicas alteradas, así como horizontes silicificados compuesto por calcedonia, las alteraciones presentes en la zona van de propolítica a argílica avanzada, así como rocas silicificadas. Se menciona que las rocas analizadas muestran enriquecimiento de As, Zr, Sb, Ba, Hg y Au originada y relacionada a la alteración hidrotermal presentes en las rocas volcánicas.

- Comentario: la presente tesis nos ayudará a conocer la composición de las rocas volcánicas del Terciario tanto en elementos mayoritarios, trazas y tierras raras.

“Características petrográficas y geoquímicas del Grupo Barroso en los cuadrantes III y IV del cuadrángulo de Ichuña (33 u)” (Carrasco, 2002)

El autor analiza las características petrográficas y geoquímicas de rocas lávicas y piroclásticas del Grupo Barroso, indica que se componen de lavas andesíticas, andesitas basálticas porfíricas y rocas piroclásticas conformadas por tobas vitrocrystalinas de composición riolítica y tranquidacíticas, correspondientemente. Así mismo en el trabajo se han realizado tinciones y difracción de rayos X, los cuales conllevaron a la determinación de la roca volcánica.

- Comentario: el presente trabajo nos da a conocer las petromineralógicas y geoquímicas de las rocas volcánicas lávicas y piroclásticas del Grupo Barroso.

“Estratigrafía, Sedimentología y Tectónica de las Series Meso-Cenozoicas del cuadrángulo de Pichacani (33-v), cuadrante II (SE), Sur del Perú” (Cuellar, 2001)



El autor menciona que el área de estudio presenta unidades litoestratigráficas del Jurásico superior hasta el Cuaternario reciente, se conforman por el Grupo Yura formado por una regresión marina conformándose por un medio de plataforma carbonatada y terminando en facies de arenosas de un ambiente fluvial de ríos distales, para terminar en una facies transgresivas y regresivas correspondiente a la Formación Murco, para pasar a la plataforma carbonatada de la Formación Acurquina. Para el Eoceno se forma la cuenca Pichu, depositándose sedimentos fluvio-lacustres y coladas volcánicas; posteriormente se depositaron las unidades volcánicas del Grupo Tacaza. Posteriormente para el Mioceno medio se forma la cuenca Maure, conformados por depósitos lacustres finalmente para el Plioceno se forman las secuencias volcánicas del Grupo Barroso.

- Comentario: el presente trabajo nos da a conocer el ambiente depositacional unidades estratigráficas, así como las características litológicas y estructurales del sector.

"Memoria explicativa de la revisión geológica del cuadrángulo de Ichuña (33-u)" (Lipa, Valdivia y Carrasco, 2001)

Los autores analizan una revisión de las principales unidades aflorantes en la zona de estudio que van desde el Jurásico al Cuaternario, toma como base los trabajos elaborados por Marocco & Pino, 1996 y Elementos de la Estratigrafía Mesozoica Sur – Peruana (Vicente, 1981). Este estudio incorpora datos de muestreo de rocas y fósiles.

- Comentario: el presente informe nos ayudará a conocer en detalle las unidades geológicas en la zona de estudio.

"Geología del Cuadrángulo de Ichuña (hoja 33-u)" (Marocco y Del Pino, 1966)

Los autores analizan las secuencias del Grupo Yura del Jurásico Superior – Cretácico Inferior, el volcánico Matalaque (Cretácico Inferior) y las secuencias terciarias del Grupo Puno, Formación Pichu, volcánico Tolapalca, Grupo Tacaza y Grupo Barroso, así mismo realizan un análisis tectónico donde reconocen tres fases de movimiento (cretácico superior, terciario inferior y superior).

- Comentario: el presente informe nos dará a conocer los aspectos litológicos y sedimentológicos de las unidades geológicas aflorantes en la zona de estudio.

1.8. HIPÓTESIS GENERAL

La hidrogeoquímica de aguas superficiales y subterráneas en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo permite determinar el recorrido de las aguas superficiales y subterráneas y su interacción con las unidades litoestratigráficas y donde los procesos de oxidación y reducción pueden generar la solubilidad de determinados minerales y en otros casos desarrollar la movilización y precipitación de elementos.

1.8.1. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- Las características geológicas e hidrogeológicas de las unidades geológicas en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo; las características deposicionales y al contexto estructural condicionan la conductividad hidráulica.



- El comportamiento y distribución hidrogeoquímica que presentan las aguas superficiales y subterráneas en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo; están relacionadas a la interacción de los flujos agua superficial y subsuperficiales con las unidades geológicas del Cretácico y Terciario.
- La variación de concentración de los elementos traza que presentan las aguas superficiales y subterráneas en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo; están influenciados por las zonas de alteración y ocurrencias mineralizantes y en menor proporción será generada por el efecto antrópico.

1.8.2. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Hipótesis General: La hidrogeoquímica de las aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo permitirá conocer el recorrido de las aguas subterráneas y superficiales, así como la interacción de las aguas con las unidades litoestratigráficas aflorante en la microcuenca Crucero, donde los procesos de oxidación y reducción pueden generar la solubilidad de determinados minerales y en otros casos desarrollar la movilización y precipitación de elementos.

- Variable Independiente: La hidrogeoquímica de aguas superficiales y subterráneas.
- Variable Dependiente: Determinar el recorrido de las aguas superficiales y subterráneas y su interacción con las unidades litoestratigráficas y donde los procesos de oxidación y reducción.
- Variable Interviniente: Parámetros fisicoquímicos, solubilidad de los minerales, movilización y precipitación de elementos, modelamiento hidrogeoquímico de las fuentes inventariadas.

Hipótesis Específica 1: Las características geológicas e hidrogeológicas de las unidades geológicas en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo; las características deposicionales y al contexto estructural condicionan la conductividad hidráulica.

- Variable Independiente: Características geológicas, características hidrogeológicas
- Variable Dependiente: Condicionan la conductividad hidráulica.
- Variable Interviniente: Litología, mineralogía, petromineralogía, capacidad de almacenamiento y transferencia de agua, análisis geoquímico de rocas y sedimentos, correlaciones y relaciones composicionales roca-agua.

Hipótesis Específica 2: El comportamiento y distribución hidrogeoquímica que presentan las aguas superficiales y subterráneas en la microcuenca Crucero, están relacionadas a la interacción de los flujos agua superficial y subsuperficiales con las unidades geológicas del Cretácico y Terciario.

- Variable Independiente: Distribución hidrogeoquímica
- Variable Dependiente: Interacción de flujos de agua superficial y subsuperficial
- Variable Interviniente: Parámetros fisicoquímicos, solubilidad de los minerales, movilización y precipitación de elementos, análisis e interpretación hidroquímico.

Hipótesis Específica 3: La variación de concentración de los elementos traza que presentan las aguas superficiales y subterráneas en la microcuenca Crucero, están influenciados por el basamento rocoso alterado, ocurrencias mineralizantes y en menor proporción por el efecto antrópico.

- Variable Independiente: Variación de concentración de los elementos traza



- Variable Dependiente: Influenciado por las zonas de alteración y ocurrencias mineralizantes y en menor proporción será generada por el efecto antrópico.
- Variable Interviniente: Análisis estadístico de elementos mayoritarios, minoritarios y traza de la química del agua

1.9. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

1.9.1. MÉTODO

El proyecto de tesis es una investigación básica, donde se hizo el uso información de publica nacional e internacional, y también información proveída por el Instituto, Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), esto referido a información de análisis químico de estaciones de aguas subterráneas y superficiales de la microcuenca Crucero. El método de investigación utilizado es **descriptivo** porque dado que usó el proceso observación para evaluar el comportamiento y las relaciones de las variables definidos por los parámetros fisicoquímicos y análisis químicos del agua propuestos para el presente estudio. Así mismo para poder analizar las causas del problema a evaluar según se ha planteado en la presente tesis, se utilizó el método **no experimental** en razón que las variables a estudiar corresponden a procesos geológicos ocurridos en el pasado, y finalmente se utilizó el método **transversal**, dado que el análisis efectuado corresponde a un tiempo y momento, este reflejará las particularidades y características principales de la microcuenca Crucero.

1.9.2. ETAPAS DE INVESTIGACIÓN

La presente tesis desarrolló un estudio local, en razón de esto se propone las siguientes etapas de trabajo, definidas por:

1.9.2.1. ETAPA I – RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN (PRE-CAMPO)

Esta etapa consistió en la recopilación de antecedentes e informaciones necesarias, donde la bibliografía se obtuvo de diferentes instituciones como INGEMMET, Autoridad Nacional del Agua (ANA), Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL), universidades, revistas de alto impacto y otros. La información recopilada corresponde a estudios de geología, hidrogeología, hidrológico, etc. La información cartográfica se obtuvo del Centro Nacional de Información Geográfica del IGN, la cartografía geológica del INGEMMET y los datos meteorológicos e hidrológicos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

La delimitación del área de estudio, es decir, el área de influencia de la microcuenca Crucero, se tomó de referencia la clasificación de cuenca y subcuenca del ANA (2015). De igual manera se realizó la delimitación de la microcuenca a partir de la base topográfica a escala 1:50,000, y así como las imágenes LandSat que ayudaron a determinar el límite de la microcuenca Crucero.

1.9.2.2. ETAPA II – RECONOCIMIENTO Y DETALLE (CAMPO)

Se realizó 02 campañas de campo para temporada de estiaje y avenidas, en el cual se hizo el registro y monitoreo de fuentes de aguas subterráneas (manantiales y fuentes termales) y aguas superficiales tomándose así datos de medida de los parámetros físico-químicos en campo (pH, temperatura, Conductividad eléctrica, Total de sólidos disueltos, Oxígeno disuelto, Resistividad, Salinidad y



Potencial de oxidación y reducción, cartografiado hidrogeológico, toma de muestras para su análisis físico-químico e isotópico. También se realizó un reconocimiento geológico – litológico, mediciones de los estratos y estructuras, levantamiento de columnas estratigráficas, etiquetado y otros.

1.9.2.3. ETAPA III – PROCESAMIENTO, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN (POST-CAMPO)

Primeramente, se realizó la validación de datos químicos de las muestras de aguas (subterráneas y superficiales) procesadas por el laboratorio de INGEMMET a través del QA/QC, para posteriormente realizar el procesamiento y análisis en base a los datos obtenidos en campo y laboratorio para la interpretación hidroquímica. Se utilizó softwares como AQUACHEM y DIAGRAMMES con el fin de ejecutar la caracterización hidrogeoquímica y de esa forma determinar las facies hidroquímicas.

Posteriormente se utilizó los programas el PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999) para realizar la especiación y modelamiento hidrogeoquímico de los componentes mayoritarios, minoritarios y trazas realizadas a nivel de las estaciones de aguas subterráneas y superficiales de la microcuenca Crucero, así como para determinar las relaciones iónicas de las aguas subterráneas y superficiales. Finalmente, para realizar el análisis geoestadístico y los análisis de correlacionales se utilizó los softwares SPSS, Minitab, XLSTAT y R Studio. Todo ello conllevó a la caracterización, evolución y modelado hidrogeoquímico, relaciones roca - agua, variabilidades de concentración de los elementos trazas y el análisis geoestadístico.

1.10. UNIDAD DE ANÁLISIS

El trabajo se realizó en la microcuenca Crucero se ubica al suroeste de la subcuenca Ichuña, y que esta a su vez forma parte de la cuenca hidrográfica del río Tambo, actualmente se han desarrollado infraestructuras hidráulicas relacionadas a la captación de aguas sobre todo del tipo subterráneo para afianzar la disponibilidad hídrica y abastecimiento de las poblaciones circundantes al área de estudio.

1.11. POBLACIÓN DE ESTUDIO

La elaboración del trabajo de investigación abarcará el análisis hidrogeoquímico del agua subterránea y superficial, así como su relación con el basamento rocoso y los depósitos cuaternarios en lo largo de la microcuenca Crucero; de acuerdo a la información disponible públicamente, la población de estudio se clasifica en:

- Análisis de los parámetros fisicoquímicos y analitos evaluados de las estaciones de agua subterránea y superficial.
- Estudios de afloramientos de las unidades geológicas.
- Parámetros hidrogeológicos.
- Imágenes satelitales disponibles.

1.12. TAMAÑO DE LA MUESTRA

La información existente de la microcuenca Crucero, se obtuvo a partir de la campaña de campo para realizada en la temporada de estiaje (2015) donde se recopilaron y muestrearon 51 estaciones (15



de aguas subterráneas y 36 de aguas superficiales), mientras que para la temporada de avenidas (2016) se tienen 58 estaciones (14 de aguas subterráneas y 44 de aguas superficiales), cabe destacar que las muestras de agua recopiladas tienen resultados de análisis de parámetros fisicoquímicos y análisis químicos de elementos mayores, minoritarios y trazas. Por otra parte, se cuenta con análisis de muestras de sedimentos de quebrada teniéndose un total de 40 estaciones muestreadas y análisis petromineralógicos los cuales ayudarán al análisis interpretativo. Todos los datos mencionados corresponden a los estudios del proyecto GA47A: Estudio de Línea Base Geoambiental de la cuenca del río Tambo, realizado por el INGEMMET.

1.13. SELECCIÓN DE LA MUESTRA

Para el presente estudio se utilizará los análisis físico-químicos y químicos de las muestras de aguas subterráneas y superficiales, sedimentos de quebrada y rocas, así como los datos de levantamiento de columnas estratigráficas, descripciones petromineralógicas, estructurales; adquiridas, procesadas y analizadas por diferentes instituciones, las cuales han sido publicadas a nivel nacional e internacional.

1.14. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Los análisis obtenidos de las muestras de aguas (subterráneas y superficiales), sedimentos de quebrada y rocas fueron realizados por los trabajos de campo por parte de INGEMMET en los años 2015 y 2016, como parte de Línea Base Geoambiental de la cuenca Tambo. Así mismo, se tienen trabajos publicados de estudios geológicos de campo en la zona de estudio, realizado por diversos autores los cuales forman parte Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Universidad Nacional de San Agustín, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco y Universidad Nacional de Ingeniería; también se cuenta con trabajos de instituciones de la Autoridad Nacional del Agua, Instituto Nacional de Recursos Naturales y el Instituto Geofísico del Perú, así como publicaciones geocientíficas nacionales en la Sociedad Geológica del Perú e internacionales a manera de trabajos indexados en Elsevier y Scopus.

1.15. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La investigación se realizará con base en el análisis de estudios previos, la cual estará sujeta en función al detalle que ofrezca, la institución, compañía y en la época que se realizó la adquisición de los datos a utilizar en el presente trabajo. Posteriormente se realizará los análisis e interpretaciones de los datos correlacionándolos con los trabajos de campo y descripciones a detalle (in situ) con los análisis químicos de las aguas, sedimentos y rocas.

1.16. LIMITACIONES

Las principales limitaciones, que se tuvieron al elaborar la presente tesis, fueron en principio el tiempo, porque sólo se pudo trabajar 4 campañas de 25 días para toda la cuenca del río Tambo, el muestreo hidroquímico se realizó en dos campañas por lo extenso de la cuenca y se hizo un sólo muestreo por

estación seleccionada; lo ideal hubiera sido tener varios análisis de la misma fuente o tener un sistema de monitoreo permanente, para ver la variación química en el tiempo y finalmente el bajo presupuesto para realizar este proyecto.

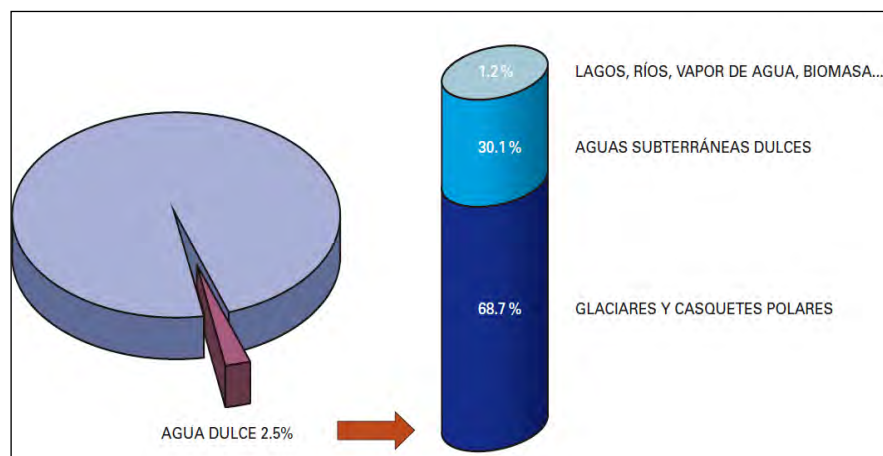
1.17. BASES TEÓRICAS

1.17.1. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN LA NATURALEZA

Según Martínez et al. (2005), la mayor parte del agua que existe en la naturaleza, el 97.5 %, es agua salada almacenada en los océanos y algunos lagos. Sólo el 2.5 % restante es el agua dulce que se encuentra almacenada en las rocas, en casquetes polares y glaciares, ríos, lagos, biomasa y atmósfera en forma de vapor (Figura 1). El agua dulce en la hidrosfera se divide en:

- Glaciares y casquetes polares 68.7%
- Aguas subterráneas dulces 30.1%
- Lagos de agua dulce 0.26%
- Ríos 0.006%
- Biomasa 0.003%
- Vapor en la atmósfera 0.04%
- Ciénagas y suelo 0.891%

Figura 1 El agua en la hidrosfera



Fuente: Martínez et al. (2005).

El tiempo medio de permanencia de una molécula de agua en los océanos es de 2,500 años, en los glaciares y casquetes polares de 9,700 años, en los acuíferos de decenas a miles de años, en los lagos de agua dulce de unos 17 años, en los lagos de agua salada unos 150 años, en los ríos de unos 15 a 20 días, en la atmósfera de 8 a 10 días, y en la biomasa de algunas horas (Martínez et al., 2005).

1.17.2. UNIDAD HIDROGRÁFICA

Según ANA (2015), indica que la unidad hidrográfica es un concepto creado por el ingeniero Otto Pfafstetter en 1989, cuando desarrolló su metodología de codificación, motivo por la cual a estas



unidades se les suele denominar “Ottocuencas”. Las Unidades Hidrográficas son espacios geográficos limitados por líneas divisorias de aguas, relacionadas espacialmente por sus códigos, donde el tamaño de sus áreas de drenaje es el único criterio de organización jerárquica. El Sistema de delimitación y codificación de Pfafstetter considera tres tipos de unidades de drenaje: cuencas, intercuenas y cuencas internas.

- Cuenca: Unidad hidrográfica que no recibe drenaje de ninguna otra área, pero si contribuye con flujo a otra unidad de drenaje (ANA, 2015).
- Intercuenca: Unidad hidrográfica que recibe el drenaje de otra unidad que se ubica aguas arriba, mediante el curso del río principal, y permite el drenaje del flujo propio y del que ha ingresado a esta unidad hacia la unidad de drenaje que se ubica hacia aguas abajo. En tal sentido una unidad de drenaje tipo intercuenca es una unidad hidrográfica de tránsito del río principal (ANA, 2015).
- Cuenca Interna: Unidad hidrográfica que no recibe flujo de agua de otra unidad ni contribuye con flujo de agua a otra unidad de drenaje o cuerpo de agua, ver Figura 2 y 3 (ANA, 2015).

El código de la unidad hidrográfica provee información importante tales como el tipo de unidad de drenaje, nivel de codificación y ubicación al interior de la unidad que lo contiene (ANA, 2015).

1.17.3. MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA NATURALEZA

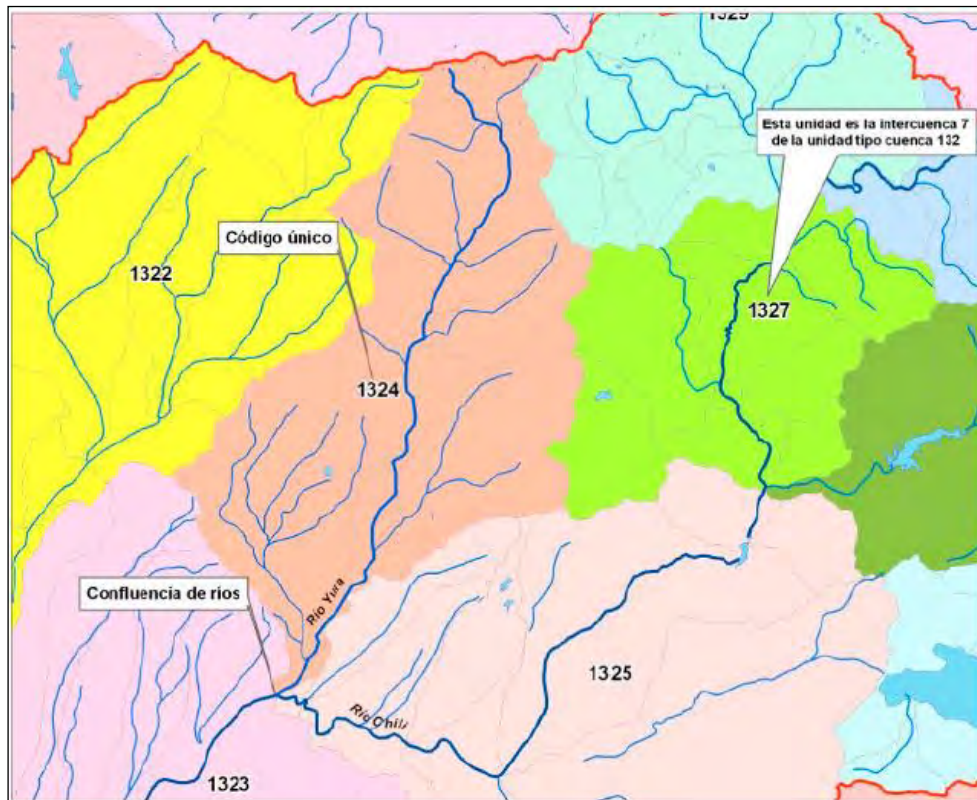
Según Martínez et al. (2005), indica que la molécula de agua, aunque eléctricamente neutra, tiene las cargas positivas y negativas distribuidas asimétricamente en su estructura: es un dipolo. La consecuencia inmediata de este hecho es la atracción de las moléculas entre sí. Cuando la energía procedente de la radiación solar actúa sobre la superficie de las masas de agua en estado sólido o líquido o sobre el suelo húmedo, y es suficiente para romper esta fuerza de atracción, el agua pasa a estado gaseoso mediante los procesos de sublimación (paso hielo a vapor) y evaporación (paso líquido a vapor). Si no se indica lo contrario, a partir de aquí, se englobarán ambos conceptos bajo el nombre de evaporación (Figura 2).

El vapor de agua asciende en la atmósfera y se enfría, lo que da lugar, por condensación, a la formación de las pequeñas partículas de agua que originan las nubes. Las nubes son arrastradas hacia el continente donde como consecuencia de un proceso termodinámico, en parte adiabático y en parte no adiabático, las pequeñas partículas de agua aumentan considerablemente su tamaño. Cuando éste es suficiente para vencer la resistencia del aire, caen hacia la superficie de la Tierra atraídas por la fuerza de la gravedad. Es lo que se conoce con el nombre de precipitación (Martínez et al., 2005).

Según la magnitud y la velocidad del cambio de presión y temperatura durante el proceso termodinámico, la precipitación puede ser en forma líquida o en forma sólida cristalizada o amorfa. Parte del agua que precipita desde las nubes nunca alcanza el suelo porque queda interceptada en su trayectoria por algún obstáculo y vuelve otra vez a la atmósfera por evaporación (Martínez et al., 2005).

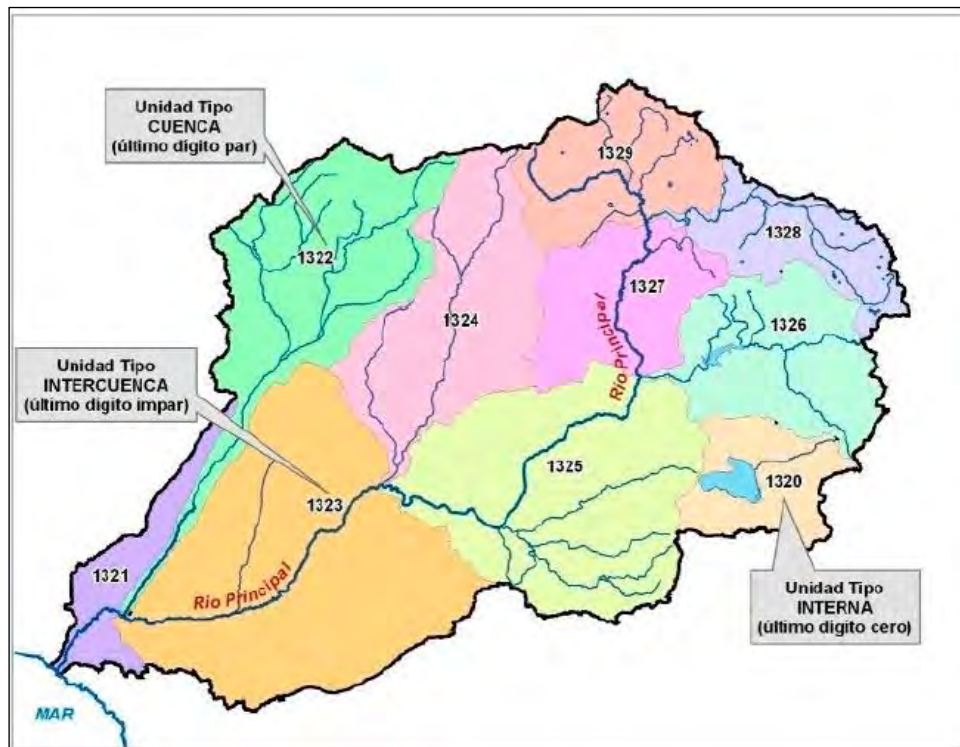


Figura 2 Características de las unidades hidrográficas



Fuente: ANA (2005).

Figura 3 Codificación a nivel de cuenca, subcuenca e intercuencas

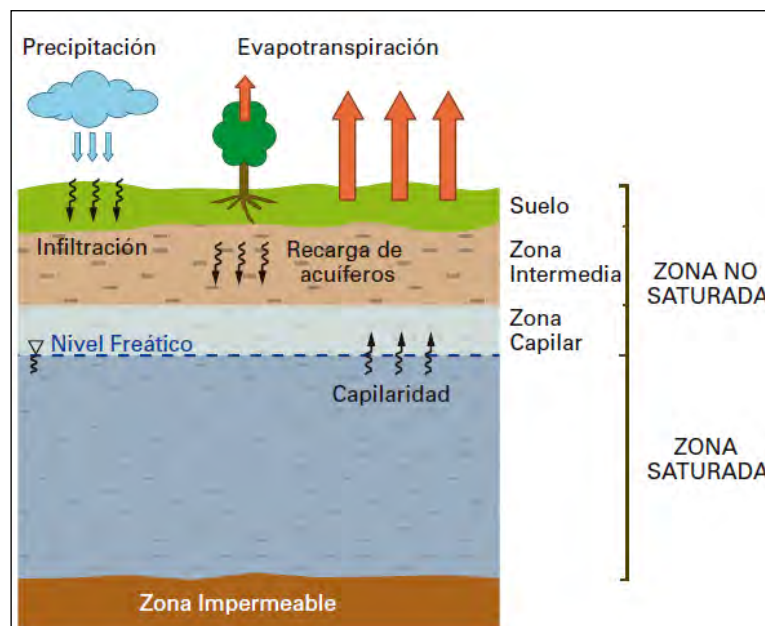


Fuente: ANA (2005).

Según Martínez et al. (2005), el agua infiltrada penetra en la zona no saturada y humedece primeramente el suelo, entendiéndose como tal la zona más superficial de la corteza terrestre donde la acción de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos la ha hecho apta para ser soporte de la vida vegetal. El desarrollo de las raíces de las plantas limita esta zona en profundidad. El agua retenida en el suelo vuelve a la atmósfera en forma de vapor bien por evaporación directa o bien por transpiración de las plantas (Figura 4).

El proceso de evaporación actúa continuamente mientras es efectiva la energía que procede de la radiación solar. En la práctica, es muy difícil separar el volumen de agua que pasa a la atmósfera por evaporación del que lo hace por transpiración. Ambos se suelen tratar en conjunto en un único concepto denominado evapotranspiración. Una vez saturado el suelo, si continúa el aporte externo y existen condiciones favorables para el flujo, el agua percola hacia zonas más profundas a través de los huecos existentes en la zona vadosa donde coexisten materia mineral, agua, aire y otros gases (Martínez et al., 2005).

Figura 4 Zonas en el subsuelo según el comportamiento del agua que se infiltra Hidrográficas.



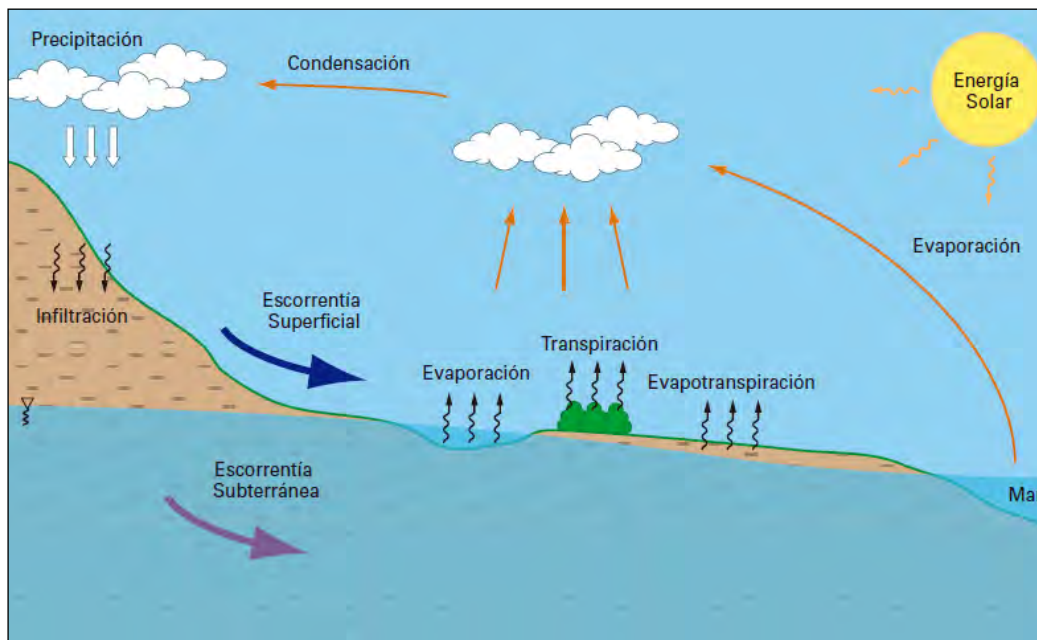
Fuente: Martínez et al. (2005).

Según Martínez et al. (2005), esta zona puede no existir en regiones muy húmedas o tener varios centenas de metros de espesor en las regiones áridas. Si continúa el movimiento descendente el agua alcanzará la zona saturada en la que todos los poros de la roca se encuentran llenos de agua. Al límite superior de la zona saturada se le denomina superficie freática o nivel freático, que se define como el lugar geométrico de los puntos en los que el agua del subsuelo se encuentra a la presión atmosférica. Inmediatamente por encima de la superficie freática el efecto de las fuerzas capilares origina una franja de terreno saturado en la que la presión es ligeramente inferior a la atmosférica: es la zona capilar. Por debajo del nivel freático la presión del agua es superior a la atmosférica (es la atmosférica más el peso de la columna de agua que carga sobre el punto de la zona saturada que se considere).

En la zona saturada el agua también se mueve como escorrentía subterránea en función de un balance de energías terminando su trayectoria en ríos, manantiales, directamente en el mar, o

evapotranspirándose cuando el nivel freático está muy próximo a la superficie del terreno. El agua en la Naturaleza está en continuo movimiento accionado por la energía de la radiación solar y por la fuerza de la gravedad, describiendo un ciclo, ciclo hidrológico, que suele explicarse considerando que empieza y termina en el mar (Figura 5). Es fácil comprender que no todas las moléculas de agua recorren el ciclo completo (Martínez et al., 2005).

Figura 5 Esquemática del ciclo hidrológico.



Fuente: Martínez et al. (2005).

1.17.3.1. EL BALANCE HIDROLÓGICO

Según Martínez et al. (2005), la precipitación es la única fuente de agua en la naturaleza donde se desarrolla en una cuenca cerrada y para un tiempo determinado, el principio de conservación de la masa (Figura 6).

Figura 6 Balance hidrológico en una cuenca cerrada para un intervalo de tiempo determinado. Ley de conservación de la masa.



Fuente: Martínez et al. (2005).

Las condiciones hídricas en la cuenca son las mismas al inicio y al final del intervalo de tiempo donde la variación en el almacenamiento es cero y ha de cumplirse, lo siguiente: Precipitación = Escorrentía + Evapotranspiración (Martínez et al., 2005).

El término escorrentía engloba el agua superficial y subterránea. A la expresión se la conoce con el nombre de balance hidrológico en una cuenca, y es fiel reflejo del principio de conservación de la masa, se precisa lo siguiente: Variación del Almacenamiento = Entradas – Salidas (Martínez et al., 2005).



La expresión puede complicarse si la cuenca no es cerrada, es decir, si hay intercambio de agua, natural o artificialmente, con otras cuencas más o menos lejanas. Un aspecto que siempre ha de quedar claro a la hora de plantear un balance hidrológico es el lugar para el que se realiza y el intervalo de tiempo que se considera. El balance sólo es válido para esas condiciones de espacio y tiempo (Martínez et al., 2005),

1.17.3.2. HIDROGEOLOGÍA

La hidrogeología tiene como objetivo el conocimiento y la evaluación de los recursos hídricos existentes en el subsuelo, la posibilidad de su captación y de su explotación en un contexto de gestión sostenible. Esto incluye el análisis del movimiento del agua, el conocimiento de sus propiedades y composición química, el estudio de su origen dentro del ciclo hidrogeológico, y la consideración de sus usos potenciales (FCIHS, 2009).

El medio físico donde se realizan todos los fenómenos hidrogeológicos lo constituyen ambientes netamente geológicos: las aguas subterráneas se mueven en el interior de las formaciones geológicas, cuyo estudio previo será fundamental para la adecuada comprensión de los problemas meramente hidrogeológicos (Martínez et al., 2005).

La geología además de representar la base inicial del conocimiento de las aguas subterráneas de una zona, condiciona el funcionamiento de los acuíferos de la misma, en cuanto a la distribución de materiales permeables y/o impermeables, cierres y geometría, fallas y fracturas, etc., que pueden influir sobre el comportamiento del acuífero considerado (Condori, 2016).

1.17.3.2.1. CLASIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS ROCAS

Los materiales dispuestos en el terreno tienen diferentes comportamientos para almacenar y transmitir aguas subterráneas, sus cantidades y características estarán condicionadas el tipo de material existente. FCHIS, 2009 propone la siguiente clasificación de materiales desde el punto de vista hidrogeológico, estos son:

- **Acuífero:** formación geológica que permite el almacenamiento y el desplazamiento o transmisión del agua por poros o por grietas, proporcionando cantidades apreciables de agua para su explotación de una manera fácil y económica (FCIHS, 2009; Custodio y Llamas, 1983).
- **Acuitardo:** Formación geológica de baja conductividad hidráulica que almacena agua, pero la transmite con mucha dificultad, es decir, en todo caso muy lentamente. No es posible su explotación directa, pero puede recargar a otros acuíferos por flujo vertical inducido (FCIHS, 2009; Custodio y Llamas, 1983).
- **Acuicludo:** Formación geológica que almacena agua, pero no la transmite, es decir, que por sus características no permite el movimiento o circulación del agua en su interior, ello hace que no sea posible su explotación (FCIHS, 2009; Custodio y Llamas, 1983).
- **Acuífugo:** Formación geológica extremadamente poco permeable que no almacena agua ni la transmite (FCIHS, 2009; Custodio y Llamas, 1983).

En la realidad, no existen formaciones geológicas completamente impermeables y tampoco formaciones geológicas con porosidad nula, tal como se muestra en la Tabla 1. Según Kresic (2009), la clasificación más común de acuíferos está basada en la litología de la porosidad media en la que estos se desarrollan y lo cual se clasifican en cuatro (4) grupos:

Tabla 1 Características hidrogeológicas de las formaciones geológicas

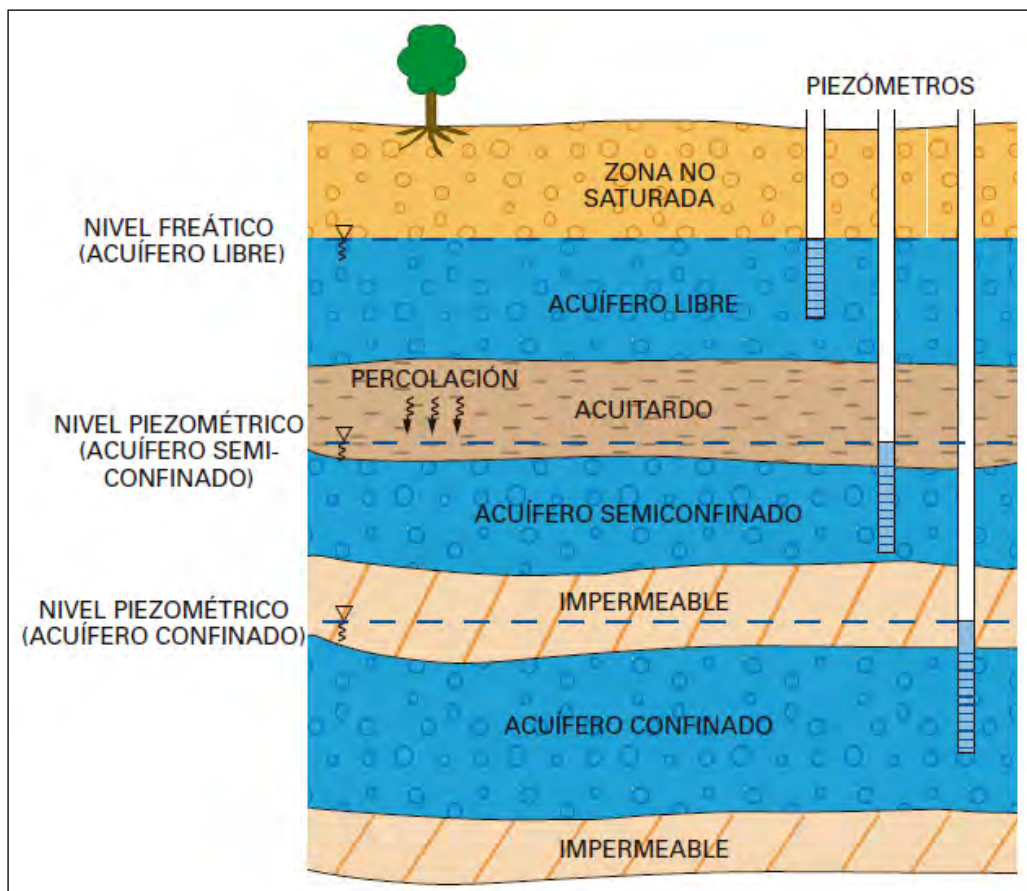
Clasificación hidrogeológica	Capacidad de almacenar	Capacidad de drenar	Capacidad de transferir	Formaciones características
Acuíferos	Alta	Alta	Alta	Gravas, arenas y calizas
Acuitardos	Alta	Media / Baja	Baja	Limos y arenas limosas
Acuicludos	Alta	Baja	Nula	Arcillas
Acuifugos	Nula	Nula	Nula	Granitos y gneis

Fuente: Tupak (2010).

1.17.3.3. TIPOS DE ACUÍFEROS

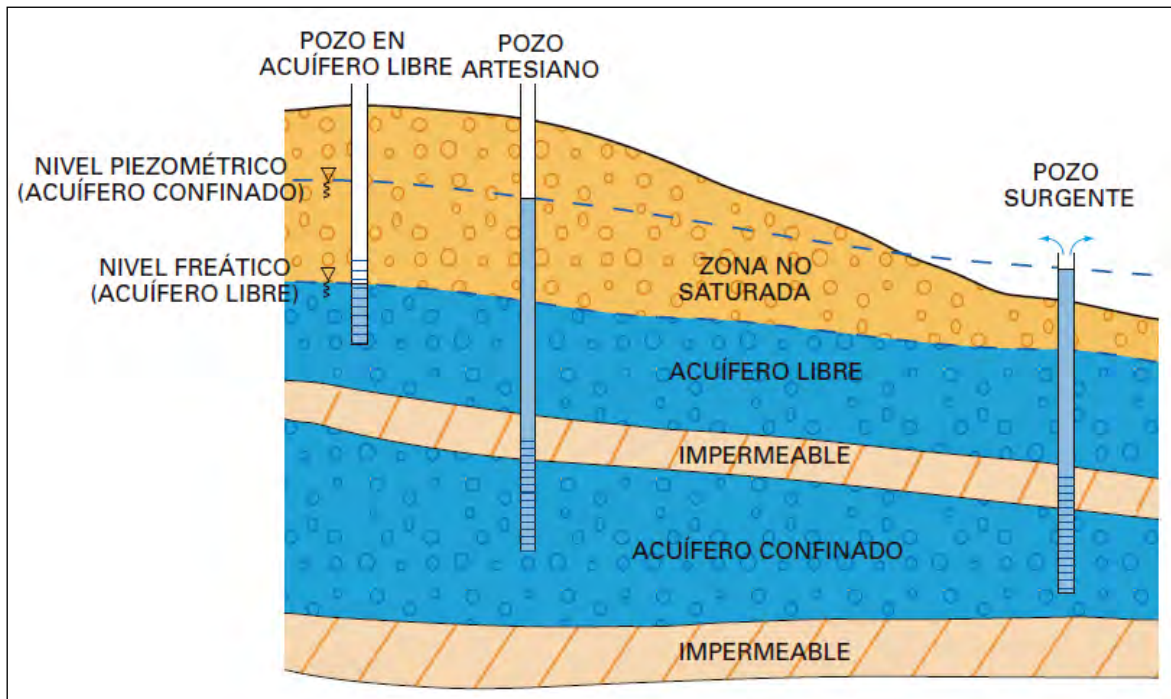
Según Colombia (2017), el comportamiento hidráulico se pueden hallar los acuíferos libres, no confinados o freáticos (aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua que está en contacto con el aire y por tanto a presión atmosférica); acuíferos cautivos confinados o a presión (aquellos en los que la superficie superior del agua y se encuentra sometida a una presión superior a la atmosférica), y acuíferos semi cautivos o semiconfinados (aquellos en los que la pared superior o inferior no es totalmente impermeable (Figura 7 y 8), sino que se trata de un acuitardo, es decir, un material que permite la filtración del agua, pero de forma muy lenta, lo que sirve de alimentación al acuífero principal).

Figura 7 Distintos tipos de unidades acuíferas según su disposición



Fuente: Martínez et al. (2005).

Figura 8 Esquema del comportamiento de los distintos tipos de pozos según el potencial hidráulico



Fuente: Martínez et al. (2005).

1.17.3.4. ENERGÍA DEL AGUA EN LOS ACUÍFEROS

Según Martínez et al. (2005), precisa que el nivel piezométrico como el nivel freático, es decir la altura que alcanza el agua subterránea en el interior de un sondeo ranurado exclusivamente en un punto de un acuífero, son consecuencia directa de la energía que tiene el agua en ese punto. A esta energía se le denomina potencial hidráulico en ese punto.

El concepto como tal fue definido por Hubbert (1940), como se manifiesta en una altura de agua en un sondeo, se mide en unidades de longitud. A efectos de poder establecer relaciones entre los niveles piezométricos o freáticos en diferentes puntos de un acuífero se dan todos ellos según una referencia común. Esta referencia suele ser la misma que se toma como origen para la medida de las cotas topográficas. El potencial hidráulico es suma de una energía potencial, consecuencia de la posición del punto en el espacio, y una energía consecuencia de la presión a la que se encuentra el agua en el punto que se considere (Figura 9):

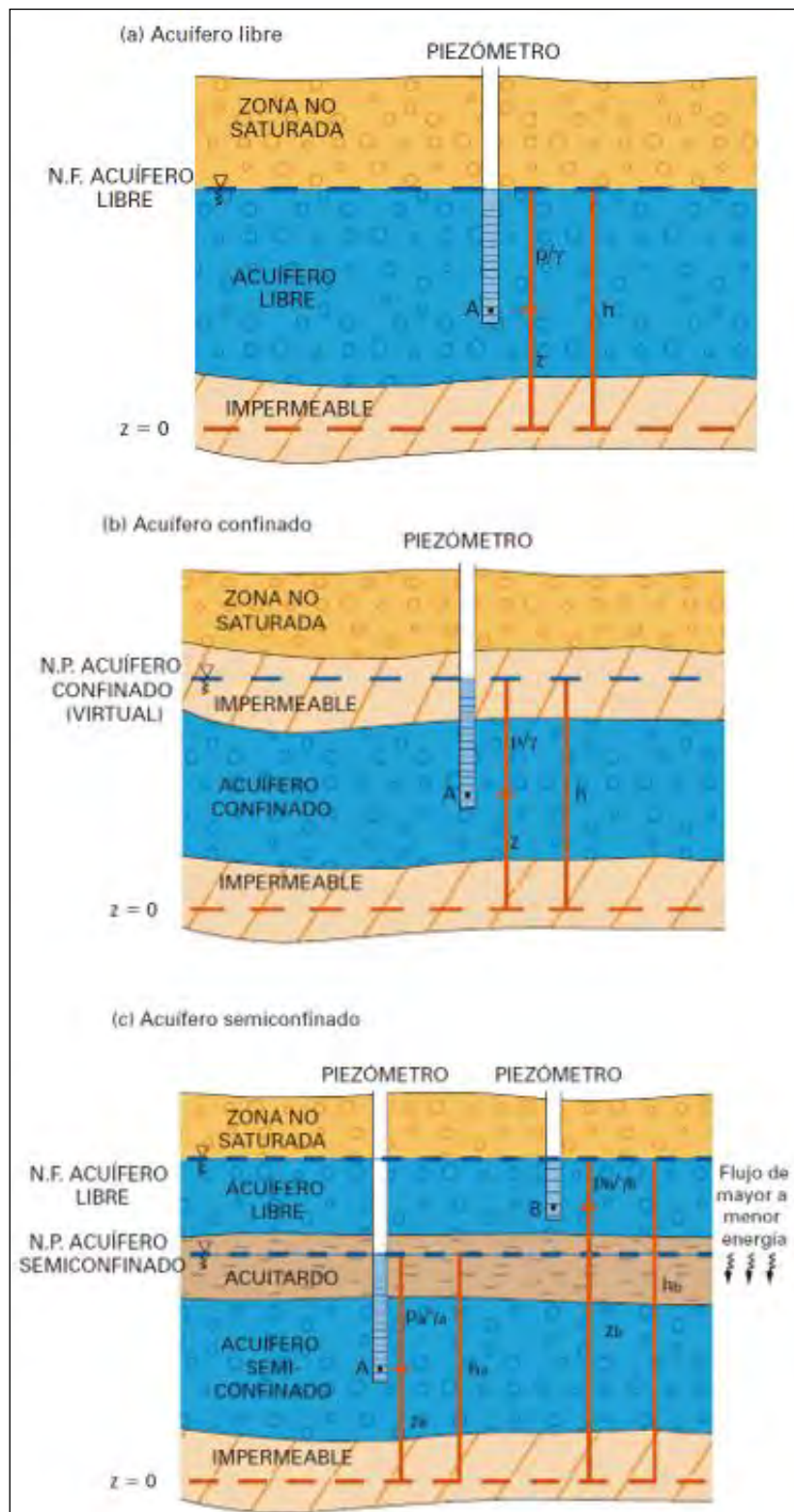
$$h = z + \frac{P}{\gamma}$$

Donde:

- h es el potencial hidráulico [L].
- z es la cota del punto del acuífero sobre un plano de referencia [L].
- p es la presión a la que se encuentra sometida el agua en el punto del acuífero, presión intersticial [ML⁻¹T⁻²].
- γ es el peso específico del agua [ML⁻²T⁻²].

En un sistema estático el potencial hidráulico tiene el mismo valor en todos sus puntos.

Figura 9 Potencial hidráulico de los diferentes tipos de acuíferos



Fuente: Martínez et al. (2005).

Según Martínez et al. (2005), define que en un sistema dinámico hay que tener en cuenta la energía cinética consecuencia de la velocidad del movimiento. Al ser, en la generalidad de los casos, la



velocidad del flujo subterráneo muy lenta, este término suele ser despreciable. Cuando un acuífero en condiciones ideales de rigidez aflora en una zona que constituye el área de recarga y en otra que constituye el área de descarga, estando confinado en el área intermedia por materiales que se han depositado posteriormente sobre él, el nivel piezométrico en la zona de confinamiento viene condicionado por el potencial hidráulico en las áreas de recarga y descarga.

Cuando se trata de materiales no consolidados, en condiciones no ideales de rigidez, la presión del agua en los poros, y como consecuencia el nivel piezométrico, también vienen condicionados por el peso de los materiales que confinan al acuífero (Martínez et al., 2005).

1.17.3.5. PARÁMETROS HIDROGEOLOGICOS

1.17.3.5.1. POROSIDAD

Es la característica que posee un material geológico de contener intersticios y su valor se da en porcentaje, representa el volumen del material ocupado por dichos intersticios. Se considera que una porosidad menor al 5 % es baja, entre el 5 y el 20 % es media y más del 20 % es alta (Tabla 2) Es posible aplicar la porosidad tanto en un material granular como en uno fracturado, inclusive se hallan materiales granulares compactos que se encuentran fracturados y enseñan lo que se llama doble porosidad (Maderey, 2005).

Tabla 2 Porosidad en los distintos tipos de sedimentos y rocas

Tipo de sedimentos y rocas	Total (%)	Eficaz (%)
Arcillas	60 a 40	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Lodo	30 a 50	
Arenisca	5 a 35	0.5 a 10
Calizas, dolomías	0.1 a 25	0.1 a 5
Calizas, dolomías kársticas	5 a 50	5 a 40
Rocas ígneas y metamórficas no fracturadas	0.01 a 1	0.0005
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1 a 10	0.0005 a 0.01

Fuente: Sander, 1998.

1.17.3.5.2. TIPOS DE POROSIDAD EN LOS ACUÍFEROS

- Porosidad intergranular

Según Martínez et al. (2005), este tipo de porosidad es típico de las rocas detríticas no consolidadas. En ellas los poros constituyen una intrincada red de canales de pequeño diámetro por los que circula el agua subterránea. Generalmente esta red de canales está distribuida por todo el volumen de la roca (Figura 10). Según Peyto (1986), en este tipo de rocas la práctica totalidad de poros están interconectados entre sí. Es el tamaño de las moléculas circulantes con el agua el que condiciona que algunos canalículos se obstruyan impidiendo en algunas zonas la circulación.

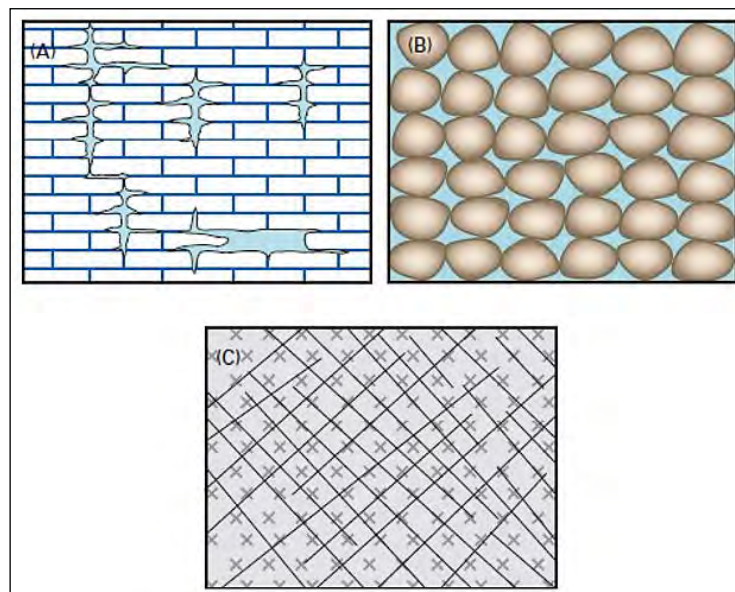
- Porosidad por fisuración

Según Davis (1969), la porosidad es característico de las rocas sedimentarias, intrusivos y metamórficas. Como consecuencia de una serie de procesos tectónicos las rocas presentan una red de fisuras de mayor o menor entidad y de mayor o menor densidad. Cuando la densidad de la red de fracturas es muy elevada y homogénea en todo el volumen de roca (medio continuo) el comportamiento hidrogeológico de este tipo de rocas puede asimilarse al de las rocas con porosidad intergranular. La porosidad de este tipo de macizos rocosos suele ser inferior al 5 %,

- Porosidad por disolución

Según Martínez et al. (2005), es la porosidad de los medios kársticos en los que a partir de pequeñas fisuras y planos de estratificación el agua va disolviendo la roca y acaban por formarse verdaderas redes de drenaje tridimensionales por las que pueden circular auténticos ríos de agua subterránea. Los aparatos kársticos, cuando no están muy desarrollados, pueden asimilarse a medios fracturados o a medios equivalentes de porosidad intergranular. Si no es así, los karst pueden tratarse como sistemas tipo caja negra que, a partir de unas entradas de agua al sistema conocidas, reproducen los hidrogramas de las surgencias reales.

Figura 10 Tipos de porosidad en los acuíferos: (A) Porosidad por disolución. (B) Porosidad intergranular. (C) Porosidad por fisuración.



Fuente: Martínez et al. (2005).

1.17.3.5.3. PERMEABILIDAD

Según Martínez et al. (2005), es una propiedad que presenta el basamento rocoso para permitir que los fluidos se movilicen por sus poros, así mismo se puede indicar que es la capacidad que tiene el agua para fluir por una sección de área de terreno, tiene dimensiones en m/s. Dentro de este concepto pueden definirse otros dos: La permeabilidad ligada tanto a las características texturales del medio físico como del fluido que transmite, denominada permeabilidad efectiva o conductividad hidráulica, representada por el coeficiente de permeabilidad, K (Tabla 3). La denominada permeabilidad intrínseca, k , que es solo dependiente de las características internas del medio permeable, se determina de la siguiente forma:

$$Q = K \cdot i \cdot A \quad \dots\dots\dots(\text{Formula})$$

- Q: Cantidad de agua drenada.
- K: Conductividad hidráulica.
- i: Gradiente piezométrica.
- A: Sección transversal.

Tabla 3 Permeabilidad de materiales

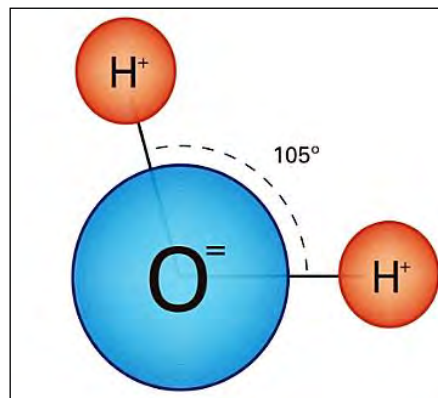
Permeabilidad relativa	K (cm/s)	Suelo típico
Muy permeable	$> 1 \times 10^{-1}$	Grava gruesa
Moderadamente	1×10^{-1} a 1×10^{-3}	Arena; arena fina
Poco permeable	1×10^{-3} a 1×10^{-5}	Arena limosa; arena sucia
Muy poco permeable	1×10^{-5} a 1×10^{-7}	Limo y arenisca fina
Impermeable	$< 1 \times 10^{-7}$	Arcilla

Fuente: Custodio y Llamas (1996).

1.17.3.6. MOLÉCULA DE AGUA

Según Martínez et al. (2005), está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. La unión de cada uno de los átomos de hidrógeno al de oxígeno es mediante un enlace covalente. La estructura tetraédrica de los orbitales del oxígeno implica que los enlaces O-H formen entre sí un ángulo de unos 105° , lo que lleva consigo que, aunque se trata de una molécula eléctricamente neutra, la distribución de sus cargas sea asimétrica, dando como resultado un dipolo (Figura 11).

Figura 11 Tipos de dipolo característico de la molécula de agua.



Fuente: Martínez et al. (2005).

Según Martínez et al. (2005), esta consecuencia de la atracción electrostática entre dipolos, las moléculas de agua tienden a unirse entre sí mediante lo que se llama un enlace de puente de hidrógeno. Puesto que la estructura de la molécula de agua es tetraédrica, cada una de ellas puede unirse a otras cuatro mediante puente de hidrógeno.

La gran diferencia en electronegatividad de los átomos de oxígeno e hidrógeno hace que el agua posea una constante dieléctrica muy elevada y que los compuestos formados por enlace iónico tiendan a disociarse en ella en aniones y cationes. Estos elementos cargados negativa o



positivamente tienden a formar enlaces de puente de hidrógeno con las moléculas de agua y a permanecer en solución (Martínez et al., 2005).

El agua es conocida con el nombre de disolvente universal. La necesidad de romper los puentes de hidrógeno tiene como consecuencia los altos valores de tensión superficial, calor de vaporización, calor específico, punto de fusión y punto de ebullición que presenta el agua. El agua es el único elemento que se presenta en sus tres estados en el rango de variación de la temperatura ambiental (Martínez et al., 2005).

Según Martínez et al. (2005), el estado líquido del agua está formada por un aglomerado de moléculas unidas entre sí por enlaces de puente de hidrógeno. El agua en estado sólido cristaliza en el sistema cúbico y aumenta su volumen con respecto al estado líquido. Como consecuencia, el hielo es menos denso que el agua líquida y flota. Este hecho es muy importante puesto que condiciona que las masas de agua en la naturaleza comiencen a congelarse en superficie permaneciendo líquidas en profundidad, permitiendo así la continuidad de la vida durante los períodos fríos.

Según Lillo (2013), menciona que los parámetros hidroquímicos y su distribución aportan información acerca del origen y distribución del agua subterránea, procesos fisicoquímicos y calidad del agua. Así mismo, esta información es esencial para establecer la evolución del acuífero en el tiempo y el espacio, evaluar la vulnerabilidad del acuífero, detectar afecciones y establecer las medidas correctoras para la contaminación, salinización y pérdida de calidad, y finalmente gestionar el recurso.

1.17.3.7. MOLÉCULA DE AGUA

El agua subterránea no se presenta en la naturaleza en estado puro, sino que contiene en solución elementos orgánicos e inorgánicos y algunos gases, principalmente oxígeno y CO₂. A la cantidad de un determinado elemento disuelta en una determinada cantidad de agua se le denomina concentración de ese elemento en el agua. Puede expresarse de varias maneras (Martínez et al., 2005).

- mol/l: molaridad o moles por litro de disolución. Es frecuente el uso de milimoles por litro de disolución, mmol/l. 1mmol/l = 10⁻³ mol/l (Vázquez y Ayora, 2014).
- mol/kg: molalidad o moles por kg de disolución (Vázquez y Ayora, 2014).
- eq/L: normalidad o equivalentes por litro de disolución. También se usa meq/l, miliequivalentes por litro de disolución. 1mmeq/L = 10⁻³ eq/L (Vázquez y Ayora, 2014).

1.17.3.8. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS

Según Lillo (2013), entre los elementos que la hidrogeoquímica considera importantes por ser mayoritarios (Tabla 4 y 5), se encuentran el calcio (Ca⁺⁺), magnesio (Mg⁺⁺), sodio (Na⁺), potasio (K⁺), bicarbonatos (HCO₃⁻), sulfatos (SO₄⁼), cloruros (Cl⁻); y como parámetros de campo, la conductividad eléctrica, la temperatura, el contenido de oxígeno disuelto y el pH. Tales análisis son suficientes para el estudio de los principales procesos químicos en la mayoría de los acuíferos y sus relaciones con los sistemas hidrológicos, según Deutsch (1997), y Custodio y Llamas (1996).

Según Lillo (2013), la composición de las aguas se puede detallar de la siguiente manera:

- Componentes mayoritarios (concentraciones superiores a 5 mg/L):



Tabla 4 Distribución aniones y cationes mayoritarios

<i>Aniones</i>	<i>Cationes</i>
Cloruro Cl ⁻	Sodio Na ⁺
Sulfato SO ₄ ²⁻	Calcio Ca ²⁺
Bicarbonato HCO ₃ ⁻	Magnesio Mg ²⁺

Fuente: Lillo (2013).

- Componentes minoritarios (concentraciones de 10 - 0,01 mg/L):

Tabla 5 Distribución aniones y cationes minoritarios

<i>Aniones</i>	<i>Cationes</i>
Nitrato NO ₃ ⁻	Potasio K ⁺
Carbonato CO ₃ ²⁻	Hierro (II) Fe ²⁺
Nitrito NO ₂ ⁻	Amonio NH ₄ ⁺
Flúor F ⁻	Estroncio Sr ²⁺

Fuente: Lillo (2013).

- Componentes trazas (concentraciones inferiores a 0,1 mg/l):

Según Lillo (2013), los analitos se definen por Br, S, S⁻, PO, PO₄⁻³, BO, BO₃H₂⁻, NO₂⁻, OH⁻, I⁻, Fe⁺⁺⁺, Mn⁺⁺, NH, NH₄⁺, H⁺, Al⁺⁺⁺ y metales como As, Sb, Cr, Pb, Cu, Zn, Ba, V, Hg, U, etc. Las especies químicas disueltas pueden tener sumar un amplio rango de concentración (Tabla 6). Las aguas dulces naturales tienen menos de 1000 mg/l, salobres hasta 5000 mg/l, y marinas hasta los 35000 mg/l.

Tabla 6 Valores composicionales representativos de las aguas naturales

Aniones	Agua lluvia	Agua mar	Agua subterránea
Cloruro	0 a 20 mg/l	2000 mg/l	10 a 250 mg/l
Sulfato	0 a 10 mg/l	3000 mg/l	10 a 300 mg/l
Bicarbonato	0 a 20 mg/l	120 mg/l	50 a 35 mg/l
Nitrato	0 a 5 mg/l	1 mg/l	0 a 300 mg/l
Bromuro	0 mg/l	65 mg/l	0 a 2 mg/l
Cationes			
Sodio		10000 mg/l	5 a 150 mg/l
Calcio		400 mg/l	10 a 250 mg/l
Magnesio		1200 mg/l	1 a 75 mg/l
Potasio		400 mg/l	1 a 10 mg/l
Estroncio		13 mg/l	0 a 1 mg/l
Otras características			
Conductividad		45000 uS/cm	100 a 200 uS/cm

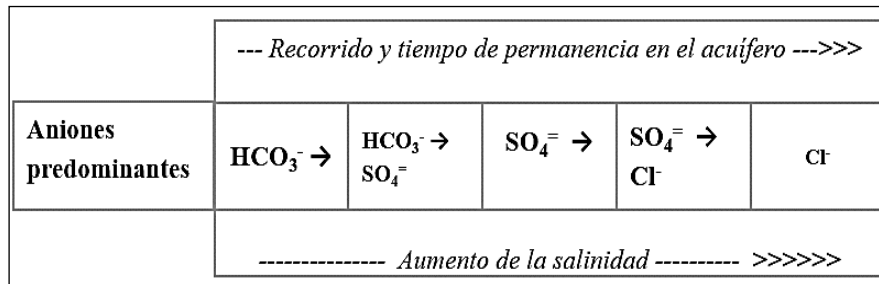
Fuente: Lillo (2013).

1.17.3.9. DATOS HIDROQUÍMICOS

Según Lillo (2013), la secuencia normal de un agua 'joven', de reciente infiltración cambiará su composición en el acuífero (Figura 12), por lo cual define la siguiente relación:



Figura 12 Secuencia de Chevorateb.



Fuente: Lillo (2013).

1.17.3.10. ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DEL AGUA

En el estudio del agua subterránea los parámetros físicos y fisico-químicos aportan información para su caracterización, por lo cual se describen a continuación:

1.17.3.10.1. POTENCIAL DE HIDROGEONES (pH)

El pH del agua es la medida de la alcalinidad y acidez e indica la concentración de los iones hidrógeno (H+) y se mide en una escala logarítmica con rango de 0-14. Las mediciones de este parámetro se consideran más exactas cuando se realizan en campo durante la toma de muestra, debido a que el pH puede modificarse con el transcurso del tiempo a causa de cambios de temperatura, escape o incorporación de gases (Martínez et al., 2005). El pH describe, en forma general la composición del agua y las sustancias disueltas alteran el pH natural del agua. Un pH de 7 indica que el agua es neutra, a valores menores indica acidez y valores mayores un carácter básico (Mazor y Pettitt, 1991). De manera natural la mayoría de las aguas subterráneas tienen un pH que varía entre 6.5 y 8 (Martínez et al., 2005).

Según Martínez et al. (2005), indica que el pH es una medida de la acidez del agua, se obtiene del inverso del logaritmo de la concentración de iones hidrógenos. Por otra parte, el pH es adimensional; siendo 7 el valor que corresponde al pH neutro, los pH inferiores a 7 corresponden a medios ácidos y los superiores a 7 a medios básicos y/o alcalinos. En las aguas naturales el pH oscila generalmente entre 6.5 y 8.

1.17.3.10.2. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)

La conductividad eléctrica es la capacidad que tiene el agua para conducir electricidad. Y se mide en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ó microohms/cm ($\mu\Omega/\text{cm}$). La conductividad eléctrica aumenta con la temperatura (2°C), por lo que se mide sobre una temperatura de referencia (18°C o 25°C). Mientras más iones haya en el agua, mayor es su conductividad. También influyen en la conductividad eléctrica el tipo de iones (carga eléctrica, estado de disociación, movilidad, entre otras). La conductividad en aguas dulces puede variar entre 100 y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Custodio y Llamas, 1996).

La conductividad varía mucho con la temperatura, hay conductímetro que introducen la corrección automáticamente, en otros hay que medir la temperatura con un termómetro y realizar el ajuste manualmente (Copa y Roque, 2016).



1.17.3.10.3. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (TDS)

El agua es un solvente capaz de disolver la mayoría de los sólidos en algún grado (Condori, 2016). De la mayoría de solutos encontrados en el agua subterránea, sólo una parte pequeña está presente en una cantidad mayor a 1 ppm, bajo condiciones naturales típicas (Deutsch, 1997). De los sólidos disueltos en el agua, los iones mayores ocupan de 97-99% del total, los menores de 1-3% y los trazas alrededor de 0.1%. Es importante resaltar que la abundancia relativa de los elementos que componen a los sólidos disueltos en el agua subterránea depende de su movilidad química. Conforme el agua subterránea migra en el subsuelo de las zonas de recarga a las zonas de descarga, cambia su composición química al disolver pequeñas cantidades de materiales que encuentra en su camino, aumentando la cantidad de sólidos disueltos que contiene (Kehew, 2001).

Según Martínez et al. (2005), hay que distinguir entre TSD y Residuo Seco (RS), que es el peso de las sustancias que quedan tras evaporar un litro de agua (desaparecen los volátiles). Si el agua se evapora de 105 a 110° C, en el RS puede quedar algo de materia orgánica y el agua de hidratación de algunos minerales. A temperaturas de 180° C estas sustancias desaparecen totalmente. Según el RS las aguas se clasifican en:

- Agua dulce, RS menor de 3 000 ppm.
- Agua salobre, RS entre 3 000 y 10 000 ppm.
- Agua salada, RS entre 10 000 y 40 000 ppm.
- Salmuera, RS mayor de 40 000 ppm.

1.17.3.10.4. POTENCIAL REDOX (Eh)

Es una medida de la tendencia a la oxidación ($Eh > 0$) o a la reducción ($Eh < 0$) de las sustancias que lleva en disolución el agua subterránea. La oxidación implica una pérdida de electrones y por lo tanto una ganancia de valencia. La reducción, por el contrario, implica una ganancia de electrones y una pérdida de valencia. Puesto que el número de electrones es constante en una determinada disolución, la oxidación de un elemento implica la reducción de otro, o viceversa. El movimiento de electrones genera una corriente eléctrica que se mide en voltios o milivoltios (Martínez et al., 2005).

1.17.3.10.5. TEMPERATURA (T)

Según Martínez et al. (2005), la medida del potencial calorífico del agua. Su valor se expresa en °C. En aguas subterráneas no suele sufrir variaciones importantes en un mismo punto del acuífero. Su valor suele coincidir con la temperatura ambiental media anual incrementada en el gradiente geotérmico (aproximadamente 1 °C por cada 30 m de profundidad del pozo). Debe medirse directamente a la salida del pozo de bombeo para evitar que se mezcle con el agua del depósito (si existe).

El termómetro debe mantenerse en contacto con el agua hasta que se estabilice su columna de mercurio. La variación de la temperatura influye en la solubilidad de las sales y en el contenido en gases disueltos. Según el análisis de estos parámetros (Temperatura, pH, Alcalinidad, Potencial Redox y Conductividad eléctrica) es conveniente medirlos in situ, pues difícilmente conservan el valor en origen (Martínez et al., 2005).



1.17.3.10.6. TURBIDEZ

Es un parámetro relacionado con el grado de transparencia y limpieza del agua que pueden ser resultado de una posible actividad biológica o simplemente una presencia de componentes no deseables. Se mide mediante la absorción que sufre un haz de luz al atravesar un determinado volumen de agua. Para eliminar esta turbidez y así mejorar la calidad del agua se usan los distintos tipos de filtros que hay en el mercado, mejorando el rendimiento con el uso de floculantes (Copa y Roque, 2016).

1.17.3.10.7. COLOR

El color del agua se debe a la presencia de sustancias orgánicas disueltas o coloidales, sustancias inorgánicas disueltas, así como cuerpos vivos presentes, tales como algas. Cuando hay turbidez, el agua presenta un color evidente y para obtener el color verdadero se recurre a algún mecanismo técnico. El color constituye una característica de orden estético y su acentuada concentración puede causar cierto rechazo (Copa y Roque, 2016).

1.17.3.10.8. OLOR Y SABOR

La determinación que se realiza es la del olor (el olfato humano es más sensible que el paladar), debido que el sabor depende de este. En el agua, todas las sustancias inorgánicas pueden producir olor y sabor, según la concentración en que se encuentren (Copa y Roque, 2016).

1.17.3.10.9. ELECTRONEGATIVIDAD

En un análisis bien realizado la suma de equivalentes de los cationes ha de ser igual a la suma de los equivalentes de los aniones, puesto que el agua ha de ser eléctricamente neutra. Con esta premisa puede establecerse el error de un análisis químico de la siguiente manera:

$$\text{ERROR (\%)} = \frac{\sum \text{CATIONES (meq/L)} - \sum \text{ANIONES (meq/L)}}{\sum \text{CATIONES (meq/L)} + \sum \text{ANIONES (meq/L)}} \times 100$$

En la práctica los análisis químicos siempre presentan un cierto error. Pueden ser aceptables errores de hasta el 5 %. Un análisis con un error del 0 % debe, en principio, considerarse como poco fiable. Es muy probable que alguno de los componentes se haya obtenido como diferencia necesaria para cuadrar el balance. A veces se obtienen errores superiores al 5 % debido a que existen elementos minoritarios, con concentraciones importantes, que no han sido determinadas en un análisis sistemático (Martínez et al., 2005).

1.17.3.11. CLASIFICACIÓN QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

La gran variedad de componentes y características fisicoquímicas del agua natural, exige su clasificación en grupos, para tener una información breve y sencilla sobre la composición química. Los diagramas hidrogeoquímicos están hechos para facilitar la interpretación de las tendencias de evolución, en especial en sistemas de aguas subterráneas (Custodio y Llamas, 1976).

1.17.3.11.1. POR IONES DOMINANTES

La clasificación por iones dominantes utiliza herramientas gráficas para su representación. Se nombra el agua por el anión o catión que sobrepasa el 50% de sus sumas respectivas. Si ninguno sobrepasa



el 50%, se nombran los dos más abundantes. Si conviene, se puede añadir el nombre de algún ion menor de interés y que esté en concentración anormalmente alta. El manejo y estudio de análisis químicos puede simplificarse con el empleo de gráficos y diagramas, en especial cuando se trata de hacer comparaciones entre varios análisis de aguas de un mismo lugar en épocas diferentes o de lugares diferentes (Custodio y Llamas, 1976). Los diagramas hidroquímicos se emplean para comparar los análisis químicos de diferentes muestras de agua subterránea. Se han desarrollado varios tipos de diagramas hidroquímicos, los más útiles son los diagramas de Stiff y Piper (Kehew, 2001).

1.17.3.11.2. UTILIDAD Y MANEJO DE LOS RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS

En los estudios hidrogeológicos la química de las aguas subterráneas se utiliza tanto para conocer su aptitud para determinados usos como para aclarar o resolver algunos procesos hidrogeológicos. En ambos casos es necesario planificar campañas de muestreo que en general se refieren a:

- Muestreo periódico en un punto a lo largo del tiempo. Proporciona el conocimiento de la evolución temporal de los diferentes parámetros y supone un control de la calidad del agua con vistas a su uso posterior.
- Muestreo periódico en una red de puntos definida para un determinado sistema hidrogeológico. Además de la utilidad anterior, contribuye a clarificar los procesos hidrogeológicos, a conocer la evolución espacio-temporal de la química de las aguas, y al conocimiento de los procesos que tienen lugar en el interior del sistema hidrogeológico.

En cualquier caso, al cabo de un plazo de tiempo no muy extenso es normal haber obtenido una considerable cantidad de datos cuyo manejo e interpretación pueden ser problemáticos. Por ello se hace imprescindible la adecuada representación gráfica de los datos (Martínez et al., 2005).

Los datos correspondientes a un solo análisis pueden representarse en gráficos de columnas, tipos tartas, radiales y poligonales (Figura 13). Estas representaciones permiten comparar distintos análisis entre sí y observar rápidamente, en un mismo análisis, la distribución de aniones y cationes. También pueden utilizarse para representar en planos o perfiles hidrogeológicos la distribución espacial de las características químicas de las aguas subterráneas (Martínez et al., 2005).

1.17.3.11.3. DIAGRAMA DE COLLINS

Se representan los aniones y cationes de un análisis medido en meq/L, en dos columnas adosadas entre sí. En una columna se representan los cationes en el orden Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+1} y K^{+1} y en la otra los aniones en el orden $(\text{CO}_3\text{H}^{-1} + \text{CO}_3^{-2})$, SO_4^{-2} , Cl^{-1} y NO_3^{-1} . Las dos columnas deben tener la misma altura salvo que el análisis tenga error (Figura 13). El conjunto $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$ es la dureza del agua expresada en meq/L, según Collins (1923), y Martínez et al. (2005).

1.17.3.11.4. GRÁFICOS DE TORTA

Cada análisis se representa en un círculo cuyo radio es proporcional al total de sales disueltas expresado en meq/l. Cada elemento disuelto se representa en este círculo mediante un sector circular de superficie proporcional a su % de meq/l (Figura 13). Según se estime conveniente puede utilizarse un círculo para los cationes y otro para los aniones, o bien representar ambos constituyentes en el mismo círculo (Martínez et al., 2005).



1.17.3.11.5. GRÁFICOS RADIALES

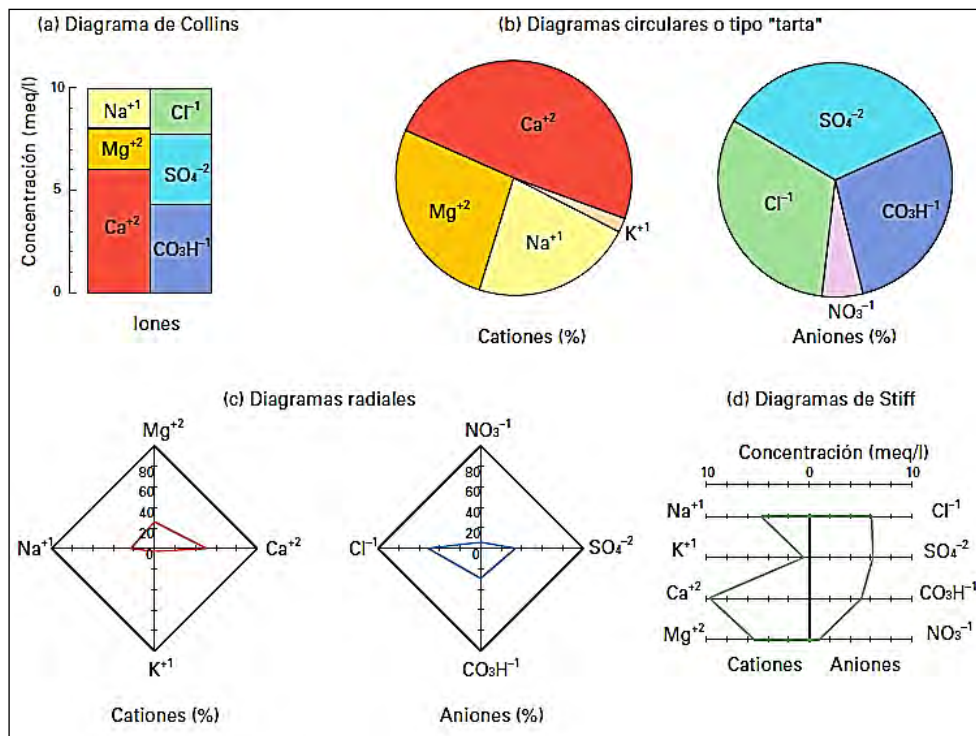
Se representan según los radios de un círculo regularmente espaciados, segmentos proporcionales al % de meq/l de cada ion (Figura 13). También puede representarse el valor de la concentración de cada elemento directamente en meq/l (Martínez et al., 2005).

1.17.3.11.6. DIAGRAMA DE POLIGONOS O DE STIFF

Constan de una serie de rectas paralelas equidistantes entre sí cortadas por una perpendicular a ellas. Esta perpendicular constituye el origen de las medidas sobre las semirrectas en que han quedado divididas las paralelas. De la vertical a la derecha se representan los aniones (uno en cada semirrecta y en meq/l, y análogamente los cationes en las semirrectas de la parte izquierda de la vertical (Figura 13). Según Stiff (1951) y Martínez et al. (2005), en los diagramas de Stiff, generalmente suelen representarse Cl^{-1} , SO_4^{-2} , HCO_3^{-1} , NO_3^{-1} en la zona de los aniones, y Na^{+1} , K^{+1} , Ca^{+2} y Mg^{+2} en la de los cationes.

Según Martínez et al. (2005), sobre cada semirrecta se lleva un segmento de longitud proporcional a la concentración de cada elemento en meq/l. La unión de los extremos de estos segmentos define un polígono cuya superficie es proporcional a la mineralización del agua. Su forma, dada por la longitud de los segmentos correspondientes a las concentraciones de los iones disueltos, indica el tipo de agua desde el punto de vista químico (clorurada, sulfatada, etc.; sódica, potásica, etc.).

Figura 13 Representatividad gráfica de iones de muestra de agua, donde (a) Diagrama de Collins, (b) Diagramas circulares, (c) Diagramas radiales y (d) Diagrama de Stiff



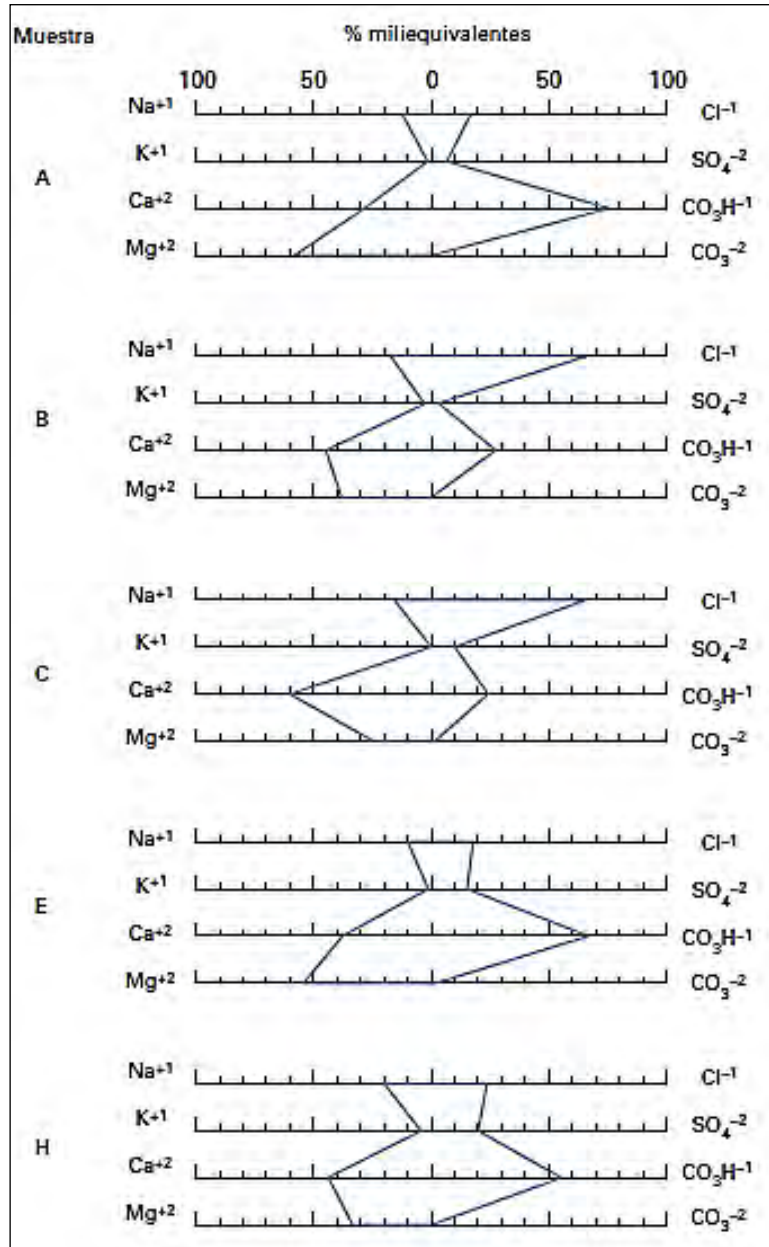
Fuente: Martínez et al. (2005).

El diagrama de Stiff a veces se modifica para adaptarlo a los elementos presentes en el agua. Por ejemplo, puede prescindirse de las semirrectas correspondientes al K^{+1} y a los NO_3^{-1} si estos elementos no son importantes (Figura 14). En el diagrama original se considera CO_3^{-2} en lugar de



NO_3^- y Fe^{+2} en lugar de K^{+1} . Para representar conjuntamente los datos correspondientes a varios análisis se suelen utilizar los diagramas logarítmicos y los diagramas triangulares (Martínez et al., 2005).

Figura 14 Diagrama de Stiff.



Fuente: Martínez et al. (2005).

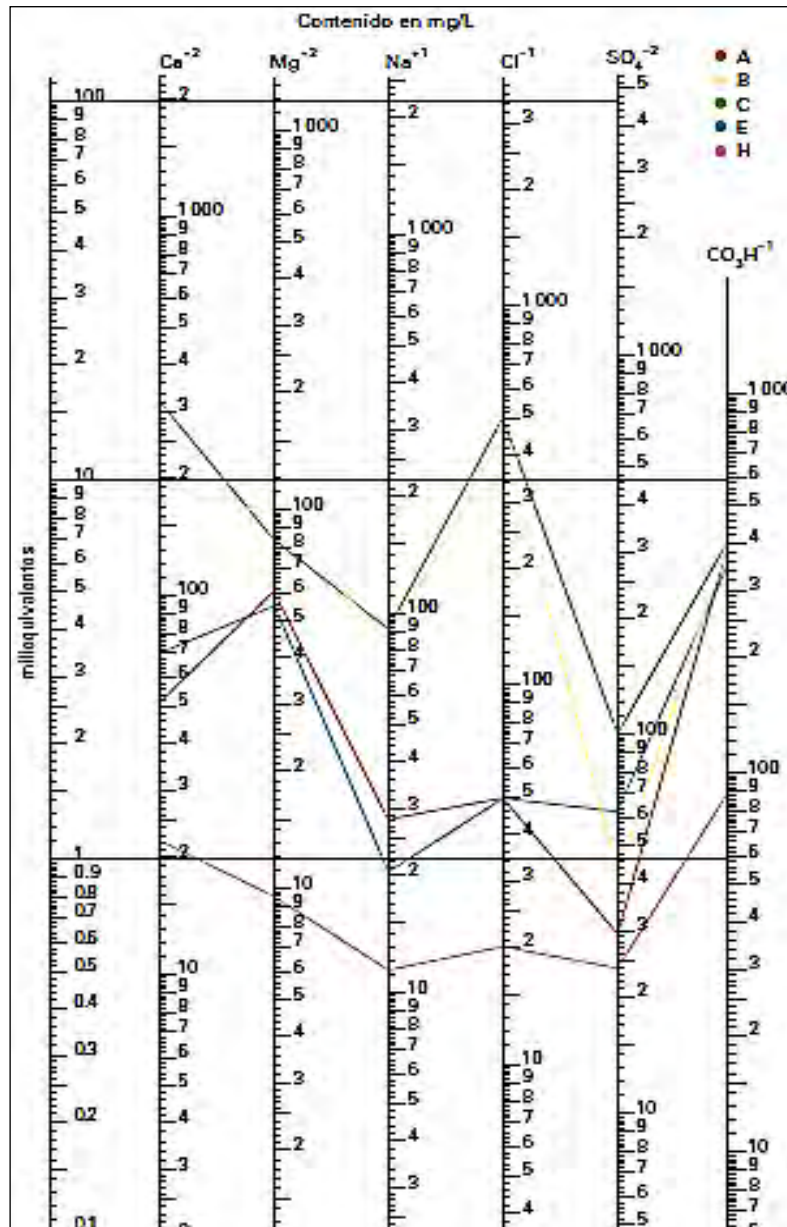
1.17.3.11.7. DIAGRAMAS LOGARÍTMICOS O DE SCHOELLER-BERKALOFF

Se conforman por varias líneas verticales paralelas entre sí. En cada una de estas líneas y a escala logarítmica se representa la concentración de un ion en ppm. Una línea vertical también a escala logarítmica, en un extremo del diagrama, proporciona la equivalencia entre las concentraciones en ppm y en meq/l. Así estos diagramas son fácilmente utilizables para ambas expresiones de la concentración. La unión de los puntos que definen la concentración de cada uno de los iones representados, da lugar a una línea quebrada que marca las características del análisis representado



(Martínez et al., 2005). La pendiente de la línea que une dos iones contiguos da una idea visual de la relación entre ambos (Figura 15). En un mismo gráfico pueden representarse varios análisis y la comparación entre ellos es inmediata (Schoeller, 1995).

Figura 15 Diagrama de Schoeller - Berkloff.



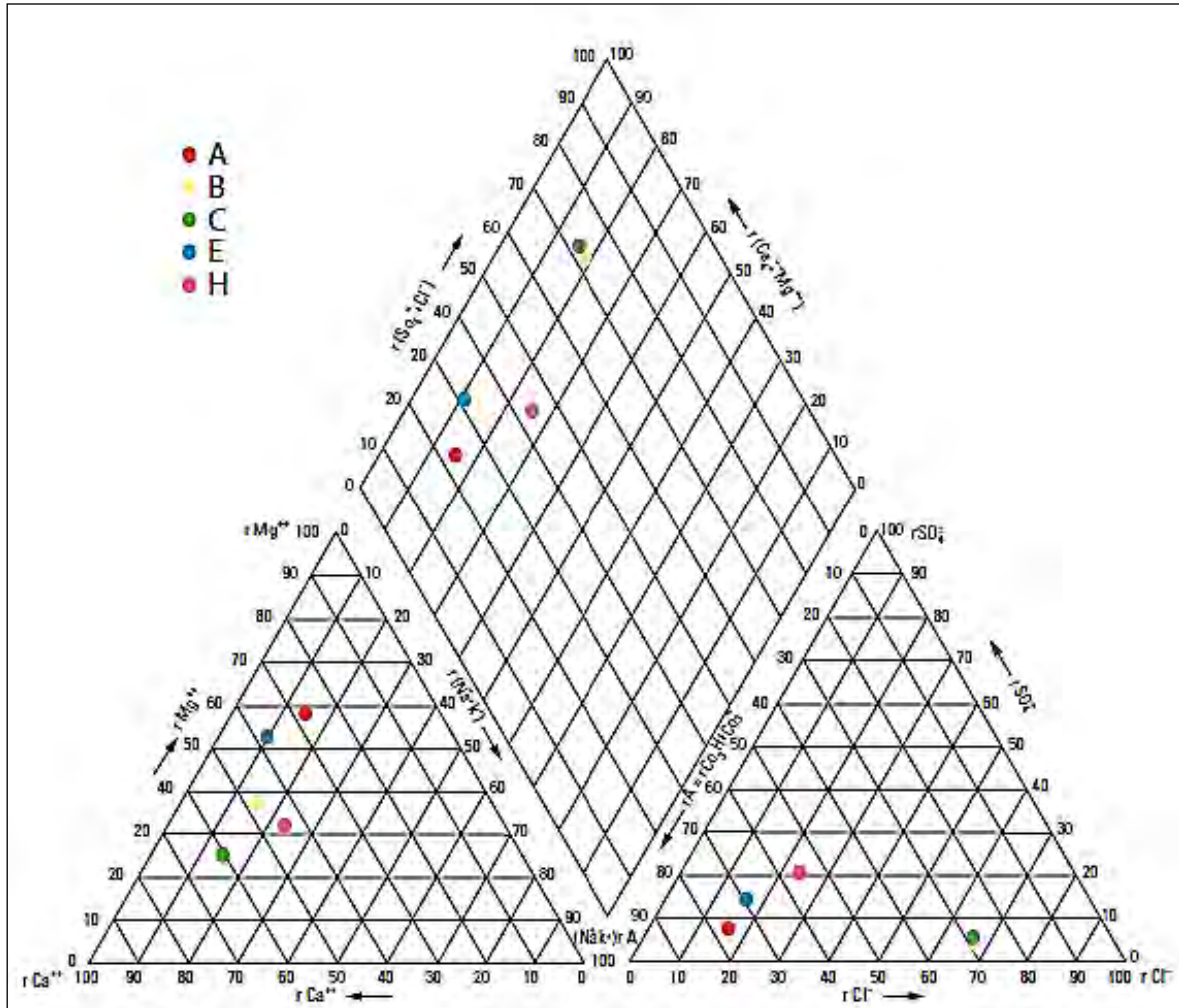
Fuente: Martínez et al. (2005).

1.17.3.11.8. DIAGRAMAS TRIANGULARES O DE PIPER

Indica que cada uno de los vértices de un triángulo equilátero representa el 100 % de la concentración en meq/l de un determinado elemento y el 0 % del elemento situado en el vértice siguiente según el sentido de las agujas del reloj. Los valores del % de la concentración de cada elemento se representan trazando desde el punto del lado del triángulo que representa el % a representar, una recta paralela al lado opuesto al vértice correspondiente al 100 % del elemento que se considera (Figura 16). Sólo

es posible representar tres iones (tres aniones o tres cationes) de cada análisis, pero es posible representar muchos análisis en el mismo gráfico (Piper, 1994).

Figura 16 Diagrama de Piper.



Fuente: Martínez et al. (2005).

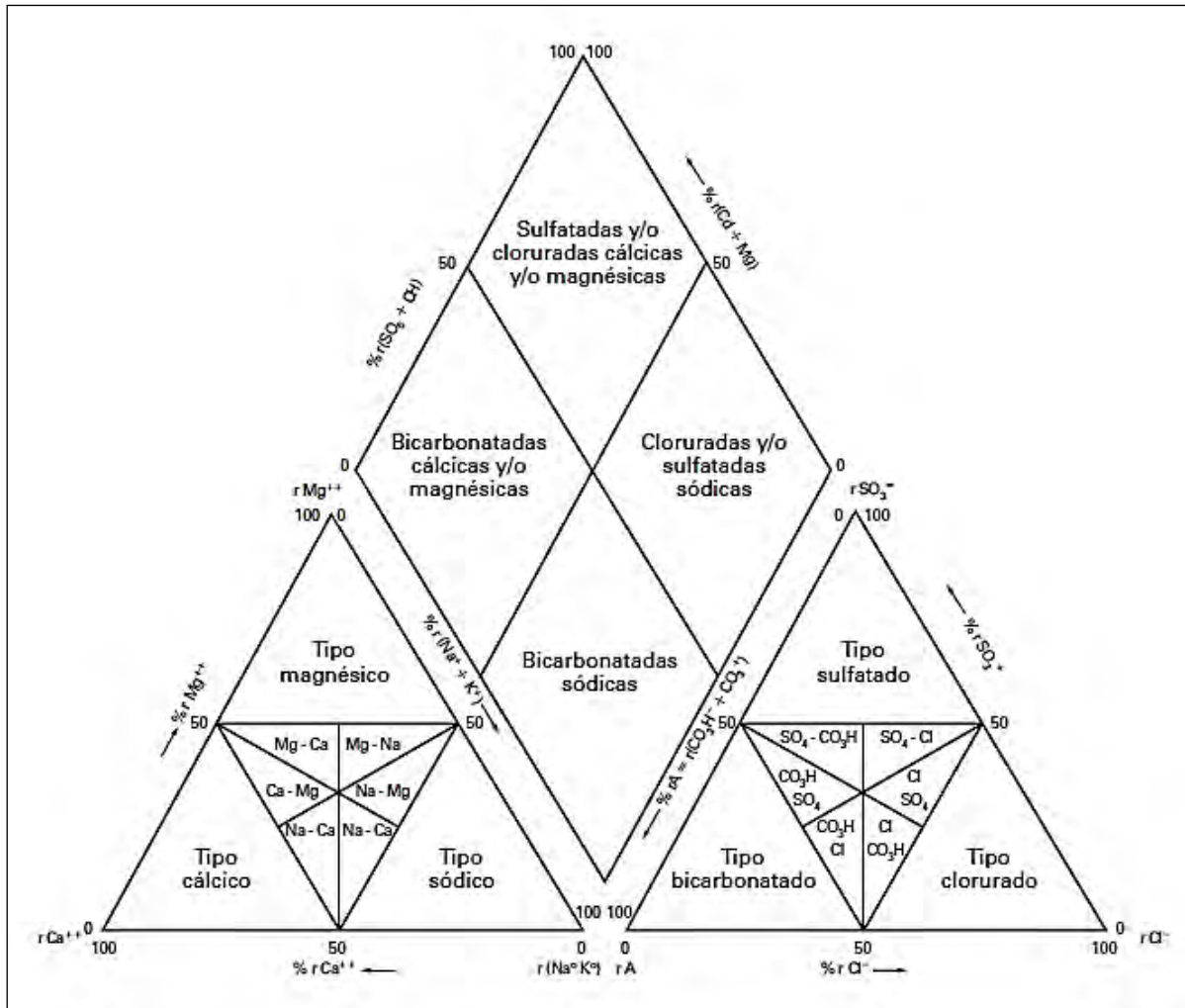
Es posible utilizar un diagrama triangular para representar aniones y otro distinto para representar los cationes. Ambos están relacionados con un diagrama central en forma de rombo en el que queda definido un tercer punto que representa a aniones y cationes del mismo análisis (Figura 17). En este tipo de diagramas los puntos que quedan agrupados definen familias de aguas de características químicas semejantes en cuanto al contenido iónico (Martínez et al., 2005).

En los vértices del triángulo de los cationes suelen representarse Ca^{+2} , Mg^{+2} y Na^{+1} , y en el de los aniones ($CO_3H^{-1} + CO_3^{-2}$), SO_4^{-2} y Cl^{-1} . Aunque pueden representarse los iones que se estime oportuno de acuerdo con los objetivos de la investigación. Cuando el punto que determina las composiciones aniónicas y catiónicas de un agua queda representado en un diagrama triangular entre otros dos puntos y alineado con ellos, es muy probable que el agua representada por el punto intermedio sea mezcla de las otras dos (Martínez et al., 2005).



El desplazamiento en el gráfico del punto representativo del análisis químico de muestras tomadas en un mismo punto a lo largo del tiempo, puede ser indicativo de fenómenos de intercambio iónico, oxidación o reducción, precipitación de sales y disolución de sales (Martínez et al., 2005).

Figura 17 Diagrama de Piper para clasificación química de las aguas.



Fuente: Martínez et al. (2005).

1.17.3.12. EVOLUCIÓN Y SISTEMAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO

Desde hace mucho tiempo se reconoce el papel importante del agua subterránea en muchos procesos geológicos, pero fue hasta los años 60-70's cuando se comprendió que esta conexión tiene una causa, los sistemas de flujos de agua subterránea (Tóth, 2000). Según Tóth (1970), define ambiente hidrogeológico como un modelo conceptual de los parámetros morfológicos, geológicos y climáticos que determinan los atributos principales de un régimen del agua subterránea en un área determinada. Los seis atributos o parámetros principales que definen un régimen de agua subterránea son: el contenido de agua en las rocas, la geometría de los sistemas de flujo, la descarga específica, la composición química del agua, la temperatura y la variación temporal de todos los anteriores (Tóth, 2000). Los parámetros de un régimen del agua subterránea están controlados por tres componentes del ambiente hidrogeológico: topografía, geología y clima (Tóth, 2000).



El flujo del agua subterránea se condiciona por el gradiente hidráulico. La forma básica de los sistemas de flujo proviene del concepto de la continuidad hidráulica en una cuenca unitaria en donde se define una zona de recarga con un flujo descendente, una zona de tránsito con un flujo horizontal y una zona de descarga ascendente (Tóth, 1995).

1.17.3.12.1. ZONA DE RECARGA

Reúnen una serie de factores que propician la infiltración de agua hasta alcanzar el agua subterránea, el nivel piezométrico relativamente alto y decrece con la profundidad, de modo que existe un flujo vertical descendente y divergente, y el nivel freático es profundo (Tóth, 2000, y Peñuela, 2007).

1.17.3.12.2. ZONA DE TRÁNSITO

Es una parte intermedia donde se produce la circulación del agua desde la zona de recarga hasta la de descarga, la altura piezométrica apenas varía con la profundidad, las isopiezas son prácticamente verticales y el flujo es predominantemente horizontal (Tóth, 2000 y Peñuela, 2007).

1.17.3.12.3. ZONA DE DESCARGA

Es donde el valor del nivel piezométrico aumenta con la profundidad y el flujo es vertical ascendente y convergente, en casos emergiendo del subsuelo, contribuyendo junto con el agua de escorrentía (exceso de lluvia) a la formación de fuentes superficiales de agua entre los cuales se tiene: los manantiales, lagos, flujo base de ríos, lagunas costeras (Tóth, 2000, y Peñuela, 2007).

Las dimensiones espaciales del acuífero y su estructura condicionan la formación de diferentes sistemas de flujo de agua subterránea (Amaya, 2015). Se pueden diferenciar tres sistemas principales de flujo de agua subterránea: local, intermedio y regional (Tóth, 1963). Algunas manifestaciones de la presencia de diferentes sistemas de flujo son muy comunes en las observaciones en el campo como: la superposición vertical de diferentes tipos de sistemas de flujo en una región y la existencia de la recarga o descarga de sistemas de flujo de diferente jerarquía en la misma región (Leyva et al., 2010).

Según Leyva et al. (2010), principalmente los sistemas de flujo se diferencian por la profundidad del recorrido y sus características hidrogeoquímicas. El contenido de elementos químicos en el agua subterránea es dependiente del medio geológico y generalmente aumenta al ampliar la escala espacial y temporal, en especial en el contenido de elementos traza. A continuación, se explican las diferencias entre los sistemas de flujo en forma comparativa:

1.17.3.12.4. SISTEMA DE FLUJO LOCAL

Es aquel donde su zona de recarga y descarga se encuentran a corta distancia, el agua tiene una profundidad somera, baja salinidad, alto contenido de oxígeno disuelto, bajo pH, valor más positivo en Eh, una temperatura cercana a la del ambiente y puede variar cuando cambian las estaciones del año (Figura 18 y 19). La presencia del flujo local se limita a una cuenca Hergt (2009) y Peñuela (2007).

1.17.3.12.5. SISTEMA DE FLUJO INTERMEDIO

Se relaciona a un recorrido es más profundo que la de un flujo local, puede pasar el límite de descarga a una cuenca topográficamente más baja, incluyendo dentro de su extensión la presencia de varios flujos locales, el agua tiene mayor concentración de sales disueltas, menor contenido de oxígeno



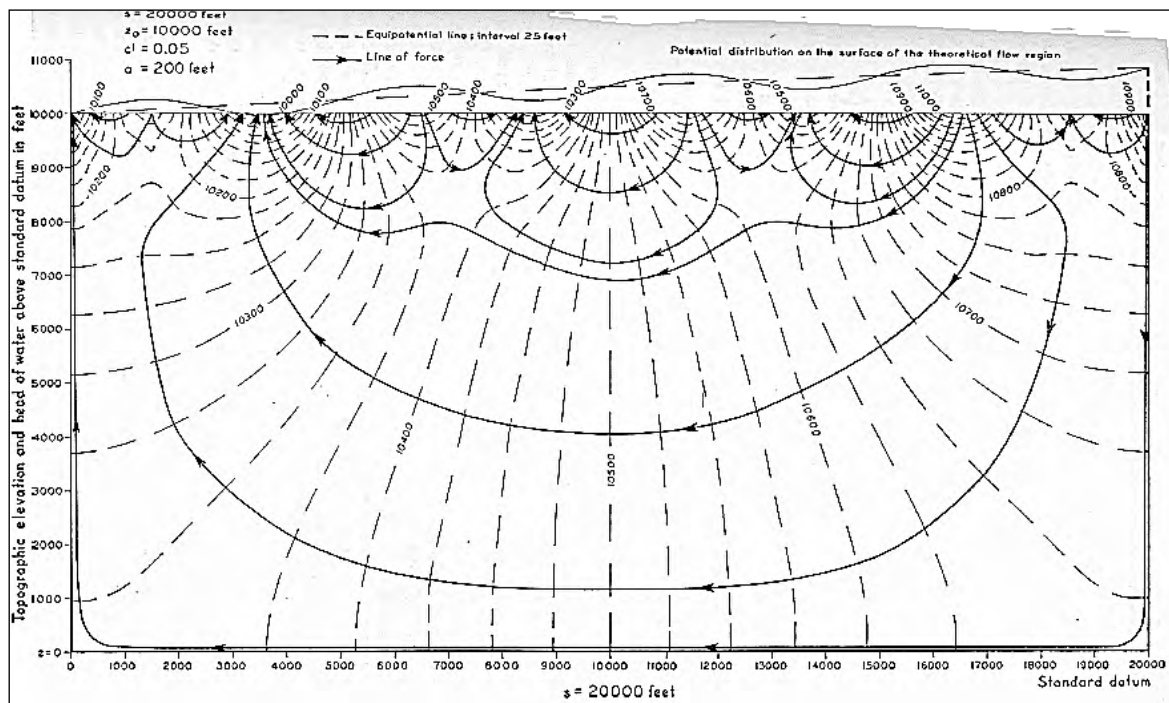
disuelto, mayor contenido de sólidos totales disueltos (STD), pH más alto, menor Eh con respecto al de un flujo local, una temperatura más elevada que la de un flujo local (Leyva et al., 2010).

Este sistema se diferencia con la de flujo local porque presenta movimiento vertical descendente del agua con mayores gradientes hidráulicos, el flujo lateral se lleva a cabo a mayor profundidad y mayor distancia (Figura 18 y 19). El movimiento del agua vertical ascendente tiene mayor velocidad (Hergt, 2009) y (Peñuela Arévalo, 2007).

1.17.3.12.6. SISTEMA DE FLUJO REGIONAL

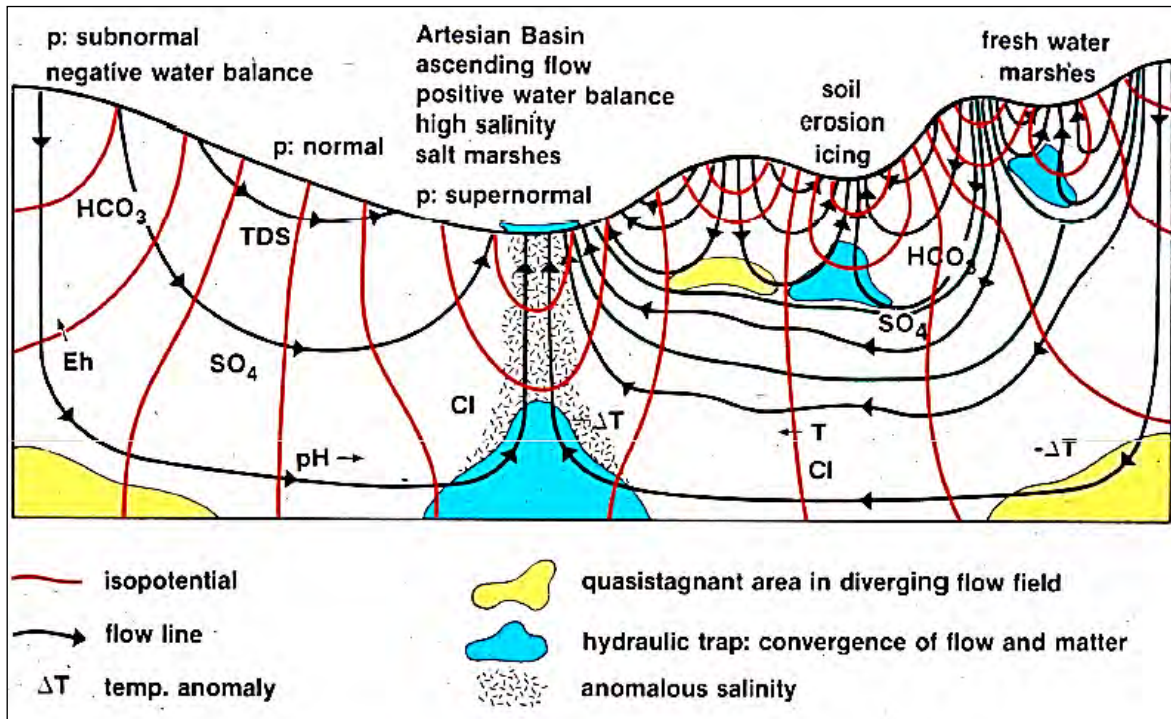
Se define como aquel flujo que circula a mayor profundidad a comparación de un flujo local e intermedio, iniciando en los terrenos de mayor altitud y finalizando en las zonas más bajas donde descarga, por lo que se pueden encontrar varios sistemas de flujo local sobre éste y al menos uno de tipo intermedio (Figura 18 y 19). Las características químicas específicas del agua de este flujo incluyen un alto contenido en sales disueltas, bajo contenido de oxígeno disuelto, pH alto tendiendo a ser más alcalino, Eh negativo, alta temperatura (Hergt, 2009 y Peñuela, 2007). Según Leyva et al., (2010), los flujos se separan por la densidad como consecuencia de su temperatura y el contenido químico. Pero también existen mezclas de los sistemas de flujo sobre todo durante la extracción del agua en los pozos perforados a una profundidad límite donde se encuentran en zonas de contacto entre dos sistemas de flujo diferentes o si existe una conexión hidráulica en un sistema acuífero. En la Figura 18 y 19, puede verse un esquema simplificado de la distribución de los sistemas de flujo subterráneo que se describió anteriormente.

Figura 18 Muestra las distribuciones de flujos obtenidos mediante ecuaciones



Fuente: Tóth (1963).

Figura 19 Sistemas de los flujos de agua subterránea



Fuente: Tóth (1999).

1.17.3.13. MODELACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

La modelación hidrogeoquímica, es la reproducción simplificada de la realidad, en donde se aplican los principios fisicoquímicos para interpretar la dinámica del sistema. La composición química del agua subterránea se origina ante diversos procesos hidrogeoquímicos; tales como, el intercambio iónico, reacciones ácido-base, procesos de oxidación-reducción, disolución, precipitación, procesos de mezcla, reducción bacteria y degradación (Bustamante, 2017)

Una forma de conocer los procesos hidrogeoquímicos es mediante la aplicación de los modelos numéricos, quienes proporcionan información detallada acerca de su origen, interacción agua-roca y patrones de flujo (Hidalgo y Cruz, 2001).

La modelación consiste en utilizar los datos de caracterización del sistema: mineralogía, composición de gases, datos isotópicos, fisicoquímicos para intentar determinar que reacciones han ocurrido a lo largo de la trayectoria y tiempo de residencia del agua subterránea con su medio geológico (Fagundo y Gonzáles, 2005).

Existen dos tipos de modelos para describir reacciones hidrogeoquímicas: modelos directos y modelos inversos, donde para el presente trabajo se incidirá en trabajar con el siguiente modelo:

- Modelación directa

Esta modelación predice la composición del agua y la transferencia de masa, que puede resultar de reacciones químicas hipotéticas, en respuesta a procesos naturales y perturbaciones del sistema. (Fagundo y Gonzáles, 2005).



La evaluación cuantitativa de la interacción química agua-roca, en ambos métodos, se basa en la utilización de un modelo de especiación y transferencia de masa, que calcula las concentraciones de todas las especies en solución (iones libres, pares de iones y compuestos de coordinación), sus actividades y coeficientes de actividad; es decir, consideran que las soluciones acuosas no son ideales (reales), calculando la actividad de los iones individuales a partir de la teoría de Debye – Hückel (Fagundo y Gonzáles, 2005).

Como resultado de esta modelación, se definen los índices de saturación (SI), respecto a los minerales de interés. Los índices de saturación permiten pronosticar la evolución de la solución acuosa, debido a procesos de interacción agua-roca (disolución o precipitación) mediante la siguiente ecuación:

En ese sentido, según Bustamante (2017) precisa que los resultados de la modelación definen IS, respecto a los minerales de interés, es decir, los IS permiten pronosticar la evolución de la solución acuosa, debido a procesos de interacción agua-roca (disolución o precipitación) mediante la siguiente ecuación:

$$IS = \log\left(\frac{IAP}{K}\right)$$

Donde:

- IAP: corresponde al producto de actividad iónica
- K: corresponde a la constante de equilibrio del constituyente

Según Appelo y Postma (1996), los valores de IS se clasifican de la siguiente forma:

- SI = 0, se considera que el sistema se encuentra en equilibrio de saturación (Bustamante, 2017).
- SI < 0, el sistema se encuentra en condiciones de subsaturación, es decir en disolución (Bustamante, 2017).
- SI > 0, el sistema se encuentra en condiciones de sobresaturación, es decir, en precipitación (Bustamante, 2017).

1.17.3.14. PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

Nuestros datos deben ser de calidad apropiada, representativos y la técnica de la medición para obtener los "números" debe tener la precisión adecuada. Este punto se dirige hacia la evaluación rigurosa de datos cuantitativos encontrados en la prospección de sedimentos de escorrentía, dando énfasis al uso de métodos estadísticos, las que presentan técnicas relativamente simples combinadas con una progresión sistemática, donde las interpretaciones obvias saldrán a través del análisis riguroso de datos por las metodologías relativamente simples (Vasquez, 2009).

En algunos casos no será necesario o deseable continuar a los procedimientos interpretativos complicados, pues en la estadística no importa qué métodos complejos se utilicen, es bien entender las variables individuales, sus histogramas (funcionamiento de la densidad de probabilidad) y la magnitud que pueden usarse los métodos simples para entender la importancia de estas variables. Semejante comprensión lleva a un nivel más alto de confianza, para entender los métodos multivariados que podría ser el caso por otra parte (Vasquez, 2009).



Según Martínez et al. (2005), este punto se basa en las medidas de (1) la tendencia central, (2) la dispersión, (3) coeficientes de distribución, (4) diagramas estadísticos, (5) coeficientes de correlación y (6) análisis multivarial.

1.17.3.14.1. MEDIDA DE TENDENCIA CENTRAL

A. Media aritmética

La medida de tendencia central es también llamada promedio, este valor resulta de sumar los valores de todas las observaciones y dividir la sumatoria entre el total de ellas (Lillo, 2025).

$$X = \frac{X1 + X2 + X3 + \dots + Xn}{n}$$

B. Media geométrica

Es la raíz enésima del producto de los valores de una serie. La media geométrica es un estadígrafo que no se deja influenciar mucho por los altos o bajos erráticos, por lo tanto, es mucho más representativo de las poblaciones examinadas (Martínez et al., 2005).

$$X = \sqrt{X1.X2.X3 \dots Xn}$$

C. Mediana

Es el valor de la variable que divide el total de las "n" observaciones debidamente ordenadas en dos partes de igual tamaño. Esto significa que a uno o al otro lado de este valor mediano se encuentra no más del 50% del total de las observaciones. Es única, fácil de calcular y los valores extremos no afectan su valor (Martínez et al., 2005).

D. Moda

Valor más frecuente en el conjunto. La moda puede no existir e incluso si existe puede ser única (Martínez et al., 2005).

E. Cuartiles

Los cuartiles son estadígrafos de posición que dividen al total de las observaciones, debidamente ordenadas, en cuatro partes de igual tamaño. Sirve para describir el 50% central de las observaciones y en la elaboración del gráfico de caja (Martínez et al., 2005).

F. Percentiles

Los percentiles son estadígrafos de posición donde 99 valores dividen a un conjunto de datos en 100 partes iguales, indicando el porcentaje de la distribución igual o menor a su valor. El percentil 95 es utilizado para determinar anomalías geoquímicas cuando tenemos una distribución errática (Martínez et al., 2005).



1.17.3.14.2. Medidas de Dispersión

Estos parámetros miden la variabilidad de un conjunto de datos.

A. Rango

Corresponde a la diferencia entre el mayor y el menor de nuestras observaciones, claramente influenciado por valores extremos (Vasquez, 2009).

$$\text{Rango} = \text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo}$$

El intervalo de una clase es la amplitud dividida entre el número de clases (Vasquez, 2009).

$$\text{Intervalo} = (V_{\max} - V_{\min}) / N^{\circ} \text{ de clases.}$$

B. Varianza

Es la medida que cuantifica la variabilidad de los datos respecto al valor de la media. Si los valores están muy concentrados las desviaciones respecto a la media serán muy pequeños y en consecuencia también sus cuadrados, se evita que las desviaciones positivas se compensen con las negativas. Pero desde este punto de vista, la varianza tiende a exagerar los verdaderos valores respecto a la media, bajo esta alternativa para medir la dispersión y que atenúe dicho efecto se utiliza la desviación estándar (Vasquez, 2009).

$$s^2 = \frac{\sum (X - x)^2}{n - 1}$$

C. Desviación Estándar

Es la raíz cuadrada positiva de la varianza. Mide la variabilidad de los datos en las unidades en que se midieron originalmente, sirve para definir la dispersión de los datos alrededor de la media. Es el valor crítico necesario para establecer las variaciones locales, regionales y las posibles anomalías. La desviación estándar puede ser distinta en ambientes que tengan la misma media. Según la estadística clásica, en una población normal, el 68.26% de la población tendrá valores entre $X + s$, el 95.44% valores entre $x + 2s$, y el 99.74% valores entre $x + 3s$. Esto quiere decir que, en una medida, estos porcentajes son exactos solamente cuando la población sigue la distribución normal perfecta. En caso que tenga una ligera asimetría los porcentajes serán aproximados (Vasquez, 2009).

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X - x)^2}{n - 1}}$$

D. Rango Intercuartílico

Es la diferencia entre el tercer cuartil y el primero El rango intercuartílico puede considerarse como una alternativa de la desviación típica para calcular la dispersión de los elementos (Vasquez, 2009).

$$R.I = (Q3 - Q1)$$



E. Coeficiente de Variación

Se usa para comparar la variabilidad entre dos o más muestras medidas en las mismas unidades o no, es decir es más homogénea o presenta menos discrepancia aquella distribución que tiene el menor coeficiente de variación. o Una distribución puede considerarse como Gaussiana o normal si el coeficiente de variación es menos a 0.5, en caso contrario indicaría un carácter log-normal.

1.17.3.14.3. COEFICIENTES DE DISTRIBUCIÓN

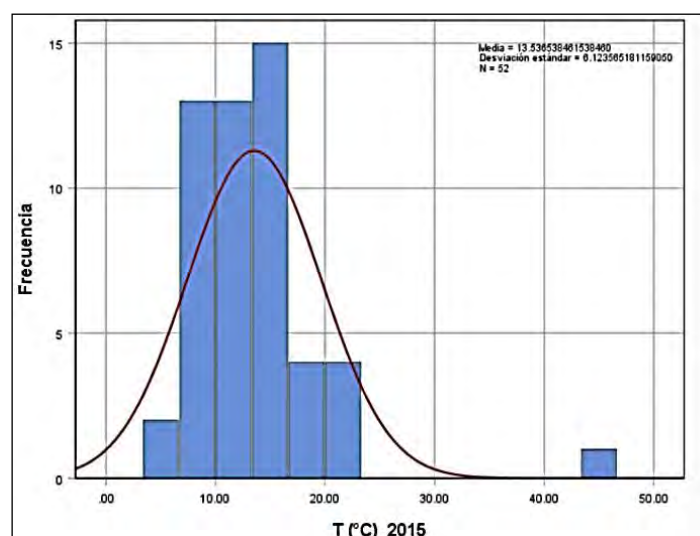
A. Curtosis

Se define como una distribución relacionada con la media, lo que significa que el valor de los coeficientes es cero si las variables son normales. De manera similar, los valores mayores que cero indican que la distribución tiende a estar más concentrada alrededor de la media que una distribución normal, mientras que los valores menores que cero indican que tienden a estar sesgados (Vasquez, 2009).

B. Asimetría

Es una medida de la simetría de la distribución de valores respecto de la media. Un valor mayor que cero indicaría una mayor desviación de la media en valores más altos (asimetría positiva), mientras que un valor menor que cero indicaría una mayor desviación de la media en valores más bajos (asimetría negativa). Trazar la distribución geoquímica del entorno natural en una escala lineal da como resultado curvas de asimetría positivas y negativas (Figura 20), siendo el primer caso el más común en nuestro estudio. Sin embargo, si la distribución de la misma población se traza en ordenadas en una escala lineal en función de los valores geoquímicos en una escala logarítmica medida en abscisas, la curva resultante será aproximadamente simétrica, en forma de campana, pero aprox. promedio. En lugar de la media aritmética de la distribución normal, se trata de un proceso de "ventana" (Vasquez, 2009).

Figura 20 a) Sesgo positivo, b) Sesgo negativo.



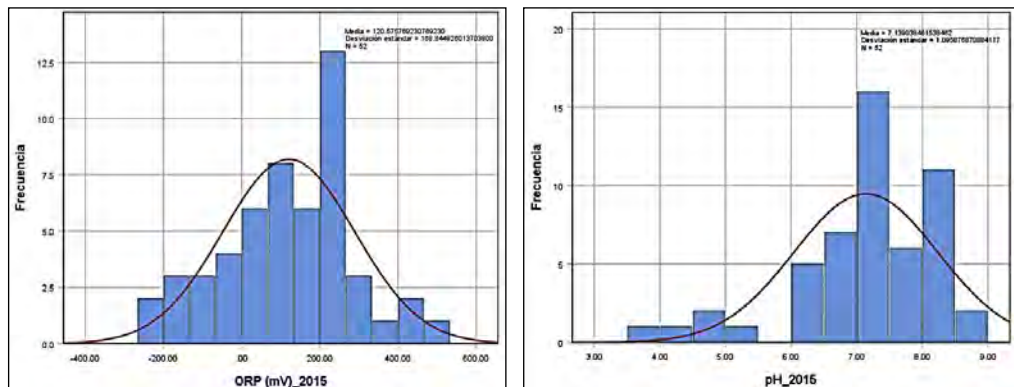
Fuente: Elaboración propia.

1.17.3.14.4. Diagramas Estadísticos

A. Histogramas

Divide el conjunto de datos en una serie de intervalos y representan bajo la forma de un histograma de frecuencias, la similitud con una curva Gaussiana (Figura 21)., induciendo que esta tiene un comportamiento normal.

Figura 21 Distribución normal de los parámetros fisicoquímicos, temporada de estiaje.



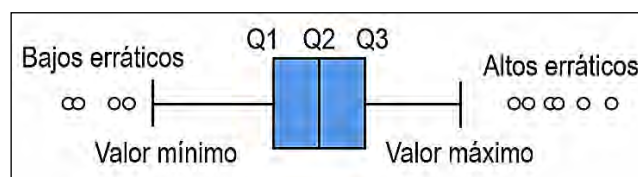
Fuente: Elaboración propia.

La base para los estudios estadístico - geoquímicos es la preparación de un histograma de frecuencias relativa, denominado como una distribución. No obstante, en geoquímica la experiencia nos muestra que hay relativamente pocos casos de distribución normal, por ejemplo, el escandio en sedimentos silicoclásticos y terbio en sedimentos calcáreos (Figura 2.4. a, b). Sin embargo, la distribución en sedimentos fluviales para una población natural se aproxima más a la distribución log normal (Vasquez, 2009).

B. Diagrama de Cajas (Boxplot)

Según Martínez et al. (2005), es un gráfico que nos sirve para distinguir cómo están distribuidas las observaciones (distribución sesgada a la derecha o izquierda), comparación de la dispersión de dos o más conjuntos de datos y si existen valores extremos que afectan a la distribución (Figura 22).

Figura 22 Diagrama de cajas.



Fuente: Elaboración propia.

Donde la Figura 22, muestra los límites superior e inferior de la caja corresponden a los cuartiles primero (Q1) y tercero (Q3) respectivamente, en consecuencia, la altura de la caja coincide con el rango intercuartílico (RI). La línea horizontal dentro de la caja corresponde al segundo cuartil Q2, denominado también mediana (Vasquez, 2009).



En el caso de que un valor diste de los límites inferior y superior de la caja más de 1.5 veces el rango intercuartílico, el valor se le denomina fuera de rango y se le representa por el símbolo "o" y por "x" si los valores son superiores a tres veces la longitud de la caja o rango intercuartílico, llamados valores extremos o erráticos. Este gráfico es muy utilizado no sólo para encontrar altos y/o bajos erráticos, sino que ayuda a comparar diferentes modelos de subconjunto de datos. Esta comparación de sistemas de datos es muy simple pero excepcionalmente eficiente para ver semejanzas y diferencias en la distribución de las poblaciones trabajadas "Distribución Litocronológica" (Vasquez, 2009).

1.17.3.15. ANÁLISIS MULTIVARIABLE

El análisis multivariante es un conjunto de métodos estadísticos y matemáticos, cuyo objetivo es describir e interpretar los datos que provienen de la observación de diferentes variables estadísticas (, donde considera su relación existente entre ellas (Miranda, 2015).

A. Correlación

Según Miranda (2015), es una herramienta estadística que se aplica para describir el grado de relación entre dos parámetros analizados, cuyo valor se mueve en un intervalo entre -1 y 1, en donde, -1 son las relaciones inversas y 1 las perfectamente lineales. Podemos definir que, un alto coeficiente de relación, con valores cercanos a 1 (o -1, correlación inversa), indica una buena relación entre las dos variables, por el contrario, un valor próximo a cero indica una ausencia de relación. Para obtenerla se calcula de la siguiente manera:

μ_a, μ_b medias de variables A y B

σ_a, σ_b desviaciones estándar de las variables A y B

n número de mediciones de (A,B)

- Covarianza:

$$\sigma_{a,b}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - \mu_a)(b_i - \mu_b)$$

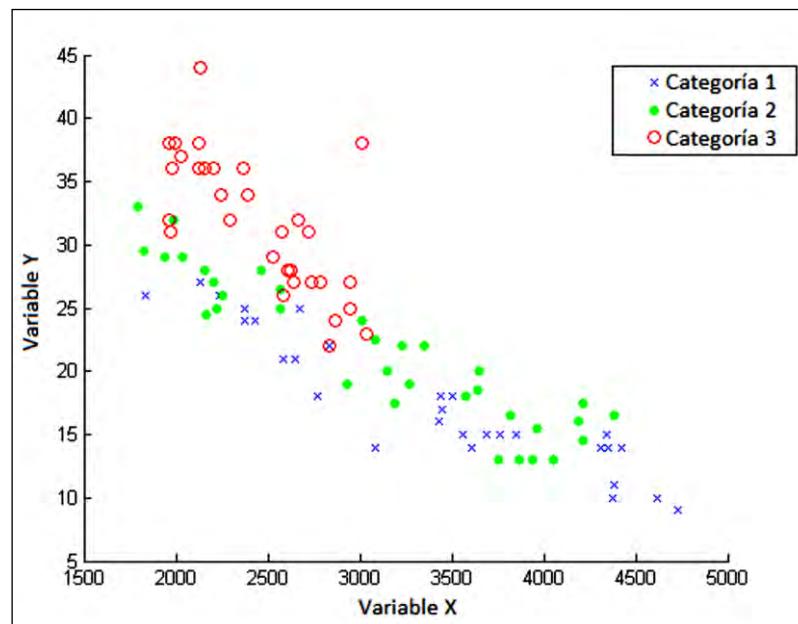
- Correlación:

$$\rho_{a,b} = \frac{\sigma_{a,b}^2}{\sigma_a \sigma_b}$$

B. Gráfico de dispersión

Permiten comparar las muestras para dos variables y los valores que toman. De esta forma, es posible identificar gráficamente dependencias entre los valores de dos variables y encontrar tendencias lineales, cuadráticas o de otro tipo. La Figura 23, se aprecia un gráfico de dispersión para dos variables x e y, incluyendo información categórica (Miranda, 2015).

Figura 23 Gráfico de dispersión



Fuente: Miranda (2015).

C. Clustering (agrupamiento)

Según Miranda (2015), los análisis exploratorios de datos son de poca ayuda al momento de entender la compleja naturaleza de las relaciones multivariadas. El clustering usa medidas de similitud para contabilizar la distancia en semejanza de las variables y/o mediciones, realizando grupos entre ellos. A diferencia de la clasificación, los grupos no se conocen de antemano y tienen que ser descubiertos durante el análisis. Las herramientas de clustering se pueden agrupar en dos grandes familias las cuales son:

- Métodos de clustering jerárquicos

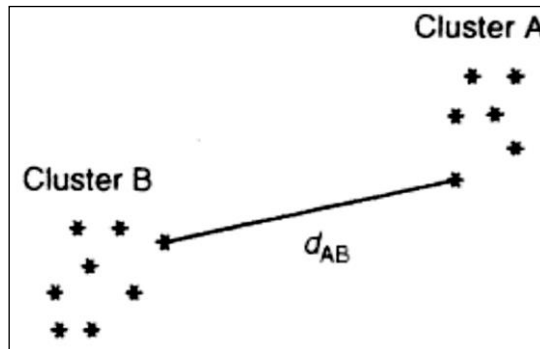
Es muy difícil relacionar todos los posibles grupos de puntos y variables, siendo esta clase de clustering una manera de obtener resultados razonables (Miranda, 2015)..

- Métodos aglomerativos

Comienzan con un solo dato y luego van siendo añadidos los más cercanos convergiendo a grupos más grandes (Figura 24, 25 y 26).

- **Single linkage:** son ordenados de acuerdo a la distancia a sus miembros más cercanos (mínima distancia).

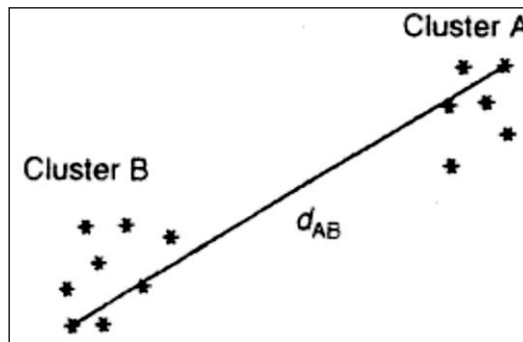
Figura 24 Single linkage



Fuente: Miranda (2015)

- Complete linkage: son ordenados con respecto a la más alejada (máxima distancia).

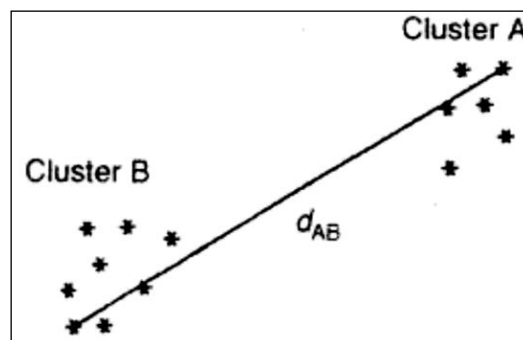
Figura 25 Single linkage



Fuente: Miranda (2015)

- Average linkage: son ordenados de acuerdo a la distancia promedio.

Figura 26 Average linkage



Fuente: Miranda (2015)

En la mayoría de los métodos de clustering las fuentes de error no están formalmente consideradas en los métodos jerárquicos, significando que estos métodos son muy sensibles a outliers. En clúster jerárquicos no existe una reacomodación de los objetos que han sido agrupados incorrectamente en etapas tempranas, por lo cual la configuración final debe ser cuidadosamente examinada para ver su sensibilidad.



Es buena idea tratar con distintos métodos de clustering, y diferentes tipos de distancias. Si los métodos son consistentes entre ellos, puede ser que sean casos de clustering natural (Miranda, 2015). La estabilidad de las soluciones jerárquicas, puede ser revisada aplicando los algoritmos de clúster antes y después de que los pequeños errores han sido removidos. Si los grupos son muy bien distinguibles, ambos modelos de clustering deberían ser acordes. Los valores iguales de similitud o de matriz de distancia, pueden producir múltiples soluciones correspondientes a diferentes maneras de tratarlas, lo cual no implica que esté necesariamente erróneo. Conociendo su existencia, se podrá interpretar apropiadamente comparando con sus pares (Miranda, 2015).

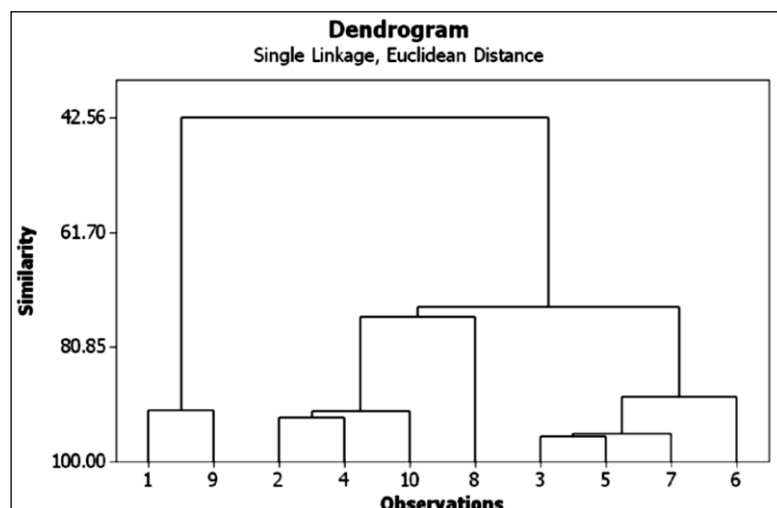
- **Análisis de Componentes Principales (Dendrograma)**

Un dendrograma es un tipo de representación gráfica o diagrama de datos en forma de árbol usada usualmente en métodos de aglomeración jerárquicos tal como se muestra en la Figura 27. Cada combinación es representada por una línea horizontal. El eje de la ordenada representa el grado de similitud de los grupos que se han fusionado, llamando a esta similitud de combinación (Miranda, 2015).

Por otra parte, según Condori (2016), este análisis consiste en determinar a partir de un número establecido de muestras, cuáles son la que guardan cercanía entre ellas (Hussain et al., 2008). Para evaluar la cercanía se estudian n número de parámetros, cada uno de ellos forma un eje o dimensión representado como un plano. Estos planos pueden ser evaluados en su conjunto a través de distancias numéricas (como las Euclidianas). Dichas distancias numéricas se obtienen al procesar estadísticamente los valores de los parámetros a evaluar (Guler et al., 2002).

Los análisis estadísticos de los datos pueden realizarse con programas computacionales (Xlstat 1.1, R Studio, Phyton, SPSS Statistics 25 y Minitab 18). Los resultados de los análisis generalmente se muestran en forma de dendogramas, los cuales son gráficos en los que se agrupan las muestras acordes al índice de similitud entre ellas (Silliman et al., 2007). Estos gráficos permiten evaluar de forma visual cuáles son las muestras más parecidas ó las que tienen una mayor diferencia. El Dendrograma de la Figura 27, muestra que el eje Y se presenta el índice de similitud, mientras que en el eje X se presentan las muestras, de esta manera se pueden observar algunos agrupamientos (Miranda, 2015).

Figura 27 Ejemplo de Dendrograma.



Fuente: Miranda (2015).



1.17.3.16. GLOSARIO HIDROGEOLÓGICO

Las terminologías se extrajeron de FCHIS (2009), así como de otros autores citados, por lo cual se analiza y sintetiza los vocablos siguientes:

- **Adsorción:** fijación de solutos en la capa límite de agua que rodea la superficie del sólido. Puede tener lugar por diferentes mecanismos en función de la fuerza que atrae el soluto a la superficie del sólido (a) físico, mediante fuerzas de van der Waals; (b) electrostático, por una superficie de carga opuesta y (c) de enlace químico (FCHIS, 2009).
- **Agua dulce:** agua que posee menos de 0.5 gramos de sales disueltas por litro (FCHIS, 2009).
- **Agua salada:** agua con más de 30 gramos de sales disueltas por litro (FCHIS, 2009).
- **Agua salobre:** agua que posee entre 0.5 y 30 gramos de sales disueltas por litro. Puede resultar de la mezcla de agua dulce con agua de mar, o encontrarse como agua de origen fósil en ciertos acuíferos asociados con rocas salinas (FCHIS, 2009).
- **Acuífero:** formación geológica que almacena agua y que es capaz de transmitirla de manera que puede ser aprovechada como recurso. El agua de superficie se infiltra a través del suelo hasta encontrarse con una capa impermeable; entonces se acumula y llena los poros y fisuras de las rocas dando lugar a una zona de saturación. El agua subterránea puede brotar de modo natural (manantiales o fuentes) o ser extraída mediante pozos u otros elementos de captación. Las características fundamentales de un acuífero son la baja velocidad en el movimiento del agua subterránea, los grandes volúmenes de reservas y el gran tiempo de renovación del agua en el sistema (FCHIS, 2009).
- **Acuífero artesiano:** acuífero cautivo donde sí se perfora la capa superior confinante el agua sale a la superficie sin necesidad de elementos externos de bombeo (FCHIS, 2009).
- **Acuífero confinado:** acuífero limitado en la parte superior por un techo impermeable, de manera que el agua se encuentra a presión superior a la atmosférica en todos los puntos. Cuando una perforación llega al techo del acuífero el agua sube por el tubo hasta que se estabiliza a una profundidad correspondiente a su nivel piezométrico. La recarga a estos acuíferos se produce lateralmente (FCHIS, 2009).
- **Acuífero libre:** acuífero no limitado en la parte superior por un techo impermeable, de manera que existe un nivel freático a una cierta profundidad. Cuando una perforación alcanza este nivel aparece un volumen de agua libre. Estos acuíferos pueden recargarse desde la superficie mediante una fracción de la pluviometría o excedentes de riego (FCHIS, 2009).
- **Acuífero semiconfinado:** acuífero de tipo confinado que se diferencia de este en que se encuentra limitado en la parte superior por una formación geológica muy poco permeable pero que es capaz de producir recarga al acuífero (FCHIS, 2009).
- **Acuitardo:** formación geológica capaz de almacenar grandes volúmenes de agua, pero que la transmite con dificultad (FCHIS, 2009).
- **Balance iónico:** medida de la bondad de un análisis químico; consiste en la diferencia entre la suma de cargas positivas (equivalentes de cationes) y la de cargas negativas (equivalentes de aniones) de las sales disueltas, normalizada por la semisuma total de iones. Suele expresarse en tanto por ciento (FCHIS, 2009).
- **Capacidad de infiltración:** máxima cantidad de agua que puede absorber un suelo por unidad de tiempo, para unas condiciones iniciales determinadas (FCHIS, 2009).
- **Coeficiente de almacenamiento:** volumen de agua que se ha de inyectar por unidad de superficie de acuífero para que el nivel piezométrico aumente en una unidad. Es un parámetro adimensional. En un acuífero libre su valor es equivalente a la porosidad eficaz. En un acuífero confinado o semiconfinado corresponde a una combinación entre la porosidad, la compresibilidad del agua y la del esqueleto granular el suelo (FCHIS, 2009).



- **Conductivímetro:** aparato que permite medir la conductividad eléctrica del agua. Las unidades habituales son los Sm-1 (FCHIS, 2009).
- **Conductividad hidráulica:** propiedad tensorial del medio que refleja la capacidad del mismo a que el agua circule a través suyo. Una componente direccional de este tensor se define como el caudal que circula a través de una sección unitaria de un acuífero, bajo un gradiente hidráulico unidad. Este parámetro presenta una gran variabilidad natural, de manera que en una formación aparentemente homogénea sus valores pueden variar tres o cuatro órdenes de magnitud (FCHIS, 2009).
- **Dureza:** suma de las concentraciones del calcio y magnesio disueltos en el agua. Suele expresarse como una concentración equivalente de CaCO₂. Se manifiesta como la dificultad de que el agua con jabón forme espuma (FCHIS, 2009).
- **Nivel freático:** equivalente a nivel piezométrico para acuíferos libres. En el resto de acuíferos no está definido (FCHIS, 2009).
- **Nivel piezométrico:** energía total por unidad de peso del agua subterránea en un punto de un acuífero. La energía total es igual a la suma de la energía potencial más la presión intersticial; la energía cinética puede despreciarse debido a los valores de velocidad bajos habituales en las aguas subterráneas. Se mide en unidades de longitud y es igual a la cota que tendría el agua en un pozo perforado en este punto (FCHIS, 2009).
- **Permeabilidad:** capacidad de un suelo o roca para que un fluido cualquiera la pueda atravesar. Se mide en [L²], aunque en muchos casos se usa como término cualitativo.
- **Porosidad:** en una roca o un suelo es el cociente entre el volumen ocupado por fluidos o gases y el volumen total. Su medida se suele realizar en el laboratorio y en ocasiones se expresa en tanto por ciento (FCHIS, 2009).
- **Porosidad eficaz:** fracción de la porosidad total en la que los poros están interconectados. En un suelo con una buena conexión entre poros la porosidad eficaz y la total son muy similares. Se calcula en el laboratorio o en el campo, y puede variar con las condiciones del ensayo, e incluso en el tiempo, de modo que no es un parámetro bien definido (FCHIS, 2009).
- **Recarga:** proceso natural o artificial por la cual se produce la entrada de agua a un acuífero (FCHIS, 2009).
- **Red de flujo:** conjunto formado por las líneas equipotenciales y de flujo, que se disponen formando una figura gráfica que asemeja una red. Incorporan y permiten identificar las zonas de recarga y descarga. También permiten hacer cálculos de caudales y de tiempo de tránsito entre dos puntos (FCHIS, 2009).
- **Superficie freática:** superficie formada por los puntos de un acuífero donde la presión del agua subterránea se encuentra equilibrada con la atmosférica (FCHIS, 2009).
- **Testificación geofísica:** métodos de reconocimientos indirectos del terreno que se aplican en el interior de las captaciones verticales (FCHIS, 2009).
- **Transmisividad:** caudal que circula en un acuífero por unidad de amplitud bajo un gradiente unidad. En un acuífero homogéneo es igual al producto de conductividad hidráulica y el espesor de la zona saturada (FCHIS, 2009).
- **Zona de descarga:** superficie del terreno en la que se produce una salida de agua subterránea. La descarga puede ser puntual (fuente), lineal (río o mar), o extensa (FCHIS, 2009).
- **Zona de recarga o infiltración:** superficie del terreno en la que se produce la infiltración de agua a un acuífero. La recarga puede ser puntual (pozo de recarga), lineal (río) o extensa (FCHIS, 2009).



1.17.3.17. GLOSARIO HIDROGEOQUÍMICO

Los términos fueron extraídos de Amaya (2015), donde presenta las definiciones de las especies mayoritarias que determinan en gran medida el comportamiento químico de las aguas subterráneas, las cuales se describen a continuación:

- **Calcio:** Suele ser el catión principal por su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Proviene de rocas ígneas (constituyente esencial en feldespatos, piroxenos y anfíboles), de rocas sedimentarias (carbonatos, sulfatos o cemento intergranular en rocas detríticas), y en menor cantidad pueden provenir de la fluorita, del apatito, de la montmorillonita, y a menudo, aparece adsorbido en las superficies de minerales en rocas y suelos. Es moderadamente soluble a muy soluble y precipita fácilmente como CaCO_3 ; junto al Mg^{2+} contribuye a la dureza del agua. Su química está asociada a la de los iones CO_3H^- y CO_2 (Pinto, 2009).
- **Carbonatos y bicarbonatos:** Tanto el CO_3^{2-} como el CO_3H^- proceden, en parte, de la disolución del CO_2 atmosférico (gas) en agua de lluvia y de la incorporación del CO_2 del suelo al agua de infiltración. También, de la disolución de calizas y dolomitas potenciada por el aporte de CO_2 y ácidos orgánicos e inorgánicos. Además de la hidrólisis de silicatos (el CO_2 disuelto en agua, al aumentar el pH da lugar a iones CO_3^{2-} y CO_3H^-). Los carbonatos y bicarbonatos comunican alcalinidad al agua. No son oxidables ni reducibles en aguas naturales (Pinto, 2009).
- **Cloruros:** El cloro es el halógeno más difundido; muy soluble en agua; muy estable en disolución; difícilmente precipitable; no se oxida ni se reduce en aguas naturales; normalmente, aparece como Cl^- en aguas naturales; proviene de la meteorización de rocas ígneas, del lavado de rocas, de evaporitas, de procesos de contaminación puntual (Pinto, 2009).
- **Componentes nitrogenados:** La mayor parte del nitrógeno aparece como forma gaseosa en la atmósfera, aunque existe una fracción importante en suelos y sustancias orgánicas en forma oxidada. Puede aparecer en forma de NH_3 , NH_4^+ (estas dos últimas formas reducidas, son oxidadas con gran facilidad a N_2 , NO_2^- y NO_3^- ; fácilmente retenidos por el terreno por cambio de bases; suelen aparecer como trazas en aguas subterráneas, y si las cantidades son significativas, pueden ser indicadores de contaminación reciente). N_2 , NO_2^- y NO_3^- (es la forma más usual en que aparece en las aguas subterráneas; muy soluble y difícilmente precipitable; tiende a ser fijado biológicamente en suelos con vegetación). Debido a su estabilidad, puede encontrarse estratificado en acuíferos libres, con mayores concentraciones en las capas superiores (Pinto, 2009).
- **Magnesio:** Similar al calcio, pero más soluble y más difícil de precipitar. Su forma predominante es Mg^{2+} . Puede formar complejos como MgOH^+ , MgSO_4 o HCO_3Mg^+ . Junto al calcio contribuye a la dureza del agua. Proviene de minerales ferromagnesianos en rocas ígneas (olivinos, piroxenos, anfíboles, micas negras, etc.) y de minerales de alteración (clorita, montmorillonita, serpentina, etc. (Pinto, 2009).
- **Potasio:** El potasio tiene una solubilidad muy alta, es difícilmente precipitable, y muy abundante en la corteza, pero escaso en el agua al ser fijado por las arcillas. Procede de rocas ígneas (en feldespatos, biotitas y moscovitas), de procesos de hidrólisis de silicatos, de depósitos de evaporitas, de actividades agrícolas (uso intensivo de fertilizantes), o por actividades industriales (Pinto, 2009).
- **Sílice:** A pesar de que el silicio es el segundo elemento abundante en la corteza terrestre, la baja solubilidad de los compuestos silicatados determina su inclusión en quinto o sexto lugar entre los constituyentes mayoritarios de las aguas. La mayor parte está en forma de H_4SiO_4



en parte disuelta y en parte coloidal y sólo una pequeña parte ionizada (Amaya, 2015). No proviene de la disolución del cuarzo, dada su lentitud de meteorización; proviene principalmente de la meteorización química (hidrólisis) de feldespatos o silicatos en general, que se transforman en minerales de la arcilla y otros productos de descomposición en la zona edáfica (Pinto, 2009).

- **Sodio:** Es el alcalino más abundante. Suele ir asociado al ión Cl⁻. Es un buen indicador de aguas blandas. Dada su alta solubilidad, tiene tendencia a permanecer en solución y no precipitar. Su forma predominante es el Na⁺. A altas concentraciones forma complejos como NaCO₃⁻, NaHCO₃, NaSO₄⁻, etc. (Amaya, 2015). Proviene de rocas ígneas (componente mayoritario), de la meteorización de silicatos, relacionado con rocas sedimentarias y con depósitos evaporíticos, en rocas detríticas, aporte de agua marina en regiones costeras, reciclaje de riegos, contaminación urbana, etc. (Pinto, 2009).
- **Sulfatos:** A 25 °C y 1 atm, las formas estables del azufre, son SO₄²⁻, HSO₄⁻, S, HS⁻, H₂S y S₂-aunque generalmente aparece en estado de máxima oxidación (SO₄²⁻); en medios reductores, con abundante materia orgánica, puede sufrir reducción bacteriana de SO₄²⁻ a HS⁻. El ión SO₄²⁻ es moderadamente soluble a muy soluble; es muy difícilmente precipitable. Proviene de la disolución del yeso y de la anhidrita, del lavado de terrenos formados en ambientes muy áridos, y de la oxidación de sulfuros (Pinto, 2009).

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

Partes por millón (ppm): Es la cantidad de soluto expresada en miligramos disuelta en 1 kilogramo de solvente. En la ecuación siguiente se muestra la fórmula para transformar fracción peso (*w*) a partes por millón, en donde *w* es el número de gramos de soluto y *w₀* el número de gramos de solvente. Al ser el agua el solvente mayoritario y al tratarse de soluciones diluidas, la densidad de dichas soluciones es aproximadamente igual a la densidad del agua pura, esto es ($\rho_{soln} = \rho_{H_2O} = 1.00 \text{ g/cm}^3$).

$$ppm = \frac{w}{w + w_0} * 100\%$$

- **Molaridad (M):** Es la forma más frecuente de expresar la concentración de las disoluciones en química. Indica el número de moles de soluto disueltos (*n*) por cada litro de disolución (*V*) (Amaya, 2015). Matemáticamente se describe como:

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

Es importante recordar que el número de moles (*n*) en gmol es igual a la masa en gramos entre el peso molecular de la sustancia (Amaya, 2015).

- **Miliequivalentes por litro (meq/L):** Un miliequivalente es la unidad de masa que representa a la mínima unidad equivalente que puede reaccionar con otra sustancia químicamente compatible (Amaya, 2015):

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



CAPÍTULO II ASPECTOS GENERALES

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

La microcuenca del río Crucero se ubica en la parte alta de la cuenca del río Tambo, entre los departamentos de Moquegua y Puno, localizada hacia el Sur del Perú a 25 km del centro poblado de Ichuña (Figura 28). La zona de estudio tiene un área de 447 km², involucra los cuadrángulos de Huaitire (34-v), Mazo Cruz (34-x) y Tarata (35-v) (Zavaleta, 2018).

La microcuenca Crucero, se encuentra situada en las coordenadas:

Latitud: 16° 8'59.42" - 16°25'3.91" sur
Longitud: 70°28'7.11" - 70°24'7.38" oeste

2.2. ACCESIBILIDAD

Teniendo en consideración como referencia la ciudad de Lima, se realiza por los siguientes medios:

Vía terrestre:

- Lima – Arequipa – Imata – Ichuña – Crucero (1315 km, 23 horas).
- Lima – Arequipa – Yalagua – Ichuña (1292 km, 25 horas).

Vía aérea y terrestre:

- Área: Lima – Arequipa (1017 km, 1 hora).
- Terrestre: ruta primaria Lima – Arequipa – Imata – Ichuña – Crucero (298 km, 5 horas).
- Terrestre: ruta secundaria Lima – Arequipa – Yalagua – Ichuña (275 km, 6 horas).

2.3. HIDROGRAFÍA

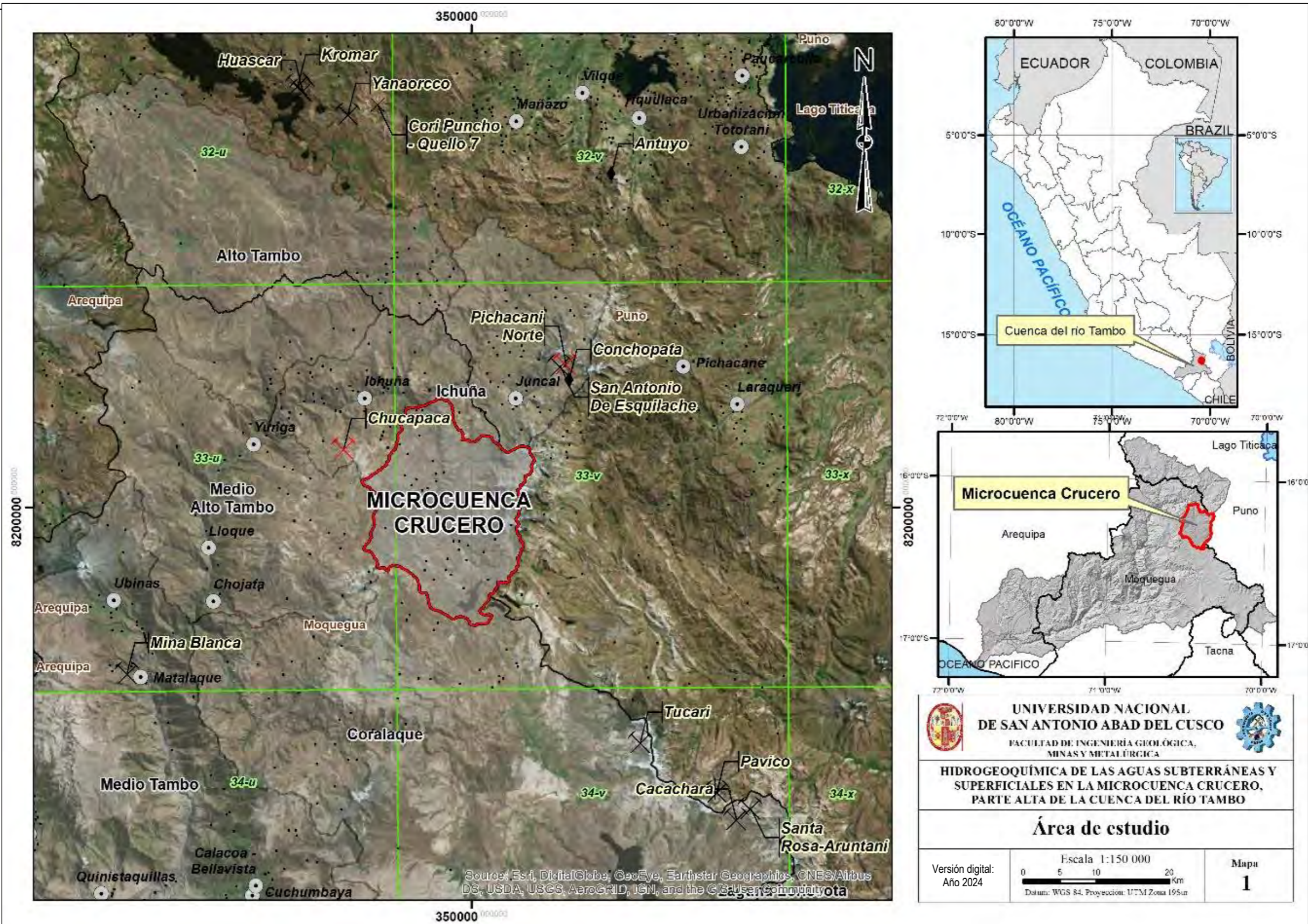
La microcuenca del río Crucero (Figura 29), se encuentra en la subcuenca del río Ichuña, y esta subcuenca a su vez pertenece a la cuenca del río Tambo. El área de estudios se encuentra delimitado por las siguientes unidades hidrográficas.

- Norte: Microcuenca San Antonio y subcuenca Alto Tambo
- Sur: Subcuenca Medio Alto Tambo
- Oeste: Subcuenca Medio Alto Tambo
- Este: Cuenca Llave



Figura 28

“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”

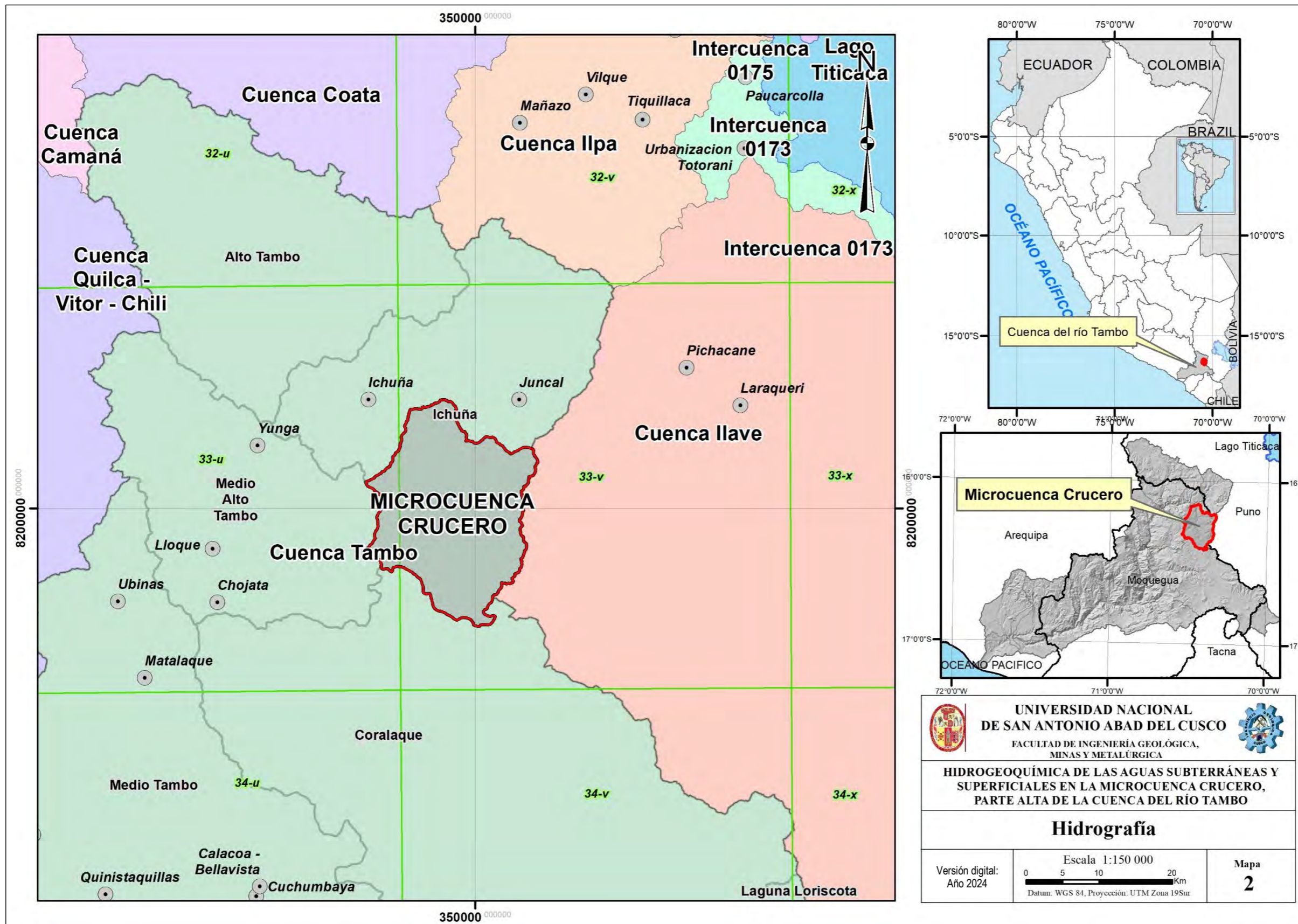


Fuente: Elaboración propia.



“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES

Figura 29 Mapa hidrográfico de la MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



Fuente: Elaboración propia.



2.4. CLIMA

Las características climáticas del Perú son peculiares por su extensión y relieve topográfico, la descripción climática se muestra en el mapa temático (Figura 30). La información climática de esta clasificación está sustentada en la información meteorológica de aproximadamente veinte años (1965 – 1984), con el cual se procedió a formular los índices climáticos y el trazado de las zonas de acuerdo a la clasificación de climas de Charles Werren Thornthwaite (SENAMHI, 2018). Según la “Clasificación Climática de Thornthwaite”, se presentan dos tipos de climas en la zona de estudio estos son:

- **Clima Lluvioso Semi-frío - B(o,i) D´ H3:** Está controlada por una precipitación lluviosa, temperatura semi-frío y húmedo. Es característico en general a lo largo de la microcuenca Crucero, se puede observar en mayor preponderancia hacia la parte alta, media y en menor proporción en la parte baja colindante al centro poblado de Crucero (Figura 30). Este clima se caracteriza por extenderse entre los 3500 y 6000 m.s.n.m. (SENAMHI, 2018), lo cual explica tener mayor predominio climático para la microcuenca Crucero. Así mismo, presenta precipitaciones anuales en promedio de 700 mm., temperaturas medias de 7° C y nieves perpetuas en alta montaña. Presenta veranos lluviosos e inviernos secos con heladas moderadas (SENAMHI, 2018).
- **Clima Semi-seco Frío – C(o,i,p) C´ H2:** Tiene una precipitación semi-seco, temperatura frío y humedad seca, es característico hacia la parte baja de la microcuenca Crucero “Valle”. Este clima va desde los 3000 y 4000 m.s.n.m. Se caracteriza por tener precipitaciones promedio de 700 mm, temperatura media anual de 12° C, mientras que los veranos lluviosos e inviernos secos se realizan con fuertes heladas (SENAMHI, 2018).

2.5. VEGETACIÓN

El Perú es uno de los países con mayor diversidad de ecosistemas del mundo, los cuales se caracterizan por su gran complejidad vegetal, climática, geomorfológica y edáfica. La flora y vegetación se encuentran representadas por variedad de formas de vida vegetal distribuidas en paisajes que van desde las llanuras desérticas y semidesérticas, así como las llanuras aluviales con bosques lluviosos, hasta los paisajes colinosos y montañosos (MINAM, 2015). El criterio se basó en a dividir las grandes regiones naturales en ámbitos menores como son las provincias de humedad, definidas en el Diagrama Bioclimático para la Clasificación de Zonas de Vida en el Mundo, propuesto por L. R. Holdridge (Mapa Ecológico del Perú, 1975). Las provincias de humedad se definen por:

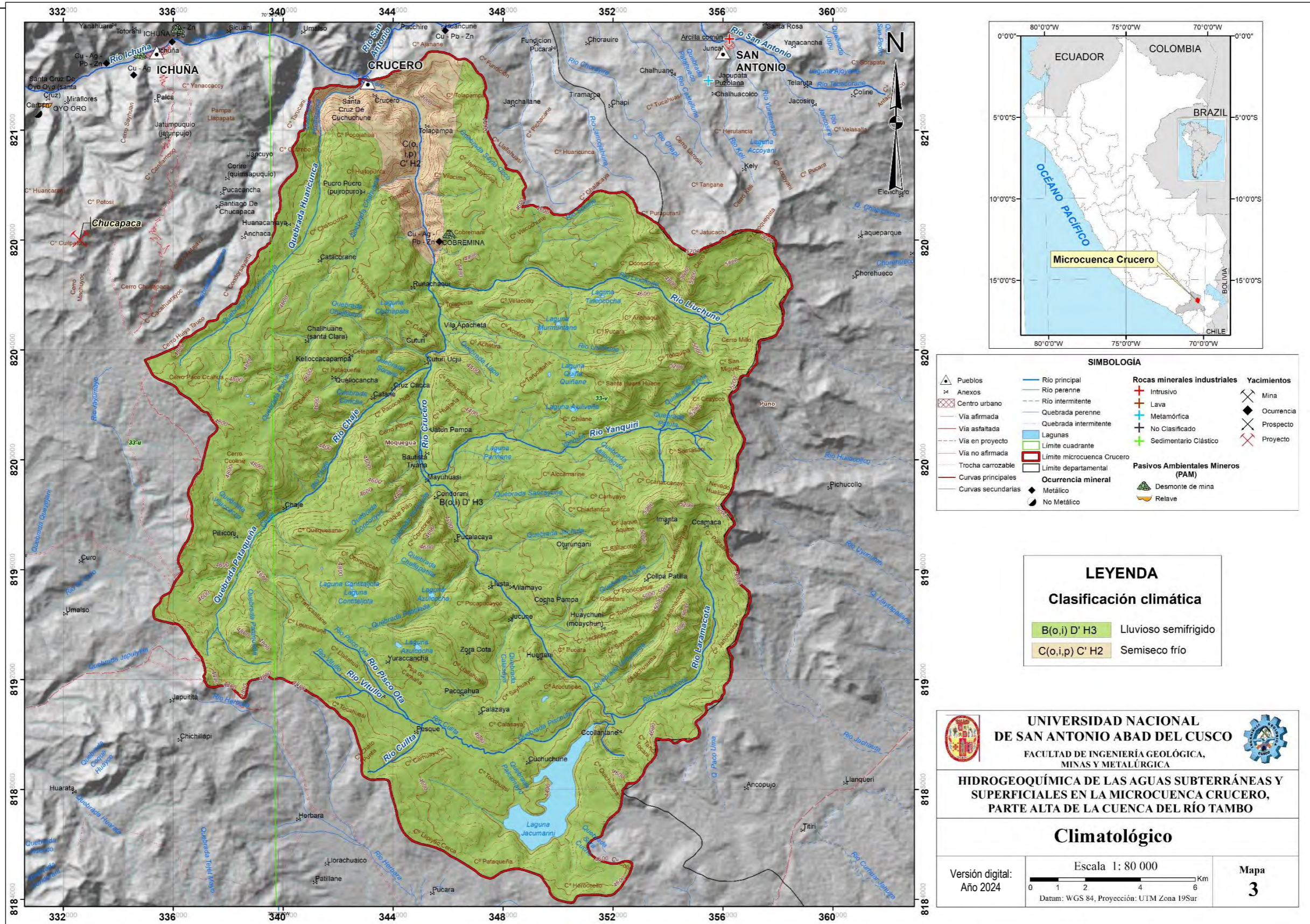
$$\text{Relación de Evapotranspiración Potencial (Rtp)} = \frac{\text{Evapotranspiración Potencial total por año}}{\text{Precipitación promedio anual}}$$

A través de la ecuación anterior, nos permite definir ambientes con determinadas características sobre la base del balance del calor y la humedad (Figura 31). Para fines del presente mapa, se creyó conveniente agrupar determinadas provincias de humedad en unidades mayores, denominadas macroprovincias de humedad, definidas por un rango de valores de Rtp. media de la subcuenca que se alimentan del deshielo de los glaciares, surgencia de agua subterránea y de las precipitaciones; matorrales arbustivos con especies arbóreas como el molle y la acasia, y cactáceas, como el opuntia (tuna); zonas de reforestación, en la parte media y baja de la microcuenca, a base de pinos y eucaliptos, con el fin de brindar protección de laderas y espejos de agua, detener la erosión del suelo y regular el agua de escorrentía (MINAM, 2015).



Figura 30

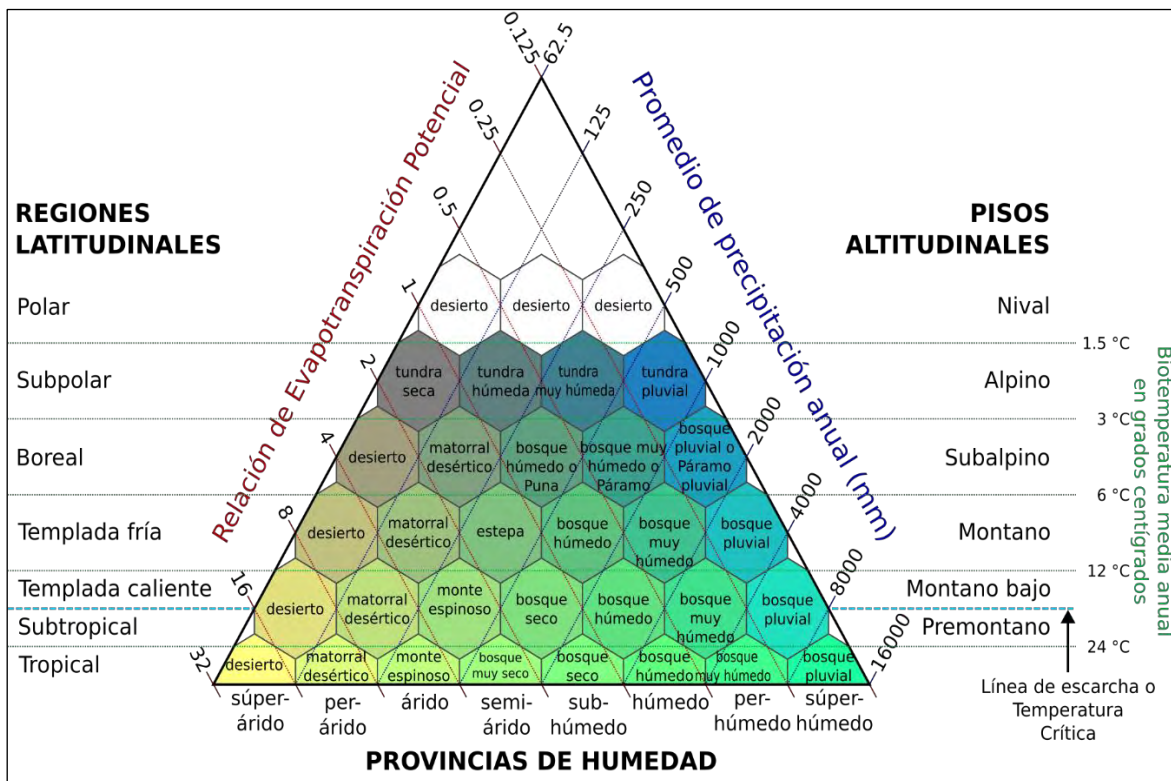
"HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO"



Fuente: Elaboración propia.



Figura 31 Diagrama para la clasificación de zonas de vida o formaciones vegetales del mundo



Fuente: Holdridge, 1987.

La microcuenca Crucero (Figura 32), está compuesta de las siguientes coberturas vegetales, estas son:

- **Pajonal andino:** Aflora ampliamente en la microcuenca Crucero (Figura 32), este tipo de cobertura vegetal está conformado mayormente por herbazales ubicado en la porción superior de la cordillera de los andes, aproximadamente entre 3800 y 4800 m.s.n.m. Se desarrolla sobre terrenos que van desde casi planos como en las altiplanicies hasta empinados o escarpado, en las depresiones y fondo de valles glaciares (MINAM, 2015).
- **Matorral arbustivo:** Este tipo de cobertura vegetal se encuentra distribuido ampliamente en la región andina, desde aproximadamente 1500 hasta 3800 m.s.n.m. en la zona sur y centro del país, y desde 1000 hasta los 3000 m.s.n.m. en la zona norte del país (Figura 32), es decir, en ambos casos, hasta el límite de los pajonales naturales (MINAM, 2015).
- **Bofedal:** Llamados también "oconal" o "turbera" (del quechua oco que significa mojado), constituye un ecosistema hidromórfico distribuido en la región altoandina, a partir de los 3800 m. s. n. m., principalmente en las zonas sur y central del país. Este humedal altoandino se encuentra ubicado en los fondos de valle fluvio-glacial, conos volcánicos, planicies lacustres, piedemonte y terrazas fluviales. Se alimentan del agua proveniente del deshielo de los glaciares, del afloramiento de agua subterránea (puquial) y de la precipitación pluvial (Figura 32). La poca disponibilidad de oxígeno debido al drenaje pobre favorece la acumulación de un grueso colchón orgánico proveniente de raíces muertas de las plantas y la materia orgánica en el suelo, provoca un escaso drenaje del mismo ayudando así al mantenimiento de humedad. La vegetación herbácea hidrófila es siempre verde, compacta y de porte almohadillado o en cojín (MINAM, 2015).



- Área altoandina con escasa vegetación y sin vegetación: Aparece a altitudes mayores a 4800 m.s.n.m., donde no se tiene el desarrollo efímero y/o permanente de cobertura vegetal, se relacionan a zonas con procesos erosivos y de intemperismo; se ubica al este de la microcuenca Crucero (Figura 32).

2.6. PENDIENTE

La clasificación adoptada en términos descriptivos está definida en el Tabla 6:

Tabla 7 Pendientes representativas de la microcuenca Crucero

Pendientes medias (°)	Relieve	Área (km ²)	Porcentaje (%)
0° - 1°	Llana	5.22	16.55
1° - 5°	Pendiente suave	7.77	24.64
5° - 15°	Moderada	4.60	14.59
15° - 25°	Fuerte	6.46	20.47
25° - 45°	Muy fuerte	6.81	21.59
> 45°	Muy escarpada	0.69	2.17
Total		31.54	100.00

Fuente: Elaboración propia.

Según la Tabla 8, podemos ver que para la microcuenca Crucero, predomina una pendiente media de 1° a 5°, con un 24.64 % de la pendiente total (Figura 33), por lo que, se tendría predominantemente una pendiente suave (relacionado a colinas, piedemontes y valles). En segundo lugar, se tienen pendientes de 25° a 45° y 15° a 25° con 21.59 % y 20.47 %, respectivamente; relacionándose a pendientes fuertes a muy fuertes (referente a zonas de laderas y montañas).

Por otro lado, tomando como referencia la clasificación establecida en el por Henao (1988), muestra que la pendiente media para área de estudio (24.64 %) se encuentra en relieve fuerte, lo cual puede interpretarse como una pendiente media y/o promedio para toda la microcuenca Crucero, dado que según el cuadro 1, se tiene pendientes suaves, fuertes y muy fuertes, ello condicionado por las geoformas aflorantes en el área de estudio (Tabla 8).

Tabla 8 Rango de pendientes medias

Pendientes medias	% Relieve
0 - 3	Plano
3 - 7	Suave
7 - 12	Mediano
12 - 20	Accidentado
20 - 35	Fuerte
35 - 50	Muy fuerte
50 - 75	Escarpado
Mayor de 75	Muy escarpado

Fuente: Elaboración propia.



Finalmente podemos mencionar que el área de estudio, presenta pendientes suaves ubicado en las zonas altas, medias y parte baja. Por otra parte, las pendientes fuertes y muy fuertes, localizados en relieves más positivos (montañas) y en zonas de quebradas (laderas), siendo estas pendientes susceptibles a que produzcan movimientos en masa como caída de rocas, deslizamientos y derrumbes.

2.7. SISTEMA DE DRENAJES

La microcuenca Crucero, presenta generalmente drenaje del tipo dendrítico donde su drenaje colector y/o curso principal es el río Crucero, el cual nace de la confluencia de los ríos Laramacota, Cullta, Chaje, Yanquiri y Liuchune, cabe indicar que el río Crucero es de orden 6.

El orden de los cauces, refleja el grado de ramificación del sistema de drenaje, donde los cursos de primer orden no poseen tributarios, los de segundo orden se forman por unión de dos cauces de primer orden, y así sucesivamente hasta saber de qué orden es el cauce principal a la salida de la cuenca (Strahler y Strahler, 1969).

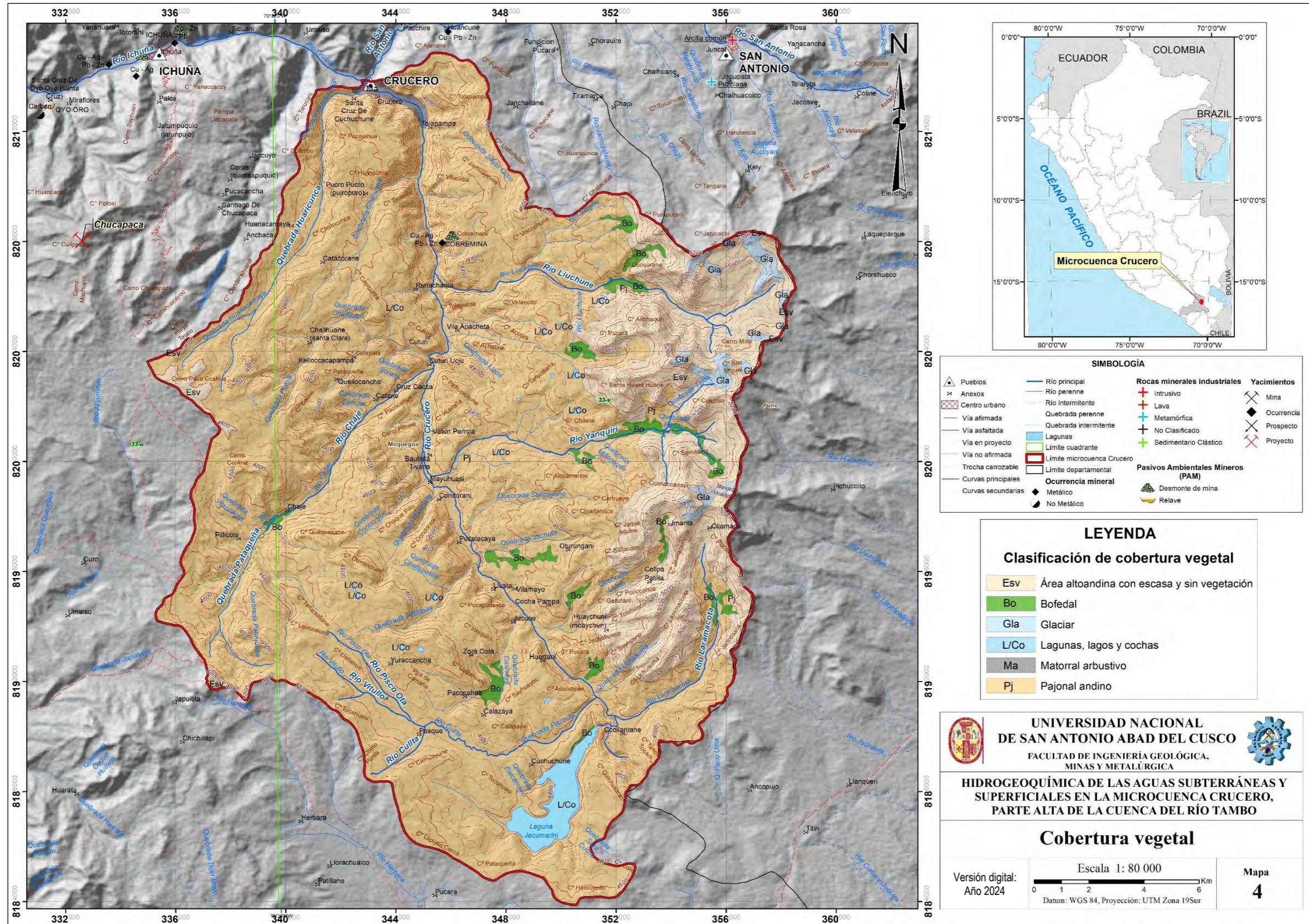
Hacia la parte noreste y sureste de la microcuenca Crucero, se tienen drenajes del tipo radial (semi-radial), esto condicionado en primera instancia por la litología aflorante la cual se conforma por rocas volcánicas y subvolcánicas compuestos por andesitas y de igual forma por geoformas pre-existentes (montañas y estratovolcanes); estos drenajes locales se encuentran por el sector de Huaychuni y parte alta (nacientes) del río Yanquiri y Liuchune (Figura 34).



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**

Figura 32

Mapa de cobertura vegetal para la microcuenca Crucero

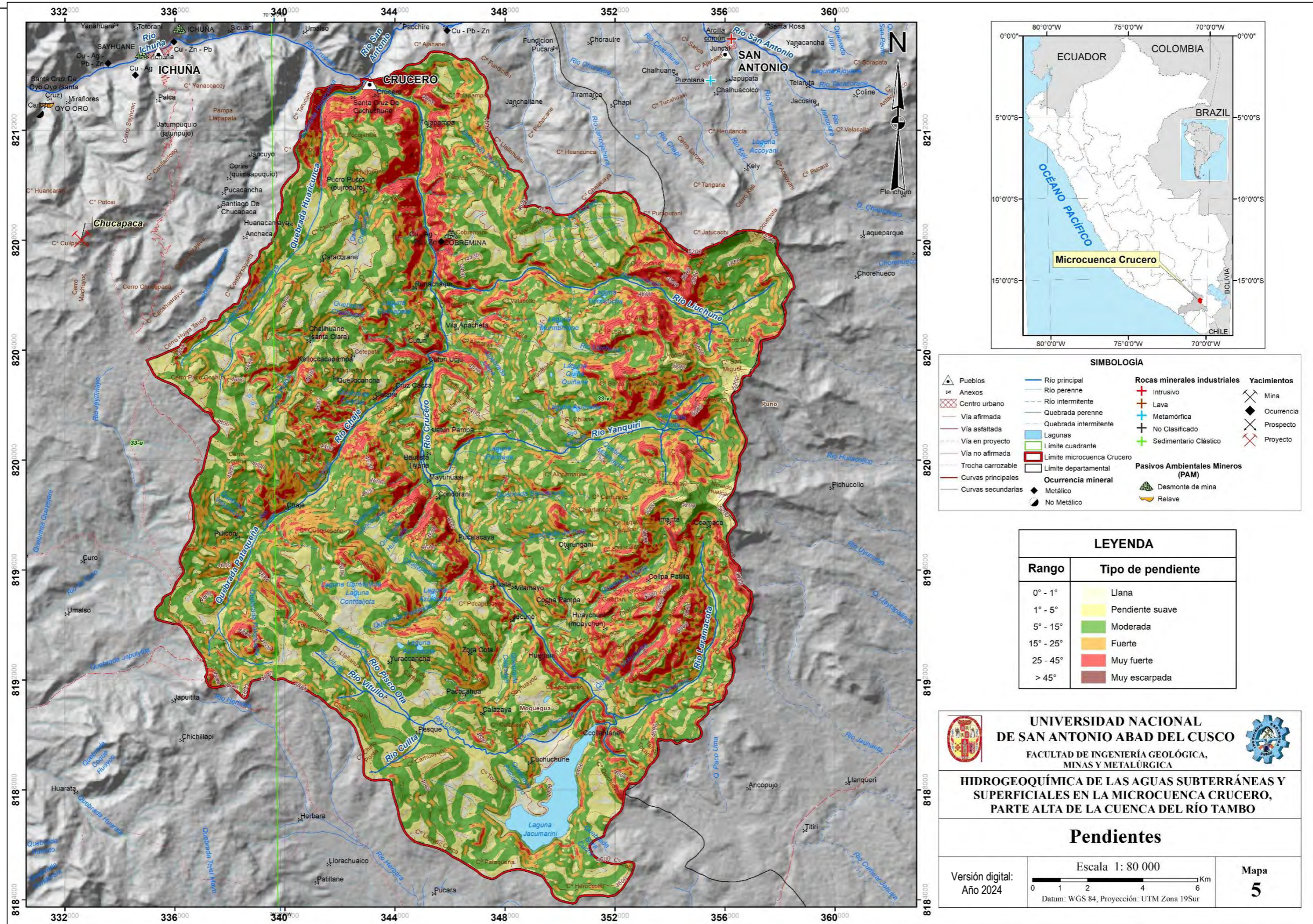


Fuente: Elaboración propia.



Figura 33

"HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO"

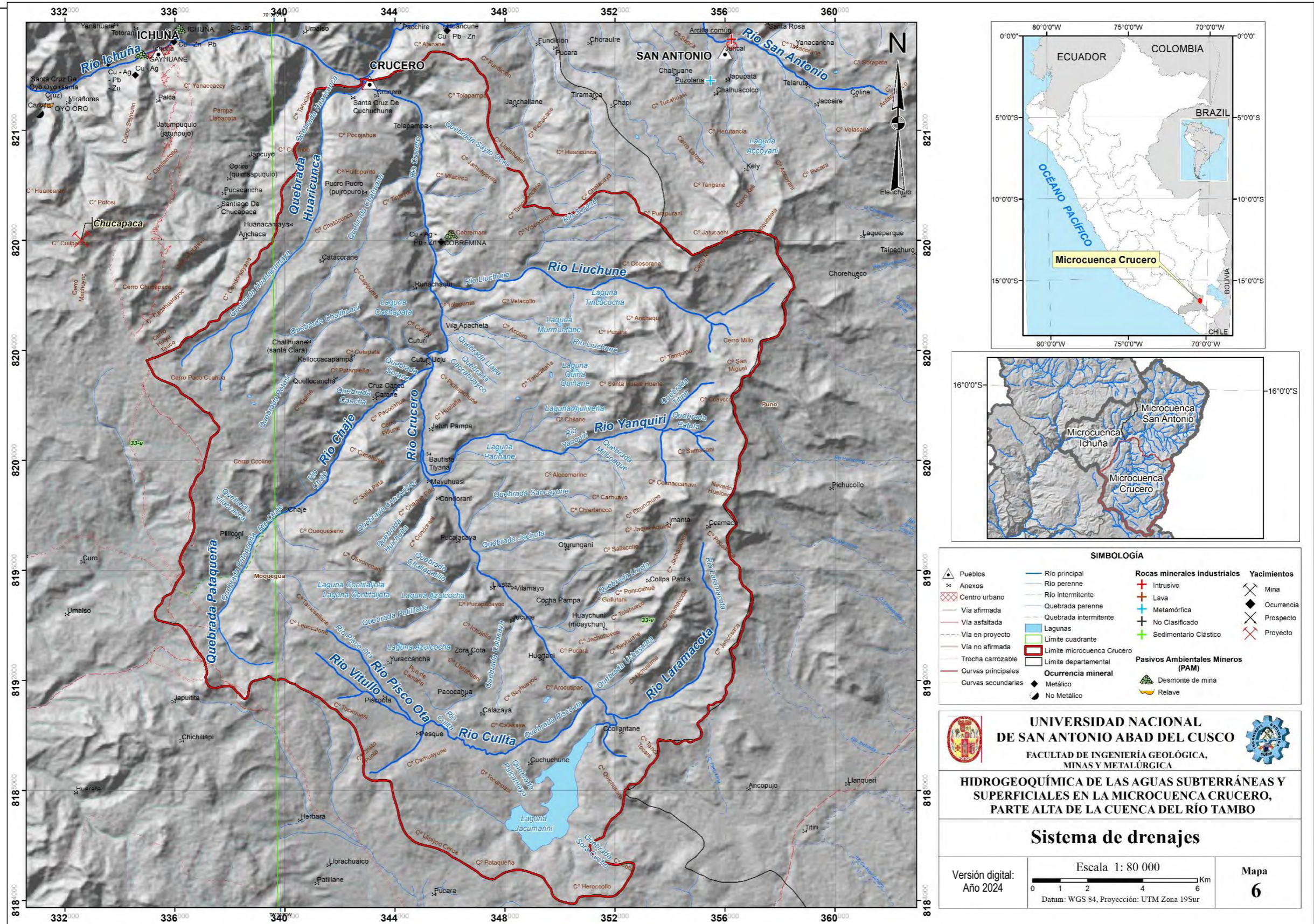


Fuente: Elaboración propia.



Figura 34

“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



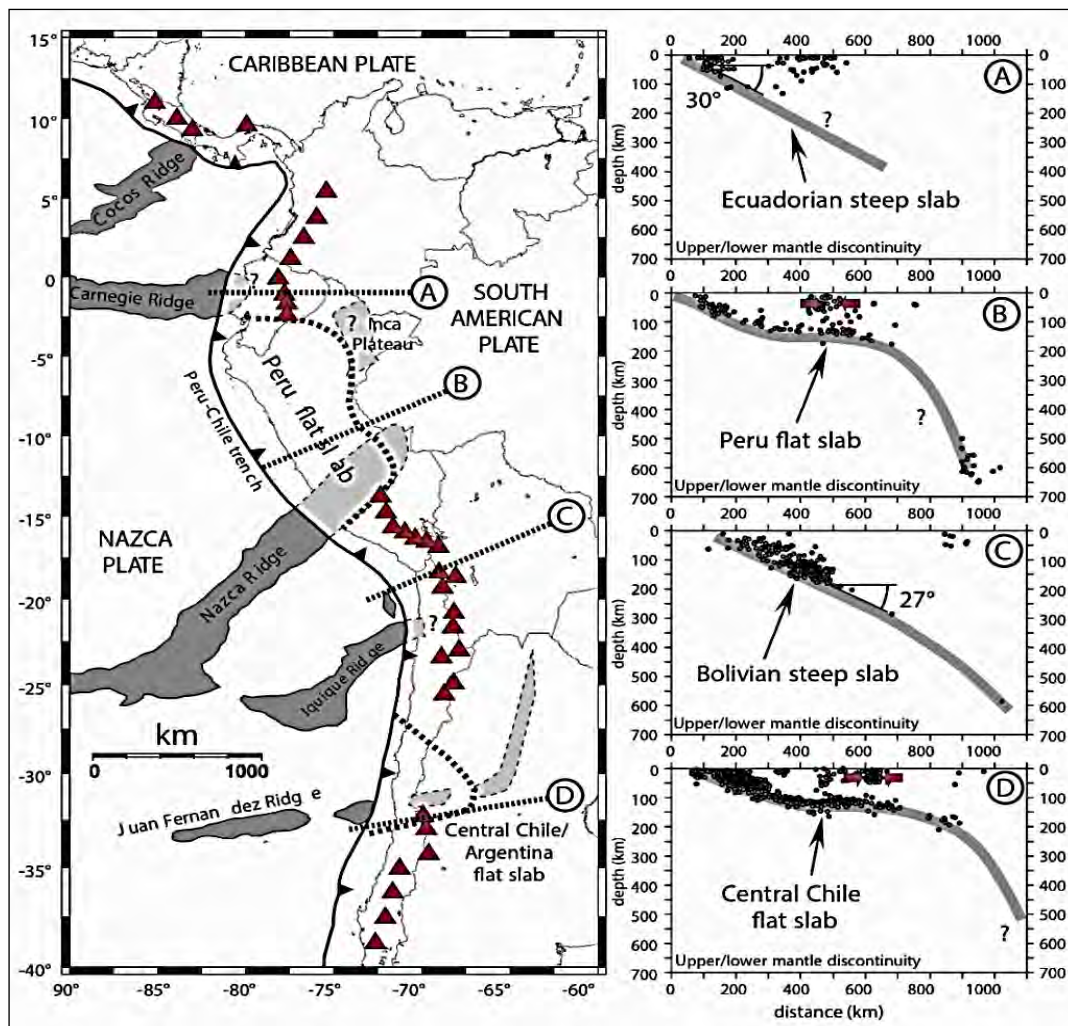
Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III CONTEXTO TÉCTÓNICO, GEOMORFOLÓGICO, GEOLÓGICO Y ESTRUCTURAL

3.1. GENERALIDADES

Según Hermoza (2005), los Andes Centrales corresponden al segmento más largo de la Cordillera de los Andes, en ese sentido la cordillera resulta de la subducción ligeramente oblicua ($\sim N75^\circ E$) de la placa oceánica de Nazca debajo el continente sudamericano. La subducción de la Placa de Nazca es menor a 50 Ma a lo largo de la longitud de la fosa, lo que sugiere que su empuje negativo es el más bajo (Hermoza, 2005). Por lo tanto, las ligeras perturbaciones en la densidad pueden afectar fácilmente su ruta descendente hacia el manto (Figura 35).

Figura 35 Presente configuración de la Cordillera de los Andes, donde los triángulos marcan los volcanes activos, el segmento de subducción de bajo ángulo (Flat Slab) y la dorsal oceánica

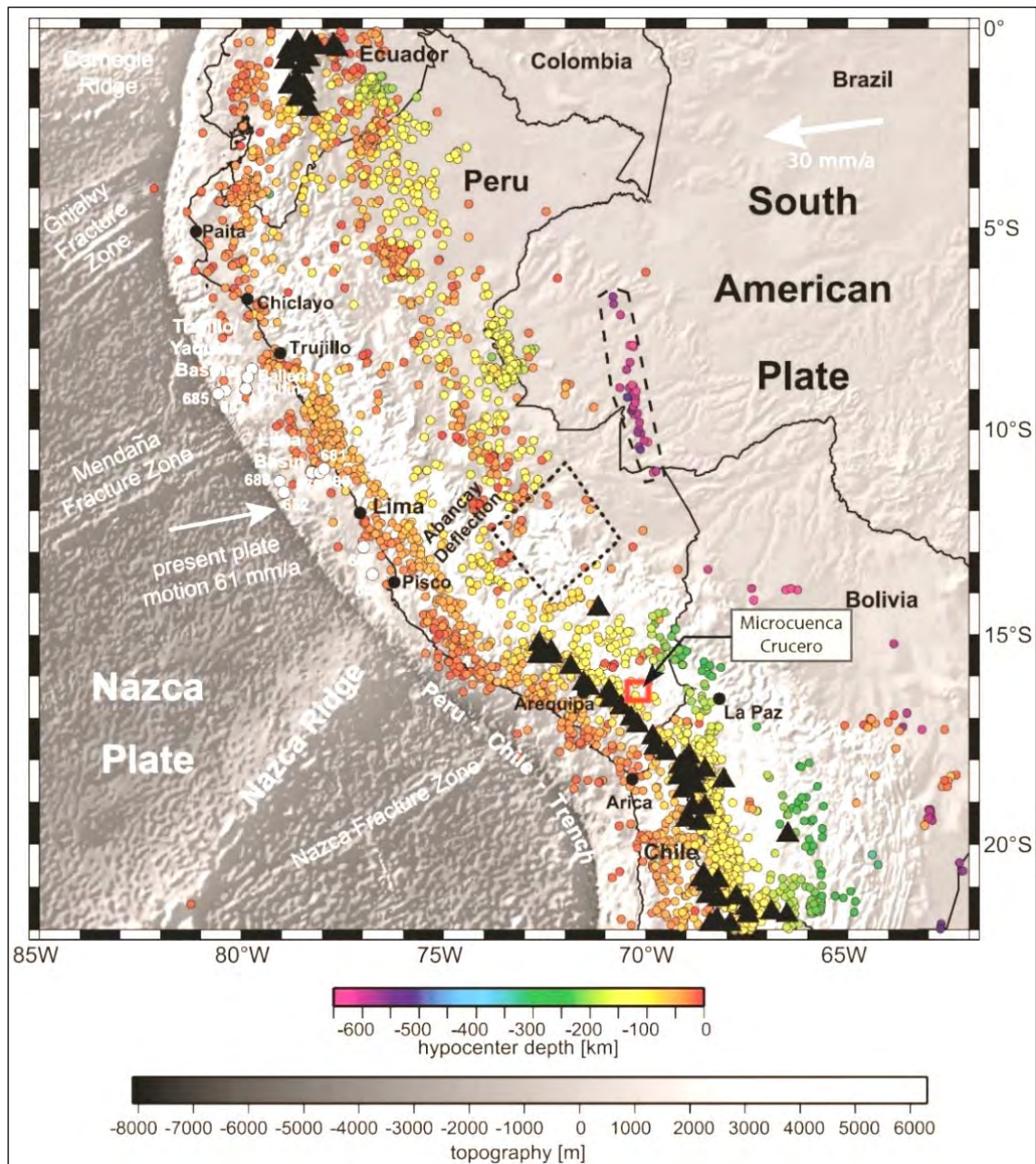


Fuente: Hermoza (2005).

Los modelos analógicos y numéricos sugieren que las subducciones horizontales pueden ser el resultado de la subducción forzada de segmentos de la placa flotante por debajo de una placa superior que se levanta (Martinod et al., 2010), tal como se puede ver en la Figura 36.

La cinemática de la deformación de los Andes Centrales está caracterizada por una dirección de acortamiento E-ESE (Figura 36). Los datos sísmicos muestran que el 90% de esta deformación proviene de la subducción mientras que el 10% restante son producto del engrosamiento cortical (Hermoza, 2005).

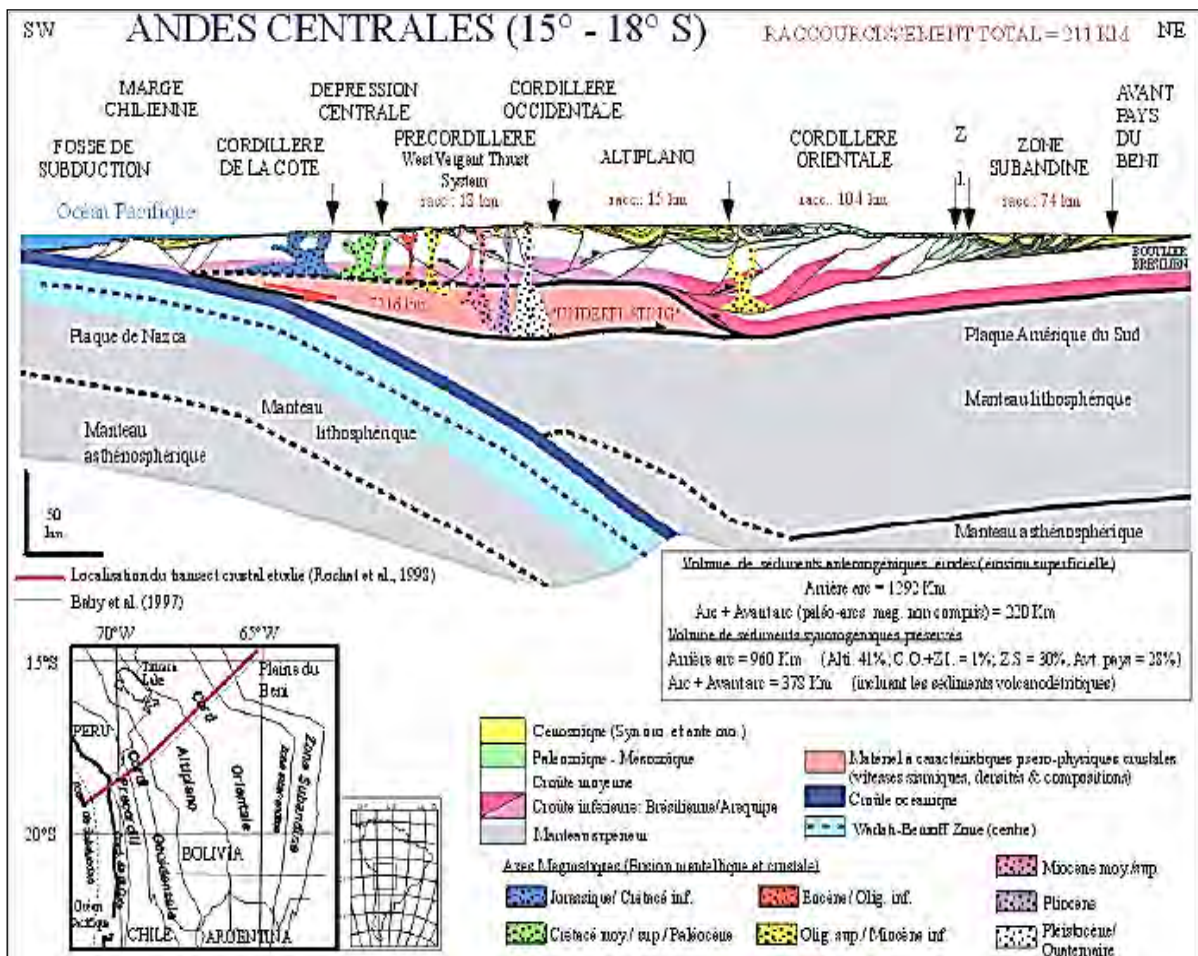
Figura 36 Mapa de Sudamérica que muestra el contexto geotectónico de los Andes con los hipocentros, zonas volcánicas y arcos volcánicos de los Andes Centrales



Fuente: Hermoza (2005).

Según Hermoza (2005), la Placa de Nazca migra a una velocidad de ~6 cm/a. El resultado de la tasa de convergencia entre las dos placas es de aproximadamente 9 cm/a. Según Simkin et al. (1994), la subducción está activa desde al menos 200 Ma, sin embargo, el levantamiento de los Andes tuvo lugar durante los últimos 30 Ma (Figura 37), solamente América del Sur migra hacia el oeste aproximadamente a una tasa actual de 3 cm/a (Hennig, 2005).

Figura 37 Corte cortical equilibrado a través de los Andes Centrales, donde se observa las diferentes unidades morfológicas y sus tasas de acortamiento (Hermoza, 2005)



Fuente: Hermoza (2005).

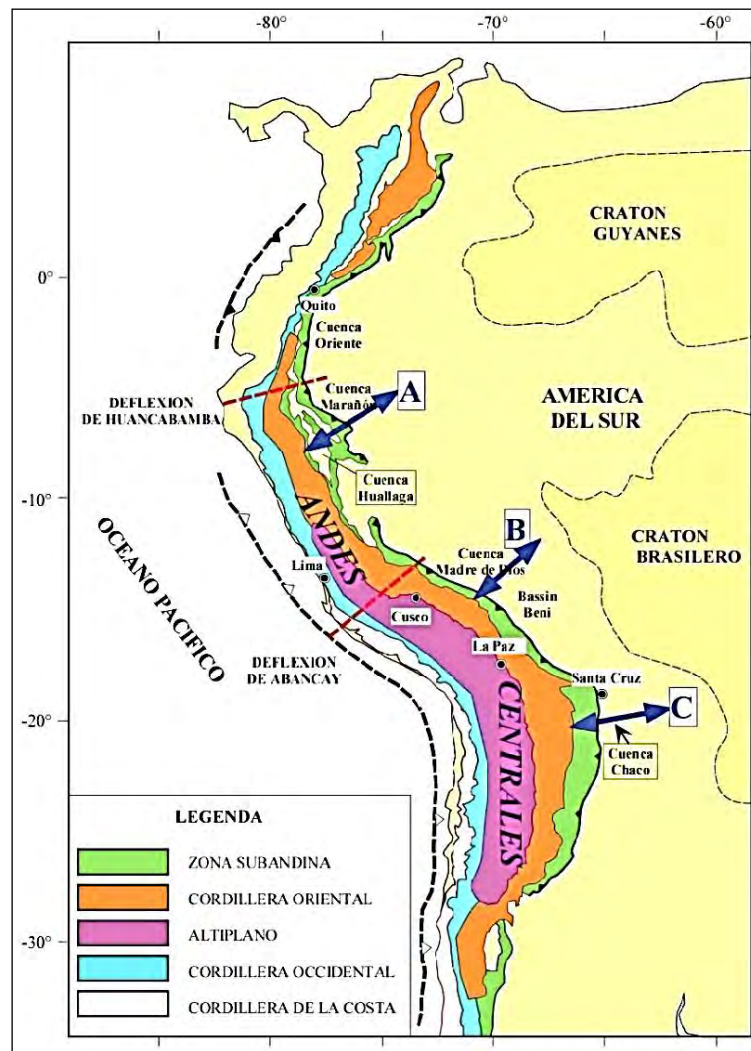
3.2. GEOMORFOLOGÍA

3.2.1. GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

La geomorfología en la parte norte del Perú, los Andes Centrales se encuentran constituidas por dos cordilleras: la Cordillera Occidental y la Cordillera Oriental, que culminan en altitudes que varían entre 5000 y 6000 m. Entre el Sur del Perú y Bolivia, estas dos cordilleras se encuentran separadas por el Altiplano (Laubacher y Naeser, 1994), con un ancho que varía entre 50 y 100 km (Figura 38). Esta planicie, que es la más grande del mundo después del Tibet, se desarrolla a una altitud media de 4000 m. (Hermoza, 2005). El área de estudio se encuentra ubicado en el borde noreste de la Cordillera

Occidental, se pueden diferenciar unidades geomorfológicas en detalle para la microcuenca Crucero, estos se describen líneas abajo.

Figura 38 Unidades morfológicas de los Andes Centrales: los Andes Centrales, limitados al norte por la Deflexión de Huancabamba, están constituidos por la zona subandina y las cordilleras Oriental y Occidental; al Sur, los Andes Centrales están constituidos por la zona Subandina, Altiplano y las Cordilleras Occidental, Oriental y costero (Hermoza, 2005)



Fuente: Hermoza (2005).

3.2.2. GEOMORFOLOGÍA LOCAL

En un mapa geomorfológico las unidades elementales que contienen, se organizan en agrupaciones genéticas; es decir que se establece a partir de su génesis principal (Serrano et al., 2004), este aspecto está relacionado a su origen endógeno y exógeno (Nuñez, 2018). Se han reconocido 03 unidades geomorfológicas: de carácter deposicional, volcánico degradacional y tectónico degradacional. Además, se cuenta con unidades subunidades que se hallan dentro de cada una de las unidades de mayor jerarquía (Tabla 9).



Tabla 9 Clasificación de unidades geomorfológicas de la microcuenca Crucero

UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DE CARÁCTER DEPOSICIONAL		
UNIDAD	SUBUNIDAD	ETIQUETA
PIEDEMONTE	Piedemonte coluvio-deluvial	P-cd
	Vertiente o piedemonte aluvio-torrencial (proluvial)	P-at
	Morrenas	Mo
VALLE	Valle fluvial y terrazas indiferenciadas	V-fl
	Valle glacio-fluvial y terrazas indiferenciadas	V-gf
PLANICIES, DEPRESIONES Y OTROS	Bofedales	Bo
	Lagunas	
UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DE CARÁCTER VOLCÁNICO DEGRADACIONAL Y EROSIONAL		
UNIDAD	SUBUNIDAD	ETIQUETA
VOLCÁNICO	Estratovolcán	Es-vo
	Colinas y lomadas ignimbríticas	CL-ig
	Coladas o campo de lavas basalto andesíticas	Ca-la
UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DE CARÁCTER TECTÓNICO DEGRADACIONAL Y EROSIONAL		
		ETIQUETA
MONTAÑAS	Montaña en roca volcánico-sedimentaria	RM-rvs
	Montaña en roca volcánica	RM-rv
	Montaña en roca intrusiva	RM-ri
	Montañas y colinas en roca sedimentaria	RMC-rs
LADERAS	Ladera en roca sedimentaria	L-rs
	Ladera en roca volcánica-sedimentaria	L-rvs
COLINAS	Colina en roca sedimentaria	RC-rs
	Colina en roca intrusiva	RC-ri
COLINAS Y LOMADAS	Colinas y lomadas en roca sedimentaria	RCL-rs
	Colinas y lomadas en roca volcánica	RCL-rv

Fuente: Villota (2005).

Se describió las subunidades geomorfológicas más importantes a nivel de microcuenca Crucero (Figura 39), estas son:

- **Montañas:** Estas unidades presentan cerros con laderas de pendientes moderadas a muy fuertes (15° a >45°) y promedian altitudes de 4600 a 5000 m.s.n.m. Litológicamente se componen de rocas volcánicas, volcano-sedimentarias, intrusivas y sedimentarias. Estas unidades afloran al sur-oeste y sur-este de la microcuenca Crucero, ubicándose estas



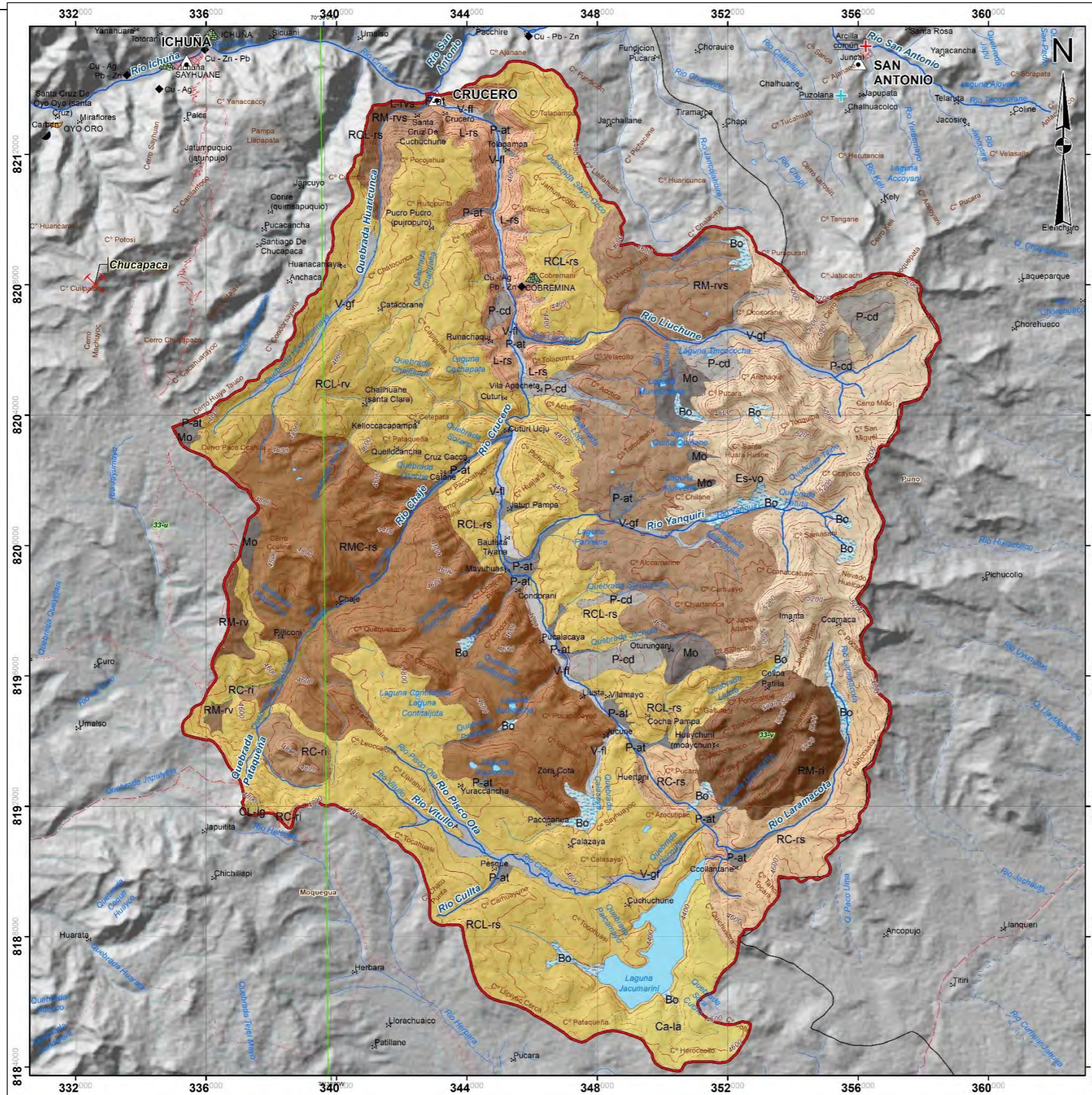
geformas por los sectores de Chaje, Pillconi, Llusta, Huaychuni, Collpa Patilla y Santa Cruz de Cuchuchune.

- **Laderas:** Se presentan con pendientes muy fuertes a muy escarpadas (25° a $> 45^\circ$) y promedian altitudes entre 4000 m.s.n.m. Litológicamente se conforman por rocas sedimentarias, esta unidad aflora preponderantemente al norte de la microcuenca Crucero, acércanos al sector de Runachaqui, Tolapampa y al centro poblado de Crucero.
- **Colinas y lomadas:** Las unidades geomorfológicas tienen pendientes llanas a moderadas (0° a 15°) y contienen altitudes entre 4400 a 4600 m.s.n.m. Litológicamente se conforma por rocas volcánicas y sedimentarias, dichas unidades afloran al noreste y sur, dichas geformas se encuentran por los sectores Pesque, Cuchuchune, Calazaya, Cocha Pampa, Challhuane, Cocha Pampa, Vilamayo y Catacorane.
- **Piedemonte:** Presentan pendientes llanas a moderadas (0° a 15°), con altitudes entre 4000 hasta 4600 m.s.n.m. Litológicamente se conforman por depósitos morrénicos, coluviales y aluviales, los cuales se ubican en las nacientes y en las partes bajas de los principales cursos de aguas y quebradas que aportan al río Crucero.
- **Valles:** Presenta pendientes llanas a suaves (0° a 5°). Litológicamente se conforman por terrazas fluviales y fluvio-glaciares, ubicándose en los principales ríos de Culta, Chaje, Yanquiri, Crucero y en la quebrada Huaricunca.
- **Otros:** Conforman los conjuntos de volcanes, domos, complejos volcánicos, mesetas volcánicas, depósitos emitidos por volcanes, depresiones y planicies.



Figura 39

"HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO"



SIMBOLOGÍA

<ul style="list-style-type: none"> ▲ Pueblos ⊗ Anexos ⊗ Centro urbano — Via afirmada — Via en proyecto — Via no afirmada — Trocha carrozable — Curvas principales — Curvas secundarias 	<ul style="list-style-type: none"> — Río principal — Río perenne — Río intermitente — Quebrada perenne — Quebrada intermitente — Lagunas — Límite cuadrante — Límite microcuenca Cruceiro — Límite departamental — Ocurriencia mineral — No Metálico 	<ul style="list-style-type: none"> — Rocas minerales industriales — Intrusivo — Lava — Metamórfica — No Clasificado — Sedimentario Clástico — Pasivos Ambientales Mineros (PAM) — Desmonte de mina — Relave 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ Mina ⊗ Ocurriencia ⊗ Prospecto ⊗ Proyecto
---	---	--	--

LEYENDA

UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DE CARÁCTER DEPOSICIONAL		UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DE CARÁCTER TECTÓNICO DEGRADACIONAL Y EROSIONAL			
UNIDAD	SUBUNIDAD	ETIQUETA	ETIQUETA		
PIEDEMONTE	Piedemonte colúvico-deluvial	P-cd	MONTAÑAS		
	Vertiente o piedemonte aluvio-torrencial (proluvial)	P-at			
	Morrenas	Mo			
VALLE	Valle fluvial y terrazas indiferenciadas	V-fi	LADERAS		
	Valle glacio-fluvial y terrazas indiferenciadas	V-gf			
PLANICIES, DEPRESIONES Y OTROS	Boledales	Bo	COLINAS		
	Lagunas	L-ls			
UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DE CARÁCTER VOLCÁNICO DEGRADACIONAL Y EROSIONAL	Estratovolcán	Es-vo	COLINAS Y LOMADAS		
				Colinas y lomadas ignimbriticas	CL-ig
				Coladas o campo de lavas basalto andesíticas	Ca-la

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO

Geomorfología

Versión digital: Año 2024

Escala 1: 80 000

Datum: WGS 84, Proyección: UTM Zona 19Sur

Mapa 7

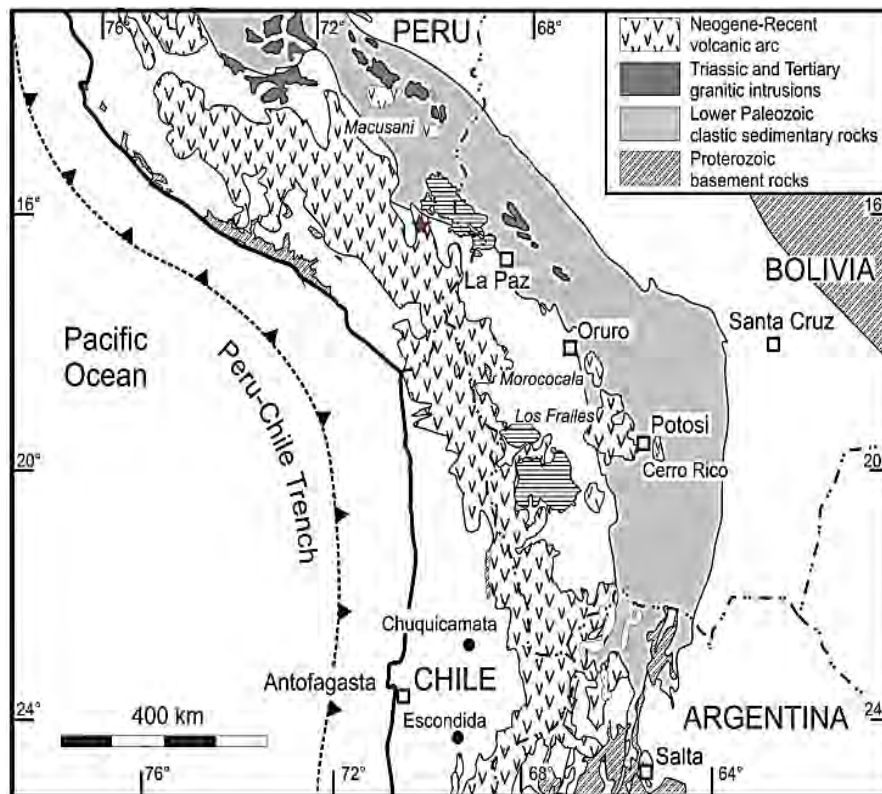
Fuente: Elaboración propia.

3.3. GEOLOGÍA REGIONAL

3.3.1. GENERALIDADES

El sur del Perú está dividido en seis unidades morfoestructurales: la Cordillera de la Costa, la Cordillera Occidental, el Altiplano, la Cordillera Oriental, la Zona Subandina y el Antepaís (Figura 40). Por otro lado, la Cordillera de la Costa el relieve es bajo (<300 m), y los sedimentos se acumulan en amplias llanuras aluviales. La Cordillera Occidental está formada por rocas metamórficas paleozoicas deformadas y rocas sedimentarias mesozoicas, como calizas, conglomerados, arenitas, greywackes, pelitas y rocas volcánicas. Están instruidos al oeste por plutones mesozoicos (arco mesozoico) y cubiertos inconformemente al este por abundantes rocas volcánicas (arco terciario), que están formadas principalmente por rocas volcánicas cenozoicas de composición intermedia a ácida que forman estratovolcanes, flujos de lava, cúpulas y mesetas de ignimbrita (Hennig, 2005)

Figura 40 Mapa geológico y de unidades geomorfológicas de los Andes Centrales.



Fuente: Hennig (2005).

En resumen, en el área de estudio y en zonas circundantes, afloran rocas volcánicas y sedimentarias del Mesozoico y Cenozoico, los cuales abarcan edades desde el Jurásico al Plioceno (Figura 41 y 42). Las rocas más antiguas están conformadas por secuencias silicoclásticas del Jurásico y Cretácico del Grupo Yura (Jenks, 1948; Benavides, 1962; y Lipa, Valdivia y Carrasco, 2001), estas forman franjas con rumbos NO-SE y en ligera discordancia yacen las secuencias pelíticas de la Fm. Murco del Cretácico superior (Cereceda et al., 2016). En discordancia angular yacen los conglomerados del Grupo Puno del Paleógeno (Lipa, Valdivia y Carrasco, 2001) que anteriormente fue denominado como Conglomerados Ciguaya (Marocco & Del Pino, 1966), luego sobreyacen las secuencias volcano-sedimentarias de la Fm. Pichu del Eoceno (García, 1978 y García, 2017). Por



encima, en discordancia erosional se encuentran las lavas andesíticas, tobas de grano fino y brechas de la Formación Lllallhui, asignados al Grupo Tacaza de edad Oligocena (Wasteneys, 1990; Marocco y Del Pino, 1966).

En discordancia progresiva sobreyacen secuencias lacustres, piroclásticas y volcano-sedimentarias del Grupo Maure (Lipa et al., 2001; Cerpa y Meza, 2001; Carlotto et al., 2005; Torres et al., 2010), interdigitado por secuencias volcánicas del Grupo Sillapaca del Mioceno Superior (Cerpa et al., 2012 y Cereceda et al., 2016). Luego, sobreyacen los depósitos de los centros volcánicos San Miguel, Huancarani y Pinguillo asignados al Grupo Barroso (Rodriguez et al., 2002). Finalmente, se tienen ubicados al este de la subcuenca Ichuña y microcuenca Crucero los centros volcánicos, donde presentan anomalías espectrales de óxidos y arcillas que evidencian zonas afectadas por alteración hidrotermal relacionados a mineralizaciones de baja y alta sulfuración asociados a mineralización de Au-Ag, Ag-Pb-Cu-Zn, Ag-Pb-Zn (Cereceda et al., 2016) y en donde están ubicados los prospectos y ocurrencias minerales: Tres Marías (Hennig, 2005), San Antonio de Esquilache, Virgen de Chapi y Chapi Chiara. Al sur, también se observan zonas afectadas por alteración hidrotermal asociado al yacimiento epitermal de alta sulfuración Chucapaca (Remigio, 2012).

Las unidades geológicas presentes a nivel regional son las siguientes:

En el Mesozoico, las rocas sedimentarias del Grupo Yura (Formaciones Cachios, Labra, Gramadal, Hualhuani y Murco), a estas la suprayace el Grupo Tacaza y el Grupo Maure, así como se encuentra el afloramiento del Centro Volcánico Chucapacca a estas unidades las intruyen una latita y una roca intrusiva pórfido andesita. En el Neógeno se tiene el afloramiento de la Formación Sencca, seguido por el Estratovolcán San Miguel (Grupo Barroso) y finalmente tenemos los depósitos cuaternarios fluviales, aluviales y residuales.

A continuación, el Mapa a escala 1:100,000 de INGEMMET.

Figura 41 Leyenda del mapa geológico regional de la microcuenca Crucero

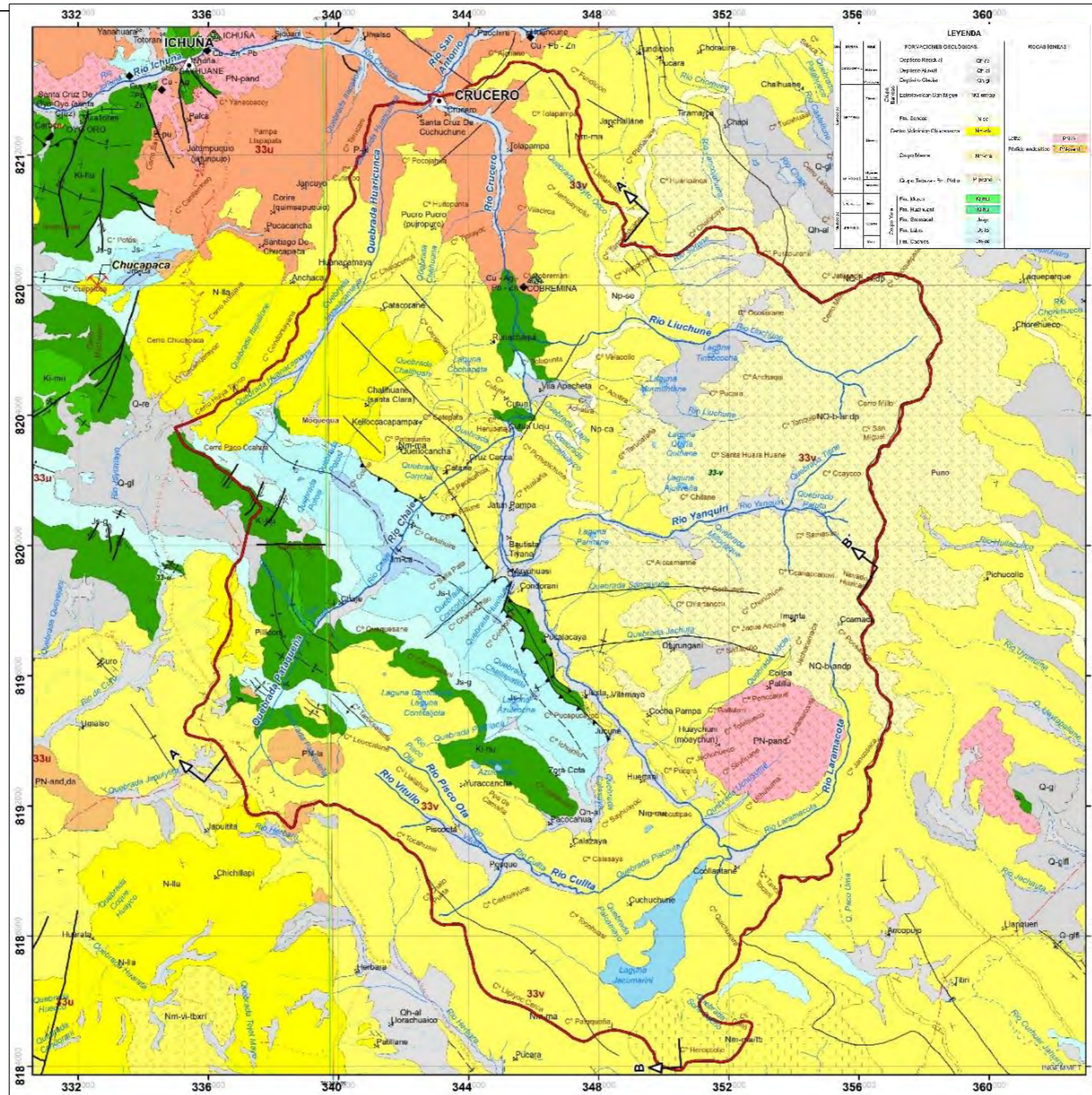
LEYENDA					
ERA	SISTEMA	SERIE	FORMACIONES GEOLÓGICAS	ROCAS ÍGNEAS	
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Depósito Aluvial Q-al		
			Depósito Glaciar Q-gl		
		Pleistoceno	Brecha Bx ¹		
MESOZOICO	NEÓGENO	Plioceno	Alteración argílica Alt		
			Grupo Barroso	Gpo. Barroso NQ-b-ig.tb	
				Volcan Huancarani NQ-b/hu-andp	Domo dacítico PN-ri
				Estrato Volcan San Miguel NQ-b/sm-andp	Andesita porfírica PN-andp
				Estrato Volcán Huancarani NQ-b/hu-andp.bx	
		Estrato Volcán Pinguillo NQ-b/pin-andp.bx		Domo dacítico PN-da	
		Mioceno	Fm. Capillune Nm-ca		
			Fm. Sillapaca Nm-si		
			Gpo. Maure Nm-ma		
			Fm. Lllallhui N-lla		
Fm. Carayccasa PN-ta/ca-andp.bx					
PALEOGENO	Oligoceno	Fm. Pichu P-pi			
	Eoceno	Gpo. Puno P-pu			
	Paleoceno	Fm. Murco Ki-mu			
CRETÁCICO	Inferior	Fm. Hualhuani Ki-hu			
	SUPERIOR	Fm. Gramadal Js-g			
Fm. Labra Js-l					
JURÁSICO		Medio	Fm. Cachios Jm-ca		

Fuente: INGEMMET (2024).



Figura 42

“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



Fuente: INGEMMET (2024).



3.4. GEOLOGÍA LOCAL

La Geología local de área de estudio se describe a continuación (Figura 43):

3.4.1. ESTRATIGRAFÍA

3.4.1.1. MESOZOICO

3.4.1.1.1. GRUPO YURA

Edad Jurásico Medio – Cretácico Medio. Corresponde el basamento del área de estudio, la litología se constituye por rocas silicoclásticas y carbonatadas de ambiente marino del Jurásico Medio-Cretácico Inferior (Jenks, 1948; Benavides, 1962). El Grupo Yura infrayace de manera casi concordante a la Formación Murco y de manera discordante al Grupo Puno y a la Formación Pichu (Zavaleta, 2018). La microcuenca Crucero, se tienen afloramientos de dirección noroeste a sureste referente a las formaciones Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani, los cuales son descritos:

3.4.1.1.2. FORMACIÓN CACHIOS

Edad Jurásico Superior. Descrita por Jenks (1948) y Benavides (1962). La litología consiste de una serie de lutitas con esporádicas intercalaciones de areniscas canalizadas, numerosos slumping y conglomerados intraformacionales arcillosos (León, 1981; Lipa, Valdivia y Carrasco, 2001), esta unidad aflora por los sectores de Chaje y Catane (Figura 42 y Mapa 8).

3.4.1.1.3. FORMACIÓN LABRA

Edad Jurásico Superior. La litología consta de areniscas inter-estratificadas con lutitas y escasos niveles de margas y calizas (Benavides, 1962), así mismo, las lutitas grises contienen nódulos esferoidales centimétricos, alternadas con areniscas grises de estratificación paralela y cruzada, esta unidad aflora igualmente por el sector de Chaje y Catane (Figura 44).

3.4.1.1.4. FORMACIÓN GRAMADAL

Edad Jurásico Superior – Cretácico Inferior. Descrita por Jenks (1948) y Benavides (1962). Litológicamente se conforma por calizas masivas grises fosilíferos con algunos niveles de dolomita y areniscas pardas hacia la base (Lipa, Valdivia, & Carrasco, 2001), esta unidad aflora por los sectores de Pillconi, Chaje y Catane (Figura 44).

3.4.1.1.5. FORMACIÓN HUALLHUANI

Edad Cretácico Inferior. Descrita por Jenks (1948) y Lipa, Valdivia y Carrasco (2001). Consiste de areniscas cuarzosas blanquecinas intercaladas con lutitas negras. El área de estudio predomina las areniscas cuarzosas gris blanquecinas de grano medio a grueso (Zavaleta, 2018), esta unidad aflora por los sectores de Pillconi, Chaje, Catane, Llusta, Pucalacaya, Condorani, Cuturi y Ranachaqui (Figura 44).



3.4.1.1.6. FORMACIÓN MURCO

Edad Cretácico Inferior. Denominada por Jenks (1948) y posteriormente Benavides (1962). Litológicamente se conforman hacia la base como una secuencia de areniscas de color pardo rojizas con estratificación cruzada y paralela (Zavaleta, 2018). Hacia la parte superior se conforma por lutitas pardas y verdes, abigarradas, laminadas y fracturadas intercalándose con niveles de areniscas cuarzosas grises las cuales contienen laminaciones oblicuas (Lipa, Valdivia y Carrasco, 2001). Afloran en las localidades de Chaje y Catane. La Formación Murco suprayace al Grupo Yura (Figura 44).

3.4.2. CENOZOICO

3.4.2.1. FORMACIÓN PICHU

Edad Paleoceno - Oligoceno inferior. Descrito por Marocco y Del Pino (1966) y Lipa, Valdivia y Carrasco (2001). Litológicamente consiste en una alternancia de andesitas, areniscas gris verdosas, conglomerados con clastos volcánicos, aglomerados y piroclastos (Zavaleta, 2018), las secuencias presentar estratificaciones lenticulares, generados por los cambios litológicos a corta distancia. Esta unidad aflora hacia la parte baja de la microcuenca Crucero, entre las localidades de Pucro Pucro, Tolapampa, Santa Cruz de Cuchuchune y hacia el centro poblado de Crucero (Figura 44).

3.4.2.2. GRUPO MAURE

Edad Mioceno. El término Formación Maure fue introducido por primera vez por García (1978), para definir a una secuencia de sedimentos y piroclásticas post-Grupo Tacaza, en el área de Palca en el sur del Perú (García, 2017).

El Grupo Maure en el cuadrángulo de Ichuña está constituido por secuencias sedimentarias intercalada con depósitos continentales lacustrinos, conglomerados y coladas de lava andesíticas; se establecen dos unidades bien diferenciadas, la unidad inferior compuesta por lutitas grises, areniscas beigs, calizas pardas, areniscas tobáceas verdes claras y niveles conglomerádicos de matriz arenosa; la unida superior corresponde a lavas andesíticas grises parcialmente fluidales, que se interdigitan en medio de esta secuencia clástica, separando los depósitos clásticos finos de los conglomerádicos (Lipa et al., 2001 y García, 2017).

Según el trabajo realizado por Valdivia y Rodríguez (2003) en el cuadrángulo de Lagunillas, consideran que el Grupo Maure comprende niveles sedimentarios, niveles de tobas riolíticas y lavas andesíticas. Por otro lado, Cuellar (2011) menciona que en la parte SE del cuadrángulo de Pichacani reconoce al Grupo Maure como una secuencia volcánica-sedimentaria de 1150 m de espesor y reconoce cinco miembros (García, 2017), los cuales son:

3.4.2.2.1. MIEMBRO A

Presenta tobas retransportadas con clastos de granos finos a gruesos de coloración verdosa; intercaladas con tobas consolidadas de composición volcánica compuesta por pómez, biotita y fragmentos líticos, a su vez intercaladas con estratos de lutitas violáceas. Hacia la parte intermedia y superior se muestran estratos de calizas grises de grano fino (Zavaleta, 2018). Presenta una secuencia vertical grano-estrato creciente y tiene aproximadamente 250 m de grosor (Zavaleta, 2018).



3.4.2.2.2. MIEMBRO B

Según Zavaleta (2018), la parte inferior está constituida por canales y clastos subangulosos a subredondeados con imbricaciones. Suprayaciendo a este nivel encontramos tobas retransportadas de coloraciones verde claras, grises y blancas, con tamaños de grano grueso a fino e intercaladas con estratos de calizas de aproximadamente 30 cm y con estratos de microconglomerados de clastos separados y matriz tobácea. Finalmente se encuentra un estrato de lutitas rojas y un paquete de tobas retransportadas amarillas contenido plagioclasas y biotitas, constituyen los últimos 20 m de este miembro. Presenta una evolución vertical grano-decreciente y un espesor aproximado de 400 m (Zavaleta, 2018).

3.4.2.2.3. MIEMBRO C

Está representado por un paquete de tobas soldadas de color blanco amarillento, la cual está contenida por biotita, cuarzo, pómez y feldspatos, así mismo presenta un espesor de 47 m (Zavaleta, 2018).

3.4.2.2.4. MIEMBRO D

Según Zavaleta (2018), contiene en la parte basal e intermedia tobas retransportadas soldadas y no soldadas de coloraciones verdes a blancas intercaladas con algunos estratos de conglomerados con clastos angulosos y subredondeados de origen volcánicos con espesores menores a 1 m, presentan también laminaciones horizontales y oblicuas planas. La parte superior está conformada por lutitas compactas de color verde. Presenta un espesor de 240 m y una evolución vertical grano-decreciente (Zavaleta, 2018).

3.4.2.2.5. MIEMBRO E

Presenta aproximadamente un espesor de 215 m hacia la base contiene intercalaciones de tobas retrabajadas blancas, verdes y amarillentas con laminaciones oblicuas planas y canales de microconglomerados de color marrón rojizo (Zavaleta, 2018). Suprayaciendo a este nivel se tiene una colada volcánica verde oscura fanerítica de 8 m de espesor y bastante alterada. Posteriormente se tiene una secuencia de tobas retrabajadas no soldadas de coloraciones blancas, rosadas y verdes que se encuentran intercalas con niveles calcáreos de color gris blanquecino a marrón claras (Zavaleta, 2018).

Por otro lado, García (2017) indica que en el sector de Lagunillas se encuentra suprayaciendo a los volcánicos Carayccasa (datadas en roca total K/Ar 21,7 +/- 0.5 Ma por Bellon y Lefèvre (1976), teniendo de edad su límite inferior al inicio del Mioceno, en la localidad de Huacochullo, al oeste del Cerro Japasaira (Pichacani). Klinck et al. (1986) realiza dataciones en muestras de lavas del Grupo Maure datadas por K/Ar dando edades de 8.0 +/- 0.4Ma y 8.8 ± 0.4Ma y una muestra datada por roca total dando una edad de 10.3 +/- 0.4 Ma, asociada a las dataciones realizadas a lavas andesíticas en la represa de Condorama (12 Ma) en donde el Grupo Maure infrayace a una ignimbrita (Torres, 2011) datada en K/Ar (biotita) 4.92 +/- 0.16 Ma por Carlotto et al. (2002). En la microcuenca Crucero, el Grupo Maure tiene una gran preponderancia y se conforma de secuencias sedimentarias lacustrinas y volcánicas, con intervención volcánica posterior al vulcanismo Oligocénico (Gpo. Tacaza). Aflora al sur y norte de la microcuenca Crucero, colindante a los sectores en los sectores de Pesque, Cuchuchune, Cocha Pampa, Vilamayo, Jatun Pampa, Cruz Cacca y Cuturi Uaju.



3.4.2.3. FORMACIÓN LLALLAHUI

Edad Mioceno. Descrita por Lipa et al. (2001). Según Zavaleta (2018), esta formación litológicamente consiste de piroclastos de tipo riódacítico con intercalaciones de flujos lávicos porfiríticos a afaníticos de composición andesítica de colores gris verdosos, aglomerados y brechas volcánicas. Según el trabajo realizado por Quispesivana y Zapata (2000), indica que la Formación Lllallahui sobreyace en discordancia erosional a las unidades Precambrianas (complejo Basal de la Costa) y Mesozoicas (Grupo Yura y Formación Matalaque) infrayaciendo en la misma relación a las unidades del Plioceno-Pleistoceno, conformada por una secuencia de lavas andesíticas y tobas, así mismo estos afloramientos están presentes en el cuadrángulo de Ichuña.

Se evidencian dos unidades en esta formación: la unidad superior conformada por una secuencia de lavas andesíticas que yacen sobre tobas brechoides blanquesinas, la unidad basal está conformada por tobas de cristales de matriz afanítica han sido reconocidas en distintos sectores, como al sureste de la hoja de Ichuña, en las pendientes del cerro Cruzani, siendo cubiertas por lavas andesíticas (Lipa, et al., 2001). Esta unidad aflora el Noroeste y en menor proporción al Suroeste de la microcuenca Crucero, por los sectores de Kellocacapampa y Challhuane (Figura 44).

3.4.2.4. FORMACIÓN SENCCA

Edad Neógeno Superior. Descrita por Lipa, Valdivia y Carrasco (2001). Consiste de 40 a 50 m de tobas riolíticas de color blanquecino variando a gris azulado, que conforma un reducido afloramiento al noroeste del área de estudio, en los sectores de Pampa Confital, por ambos flancos del río Pancomayo. Descansa sobre las Formación Capillune tal como se evidencia al norte de Pati en la quebrada Frailes. El nivel de tobas se encuentra soldadas y contiene cuarcitas, pómez, cuarzo, fragmentos líticos de rocas volcánicas de tamaños entre 3-5 cm y buena cantidad de biotitas. Las tobas riolíticas en sección delgada muestran una matriz compuesta de vidrio y sílice. Esta unidad aflora a la parte Norete de la microcuenca Crucero, por el río Liuchune (Zavaleta, 2018).

3.4.2.5. FORMACIÓN CAPILLUNE

Edad Neógeno. Descrita por (Lipa, Valdivia, & Carrasco, 2001). Consiste de 40 a 50 m de tobas riolíticas de color blanquecino variando a gris azulado, que conforma un reducido afloramiento al noroeste del área de estudio, en los sectores de Pampa Confital, por ambos flancos del río Pancomayo. Descansa sobre las Formación Capillune tal como se evidencia al norte de Pati en la quebrada Frailes. El nivel de tobas se encuentra soldadas y contiene cuarcitas, pómez, cuarzo, fragmentos líticos de rocas volcánicas de tamaños entre 3-5 cm y buena cantidad de biotitas. Las tobas riolíticas en sección delgada muestran una matriz compuesta de vidrio y sílice. Esta unidad aflora a la parte Norete de la microcuenca Crucero, por el río Liuchune (Figura 44).

3.4.2.6. GRUPO BARROSO

Edad Neógeno. Descrita por Lipa, Valdivia y Carrasco (2001). Consiste de 40 a 50 m de tobas riolíticas de color (Marocco y Del Pino, 1966). Así mismo, García (1978) dio el nombre de Formación Barroso a una serie de rocas volcánicas que constituyen la Cordillera del Barroso. Posteriormente Mendivil (1965), lo eleva a la categoría de Grupo, en razón de la diferenciación litológica. Por un lado, Lipa et al. (2001), indica que el Grupo Barroso está conformado para el cuadrángulo de Ichuña por la Estructura Volcanica Pucasaya, Ajana, Tusuna, Misigua, Condori y Pinquillo.



3.4.2.7. INTRUSIVOS

El trabajo de Quispesivana y Zapata (2000), realizado en la hoja de Omate (34-u), describen cuerpos plutónicos de la Superunidad Yarabamba en forma de stock y apófisis se encuentran intruyendo unidades pertenecientes al Mesozoico, peculiarmente a la Formación Matalaque. Litológicamente están constituidos por rocas ácidas a intermedias como granodioritas, cuarzo monzodioritas cuarcíferas, dioritas y tonalitas. Las cuarzo-monzodioritas son las más características, formando afloramientos aislados. Entre las localidades de Muilaque y Candahua los afloramientos tienen forma de un stock alargado de dirección SSE - NNO, este cuerpo se encuentra intruyendo a la Formación Matalaque. En el sector de Yaral la Formación Matalaque se encuentra intruido por pequeños apófisis.

Finalmente, Lipa et al. (2001) en la hoja de Ichuña (33-u), al sur de la hoja, en la localidad de Chujilaque, reconoce un cuerpo plutónico de granodiorita de forma semi-circular cuya superficie cubre 25 Km. Este cuerpo corta a la Formación Matalaque, Grupo Tacaza y Grupo Maure. Este cuerpo intrusivo es asociado al Paleógeno-Neógeno (Figura 44 y Figura 45).

3.4.2.8. INTRUSIVOS SUBVOLCÁNICOS

Los trabajos en la hoja de Omate (34-u), descritas por Quispesivana y Zapata (2000), describen cuerpos subvolcánicos que se encuentran en afloramientos restringidos y aislados en el sector de Yaral. Estos cuerpos son mayormente de composición intermedia, litológicamente corresponden a andesitas porfíricas que intruyen a la secuencia volcanoclástica de la Formación Matalaque en forma dispersa.

Por otro lado, Valdivia y Rodríguez (2003) en la hoja de Lagunillas (32-u), describe unos cuerpos subvolcánicos que afloran en el cerro Jurapunco y en el sector Colquerane. Según Zavaleta (2018), el cuerpo subvolcánico Jurapuco consiste de andesitas de textura porfírica, este cuerpo es asociado al Paleógeno; el cuerpo subvolcánico Colquerane consiste de un pórfido andesita con morfología típicas de extrusiones dómicas, este cuerpo es asociado al Neógeno.

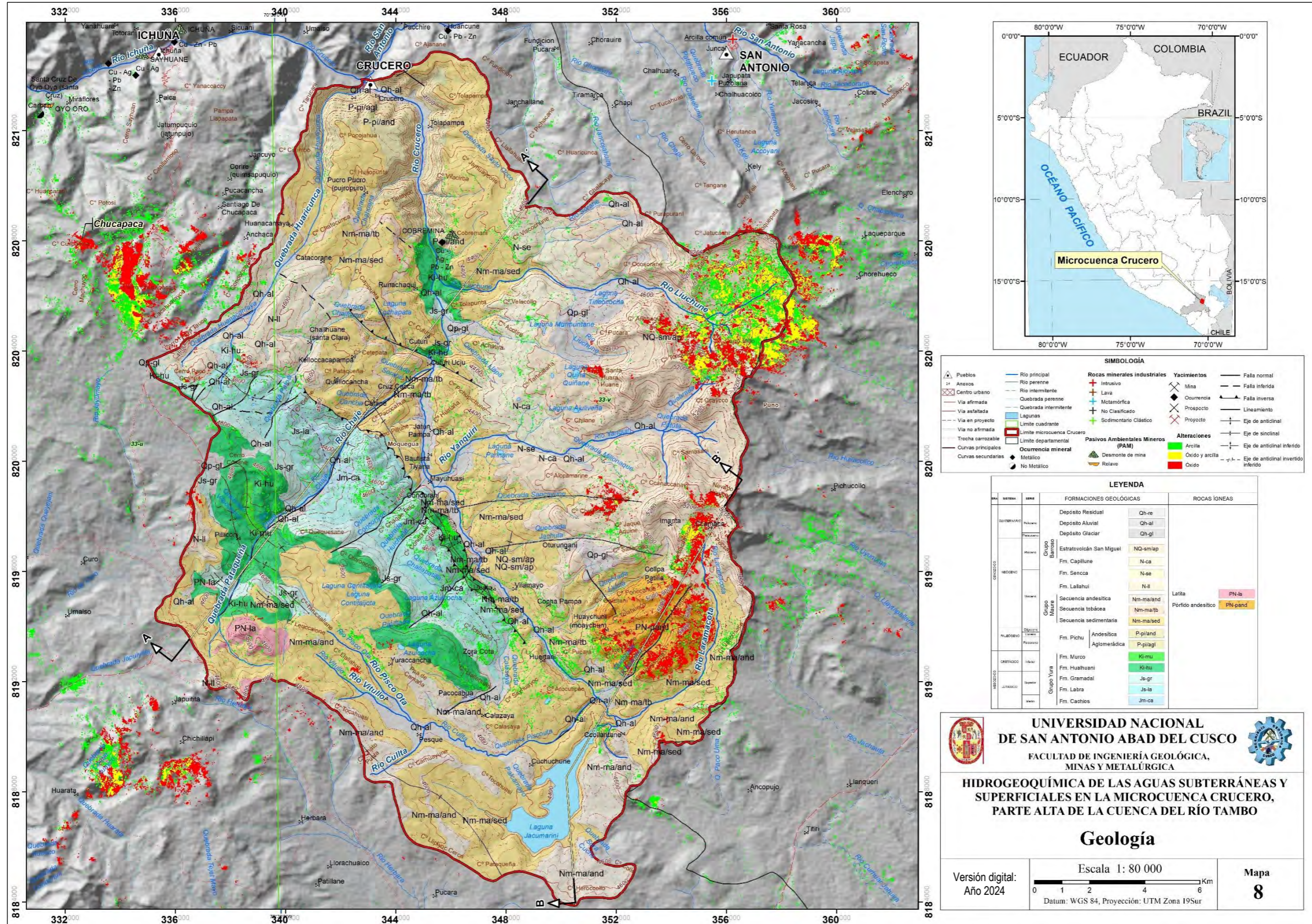
Finalmente, Cuellar (2001) menciona que en la hoja de Pichacani (33-v), afloran cuerpos subvolcánicos del Paleógeno-Neógeno (Figura 44). El cuerpo de pórfido andesítico aflora en las cercanías del proyecto minero San Gabriel (antes denominado “Chucapaca”) y el cuerpo pórfido diorítico aflora en las cercanías del proyecto minero San Antonio de Esquilache (Zavaleta, 2018)



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**

Figura 44

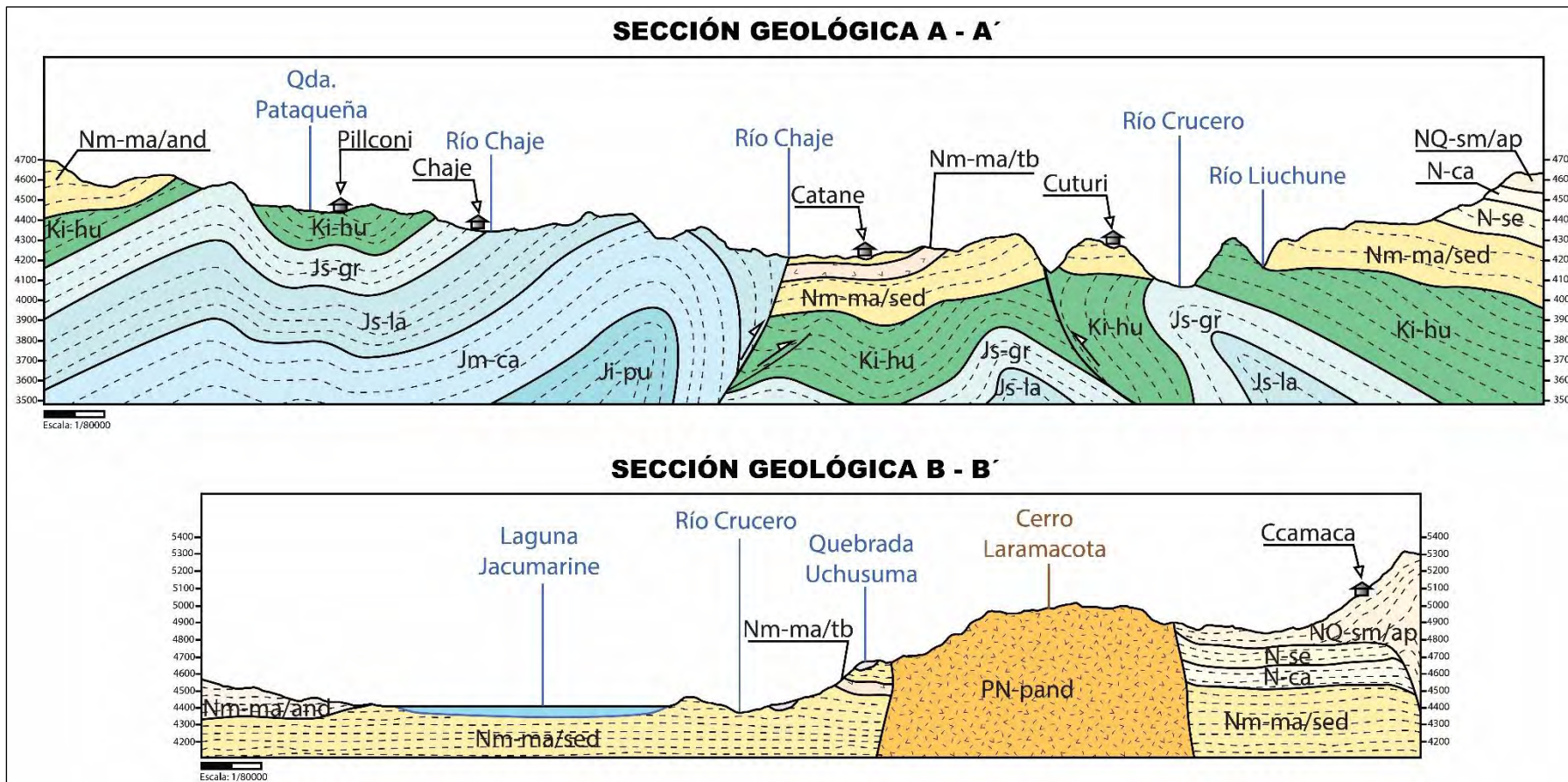
Mapa de geología local de la microcuenca Crucero



Fuente: Elaboración propia.



Figura 45 Sección geológica A-A' y B-B', cortando en dirección noreste a suroeste de la microcuenca Crucero

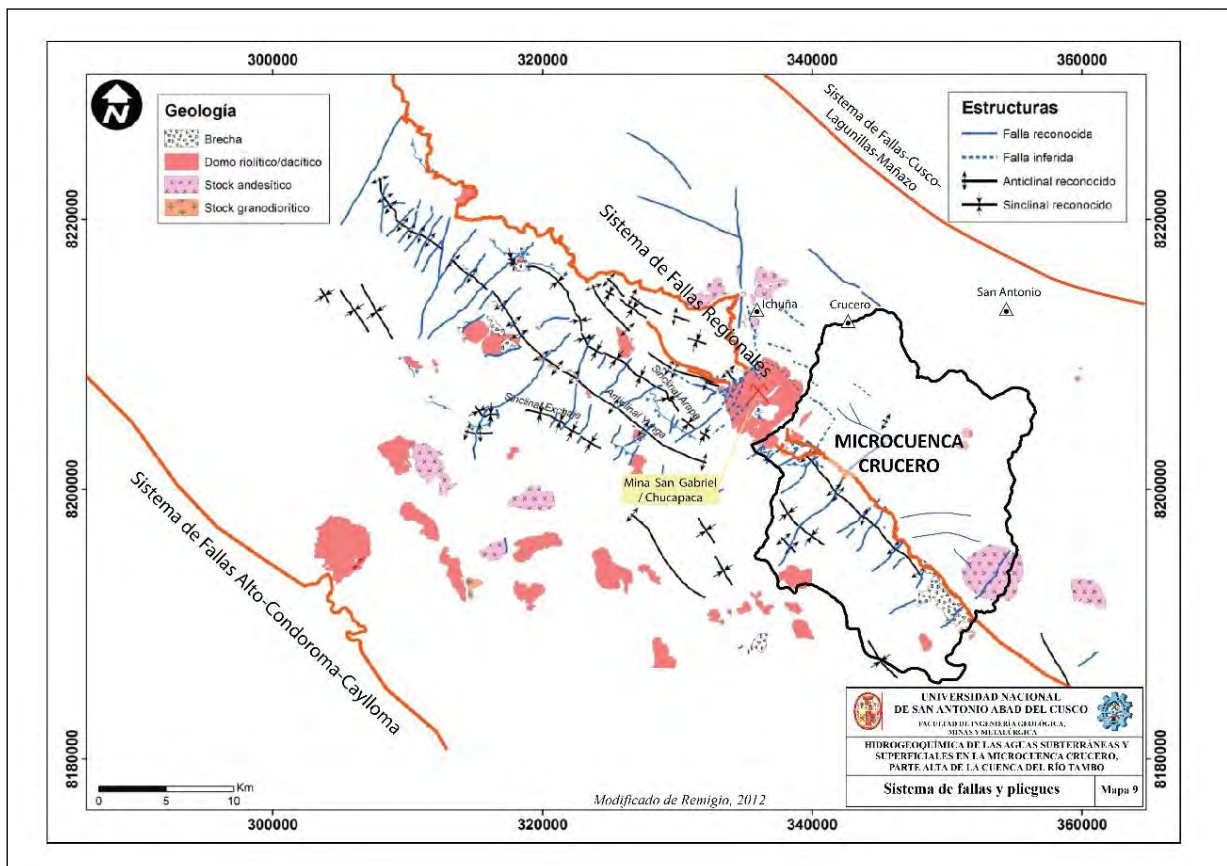


Fuente.: Elaboración propia.

3.5. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El área de estudio se encuentra limitada hacia el noreste por el sistema de fallas Cusco – Lagunillas - Mañazo y hacia al suroeste por el sistema de fallas Alto Condoroma – Caylloma (Figura 46), estos sistemas de fallas delimitan los dominios geotectónicos de la Cordillera Occidental y el Alto Condoroma Caylloma (García, 2017), estas estructuras a su vez controlan un corredor metalogenético (Remigio, 2012).

Figura 46 Geología estructural a escala regional para la microcuenca Crucero



Fuente: Modificado de Cuellar (2011) y Remigio (2012).

El área de estudio presenta dos zonas de interés desde el punto de vista de geología estructural (Figura 47), estos son:

3.5.1. ZONA NORESTE

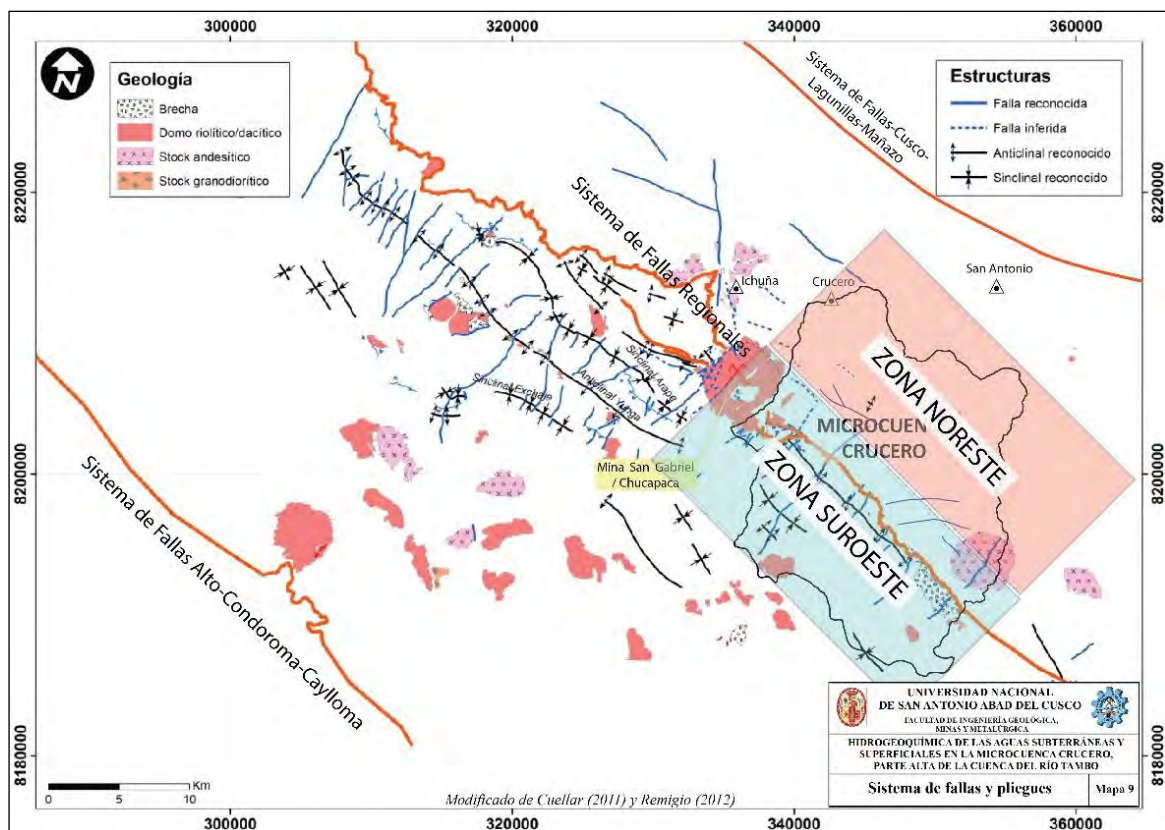
Tiene una ligera presencia de estructuras, entre estas se encuentran fallas inversas y lineamientos con dirección NO-SE, no se visualiza pliegues, por lo que se puede indicar que la zona no tiene una alta deformación relacionada a regímenes de esfuerzos compresivos y/o extensionales.

3.5.2. ZONA SUROESTE

La estructura dominante en este sector posee una orientación andina, es decir, noroeste a sureste, y el cual se compone por fallas inversas y pliegues asociados (Figura 47), conformados por una serie anticlinales y sinclinales; dichas estructuras afectan preponderantemente las unidades sedimentarias del Cretácico (Grupo Yura) y secuencias volcánicas del Mioceno.

Por otro lado, zona muestra fallas normales y lineamientos de dirección noreste a suroeste, y este a oeste (Figura 47), los cuales interceptan las estructuras NW-SE, dichas estructuras afectan en mayor proporción a las unidades volcánicas del Mioceno y Plioceno, como al Grupo Maure, formaciones Llallhui, Sencca, Capillune y al Grupo Barroso (Estratovolcán San Miguel), así mismo, afecta al subvolcánico pórfido andesítico y unidades del Cretácico.

Figura 47 Mapa geológico estructural por zonas estructurales y diagramas de dirección (rosas) de las principales fallas, perteneciente al sector Chucapaca y cuadrángulo de Pichacani



Fuente: Modificado de Cuellar (2011) y Remigio (2012).

3.6. EVOLUCIÓN TECTONO-SEDIMENTARIA

A partir del mapa geológico, el análisis estructural y las secciones estructurales de la zona de estudio, podemos deducir la cronología de eventos tectónicos para la microcuenca Crucero, teniendo como apoyo las investigaciones circundantes al área de estudio, realizadas por Cuellar (2011) y Remigio (2012).



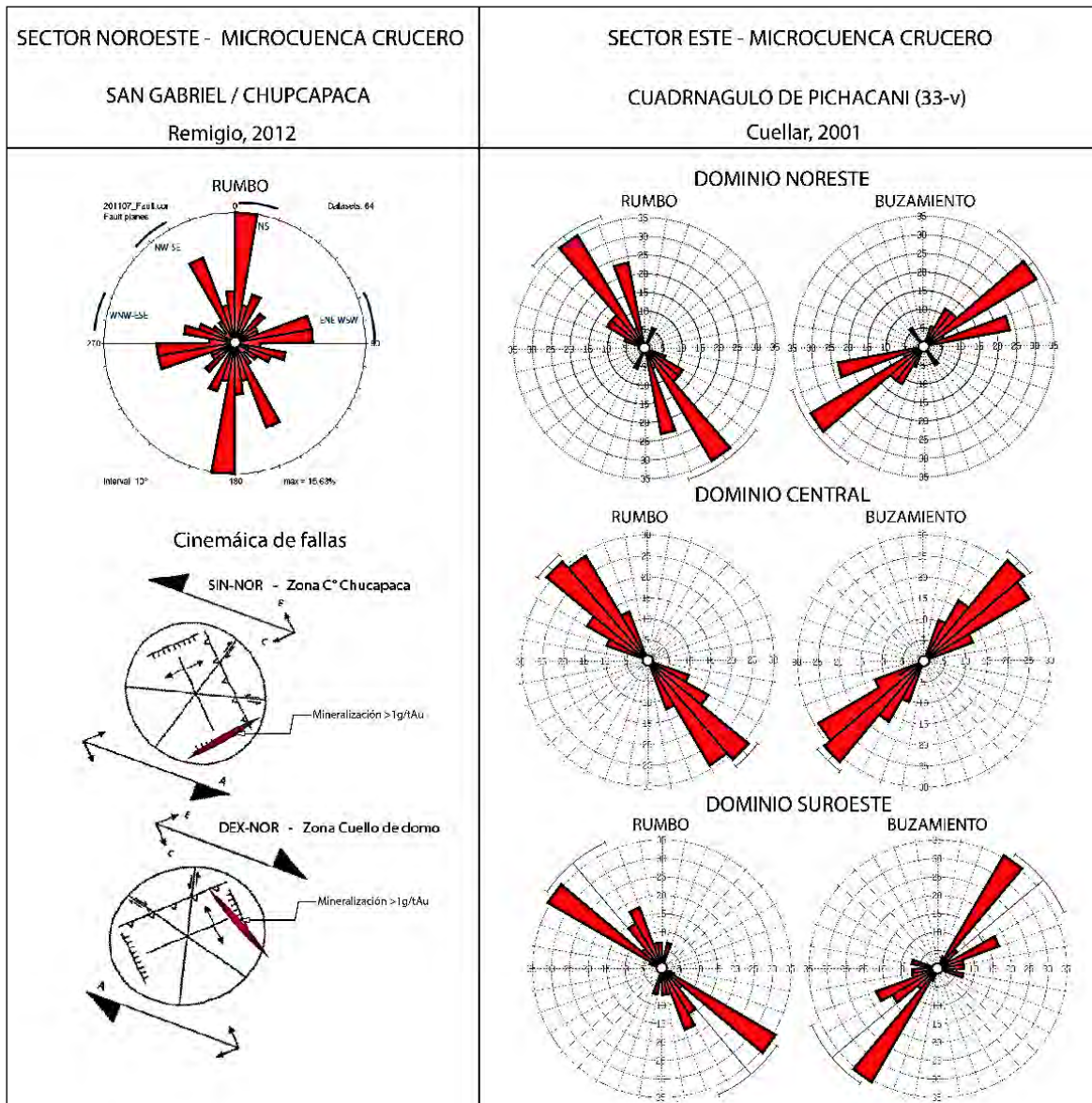
Según Cuellar (2011), el cuadrángulo de Pichacani (33-v), ubicado al este de microcuenca Crucero, define que las deformaciones más antiguas están representadas por los anticlinales y sinclinales kilométricos de dirección NO-SE, que afectan a rocas de Grupo Yura y formaciones Murco y Arcurquina que se encuentran dentro del Dominio central (Figura 48). Probablemente estas estructuras antiguas se han podido originar durante la fase Peruana 3 del Campaniano superior (~76-73 Ma); ya que este evento está bien marcado en la Región de Arequipa por el funcionamiento del sobre-escurrimiento de Cincha-Lluta (Vicente et al., 1979); sin embargo, la mayor deformación probablemente corresponda al evento tectónico Inca 1 (~44-42 Ma); la cual estaría evidenciado por la discordancia angular entre la Formación Pichu del Eoceno inferior y los depósitos Mesozoicos (Grupo Yura, formaciones Murco y Acurquina).

Un tercer evento de deformación estaría representado por el pliegue de dirección NNO-SSE del Dominio Nororiental, afectando suavemente a las estructuras ya formadas y generando algunas fallas de rumbo principalmente dextrales, ubicadas en el *Dominio* Central (Figura 46). Esta fase correspondería al evento tectónico Quechua 1 (~20-17 Ma), el cual probablemente haya generado la apertura de la cuenca Maure (Cuellar, 2011).

Por otro lado, se tiene un cuarto evento tectónico, representado por el sinclinal de Huaccochullo (dirección NO-SE), el cual afecta a depósitos del Grupo Maure, del Dominio Suroeste, esta deformación probablemente esté relacionado con el evento tectónico Quechua 2 (~10 Ma) (Cuellar, 2011). Según Remigio, 2012 indica que hacia el sector del cerro Chucapaca, ubicado al noroeste de la microcuenca Crucero, precisar que la cronología absoluta de las fallas estudiadas se genera después de los 12 Ma, es decir se relaciona a la edad relativa del complejo volcánico observado para las zonas circundantes a la microcuenca Crucero Las fallas deben pertenecer a la fase tectónica Quechua II o Quechua III (Figura 48).

En la zona de estudio las fallas han sido generadas por tres movimientos de las fallas andinas: sinextral-normal, dextral-normal y dextral-inverso (Figura 46), para la cronología relativa de las fallas se tuvo en cuenta la ubicación espacial de las fallas. (Remigio, 2012) indica que el movimiento posterior al emplazamiento del complejo volcánico ha sido el sistema sinextral-normal seguido del sistema dextral-normal (Siddorn y Gradim, 2010), y finalmente el movimiento dextral-inverso, ocurre después a los otros sistemas anteriores mencionados.

Figura 48 Diagramas de dirección (rosas) de las principales fallas para el sector Chucapaca y cuadrángulo de Pichacani.



Fuente: Modificado de Cuellar, 2011 y Remigio, 2012.

3.7. GEOLOGÍA ECONÓMICA

Según Zavaleta (2018), el área de estudio se encuentra en la franja de Pórfidos-Skarn de Cu-Mo (Au, Zn) relacionado a depósitos de Cu-Au-Fe con intrusivos del Eoceno-Oligoceno, franja de depósitos polimetálicos Pb-Zn-Cu con superposición epitermal de Au-Ag y la franja de Epitermales de Au-Ag del Mio-Plioceno (García, 2017). Según Zavaleta (2018), se tienen proyectos mineros metálicos de importancia alrededores del área de estudio los cuales son depósitos epitermales de alta sulfuración (San Gabriel / Chucapaca, Chapi Chiara), vetas polimetálicas (San Antonio de Esquilache, Conchopata, Virgen de Chapi, Santa Bárbara y Tres Marías) y pórfidos de Cu-Au (Pinaya), así mismo se tienen ocurrencias metálicas de Cu-Ag-Pb y Zn al norte de la microcuenca Crucero.



CAPÍTULO IV CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

4.1. GENERALIDADES

La caracterización hidrogeológica es una metodología que se desarrolló a partir de la necesidad de representar cartográficamente las características hidrogeológicas de las formaciones geológicas, en particular aquellas que poseen aguas subterráneas con potencial para su prospección y explotación como acuíferos (Peña et al, 2010), las manifestaciones de aguas subterráneas a manera de manantiales captados, sin captar y fuentes termales en la zona de estudio se muestran en la Figura 49.

Para el desarrollo de esta caracterización hidrogeológica en cada una de las formaciones, se realizó basados en la litología como componente principal, se considera también la geomorfología como medios de recarga y circulación de agua (Tabla 10). Las propiedades hidráulicas de los materiales como la conductividad hidráulica (permeabilidad), la porosidad y la disposición estructural de los materiales, influyen en la recarga y descarga que poseen los diversos acuíferos (Carpio, 2013).

Los resultados muestran la importancia que tienen los acuíferos fisurados, en primer lugar, lo conforman los de origen volcánico, estos representan un 33 % del área total (Figura 50) y se encuentran ubicados en mayor proporción al noreste de la microcuenca Crucero (Figura 51), se encuentran conformados por las unidades geológicas del Grupo Maure, la Formación Pichu y el estratovolcán San Miguel. En segundo lugar, se tienen los acuíferos fisurados de origen sedimentario donde representan el 15 % del área total (Figura 50), se ubican al suroeste de la microcuenca Crucero (Figura 51) y lo conforman las formaciones del Grupo Yura.

Tabla 10 Caracterización hidrogeológica de la microcuenca Crucero

UNIDADES GEOLÓGICAS	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	CÓDIGO HIDROGEOLÓGICO
Depósitos aluviales	Qh-al	Gravas y arenas mal seleccionadas envueltas en una matriz limo-arenosa y areno-limosa.	Acuífero Poroso No Consolidado	APNC-al
Depósito glaciar	Qp-gl	Clastos angulosos a subangulosos envueltos en una matriz areno-limosa, intercalados con arenas.	Acuífero Poroso No Consolidado	APNC-gl
Depósitos residuales	Qh-re	Material disgregado por erosión, conformado por arenas y limos.	Acuífero Poroso No Consolidado	APNC-re
Fm. Gramadal	Js-gr	Intercalación de caliza gris oscuras de grano fino con delgados niveles de areniscas cuarzosas.	Acuífero Fisurado Sedimentario	AFS-gr
Fm. Hualhuani	Ki-hu	Areniscas cuarzosas de grano fino a medio de coloraciones blanquecinas intercalados con lutitas grises.	Acuífero Fisurado Sedimentario	AFS-hu
Fm. Labra	Js-la	Areniscas cuarzosas gris blanquecinas, intercaladas con areniscas calcáreas y delgados niveles de lutitas negruzcas.	Acuífero Fisurado Sedimentario	AFS-la
Fm. Llallahuí	N-ll	Intercalaciones de flujos lávicos porfiríticos a afáníticos de composición andesítica de colores gris verdosos, aglomerados y brechas volcánicas.	Acuífero Fisurado Volcánico	AFV-ll
Gpo. Maure	Nm-ma/and	Andesita porfirítica.	Acuífero Fisurado Volcánico	AFV-ma
Fm. Pichu	P-pi/agl	Andesitas, basaltos y aglomerados violáceos a gris verdosos.	Acuífero Fisurado Volcánico	AFV-pi
Estratovolcán San Miguel	NQ-sm/ap	Andesitas porfiríticas moderadamente fracturadas y alteradas.	Acuífero Volcánico	ATV-sm
Fm. Cachíos	Jm-ca	Lutitas con esporádicas intercalaciones de areniscas canalizadas y conglomerados, presentan nódulos calcáreos.	Acuífero Sedimentario	ATS-ca
Fm. Marco	Ki-mu	Areniscas pardo rojizas intercaladas por lutitas y limolitas pardas y verdes.	Acuífero Sedimentario	ATS-mu
Fm. Capillune	N-ca	Limolitas, areniscas y tobas retrabajadas de grano medio a grueso de colores amarillento-blanquecinas.	Acuífero Volcánico	ATV-ca
Lutita	PN-la	Lutita moderadamente fracturada.	Acuífero Volcánico	ATV-la
Grupo Maure	Nm-ma/tb	Tobas moderadamente soldadas de color blanco amarillento.	Acuífero Volcánico	ATV-ma
Pórfido andesítico	PN-pand	Andesita moderadamente fracturada.	Acuífero Volcánico	ATV-pand
Fm. Sencca	N-se	Tobas volcánicas clásticas, brechas, lavas andesíticas y aglomerado volcánico.	Acuífero Volcánico	ATV-se
Gpo. Maure	Nm-ma/sed	Conglomerados intercalados con areniscas de grano fino y delgados niveles de calizas.	Acuífero Volcánico Sedimentario	ATVS-ma

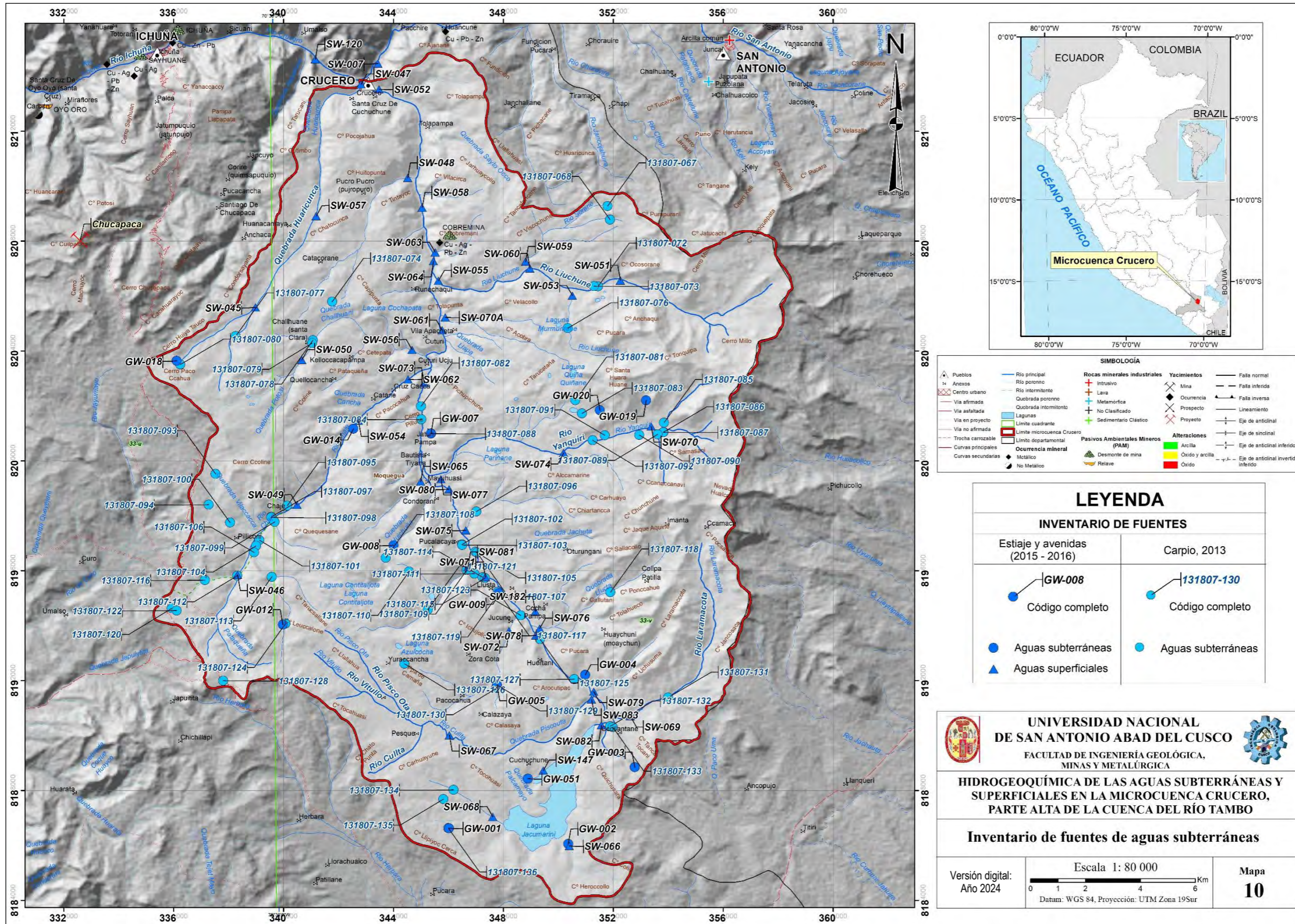
Fuente: Elaboración propia.



“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES

Figura 49

Mapa de inventario de fuentes de agua subterránea y superficial en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo

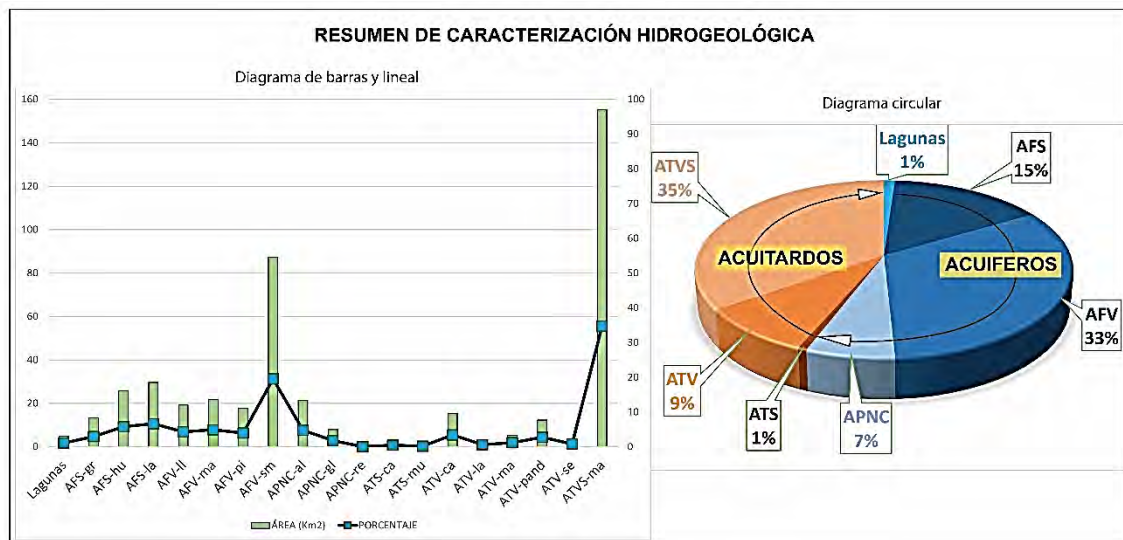


Fuente: Elaboración propia.



Finalmente, sumándose en menor proporción, se exponen los acuíferos porosos no consolidados con un 7 % (Figura 50), forman parte los depósitos cuaternarios (Figura 50). Cabe mencionar que los acuíferos descritos conforman los importantes reservorios de aguas subterráneas y zonas de recarga para la microcuenca Crucero. La caracterización elaborada junto con la información de la hidrogeoquímica, nos ayudan a interpretar el sistema de flujo subterráneo de la cuenca, así como la procedencia y zonas de recarga (Figura 51).

Figura 50 Gráfica de área (Km²) y porcentual de las unidades hidrogeológicas distribuidas en la microcuenca Crucero



Fuente: Elaboración propia.

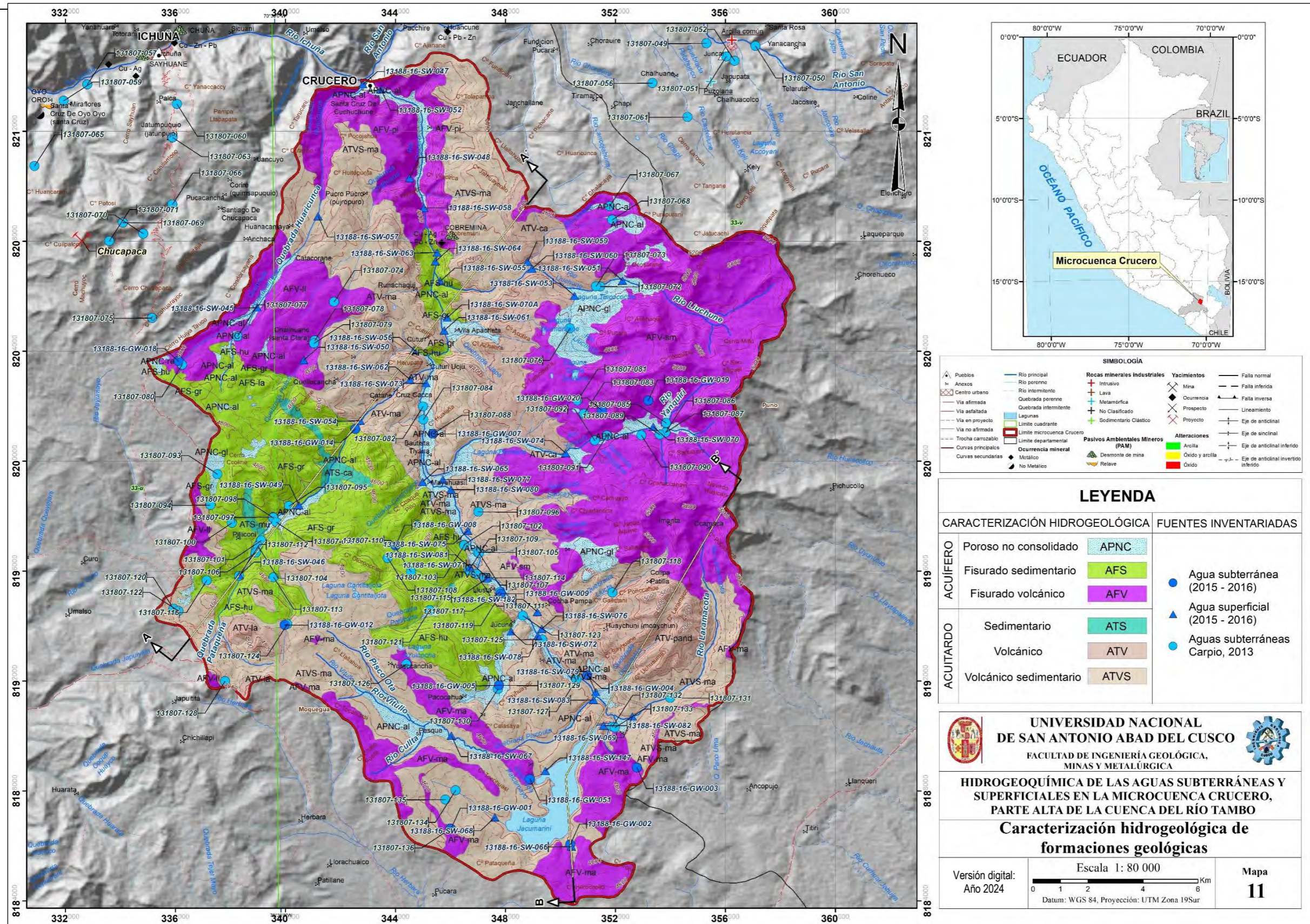
La Figura 51, expone las diferentes unidades hidrogeológicas diferenciadas por colores y tramas asignado en función del material predominante. La representación de colores y símbolos se tomó como guía las recomendaciones establecidas en el manual internacional para elaboración de mapas hidrogeológicos de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH) (Struckmeier y Margat, 1995). Desarrollando una adaptación para las condiciones y los tipos de litologías que presentan nuestro país ya que es muy variada, obteniendo las degradaciones, atenuaciones y matices de colores según sea la unidad hidrogeológica (Carpio, 2013).

El mapa hidrogeológico realizado para la microcuenca Crucero (Figura 51), se trabajó a una escala 1:60 000, el cual servirá de guía para analizar el comportamiento hidrogeológico de las rocas.



Figura 51

“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



Fuente: Elaboración propia.



4.2. ACUÍFERO POROSO NO CONSOLIDADO

Están constituidos por materiales detríticos no consolidados, porosos y permeables (Carpio, 2013), su composición litológica es primordialmente de gravas, arenas, limos y arcillas, encontrándose estas dos últimas litologías en menor proporción, por lo que podemos indicar que generalmente este tipo de acuíferos permitirá y facilitará la libre circulación y almacenamiento de las aguas subterráneas. Esta unidad representa el 7 % de las rocas caracterizadas hidrogeológicamente en el área de estudio (Figura 50). Así mismo, esta unidad presenta abundantes manantiales relacionados a su naturaleza inconsolidado el material y/o depósitos cuaternarios, entre estas manifestaciones de aguas subterráneas resaltan las manantiales aguas arriba al río Lluchuni, los cuales se encuentran en los depósitos aluviales y glaciares, tal como se puede observar en la Figura 52.

4.3. ACUÍFERO FISURADO VOLCÁNICO

Está conformado por rocas sedimentarias, volcánicas y volcano-sedimentarias. Este tipo de acuífero está condicionado por las fracturas y fallas normales e inversas de la zona de estudio. Se tiene, por ejemplo, el manantial Sorocucho quien surge a partir del contacto del acuífero fisurado y un acuitardo volcánico sedimentario (Grupo Maure), este manantial aporta un caudal de 10 L/s a la recarga de la laguna Jacumarine, donde este embalse de agua superficial está condicionado en subsuelo por el acuitardo, el cual ayuda a la retención del agua subterránea (Figura 52). A continuación, se tiene la siguiente descripción de las subunidades:

4.3.1. ACUÍFERO FISURADO VOLCÁNICO LLALLAHUI

Se conforma por flujos lávicos porfiríticos a afaníticos de composición andesítica de colores gris verdosos, aglomerados y brechas volcánicas, aflora al SW y W de la microcuenca Crucero, colíndate a los sectores Pillconi y Challhuane (Figura 52).

4.3.2. ACUÍFERO FISURADO VOLCÁNICO MAURE

Presenta secuencias de andesitas de moderada a altamente fracturadas, aflora al S y SE de la microcuenca Crucero, circundante a los sectores de Piscota, Pesque y Cuchuchune (Figura 52).

4.3.3. ACUÍFERO FISURADO VOLCÁNICO PICHU

Se constituye por andesitas, basaltos y aglomerados violáceos a gris verdosos, de moderadamente y altamente fracturado, se ubican hacia la parte norte y noroeste de la microcuenca Crucero, colíndate al anexo Santa Cruz de Cuchuchune y al poblado Crucero.

4.3.4. ACUÍFERO FISURADO ESTRATOVOLCÁN SAN MIGUEL

Se conforma por andesitas porfiríticas moderadamente fracturadas y alteradas, este acuífero se ubica hacia el noreste (Figura 50) y abarca una gran extensión en la microcuenca Crucero (38 %), así mismo, funciona como zonas de recarga de las aguas subterráneas para el sector (Figura 52).



4.4. ACUÍFERO FISURADO SEDIMENTARIO

Este tipo de litología es considerado un acuífero, y el cual se condiciona por las diaclasa y fracturas predominante a nivel del basamento rocoso. Estos acuíferos se ubican principalmente hacia el sector suroeste de la microcuenca Crucero; como afloramientos de aguas subterráneas se tienen los manantiales Chaje 2 (caudal de 25 l/s) y Surapunco (caudal de 22 l/s), colindantes a los sectores de Pillconi y Chaje. A continuación, se describen las siguientes subunidades:

4.4.1. ACUÍFERO FISURADO SEDIMENTARIO GRAMADAL

Constituido por intercalaciones de caliza gris oscuras de grano fino con delgados niveles de areniscas cuarzosas, moderadamente fracturados. Abarca una menor proporción (< 8 %) de la microcuenca Crucero, aflora por el sector de Pillconi y Runachaqui.

4.4.2. ACUÍFERO FISURADO SEDIMENTARIO HUALLHUANI

Se conforma por areniscas cuarzosas de grano fino a medio de coloraciones blanquecinas intercalados con niveles delgados de lutitas grises, moderadamente a muy fuertemente fracturado. Aflora hacia el sector SW y parte media de la microcuenca Crucero, circundante a los sectores Pillconi, Cuturl y Runachaqui. Esta unidad constituye un 5.7 % del área total en la microcuenca Crucero (Figura 52).

4.4.3. ACUÍFERO FISURADO SEDIMENTARIO LABRA

Compuesta por areniscas cuarzosas gris blanquecinas, intercaladas con areniscas calcáreas y delgados niveles de lutitas negruzcas, posee un 6.63 % del área total (Figura 50) y aflora al SW de la microcuenca Crucero, colindante al sector de Pillconi (Figura 52).

4.1. ACUITARDO SEDIMENTARIO

Esta unidad está conformada por formaciones geológicas de baja permeabilidad, que almacena agua, pero lo transmiten con mucha dificultad. Se ubica al SW de la microcuenca Crucero y abarca poca área (0.7 %), se tiene las siguientes subdivisiones (Figura 51 y 52):

4.1.1. ACUITARDO SEDIMENTARIO CACHIOS

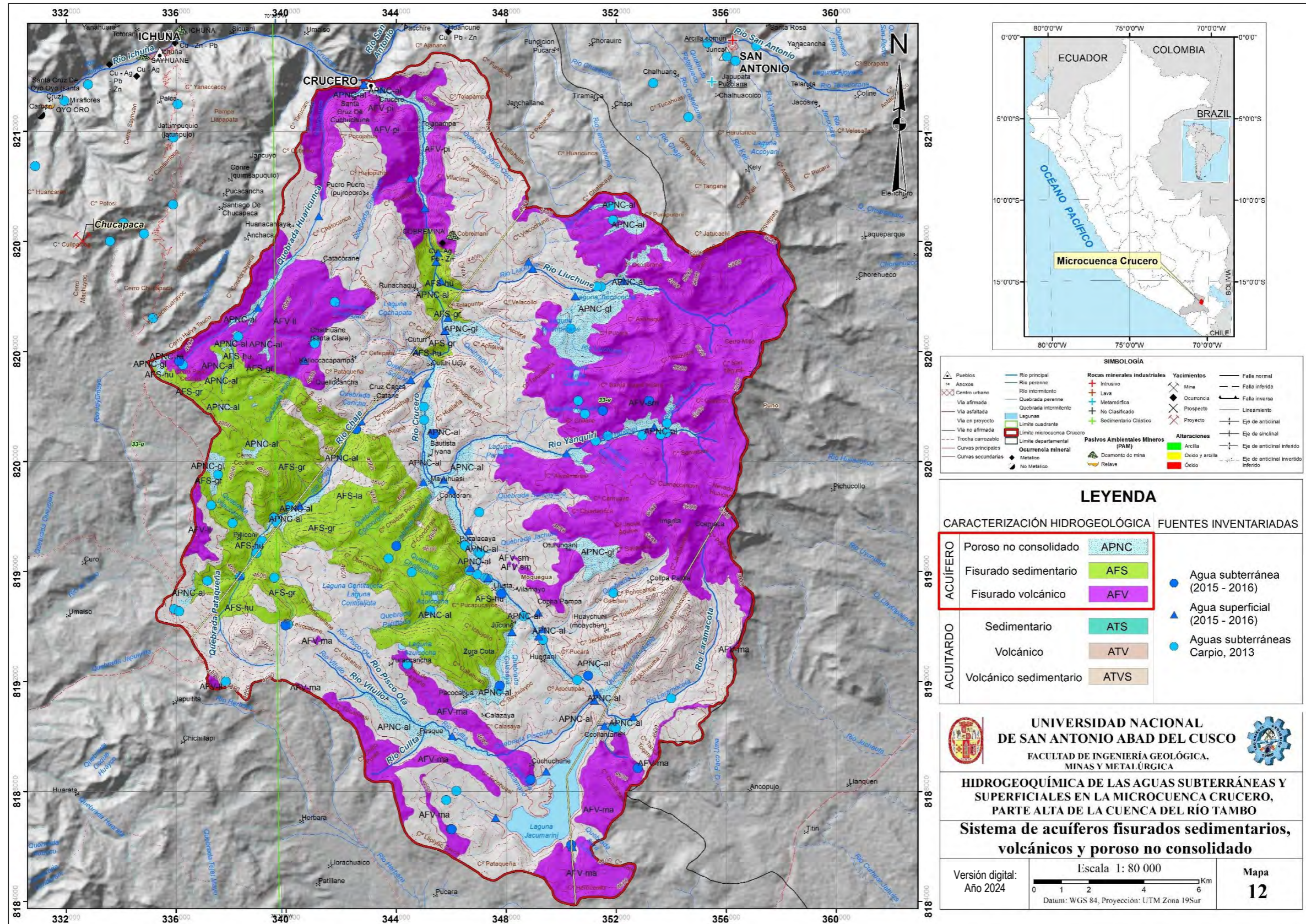
Se conforma por lutitas negruzcas con esporádicas intercalaciones de areniscas canalizadas y conglomerados. Posee una orientación NW-SE y se localiza por el sector de Chaje.



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**

Figura 52

Mapa de sistema acuífero fisurado sedimentario y volcánico para la microcuenca Crucero



Fuente: Elaboración propia.



4.1.2. ACUITARDO SEDIMENTARIO MURCO

Presenta areniscas pardo rojizas intercaladas por lutitas y limolitas pardas y verdes. Posee un afloramiento restringido en el sector de Pillconi con tendencias noroeste a sureste, aguas arriba del río Chaje (Figura 53).

4.2. ACUITARDO VOLCÁNICO

Se compone litológicamente por piroclastos, ignimbritas intercaladas con tobas, brecha piroclástica soldada, tobas, pómez, ceniza, algunos depósitos de travertino, lapilli, domos de lava dacítica o riolítica; algunas de estas rocas pueden presentar un alto grado de porosidad primaria, el cual tendría una gran capacidad de almacenar agua, sin embargo, su conductividad hidráulica (permeabilidad) es baja y solo se tiene la factibilidad de transmitir agua a través de fracturas y presión hidrostática (Figura 53).

4.2.1. ACUITARDO VOLCÁNICO CAPILLUNE

Presenta limolitas, areniscas y tobas retrabajadas de grano medio a grueso de colores amarillento-blanquecinas, aflora al E de la microcuenca Crucero con tendencia N-S, y representa un 3.43 % del área total (Figura 53).

4.2.2. ACUITARDO VOLCÁNICO LATITA

Se compone de rocas volcánicas de latita moderadamente fracturadas, se localiza un afloramiento aguas arriba de del río Chaje, colindante al sector de Pillconi (Figura 53).

4.2.3. ACUITARDO VOLCÁNICO MAURE

Presenta tobas moderadamente soldadas de color blanco amarillento, aflora aguas arriba a la quebrada Pataqueña.

4.2.4. ACUITARDO VOLCÁNICO PÓRFIDO ANDESÍTICO

Está constituido por el subvolcánico pórfido andesítico moderadamente fracturado, constituye un 2.7 % del área total (Figura 50). Presenta una geoforma de domo y/o montana de roca subvolcánica, se encuentra circundante a los sectores Collpa Patilla y Huaychuni (Figura 53).

4.2.5. ACUITARDO VOLCÁNICO SENCCA

Está conformado por tobas volcano clásticas, brechas, lavas andesíticas y aglomerados volcánicos. Aflora de manera restringida en la microcuenca Crucero, ubicándose aledaños a los ríos Liuchune y Yanquiri (Figura 53).



4.3. ACUITARDO VOLCÁNICO SEDIMENTARIO

Se compone litológicamente por piroclastos, lavas andesitas, ignimbritas intercaladas con tobas, brecha piroclástica soldada, tobas, pómez, ceniza y aglomerados (Carpio y Peña, 2020). Esta unidad posee una gran extensión en la microcuenca Crucero por lo cual constituye una roca confinante de mayor amplitud. Así mismo, se presentan algunos manantiales de gran caudal como el Humalaya (caudal de 90 l/s, ubicado alrededores de Pucalacaya), estos debido al control estructural puntual ya sea definido por fallas de rumbos y normales de direcciones noreste a suroeste (Figura 53). Seguidamente, se describen las siguientes subunidades:

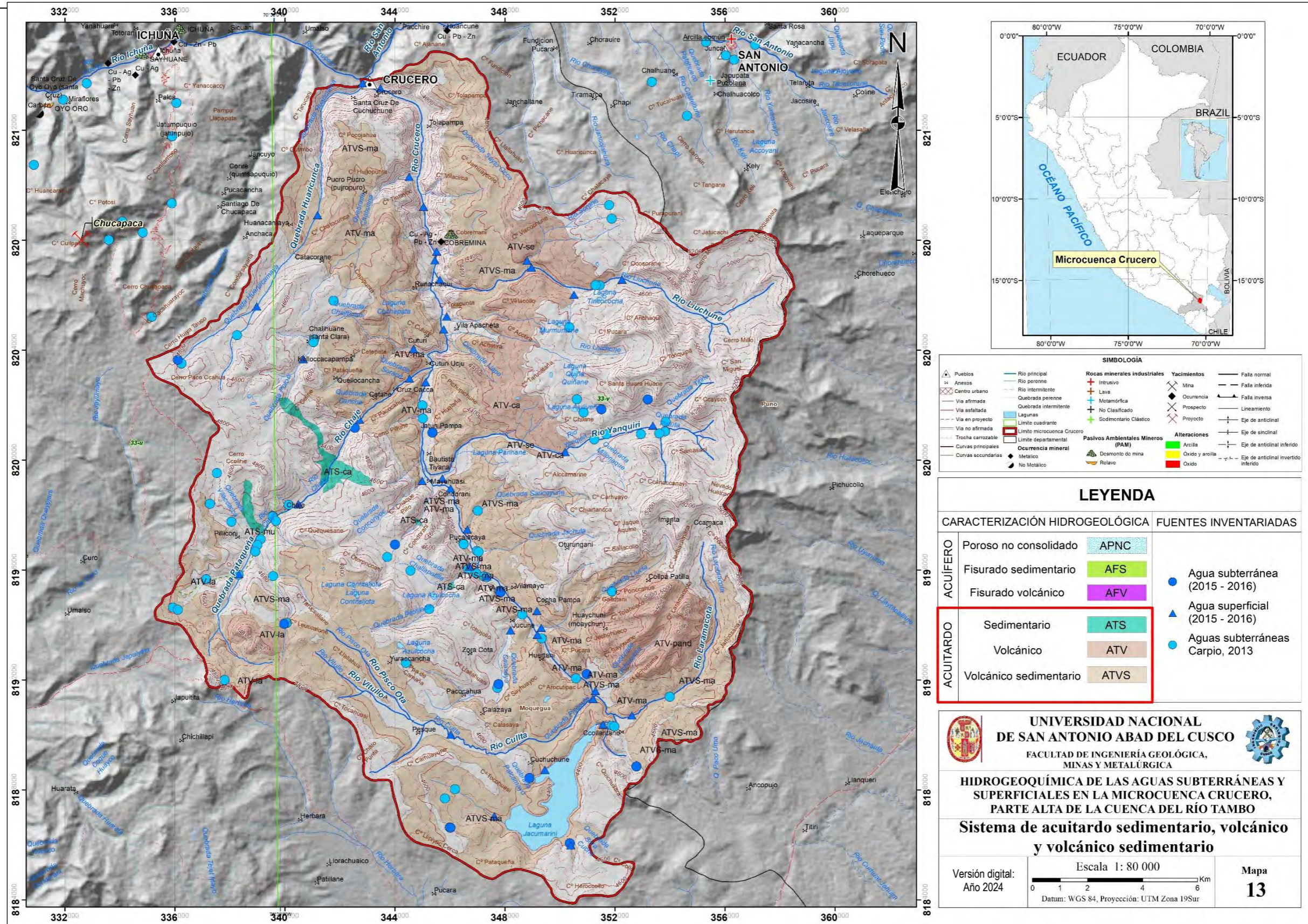
4.3.1. ACUITARDO VOLCÁNICO SEDIMENTARIO MAURE

Está representado por tobas retransportadas soldadas y no soldadas de coloraciones verdes a blancas intercaladas con algunos estratos de conglomerados con clastos angulosos y subredondeados (Zavaleta, 2018), así mismo presentan lutitas compactas de color verde. Esta unidad abarca una extensión 34.73 % del área total (Figura 50) por lo cual, constituye el principal acuitardo presente en la microcuenca Crucero, ubicado al norte, sur y este, colindante a los sectores de Cuchuchune, Huertani, Jucune, Llusta, Pucalacaya, Catane, Cruz Cacca, Cuturi y Tolapampa (Figura 53 y 54).



Figura 53

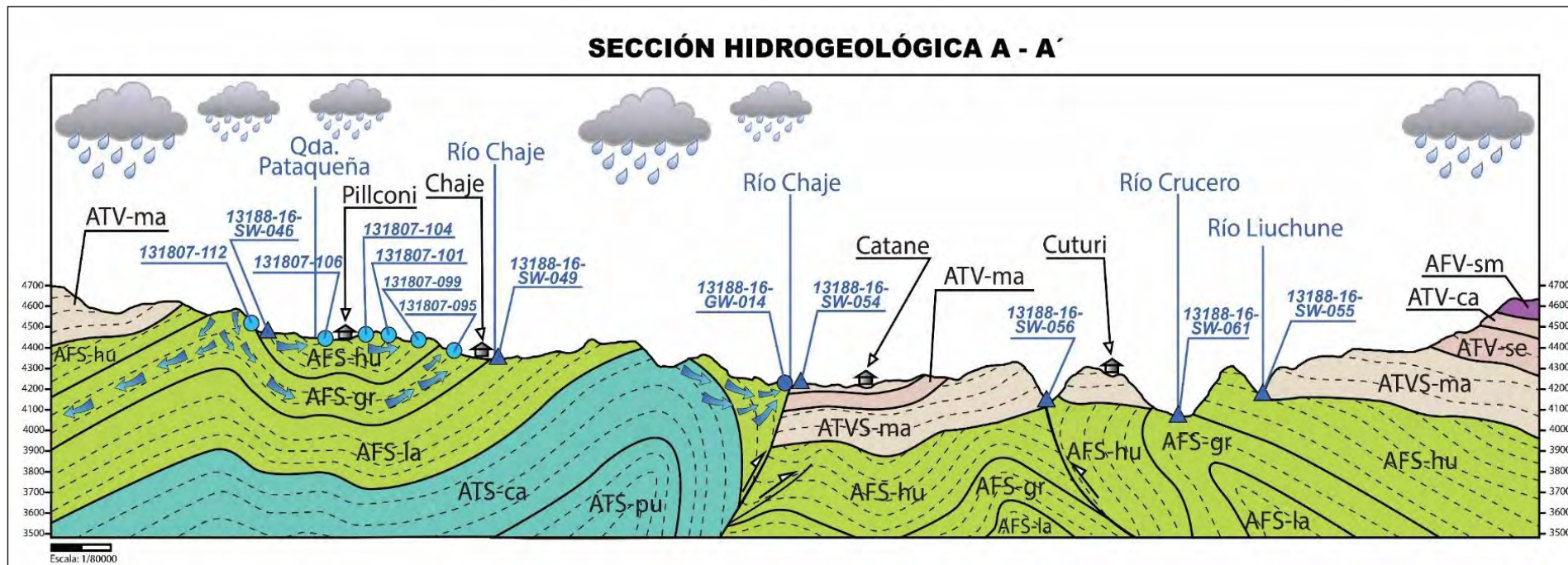
“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



Fuente: Elaboración propia.



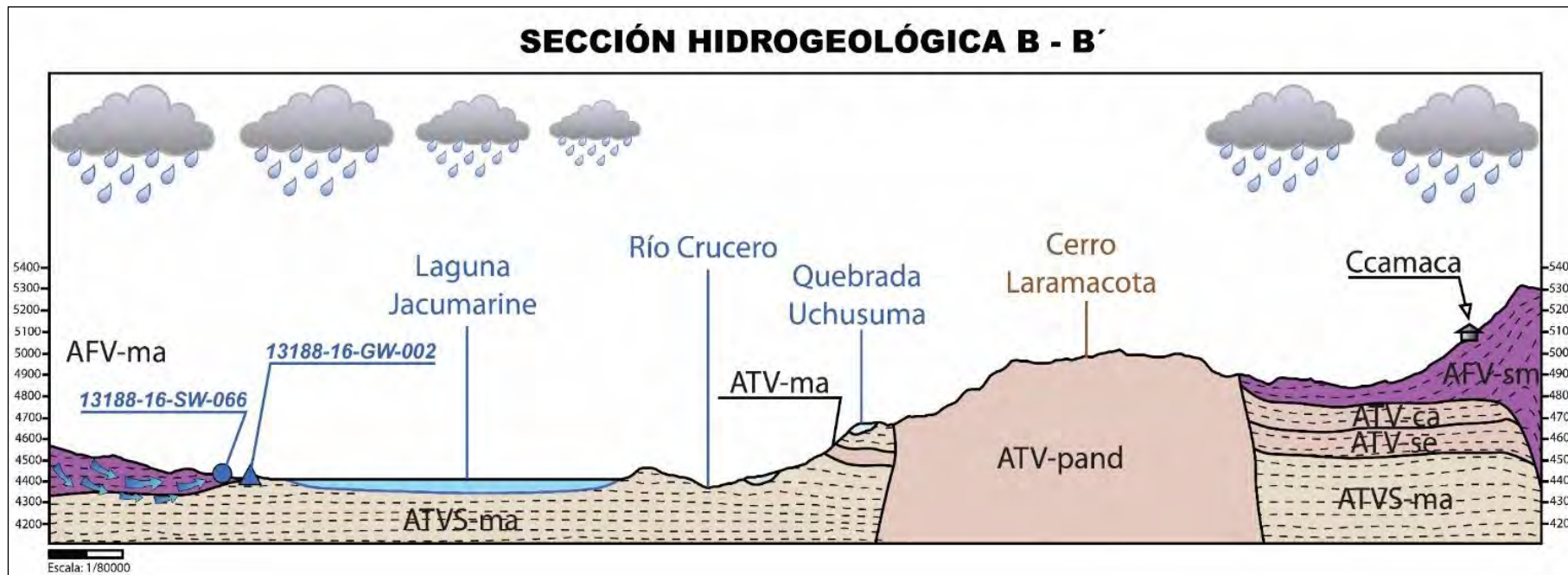
Figura 54 Modelo hidrogeológico conceptual de la sección geológica A-A' y B-B', cortando en dirección NE-SW en la microcuenca Crucero



Fuente: Elaboración propia.



Figura 55 Modelo hidrogeológico conceptual de la sección geológica A-A' y B-B', cortando en dirección NE-SW en la microcuenca Crucero



Fuente: Elaboración propia.



CAPÍTULO V ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICO

5.1. INVENTARIO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES

El desarrollo de los trabajos de campo en la microcuenca Crucero, se realizó en dos temporadas: Estiaje (setiembre - octubre del 2015) y avenidas (abril - mayo del 2016), se recopiló parámetros fisicoquímicos a nivel de cada estación y muestras de agua para obtener el análisis químico y determinar los elementos constituyentes del agua. La temporada de estiaje, se hizo un inventario de 52 estaciones (Figura 56 y Tabla 11) de las cuales se obtuvo muestras de aguas en todas las estaciones (36 superficiales y 14 subterráneas). Por otro lado, durante la temporada de avenidas, se monitoreó 56 estaciones (Figura 57 y Tabla 11) de las cuales se recolectó un total de 51 muestras de agua (37 superficial y 14 subterránea); en esta última temporada se observó que 05 estaciones no contaban con escorrentía superficial. Por otro lado, en el presente estudio se consideró 01 fuente de agua superficial del río San Antonio e Ichuña, para realizar las comparativas de los parámetros fisicoquímicos y calidad del agua, cuando el río Crucero confluye en los ríos indicados anteriormente.

Tabla 11 Resumen de las estaciones de muestreo, temporadas de estiaje y avenida

Microcuenca	Estiaje 2015				Avenidas 2016			
	Agua superficial	Agua subterránea	Sin escorrentía	Subtotal	Agua superficial	Agua subterránea	Sin escorrentía	Subtotal
Crucero	36	14	0	50	37	14	5	56
San Antonio-Jesús María	1	0	0	1	1	0	0	1
Ichuña	1	0	0	1	1	0	0	1
SUBTOTAL	38	14	0	52	39	14	5	58
TOTAL		52				58		

Fuente: Elaboración propia.

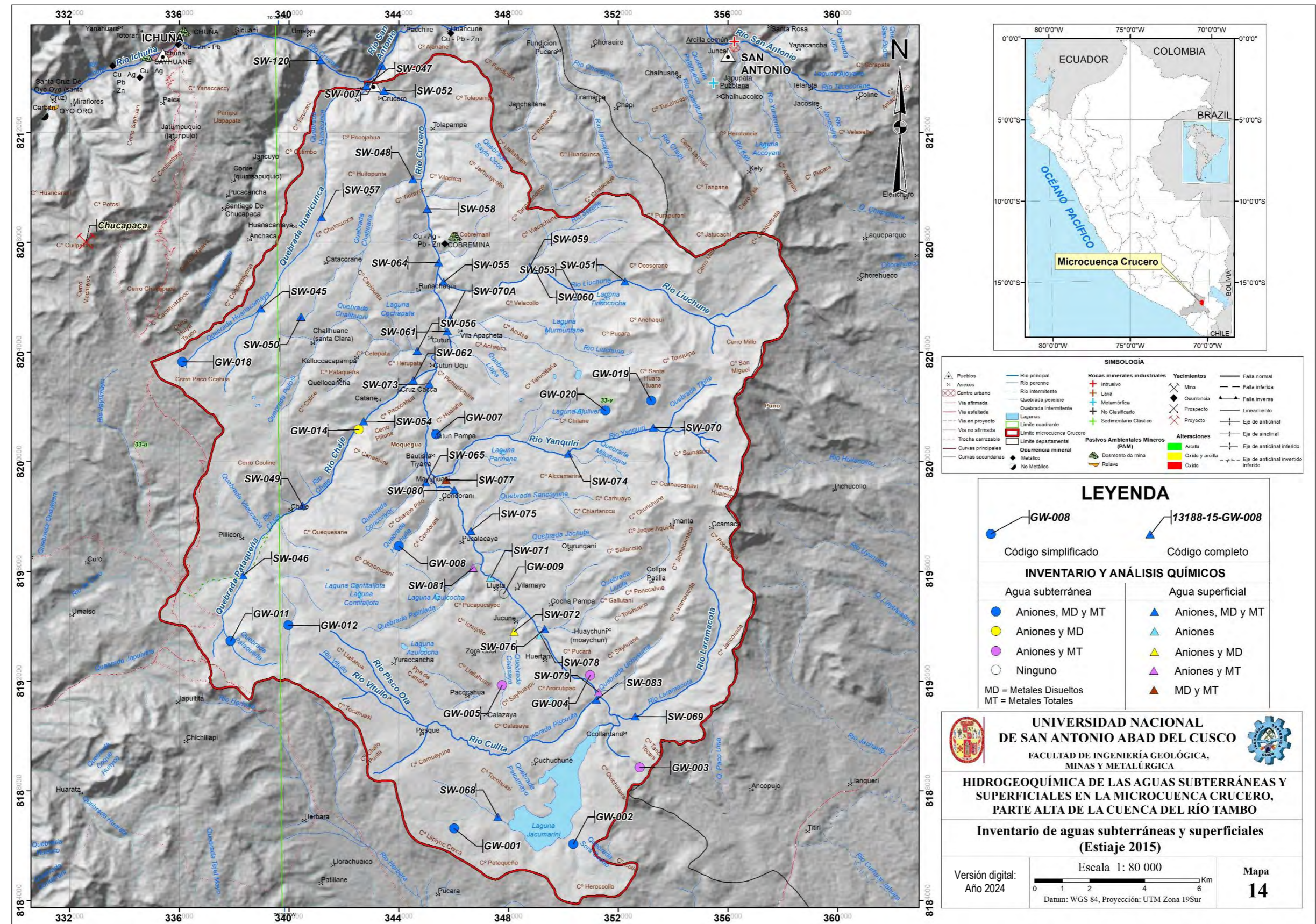
Cabe resaltar que, por problemas logísticos en campo y análisis químico en laboratorio durante la temporada de estiaje, algunas muestras de agua no cuentan con todos los análisis químicos. Tendiéndose así que en algunos casos las muestras no cuentan con análisis de aniones, y otros no tienen análisis por metales disueltos y/o totales, este detalle se puede observar en la Figura 56 y 57.

Por lo correspondiente a la temporada de avenidas no hubo inconvenientes con los análisis químicos. Las fuentes inventariadas presentan resultados de análisis químicos, los cuales fueron analizados y procesados por el laboratorio de INGEMMET.



Figura 56

“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”
 Mapade inventario de estaciones de aguas subterráneas y superficiales para la microcuenca Crucero, temporada de estiaje 2015



SIMBOLOGÍA

<ul style="list-style-type: none"> ▲ Puntos ⊗ Anexos ⊗ Centro urbano — Via afirmada — Via en proyecto — Via no afirmada — Trocha carrozable — Curvas principales — Curvas secundarias 	<ul style="list-style-type: none"> — Río principal — Río perenne — Río intermitente — Quebrada perenne — Quebrada intermitente — Lagunas — Límite cuadrante — Límite microcuenca Crucero — Límite departamental — Ocuencia mineral — No Metálico 	<ul style="list-style-type: none"> — Rocas minerales industriales — Intrusivo — Lava — Metamórfica — No Clasificado — Sedimentario Clásico 	<ul style="list-style-type: none"> — Yacimientos — Mina — Ocuencia — Prospecto — Proyecto — Alteraciones — Arcilla — Óxido y arcilla — Óxido — Eje de anticlinal — Eje de anticlinal inferido — Eje de anticlinal invertido — Eje de anticlinal invertido inferido
--	---	--	---

LEYENDA

● GW-008	▲ 13188-15-GW-008
Código simplificado	Código completo

INVENTARIO Y ANÁLISIS QUÍMICOS	
Agua subterránea	Agua superficial
● Aniones, MD y MT	▲ Aniones, MD y MT
● Aniones y MD	▲ Aniones
● Aniones y MT	▲ Aniones y MD
○ Ninguno	▲ Aniones y MT
	▲ MD y MT

MD = Metales Disueltos
MT = Metales Totales

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO

Inventario de aguas subterráneas y superficiales (Estiaje 2015)

Versión digital: Año 2024

Escala 1: 80 000

Datum: WGS 84, Proyección: UTM Zona 19Sur

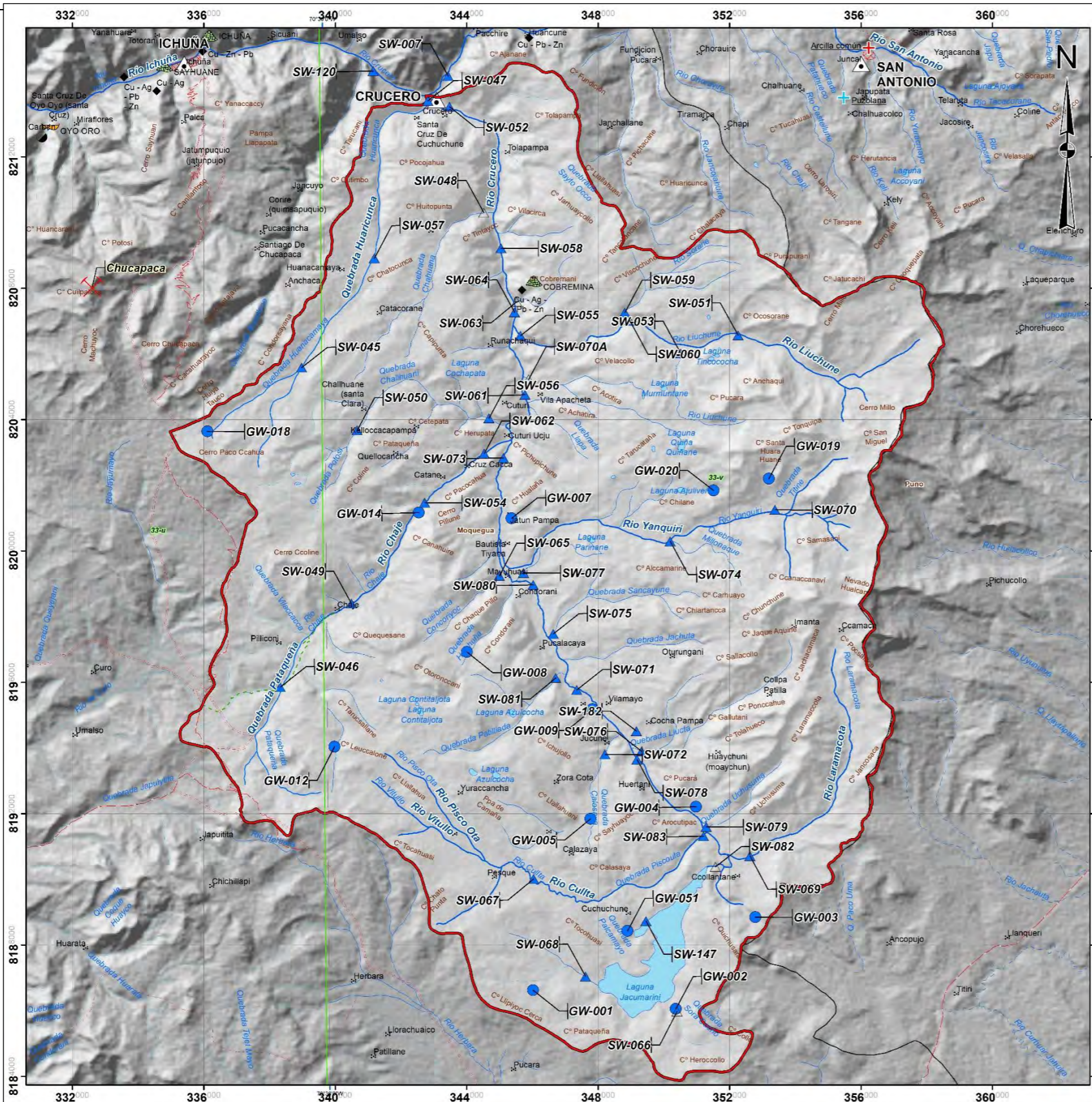
Mapa **14**

Fuente: Elaboración propia.



Figura 57

“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



SIMBOLOGÍA

<ul style="list-style-type: none"> ▲ Poblados ⊗ Anexos ⊠ Centro urbano — Via afirmada — Via en proyecto — Via no afirmada — Trocha carrozable — Curvas principales — Curvas secundarias 	<ul style="list-style-type: none"> — Río principal — Río perenne — Río intermitente — Quebrada perenne — Quebrada intermitente — Lagunas — Límite cuadrante — Límite microcuenca Crucero — Límite departamental — Ocuencia mineral ● Metálico ● No Metálico 	<ul style="list-style-type: none"> — Falla normal — Falla inversa — Lineamiento — Eje de anticlinal — Eje de sinclinal — Eje de anticlinal inferido — Eje de anticlinal invertido inferido 	<ul style="list-style-type: none"> — Rocas minerales Industriales — Intrusivo — Lava — Metamórfica — No Clasificado — Sedimentario Clastico 	<ul style="list-style-type: none"> — Yacimientos — Mina — Ocuencia — Prospecto — Proyecto 	<ul style="list-style-type: none"> — Alteraciones — Arcilla — Óxido y arcilla — Óxido
--	---	---	---	--	---

LEYENDA

Código simplificado
 13188-16-GW-008 Código completo

INVENTARIO Y ANÁLISIS QUÍMICOS	
Agua subterránea	Agua superficial
● Aniones, MD y MT	▲ Aniones, MD y MT
MD = Metales Disueltos MT = Metales Totales	△ Ninguno

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO
Inventario de aguas subterráneas y superficiales (Avenidas 2016)

Versión digital: Año 2024 | Escala 1: 80 000 | Mapa 15
 Datum: WGS 84, Proyección: UTM Zona 19S sur

Fuente: Elaboración propia.



5.2. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA

El presente análisis se ejecutó para la microcuenca Crucero, conllevó a realizar el inventario de estaciones a lo largo del río Crucero, el cual se forma (aguas arriba) a partir de la confluencia del río Lamacota y Cullta (al sur de la microcuenca), Chaje, Yanquiri y Liuchune (al norte de la microcuenca).

Los resultados de la campaña de campo ejecutada en la microcuenca Crucero ejecutado en la temporada de estiaje y avenidas, se realizó en los meses de setiembre del 2015, y abril y mayo del 2016, correspondientemente. El objetivo fue evaluar la variabilidad de los parámetros físicoquímicos y evaluar el comportamiento de los elementos disueltos y totales en las aguas superficiales y subterráneas, tal como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12 Resumen de parámetros físicoquímicos, temporadas de estiaje y avenida

TEMPORADA	Parámetros	ESTIAJE				AVENIDA					
		N° Datos	Máx.	Mín.	Media	Mediana	N° Datos	Máx.	Mín.	Media	Mediana
	T (°C)	50	44.3	4.5	13.6	12.9	51	43.9	5.3	12.5	12.3
	pH	50	8.8	3.6	7.1	7.3	51	8.6	3.6	7.3	7.6
	CE_uS/cm	50	3208.0	38.2	602.5	450.9	51	3557.0	41.9	556.3	426.8
	TDS_mg/L	50	1572.0	19.2	293.9	221.4	51	1744.0	21.0	273.5	209.2
	Salinidad_psu	50	1.7	0.1	0.4	0.3	51	1.9	0.1	0.3	0.3
	Resistividad Kohm-cm	50	26.2	0.3	4.6	2.2	51	23.9	0.3	4.7	2.3
	OD_%Sat	50	186.6	1.7	102.4	107.3	50	155.5	1.2	105.1	111.0
	OD_mgL	50	10.1	0.1	6.5	6.7	50	9.7	0.0	6.7	7.1
	Eh_mV	50	717.9	5.7	334.6	348.9	51	837.0	114.6	418.6	383.8
	ORP_mV	50	497.9	-225.7	114.6	128.9	51	617.0	-105.4	198.6	163.8

Fuente: Elaboración propia.

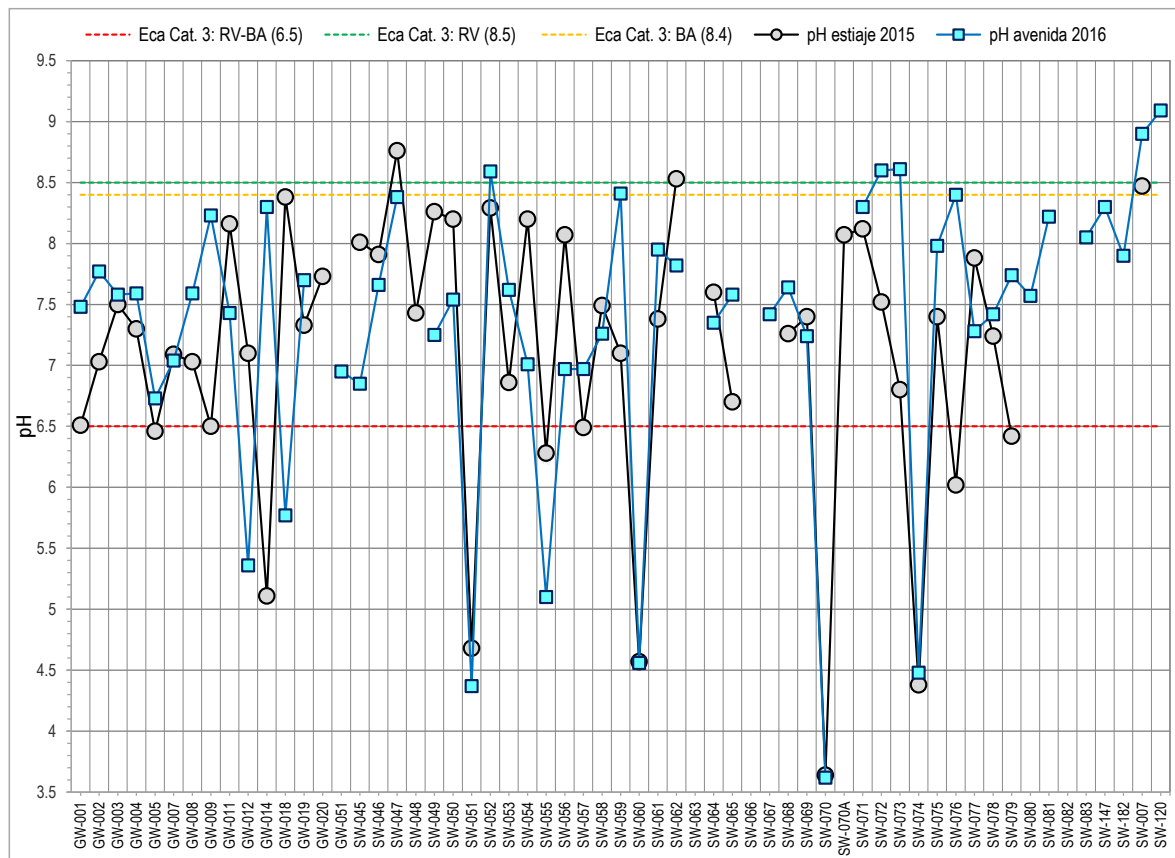
A través de la información recopilada, se desarrollaron mapas de variación de pH, Conductividad Eléctrica (CE), Salinidad, ORP y Eh, los cuales fueron comparados con la legislación peruana de acuerdo al DS N° 004-2017-MINAM: Modificación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua (ECA). De acuerdo a la Resolución Jefatural N° 270-2017-ANA, la microcuenca Crucero está clasificada con la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales. A continuación, se hace una breve descripción de cada parámetro físico-químico.

5.2.1. pH

El pH en la microcuenca Crucero presenta una moderada variabilidad, los valores máximos son 8.8 y 8.6, el valor mínimo es 3.6 para las temporadas de estiaje y avenidas, respectivamente; además muestra una mediana que varía de 7.3 a 7.6, por lo que podemos inferir que la población de datos (muestras) aumenta ligeramente su pH, tendiendo a ser más alcalino para la temporada de avenidas (Figura 58), posiblemente debido a la mayor descarga en los caudales condicionado por las precipitaciones en el área de estudio.



Figura 58 Variación del pH en la microcuenca Crucero, temporadas de estiaje y avenida.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 58, muestra que la mayoría de las estaciones monitoreadas en la microcuenca Crucero se encuentran en los rangos de 6.5 y 8.5 de pH. También se observa una moderada variación del pH en ambas temporadas, notándose una tendencia a incrementar los valores del pH (ligeramente básicos y/o alcalinos) en la temporada de avenidas debido al mayor aporte del caudal hídrico de la margen izquierda (Figura 58), donde afloran rocas sedimentarias (calizas, areniscas y en menos proporción lutitas).

Para la temporada de estiaje, se tiene que hacia la margen derecha del río Crucero, las aguas superficiales y subterráneas están asociadas al estratovolcán San Miguel compuesta por andesitas porfíricas con alteración argílica, presencia de minerales sulfurados (pirita) y óxidos de hierro, esta unidad forma parte de la naciente de los ríos Lluchune y Yanquiri, los cuales presentan fuentes con tendencia a drenaje ácido en la parte alta y media de estos ríos (SW-074:4.48; SW-070:3.62; GW-019: 5.77; SW-051:4.37; SW-060:4.56 y SW-055: 5.1), y a medida que llega a la parte baja los valores de pH tienden a ser neutros y menos ácidos (SW-055:5.1 y SW-077:7.28), relacionado al aporte de agua de otras quebradas y/o cursos intermitentes. Por otro lado, se observa se tienen estaciones de monitoreo que presentan valores ligeramente, ubicándose principalmente dichas estaciones en lo largo del río Crucero (Figura 58).

Cabe mencionar que en la Figura 58, las fuentes SW-007 y SW-120 pertenecientes al río San Antonio e Ichuña; muestra que el pH en temporada de estiaje en el río San Antonio predomina el pH alcalino y cuando este confluye aguas abajo con el río Crucero (pH neutro para cat.3) para formar el río Ichuña,



este último muestra un pH óptimo, donde no excede los límites establecidos por el ECA riego vegetal y bebida animales.

Caso contrario sucede en la temporada de avenidas, donde se observa que prepondera pH superiores a 8.4 y 8.5 (Figura 61 y 62); podemos finalizar, mencionando que para la preponderancia del pH ya sea que se relacionen a pH ácidos o básicos en las aguas superficiales, incidirá en gran forma el caudal que esta contenga, dado que a mayor caudal mayor carga de elementos suspendidos, contaminantes (en el caso de tener un foco contaminante aguas arriba), entre otros.

Respecto a las aguas subterráneas, presentan se tiene similar comportamiento en ambas estaciones, encontrándose valores de pH en el rango de 6.5 a 8.5. Sin embargo, se observa que 02 fuentes que muestran un comportamiento diferente, primeramente, se tiene la fuente termal Calazaya, la cual registra un valor de pH de 6.46 (ligeramente ácido) en estiaje y avenida en 6.73 (Figura 58), probablemente relacionado a la concentración del ion sulfato que precipita de esta fuente.

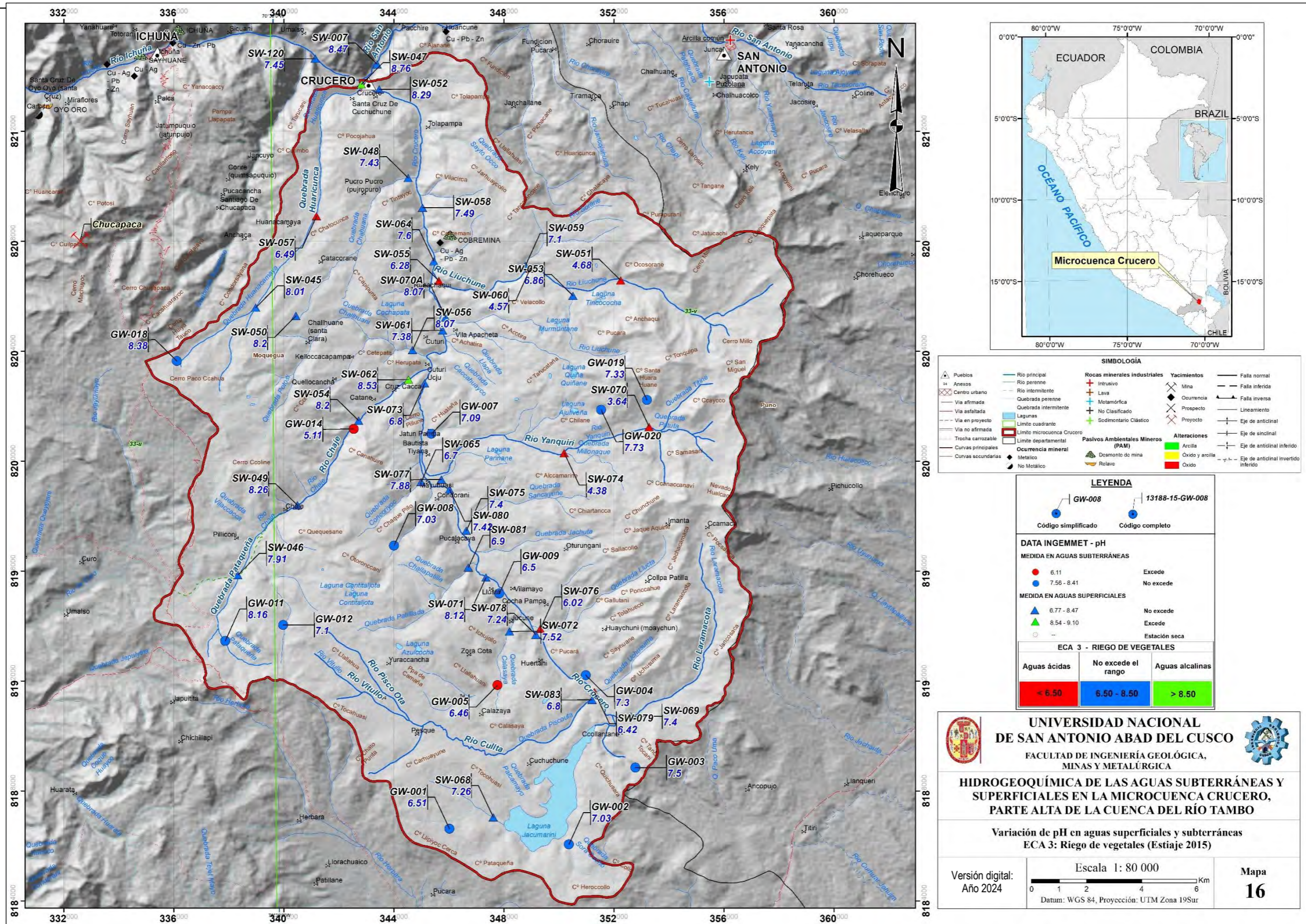
En segundo lugar, se tiene el manantial GW-014, ubicado en la parte baja del río Chaje, presenta un pH ligeramente ácido de 5.11 en estiaje y 5.38 en avenidas, esta fuente presenta un caudal mínimo (<0.5 l/s), con presencia de abundantes precipitados de óxido de hierro, dicha surgencia está condicionada por una falla inversa de dirección NW-SE que pone en contacto las secuencias del Grupo Yura (Jurásico-Cretácico) con el Grupo Maure (Neógeno), se puede inferir que la concentración de los óxidos de hierro se generan a causa de la recarga e infiltración del agua en las secuencias lutáceas de la Formación Maure (caracterizado como un acuitardo), en donde el agua tiene más tiempo de permanencia en las rocas ferro-alumínicas (arcillas) y estas se descargan a través de la zona de falla, tal cual se muestra en el modelo hidrogeológico conceptual propuesto (Figura 58).

La microcuenca Crucero, de acuerdo al ECA-Cat. 3 clasifica al pH apto para el Riego de vegetales entre 6.5 a 8.5 (Figura 59 y 61) y para la Bebida de animales entre 6.5 a 8.4 (Figura 60 y 62). Los valores de pH que se sitúan por debajo o encima de estos límites establecidos, son considerados no aptos para la categoría 3. En la microcuenca Crucero 08 estaciones de monitoreo presentan valores de pH ácido a ligeramente ácidos y 05 estaciones valores ligeramente básicos.



Figura 59

"HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO"



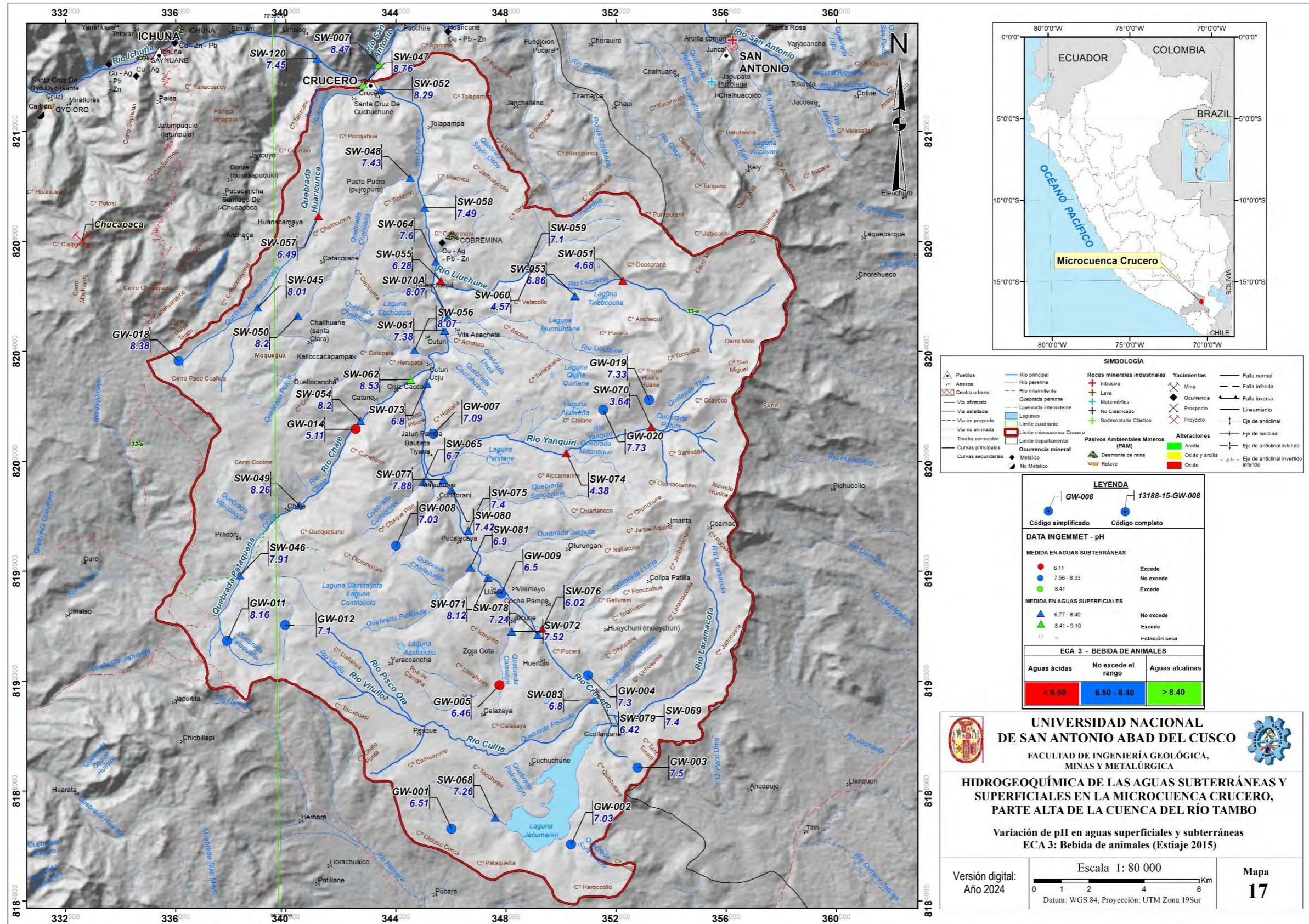
Fuente: Elaboración propia.



Figura 60

“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”

Variación del pH en aguas subterráneas y superficiales, ECA 3: Bebida de animales (Estiaje, 2015)

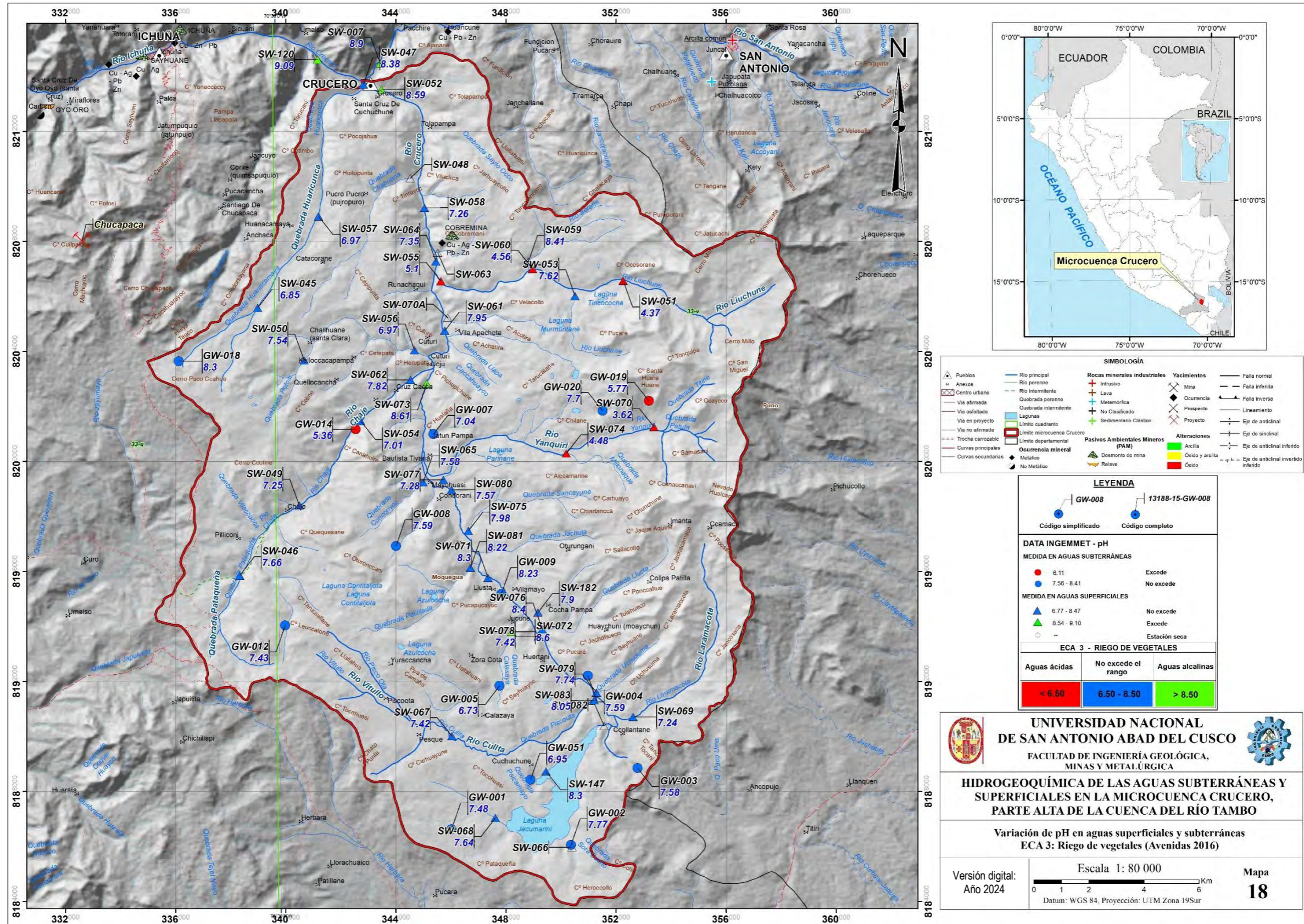


Fuente: Elaboración propia.



Figura 61

“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO” Variación del pH en aguas subterráneas y superficiales, ECA 3: Riego de vegetales (Avenida, 2016)

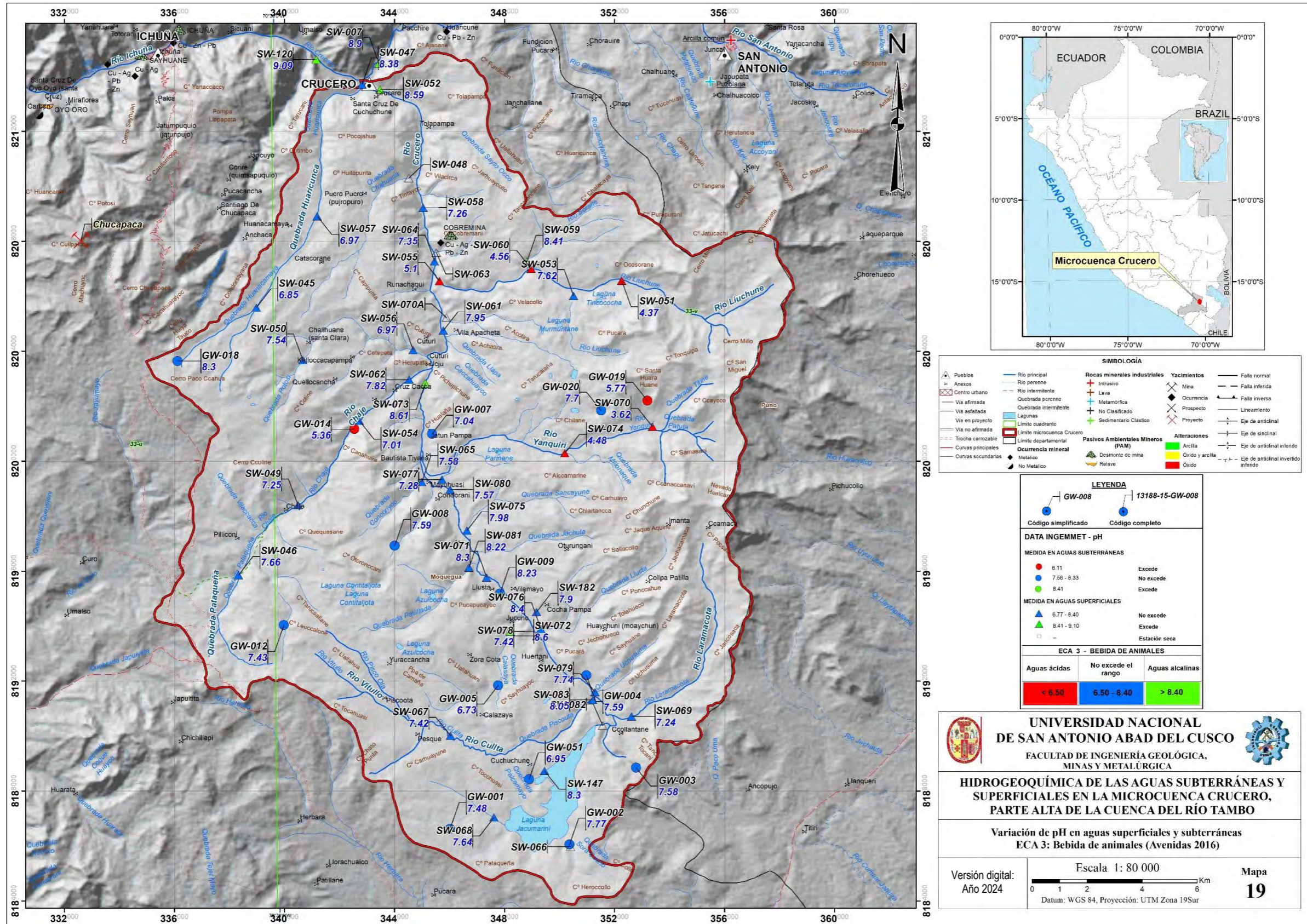


Fuente: Elaboración propia.



Figura 62

“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO” Variación del pH en aguas subterráneas y superficiales, ECA3: Bebida de animales (Avenida, 2016)



Fuente: Elaboración propia.

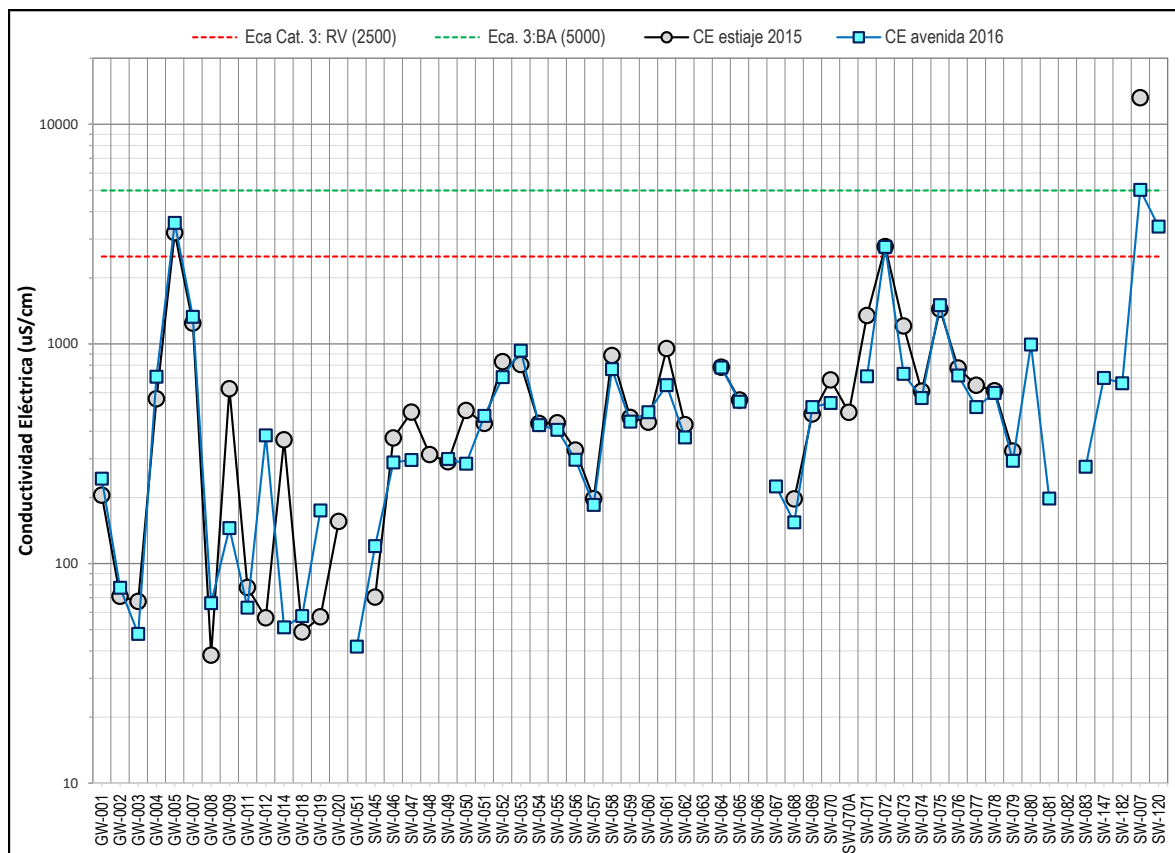


5.2.2. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE)

Para el análisis de la variación de la CE en la microcuenca Crucero se elaboraron mapas, cuadros y gráficos que fueron comparados con los ECA para el agua cat.3, donde se clasifica a la CE para el riego de vegetales como apto para valores menores a 2500 uS/cm (Figura 64, y 66), y para bebida de animales menores a 5000 uS/cm (Figura 65 y 67). La microcuenca Crucero registra 50 datos de CE en la época de estiaje y 51 datos en avenidas, los valores máximos son 3208 y 3557 uS/cm y los valores mínimos son 38.2 y 41.9 uS/cm (Tabla 12), para las temporadas de estiaje y avenidas, respectivamente.

El análisis estadístico de las fuentes inventariadas (Tabla 12), muestra una mediana de 450.9 uS/cm para la época de estiaje y 426.8 uS/cm para la época de avenidas, de acuerdo a estos datos la variabilidad de la CE en ambas épocas es moderada. A partir de los datos analizados, podemos mencionar que en la época de estiaje el agua en la microcuenca tiende a tener mayor concentración de sales disueltas en comparación a la de época de avenidas, probablemente porque en estiaje la temperatura del ambiente es mayor; por lo tanto, los niveles de evaporación incrementan, teniendo como resultado la mayor concentración de sales en los cuerpos de agua.

Figura 63 Variación de la conductividad eléctrica en la microcuenca Crucero, temporadas de estiaje y avenida



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 64, 65, 66 y 67 muestra la variación de las estaciones monitoreadas en ambas temporadas. Se puede observar que, del total de las estaciones monitoreada, dos de ellas presentan valores



superiores a 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se trata de la fuente termal Calazaya (GW-005) el cual registra un valor de CE de 3280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (estiaje) y 3557 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (avenidas); las altas concentraciones de aniones y cationes presentes en esta fuente termal, pueden ser debido a la interacción agua-roca en los medios sedimentarios (Grupo Yura) por donde circula subterráneamente. Esta fuente se ubica en las nacientes de la quebrada Calazaya, y aguas abajo en la misma quebrada antes de su confluencia con el río Crucero, las concentraciones de CE en la estación SW-072 es 2768 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (estiaje) y 2768 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (avenidas), debido a que la fuente termal vierte sus aguas directamente a la quebrada Calazaya (Figura 64, 65, 66 y 67).

Por lo correspondiente a las fuentes del río San Antonio e Ichuña (SW-007 y SW-120), se puede observar que, tanto para la temporada de estiaje y avenidas superan los 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ECA-cat. 3), podemos indicar que el agua contenida en los ríos muestra muy altas concentraciones de sales, por lo cual sus concentraciones de CE se elevan, según lo analizado en campo se pudo apreciar, que aguas arriba del río San Antonio se tiene la fuente termal Jesús María, donde sus aguas (caudal > 50 L/s) aportan al río San Antonio, por ende, puede ser el causante directo de que se tenga dicho parámetro de CE elevado (Figura 64, 65, 66 y 67).

En la microcuenca Crucero, podemos mencionar que solo dos estaciones de monitoreo superan los ECA-Cat. 3 para riego de vegetales tanto para las temporadas de estiaje y avenida (Figura 64, y 66), y para la categoría bebida de animales, se tiene que ninguna fuente supera los límites establecidos (Figura 65 y 67); a exceptos de las fuentes del río San Antonio e Ichuña, los cuales se encuentran fuera del área de estudio.

5.2.3. TEMPERUATURA

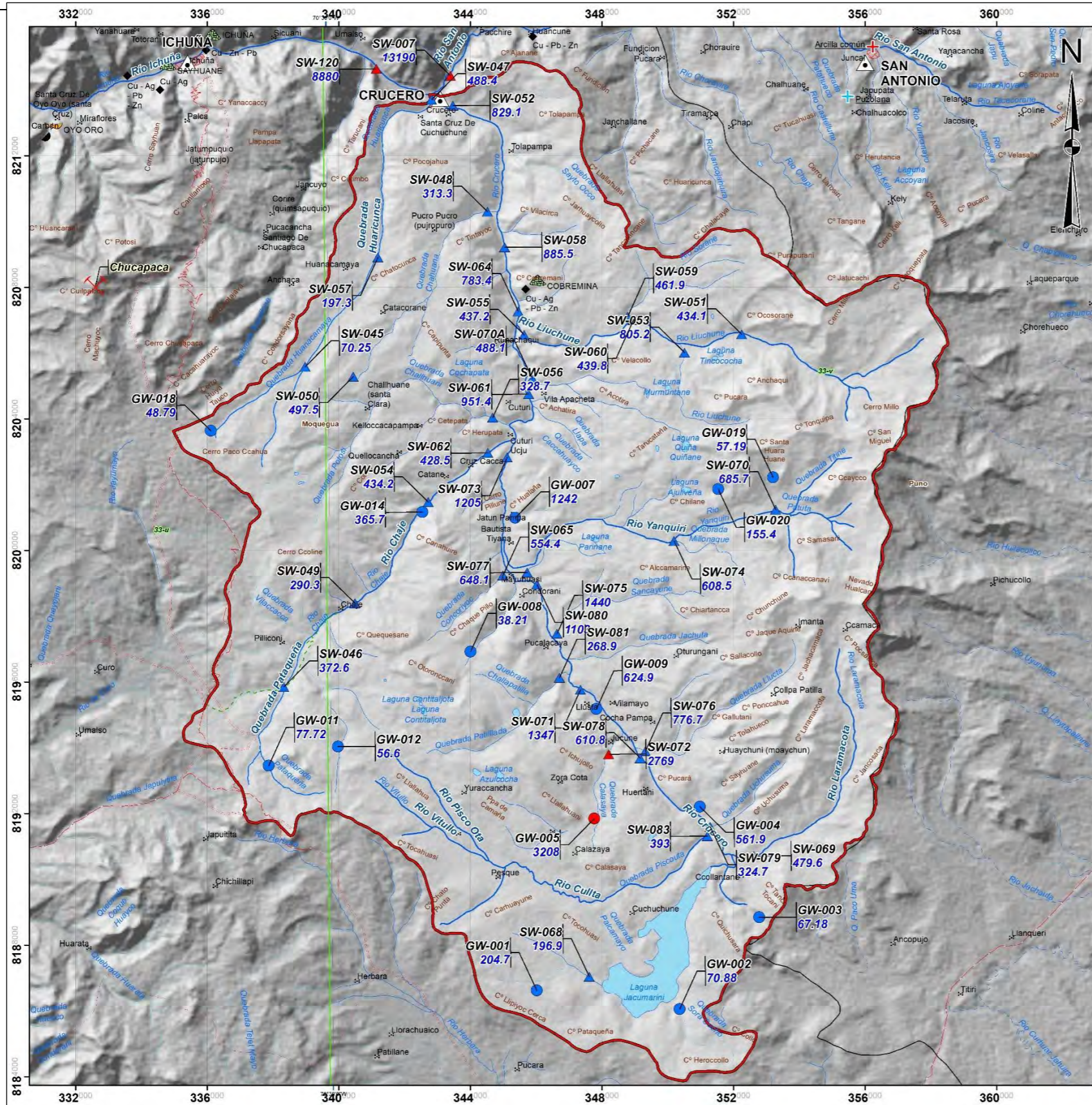
La microcuenca Crucero tiene una variación moderada de temperatura tanto para la temporada de estiaje y avenidas. El análisis estadístico (Cuadro 12), se muestra que la temperatura máxima de 44.3 °C (estiaje) y 44.9 °C (avenidas) correspondiente a la fuente termal Calazaya (GW-005) y tiene una temperatura mínima de 4.5 °C (estiaje) a la fuente GW-018 y 5.3 °C (avenidas), fuente SW-069. Se tiene una mediana de 12.9 °C (estiaje) y 12.3 °C (avenidas) por lo cual podemos inferir que la temperatura disminuye cuando se tiene más precipitaciones pluviales y cambios climáticos fluctuantes en la zona de estudio, así mismo, este parámetro guarda relación a la hora en que fueron medidos y extraídos los datos en la estación de muestreo.

En general, en la microcuenca Crucero predomina un tipo de agua de acuerdo a la temperatura, correspondiendo a fuentes o estaciones de aguas frías en los ríos, quebradas y manantiales, y menor proporción se tiene una sola estación de aguas calientes correspondiendo a la fuente termal Calazaya. La Figura 68, muestra que existe una mayor temperatura fuentes frías muestreadas en temporada de estiaje, en comparación a las de temporada de avenidas; mientras que la fuente termal, mantiene su temperatura, muy similar en ambas temporadas.



Figura 64

“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



SIMBOLOGÍA

▲ Puntos	— Río principal	■ Rocas minerales industriales	⊗ Yacimientos	— Falta normal
⊗ Anexos	— Río perenne	⊕ Intrusivo	⊗ Mina	— Falta inversa
⊗ Centro urbano	— Río intermitente	⊕ Lava	⊗ Ocurriencia	— Lineamiento
— Via afirmada	— Quebrada perenne	⊕ Metamórfica	⊗ Proyecto	— Eje de anticlinal
— Via asfaltada	— Quebrada intermitente	⊕ No Clasificado	⊗ Proyeto	— Eje de anticlinal
— Via no afirmada	— Lagunas	⊕ Sedimentario Clásico	⊗ Alteraciones	— Eje de anticlinal
— Trocha carrozable	— Límite cuadrante	— Pasivos Ambientales Mineros (PAM)	⊗ Arcilla	— Eje de anticlinal invertido
— Curvas principales	— Límite departamental	— Ocurriencia mineral	⊗ Óxido y arcilla	— Eje de anticlinal invertido
— Curvas secundarias	— Ocurriencia mineral	⊗ Metaico	⊗ Óxido	
		⊗ No Metálico	⊗ Relave	

LEYENDA

GW-008	13188-15-GW-008
Código simplificado	Código completo
DATA INGGEMMET - CE (uS/cm)	
MEDIDA EN AGUAS SUBTERRÁNEAS	
● 88.67 - 259.4	No excede
● 3297	Excede
MEDIDA EN AGUAS SUPERFICIALES	
▲ 11.70 - 967.5	No excede
▲ —	Estación seca
ECA 3 - RIEGO DE VEGETALES	
No excede el rango	Excede
0 - 2500	> 2500

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO

Variación de CE en aguas superficiales y subterráneas
 ECA 3: Riego de vegetales (Estiaje 2015)

Versión digital: Año 2024

Escala 1: 80 000

Datum: WGS 84, Proyección: UTM Zona 19Sur

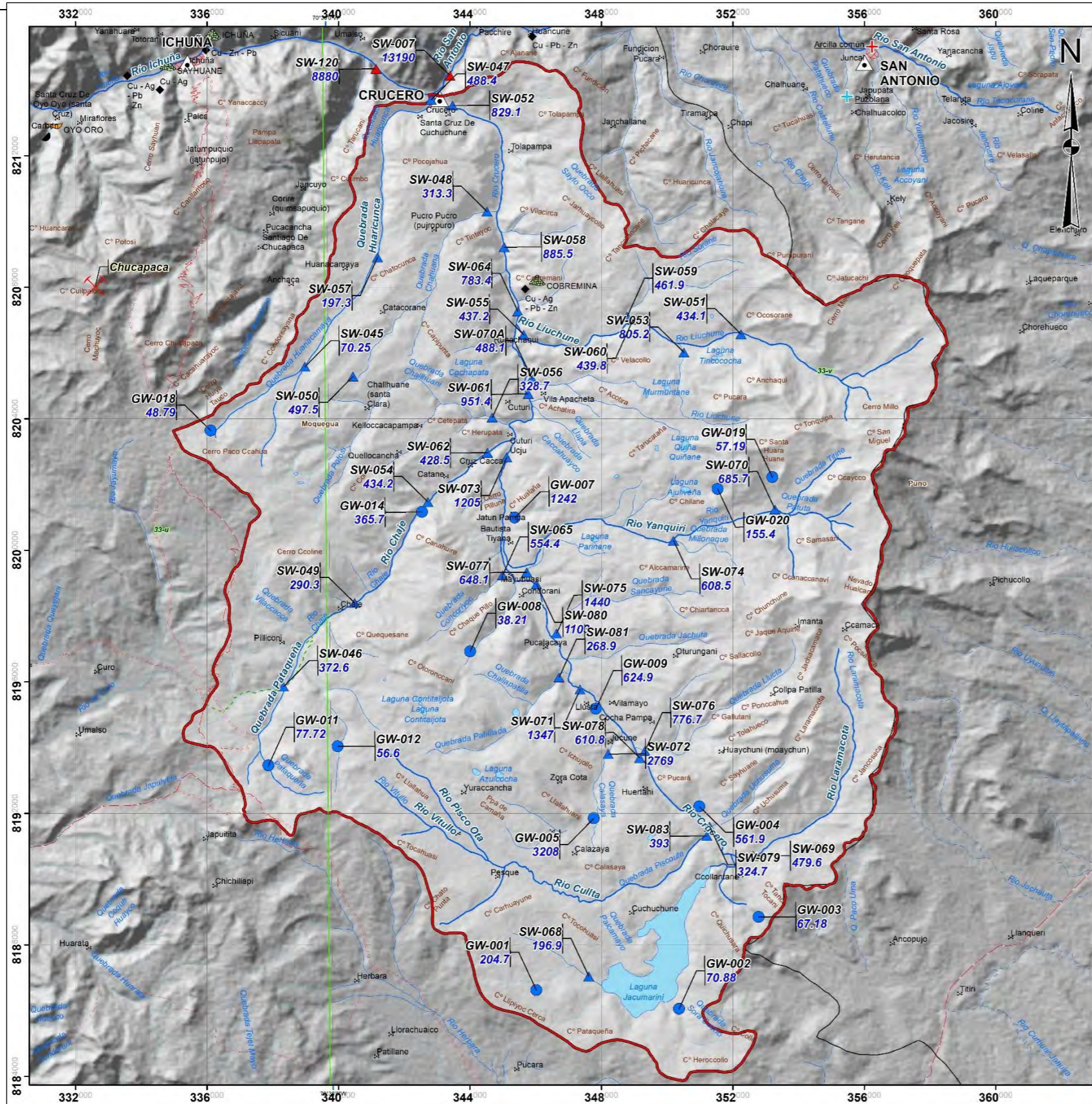
Mapa 20

Fuente: Elaboración propia.



Figura 65

"HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO"



SIMBOLOGÍA

▲ Poblados	— Río principal	■ Rocas minerales Industriales	⊗ Yacimientos	— Falla normal
⊗ Ancos	— Río perenne	⊕ Intrusivo	⊗ Mina	— Falla inversa
⊗ Centro urbano	— Río intermitente	⊕ Lava	⊗ Ocuencia	— Lineamiento
— Via afirmada	— Quebrada perenne	⊕ Metamórfica	⊗ Prospecto	— Eje de anticlinal
— Via en proyecto	— Quebrada intermitente	⊕ No Clasificado	⊗ Proyecto	— Eje de sinclinal
— Via no afirmada	— Lagunas	⊕ Sedimentario Clásico	⊗ Alteraciones	— Eje de anticlinal invertido
— Trocha carrozable	— Límite cuadrante	— Pasivos Ambientales Mineros (PAM)	⊗ Arcilla	— Eje de anticlinal invertido
— Curvas principales	— Límite microcuenca Crucero	— Pasivos Ambientales Mineros (PAM)	⊗ Oxido y arcilla	— Eje de anticlinal invertido
— Curvas secundarias	— Límite departamental	— Pasivos Ambientales Mineros (PAM)	⊗ Oxido	
	— Ocuencia mineral	— Pasivos Ambientales Mineros (PAM)	⊗ Relieve	
	— Metalico			
	— No Metalico			

LEYENDA

● GW-008	● 13188-15-GW-008
Código simplificado	Código completo
DATA INGENMET - CE (uS/cm)	
MEDIDA EN AGUAS SUBTERRÁNEAS	
● 88.67 - 259.4	No excede
● 3297	Excede
MEDIDA EN AGUAS SUPERFICIALES	
▲ 11.70 - 967.5	No excede
○	Estación seca
ECA 3 - RIEGO DE VEGETALES	
■ 0 - 2500	No excede el rango
■ > 5000	Excede

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DELCUSCO
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO

Variación de CE en aguas superficiales y subterráneas ECA 3: Bebida de animales (Estiaje 2015)

Versión digital: Año 2024

Escala 1: 80 000

Datum: WGS 84, Proyección: UTM Zona 19Sur

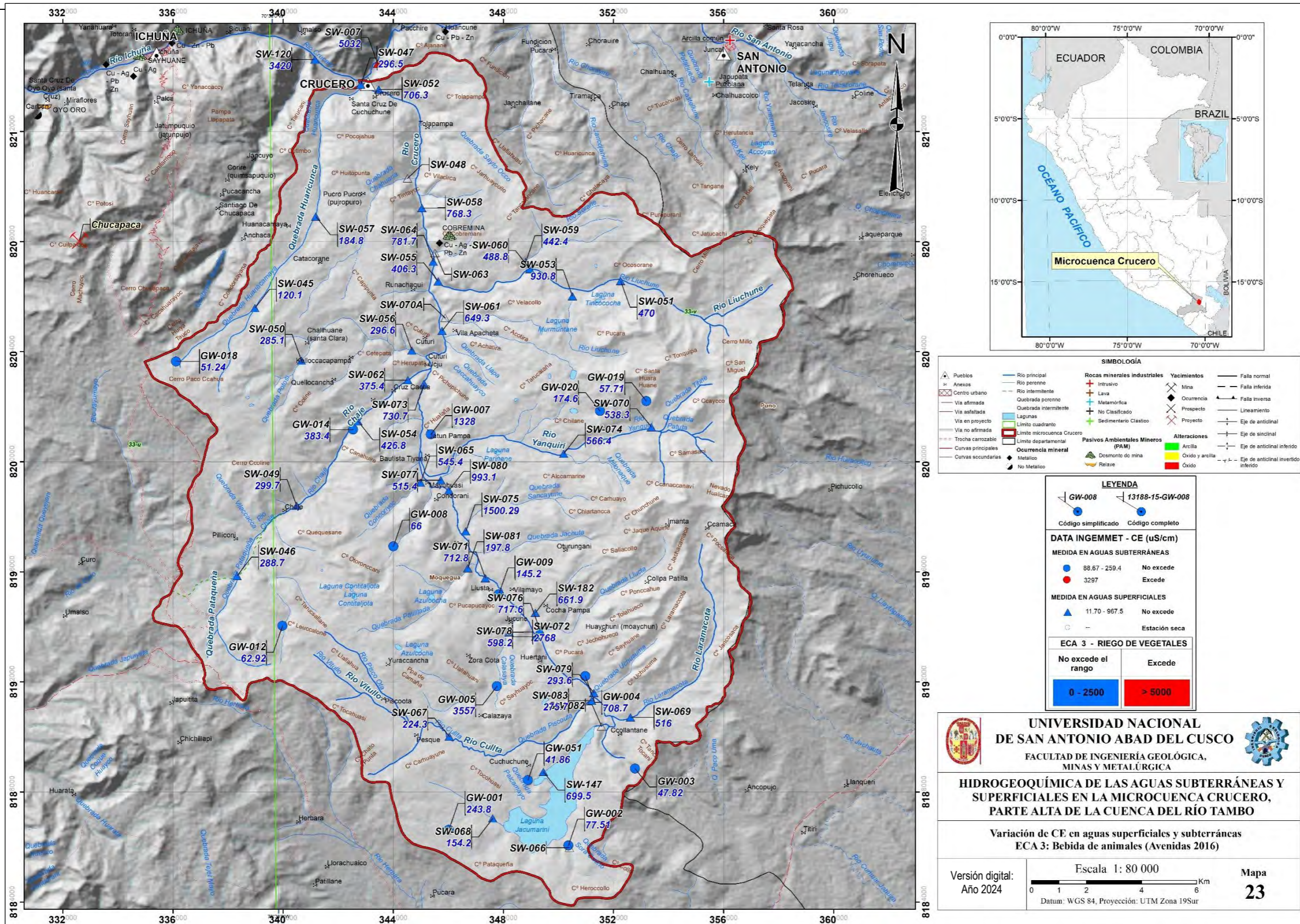
Mapa 21

Fuente: Elaboración propia.



Figura 67

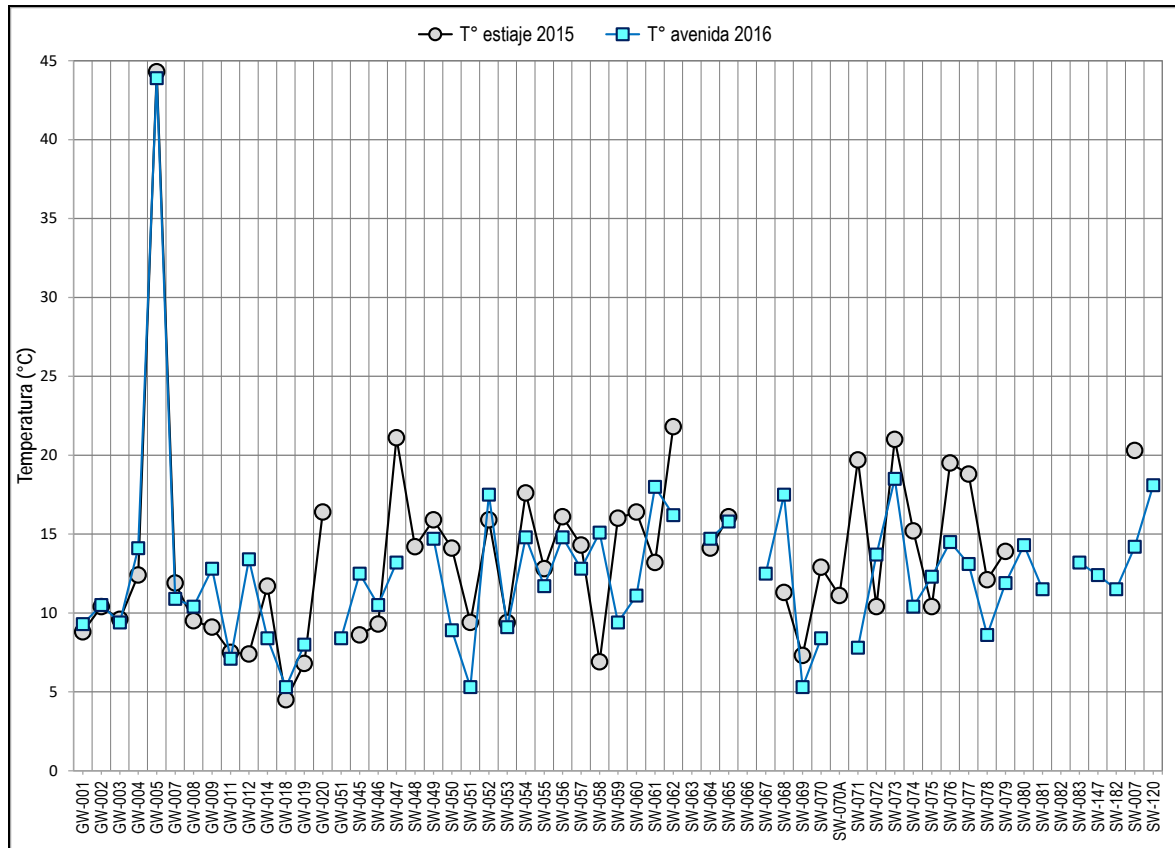
“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



Fuente: Elaboración propia.



Figura 68 Variación de la temperatura en la microcuenca Crucero, temporadas de estiaje y avenida.



Fuente: Elaboración propia.

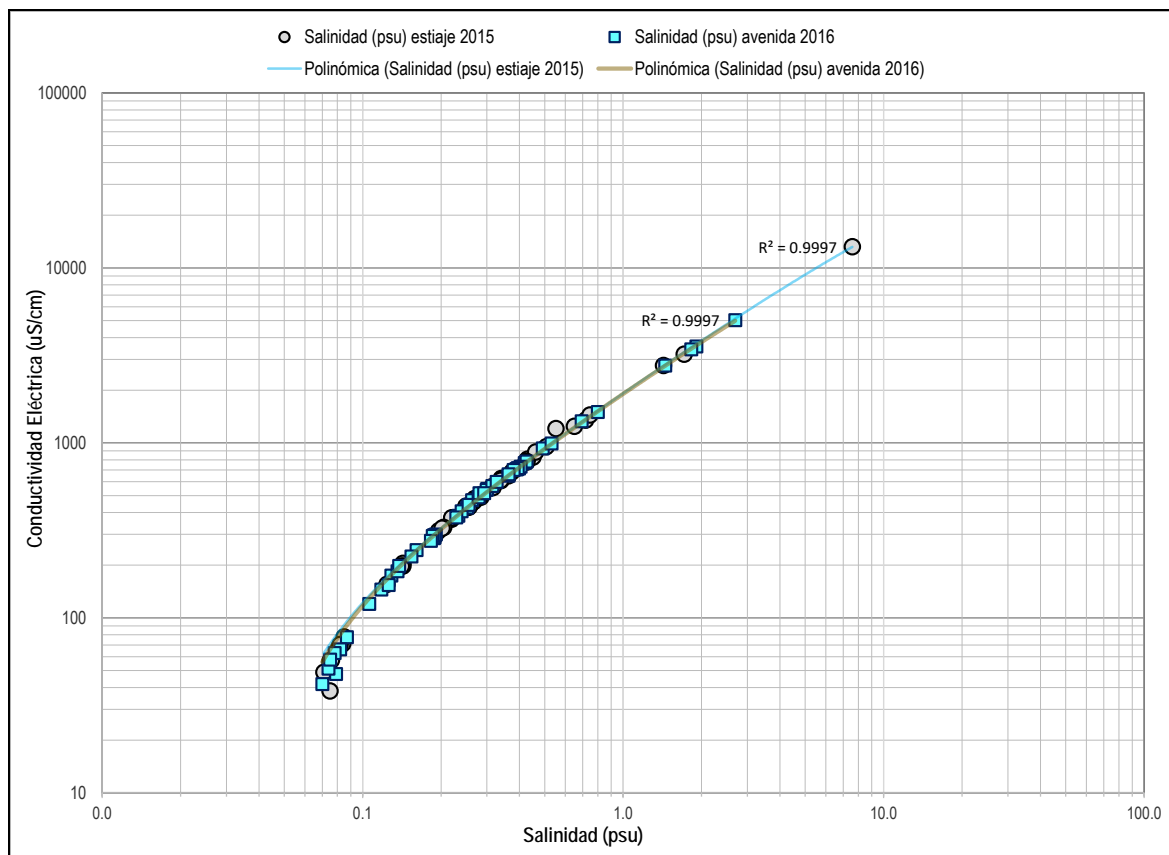
5.2.4. SALINIDAD

La conductividad eléctrica (CE) guarda una estrecha relación con la salinidad, debido a que la conductividad mide la capacidad de una solución acuosa de transmitir la electricidad, la cual depende de los iones disueltos.

La microcuenca Crucero presenta en general, fuentes de aguas superficiales y subterráneas dulces y en algunos casos salobres, como se representa en la Figura 69. Así mismo, la salinidad es directamente proporcional con la conductividad eléctrica (CE), mostrándose que los datos se ajustan a una curva polinómica, donde su ajuste da como coeficiente de Pearson (R^2) igual a 0.9997, tanto para la temporada de estiaje y avenidas; ello significa que los datos de CE y salinidad tomados en las estaciones de muestreo, se encuentran muy altamente correlacionados. También podemos observar en la Figura 69, que la salinidad varía ligeramente en ambas épocas monitoreo, mostrándose valores de mayor salinidad en la época de estiaje.



Figura 69 Variación de la salinidad en la microcuenca Crucero, temporadas de estiaje y avenida.



Fuente: Elaboración propia.

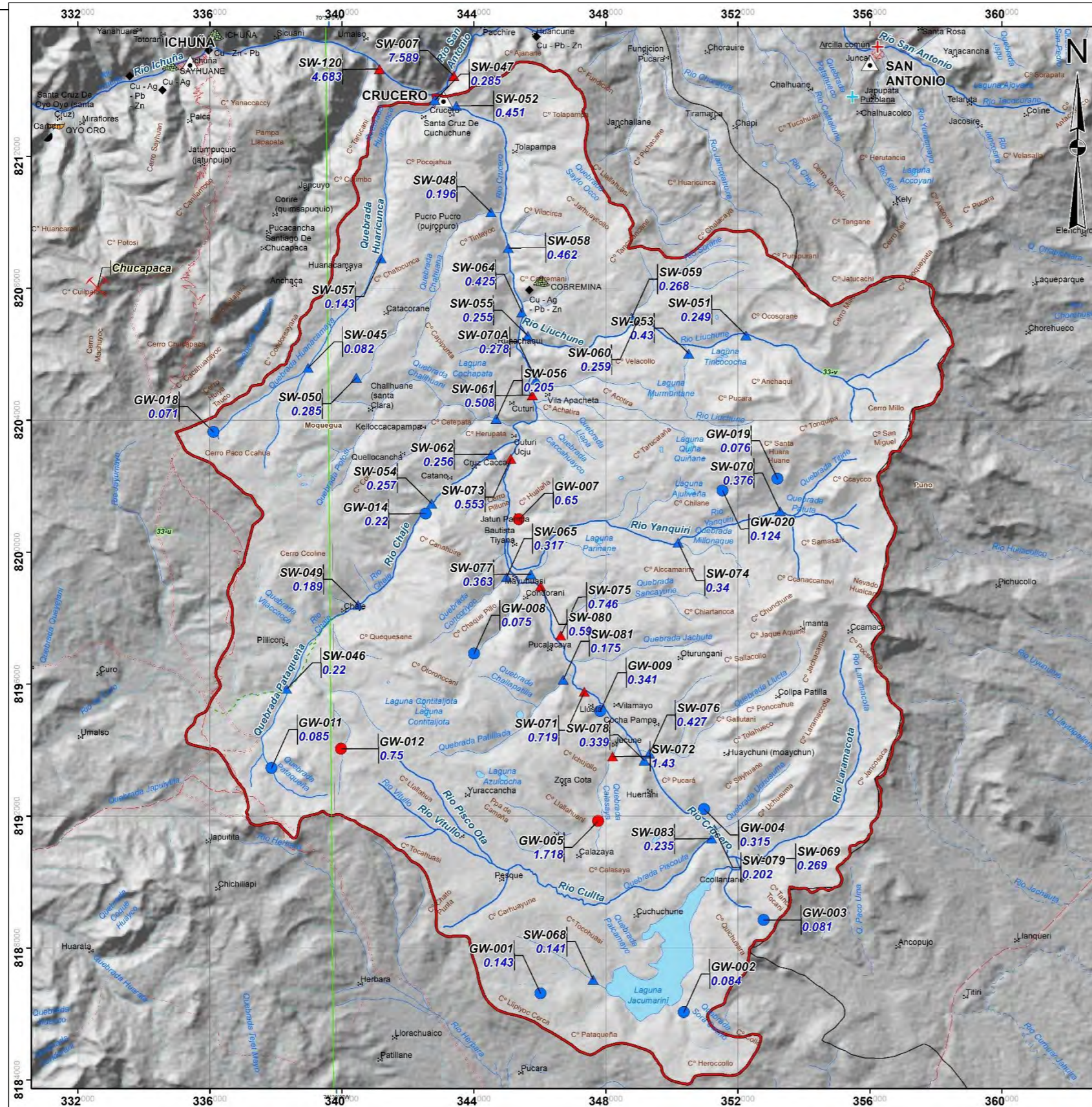
La microcuenca Crucero, registra valores de salinidad en 49 estaciones de agua superficial y subterránea para la temporada de estiaje, de las cuales 41 estaciones presentan valores menores a 0.5 ppt, clasificándose como agua dulce y 11 estaciones poseen valores de salinidad entre 0.5 ppt – 30 ppt, catalogados como aguas salobres. Por otro lado, se muestra la salinidad 53 estaciones para la temporada de avenidas, de las cuales contiene 46 estaciones de aguas dulces y 7 estaciones salobres.

Las Figura 70 y 71, muestran que hacia la parte alta de la microcuenca Crucero (colindante al sector de Jacune), específicamente a partir de la quebrada Calazaya, el contenido de sales cambia drásticamente en el río Crucero en 5 estaciones aguas abajo (SW-071, SW-075, SW-080, SW-073 y SW-061), estas aguas se clasifican como aguas salobres, reciben el aporte hídrico directamente de la fuente termal Calazaya (GW-005), dicha tendencia se mantiene en la temporada de estiaje y avenidas. Así mismo, se observa que el manantial GW-007 mantiene una tendencia de aguas salobres para ambas temporadas (Figura 70 y 71), que se ubica en el centro poblado Jatun Pampa, probablemente se encuentre influenciado por el río Crucero y finalmente se observa que la fuente GW-012 (parte alta de la quebrada Pataqueña), muestra aguas salobres en la temporada de estiaje, mientras que para la temporada de avenidas posee aguas dulces, se puede inferir que dicho comportamiento se debe a las condiciones climatológicas para cada temporada, donde en estiaje se tiene menos precipitación, recarga de aguas en la roca - sedimentos y predomina la evaporación, los cuales generarán que las sales se incrementen en las aguas infiltradas y/o excedentes.



Figura 70

“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



SIMBOLOGÍA

<ul style="list-style-type: none"> ▲ Pucobios ⊗ Anexos ⊠ Centro urbano — Via afirmada — Via en proyecto — Via no afirmada — Trocha carrozable — Curvas principales — Curvas secundarias 	<ul style="list-style-type: none"> — Rio principal — Rio perenne — Rio intermitente — Quebrada perenne — Quebrada intermitente — Lagunas — Límite cuadrante — Límite microcuenca Crucero — Límite departamental — Ocuencia mineral — Curvas principales — Curvas secundarias 	<ul style="list-style-type: none"> — Rocas minerales Industriales — Intrusivo — Lava — Metamorfica — No Clasificado — Sedimentario Clastico 	<ul style="list-style-type: none"> — Yacimientos — Mina — Ocuencia — Prospecto — Proyecto — Alteraciones — Arcilla — Oxido y arcilla — Oxido 	<ul style="list-style-type: none"> — Falla normal — Falla inversa — Falla invertida — Lineamiento — Eje de anticlinal — Eje de sinclinal — Eje de anticlinal invertido — Eje de anticlinal invertido
--	--	---	---	--

LEYENDA

Código simplificado	Código completo
● GW-008	● 13188-15-GW-008
AGUA SUBTERRÁNEA	AGUA SUPERFICIAL
● Agua dulce (< 0.5 ppt)	▲ Agua dulce (< 0.5 ppt)
● Agua salobre (0.5 - 30 ppt)	▲ Agua salobre (0.5 - 30 ppt)

PSU = ppt (parts per thousand)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL CUSCO
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO

Variación de la salinidad (Estiaje 2015)

Versión digital: Año 2024

Escala 1: 80 000

Datum: WGS 84, Proyección: UTM Zona 19Sur

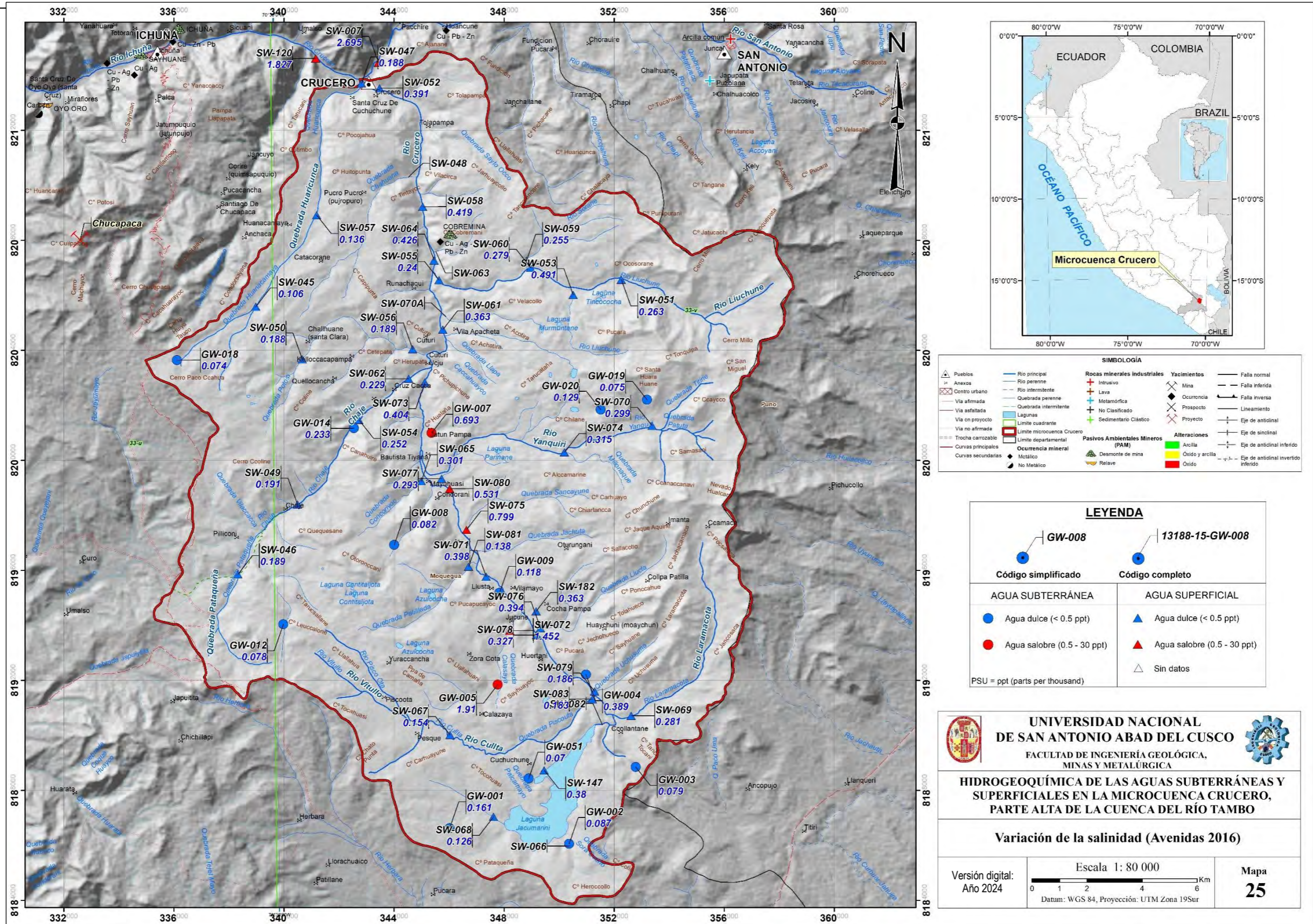
Mapa 24

Fuente: Elaboración propia.



Figura 71

“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



Fuente: Elaboración propia.

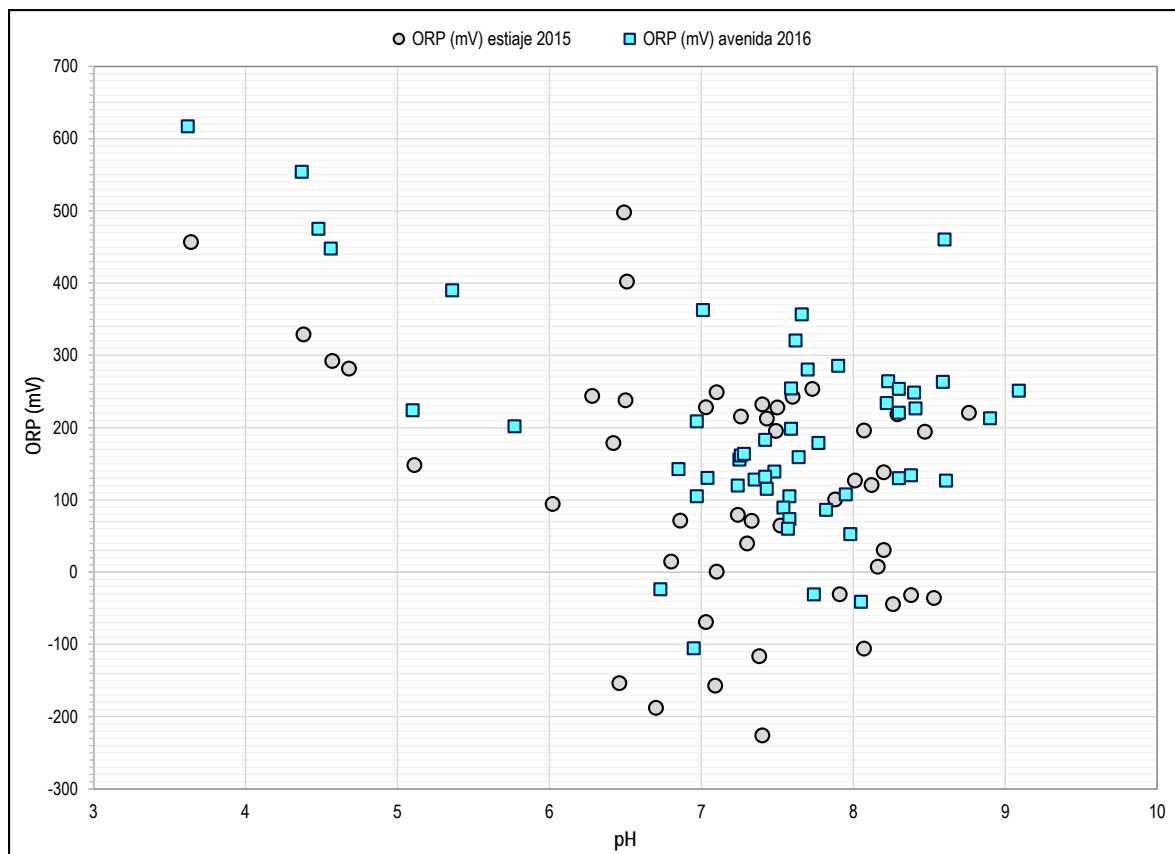


5.2.5. POTENCIAL DE OXIDACIÓN Y REDUCCIÓN (ORP)

La microcuenca Crucero presenta para la temporada de estiaje, una preponderancia de estaciones de aguas superficiales y subterráneas que se encuentran en un estado oxidante y reductor (Figura 69) a comparación de las fuentes registradas para la temporada de avenidas, las cuales llegar a tener una tendencia más oxidante. También, se puede interpretar en diagrama de ORP versus pH (Figura 74 y 75), que a pH más ácido (menor a pH 6.5 y 7) las fuentes se encuentran en un estado oxidante, en comparación a pH más alcalinos y/o básicos (mayor a pH 6.5 y 7), las fuentes muestran una tendencia más reductora.

La relación del Eh y pH (Figura 73) indica que las fuentes que contienen altas concentraciones de hierro (Fe), caen dentro y cerca del equilibrio químico $\text{Fe}(\text{OH})_3 - \text{Fe}^{2+}$, mostrando que la ocurrencia de este elemento se relaciona a procesos Redox, y este comportamiento tiene más tendencia las fuentes recopiladas en temporada de estiaje. Por otro lado, se observa que se tienen varias fuentes asociadas a las condiciones de equilibrio NO_3^- y NO_2^- , mostrando este comportamiento las fuentes inventariadas en temporadas de avenidas.

Figura 72 Variación del ORP versus el pH en la microcuenca Crucero, temporadas de estiaje y avenida.



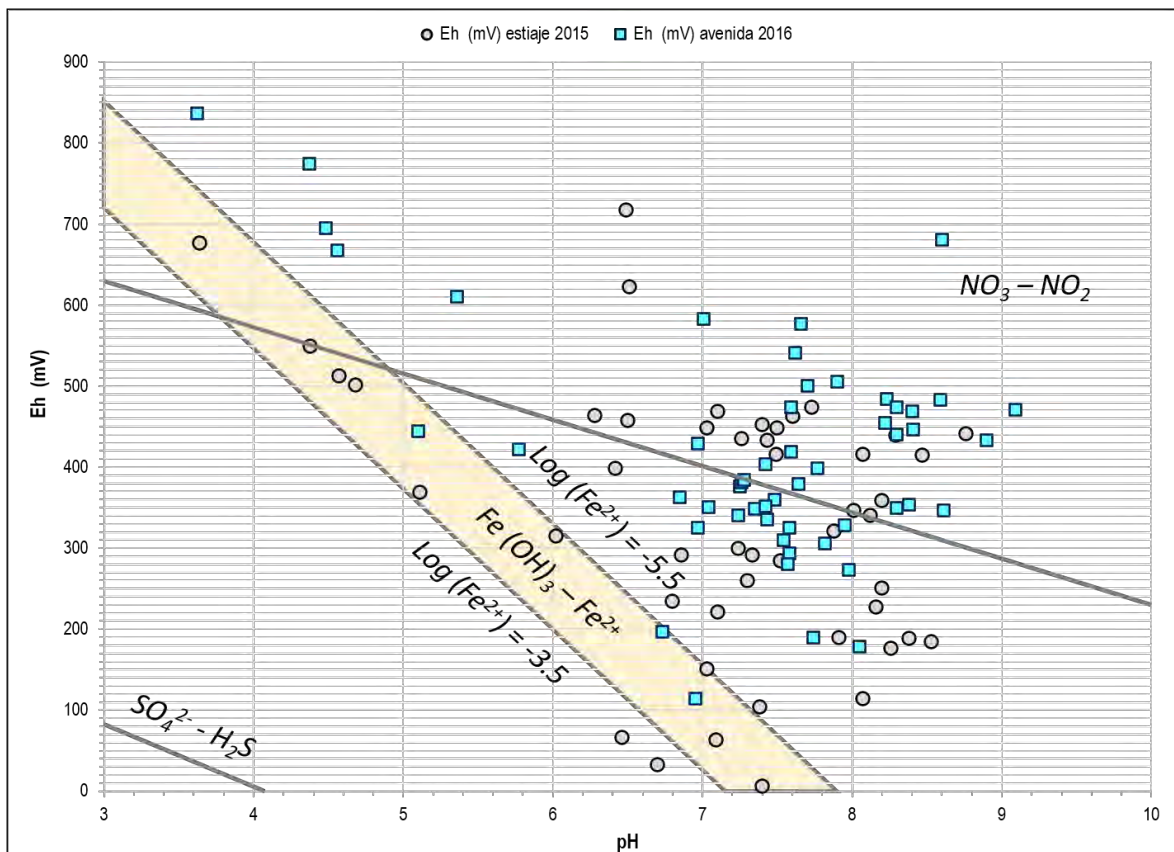
Fuente: Elaboración propia.

En la microcuenca Crucero, se registraron datos de ORP en 50 fuentes de agua superficiales y subterránea para la temporada de estiaje, donde 38 estaciones presentan valores positivos de ORP (Figura 74 y 75), indicándonos que se encuentran en medios oxidantes, estos cursos y manifestaciones de agua, circulan por rocas en su mayoría por las secuencias volcánicas. Sin



embargo, 12 estaciones de aguas registran valores negativos de ORP, encontrándose en ambientes reductores, estas fuentes están relacionadas en mayor proporción a las rocas sedimentarias (calizas, areniscas y lutitas) del Grupo Yura y en menor proporción a las rocas volcano-sedimentarias del Grupo Maure.

Figura 73 Variación del Eh versus el pH en la microcuenca Crucero, temporadas de estiaje y avenida.



Fuente: Elaboración propia.

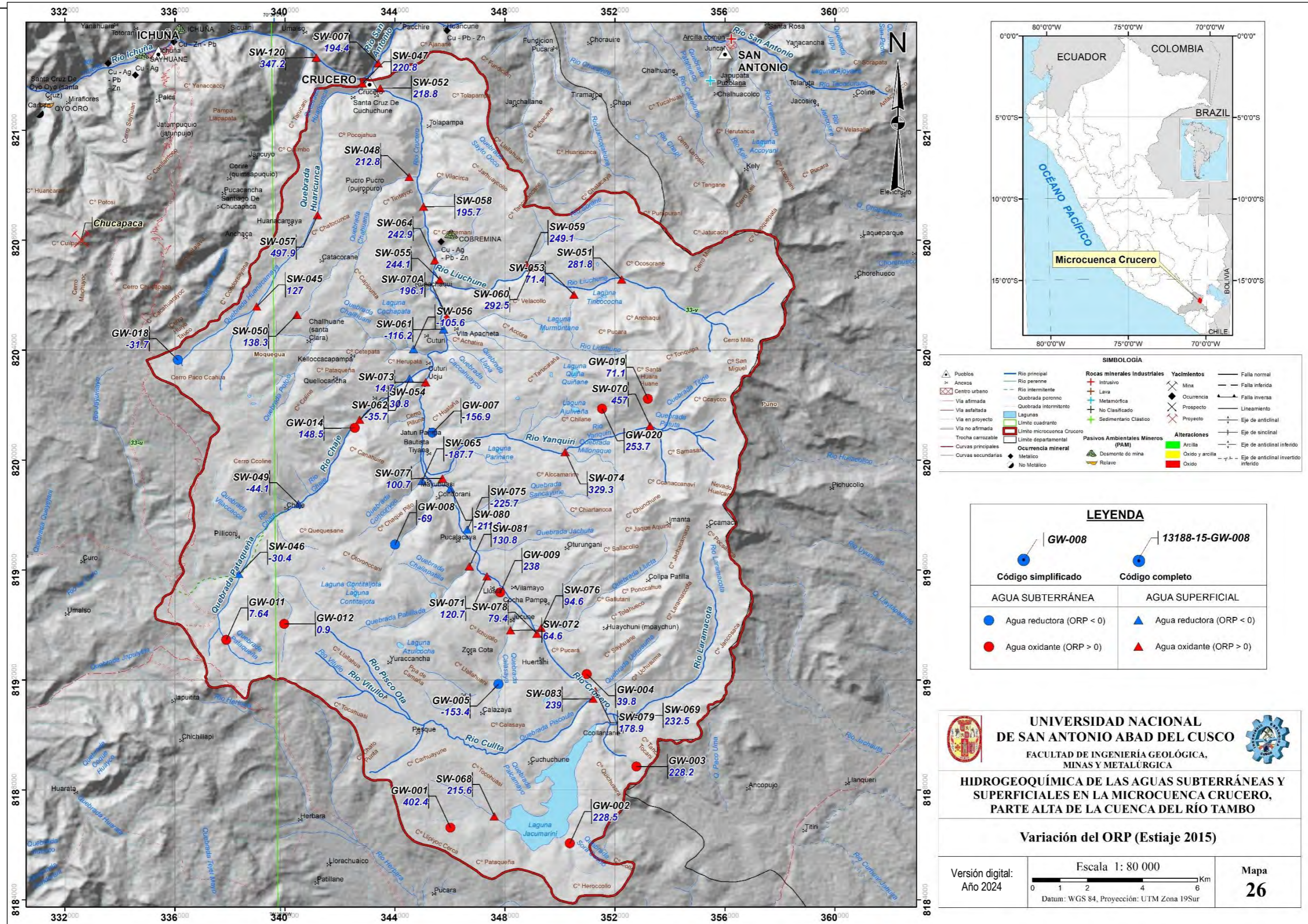
Por otra parte, las estaciones de aguas monitoreadas en temporada de avenidas (Figura 75), muestra que la mayoría de estaciones tienen un comportamiento oxidante, el cual está relacionado a las condiciones climatológicas de precipitación pluvial, entre otros. Así mismo, en menor proporción hacia la parte sur de la microcuenca Crucero, colindante a los sectores Pacocahua y Cuchuchune, se tienen 04 fuentes de aguas (02 subterráneas y 02 superficiales), las cuales nos indican que se encuentran en un estado reductor, asociados a las rocas del Grupo Yura y secuencias volcano-sedimentarias del Grupo Maure.

Cabe mencionar, que a partir del análisis realizado tanto para la temporada de estiaje y avenidas, el agua de la fuente termal Calazaya (GW-005) mantiene un comportamiento de aguas en estado reductor, registrando valores entre -153.4 y 23.5 mV de ORP (estiaje y avenidas), lo cual nos indica relaciones de procesos físico-químicos reductores debido a la temperatura de la fuente (44.3° C) que hace que se incremente la viscosidad del fluido (por ganancia de elementos disueltos y totales) y por lo tanto, aumente el intercambio iónico en el agua. Las aguas termales de esta fuente circulan por las rocas sedimentarias (calizas y areniscas) del Grupo Yura, favoreciendo el contenido de iones disueltos en el agua (Figura 74 y 75).



Figura 74

Variación del ORP EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO

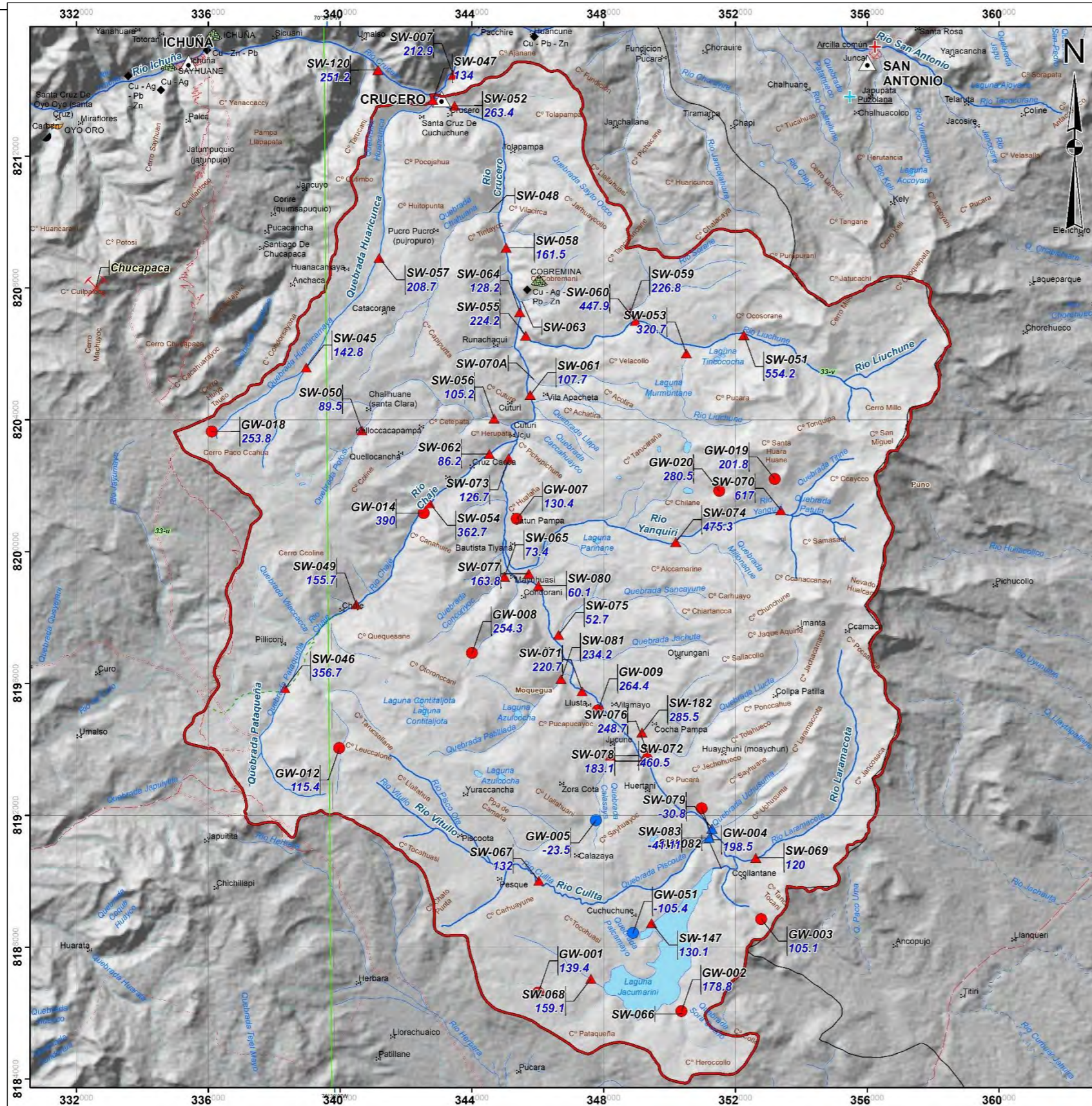


Fuente: Elaboración propia.



Figura 75

“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



SIMBOLOGÍA

<ul style="list-style-type: none"> ▲ Puclos ⊗ Anexos ⊠ Centro urbano — Via afirmada — Via en proyecto — Via no afirmada — Trocha carrozable — Curvas principales — Curvas secundarias 	<ul style="list-style-type: none"> — Rio principal — Rio perenne — Rio intermitente — Quebrada perenne — Quebrada intermitente — Lagunas — Límite cuadrante — Límite microcuenca Crucero — Límite departamental — Ocuencia mineral — No Metálico 	<ul style="list-style-type: none"> — Rocas minerales Industriales — Intrusivo — Lava — Metamórfica — No Clasificado — Sedimentario Clásico 	<ul style="list-style-type: none"> — Yacimientos — Mina — Ocurrencia — Prospecto — Proyecto — Alteraciones — Arcilla — Oxido y arcilla — Oxido 	<ul style="list-style-type: none"> — Falla normal — Falla inversa — Lineamiento — Eje de anticlinal — Eje de sinclinal — Eje de anticlinal invertido — Eje de anticlinal invertido
--	---	--	---	---

LEYENDA

Código simplificado	Código completo
● GW-008	● 13188-15-GW-008
AGUA SUBTERRÁNEA	AGUA SUPERFICIAL
● Agua reductora (ORP < 0)	▲ Agua reductora (ORP < 0)
● Agua oxidante (ORP > 0)	▲ Agua oxidante (ORP > 0)
	△ Sin datos

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABADEL DELCUSCO
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO

Variación del ORP (Avenidas 2016)

Versión digital: Año 2024	Escala 1: 80 000 0 1 2 4 6 Km Datum: WGS 84, Proyección: UTM Zona 19Sur	Mapa 27
------------------------------	---	-------------------

Fuente: Elaboración propia.



5.3. ANÁLISIS QUÍMICO DE RESULTADOS DE LABORATORIO

La salida de campo se desarrolló en la temporada de estiaje (09 de setiembre al 11 de octubre del 2015) y avenidas (21 abril al 20 de mayo del 2016). A continuación, se describen algunos detalles de la recolección de datos en campo:

5.3.1. TEMPORADA DE ESTIAJE

Se recolectaron 36 aguas superficiales, 14 aguas subterráneas, 6 duplicados, 4 blancos de campo y 4 blancos viajeros, para analizarse por aniones mayoritarios (SO₄ y Cl), carbonatos y bicarbonatos, metales disueltos y metales totales.

Inicialmente estaba contemplado que las muestras de agua se analicen en el laboratorio externo SGS, contando con todos los materiales proporcionados y enviándose 4 lotes de envío desde campo, hasta que el INGEMMET decidió disolver el contrato N°74-2014 del concurso público "N°005-2014-INGEMMET/CE – Primera convocatoria. Bajo este suceso, todas las muestras se llevaron al laboratorio institucional para el respectivo análisis (Tabla 13).

Tabla 13 Entrega de muestras de agua al laboratorio institucional, temporada estiaje

N°	Solicitud DGAR	Fecha de entrega de solicitud	Fecha de entrega de resultados	Tiempo de entrega de resultados (días)
1	098-2015-INGEMMET-DGAR	14/10/2015	20/11/2015	37
2	099-2015-INGEMMET-DGAR	14/10/2015	09/02/2016	118
3	107-2015-INGEMMET-DGAR	06/11/2015	12/01/2016	66
4	108-2015-INGEMMET-DGAR	06/11/2015	11/02/2016	97
5	109-2015-INGEMMET-DGAR	06/11/2015	15/12/2015	38
6	110-2015-INGEMMET-DGAR	12/11/2015	22/12/2015	41

Fuente: Elaboración propia.

5.3.2. TEMPORADA DE AVENIDA

Se recolectaron un total de 37 muestras de agua superficial, 14 de agua subterránea, 6 duplicados, 5 blancos de campo, 5 blancos viajeros y 6 estándares de agua, los análisis realizados fueron por aniones mayoritarios (SO₄, Cl, NO₃, NO₂, F), carbonatos y bicarbonatos, metales disueltos y metales totales. Las muestras de agua, se enviaron al laboratorio institucional, realizándose 5 envíos/entregas (Tabla 14). El mayor periodo de reporte de resultados fue de 88 días aproximadamente (tercer envío).

Tabla 14 Entrega de muestras de agua al laboratorio institucional, temporada seca

N°	Solicitud DGAR	Fecha de entrega de solicitud	Fecha de entrega de resultados	Tiempo de entrega de resultados (días)
1	019-2016-INGEMMET/DGAR	06/05/2016	27/07/2016	82
2	021-2016-INGEMMET/DGAR	11/05/2016	02/08/2016	83
3	023-2016-INGEMMET/DGAR	16/05/2016	12/08/2016	88



4	024-2016-INGEMMET/DGAR	19/05/2016	12/08/2016	85
5	026-2016-INGEMMET/DGAR	26/05/2016	12/08/2016	78

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se hace un breve informe sobre el “Aseguramiento y control de calidad de los análisis de agua” de las muestras mencionadas para ambas temporadas.

5.4. ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD DE DATOS (QA/QC)

Tienen la finalidad de evaluar la precisión y desviación de los análisis químicos realizado en los puntos de monitoreo, se realizó el análisis de muestras duplicadas, blanco de campo, blanco viajero y estándares para el control respectivo, estas se describen a continuación:

5.4.1. ANÁLISIS DE DUPLICADOS

La muestra duplicada, es una muestra que se realiza en el mismo punto y tiempo de la muestra original, así como se utilizan los mismos materiales de campo para la toma de muestra (guantes, jeringas y filtros). La comparación de resultados de ambas muestras, determinan la “precisión” de los datos durante el muestreo, para los trabajos realizados en campo se recopiló 01 duplicado por cada 20 a 30 estaciones de muestreo aproximadamente; obteniéndose así un total de 04 duplicados (01 por cada grupo de envío).

Se consideran los resultados de los analitos brindados por el laboratorio, las concentraciones que se encuentran por encima de 05 veces el Límite Mínimo de Detección (5LMD) para el análisis respectivo, por lo cual, se procedió a trabajar con los analitos que cumplen estas concentraciones.

Según lo indicado anteriormente, se procedió a calcular la Diferencia Porcentual Relativa (DPR) para cada elemento de muestras de agua originales y duplicadas. El DRP hallado debe ser menor al 25%, si es mayor se tiene una imprecisión en el elemento analizado. Se observaron que algunos analitos poseen valores de DPR en los grupos de muestras para ambas temporadas, estos son:

5.4.1.1. TEMPORADA DE ESTIAJE

En el presente trabajo se analizaron cinco (5) estaciones. En el análisis de metales disueltos, ninguno de los 16 elementos de interés (As, B, Be, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Ti, Zn) superan el 25 % de no precisión (DPR), por lo que los trabajos se realizaron con precisión. Sin embargo, para el Aluminio disuelto se tiene un DPR de 29.4 % (Tabla 15).

Tabla 15 Elementos disueltos que superan el DPR

Código	Al (mg/l)
13188-15-SW-052	0.424
13188-15-SW-123 (Duplicado)	0.11
LMD	0.005
5 LMD	0.025
DPR (>25%)	29.4

Fuente: Elaboración propia.



En el análisis de metales totales (Tabla 16), existen mayores elementos que superan el 25% del DPR. De los 16 elementos de interés, superan el Pb, Sn y Ti; además otros elementos como Bi, U y W; todos ellos en el análisis de metales totales (Tabla 16).

Tabla 16 Concentraciones reportadas en el análisis de duplicados

Código	Ag (mg/l)	Bi (mg/l)	Pb (mg/l)	Sn (mg/l)	Ti (mg/l)	U (mg/l)	W (mg/l)	W (mg/l)
13188-15-SW-129	-	0.0681	0.0797	0.0374	0.0451	0.0095	0.0253	0.0253
13188-15-SW-093 (Duplicado)	-	0.0149	0.017	0.008	0.0061	0.0007	0.003	0.003
13188-15-SW-007	0.0149	-	-	-	-	-	-	-
13188-15-SW-128 (Duplicado)	0.2201	-	-	-	-	-	-	-
LMD	0.0003	0.0002	0.0005	0.0005	0.0006	0.0001	0.0005	0.0005
5 LMD	0.0015	0.001	0.0025	0.0025	0.003	0.0005	0.0025	0.0025
DPR (>25%)	43.7	32	32.4	32.4	38.1	43.1	39.4	39.4

Fuente: Elaboración propia.

Tomando en cuenta que el análisis de metales disueltos es más representativo y contiene información más clara de la composición química real del agua, el trabajo se realizó de forma precisa. Así mismo, se presenta un máximo de 6 elementos que superan el 25% del DPR en el análisis de metales totales en una sola muestra, mientras que, en los otros 31 elementos analizados de la misma muestra, son menores al 25% del DPR.

5.4.1.2. TEMPORADA DE AVENIDA

Se analizó cinco (5) estaciones, de las cuales se sólo se registró variaciones de precisión en la estación 13188-16-SW-093 y su duplicado 13188-16-SW-129 (tercer envío de muestras), la muestra fue tomada en el río Ichuña próximo al puente principal del centro poblado. Las variaciones se dan en 2 elementos trazas disueltos (Sr y Mn) y 5 elementos totales (Li, As, B, Fe y Mn) tal como se expone en la Tabla 17.

Tabla 17 Análisis de precisión con muestras duplicadas

Código	Sr_dis	Mn_dis	Li_tot	As_tot	B_tot	Fe_tot	Mn_tot
13188-16-SW-093	1.4918	0.0017	1.7302	0.111	11.89	0.06	0.0474
13188-16-SW-129 (Duplicado)	0.0316	0.0486	0.5078	0.022	1.56	3.67	0.4615
LMD	0.0005	0.0002	0.0004	0.001	0.05	0.01	0.0002
5 LMD	0.0025	0.001	0.002	0.005	0.25	0.05	0.001
DPR (>25%)	47.9	46.6	27.3	33.5	38.4	48.4	40.7

Fuente: Elaboración propia.

De los 15 elementos de interés (sin considerar al Hg), en metales disueltos el Mn presenta valores de DPR de 46.6%, mientras que el DPR en metales totales (As, B, Fe y Mn) llega a un 48.4% (Cuadro). Esto muestra la poca precisión en esta parte del trabajo, debido posiblemente a que el río Ichuña es una estación muy susceptible a cambios notorios en estos metales trazas debido principalmente a actividades antrópicas (polvo del lugar, efluentes del centro poblado, zona de lavado de ropa) y la incidencia de la fuente termal de Ichuña (a unos 1.5 km aguas arriba). También se observó que el Sr disuelto y el Li total, presentan valores de DPR mayores al 25%.



El análisis de las muestras duplicadas, indica que se realizó el trabajo de campo de forma precisa en las 6 estaciones evaluadas. En la estación del río Ichuña, el trabajo también guarda el grado de precisión, considerando que la variación mostrada en dicha estación se debe a condicionantes locales las cuales pueden modificar la calidad del agua de manera repentina, observándose sobre todo en metales totales.

5.4.2. ANÁLISIS DE BLANCO DE CAMPO

Son muestras que se toman utilizando agua ultrapura, siguiendo los mismos procedimientos del muestreo en campo. Este tipo de blanco sirve para conocer la "contaminación" del ambiente y los relacionados al procedimiento del muestreo en campo. Se considera para el presente estudio, que concentraciones mayores a 5LMD son significativos.

5.4.2.1. TEMPORADA DE ESTIAJE

El Cuadro 18, muestra las concentraciones de los blancos de campo, donde los metales disueltos no muestra concentraciones significativas (>5LMD). Sólo el Bario y Cerio en la muestra 13188-15-SW-122 y Manganeso para la muestra 13188-15-SW-131; tienen una concentración y contaminación significativa en dichos elementos.

Tabla 18 Concentraciones reportadas en el análisis de blancos de campo, temporada de estiaje

Elemento	Unidades	LMD	5LMD	13188-15-SW-140	13188-15-SW-122	13188-15-SW-131
Metales disueltos						
Na	mg/l	0.1	0.5	<0.1	0.1	<0.1
Mg	mg/l	0.1	0.5	<0.1	0.1	<0.1
Ca	mg/l	0.3	1.5	<0.3	0.4	<0.3
Ce	mg/l	0.0002	0.001	<0.0002	0.0004	<0.0002
Mn	mg/l	0.0002	0.001	0.0003	<0.0002	0.0002
Zn	mg/l	0.001	0.005	<0.001	0.001	<0.001
Metales totales						
Na	mg/l	0.1	0.5	<0.1	0.5	<0.1
Mg	mg/l	0.1	0.5	<0.1	0.1	0.3
Ca	mg/l	0.3	1.5	<0.3	0.4	<0.3
Sr	mg/l	0.0005	0.0025	<0.0005	0.0007	0.0005
Al	mg/l	0.005	0.025	0.01	0.011	<0.005
Ba	mg/l	0.0005	0.0025	<0.0005	0.0042	<0.0005
Ce	mg/l	0.0002	0.001	<0.0002	0.0035	<0.0002
Fe	mg/l	0.01	0.05	<0.01	0.03	<0.01
Mn	mg/l	0.0002	0.001	0.0005	0.0002	0.002
Ti	mg/l	0.0006	0.003	<0.0006	0.0008	<0.0006
V	mg/l	0.0005	0.0025	<0.0005	0.0012	<0.0005
W	mg/l	0.0005	0.0025	<0.0005	0.0009	<0.0005
Zn	mg/l	0.001	0.005	0.002	0.001	<0.001

Fuente: Elaboración propia.



La muestra 13188-15-SW-122 se recolectó en una quebrada donde existía abundantes precipitados blanquecinos en el cauce por evaporación, sumado a los vientos constantes de la zona. Es posible que, debido a estas condiciones durante el muestreo, la muestra 13188-15-SW-122 tenga concentraciones bajas y altas (significativas) en 14 elementos del análisis de metales totales (Tabla 18).

5.4.2.2. TEMPORADA DE AVENIDA

La Tabla 19 muestra los 15 elementos de interés (sin considerar Hg), donde se tienen 4 elementos (Li, Al, Mn y Zn disueltos) con valores, los cuales no presentan concentraciones mayores a 5LMD y por tanto no son significativos. En metales totales existen concentraciones mayores a 5LMD de Mn, S, Zn (color rojo). En este último análisis también se pueden encontrar algunas concentraciones totales de Sodio (Na), Calcio (Ca), Litio (Li), Aluminio (Al), Cobre (Cu) y Hierro (Fe) que no son significativos.

Podemos concluir que existe una tendencia en la presencia de concentraciones Manganeseo (Mn) total y posiblemente Zinc (Zn) total.

Tabla 19 Concentraciones reportadas en los blancos de campo, temporada de avenidas

Elemento	Unidades	LMD	5 LMD	13188-16-SW-122	13188-16-SW-124	13188-16-SW-124	13188-16-SW-131	13188-16-SW-140
Metales disueltos								
Li	mg/l	0.0004	0.0020	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	0.0005
Al	mg/l	0.005	0.025	<0.005	0.006	<0.005	<0.005	<0.005
Mn	mg/l	0.0002	0.0010	0.0003	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002
Zn	mg/l	0.001	0.005	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001
Metales totales								
Na	mg/l	0.1	0.5	<0.1	0.1	0.4	<0.1	0.1
Ca	mg/l	0.3	1.5	<0.3	0.3	<0.3	<0.3	<0.3
Li	mg/l	0.0004	0.0020	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	0.0006
Al	mg/l	0.005	0.025	0.008	<0.005	0.007	<0.005	0.010
Cu	mg/l	0.0005	0.0025	<0.0005	<0.0005	0.0008	<0.0005	<0.0005
Fe	mg/l	0.01	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	0.05	<0.01
Mn	mg/l	0.0002	0.0010	0.0013	0.0004	0.0003	0.0004	0.0003
S	mg/l	0.3	1.5	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	1.7
Zn	mg/l	0.001	0.005	0.001	0.009	0.002	<0.001	0.001

Fuente: Elaboración propia.

5.4.3. ANÁLISIS DE BLANCO VIAJERO

Son muestras de agua ultrapura que proporciona laboratorio que vienen cerradas y no se abren durante el traslado. Sus concentraciones químicas son menores al LMD (límite de detección). Este tipo de blanco sirve para conocer la "contaminación" en el transporte y en la etapa de laboratorio. Los valores mayores a 5 LMD son significativos y pueden representar contaminación en estas etapas (Tabla 20).



5.4.3.1. TEMPORADA DE AVENIDAS

Los valores analizados en los blancos viajeros se presentan en la Cuadro 20, donde se puede observar que hay contaminación importante en S (disuelto y total) en una muestra (color rojo). También se observa una tendencia en los valores de Mn total en todas las muestras.

Tabla 20 Concentraciones reportadas en el blanco viajero, temporada de avenidas

Nombre	Unidad	LMD	5 LMD	13188-16-SW-143	13188-16-SW-145	13188-16-SW-149	13188-16-SW-151	13188-16-SW-153
Metales disueltos								
Sr	mg/l	0.0005	0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0014
Li	mg/l	0.0004	0.0020	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	0.0008
S	mg/l	0.3	1.5	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	1.7
Zn	mg/l	0.001	0.005	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001
Metales totales								
Na	mg/l	0.1	0.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1
Ca	mg/l	0.3	1.5	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	0.4
Sr	mg/l	0.0005	0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0016
Li	mg/l	0.0004	0.0020	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	0.0008
Al	mg/l	0.005	0.025	0.006	<0.005	<0.005	0.008	0.010
Ba	mg/l	0.0005	0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0006
Cu	mg/l	0.0005	0.0025	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0007	<0.0005
Mn	mg/l	0.0002	0.0010	0.0006	0.0002	0.0002	0.0002	0.0004
S	mg/l	0.3	1.5	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	1.9
W	mg/l	0.0005	0.0025	0.0011	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Zn	mg/l	0.001	0.005	<0.001	0.001	<0.001	0.002	<0.001

Fuente: Elaboración propia.

5.4.4. ANÁLISIS DE ESTÁNDAR

Las muestras estándares son muestras con una determinada concentración de elementos seleccionados, y son normalmente certificados por los proveedores del producto. Este tipo de muestra sirve para analizar la "exactitud" del análisis reportado por laboratorio.

Para este caso, se emplearon estándares certificados externos con concentraciones y elementos conocidos (elementos de alta y baja concentración) para el análisis de metales disueltos y totales. Con estos datos, se procedió a elaborar la comparación entre el valor analizado (VA) sobre el valor real (VR) por el 100%, para cada analito (Cuadros 21, 22, 23 y 24). Para definir el porcentaje de exactitud, las guías recomiendan que esta diferencia no supere el 80 y 120 % (+/- 20%).

5.4.4.1. TEMPORADA DE ESTIAJE

Los estándares fueron analizados en el laboratorio institucional junto con el grupo de muestras de agua. Estos estándares, contenían concentraciones menores al límite de detección del laboratorio institucional (debido a que fueron elaborados por el laboratorio externo con distinto Limite de Detección), por lo que no se permitió conocer la exactitud del trabajo realizado.



5.4.4.2. TEMPORADA DE AVENIDAS

La Tabla 21, 22, 23 y 24, muestran las comparaciones definidas anteriormente y se indica lo siguiente:

- Se realizó un total de 156 comparaciones de exactitud (uno por cada analito, 52 comparaciones por cada envío), que representa el 100 %.
- De los 26 elementos de interés, se encontró 125 valores clasificados como exactitud alta (metales disueltos y totales) que representan un 80.13%.
- De los 26 elementos de interés, se encontró 21 valores clasificados como exactitud moderada (metales disueltos y totales) que representan un 13.46%.
- De los 26 elementos de interés, se encontró 10 valores clasificados como no exacto (metales disueltos y totales), que representan un 6.41%.

El análisis guarda la exactitud que en general se requiere, encontrándose algunos elementos como Plata (Ag), Boro (B), Talio (Tl), Plomo (Pb) y Cobre (Cu) que presentan valores no exactos.

El valor más bajo y más alto con una calidad de medición inexacta es el del primer envío (49996-18-SW-003), donde en metales disueltos, el Boro (B) está con un valor de 65.77%, y en metales totales el Plomo (Pb) con 146.23 %.



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



Tabla 21 Reporte y análisis de precisión de análisis de muestras estándares versus metales disueltos, temporada de avenida

Código	Nombre	Na _{di} s	Mg _{di} s	K _{di} s	Ca _{di} s	Sr _{di} s	Li _{dis}	SiO2 _{di} s	Ag _{di} s	Al _{di} s	As _{di} s	B _{di} s	Ba _{di} s	Be _{di} s	Bi _{di} s	Cd _{di} s
	LMD	0.1	0.1	0.2	0.3	0.0005	0.0004	0.5	0.0003	0.005	0.001	0.05	0.0005	0.0002	0.0002	0.0002
	Unidades	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
13188-16-SW-141	Estándar	9.3	9.1	9.5	9.2	0.0021	0.0020	4.8	0.0009	0.021	0.009	1.45	0.0098	0.0018	0.0017	0.0019
13188-16-SW-144	Estándar	9.8	9.8	10.5	10.0	0.0019	0.0021	4.6	0.0009	0.021	0.011	1.98	0.0018	0.0020	0.0019	0.0020
13188-16-SW-146	Estándar	9.7	9.7	9.8	11.0	0.0019	0.0020	4.4	0.0009	0.021	0.009	1.89	0.0020	0.0018	0.0018	0.0019
13188-16-SW-148	Estándar	9.4	9.3	9.5	10.1	0.0023	0.0020	4.7	0.0008	0.021	0.010	1.86	0.0023	0.0019	0.0018	0.0019
Concentración requerida1: 13188-16-SW-141		10.2	10.4	9.9	10.7	0.0021	0.0019	4.5	0.0012	0.023	0.010	2.03	0.0085	0.0020	0.0019	0.0018
% Calidad de medición (RC/CRE)		91.2	87.5	96.0	86.0	100.0	105.3	106.7	75.0	91.3	90.0	71.4	115.3	90.0	89.5	105.6
Concentración requerida2: 13188-16-SW-144		10.4	10.5	10.2	10.5	0.0026	0.0019	4.7	0.0009	0.023	0.012	2.00	0.0020	0.0023	0.0022	0.0020
% Calidad de medición (RC/CRE)		94.2	93.3	102.9	95.2	73.1	110.5	97.9	100.0	91.3	91.7	99.0	90.0	87.0	86.4	100.0
Concentración requerida3: 13188-16-SW-146		10.2	10.4	9.9	10.7	0.0056	0.0027	4.5	0.0009	0.024	0.012	2.03	0.0023	0.0024	0.0020	0.0019
% Calidad de medición (RC/CRE)		95.1	93.3	99.0	102.8	33.9	74.1	97.8	100.0	87.5	75.0	93.1	87.0	75.0	90.0	100.0
Concentración requerida4: 13188-16-SW-148		10	10.1	9.9	10.2	0.0028	0.0022	4.5	0.0009	0.024	0.012	2.01	0.0021	0.0025	0.0023	0.0020
% Calidad de medición (RC/CRE)		94.0	92.1	96.0	99.0	82.1	90.9	104.4	88.9	87.5	83.3	92.5	109.5	76.0	78.3	95.0

Fuente: Elaboración propia.



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



Tabla 22 Concentraciones Reporte y análisis de precisión de análisis de muestras estándares versus metales disueltos, temporada de avenida

Código	Nombre LMD Unidades	Co_dis 0.0002 mg/l	Cr_dis 0.001 mg/l	Cu_dis 0.0005 mg/l	Fe_dis 0.01 mg/l	La_dis 0.0002 mg/l	Mn_dis 0.0002 mg/l	Mo_dis 0.0002 mg/l	Ni_dis 0.0007 mg/l	Pb_dis 0.0005 mg/l	S_dis 0.3 mg/l	Sb_dis 0.0008 mg/l	Se_dis 0.002 mg/l	Sn_dis 0.0005 mg/l	Zn_dis 0.001 mg/l
13188-16-SW-141	Estándar	0.0018	0.019	0.0022	0.19	0.0021	0.0021	0.0020	0.0020	0.0025	0.6	0.0019	0.022	0.0053	0.018
13188-16-SW-144	Estándar	0.0019	0.020	0.0020	0.19	0.0019	0.0019	0.0020	0.0019	0.0019	1.3	0.0019	0.020	0.0019	0.020
13188-16-SW-146	Estándar	0.0019	0.020	0.0020	0.18	0.0019	0.0020	0.0018	0.0019	0.0019	1.4	0.0019	0.019	0.0020	0.019
13188-16-SW-148	Estándar	0.0019	0.019	0.0020	0.17	0.0021	0.0019	0.0021	0.0020	0.0020	1.1	0.0021	0.021	0.0021	0.019
Concentración requerida1: 13188-16-SW-141		0.0017	0.018	0.0022	0.20	0.0018	0.0019	0.0019	0.0018	0.0023	1.1	0.0018	0.022	0.0172	0.023
% Calidad de medición (RC/CRE)		105.9	105.6	100.0	95.0	116.7	110.5	105.3	111.1	108.7	54.5	105.6	100.0	30.8	78.3
Concentración requerida2: 13188-16-SW-144		0.0018	0.019	0.0021	0.22	0.0019	0.002	0.002	0.0018	0.0024	1.1	0.002	0.023	0.0023	0.024
% Calidad de medición (RC/CRE)		105.6	105.3	95.2	86.4	100.0	95.0	100.0	105.6	79.2	118.2	95.0	87.0	82.6	83.3
Concentración requerida3: 13188-16-SW-146		0.0018	0.02	0.0023	0.2	0.0018	0.0019	0.0019	0.0019	0.0025	1.1	0.002	0.022	0.0039	0.024
% Calidad de medición (RC/CRE)		105.6	100.0	87.0	90.0	105.6	105.3	94.7	100.0	76.0	127.3	95.0	86.4	51.3	79.2
Concentración requerida4: 13188-16-SW-148		0.0018	0.019	0.0023	0.2	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0026	1.1	0.002	0.022	0.0023	0.022
% Calidad de medición (RC/CRE)		105.6	100.0	87.0	85.0	110.5	100.0	110.5	105.3	76.9	100.0	105.0	95.5	91.3	86.4

Fuente: Elaboración propia.



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



Tabla 23 Concentraciones Reporte y análisis de precisión de análisis de muestras estándares versus metales totales, temporada de avenida

Código	Nombre LMD Unidades	Na_tot 0.1 mg/l	Mg_tot 0.1 mg/l	K_tot 0.2 mg/l	Ca_tot 0.3 mg/l	Sr_tot 0.0005 mg/l	Li_tot 0.0004 mg/l	SiO2_tot 0.5 mg/l	Ag_tot 0.0003 mg/l	Al_tot 0.005 mg/l	As_tot 0.001 mg/l	B_tot 0.05 mg/l	Ba_tot 0.0005 mg/l	Be_tot 0.0002 mg/l	Bi_tot 0.0002 mg/l	Cd_tot 0.0002 mg/l
13188-16-SW-141	Estándar	9.5	9.2	9.6	9.5	0.0021	0.0020	5.0	0.0011	0.022	0.010	2.20	0.0103	0.0018	0.0020	0.0022
13188-16-SW-144	Estándar	9.9	9.9	10.6	10.6	0.0020	0.0021	4.8	0.0009	0.021	0.011	2.05	0.0021	0.0020	0.0019	0.0021
13188-16-SW-146	Estándar	10.2	10.4	10.3	11.3	0.0020	0.0021	4.5	0.0009	0.021	0.009	1.90	0.0028	0.0021	0.0019	0.0019
13188-16-SW-148	Estándar	9.8	9.8	9.7	10.4	0.0023	0.0021	4.8	0.0009	0.022	0.012	1.96	0.0023	0.002	0.0021	0.0020
Concentración requerida1: 13188-16-SW-141		10.2	10.4	9.9	10.7	0.0023	0.0023	4.5	0.0012	0.023	0.010	2.03	0.0086	0.0023	0.0019	0.0019
% Calidad de medición (RC/CRE)		93.1	88.5	97.0	88.8	91.3	87.0	111.1	91.7	95.7	100.0	108.4	119.8	78.3	105.3	115.8
Concentración requerida2: 13188-16-SW-144		10.1	10.1	9.8	10.7	0.0082	0.0027	4.5	0.0009	0.023	0.012	1.97	0.0028	0.0024	0.0023	0.0021
% Calidad de medición (RC/CRE)		98.0	98.0	108.2	99.1	24.4	77.8	106.7	100.0	91.3	91.7	104.1	75.0	83.3	82.6	100.0
Concentración requerida3: 13188-16-SW-146		10.4	10.2	10.1	11.1	0.0103	0.0029	4.7	0.0010	0.024	0.012	2.05	0.0039	0.0024	0.0022	0.0020
% Calidad de medición (RC/CRE)		98.1	102.0	102.0	101.8	19.4	72.4	95.7	90.0	87.5	75.0	92.7	71.8	87.5	86.4	95.0
Concentración requerida4: 13188-16-SW-148		10.0	10.4	9.9	10.4	0.0026	0.002	4.7	0.0009	0.021	0.012	1.99	0.0026	0.0024	0.0023	0.0021
% Calidad de medición (RC/CRE)		98.0	94.2	98.0	100.0	88.5	105.0	102.1	100.0	104.8	100.0	98.5	88.5	83.3	91.3	95.2

Fuente: Elaboración propia.



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



Tabla 24 Concentraciones Reporte y análisis de precisión de análisis de muestras estándares versus metales totales, temporada de avenida

Código	Nombre	Co_tot	Cr_tot	Cu_tot	Fe_tot	La_tot	Mn_tot	Mo_tot	Ni_tot	Pb_tot	S_tot	Sb_tot	Se_tot	Sn_tot	Zn_tot
	LMD	0.0002	0.001	0.0005	0.01	0.0002	0.0002	0.0002	0.0007	0.0005	0.3	0.0008	0.002	0.0005	0.001
	Unidades	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
13188-16-SW-141	Estándar	0.0022	0.023	0.0025	0.19	0.0021	0.0027	0.0023	0.0022	0.0031	1.0	0.0020	0.023	0.0053	0.019
13188-16-SW-144	Estándar	0.0019	0.021	0.0021	0.20	0.0020	0.0021	0.0020	0.0020	0.0021	1.7	0.0020	0.021	0.0021	0.021
13188-16-SW-146	Estándar	0.0019	0.021	0.0021	0.20	0.0019	0.0021	0.0019	0.0021	0.0020	1.9	0.0019	0.020	0.0021	0.021
13188-16-SW-148	Estándar	0.0020	0.021	0.0022	0.21	0.0022	0.0022	0.0022	0.0020	0.0021	1.2	0.0022	0.022	0.0022	0.020
Concentración requerida1: 13188-16-SW-141		0.0018	0.019	0.0024	0.20	0.0018	0.0020	0.0020	0.0021	0.0030	1.1	0.0019	0.023	0.0174	0.023
% Calidad de medición (RC/CRE)		122.2	121.1	104.2	95.0	116.7	135.0	115.0	104.8	103.3	90.9	105.3	100.0	30.5	82.6
Concentración requerida2: 13188-16-SW-144		0.0018	0.019	0.0023	0.21	0.0019	0.002	0.002	0.0024	0.0024	1	0.002	0.023	0.0031	0.023
% Calidad de medición (RC/CRE)		105.6	110.5	91.3	95.2	105.3	105.0	100.0	83.3	87.5	170.0	100.0	91.3	67.7	91.3
Concentración requerida3: 13188-16-SW-146		0.0018	0.02	0.0022	0.2	0.0019	0.002	0.002	0.0019	0.0025	1.1	0.002	0.023	0.0048	0.024
% Calidad de medición (RC/CRE)		105.6	105.0	95.5	100.0	100.0	105.0	95.0	110.5	80.0	172.7	95.0	87.0	43.8	87.5
Concentración requerida4: 13188-16-SW-148		0.0019	0.019	0.0022	0.22	0.0019	0.0019	0.0019	0.0018	0.0024	1.1	0.002	0.023	0.0033	0.022
% Calidad de medición (RC/CRE)		105.3	110.5	100.0	95.5	115.8	115.8	115.8	111.1	87.5	109.1	110.0	95.7	66.7	90.9

Fuente: Elaboración propia.



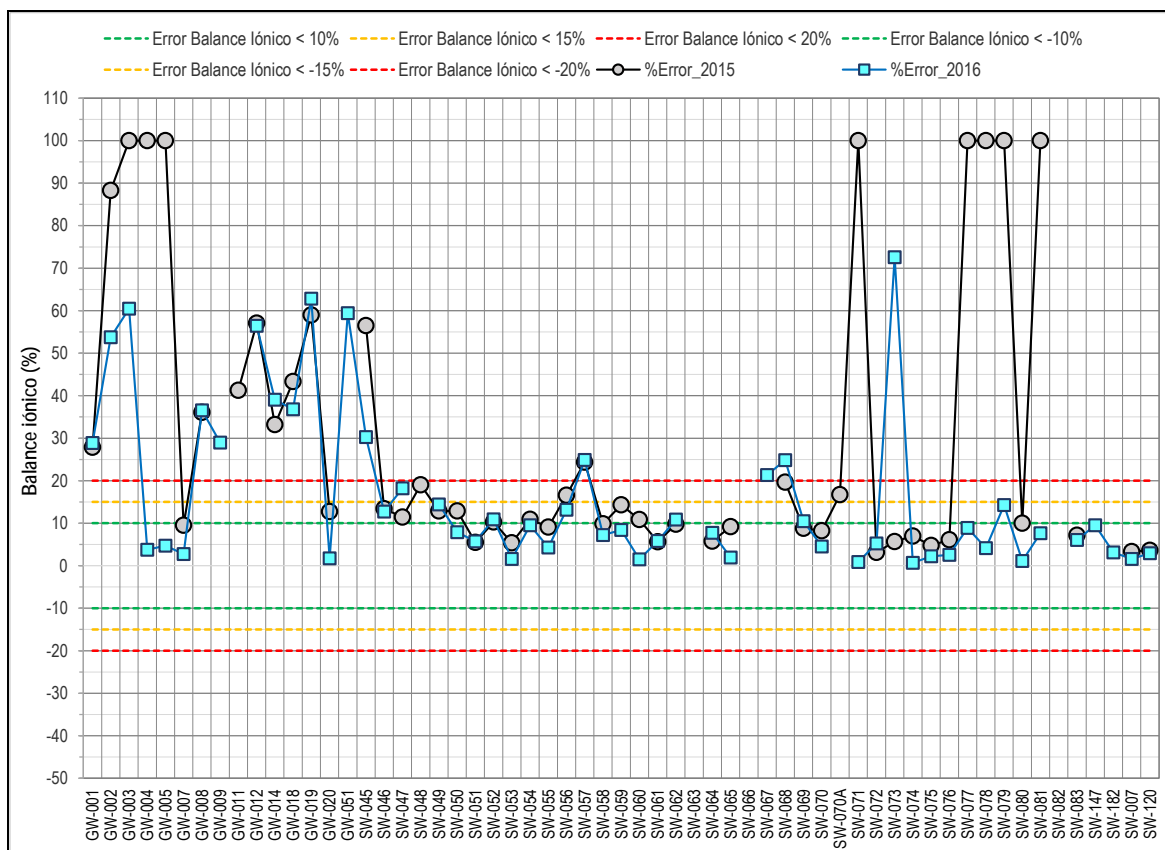
5.4.5. BALANCE IÓNICO

Calcular el error de equilibrio de carga es una práctica estándar para evaluar la precisión del análisis del agua. Para ello, se debe realizar un análisis completo, incluyendo los principales iones disueltos (normalmente Na, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, HCO⁻ y SO₄²⁻; ocasionalmente también K⁺, Fe²⁺, Fe³⁺, Mn²⁺, Al³⁺, CO₃²⁻ y NO₃⁻), la fórmula del equilibrio iónico es la siguiente:

$$\% \text{ de error} = \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}} * 100$$

El equilibrio iónico muestra que la suma de las concentraciones de cationes debe ser igual a la suma de las concentraciones de aniones. En general, se considera aceptable un error de hasta el 15% en el equilibrio de carga. A continuación, la Figura 76 muestra los resultados de la evaluación del balance iónico de la muestra obtenida.

Figura 76 Balance iónico de los resultados del muestreo en temporada de estiaje y avenida



Fuente: Elaboración propia.

Podemos observar, que se tiene fuentes de aguas con balance iónico inferiores al +/-15 %, y otras mayores a este intervalo. Este aspecto va relacionado, para el caso a la temporada de estiaje al tema logístico ocurrido por el cambio de laboratorio externo al institucional, donde no se tuvo algunas muestras para analizar por elementos mayoritarios. Por otro lado, se tiene en cuenta la naturaleza de la muestra, donde para la subcuenca Ichuña y particularmente en la microcuenca Crucero se tienen fuentes termales y otras relacionadas a rocas con ocurrencias mineralizantes, por lo cual, los estados



de oxidación y reducción de las muestras de agua puede verse alterada, tanto al momento del muestreo, preservación y transporte para su respectivo análisis.

5.4.6. INFERENCIAS Y ANÁLISIS DEL QA/QC

El análisis comparativo de los datos de muestras duplicadas, indican que el trabajo es “representativo” desde el punto de vista de precisión. En las estaciones de muestreo 49996-18-SW-023, 49996-18-SW-044, 49996-18-SW-074, 49996-18-SW-095, 49996-18-SW-032, 49996-18-SW-028 y 49996-18-SW-035, existen ligeras variaciones de precisión en 6 elementos disueltos (Al, As, B, Li, Mn y Si) y 4 elementos totales (As, B, Li y Si).

El procesamiento de datos del blanco de campo, muestra ligera contaminación en sodio disuelto en las muestras 49996-18-SW-007, 49996-18-SW-043 y 49996-18-SW-067. Existe la presencia de cobre total (Cu) para la muestra 49996-18-SW-067. La contaminación de los analitos de sodio (Na) y cobre (Cu) se debe probablemente al ambiente donde se hizo la toma de blancos de campo.

Para blancos viajeros, el procesamiento de datos indica contaminación en sodio disuelto en la muestra 49996-18-SW-018. Asimismo, se presenta contaminación importante en metales disueltos (Ag, Al, Ba, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr y Zn) para la muestra 49996-18-SW-080, debido al mal cierre del envase (digitube) por parte de laboratorio (en campo se encontró el digitube con tapa mal cerrada y la mitad de agua ultrapura, dentro de las bolsas individuales del blanco).

La exactitud del trabajo fue alta en el 80.13% de comparaciones. La Tabla 21, 22, 23 y 24, muestran en letra roja, los elementos disueltos y totales como “no exactos” (Ag, B, Cu, Pb y Tl). Así mismo, se determina que sólo el boro disuelto, plata total, boro total y silicio total como elementos con exactitud moderada.

El balance iónico muestra en general, que la mayoría de las fuentes de aguas subterráneas y superficiales se encuentran inferiores al intervalo +/-15%. Cabe indicar, que se presentan muestras que superan a este límite, los cuales pueden estar relacionados a la naturaleza de las aguas y condicionados a los procesos de oxidación y reducción.

5.5. FACIES HIDROQUÍMICAS

5.5.1. DIAGRAMAS DE PIPER

Los resultados de análisis químico realizados a las muestras obtenidas en la campaña de campo, se representaron los cationes y aniones mayoritarios en el gráfico triangular y rómbico del diagrama de Piper (1953), el cual permite interpretar y visualizar su composición química, evolución espacial y temporal del agua.

Las muestras analizadas se constituyen de aguas subterráneas y superficiales de la microcuenca Crucero, Ichuña y San Antonio (Figura 74) y se distribuyen predominantemente se tienen cinco (5) especies o familias hidroquímicas (Tabla 25), que se describen a continuación:



Tabla 25 Facies hidroquímicas predominantes en la microcuenca Crucero

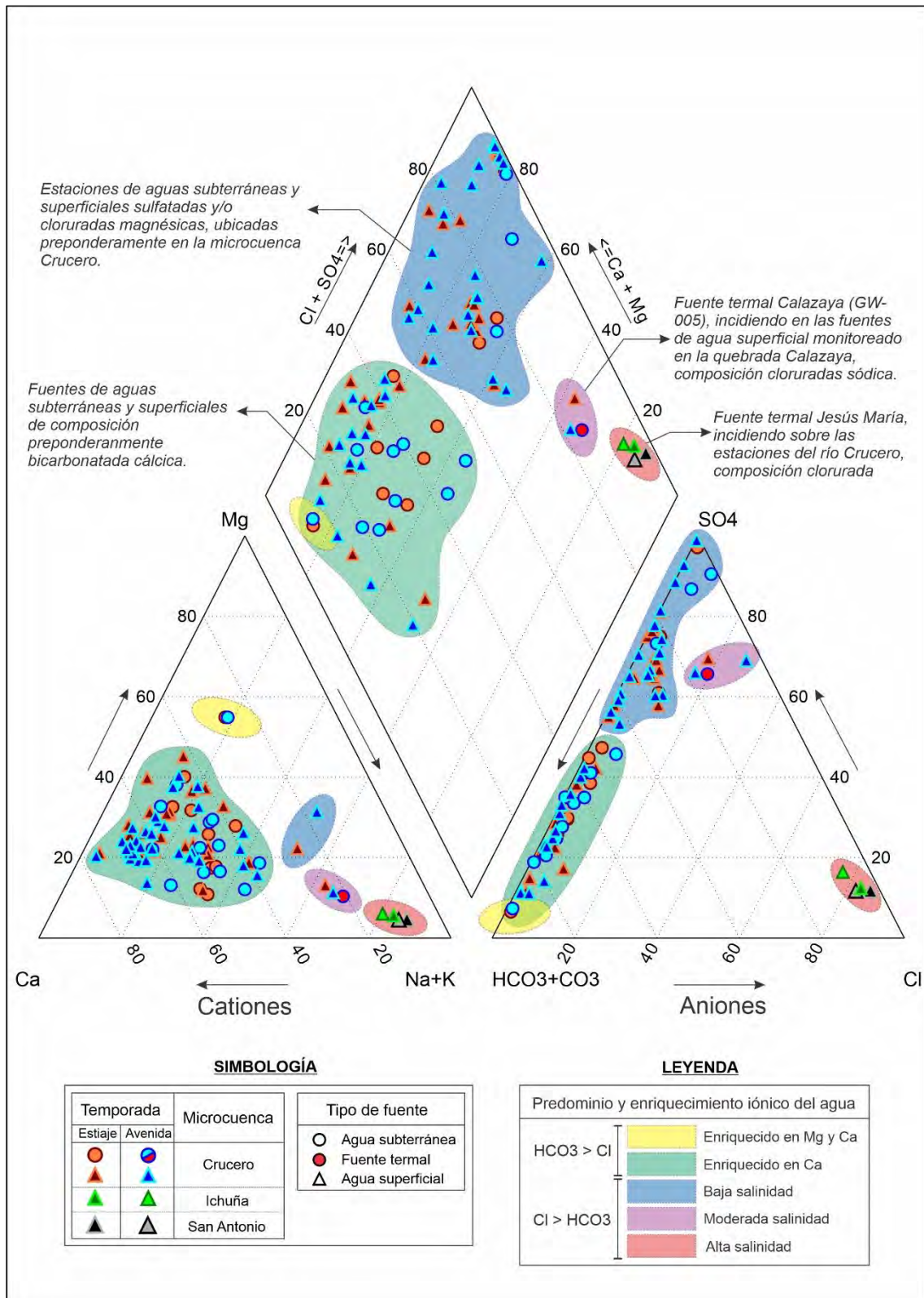
Facies	Fórmula iónica	Fuente
Bicarbonatada cálcica	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$	Aguas subterráneas y superficiales en contacto con rocas sedimentarias del Grupo Yura.
Sulfatada cálcica	$\text{SO}_4\text{-Ca}$	Aguas superficiales en mayor proporción, interactúan con las rocas volcano-sedimentarias del Grupo Barroso e intrusivos de composición andesítica.
Sulfatada sódica	$\text{SO}_4\text{-Na}$	Aguas de origen termal que interactúan con las secuencias cuarzosas de la Formación Huallhuani.
Clorurada cálcica	Cl-Ca	Aguas predominantemente de origen termal que interactúan con las rocas volcano-sedimentarias del Grupo Maure.

Fuente: Elaboración propia.

- La primera facie dominante es el de tipo Bicarbonatada Cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$), corresponde aguas de infiltración y están conformadas por manantiales y ríos, provenientes altas partes altas y su recarga se relaciona en mayor predominio a las unidades sedimentarias del Grupo Yura al sur y suroeste de la microcuenca Crucero, y en menor proporción a las secuencias volcano-sedimentarias de la Formación Lllallhui, Grupo Maure y Barroso, predominantes en la zona de estudio. Para la temporada de estiaje, el contenido de bicarbonato varía de 13 a 290 mg/L y calcio de 3.4 a 223 mg/L, y para la temporada de avenida se tienen bicarbonato valores de 7 a 375 mg/L y calcio de 2.3 a 252.7 mg/L. Podemos analizar que los datos disminuyen, posiblemente relacionado a las precipitaciones del sector.
- La segunda facie es de tipo Sulfatada Cálcica ($\text{SO}_4\text{-Ca}$), se presenta en mayor proporción en los cursos monitoreados de ríos y quebradas tributarios al río Crucero, estas aguas provienen en general de la recarga de las rocas volcano-sedimentarias del Grupo Barroso y rocas intrusivas de composición andesítica ubicadas al N y E de la microcuenca Crucero (Mapa 28 y 29). La temporada de estiaje muestra sulfato con valores de 5 a 1095 mg/L, y para avenida valores de 3.7 a 1103.2 mg/L.
- La tercera facie es de tipo Sulfatada Sódica ($\text{SO}_4\text{-Na}$), se conforman las aguas provenientes de la Fuente Termal Calizaya (GW-005), donde se mantiene su característica en las fuentes monitoreadas aguas abajo en el río Crucero. Este tipo de aguas interactúa con las areniscas cuarzosas de la Formación Huallhuani. La temporada de estiaje muestra sodio con valores de 1.4 a 2171 mg/L, y para avenida valores de 1 a 877.1 mg/L.
- La cuarta facie es de tipo Clorurada Sódica (Cl-Na), está conformada por las aguas provenientes de la Fuente Termal Jesús María (GW-035), las cuales aportan al río San Antonio y aguas abajo confluencia con el río Crucero para formar el río Ichuña. Las aguas de esta facie interactúan con las rocas volcano-sedimentarias del Grupo Maure. La temporada de estiaje muestra cloro con valores de 0.2 a 3699.3 mg/l y para la temporada de avenida se tienen valores de 0.2 a 1349.3 mg/L.



Figura 77 Diagrama de Piper para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida)



Fuente: Elaboración propia.



5.5.2. DIAGRAMA DE DUROV

Nos permite analizar de forma resumida las características fisicoquímicas de las aguas subterráneas y superficiales para la temporada de estaje y avenida (Amaya, 2015). La Figura 78, expone que los aniones tienen una predominancia de relacionada al HCO_3 , mientras en menor presentan los analitos SO_4 y Cl , así mismo, se puede definir en los cationes que el analito predominante es el Ca , mientras que el Mg y Na se encuentran en un rango menor, siendo estas últimas estaciones las que se relacionan a fuentes termales en el área de estudio.

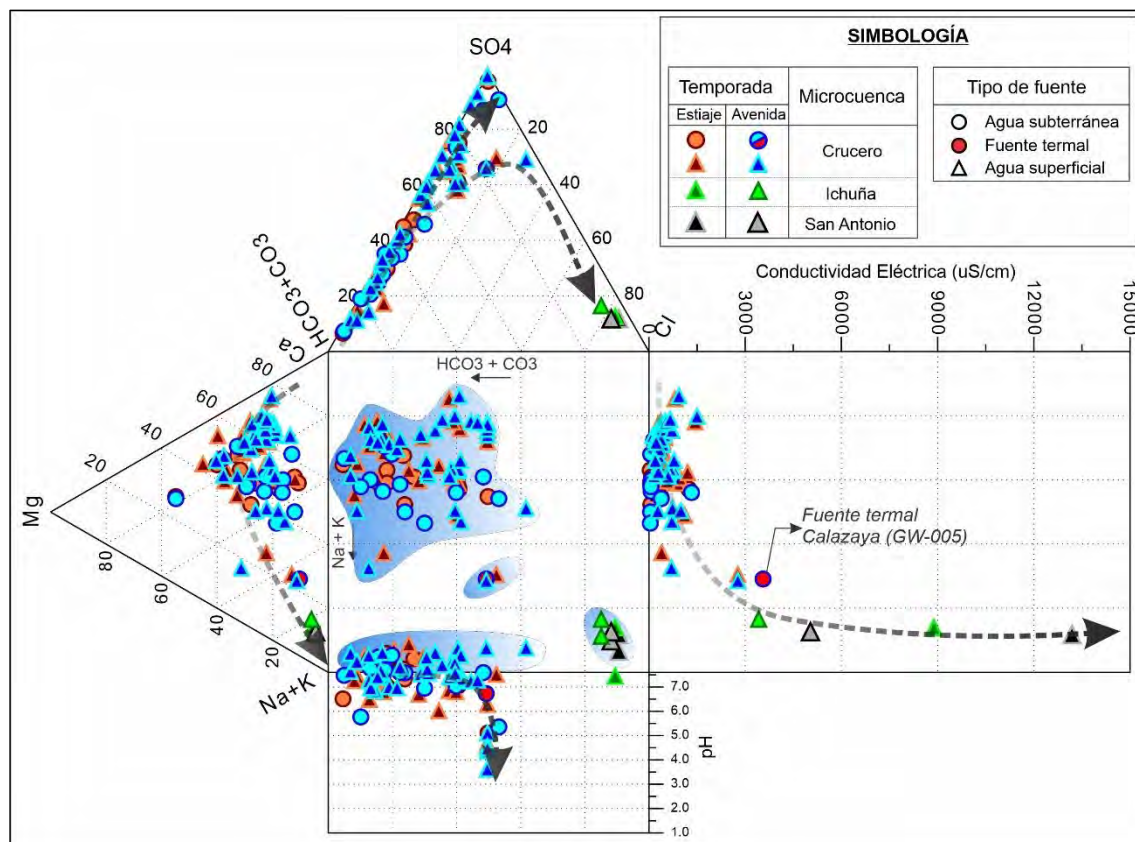
Por otro lado, la Figura 78 nos permite determinar que en general la mayor parte de las estaciones inventariadas en ambas temporadas tienen conductividades eléctricas $< 1700 \text{ uS/cm}$, mientras que por otro lado existen ciertas estaciones de aguas superficial que contienen elevados valores, las cuales están condicionadas por las fuentes termales existentes en el área evaluadas, las cuales son denominadas: Calazaya, Jesús María e Ichuña. Se puede definir que estas fuentes termales al presentar elevadas temperaturas pueden ocasionar la disolución de los minerales de las rocas o del basamento rocoso por donde circulan estas aguas subterráneas, por ello podemos elevadas concentraciones de sales disueltas con conductividades eléctricas $> 12,000 \text{ uS/cm}$.

En cuanto al pH se observa que las estaciones tienen valores superiores a 6.5, mostrando una característica más alcalina, excepcionalmente se tienen valores inferiores a 6.5, siendo estaciones frías que se relacionan a las secuencias volcánicas del estratovolcán San Miguel compuesta por andesitas porfíricas con presencia de minerales sulfurados (pirita) y óxidos de hierro, ubicados a la naciente de los ríos Lluchune y Yanquiri.

Finalmente, observamos que relación de $r\text{HCO}_3 + r\text{CO}_3$ y $r\text{Na} + r\text{K}$ (r : meq/L), expone tres (3) zonas definidas que son condicionadas por la concentración de sales y por el tipo de fuente, las estaciones que contienen $< \text{HCO}_3 + \text{CO}_3$ y $> \text{Na} + \text{K}$ preponderan en las estaciones de aguas subterráneas y superficiales frías, mientras que cuando se tienen $> \text{HCO}_3 + \text{CO}_3$ y $< \text{Na} + \text{K}$ se relacionan a fuentes termales.



Figura 78 Diagrama de Durov para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida)



Fuente: Elaboración propia.

5.6. ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS

Las relaciones iónicas entre especies disueltas nos permiten entender los cambios fisicoquímicos que afectan a las aguas subterráneas y superficiales a lo largo de su recorrido desde el área de recarga hacia los puntos de descarga que son manifestados en ríos, quebradas, manantiales, pozos, entre otros. Según Herrera (2001), las relaciones nos permiten conocer la interacción de los flujos con los materiales no consolidados y el macizo rocoso donde circula el agua y sus fenómenos modificadores que cambian su composición química. Es importante destacar que los pequeños errores analíticos pueden hacer variar de modo significativo el valor de las relaciones iónicas, especialmente en muestras que presentan una baja mineralización (Herrera, 2001).

La evaluación de las reacciones entre aniones y cationes muestran una información importante referida a la estequiometría del proceso geoquímico, tener una alta correlación permite definir la probable fuente u origen. Las relaciones calculadas nos ayudan a ver las tendencias de las concentraciones iónicas frente al aumento de la salinidad, estas son: r_{Na+}/r_{Cl-} , r_{Na+}/r_{K+} , r_{SO4-}/r_{Cl-} , r_{Mg+}/r_{Cl-} , r_{Mg+}/r_{Ca+} , r_{SO4-}/r_{Ca+} , $r_{Cl-}/r_{(HCO3-+CO3-)}$, r_{Cl-}/r_{B+} , r_{Cl-}/r_{F+} y r_{Cl-}/r_{Br+} .



5.6.1. $r_{Na/rCl}$

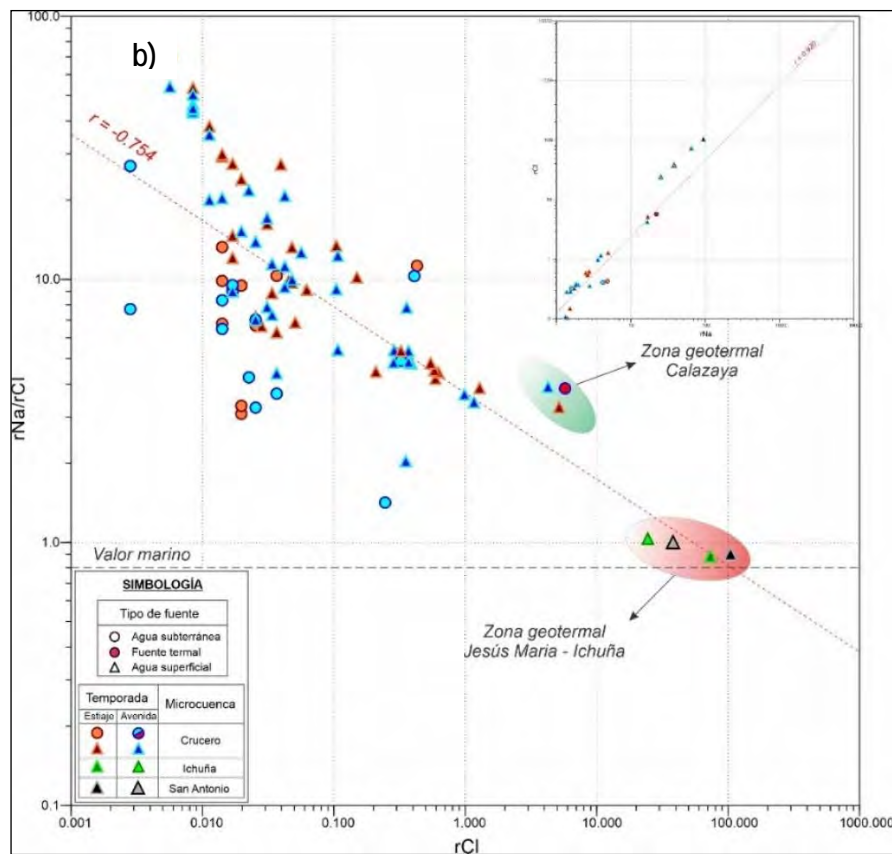
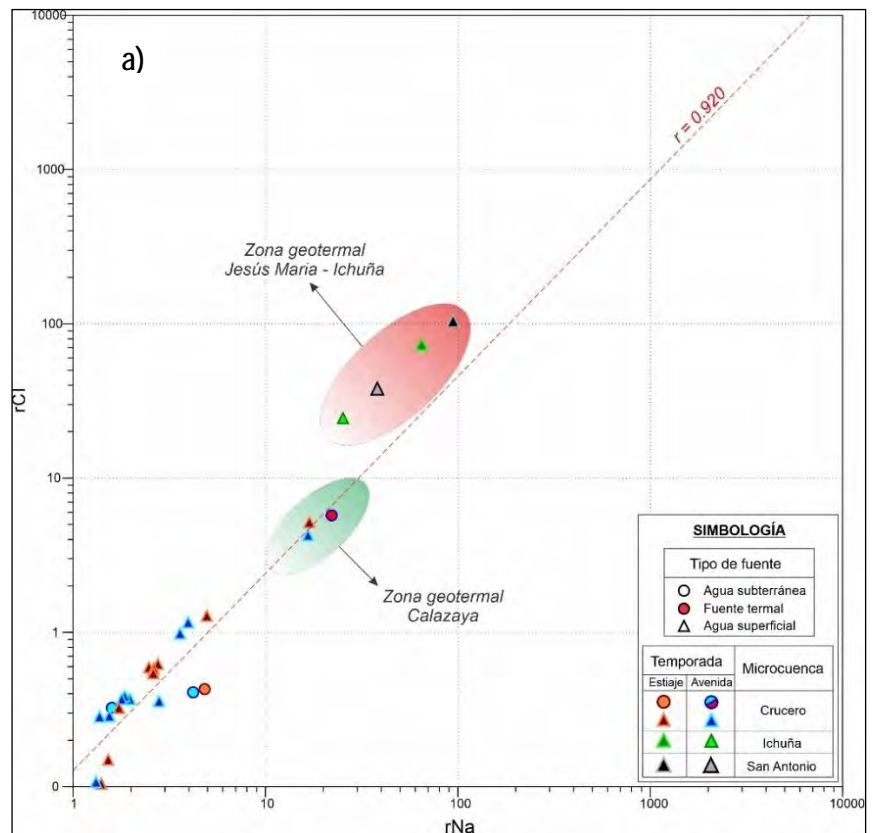
Esta relación iónica se usa comúnmente para identificar los mecanismos de adquisición de la salinidad y las intrusiones salinidad en terrenos semiáridos, así como para asociar la existencia de procesos de cambio de bases debido a que el ion Cl no es afectado por la retención con el terreno, mientras que el ion Na sí (Herrera, 2001). El valor de esta relación iónica puede verse alterado por la meteorización que afecta a algunos silicatos, los cuales podrían liberar Na al agua (Jalali y Khanlari, 2008).

La Figura 79 a permite interpretar que las aguas subterráneas y superficiales presentan una buena correlación (r igual a 0.92) para ambas épocas de muestreo, lo cual indica que las aguas subterráneas y superficiales son probablemente controladas por la interacción agua – roca. Las fuentes registradas en el área de estudio registran un valor promedio es de 8.6, en específico los valores máximos de la relación del agua subterránea (8.6 y 17.50) son más bajo que el agua superficial en ambas épocas (46.50 y 35).

Por otro lado, la Figura 79 b representa la relación $r_{Na/rCl}$ versus el ion Cl, para este análisis se ploteo el promedio normal de la relación $r_{Na/rCl}$ para el agua de mar cuyo valor es 0.86, y donde se determina que las fuentes inventariadas en general registran valores superiores a esta relación y lo cual puede estar relacionado a que existe un mayor aporte de Na por la alteración de las plagioclasas, considerar para este caso las unidades volcánicas y volcansedimentarias son predominantes para el área de estudio. Así mismo, se tiene que las fuentes superficiales y subterráneas correspondientes a la zona geotermal Calazaya y principalmente Jesús María de la Microcuenca Ichuña tienen una tendencia que se aproxima a la relación del agua de mar, lo cual se podría interpretar que la solubilidad de los iones Cl y Na estaría relacionado sistemas geotérmicos que generan muy elevadas temperaturas y acidez del agua que ocasiona reacciones de precipitación y disolución. Así mismo, se evidencia que las fuentes inventariadas tienen un mayor aumento de la concentración iónica, y lo cual podemos correlacionar con el diagrama de Piper (Figura 77).



Figura 79 Relación rNa versus rCl (a), y rNa/rCl versus rCl (b).



Fuente: Elaboración propia.

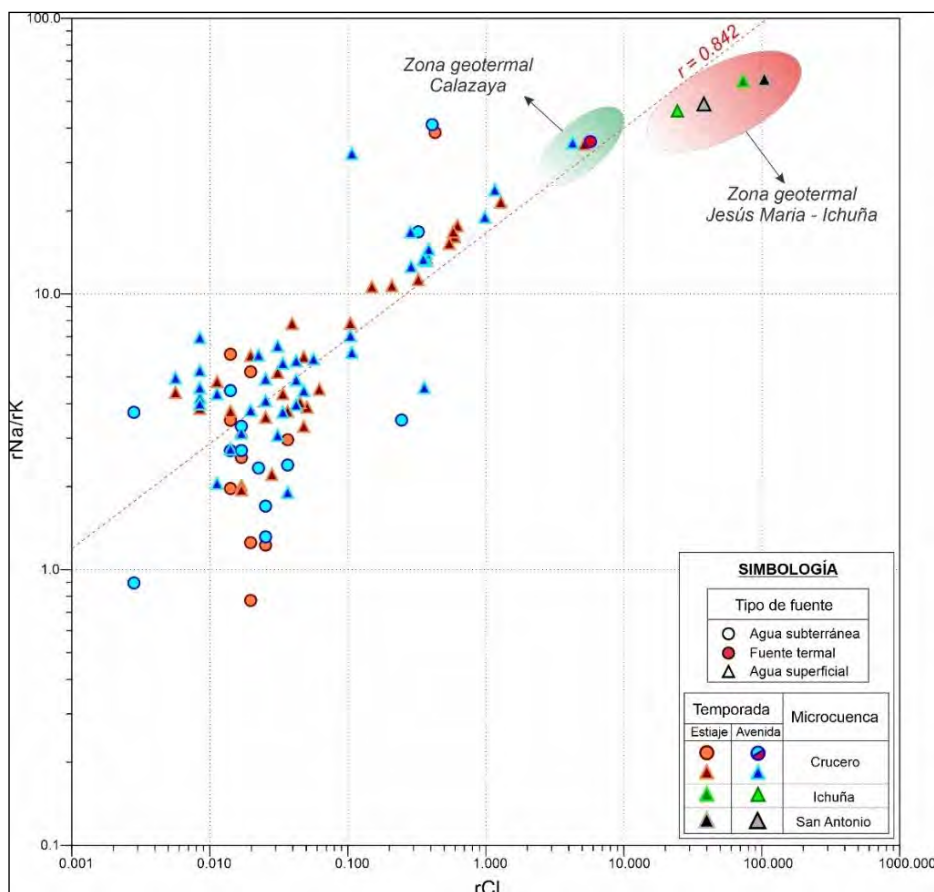


5.6.2. rNa/rK

Los valores más frecuentes en agua dulce suelen estar en el rango de 3 y 250, y el agua marina puede variar entre 40 y 50 (Custodio y Llamas, 1983). Las estaciones de aguas superficiales y subterráneas evaluadas para la época seca y húmeda tienen un valor promedio de 6.05 y 5.96, mientras que el valor máximo es 35.42 y 28.76, y mientras el valor mínimo es 0.45 y 0.53, respectivamente.

La Figura 80 muestra que las fuentes inventariadas tienen una buena correlación, siendo r igual a 0.842 para ambas épocas de muestreo hidroquímico, se puede mostrar que la gran parte de los resultados obtenidos para las estaciones tienen bajas concentraciones para aguas referidas a la microcuenca Crucero, mientras que existen en menor proporción estaciones que tienen altas concentraciones en razón de rNa/rK y el rCl que se conforman estaciones de Calazaya que forma parte de la microcuenca Crucero y las estaciones de Jesús María que se encuentran en la microcuenca Ichuña, probablemente la solubilidad de los elementos y mayores concentraciones se relacionen a las altas temperaturas por presentan dichas estaciones, por lo cual llegan a formar zonas geotermales en ambas microcuencas.

Figura 80 Representación de relación rNa/rK versus rCl .



Fuente: Elaboración propia



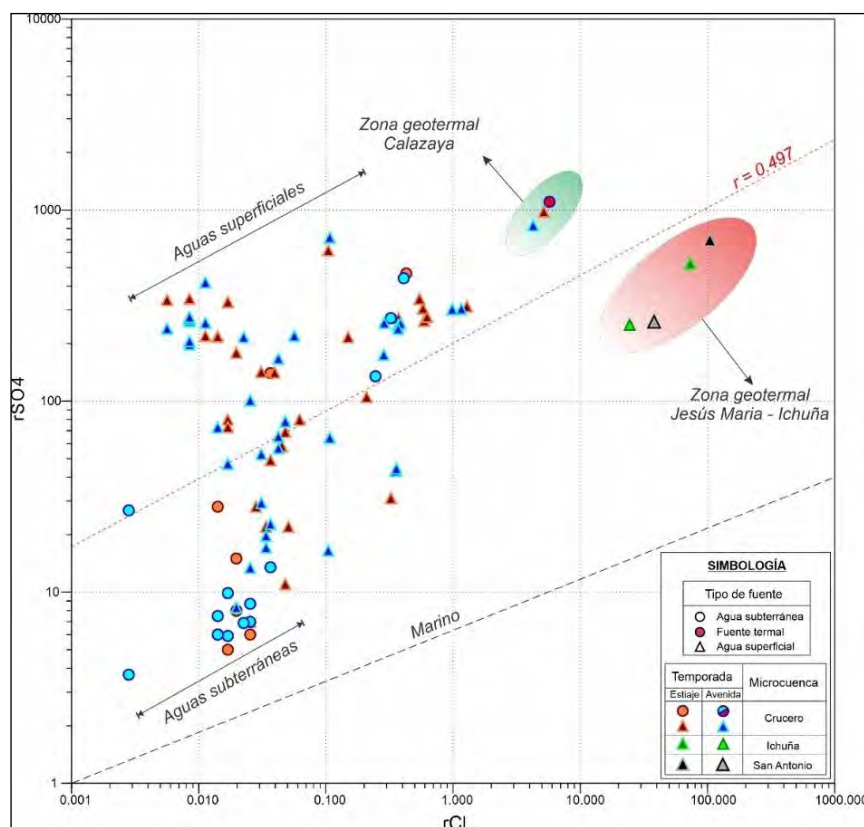
5.6.3. rSO_4/rCl

El valor de relación para el agua de mar se considera de 0.11 y en precipitaciones locales un rango de 0.34, donde las estaciones presentan un ligero valor que supera a los mencionados (Herrera, 2001). La Figura 81 muestra que la relación rSO_4 versus el rCl para las estaciones de aguas subterráneas en época de húmeda y seca tienen una menor concentración en rSO_4 a diferencia que las estaciones de agua superficial donde hay una mayor prevalencia de este analito.

Por otro lado, la Figura 81 expone que las fuentes termales como Calazaya tiene una mayor proporción en el analito rSO_4 , mientras que las estaciones de agua de Jesus Maria presenta una alta concentración en rCl , esto se puede deber a dos aspectos, para el caso de Calazaya al estar en contacto con areniscas de la formación Huallhuani, mientras que las aguas subterráneas de la fuente Jesus Maria tendría como condicionante un mayor recorrido y circulación en el basamento rocoso.

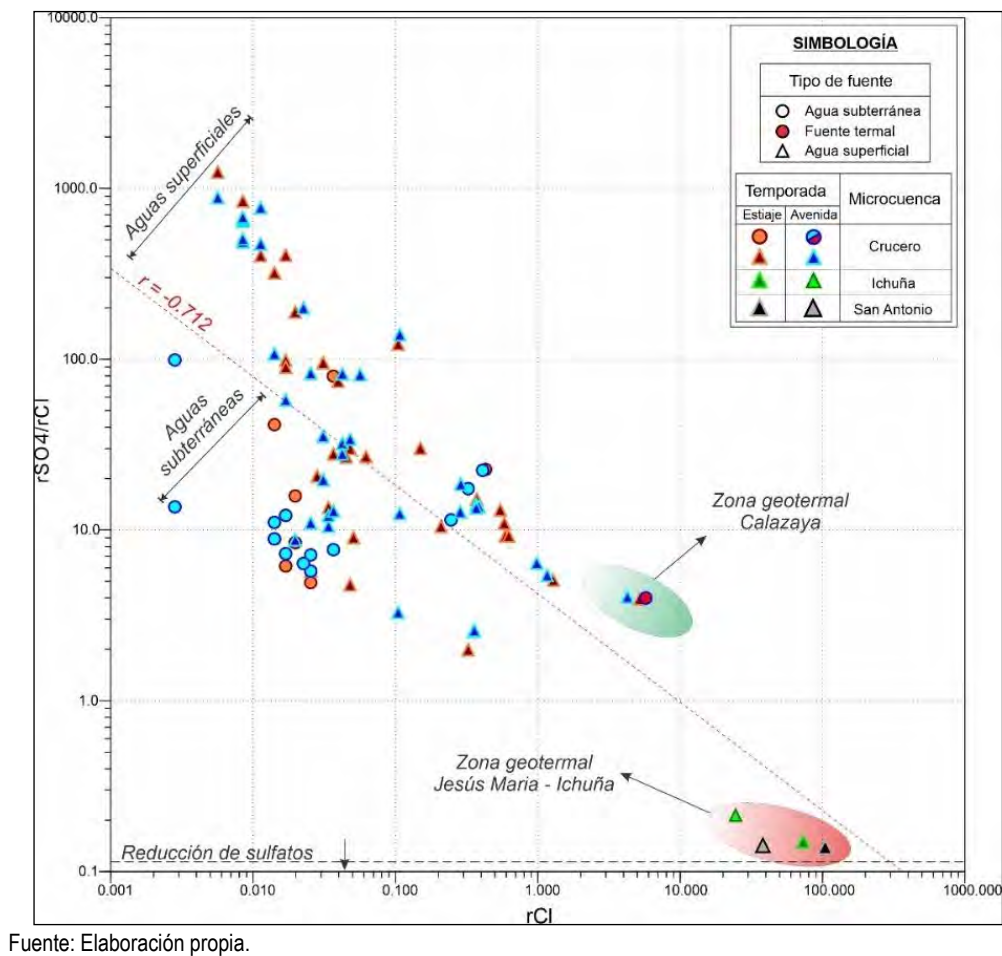
La Figura 81, presenta la relación de rSO_4/rCl versus rCl , donde la microcuenca Crucero difiere de las aguas superficiales, estas últimas tienden a tener mayores concentraciones de rSO_4/rCl , así mismo se observa que las fuentes de Calazaya llegan a tener una mayor concentración de rCl , y por otro lado, las estaciones de Jesus Maria que forma parte de la microcuenca Ichuña llegan a presentar las mayores concentraciones del analito rCl , se infiere estas últimas estaciones están influenciadas por la alta temperatura y presión que presenta por estar ligados a zonas geotermales.

Figura 81 Representación de relación rSO_4 versus rCl .



Fuente: Elaboración propia.

Figura 82 Representación de relación rSO_4/rCl versus rCl .



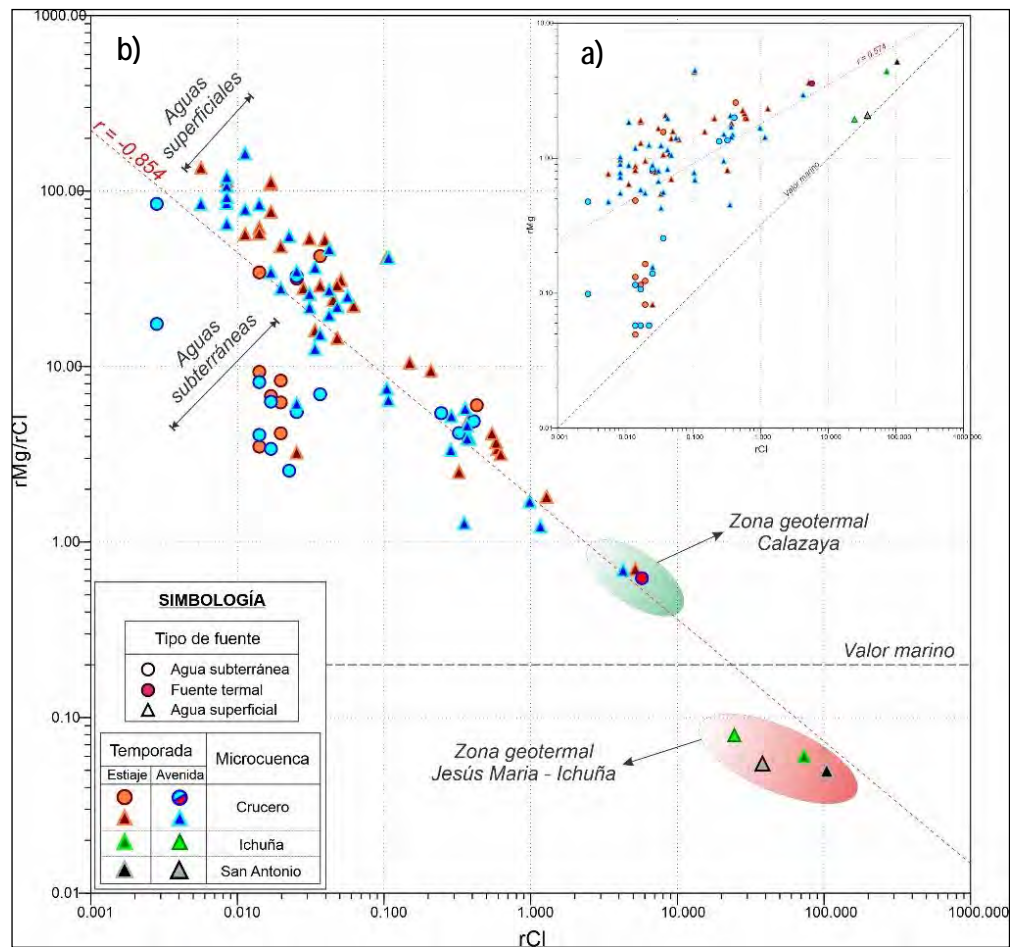
5.6.4. rMg/rCl

El rMg en esta relación presenta una mayor concentración en aguas marinas y con ello se puede evaluar alguna posible mezcla de aguas de origen meteorológico con aguas marinas, así mismo, precisar que las altas concentraciones de rMg pueden estar relacionado a la alteración de silicatos por procesos de absorción (Herrera, 2001). La Figura 83a muestra que la relación de rMg/rCl tiene una moderada correlación (r igual a 0.574), y donde en general la relación expone dos agrupaciones marcadas, siendo las aguas subterráneas en época húmeda y seca las que presentan una menor concentración de rMg y, por otro lado, se tiene que las aguas superficiales en ambas épocas tienden a tener altas concentraciones de rMg y pueden llegar a tener moderadas concentraciones de rCl . Finalmente, las estaciones de Jesús María tienden a tener altas concentraciones de rMg y rCl , y las cuales forman parte de la microcuenca Ichuña y Crucero.

La Figura 83b muestra que las estaciones de aguas subterráneas y superficiales se agrupan diferidamente en ambas temporadas, siendo las estaciones de agua superficial que tienen altas concentraciones de rMg/rCl . Por otro lado, la fuente termal Calazaya tiene una baja relación para el rMg/rCl y aumenta en rCl , mientras que las fuentes de María que se ubica en la microcuenca Ichuña y San Antonio presenta una muy elevada concentración de rCl , es probable que las temperaturas y presiones de las aguas termales generen procesos de solubilidad a lo largo de su trayecto y permanencia en el basamento rocoso.



Figura 83 Representación de relación rMg/rCl versus rCl .



Fuente: Elaboración propia.

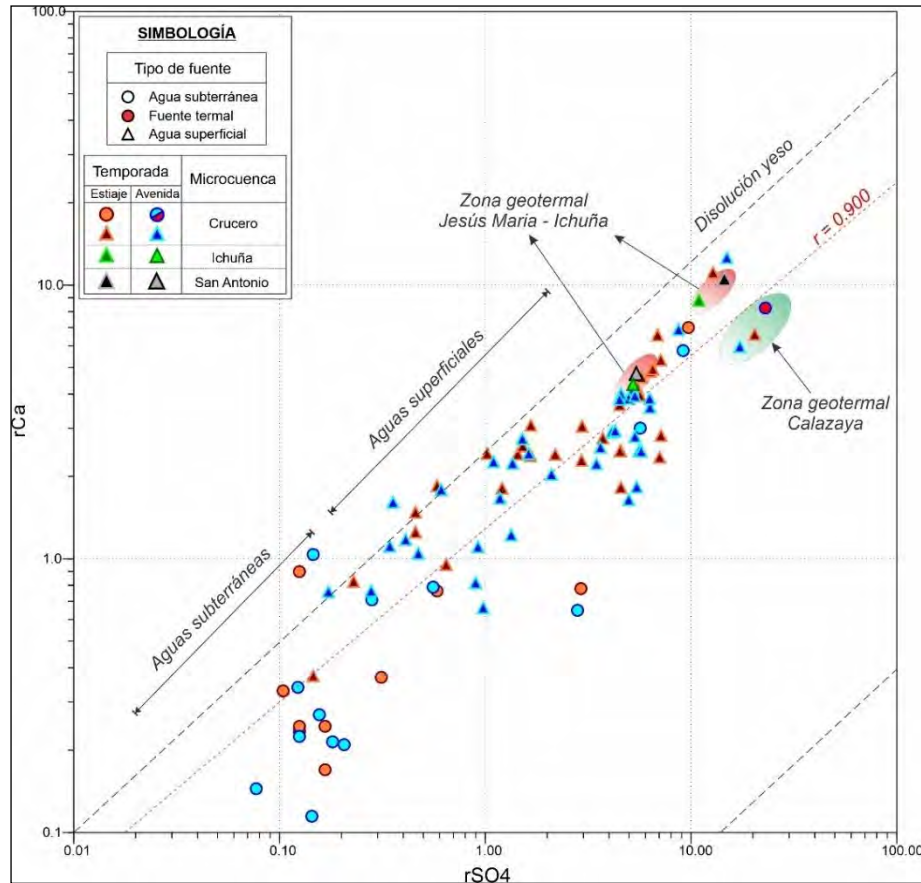
5.6.5. rSO_4/rCa

Esta relación tiene el fin de analizar el origen del sulfato en las aguas subterráneas y superficiales. La Figura 30 presenta que la relación tiene una buena correlación (r es igual a 0.90), así mismo expone que las estaciones de agua subterráneas en ambas épocas presentan concentraciones más bajas en razón de rSO_4 y rCa (Herrera, 2001), esto puede deberse a que obedecen a un sistema de recarga local y somero, mientras que las estaciones de agua superficial muestran una mayor concentración en rSO_4 y rCa , lo cual puede evidenciar que hay un incremento de estos analitos que pueden estar influenciados por el recorrido de las aguas que da tiempo a que tenga interacción con el basamento rocoso que atraviesa, es decir con las roca volcano sedimentarias de la Formación Llallahui, Grupo Maure y Barroso que adicionen elementos solubles como el rSO_4 y rCa a partir de la descomposición de la plagioclasas y feldespatos (Figura 84).

Finalmente, se tienen que las estaciones de agua termal como Calazaya y Jesús María tienen altas concentraciones de los analitos mencionados, para este punto se puede ver una diferencia ligera y marcada, es decir, la denominada zona geotermal Jesús María presenta un incremento del rCa lo cual puede relacionarse a que estas fuentes de agua afloran en un medio volcánico sedimentario conformado por el Grupo Maure el cual confiere un incremento importante de rCa por la alteración posiblemente de las plagioclasas, mientras la zona geotermal Calazaya presenta una disminución del

rCa pero hay un aumento de rSO₄ dado que aflora en la Formación Huallhuani que ciertos materiales pelíticos que la conforman pueden conferir el analito en mención.

Figura 84 Representación de relación rCa versus rSO₄.



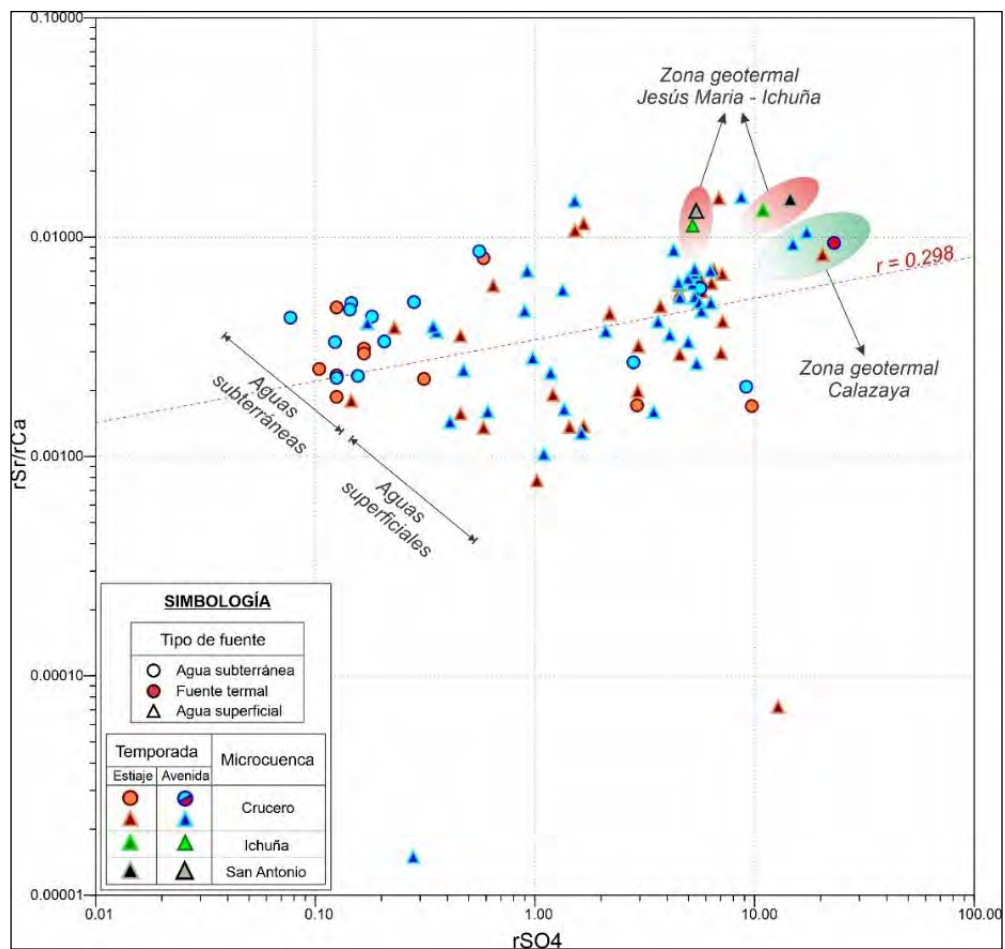
Fuente: Elaboración propia.

5.6.6. rSr/rCa

Las concentraciones de rSr en general a nivel de las muestras de agua con inferiores a los límites de detección dado que es muy atípico obtener valores elevados, según la relación de rSr/rCa para las aguas marinas van en el rango de $14 \cdot 10^3$ (Custodio y Llamas, 1983).

La relación de las estaciones de agua subterránea y superficial se agrupan por zonas, es decir, la relación de rSr/rCa versus rSO₄ es menor para las aguas subterráneas en la microcuenca Crucero, mientras que esta relación aumenta para las aguas superficiales, cabe precisar que ciertas estaciones de aguas subterráneas acompañan a este último agrupamiento. Por otro lado, se tienen que las zonas geotermales de Calazaya y Jesus Maria tienen una mayor concentración de la relación evaluada, es lo más probable que por el tipo de fuente tengan cierta solubilidad de minerales que conlleve a tener mayores concentraciones de los analitos evaluados (Figura 85).

Figura 85 Representación de relación rSr versus rCa.



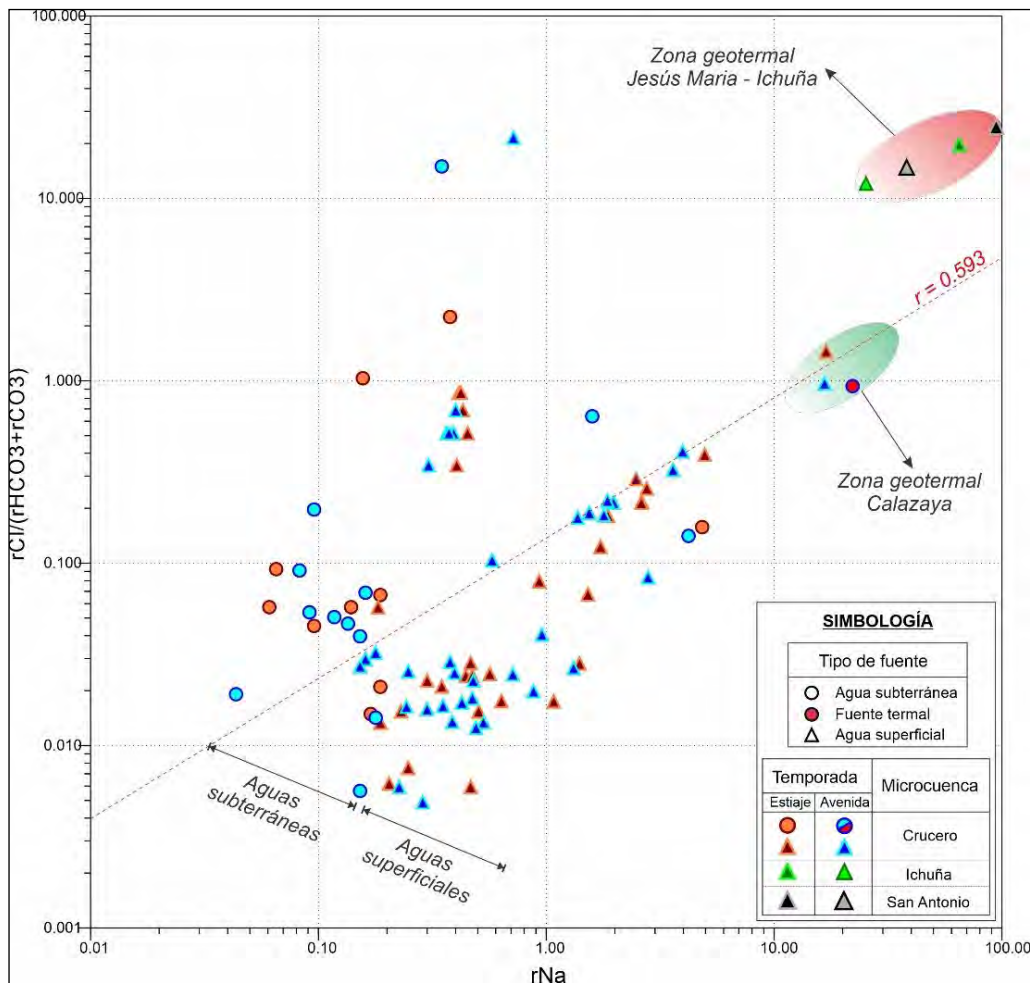
Fuente: Elaboración propia.

5.6.7. $rCl/r(HCO_3 + CO_3)$

Las aguas continentales en general presentan pH que son mayores a 7, y cuyos valores de relación van de 0.1 y 5, así mismo el agua de mar presenta valores en el rango de 20 y 50 (Custodio y Llamas, 1983). Así mismo, si se tiene un crecimiento continuo o un incremento de la relación iónica analizada se podría interpretar que existen procesos de incorporación selectiva de cloruro y lo cual puede indicar distintos orígenes de las aguas (Custodio y Llamas, 1978).

La Figura 86 muestra que hay una moderada correlación de los resultados de las estaciones analizadas, siendo r igual a 0.593. Así mismo, se muestra que las estaciones de aguas subterráneas tienen una mayor concentración de $rCl/r(HCO_3 + CO_3)$ versus rNa para ambas épocas, mientras que las aguas superficiales tienen un menor $rCl/r(HCO_3 + CO_3)$ y va creciendo el analito rNa . Lo propio se puede observar que las estaciones ligadas a aguas termales como es de Calazaya, tiene una alta concentración de $rCl/r(HCO_3 + CO_3)$ y rNa , mientras que las estaciones de Jesús María se eleva su concentración de $rCl/r(HCO_3 + CO_3)$ y rNa , propiamente eso se debe a la solubilidad que el agua de alta temperatura ejerce sobre el basamento rocoso de naturaleza volcánico sedimentario (Figura 86).

Figura 86 Representación de relación $rCl/r(HCO_3+CO_3)$ versus rCa .

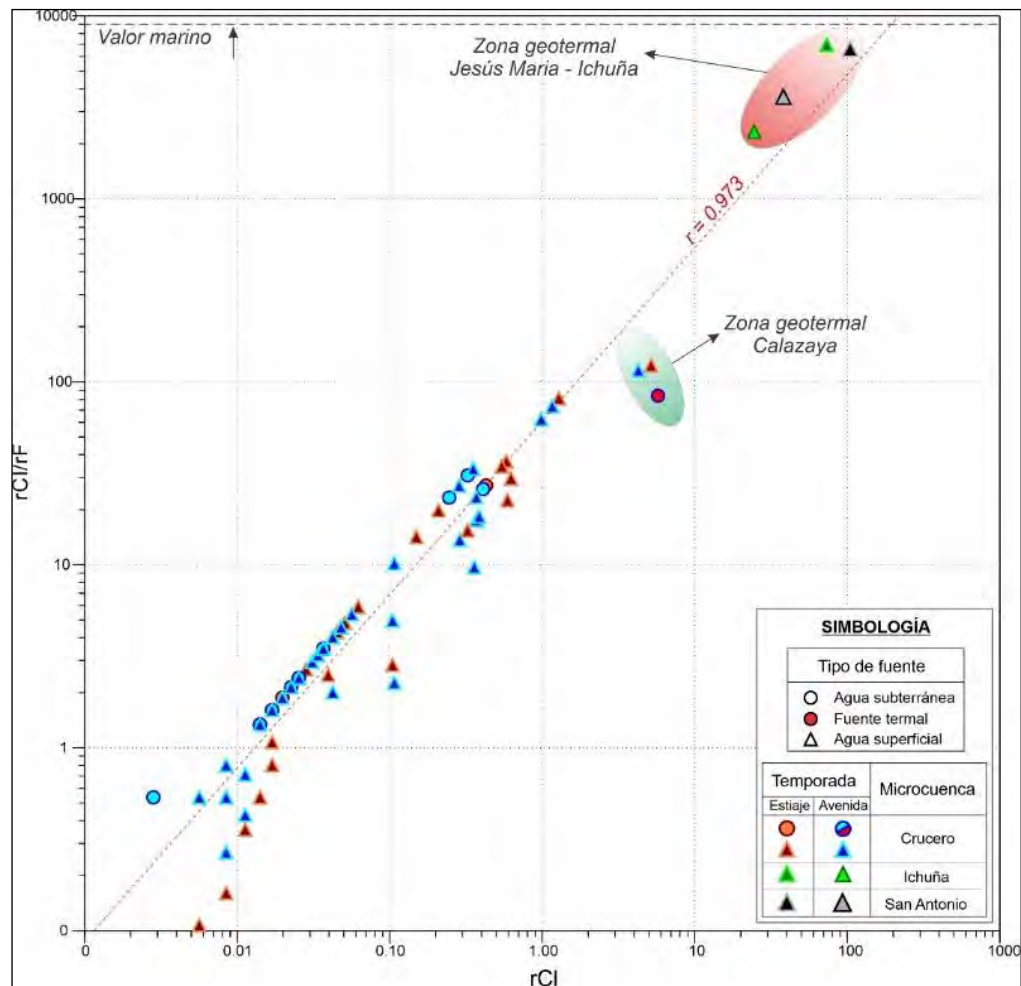


Fuente: Elaboración propia.

5.6.8. rCl/rF

Esta relación contempla que el rF en las aguas subterráneas varía de 0.1 y 10 mg/L, y para el agua de mar se maneja un rango de 0.6 y 0.7 mg/l (Custodio y Llamas. 1983). La Figura 87 muestra que la correlación de las estaciones es buena, siendo r igual a 0.973, así mismo se determina que las estaciones de agua superficial y subterránea en ambas épocas se ajustan al método lineal donde todas las fuentes se traslapan unas con otras, esto puede deberse también al análisis y límite de detección del analito rF . Por otro lado, se tiene que las fuentes relacionadas a las aguas termales como la zona geotermal Calazaya presentan una menor concentración de rCl/rF versus rCl , luego para pasar a las estaciones ligadas a la zona geotermal Jesús María e Ichuña donde presentan altos valores de los analitos evaluados.

Figura 87 Representación de relación rCl/rF versus rCl .



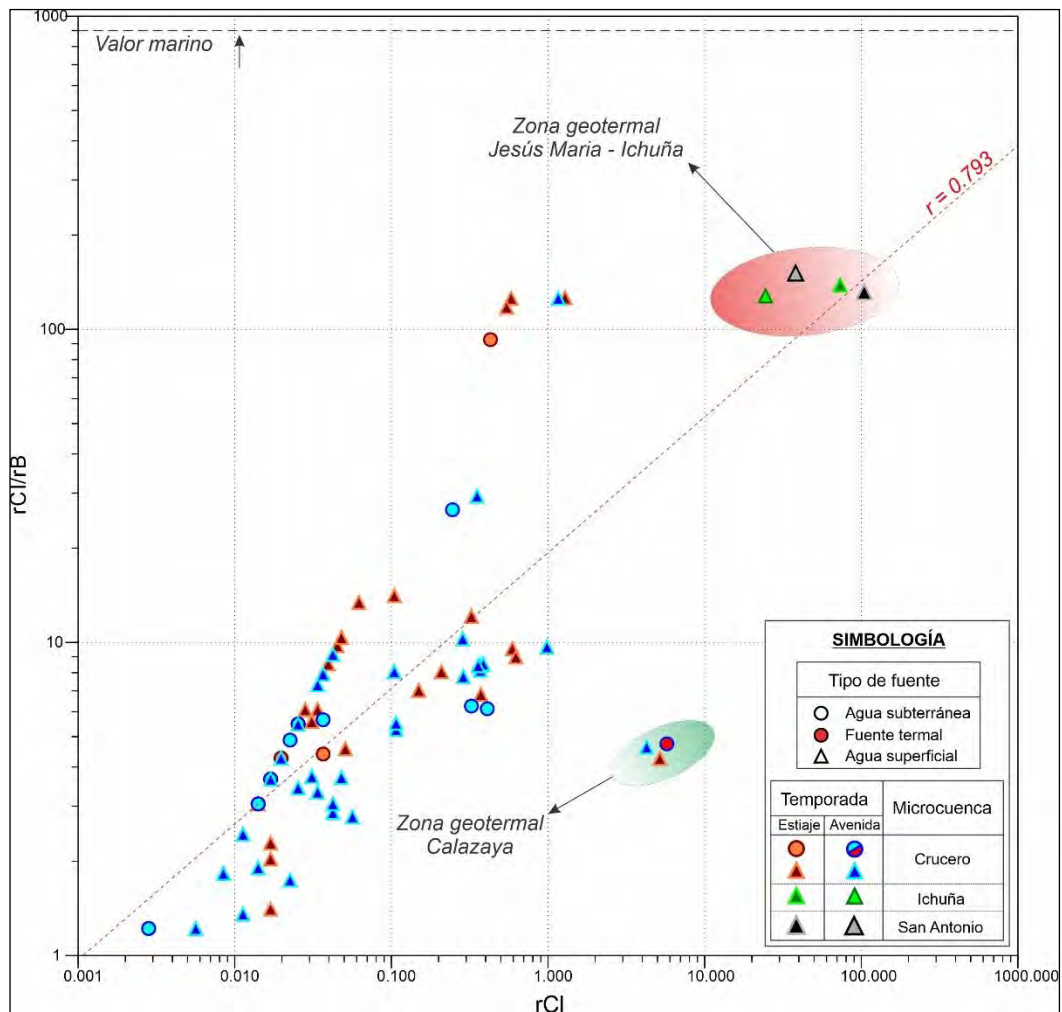
Fuente: Elaboración propia.

5.6.9. rCl/rB

La relación de rCl/rB en aguas de baja temperatura en rocas volcano-sedimentarias es controlada por una mezcla conservativa (Arnórsson y Andrésdótti, 1995), así mismo, los autores definen que el origen de estos analitos, agua de mar se relacionan al agua de mar, lixiviación de rocas basálticas (en zonas geotermales) y agua de mar (aerosol o la mezcla directa con agua de mar).

La Figura 88 presenta la relación rCl/rB versus rCl siendo el coeficiente de correlación moderado a bueno (r es igual a 0.793). Así mismo se puede observar de la Figura 34 que las estaciones de aguas inventariadas tienen marcadas diferencias, donde las aguas subterráneas y superficiales de la microcuenca Crucero presentan baja concentración en rCl/rB versus rCl , mientras que las fuentes ligadas a la zona geotermal Calazaya muestra una mayor concentración de rCl , y una menor proporción de rCl/rB , y referente a la zona geotermal Jesús María e Ichuña se muestra que tienen las más altas concentraciones de rCl/rB versus rCl , siendo algo característico de estas últimas estaciones que forma parte de un sistema geotermal activo.

Figura 88 Representación de relación rCl/rB versus rCl .



Fuente: Elaboración propia.

5.7. EVOLUCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES

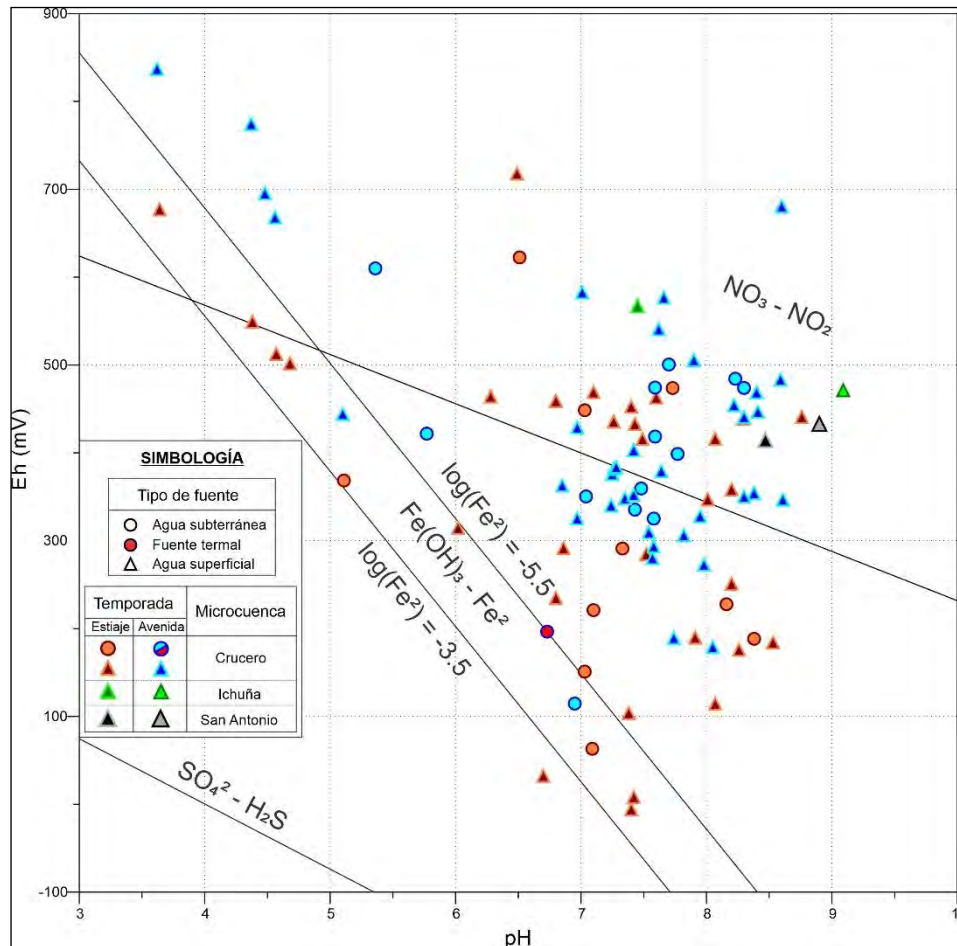
5.7.1. INDICADOR DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICO

La relación Eh versus pH determina especies solubles e insolubles del agua, así mismo representa la estabilidad de las aguas naturales donde los límites enmarcados dentro del diagrama determinan las condiciones de disociación de la molécula de agua en sus componentes gaseosos y especies químicas, incluso se puede determinar la toxicidad potencial de elementos (Herrera, 2001).

La Figura 89 presenta la distribución de las estaciones de agua subterránea y superficial de la microcuenca Crucero, donde se determina que las estaciones de agua en general presentan un pH mayor a los 6.5 y va hasta el valor de 9, siendo considerados en general fuentes básicas, así mismo las estaciones presentan un Eh en el rango de 0 a 600 mV. Por otra parte, en menor proporción se tienen estaciones de agua superficial que se ubican en un rango de pH de 5 a 3.5, siendo estas estaciones las que presentan un Eh mayor a los 600 mV. La Figura 89 determina que las estaciones en general las especies de nitrato (NO_3) se relacionan a especies más oxidantes, para este punto se

relacionan las estaciones de agua superficial y subterránea para la microcuenca Crucero, para este punto se ubican las Fuentes Termales de Jesús María pertenecientes a la microcuenca San Antonio e Ichuña; por otra parte, existen otras estaciones (en menor proporción) que se relacionan a especies de Hierro (Fe), sobre todo esto va relacionado a la Fuente Termal Calazaya.

Figura 89 Representación de relación pH versus Eh.



Fuente: Elaboración propia.

5.7.2. INDICADOR HIDROGEOQUÍMICO $rNa+rK$ vs $rCl+rSO_4$

Este análisis hidroquímico también es conocido como diagrama de Scatter, nos permite corroborar las predominancias con la evolución de flujos utilizando la relación hidroquímica (Condori, 2016), $rNa+rK$ versus $rCl+rSO_4$ (Mifflin, 1988), en ese sentido, se elaboró la Figura 36 con la finalidad de ingresar los resultados químicos del agua subterránea y superficial tomados en la microcuenca Crucero, y de forma muy limitada de la microcuenca Ichuña y San Antonio, se trabajó con la información en época seca y húmeda de 2015 y 2016 respectivamente.

La Figura 90 determina el siguiente análisis:

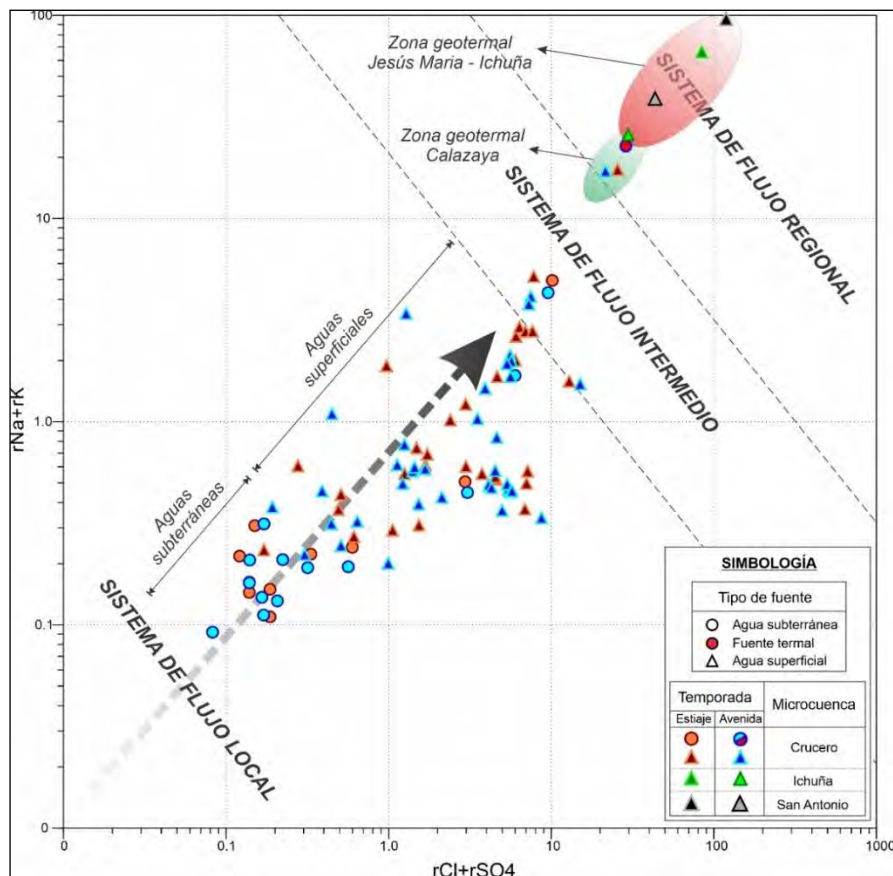
- El 90 % de las estaciones de agua pertenecientes a la microcuenca Crucero, se relacionan en forma general al sistema de flujos locales, sobre esto se puede definir que las estaciones de aguas subterráneas tienen una menor concentración de $rNa+rK$ y $rCl+rSO_4$, mientras que las aguas superficiales incrementan su concentración de estos analitos mayoritarios, así



mismo este sistema guarda correspondencia con las facies hidroquímicas del tipo Bicarbonatada Cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$) y donde su predominio se afianza a las unidades sedimentarias del Grupo Yura, y en menor proporción a las formaciones volcano-sedimentario de la Formación Llallahui, Grupo Maure y Barroso.

- El 8 % de estaciones de agua subterránea y superficial de la microcuenca Crucero se caracterizan por ser sistemas de flujos intermedios, indicar que las estaciones que se enmarcan en este sistema tienen una moderada concentración de $r\text{Na}+r\text{K}$ y $r\text{Cl}+r\text{SO}_4$. Se precisa que estas estaciones se relacionan a las facies hidroquímicas del tipo Sulfatada Cálcica ($\text{SO}_4\text{-Ca}$) y donde su relación litológica se afianza con las rocas volcano-sedimentarias del Grupo Barroso y rocas intrusivas de composición andesítica ubicadas al N y E de la microcuenca Crucero.
- El 2 % restante de las estaciones de aguas superficiales y subterráneas corresponde a flujos provenientes de la Fuente Termal Calazaya, los cuales se relacionan a sistemas de flujo regional donde tienen altas concentraciones de $r\text{Na}+r\text{K}$ y $r\text{Cl}+r\text{SO}_4$, así mismo guardan correspondencia a las facies hidroquímicas del tipo Sulfatada Sódica ($\text{SO}_4\text{-Na}$) y el cual interactúa con las areniscas cuarzosas de la Formación Huallhuani.
- Las estaciones de agua superficial que se relacionan a la Fuente Termal Jesús María, y las cuales se determinan que el agua contenida se relaciona a sistemas de flujo regional, dichas estaciones se encuentran o forma parte de la microcuenca San Antonio e Ichuña. Los flujos de agua de estas fuentes guardan una correlación con las facies hidroquímicas del tipo Clorurada Sódica (Cl-Na) e interactúan con las rocas volcano-sedimentarias del Grupo Maure.

Figura 90 Representación de relación $r\text{Na}+r\text{K}$ versus $r\text{Cl}+r\text{SO}_4$



Fuente: Elaboración propia.



5.8. PROCESOS DE INTERACCIÓN AGUA-ROCA

Este gráfico fue desarrollado por Gibbs (1970), donde refleja el análisis del estudio del agua superficial, actualmente se ha utilizado también para agua subterránea (Bustamante, 2017). La Figura 37 muestra la concentración de los sólidos disueltos y la relación de $Na/(Na+K)$ para cationes y para los aniones $Cl/(Cl+HCO_3)$, es posible identificar tres procesos ocurrientes en la dinámica del agua subterránea mediante su química, siendo: el proceso de precipitación meteórica (lluvia y su rápida infiltración), proceso de intemperismo (interacción agua – roca), y el proceso de evaporación – cristalización (Bustamante, 2017), siendo este último proceso el que toma la temperatura como un factor.

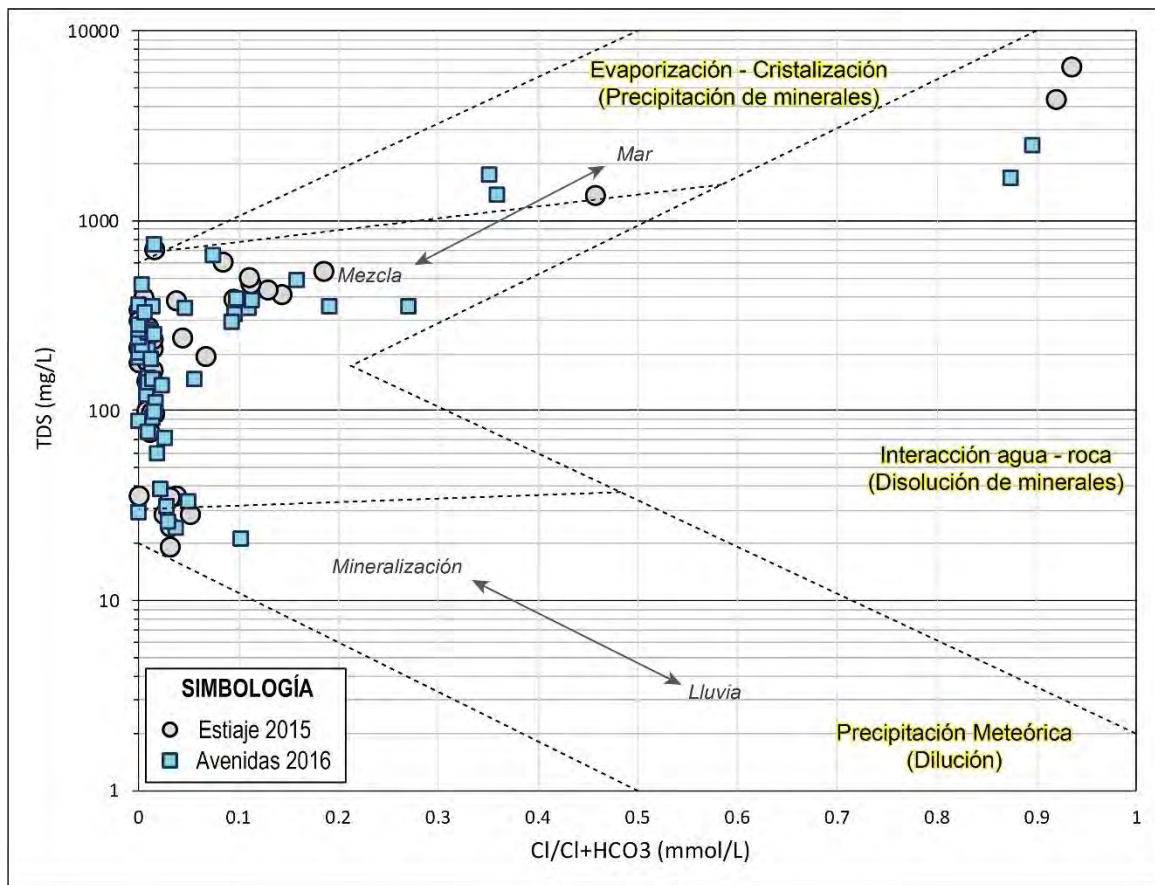
Las relaciones de Gibbs se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Indice de Gibbs I} = \frac{Na^+ + K^+}{Na^+ + K^+ + Ca^{2+}} \quad \text{O} \quad \text{Indice de Gibbs II} = \frac{Cl^-}{HCO_3^- + Cl^-}$$

La Figura 91, se observa que la presencia de aniones mayoritarios conformados por Cl y HCO_3 en el área de estudio, provienen principalmente por el dominio de la roca, es decir la microcuenca Crucero en general presenta precipitaciones elevadas lo cual infiltra y percola por el basamento rocoso desde las zonas de recarga hasta llegar la descarga de flujos subterráneos superficiales al río Crucero, Chaje e Ichuña, durante este proceso se tienen una serie de reacciones químicas con el medio geológico que proporciona y adiciona al agua los analitos de Na y Cl , y estos pueden resultarse como precipitación de minerales, este comportamiento se mantiene para la época húmeda y seca. Por otro lado, se tiene estaciones que tiene un comportamiento a tener mayor concentración en Cl , y estas van relacionadas a la Fuente Termal Calazaya y Jesús María, por se clasifican como estaciones por contaminación de agua, lo cual se tiene que incidir que es a nivel natural, dado que el agua subterránea ingreso en profundidad y se obtiene la ganancia del ion Cl dado que no forma sales de baja solubilidad, por lo que su alta concentración sobre todo se da por una evolución de aguas en profundidad.



Figura 91 Diagrama de Gibbs para aniones

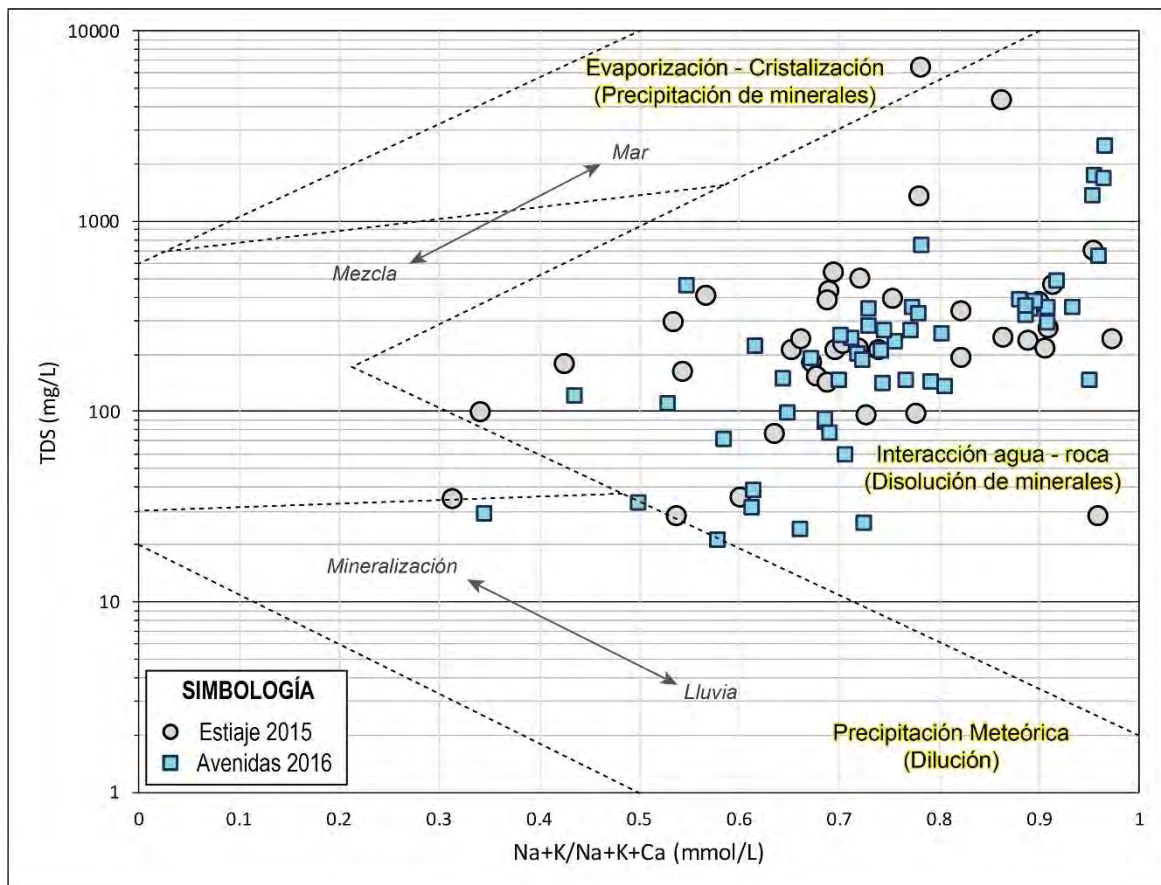


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 92, muestra que la presencia de iones de Ca y Na para el área de estudio, presenta generalmente una predominancia de la interacción agua – roca, el cual está conformado por la gran mayoría de las estaciones de agua subterránea y superficial de la microcuenca Crucero. Por otro lado, se puede observar que existen ciertas estaciones que dependen procesos de mezcla relacionado a la precipitación meteórica, dichas estaciones posiblemente se relacionan a las precipitaciones de recarga de la microcuenca Crucero. Por otro lado, se tiene estaciones que tienen altas concentraciones de TDS, estas fuentes de agua obedecen a las fuentes termales de Calazaya y Jesús María y pertenecen a un proceso de actividad hidrotermal.



Figura 92 Diagrama de Gibbs para cationes



Fuente: Elaboración propia.

5.9. MODELIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

La modelización hidrogeoquímica se empleó usando la información disponible de los parámetros fisicoquímicos y resultados químicos tomados en las estaciones de agua subterráneas y superficiales en época seca y húmeda de 2015 y 2016, con el fin de analizar el comportamiento de las aguas versus las fases minerales del basamento rocoso a nivel del área de estudio.

5.9.1. CÁLCULO DE ESPECIAZACIÓN – SOLUBILIDAD E INDICES DE SATURACIÓN

Para verificar y/o descartar las hipótesis propuestas en los ítems anteriores e identificar los principales procesos que determinan las características y la evolución hidrogeoquímica de las aguas del sistema, se han realizado cálculos de especiación/solubilidad, empleando el código PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999).

La representación de los Índices de Saturación (IS) de Langelier de las aguas del sistema con respecto a la albita, montmorillonita, calcita, dolomita, goethita, mica-k, hematita, jarosita-k y cuarzo (Figura 93, 94 y 95), así como del log. pCO₂ con respecto al pH, pone de manifiesto que, a pesar de que las aguas de todas estaciones de agua subterránea y superficial están sobresaturadas (en forma general), el grado de saturación con respecto a esos minerales aumenta progresivamente durante la



evolución del sistema (Prado, 2011). Este aumento en el IS de las fases sulfatadas y cloruradas es coherente con el modelo hidrogeológico conceptual del sistema y el cual se propone para el área de estudio.

5.9.2. INTERPRETACIÓN DE ÍNDICES DE SATURACIÓN DE LANGELIER

Según el modelamiento directo que se ejecutó para las estaciones de agua subterránea y superficial de la microcuenca Crucero, se presenta la siguiente interpretación por cada mineral:

- **Albita:** El 85 % de las estaciones de agua subterránea y superficial en época seca y húmeda, presenta que la albita tiene un $IS > 0$ y que se tipifican en la zona subsaturada. Por otro lado, en menor proporción (10 %) se encuentran se tienen estaciones con un $IS < 0$ por lo cual están en condiciones sobresaturada, y muy limitadamente (5 %) hay estaciones con $IS = 0$ en equilibrio y es neutra (Figura 93a).
- **Montmorillonita:** El 95 % de estaciones de agua subterránea y superficial presenta un $IS > 1$ por lo que se encuentran sobresaturados en ambas épocas, mientras que se tiene cuatro (4) estaciones que tienen un $IS < 0$ y representan a procesos de disolución (Figura 93b).
- **Dolomita:** El 55 % de estaciones de agua subterránea y superficial en época seca y húmeda tienen el $IS < 0$ y tienen condición de subsaturados, mientras que el 35 % estaciones presenta un $IS > 0$ de condición sobresaturado, finalmente el 10 % de estaciones tiene un $IS = 0$ y por lo que se encuentran en equilibrio de saturación (Figura 93c).
- **Calcita:** El 65 % de fuentes de agua subterránea y superficial en época seca y húmeda tienen un $IS < 0$ por lo que están saturados, mientras que el 30 % estaciones contienen un $IS > 0$ de condición sobresaturada, finalmente el 5 % de estaciones se tiene un $IS = 0$, que están en equilibrio de saturación (Figura 93d).
- **Goethita:** El 95 % de las estaciones de aguas subterráneas y superficiales tiene un $IS > 0$ por lo que están en zona de sobresaturación, mientras que el 4 % presentan un $IS < 1$ por lo cual están subsaturados y el 1 % de estaciones se encuentran en equilibrio (Figura 94a).
- **Yeso:** El 100 % de las estaciones de agua subterránea y superficial tanto para época seca y húmeda tienen un $IS < 0$, y por lo cual están en condición de disolución (Figura 94b).
- **K-mica:** El 99 % de las estaciones de agua subterránea y superficial presentan un $IS > 0$ y tienen un comportamiento incrustante (precipitación), mientras que el 1 % tiene un $IS < 0$, por lo que están en condición de subsaturación (Figura 94c).
- **Hematita:** El 96 % de las estaciones de agua subterránea y superficial tiene un $IS > 0$ por lo cual se encuentran en condiciones de sobresaturación (precipitación), mientras que el 3 % de las estaciones tienen un $IS < 0$ y se encuentran subsaturados, finalmente el 1 % está con un $IS = 0$, por lo que se encuentran en equilibrio (Figura 94d).
- **Jarosita-K:** El 100 % de las estaciones de aguas subterránea y superficial en época seca y húmeda para la microcuenca Crucero presentan un $IS < 0$, donde su condición es subsaturada para dicho mineral (Figura 95a).
- **Cuarzo:** El 98 % de estaciones de aguas subterránea y superficial presentan un $IS > 0$, por lo cual están en la zona sobresaturada, mientras el 2 % de estaciones tienen un $IS < 0$ y $IS = 0$, según ello se encuentran en subsaturada y equilibrio, respectivamente (Figura 95b).



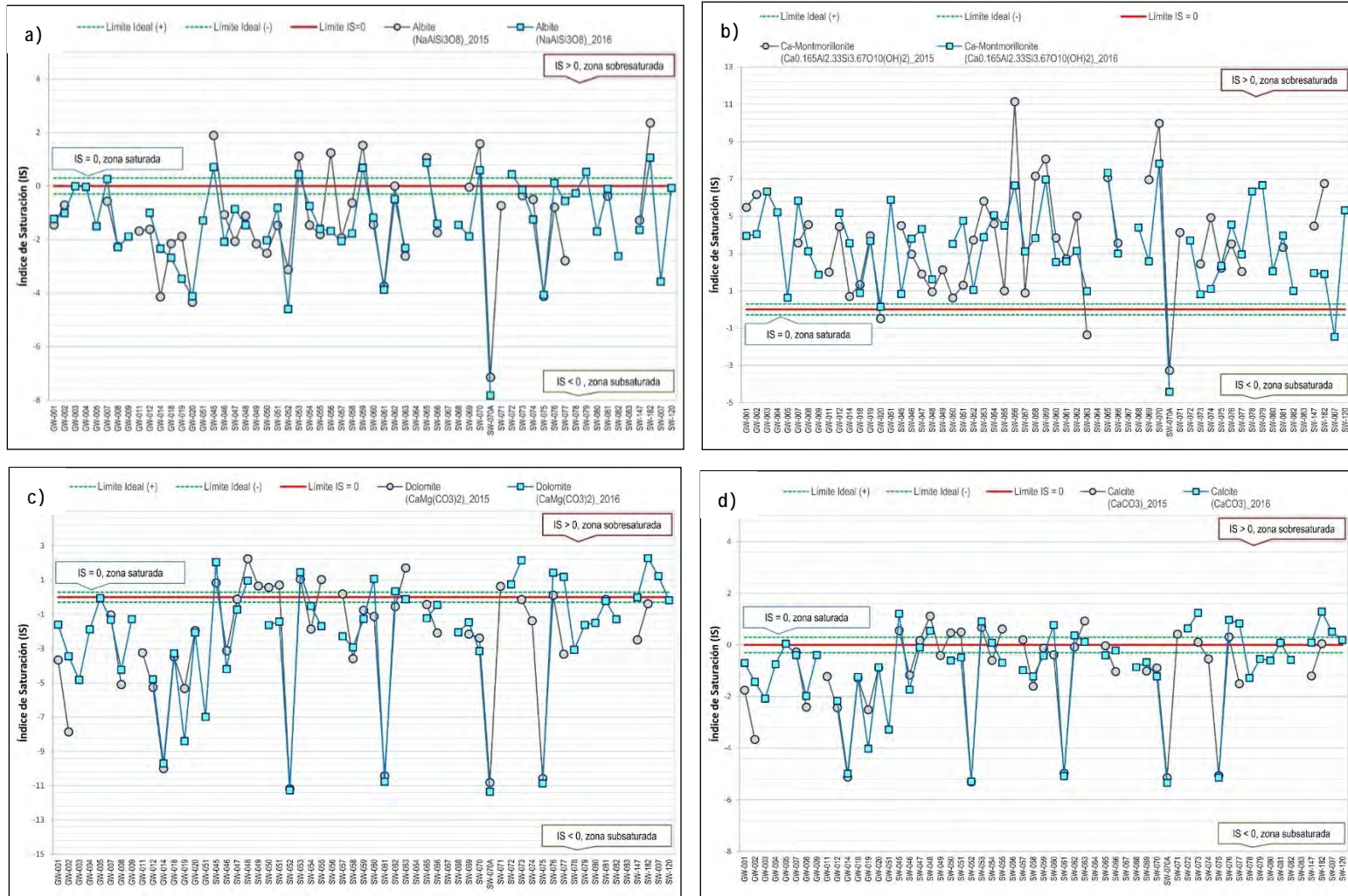
5.9.3. CORRELACIÓN DE ÍNDICES DE SATURACIÓN DE LANGELIER

Con el fin de analizar la consistencia de los resultados emitidos por el programa código PHREEQC, se hizo una correlación de resultados entre el IS de Dolomita y Calcita para las estaciones de agua subterránea y superficial en época seca y húmeda, por lo que se obtuvo el siguiente resultado:

- Las estaciones de agua para la época seca y húmeda presentan una muy buena correlación para el IS de Dolomita y Calcita, siendo $r = 0.9906$ y $r = 0.9965$, respectivamente para cada época (Figura 95c y 95d). Esto implica que los minerales evaluados están correlacionados, en donde sus concentraciones en ambos analitos llegan a incrementarse a medida que uno aumentar respecto a otro, esto se aplica para cada muestra de agua tomada a nivel de las estaciones evaluadas en la microcuenca Crucero. Así mismo, este aspecto se puede relacionar a las facies predominantes del tipo Bicarbonatada Cálcida ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$) y Sulfatada Cálcida ($\text{SO}_4\text{-Ca}$), que a su vez interaccionan con secuencias volcano-sedimentarias de la Formación Llallahui, Grupo Maure y Barroso, así mismo rocas volcano-sedimentarias del Grupo Barroso y rocas intrusivas de composición andesítica ubicadas al norte y este de la microcuenca Crucero, donde muchos de los minerales del basamento rocoso descrito, tienen mineralogía relacionada a la Dolomita y Calcita sobre todo en las formaciones del tipo volcano-sedimentarias.



Figura 93 Variación del IS para el mineral Albita, Montmorillonita, Dolomita y Calcita en época de estiaje y avenida



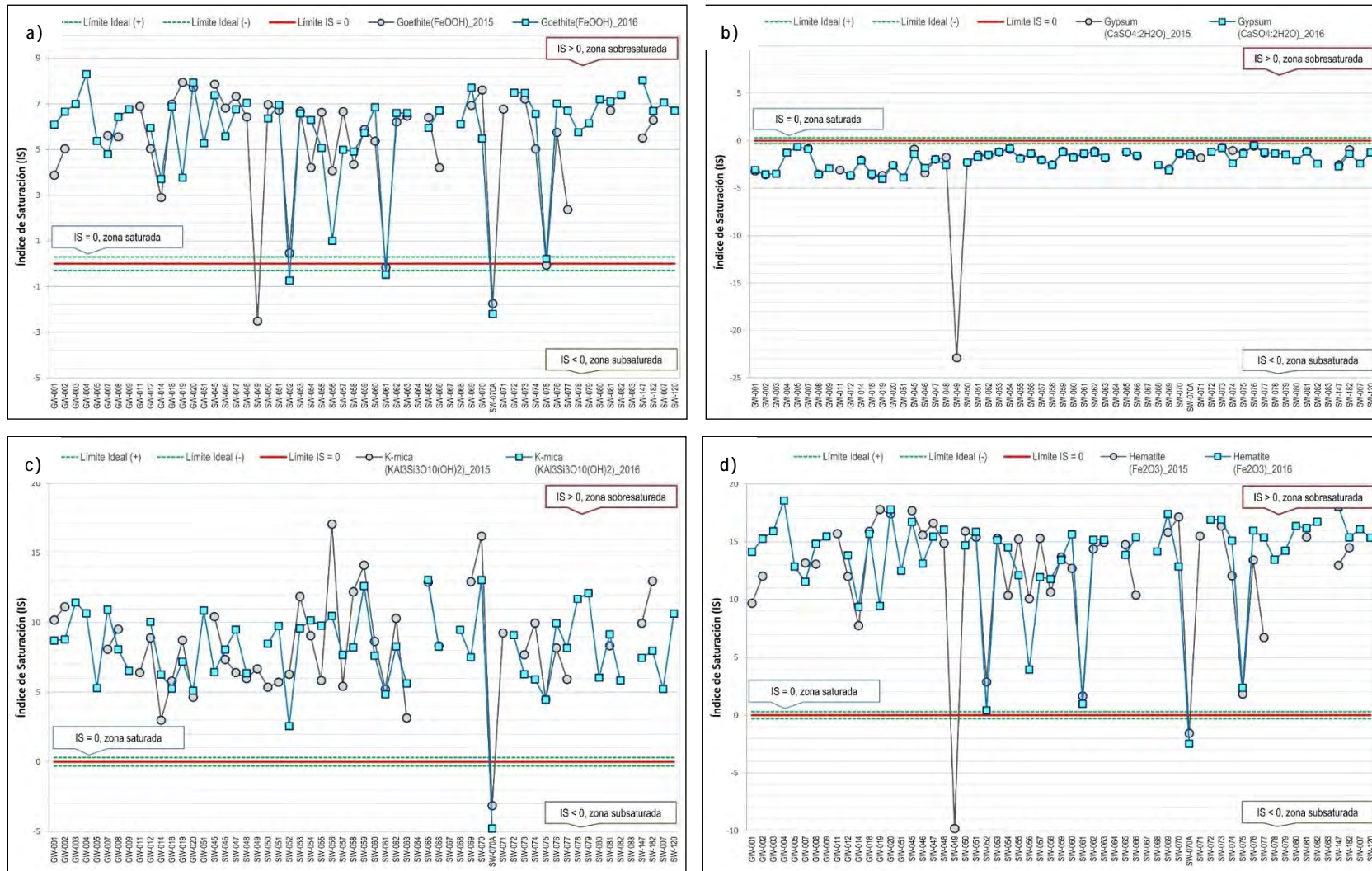
Fuente: Elaboración propia.



“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



Figura 94 Variación del IS para el mineral Goethita, Yeso, K-mica y Hematita en época de estiaje y avenida



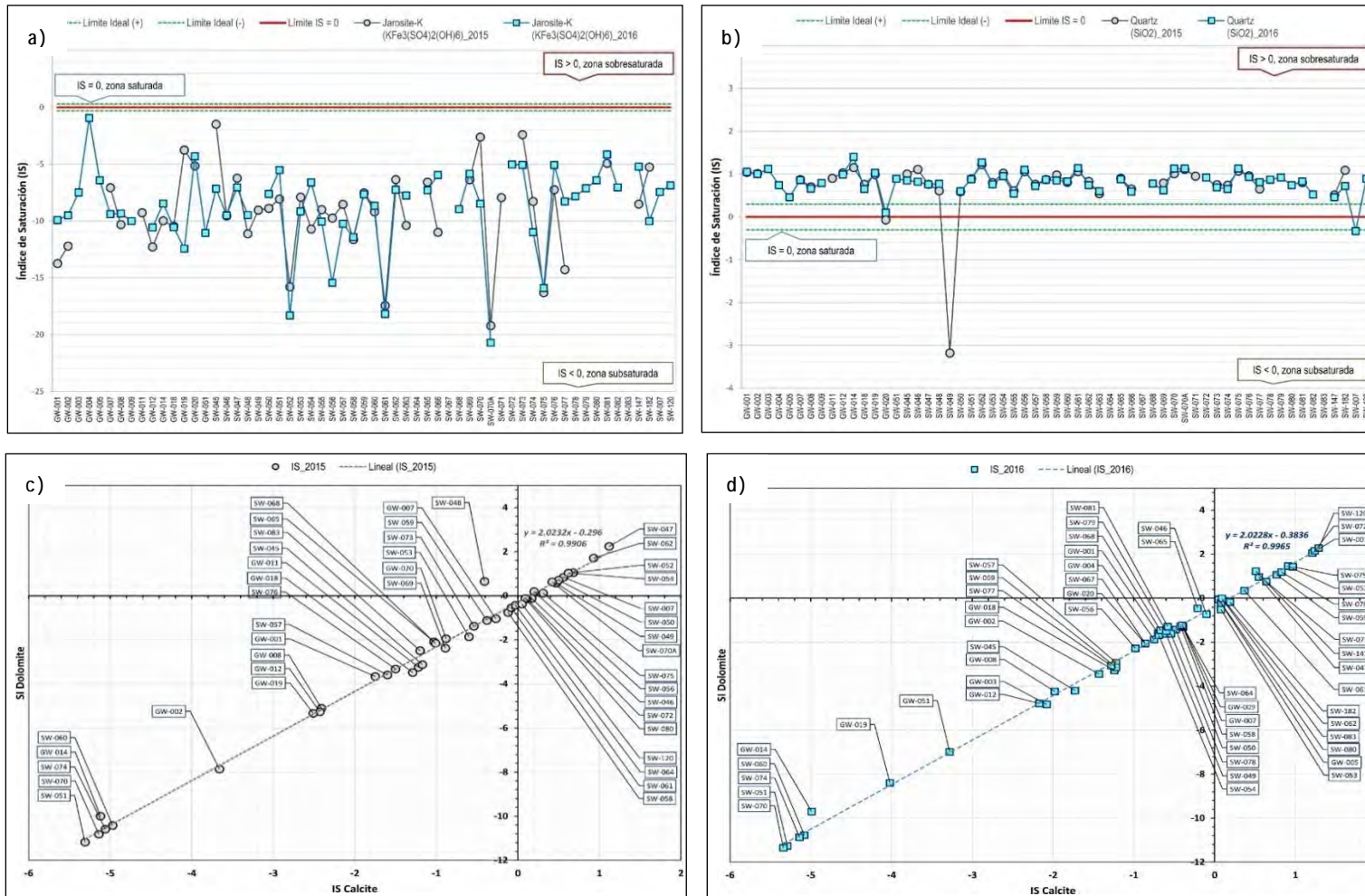
Fuente: Elaboración propia.



“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



Figura 95 Variación del IS para el mineral Jarosita-K y Cuarzo en época de estiaje y avenida, y la correlación de IS calculadas para las estaciones de agua subterránea y superficial en época seca y húmeda



Fuente: Elaboración propia.

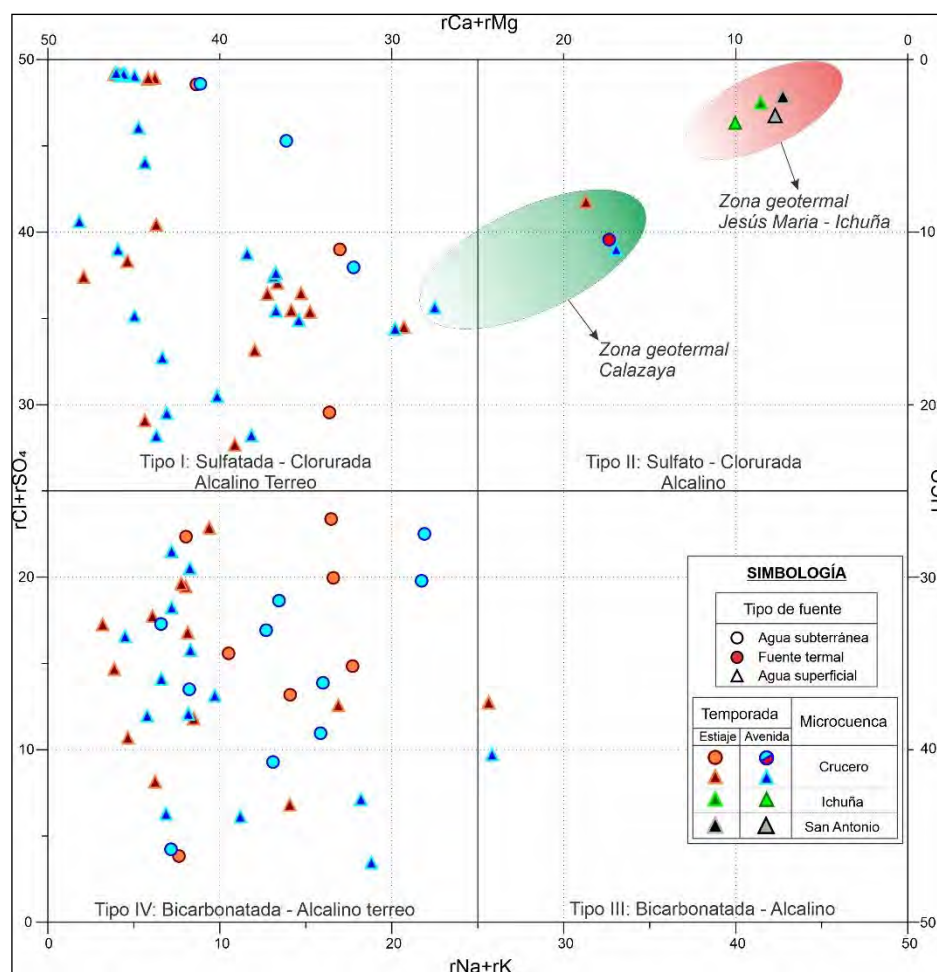


5.10. CLASIFICACIÓN DE AGUAS TERMALES

5.10.1. DIAGRAMA DE LANGELIER - LUDWING

Definida por Ludwig (1942), el cual resalta los sistemas geotermales a través de las relaciones $rCl+rSO_4$, $rCa+rMg$, $rHCO_3$ y $rNa+rK$, caracterizándolas en cuatro (4) tipos de aguas, los cuales se distribuyen en la microcuenca Crucero. La Figura 96, muestra principalmente que las fuentes termales de Jesús María e Ichuña se encuentran en el tipo II, relacionado a aguas sulfatadas-cloruradas (alcalinas) consideradas como aguas provenientes de niveles profundos, mientras que las fuentes termales de Calazaya se encuentran entre el tipo I y II, siendo aguas sulfatadas-cloruradas de características alcalinas terreas dicha composición se relaciona a la interacción de las aguas con el basamento conformado por rocas volcánicas y sedimentarias (Figura 96). Finalmente, las aguas subterráneas y superficiales frías se agrupan en aguas sulfatadas-cloruradas (alcalino terreo) y bicarbonatadas (alcalino terreo).

Figura 96 Diagrama de Ludwig para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida).



Fuente: Ludwig, 1942.

Elaboración propia.

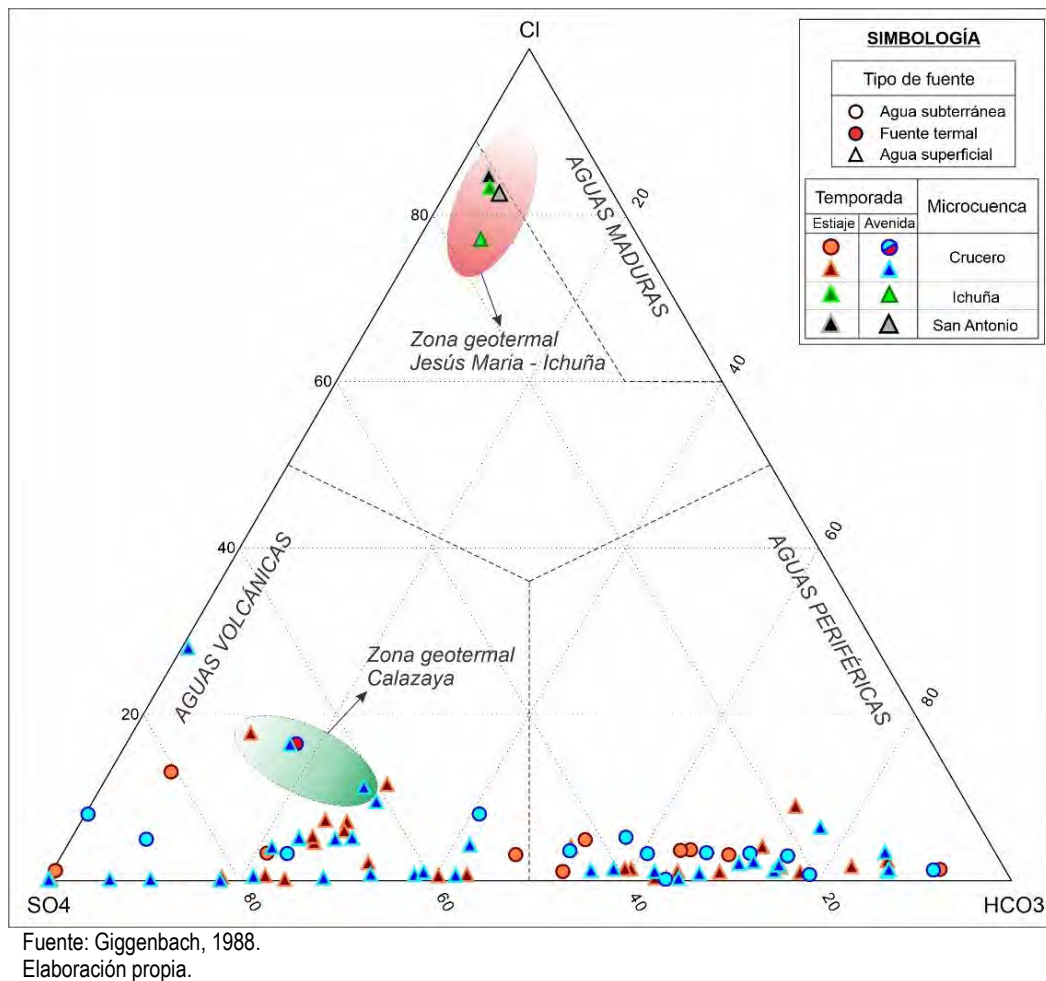


5.10.2. DIAGRAMA TERNARIO rSO_4 - rCl - $rHCO_3$

Propone Giggenbach (1988), la clasificación de las aguas en base a las concentraciones relativas de los aniones como: Cl, SO_4 y HCO_3 . Para las estaciones monitoreadas en la microcuenca Crucero en ambas temporadas, se realizó la clasificación de las zonas geotermales en base a la Figura 97 el cual muestra agrupaciones clasificadas de la siguiente manera:

- **Zona geotermal Jesús María e Ichuña:** compuesta por aguas Cloruradas Sódicas (Cl-Na), se caracteriza por ser aguas maduras. Probablemente estas fuentes termales son alimentadas desde un reservorio profundo, típico de fluidos asociados a sistemas geotérmicos de alta temperatura (Cruz et al., 2014) y de relación volcanogénica (Mallen, 2013). Se observan altos valores de sulfatos en las fuentes termales de Jesús María que varía para la temporada de estiaje de 0.2 a 3699.3 mg/L, y para avenida se tienen valores de 0.2 a 1349.3 mg/L, esto indicaría que durante sus largos recorridos estos fluidos han pasado por procesos de interacción agua – roca interactuado con las rocas volcánicas relacionadas al centro volcánico Chucapaca, San Miguel y Huancarani, los cuales presentan alteración hidrotermal y contienen minerales sulfurados como piritita, calcopiritita, arsenopiritita entre otros, asociados a estos sistemas de alteración (Cereceda et al., 2018).
- **Zona geotermal Calazaya:** conformada por aguas Sulfatadas Sódicas (SO_4 -Na), posiblemente su temperatura se atribuya al agua que infiltra a subsuelo condicionado a los ambientes volcánicos del sector, o en su defecto, se relacione a aguas someras calentadas por el gradiente geotérmico, condicionado por estructuras locales como fallas y pliegues de dirección andina.
- **Fuentes frías ($< 20^\circ C$):** se tienen estaciones de muestreo tanto de aguas subterráneas y superficiales, las cuales corresponden a dos grupos de agua: El primer grupo corresponde al tipo IV Bicarbonatadas Alcalino terreo, las cuales de acuerdo al diagrama ternario de Giggenbach probablemente son aguas periféricas, asociadas a flujos subsuperficiales (agua meteórica donde predomina el anión HCO_3). El segundo grupo corresponde al tipo I Sulfato Alcalino Terreo, donde el anión predominante es el sulfato, que al circular por rocas volcánicas probablemente se estén enriqueciendo por el anión sulfato.

Figura 97 Diagrama de ternario de Giggenbach para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida).



5.11. TRAZADORES QUÍMICOS

Conociendo las características químicas inertes de los elementos Cl, B y Li, que al ser agregados en la fase líquida no son alterados, por lo que permiten conocer el origen de las aguas en cuya composición contienen estos elementos (Cruz et al., 2014).

5.11.1. DIAGRAMA TERNARIO rCl-rLi-rB

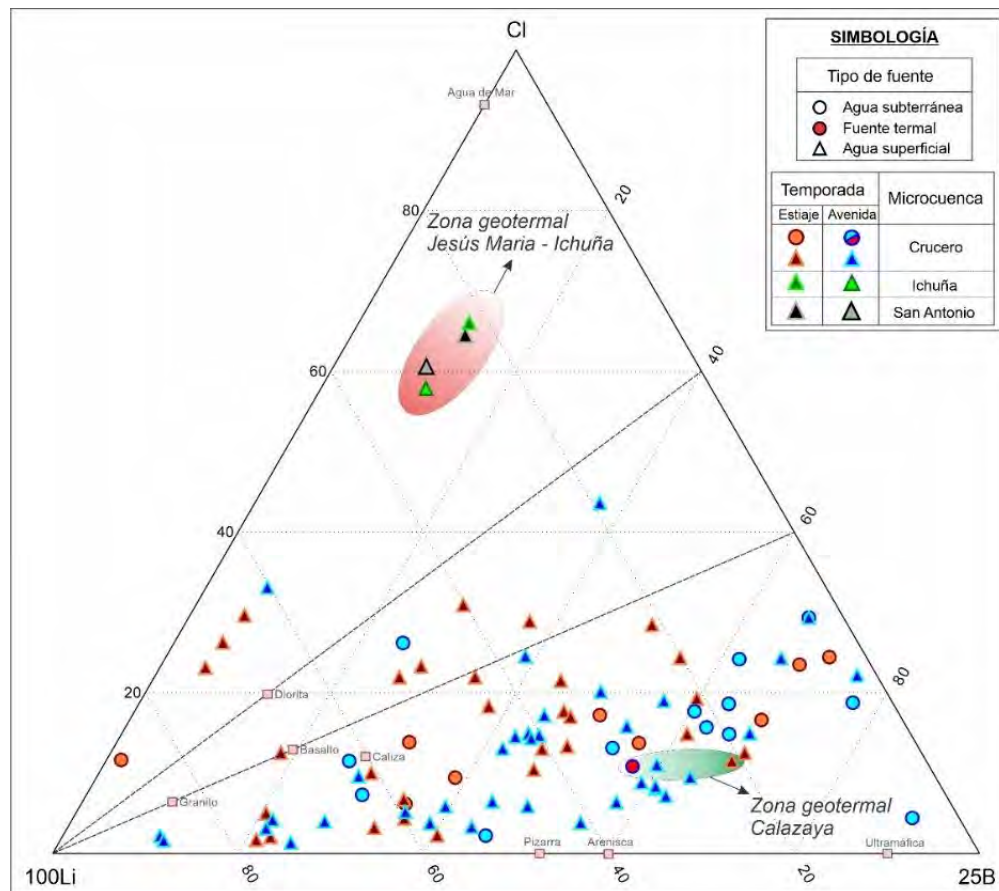
La Figura 98, se observa que las zonas geotermales de Jesús María e Ichuña se ubican en el vértice de Cl, indicando que estas aguas subterráneas y superficiales pueden relacionarse y estar influenciadas por la intrusión de agua de mar. Sin embargo, por la ubicación y altitud de las estaciones de muestreo (4200 msnm), posiblemente se atribuye que las altas concentraciones de rCl respecto al rLi y rB se debería probablemente a que estas aguas estén circulando por centros volcánicos Hurancani, San Miguel y Chucapaca, con alteración hidrotermal asociado a rocas intrusivas (pórfidos riolíticos) fuertemente fracturados.



Respecto a la zona geotermal de Calazaya, en el diagrama Cl-Li-B (Figura 78) muestra que la fuente termal Calazaya y su zona de influencia (aguas superficiales), tienen una tendencia hacia el vértice del boro y asociado a rocas sedimentarias.

En las fuentes frías (<20°C) encontramos dos tipos de aguas predominantes las bicarbonatadas alcalino terreas (HCO₃-Ca, Mg) y sulfatadas alcalino terreas (SO₄-Ca, Mg), las cuales de acuerdo al diagrama B-Cl (Figura 79) estarían asociados en mayor proporción a rocas volcánicas y sedimentarias y en menor proporción a las rocas intrusivas.

Figura 98 Diagrama de ternario Cl-Li-B para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida).



Fuente: Shigeno, 1983.
Elaboración propia.

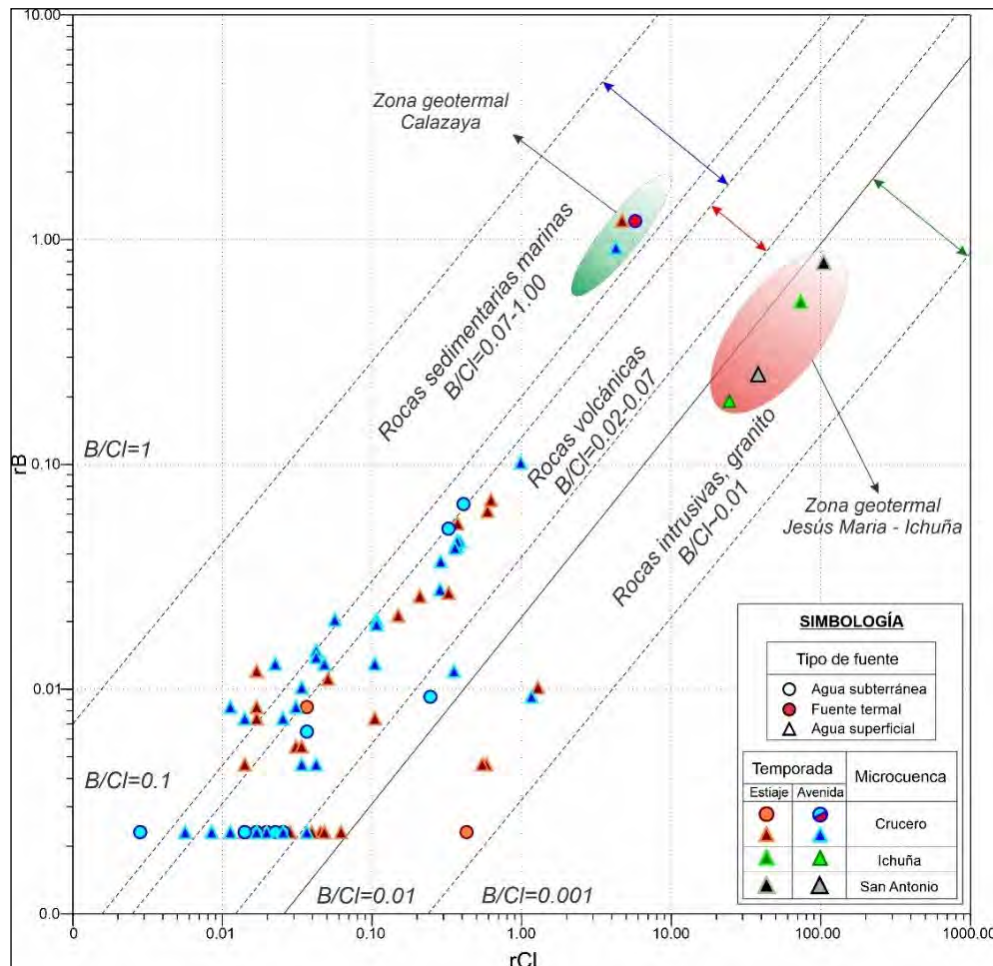
5.11.2. DIAGRAMA BINARIO rCl vs rB

La relación rB y rCl (Figura 99), muestra que las fuentes termales de Jesús María e Ichuña, tienen una proporción de rB/rCl baja (0.01) propio de un sistema hidrotermal viejo o muy antiguo, en donde las aguas interaccionan con las rocas intrusivas y volcánicas en niveles profundos asociado a cámaras y fluidos magmáticos contenidos en su estructura.

Por otra parte, la fuente termal Calazaya presentan una mayor proporción de rB/rCl (>0.07), en relación a la zona termal de Jesús María e Ichuña. De acuerdo al diagrama rB y rCl (Figura 99), estas fuentes termales estarían asociadas a rocas sedimentarias.

Finalmente, las fuentes de aguas subterráneas y superficiales frías, muestran pequeñas proporciones rB/rCl , en relación a las fuentes termales y su zona de influencia.

Figura 99 Diagrama binario rB y rCl para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida).



Fuente: Elaboración propia.

5.11.3. GEOINDICADOR DE $rNa-rK-rMg$

El diagrama ternario Na-K-Mg (Giggenbach, 1983) que se representa en la figura 4.16, define el equilibrio de las aguas geotermales. Este diagrama muestra la distribución de los datos de las tres zonas geotérmicas de la subcuenca Ichuña.

Respecto a la zona geotermal de Jesús María (GW-035) e Ichuña (GW-052 y GW-037), se observa que caen dentro del área de equilibrio parcial, lo cual es característico de aguas ligadas a reservorios geotermales profundos. La Figura 100, muestra que la zona geotermal de Ichuña, se encuentra en el límite inferior de esta área, indicando que estén siendo afectadas por mezcla con aguas superficiales.

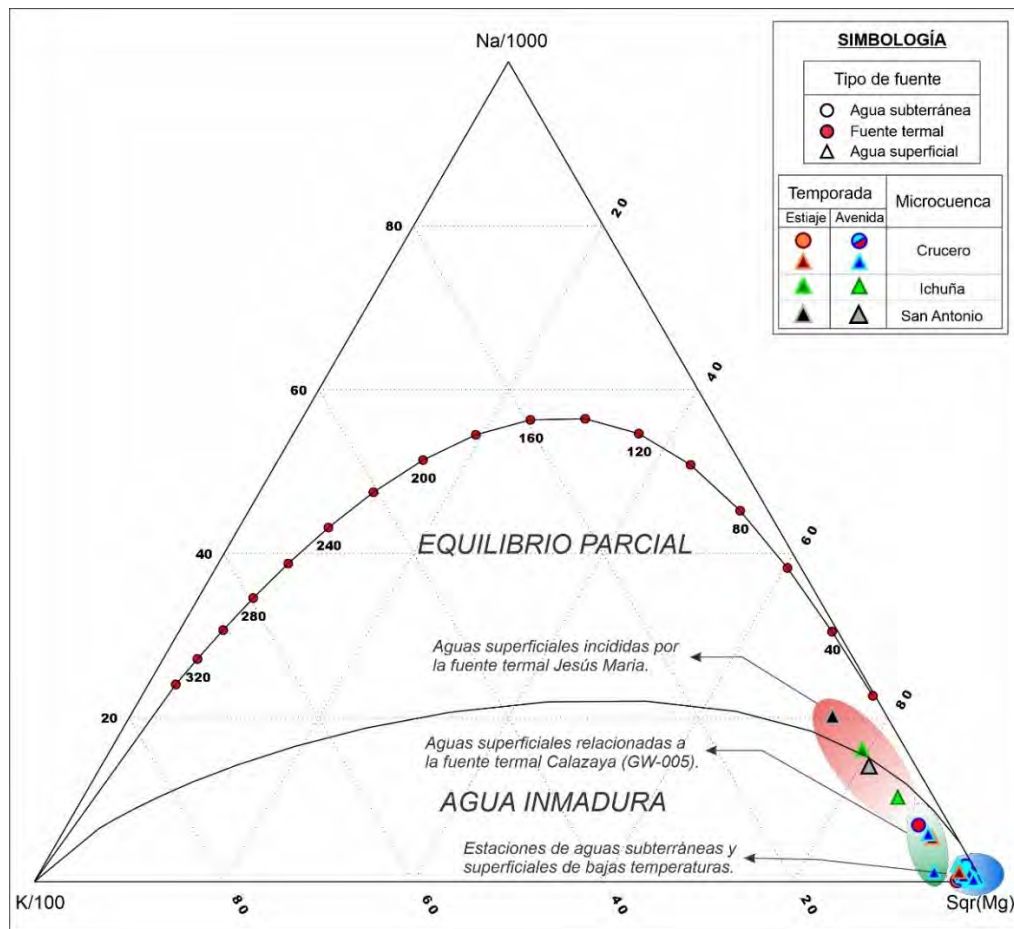
La zona geotermal de Calazaya (Figura 100), se ubica dentro de las aguas inmaduras, debido al mayor contenido de sulfato en relación al rB y rCl y que presentan un carácter ligeramente ácido, indicando que son aguas poco profundas. Este diagrama también indica la tendencia lineal con dirección a la temperatura de equilibrio rNa/rK del reservorio, para el caso de Jesús María la



temperatura de reservorio es de 150 a 160°C y para Ichuña de 120°C a 130°C, por tanto, estos dos sectores presentan temperaturas cuyo parámetro de entalpia es medio.

La fuente termal Calazaya, se ubica dentro de aguas juveniles o comente denominadas inmaduras, interpretamos que estas fuentes termales se estén mezclando con aguas inmaduras (fuentes frías), pero conservan sus características de aguas maduras del reservorio, además indicar que en este diagrama su temperatura no es real. Las fuentes frías, se ubican dentro de aguas inmaduras con elevadas concentraciones de rMg (Figura 100).

Figura 100 Diagrama binario rB y rCl para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida).



Fuente: Giggenbach, 1988.
Elaboración propia.



5.12. ANÁLISIS DE AGUAS PARA CONSUMO HUMANO

5.12.1. CALIDAD DEL AGUA PARA USO POTABLE

Los diagramas logarítmicos de Schoeller presentan ocho (8) barras con escalas logarítmicas de seis (6) elementos en mg/l y dos (2) parámetros físico-químicos: dureza (grados franceses) y pH (unidad de pH), los valores de los elementos y parámetros físico-químicos de una estación cualquiera se unen con líneas, y se comparan con la posible potabilidad del agua que pueda presentar, clasificándose como no potable, muy mala, mala, mediocre, aceptable y buena (Condori, 2016).

5.12.1.1. TEMPORADA DE ESTIAJE

El análisis y clasificación de potabilidad del agua evaluado para las estaciones de agua subterránea y superficial muestreadas en época seca para la microcuenca Crucero, se ha procedido a elaborar cuatro (4) gráficas conformadas por la Figura 101a, 101b, 102a y 102b, los cuales muestran los siguientes resultados en cuanto a calidad del agua:

- Figura 101a, consideró la evaluación de diez (10) estaciones de agua subterránea conformado principalmente por manantiales, donde se determina que las fuentes 13188-15-GW-001, 13188-15-GW-007, 13188-15-GW-008, 13188-15-GW-014 y 13188-15-GW-020, presentan parámetros que se encuentran dentro del rango aceptable, estos se conforman por: Ca, Mg, Na (+K), Cl, SO₄, HCO₃ y pH mientras que en el parámetro dureza dichas estaciones se encuentran fuera de lo aceptable, incluso llegan a sobrepasar el límite máximo de dureza y pH según lo dispuesto por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Por otro lado, las estaciones 13188-15-GW-002, 13188-15-GW-011, 13188-15-GW-012, 13188-15-GW-018 y 13188-15-GW-019 se encuentran en el rango potabilidad aceptable para todos los parámetros analizados.
- Figura 101b, considero el análisis de once (11) estaciones de agua superficial, y donde se determina que las fuentes 13188-15-SW-007, 13188-15-SW-046, 13188-15-SW-047, 13188-15-SW-048, 13188-15-SW-049, 13188-15-SW-050, 13188-15-SW-051, 13188-15-SW-052, 13188-15-SW-053 y 13188-15-SW-054, presenta los parámetros Ca, Mg, Na (+K), Cl, SO₄, HCO₃ y pH que se clasifican como de potabilidad buena a aceptable, mientras que el parámetro dureza indica que tiene un comportamiento de potabilidad mediocre a no potable, siendo parámetro el que se encuentra por encima al valor promedio que establece la OMS. Por otra parte, la estación 13188-15-SW-045 determina que todos sus parámetros se clasifican como de potabilidad aceptable.
- Figura 102a, presenta la evaluación de once (11) estaciones de agua superficial, las cuales se determinan que las estaciones 13188-15-SW-055, 13188-15-SW-056, 13188-15-SW-057, 13188-15-SW-058, 13188-15-SW-059, 13188-15-SW-060, 13188-15-SW-061, 13188-15-SW-062, 13188-15-SW-064, 13188-15-SW-065 y 13188-15-SW-068, referente a los parámetros de Ca, Mg, Na (+K), Cl, SO₄, HCO₃ y pH de las estaciones analizadas se encuentran en el rango de potabilidad aceptable, mientras que en el parámetro de dureza las estaciones se encuentran en el rango de potabilidad mediocre a muy mala, y cabe precisar que las fuentes 13188-15-SW-055, 13188-15-SW-057, 13188-15-SW-060 y 13188-15-SW-065, presentan valores de pH que van en el rango de potabilidad mediocre a no potable,



siendo la dureza y el pH en las estaciones evaluadas que se encuentran fuera del valor promedio que establece la OMS para los analitos evaluados.

- Figura 102b, contiene el análisis de once (11) estaciones de agua superficial, estas son 13188-15-SW-069, 13188-15-SW-070, 13188-15-SW-070A, 13188-15-SW-072, 13188-15-SW-073, 13188-15-SW-074, 13188-15-SW-075, 13188-15-SW-076, 13188-15-SW-080, 13188-15-SW-083 y 13188-15-SW-120, las cuales tienen un rango de potabilidad aceptable para los parámetros Ca, Mg, Na (+K), Cl, SO₄, HCO₃ y pH, sobre esto precisar que las estaciones mencionadas en general tienen un rango de potabilidad mediocre, así mismo, se precisa que la estación 13188-15-SW-120 tiene rango de potabilidad muy mala en el parámetro Na (+K) y Cl, así mismo la estación 13188-15-SW-072 presenta un rango de potabilidad mediocre para SO₄, y las estaciones 13188-15-SW-076 y 13188-15-SW-074 tienen un rango de potabilidad muy mala a no potable, estando por encima del valor promedio dispuesto por la OMS.

5.12.1.2. TEMPORADA DE AVENIDA

El análisis de potabilidad de las estaciones de agua subterránea y superficial muestreadas en época húmeda en la microcuenca Crucero, consta de cuatro (4) gráficas conformadas por la Figura 103a, 103b, 104a y 104b, los cuales muestran los parámetros de calidad del agua.

- Figura 103a, presenta catorce (14) estaciones de agua subterránea, y los cuales son 13188-16-GW-001, 13188-16-GW-004, 13188-16-GW-005, 13188-16-GW-007, 13188-16-GW-008, 13188-16-GW-014 y 13188-16-GW-019, sobre las estaciones mencionadas, se indica que presentan un rango de potabilidad buena a aceptable para los parámetros Ca, Mg, Na (+K), Cl, SO₄, HCO₃ y pH, se precisa que todas estas estaciones tienen rango de potabilidad mediocre a no potable para la dureza, así mismo la estación 13188-16-GW-005 tiene un rango de potabilidad mala a mediocre para el parámetro Cl y pH, mientras que la estación 13188-16-GW-014 y 13188-16-GW-019 presentan una potabilidad muy mala a no potable para el parámetro pH. Por otro lado, las estaciones 13188-16-GW-002, 13188-16-GW-003, 13188-16-GW-009, 13188-16-GW-012, 13188-16-GW-018, 13188-16-GW-020 y 13188-16-GW-051 tiene parámetros que se encuentran en un rango de potabilidad buena y aceptable en cuanto a su calidad de aguas.
- Figura 103b, contiene trece (13) estaciones que de agua superficial que se conforman por 13188-16-SW-007, 13188-16-SW-046, 13188-16-SW-047, 13188-16-SW-049, 13188-16-SW-050, 13188-16-SW-051, 13188-16-SW-052, 13188-16-SW-053, 13188-16-SW-054, 13188-16-SW-055, 13188-16-SW-056 y 13188-16-SW-057, las cuales tienen rango de potabilidad aceptable para los parámetros Ca, Mg, Na (+K), Cl, SO₄, HCO₃ y pH, así mismo se determina que las estaciones tienen un rango de potabilidad mediocre a muy mala, así mismo la estación 13188-16SW-007 y 13188-16-SW-055 tienen rangos de potabilidad muy mala a no potable en Cl y pH, respectivamente, cabe precisar que esos parámetros sobrepasan el rango promedio que la OMS establece. La estación 13188-16-SW-045 tiene todos los parámetros con un aspecto de potabilidad aceptable.
- Figura 104a, presenta trece (13) estaciones de agua superficial, donde las fuentes de códigos 13188-16-SW-058, 13188-16-SW-059, 13188-16-SW-060, 13188-16-SW-061, 13188-16-SW-062, 13188-16-SW-064, 13188-16-SW-065, 13188-16-SW-067, 13188-16-SW-068,



13188-16-SW-069, 13188-16-SW-070, 13188-16-SW-071 y 13188-16-SW-072, presentan rangos de potabilidad buena a aceptable para los parámetros Ca, Mg, Na (+K), Cl, SO₄, HCO₃ y pH, mientras que en el parámetro dureza en general todas las estaciones se encuentran en el rango de potabilidad mediocre a muy mala, así mismo, se precisa que las estación 13188-16-SW-065 tiene un rango de potabilidad mediocre para el analito SO₄ y la estación 13188-16-SW-070 un rango de no potabilidad, según lo evaluados los parámetros que tienen potabilidad desde mediocre a no potable, sobrepasan los valores promedios establecidos por la OMS.

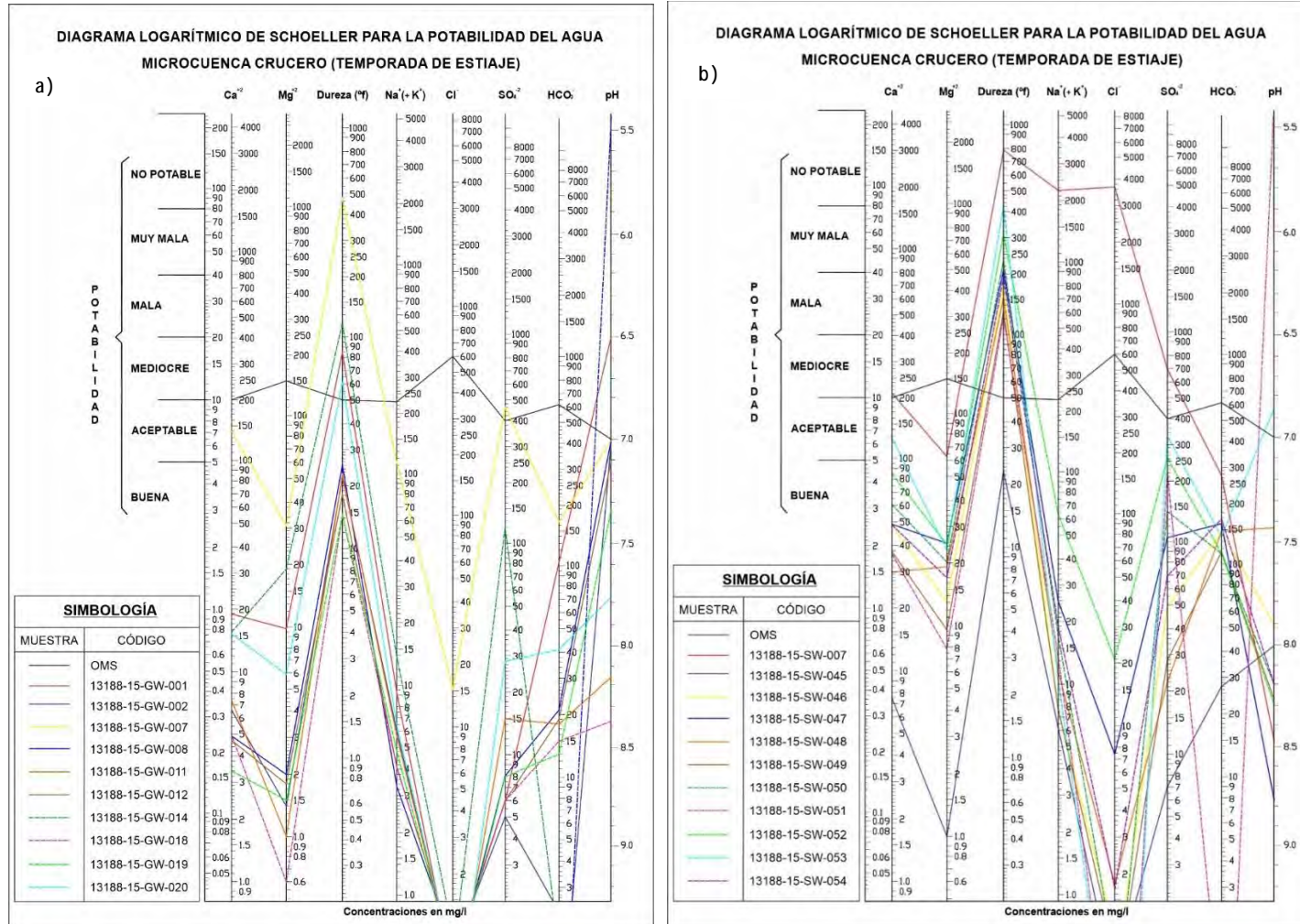
- Figura 104b, presenta trece (13) estaciones de agua superficial, donde las fuentes de códigos 13188-16-SW-073, 13188-16-SW-074, 13188-16-SW-075, 13188-16-SW-076, 13188-16-SW-077, 13188-16-SW-078, 13188-16-SW-079, 13188-16-SW-080, 13188-16-SW-081, 13188-16-SW-083, 13188-16-SW-120, 13188-16-SW-147 y 13188-16-SW-182, presentan analitos como el Ca, Mg, Na (+K), Cl, SO₄, HCO₃ y pH que se encuentran en un rango de potabilidad buena a aceptable, a excepto del parámetro dureza para todas las estaciones de agua analizadas y donde su rango de potabilidad son de mediocre a no potable, así mismo la estación 13188-16-SW-075 tiene el analito SO₄ que se encuentra en potabilidad mediocre, en general las muestras que tienen rangos de potabilidad mediocre a no potable se encuentran encima del valor promedio establecido por la OMS.



“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



Figura 101 Diagrama logarítmico de potabilidad para aguas subterráneas, temporada de estiaje



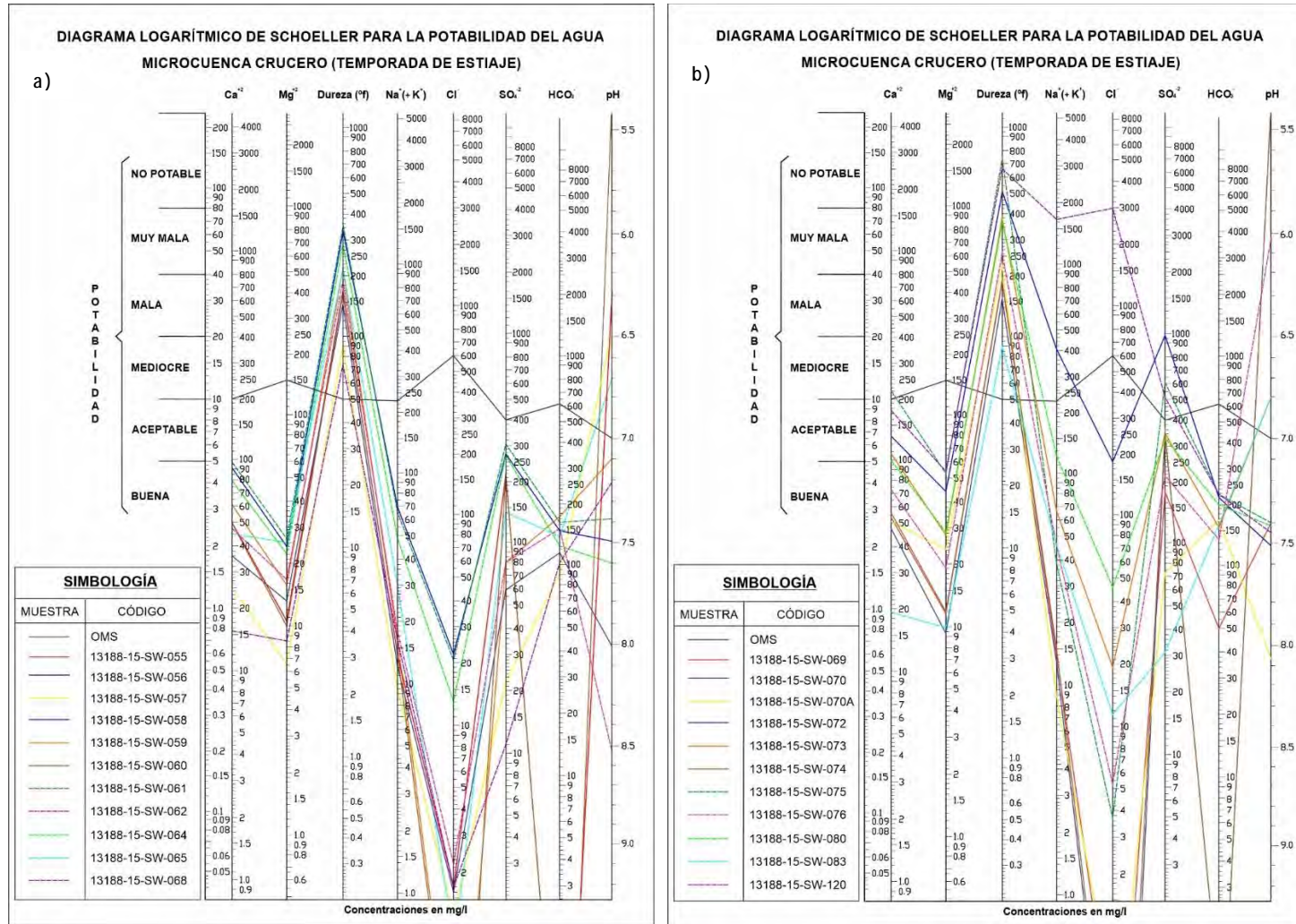
Fuente: Elaboración propia.



“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



Figura 102 Diagrama logarítmico de potabilidad para aguas superficiales, temporada de estiaje



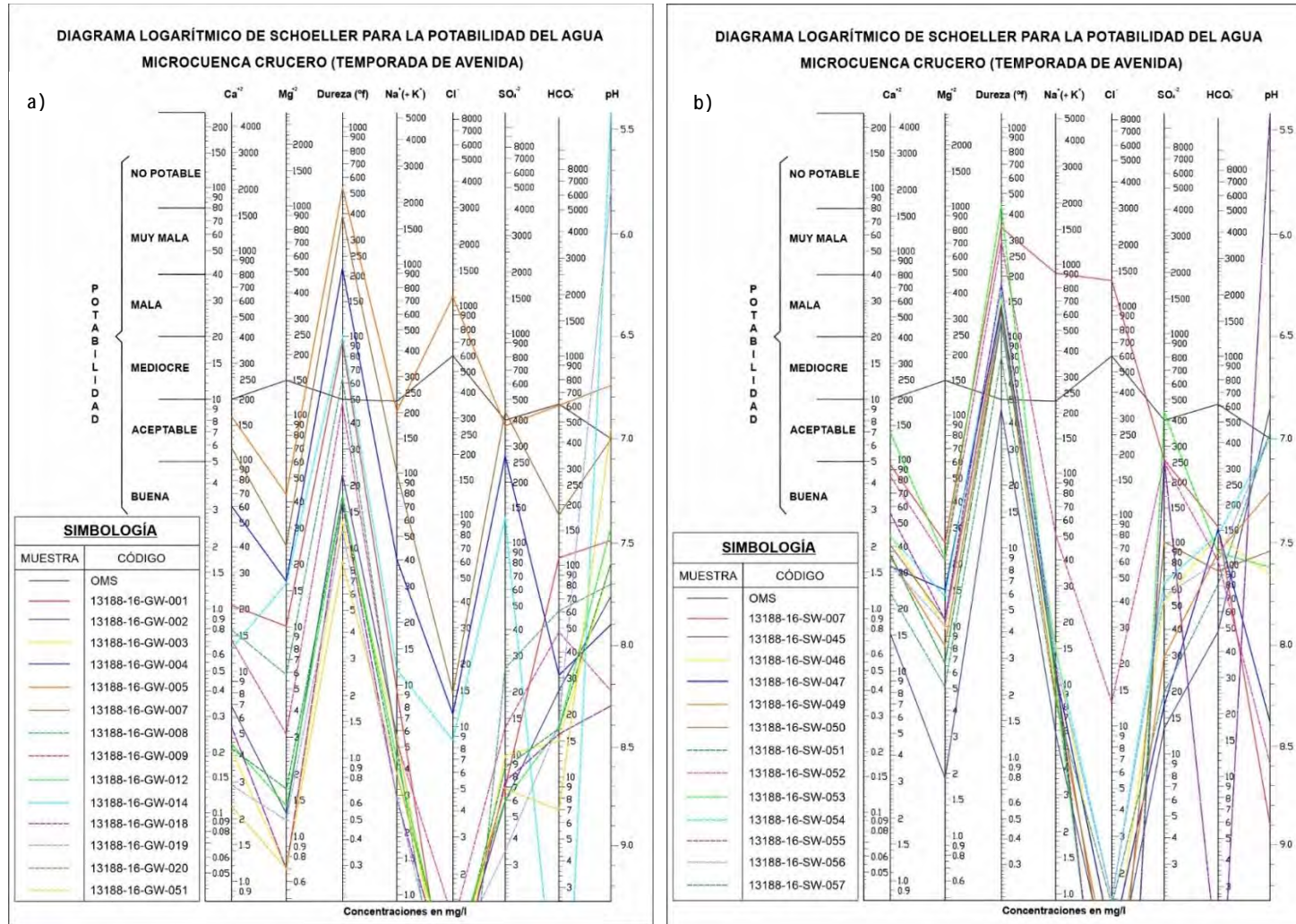
Fuente: Elaboración propia.



“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



Figura 103 Diagrama logarítmico de potabilidad para aguas subterráneas, temporada de avenida



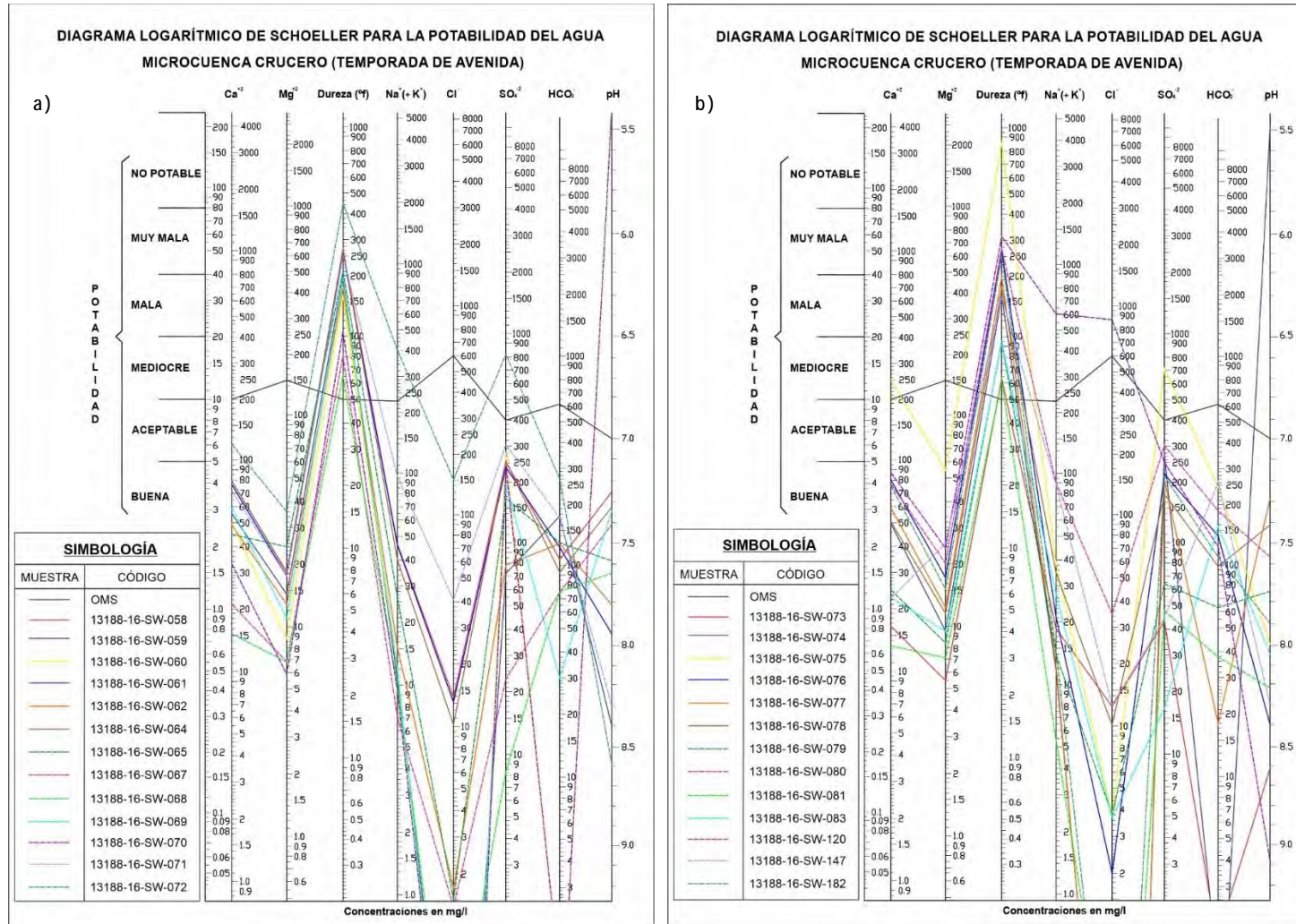
Fuente: Elaboración propia.



“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



Figura 104 Diagrama logarítmico de potabilidad para aguas subterráneas, temporada de avenida



Fuente: Elaboración propia.



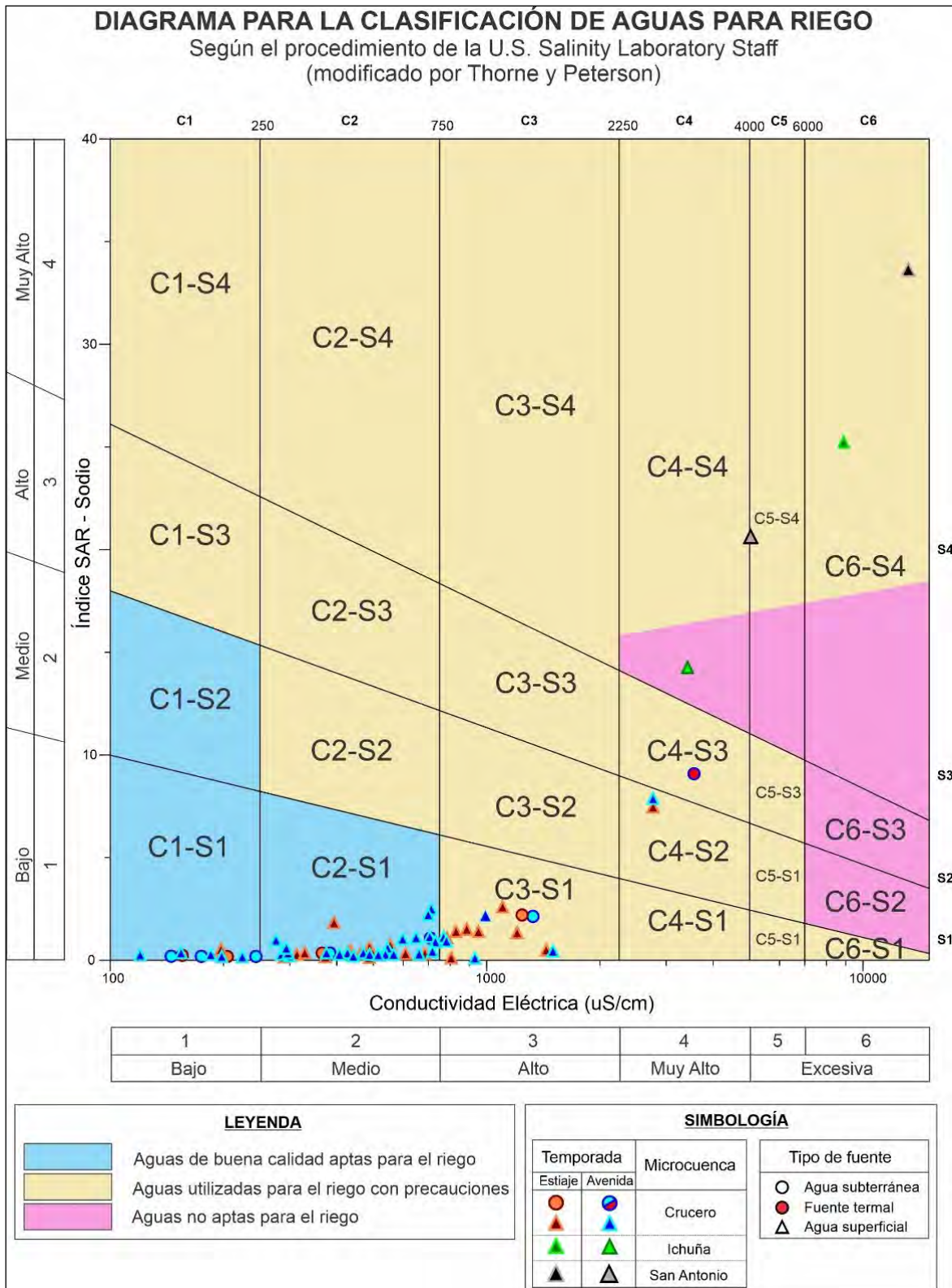
5.13. ANÁLISIS DE AGUAS PARA RIEGO DE VEGETALES

Para la evaluación respectiva se ha empleado los diagramas de Wilcox en la microcuenca Crucero, la clase predominante es la C2-S1 son aguas de mediana salinidad y bajo contenido de sodio y que constituyen aguas de buena calidad y aptas para la agricultura (Condori, 2016). La Figura 105 muestra la representación de las estaciones de agua subterránea y superficial tomada en época seca y húmeda, así mismo se expone de forma general que las fuentes están en relación a 03 categorías o clases de acuerdo al peligro de salinización y alcalinización del suelo en el uso posible de estas aguas para riego, y en menor proporción se tienen estaciones un par de estaciones que se encuentran definidas en otras categorías. A continuación, se describen cada categoría:

- C1 – S1: corresponde a aguas de baja salinidad y bajo contenido en sodio (Condori, 2016), según la Figura 51 en esta clase se encuentran un 10 % de estaciones de agua subterráneas y menor proporción superficiales tomadas en época seca y húmeda, y las cuales obedecen a fuentes de agua que se ubican en la microcuenca Crucero.
- C2 – S1: corresponde a aguas de mediana salinidad y bajo contenido de sodio y que constituyen aguas de buena calidad y aptas para la agricultura (Condori, 2016). La Figura 105 muestra que el 65 % de las estaciones evaluadas en época seca y húmeda pertenecen a esta clase de agua, además todos se encuentran destruidos en la microcuenca Crucero, en ese sentido, se puede definir que la mayoría de fuentes están concentradas en este grupo.
- C3 – S1: corresponde a aguas de mediana a alta salinidad y bajo contenido de sodio (Condori, 2016). Estas aguas pueden ser utilizadas en la agricultura bajo ciertas condiciones. De acuerdo a la Figura 51 el 15 % de las estaciones de agua superficial se encuentran en la microcuenca Crucero se encuentran en este grupo y pueden ser usadas las aguas bajo ciertas precauciones.
- C4 – S2: corresponde a aguas de muy alta salinidad y mediano contenido de sodio (Condori, 2016), corresponden a las aguas superficiales que provienen de la zona geotermal Calazaya, la cuales presentan moderados contenidos de sodio por el tipo de fuente al que están asociadas, de preferencia pueden ser usados para otros fines del tipo recreacional.
- C4 – S3: corresponde a aguas de muy alta salinidad y alto contenido de sodio (Condori, 2016), esta fuente se relaciona a la zona geotermal Calazaya, es decir, que sus aportes provienen de una fuente termal que contiene una alta disolución de elementos y minerales que la conforman, las características fisicoquímicas de la estación tipificada como termal puede ser utilizado para otros fines como la balneología, uso recreacional, entre otras actividades.
- C4 – S4: tienen agua de muy alta salinidad y muy alto contenido de sodio, corresponde a fuentes de aguas superficiales que se relacionan a la zona geotermal de Jesús María, estas fuentes tienen un origen termal, por lo que tienen parámetros fisicoquímicos altos, y deben ser usados para otros fines como balneología y recreacional, para este aspecto se debe evaluar en detalle sus analitos constituyentes del agua.
- C6 – S4: presentan aguas de excesiva salinidad y muy alta concentración de sodio, se relacionan a la zona geotermal de Jesús María, su fuente es de origen termal, se sugiere que se prevea un uso con fin recreacional y el cual debe ser analizados los analitos constituyentes para evitar perjuicios a la salud humana, no se recomienda el uso para riego de suelos.



Figura 105 Diagrama de Wilcox para muestras de aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero (estiaje y avenida).



Fuente: Elaboración propia.



CAPÍTULO VI ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y MULTIVARIANTE

6.1. PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO

Posterior a realizar el análisis hidrogeoquímico de las estaciones de agua subterránea y superficial para la microcuenca Crucero, resulta necesario tener una visión global del conjunto de valores obtenidos, para se realizó el uso de herramientas Estadísticas. Los resultados analíticos de ICPMS, por ser más numerosos (52 elementos), han sido sometidos a este procesamiento estadístico porque se tiene una mayor cantidad de variables, así se ha utilizado los parámetros fisicoquímicos para realizar la comparación de los elementos.

El Capítulo V utilizó la estadística bivariar para evaluar las relaciones iónicas de los analitos por cada temporada, lo cual ha permitido establecer grupos con tendencias similares. En cuanto a la estadística multivariar, tiene la finalidad de encontrar las relaciones entre grupos de elementos directamente relacionados, se utilizó dos técnicas estadísticas como el Análisis Clúster y Análisis de Componentes Principales (PCA). Se tuvo en cuenta que el tamaño de la muestra estadística debe ser mayor a 20 muestras con el fin de tener un análisis estadístico representativo a través de un universo de muestras óptima para ejecutar este tipo de análisis multivariado, así mismo se han sido sometidas a pruebas estadísticas para establecer el grado de correlación entre las variables utilizadas, así como la aplicabilidad del método.

Este capítulo plasma los resultados estadísticos obtenidos para las estaciones subterráneas y superficiales tomadas en la microcuenca Crucero y las cuales se ejecutaron en dos temporadas: Estiaje (setiembre - octubre del 2015) y avenidas (abril - mayo del 2016), en la cual se recolectaron datos de parámetros fisicoquímicos in situ por cada estación y muestras de agua subterránea y superficial (Tabla 26). En la época seca se hizo un inventario de 50 estaciones (14 aguas subterráneas y 36 aguas superficiales) y durante la época húmeda se conforma por 51 estaciones (14 aguas subterráneas y 37 aguas superficiales).

6.2. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS

6.2.1. ÉPOCA SECA

Consistió en la evaluación de 50 estaciones de agua subterránea y superficial, donde los parámetros determinar que tienen las siguientes desviaciones estándar para los parámetros fisicoquímicos como la Temperatura (°C), pH, Salinidad (psu), Resistividad (Kohm-cm), Oxígeno Disuelto (mg/L) los cuales presentan valores menores a 10 unidades, por lo que se puede interpretar que estos parámetros fisicoquímicos de las estaciones evaluadas se encuentran ajustados y no muestran una alta variabilidad, es decir, las desviaciones medidas son bajas (Tabla 26).

Por otro lado, los parámetros fisicoquímicos como la Conductividad eléctrica (uS/cm), Total de Sólidos Disueltos (mg/l) y el Potencial de Oxidación y Reducción (mV) tienen un valor por encima de 150 unidades, esto se determina que los parámetros fisicoquímicos tienen una moderada a alta variabilidad de resultados, lo cual se relaciona a la existencia de estaciones que tienen bajas y altas



concentraciones iónicas y donde la variación de resultados es significativa, para este punto las estaciones que pueden condicionar esta variación están ligadas a las fuentes termales de Calazaya y Jesús María, así mismo a las fuentes frías que interactúa con el basamento rocoso.

6.2.2. ÉPOCA HÚMEDA

Se realizó el análisis de 51 estaciones de agua subterránea y superficial, y se determina que las estaciones evaluadas tienen desviaciones estándar bajas menores a 10 unidades referidos a los parámetros fisicoquímicos como Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pH, Salinidad (psu), Resistividad (Kohm-cm), Oxígeno Disuelto (mg/L), mientras que se presentan una moderada a elevada desviación estándar como Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Total de Sólidos Disueltos (mg/l) y el Potencial de Oxidación y Reducción (mV), este aspecto guarda relación con la época seca, y donde las variaciones de resultados se deben principalmente el tipo de fuentes evaluada como las fuentes termales de Calazaya y Jesús Maria, así como fuentes frías que interactúan con las rocas volcano sedimentarias del área de estudio (Tabla 26).

6.3. HISTOGRAMAS DE DATOS

Las gráficas realizadas para los parámetros fisicoquímicos y analitos evaluados se ejecutaron con el fin de analizar la distribución de los datos de las estaciones evaluadas, a partir parámetros fisicoquímicos y de los elementos evaluados, de esa forma nos permita determinar la forma de tratar los datos y definir si existen valores extremos y sus verosimilitudes.

6.3.1. TEMPORADA DE ESTIAJE

La Figura 106 muestra que los parámetros fisicoquímicos como la Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y Total de sólidos disueltos (mg/l), y los analitos como el Cloro (mg/l), Sulfato (mg/l), Sodio (mg/l), Calcio (mg/l), Magnesio (mg/l), y Potasio (mg/l), presentan en conjunto una distribución de histograma que es sesgada hacia la derecha, lo cual implica que tiene excesivos valores extremos, y se aproxima a tener una distribución log normal, así mismo se puede definir que la mediana es mucho menor que la media aritmética.

Por otro lado, la Figura 106 expone que los resultados Eh (mV), Potencial de oxidación y reducción (mV) y Bicarbonato (mg/l), tienen una distribución normal donde la media aritmética y mediana tienen casi una similitud. Finalmente, los parámetros fisicoquímicos referidos pH y Oxígeno disuelto (% Saturación), muestran una distribución log normal y donde tiene un sesgo hacia la izquierda, en ese sentido se tiene que la media geométrica es menor que la mediana poblacional de las estaciones evaluadas.

Con el fin de evaluar los datos, sin tener la afectación de las concentraciones de los parámetros fitoquímicos y analitos, se ha procedido a trabajar con el logaritmo natural cuyo fin es evaluar sus relaciones sin considerar el sobredimensionamiento de estos. La Figura 107, muestra que los parámetros fisicoquímicos y analitos tienen una tendencia de datos normal, asimilándose a una campana de Gauss, por lo cual exceptúa el sesgo de datos y donde la mediana y media geométrica tendrán un valor casi similar.



6.3.2. TEMPORADA DE AVENIDA

La Figura 108 expone que los parámetros fisicoquímicos como la Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y Total de sólidos disueltos (mg/l), y los analitos como el Bicarbonato (mg/l), Cloro (mg/l), Sulfato (mg/l), Sodio (mg/l), Calcio (mg/l), Magnesio (mg/l), y Potasio (mg/l), presentan una distribución log normal de sesgo a la derecha, mientras que los parámetros como pH y Oxígeno disuelto (% Saturación) tienen una distribución log normal con sesgo a la izquierda, y finalmente se tiene que el Eh (mV), y el Potencial de oxidación y reducción (mV) tiene una distribución normal.

La Figura 109 muestra los parámetros fisicoquímicos y analitos convertidos en logaritmo natural para analizar el comportamiento de las variables, en ese sentido, se determina que la distribución de los datos se asimila a una distribución normal y la simetría corresponde a una campana de Gauss.

6.4. DIAGRAMA DE CAJAS

Los diagramas de cajas también se denominan *box plot*, este tipo de gráficas permite evaluar los valores atípicos y atípicos extremos de las estaciones inventariadas de agua subterránea y superficial para la microcuenca Crucero, así mismo, nos permite ver la distribución de todas las variables y de esa forma evaluar las desviaciones por cada elemento.

6.4.1. TEMPORADA DE ESTIAJE

La Figura 110 muestra la distribución de las concentraciones de parámetros fisicoquímicos y elementos mayoritarios, donde se determina que el parámetro fisicoquímico como ORP tiene una alta variabilidad de datos, así mismo se puede ver una moderada variabilidad para el analito Cl y SO_4 , mientras que para las otras variables como Eh, CE, TDS, Na, Mg, K, Ca, tienen una tendencia a presentar datos atípicos, esto puede estar relacionado a las estaciones que tiene como origen aguas termales, condicionado por la solubilidad de elementos. Finalmente, el parámetro como la T y pH, muestran cierto agrupamiento donde no evidencia datos atípicos.

La Figura 111, presenta la conversión de las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos y analitos a logaritmo con el fin de contrarrestar los datos atípicos, de esa forma, evaluar sobre una misma dimensión las variables respectivas, esto se aplicó para ambas temporadas.

6.4.2. TEMPORADA DE AVENIDA

La Figura 110, muestra que las variables en general, tienen una tendencia de presentar sus datos en un mismo rango, es decir, no tienen altas variaciones remarcadas, lo que si se visualiza es que los parámetros como T, pH, Eh, CE, TDS, OD, ORP, HCO_3 , Cl, SO_4 , Na, Mg, K y Ca, tienen datos atípicos, por lo que hay puntos fuera del gráfico de cajas y los bigotes de estas gráficas se alargan, mostrando esta tendencia, con el fin de analizar las relaciones entre variables, como se precisó se va trabajar con datos convertidos en logaritmos (Figura 111).



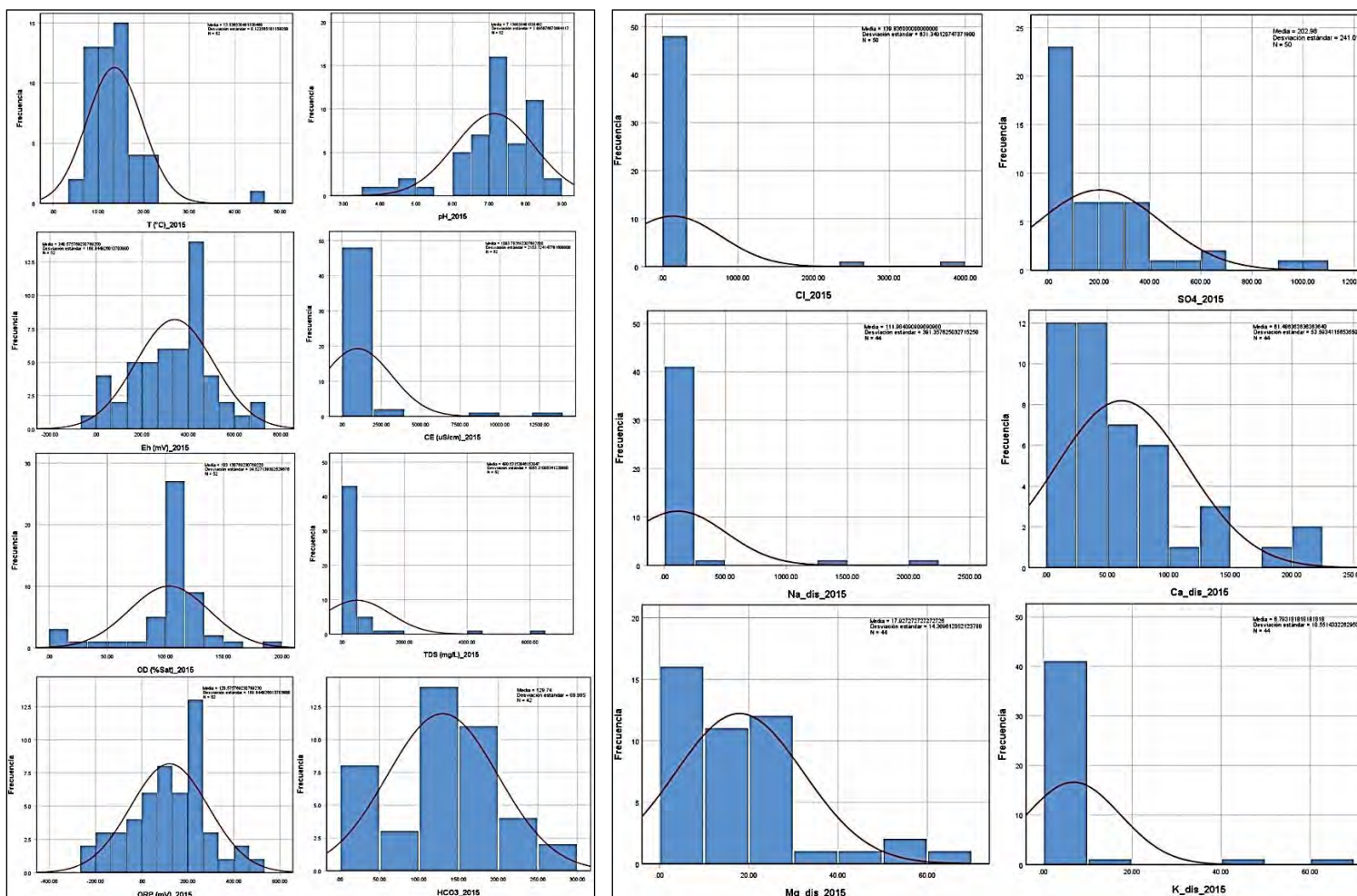
Tabla 26 Análisis estadístico de datos en época seca y húmeda para la microcuenca Crucero

ÉPOCA	Parámetros	N° Datos	ESTIAJE						AVENIDA						
			Máx.	Min.	Media	Mediana	Desviación estándar	CV	N° Datos	Máx.	Min.	Media	Mediana	Desviación estándar	CV
	T (°C)	50	44.30	4.50	13.56	12.85	6.06	44.69	51	43.90	5.30	12.46	12.30	5.55	44.52
	pH	50	8.76	3.64	7.11	7.32	1.10	15.48	51	8.61	3.62	7.28	7.58	1.15	15.83
	CE (uS/cm)	50	3208.00	38.21	602.54	450.85	605.70	100.52	51	3557.00	41.86	556.32	426.80	624.23	112.21
	TDS (mg/L)	50	1572.00	19.22	293.94	221.40	295.27	100.45	51	1744.00	21.01	273.54	209.20	306.37	112.00
	Salinidad (psu)	50	1.72	0.07	0.34	0.26	0.31	90.16	51	1.91	0.07	0.32	0.25	0.32	100.55
	Resistividad (Kohm-cm)	50	26.17	0.31	4.57	2.22	5.94	130.03	51	23.89	0.28	4.74	2.34	5.72	120.83
	OD (% Saturación)	50	186.60	1.70	102.40	107.25	34.95	34.13	50	155.50	1.20	105.11	110.95	28.89	27.48
	OD (mg/L)	50	10.09	0.06	6.47	6.75	1.87	28.96	50	9.65	0.04	6.72	7.05	1.83	27.25
	Eh (mV)	50	717.90	-5.70	334.57	348.90	168.75	50.44	51	837.00	114.60	418.64	383.80	145.58	34.78
	ORP (mV)	50	497.90	-225.70	114.57	128.90	168.75	147.29	51	617.00	-105.40	198.64	163.80	145.58	73.29

Fuente: Elaboración propia.



Figura 106 Histogramas de parámetros fisicoquímicos y concentraciones de analitos como el bicarbonato, cloro, sulfato, sodio, calcio, magnesio y potasio (mg L^{-1}), temporada de estiaje



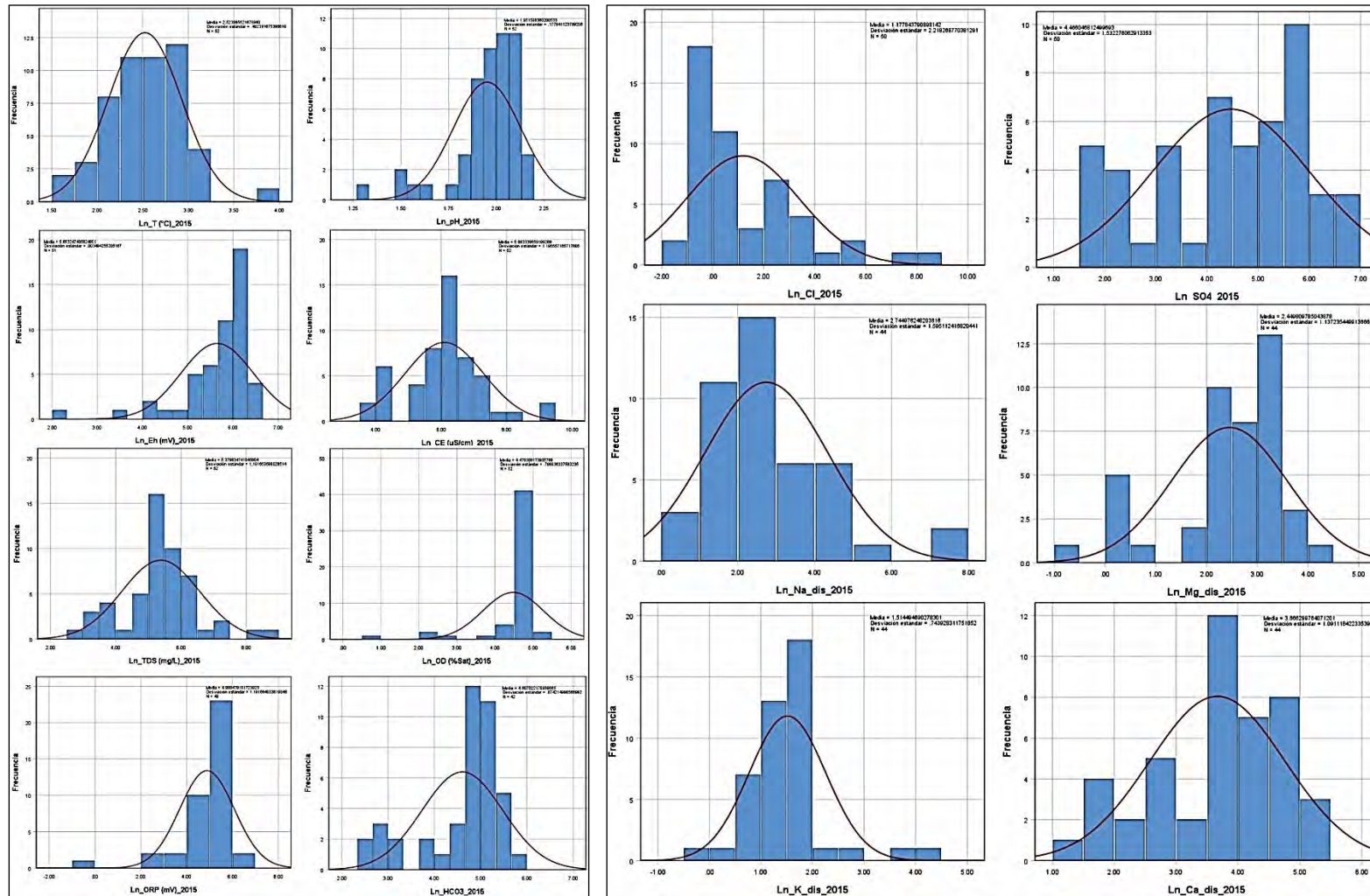
Fuente: Elaboración propia.



“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



Figura 107 Histogramas del logaritmo natural de parámetros fisicoquímicos y concentraciones de analitos como el bicarbonato, cloro, sulfato, sodio, calcio, magnesio y potasio (mg L^{-1}), temporada de estiaje



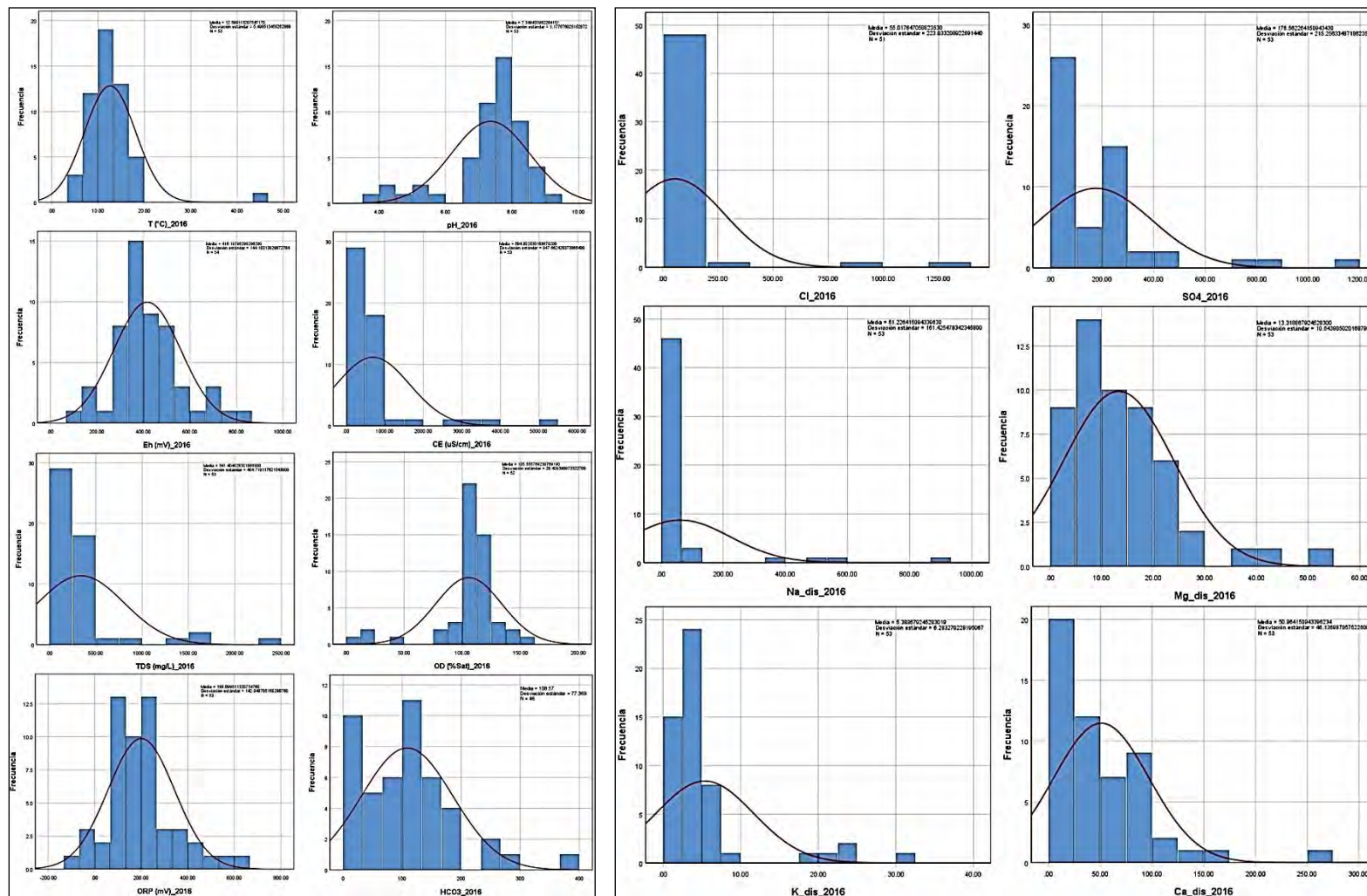
Fuente: Elaboración propia.



“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



Figura 108 Histogramas de parámetros fisicoquímicos y concentraciones de analitos como el bicarbonato, cloro, sulfato, sodio, calcio, magnesio y potasio (mg L^{-1}), temporada de avenida



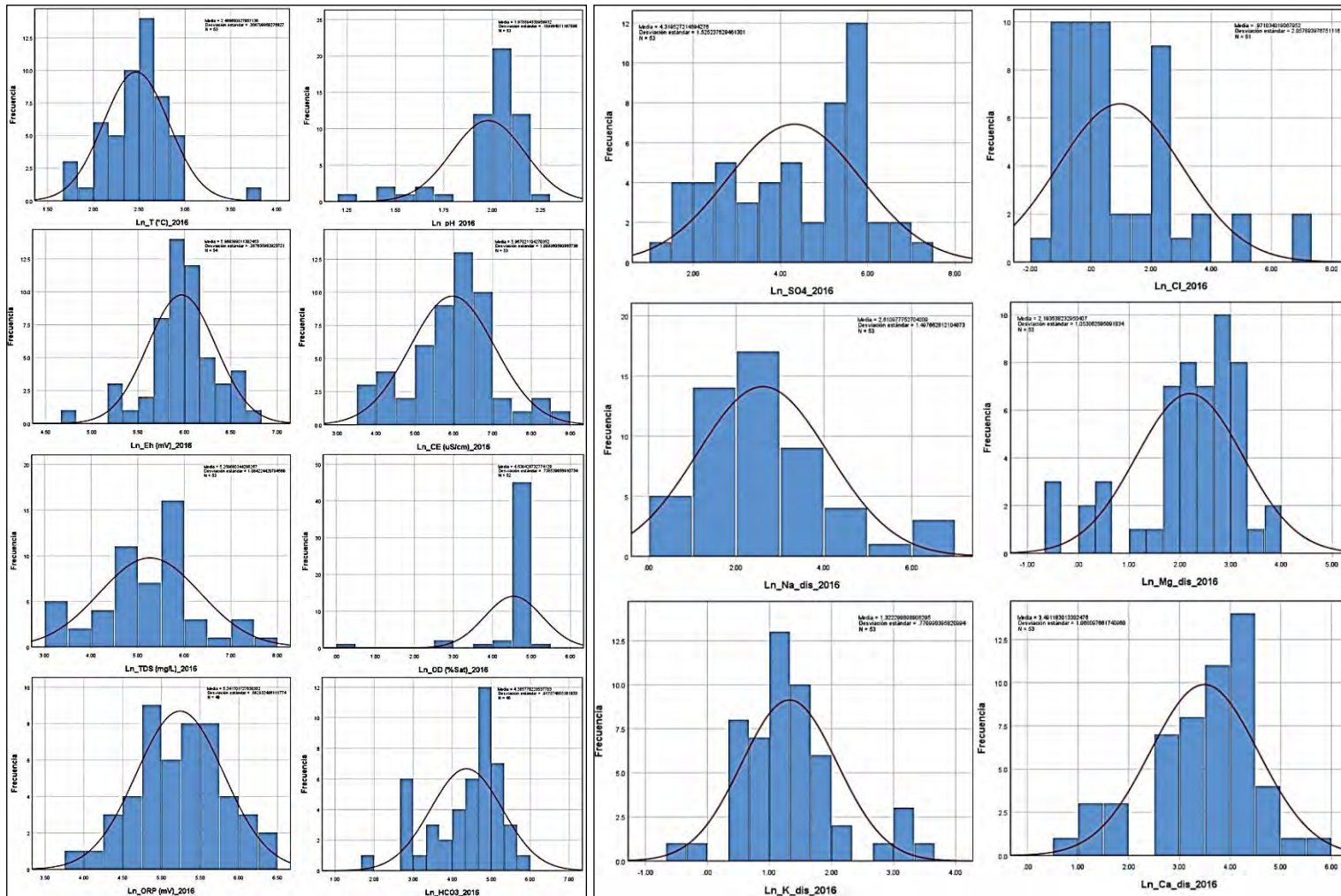
Fuente: Elaboración propia.



“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”



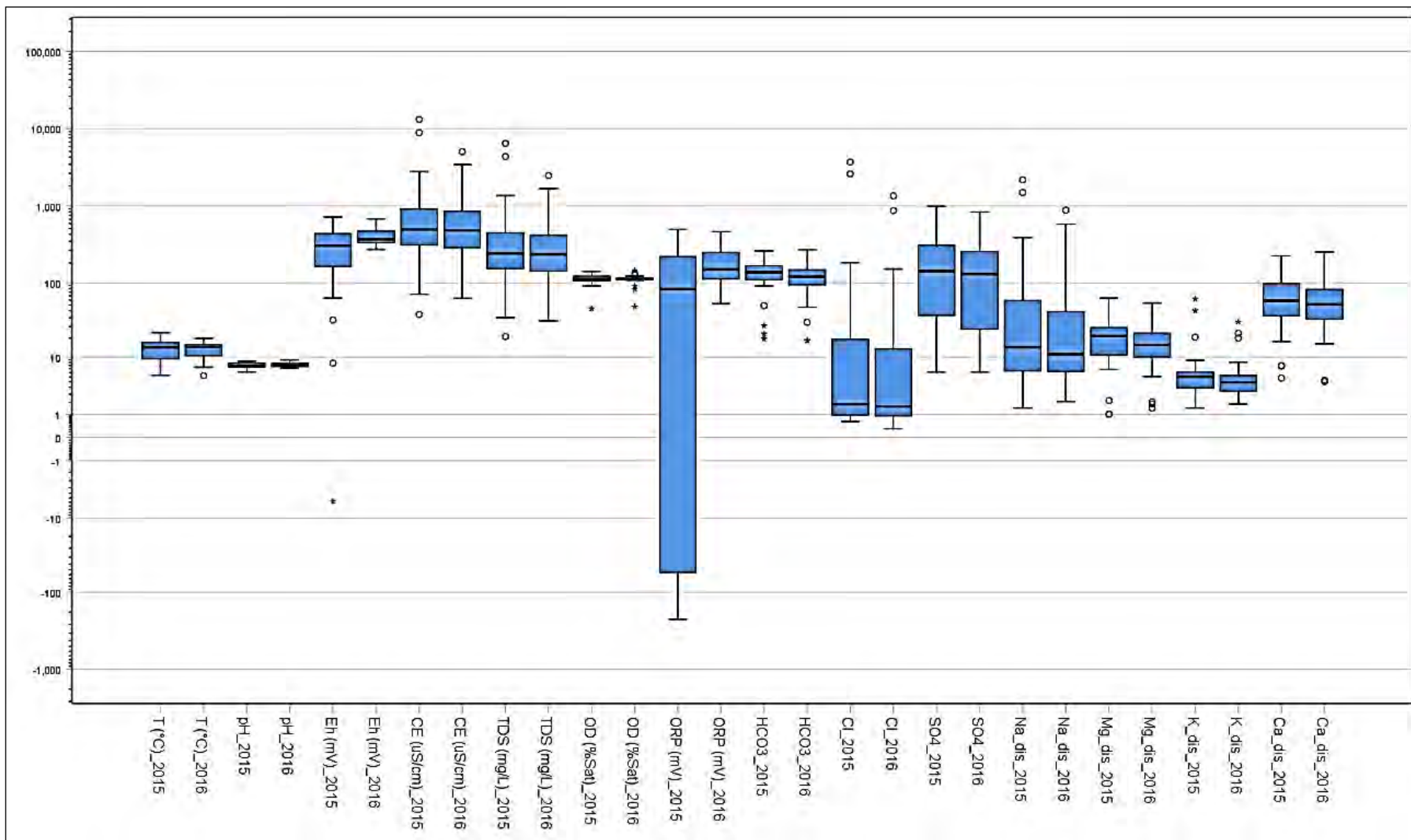
Figura 109 Histogramas en logaritmo natural de parámetros fisicoquímicos y concentraciones de analitos como el bicarbonato, cloro, sulfato, sodio, calcio, magnesio y potasio (mg L^{-1}), temporada de avenida



Fuente: Elaboración propia.



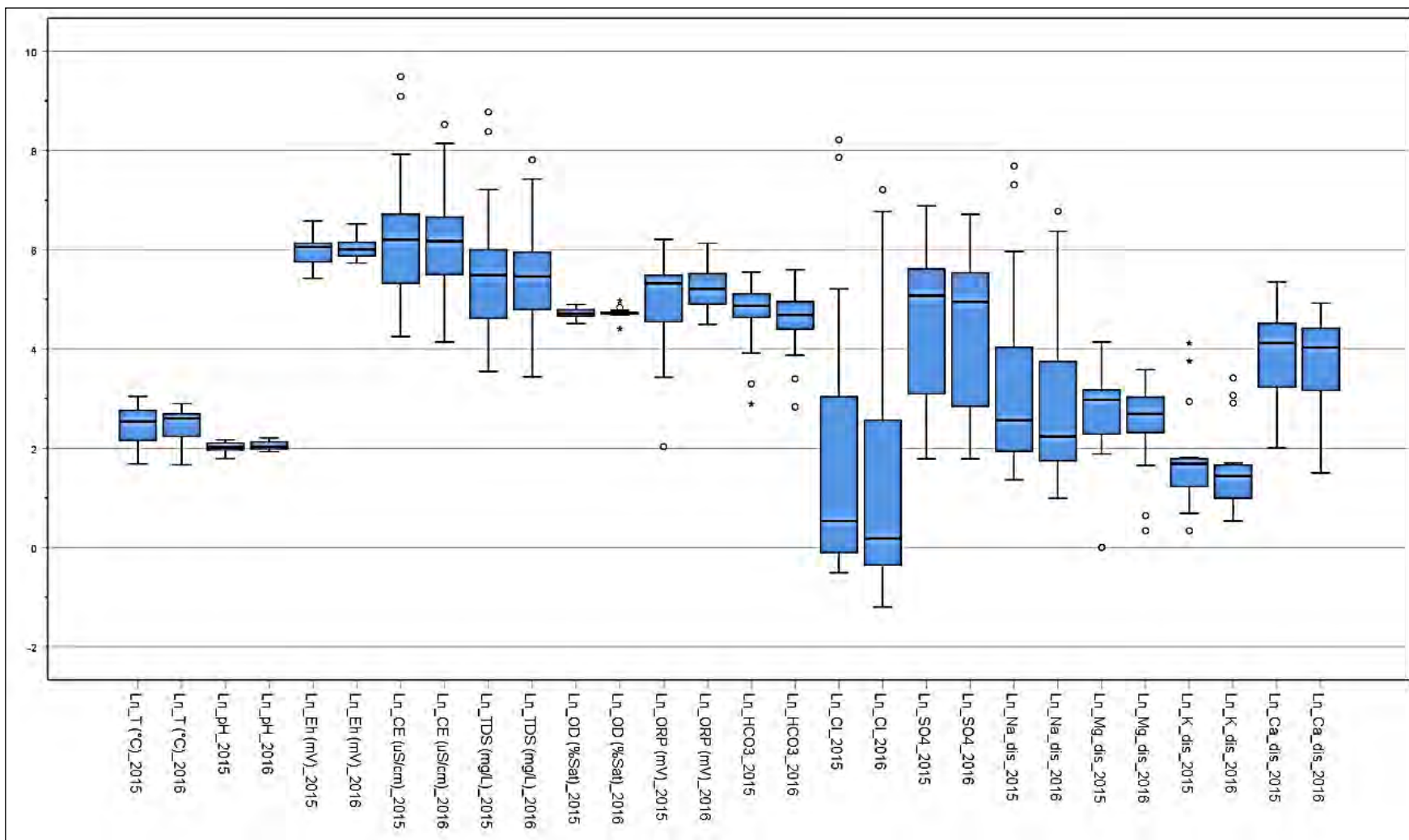
Figura 110 Diagrama de cajas de estaciones de agua subterránea y superficial de la microcuenca Crucero, temporada de estiaje y avenida (mg L-1)



Fuente: Elaboración propia.



Figura 111 Diagrama de cajas en logaritmo de estaciones de agua subterránea y superficial de la microcuenca Crucero, temporada de estiaje y avenida



Fuente: Elaboración propia.



6.5. CORRELACIÓN DE PEARSON

Se realizó el análisis de correlación de resultados para analizar que variables y/o analitos se relacionan entre sí, la Tabla 27 y 28 (temporada de estiaje y avenida) muestran que los coeficientes de Pearson tienen una correlación positiva alta donde r varía de 0.75 a 0.89, y una correlación positiva muy alta donde r está en el rango de 0.9 a 0.99, finalmente si r es igual a 1, se prevé una correlación positiva grande y perfecta. Si los valores de r son negativos (-) se tendrá una relación inversa y por lo que se define que las variables están disociadas, es decir, si una variable aumenta la otra disminuye; por otra parte, si los valores de r son positivos (+), implica que las variables tienen una relación directa, por lo que, si una variable aumenta, la otra mantiene dicha tendencia.

Se determina que la microcuenca Crucero presenta los siguientes resultados:

- Correlación positiva muy alta de los siguientes parámetros fisicoquímicos como ORP con Eh.
- Correlación positiva alta a muy alta entre parámetros fisicoquímicos y los siguientes analitos: CE y TDS versus el HCO₃, Cl, SO₄, Na, Mg, K, Ca, Sr, Li, B, S, Ti y Tl.
- Correlación positiva alta a muy alta entre los siguientes analitos: CO₃ versus Ce; HCO₃ versus SO₄, Mg, Ca y Tl; F versus Al, Co y Fe; Cl versus Na, K y Li; SO₄ versus Ma, Ca, Sr, Li, S y Ti; Na versus K, Ca, Li y B; Mg versus K, Ca, Sr, Li y S; K versus Li, B y Tl; Ca versus Sr, Li y S; Sr versus Li y S; Li versus B y S; SiO₂ versus Ce, Co y Ni; Al versus Ce, Cu y Mn; Ce versus Cu, Mn, Mo, Ni, Tl y Zn; Co versus Fe, Mn, Ni y Zn; Fe versus Mn, Ni y Zn; Mn versus Ni y Zn; S versus Ti.
- Correlación negativa muy alta entre el parámetro fisicoquímicos de pH versus Ce, Co, Ni y Zn.
- Correlación negativa alta y muy alta entre los analitos: Ba versus Ce; Ce versus V.

Según lo analizado, el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos y los analitos se mantiene en general para la época seca y húmeda a nivel de las estaciones evaluadas de aguas subterránea y superficial, en lo que refiere al parámetro de CE tiene una relación muy marcada con los analitos mayoritarios como HCO₃, Cl, SO₄, Na, Mg, K y Ca, por lo que presentan la mineralización de agua. Así mismo, se determinó que se tienen correlaciones negativas importante del pH versus Ce, Co, Ni, por lo que determina que dichos analitos guardan una disociación marcada respecto al parámetro fisicoquímico del pH, es decir, los cambios de base condicionarán la precipitación y solubilidad de dichos analitos en el agua.



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



Tabla 27 Coeficientes de correlación de Pearson para los distintos parámetros en temporada de estiaje para la microcuenca Crucero

ANALITOS	Ln_T (°C)	Ln_pH	Ln_Eh (mV)	Ln_CE (uS/cm)	Ln_TDS (mg/L)	Ln_OD (%Sat)	Ln_ORP (mV)	Ln_CO3	Ln_HCO3	Ln_F	Ln_Cl	Ln_SO4	Ln_Na	Ln_Mg	Ln_K	Ln_Ca	Ln_Sr	Ln_Li	Ln_SiO2	Ln_Al	Ln_As	Ln_B	Ln_Ba	Ln_Ce	Ln_Co	Ln_Cu	Ln_Fe	Ln_Mn	Ln_Mo	Ln_Ni	Ln_S	Ln_Ti	Ln_Tl	Ln_U	Ln_V	Ln_Zn	
Ln_T (°C)	1.00	-0.04	-0.22	0.40	0.40	-0.10	0.13	0.22	0.57	0.34	0.26	0.42	0.22	0.49	0.25	0.41	0.35	0.19	-0.14	-0.15	0.04	-0.28	0.36	0.09	0.14	-0.01	-0.10	-0.03	0.12	-0.01	0.32	-0.31	0.00	0.18	0.08	0.06	
Ln_pH	-0.04	1.00	-0.22	-0.04	-0.04	0.19	-0.27	0.27	-0.06	-0.53	0.31	-0.22	0.12	0.02	0.03	0.00	-0.02	0.06	-0.48	-0.71	0.29	0.33	-0.06	-0.83	-0.83	-0.69	-0.74	-0.60	0.11	-0.81	-0.23	-0.22	-0.17	0.42	-0.02	-0.76	
Ln_Eh (mV)	-0.22	-0.22	1.00	-0.10	-0.10	0.18	0.87	-0.21	-0.13	0.18	-0.20	-0.15	-0.13	-0.09	0.00	-0.09	0.04	-0.08	0.20	0.42	-0.19	0.18	0.18	0.75	0.58	0.31	0.42	0.31	-0.31	0.52	-0.10	-0.12	0.11	-0.34	0.10	0.26	
Ln_CE (uS/cm)	0.40	-0.04	-0.10	1.00	1.00	-0.04	0.23	0.34	0.85	-0.07	0.78	0.90	0.90	0.90	0.89	0.93	0.83	0.90	0.21	0.09	0.58	0.75	0.56	-0.08	-0.35	0.11	-0.08	0.18	0.35	-0.25	0.89	0.82	0.80	0.26	-0.05	0.36	
Ln_TDS (mg/L)	0.40	-0.04	-0.10	1.00	1.00	-0.04	0.24	0.35	0.85	-0.06	0.78	0.90	0.90	0.90	0.89	0.93	0.83	0.90	0.21	0.09	0.58	0.76	0.56	-0.08	-0.35	0.11	-0.08	0.18	0.35	-0.25	0.88	0.82	0.80	0.26	-0.05	0.36	
Ln_OD (%Sat)	-0.10	0.19	0.18	-0.04	-0.04	1.00	0.38	-0.05	0.05	-0.44	-0.11	-0.07	0.21	0.22	0.16	0.33	0.35	0.14	-0.34	-0.04	0.16	0.12	0.10	0.15	-0.35	0.12	-0.47	-0.25	-0.03	-0.43	0.15	-0.11	0.19	0.08	0.00	-0.31	
Ln_ORP (mV)	0.13	-0.27	0.87	0.23	0.24	0.38	1.00	-0.31	0.35	0.45	0.01	0.19	0.17	0.33	0.24	0.30	0.31	0.19	0.08	0.35	0.16	0.13	0.43	0.70	0.51	0.40	0.22	0.14	-0.03	0.46	0.19	-0.19	0.13	-0.12	0.18	0.39	
Ln_CO3	0.22	0.27	-0.21	0.34	0.35	-0.05	-0.31	1.00	0.70	0.30	0.25	0.44	0.25	0.51	0.16	0.46	0.25	0.27	-0.15	-0.41	0.31	0.12	0.03	0.92	-0.22	-0.33	-0.11	-0.07	0.08	0.61	0.46	0.16	0.55	0.16	0.03	-0.24	
Ln_HCO3	0.57	-0.06	-0.13	0.85	0.85	0.05	0.35	0.70	1.00	0.42	0.60	0.77	0.68	0.94	0.71	0.89	0.71	0.69	0.14	-0.11	0.50	0.52	0.66	-0.42	0.01	0.27	-0.49	-0.02	0.28	0.13	0.74	0.29	0.88	0.36	0.31	0.32	
Ln_F	0.34	-0.53	0.18	-0.07	-0.06	-0.44	0.45	0.30	0.42	1.00	-0.31	0.35	-0.43	-0.45	-0.38	-0.30	-0.50	-0.57	0.32	0.87	-0.52	0.04	-0.37	0.21	0.77	0.61	0.82	0.60	-0.63	0.74	0.08	0.30	-0.28	-0.49	0.32	0.41	
Ln_Cl	0.26	0.31	-0.20	0.78	0.78	-0.11	0.01	0.25	0.60	-0.31	1.00	0.57	0.93	0.60	0.84	0.58	0.60	0.84	-0.01	-0.29	0.57	0.82	0.50	-0.70	-0.66	-0.20	-0.39	0.02	0.26	0.59	0.53	0.39	0.52	0.39	-0.12	0.08	0.08
Ln_SO4	0.42	-0.22	-0.15	0.90	0.90	-0.07	0.19	0.44	0.77	0.35	0.57	1.00	0.74	0.83	0.67	0.91	0.76	0.76	0.28	0.43	0.48	0.48	0.37	0.38	-0.01	0.30	0.17	0.39	0.40	0.22	1.00	0.83	0.65	0.12	-0.19	0.47	
Ln_Na	0.22	0.12	-0.13	0.90	0.90	0.21	0.17	0.25	0.68	-0.43	0.93	0.74	1.00	0.73	0.89	0.75	0.72	0.91	0.10	-0.07	0.56	0.82	0.50	-0.43	-0.51	-0.03	-0.22	0.12	0.31	-0.50	0.74	0.58	0.65	0.34	-0.14	0.29	
Ln_Mg	0.49	0.02	-0.09	0.90	0.90	0.22	0.33	0.51	0.94	-0.45	0.60	0.83	0.73	1.00	0.77	0.92	0.76	0.76	0.09	-0.10	0.59	0.57	0.64	-0.59	-0.33	-0.12	-0.19	0.04	0.38	-0.41	0.83	0.53	0.54	0.54	0.14	0.19	
Ln_K	0.25	0.03	0.00	0.89	0.89	0.16	0.24	0.16	0.71	-0.38	0.84	0.67	0.89	0.77	1.00	0.72	0.73	0.86	0.22	-0.12	0.51	0.80	0.68	-0.49	-0.45	0.03	-0.11	0.19	0.26	-0.38	0.67	0.58	0.77	0.24	0.12	0.36	
Ln_Ca	0.41	0.00	-0.09	0.93	0.93	0.33	0.30	0.46	0.89	-0.30	0.58	0.91	0.75	0.92	0.72	1.00	0.81	0.78	0.18	0.15	0.56	0.41	0.45	-0.01	-0.31	0.08	-0.22	0.05	0.39	-0.32	0.91	0.73	0.59	0.30	-0.04	0.19	
Ln_Sr	0.35	-0.02	0.04	0.83	0.83	0.35	0.31	0.25	0.71	-0.50	0.60	0.76	0.72	0.76	0.73	0.81	1.00	0.87	0.13	0.09	0.53	0.50	0.60	-0.08	-0.45	0.14	-0.21	0.18	0.52	-0.45	0.76	0.37	0.61	0.30	-0.18	0.20	
Ln_Li	0.19	0.06	-0.08	0.90	0.90	0.14	0.19	0.27	0.69	-0.57	0.84	0.76	0.91	0.76	0.86	0.78	0.87	1.00	0.14	-0.08	0.64	0.77	0.56	-0.46	-0.69	-0.04	-0.13	0.21	0.48	-0.40	0.76	0.50	0.61	0.42	-0.15	0.26	
Ln_SiO2	-0.14	-0.48	0.20	0.21	0.21	-0.34	0.08	-0.15	0.14	0.32	-0.01	0.28	0.10	0.09	0.22	0.18	0.13	0.14	1.00	0.56	-0.03	-0.10	0.23	0.83	0.76	0.55	0.48	0.45	0.07	0.79	0.28	0.41	0.65	-0.45	0.25	0.58	
Ln_Al	-0.15	-0.71	0.42	0.09	0.09	-0.04	0.35	-0.41	-0.11	0.87	-0.29	0.43	-0.07	-0.10	-0.12	0.15	0.09	-0.08	0.56	1.00	-0.34	0.02	-0.19	0.89	0.68	0.87	0.69	0.81	-0.30	0.56	0.42	0.50	-0.06	-0.52	-0.41	0.70	
Ln_As	0.04	0.29	-0.19	0.58	0.58	0.16	0.16	0.31	0.50	-0.52	0.57	0.48	0.56	0.59	0.51	0.56	0.53	0.64	-0.03	-0.34	1.00	0.02	0.33	-0.68	-0.71	-0.33	-0.41	-0.22	0.63	-0.47	0.48	0.20	0.31	0.73	0.03	-0.06	
Ln_B	-0.28	0.33	0.18	0.75	0.76	0.12	0.13	0.12	0.52	0.04	0.82	0.48	0.82	0.57	0.80	0.41	0.50	0.77	-0.10	0.02	0.02	1.00	0.56	-0.50	-0.33	0.09	0.02	0.30	-0.04	-0.56	0.48	0.26	0.74	-0.09	-0.29	0.30	
Ln_Ba	0.36	-0.06	0.18	0.56	0.56	0.10	0.43	0.03	0.66	-0.37	0.50	0.37	0.50	0.64	0.68	0.45	0.60	0.56	0.23	-0.19	0.33	0.56	1.00	-0.80	-0.29	-0.06	-0.02	0.20	0.21	-0.47	0.36	-0.03	0.44	0.33	0.10	0.24	
Ln_Ce	0.09	-0.83	0.75	-0.08	-0.08	0.15	0.70	0.92	-0.42	0.21	-0.70	0.38	-0.43	-0.59	-0.49	-0.01	-0.08	-0.46	0.83	0.89	-0.68	-0.50	-0.80	1.00	0.70	0.88	0.42	0.80	-0.47	0.75	0.38	0.02	0.87	-0.70	-0.89	0.80	
Ln_Co	0.14	-0.83	0.58	-0.35	-0.35	-0.35	0.51	-0.22	0.01	0.77	-0.66	-0.01	-0.52	-0.33	-0.45	-0.31	-0.45	-0.69	0.76	0.68	-0.71	-0.33	-0.29	0.70	1.00	0.59	0.82	0.93	-0.60	0.97	-0.02	-0.55	-0.12	-0.68	-0.72	0.76	
Ln_Cu	-0.01	-0.69	0.31	0.11	0.11	0.12	0.40	-0.33	0.27	0.61	-0.20	0.30	-0.03	-0.12	0.03	0.08	0.14	-0.04	0.55	0.87	-0.33	0.09	-0.06	0.88	0.59	1.00	0.52	0.64	-0.31	0.64	0.30	0.25	0.33	-0.55	0.12	0.69	
Ln_Fe	-0.10	-0.74	0.42	-0.08	-0.08	-0.47	0.22	-0.11	-0.49	0.82	-0.39	0.17	-0.22	-0.19	-0.11	-0.22	-0.21	-0.13	0.48	0.69	-0.41	0.02	-0.02	0.42	0.82	0.52	1.00	0.83	-0.30	0.80	0.16	-0.08	0.10	-0.62	-0.45	0.75	
Ln_Mn	-0.03	-0.60	0.31	0.18	0.18	-0.25	0.14	-0.07	-0.02	0.60	0.02	0.39	0.12	0.04	0.19	0.05	0.18	0.21	0.45	0.81	-0.22	0.30	0.20	0.80	0.93	0.64	0.83	1.00	-0.20	0.94	0.39	0.24	0.27	-0.55	-0.62	0.77	
Ln_Mo	0.12	0.11	-0.31	0.35	0.35	-0.03	0.08	0.28	-0.63	0.26	0.40	0.31	0.38	0.26	0.39	0.52	0.48	0.07	-0.30	0.63	-0.04	0.21	-0.47	-0.60	-0.31	-0.30	-0.20	1.00	-0.35	0.40	0.03	0.15	0.67	-0.14	-0.06		
Ln_Ni	-0.01	-0.81	0.52	-0.25	-0.25	-0.43	0.46	0.61	0.13	0.74	-0.59	0.22	-0.50	-0.41	-0.38	-0.32	-0.45	-0.40	0.79	0.56	-0.47	-0.56	-0.47	0.75	0.97	0.64	0.80	0.94	-0.35	1.00	0.21	-0.05	0.23	-0.56	-0.74	0.75	
Ln_S	0.32	-0.23	-0.10	0.89	0.88	0.15	0.19	0.46	0.74	0.08	0.53	1.00	0.74	0.83	0.67	0.91	0.76	0.76	0.28	0.42	0.48	0.48	0.36	0.38	-0.02	0.30	0.16	0.39	0.40	0.21	1.00	0.84	0.66	0.12	-0.19	0.47	
Ln_Ti	-0.31	-0.22	-0.12	0.82	0.82	-0.11	-0.19	0.16	0.29	0.30	0.39	0.83	0.58	0.53	0.58	0.73	0.37	0.50	0.41	0.50	0.20	0.26	-0.03	0.02	-0.55	0.25	-0.08	0.24	0.03	-0.05	0.84	1.00	0.33	-0.11	0.02	0.14	
Ln_Tl	0.00	-0.17	0.11	0.80	0.80	0.19	0.13	0.55	0.88	-0.28	0.52	0.65	0.65	0.54	0.77	0.59	0.61	0.61	0.65	-0.06	0.31	0.74	0.44	0.87	-0.12	0.33	0.10	0.27	0.15	0.23	0.66	0.33	1.00	-0.51	0.00	0.74	
Ln_U	0.18	0.42	-0.34	0.26	0.26	0.08	-0.12	0.16	0.36	-0.49	0.39	0.12	0.34	0.54	0.24	0.30	0.30	0.42	-0.45	-0.52	0.73	-0.09	0.33	-0.70	-0.68	-0.55	-0.62	-0.55	0.67	-0.56	0.12	-0.11	-0.51	1.00	0.21	-0.49	
Ln_V	0.08	-0.02	0.10	-0.05	-0.05	0.00	0.18	0.03	0.31	0.32	-0.12	-0.19	-0.14	0.14	0.12	-0.04	-0.18	-0.15	0.25	-0.41	0.03	-0.29	0.10	-0.89	-0.72	0.12	-0.45	-0.62	-0.14	-0.74	-0						



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



Tabla 28 Coeficientes de correlación de Pearson para los distintos parámetros en temporada de avenida para la microcuenca Crucero

	Ln_T (°C)	Ln_pH	Ln_Eh (mV)	Ln_CE (uScm)	Ln_TDS (mg/L)	Ln_OD (%Sat)	Ln_ORP (mV)	Ln_Alcalinidad (mg/L)	Ln_CO3	Ln_HCO3	Ln_F	Ln_Cl	Ln_SO4	Ln_Na	Ln_Mg	Ln_K	Ln_Ca	Ln_Sr	Ln_Li	Ln_SiO2	Ln_Al	Ln_As	Ln_B	Ln_Ba	Ln_Co	Ln_Cu	Ln_Fe	Ln_Mn	Ln_Mo	Ln_Ni	Ln_S	Ln_Ti	Ln_Tl	Ln_U	Ln_V	Ln_Zn	
Ln_T (°C)	1.00	0.29	-0.25	0.47	0.47	-0.29	-0.23	0.53	0.06	0.53	0.32	0.54	0.30	0.53	0.48	0.50	0.40	0.37	0.47	-0.10	-0.24	0.11	0.54	0.17	-0.12	0.01	-0.27	-0.11	0.22	-0.04	0.32	-0.04	-0.14	0.33	0.12	-0.26	
Ln_pH	0.29	1.00	-0.39	0.09	0.09	0.24	-0.46	0.32	0.44	0.32	-0.24	0.42	-0.15	0.27	0.14	0.21	0.07	0.14	0.24	-0.47	-0.31	0.16	0.19	0.17	-0.74	-0.68	-0.83	-0.56	0.08	-0.85	-0.15	-0.10	-0.15	0.08	0.04	-0.29	
Ln_Eh (mV)	-0.25	-0.39	1.00	0.15	0.15	0.15	0.30	0.12	0.05	0.12	-0.22	-0.15	0.22	-0.06	0.08	0.02	0.15	0.10	0.06	0.20	0.48	0.02	-0.08	-0.12	0.39	0.44	0.54	0.41	-0.36	0.46	0.20	0.30	0.30	-0.28	-0.09	0.43	
Ln_CE (uScm)	0.47	0.09	0.15	1.00	1.00	-0.15	0.05	0.77	0.32	0.77	0.60	0.69	0.88	0.88	0.90	0.88	0.90	0.88	0.98	0.08	0.11	0.57	0.65	0.29	-0.37	0.22	-0.13	0.35	0.42	0.06	0.88	0.23	0.48	0.20	-0.01	0.20	
Ln_TDS (mg/L)	0.47	0.09	0.15	1.00	1.00	-0.15	0.05	0.77	0.32	0.77	0.60	0.69	0.88	0.88	0.90	0.88	0.90	0.88	0.98	0.08	0.11	0.57	0.65	0.29	-0.37	0.22	-0.13	0.35	0.42	0.06	0.88	0.23	0.48	0.20	-0.01	0.20	
Ln_OD (%Sat)	-0.29	0.24	-0.15	-0.15	-0.15	1.00	-0.13	-0.13	-0.13	-0.48	-0.29	-0.13	-0.17	-0.10	-0.24	-0.01	-0.04	-0.32	-0.18	0.14	0.02	-0.44	0.09	-0.34	0.15	-0.59	-0.18	-0.12	-0.14	-0.13	-0.17	-0.02	-0.17	-0.06	-0.10		
Ln_ORP (mV)	-0.23	-0.46	0.98	0.05	0.05	-0.13	1.00	-0.06	0.02	-0.06	-0.06	-0.12	0.13	-0.07	-0.08	-0.09	-0.03	0.01	0.00	0.17	0.48	-0.15	0.08	-0.19	0.38	0.33	0.63	0.46	-0.41	0.49	0.12	0.26	0.29	-0.42	-0.27	0.46	
Ln_Alcalinidad (mg/L)	0.53	0.32	0.12	0.77	0.77	-0.13	-0.06	1.00	0.70	1.00	0.59	0.54	0.62	0.68	0.85	0.71	0.79	0.67	0.67	-0.17	-0.06	0.47	0.43	0.36	-0.57	0.36	-0.38	0.01	0.17	-0.17	0.62	-0.01	0.07	0.54	0.24	0.08	
Ln_CO3	0.06	0.44	0.05	0.32	0.32	-0.13	0.02	0.70	1.00	0.67	0.58	0.33	0.04	0.38	0.43	0.59	0.02	0.25	0.39	-0.55	-0.45	0.00	0.39	0.13	-0.13	0.06	-0.14	0.06	-0.32	0.27	0.05	0.00	0.37	-0.14	0.29	0.10	
Ln_HCO3	0.53	0.32	0.12	0.77	0.77	-0.13	-0.06	1.00	0.67	1.00	0.59	0.54	0.62	0.68	0.85	0.70	0.79	0.68	0.67	-0.16	-0.05	0.47	0.43	0.36	-0.57	0.36	-0.38	0.02	0.18	-0.17	0.62	0.00	0.07	0.54	0.24	0.08	
Ln_F	0.32	-0.24	-0.22	0.60	0.60	-0.48	-0.06	0.59	0.58	0.59	1.00	0.33	0.47	0.54	0.53	0.70	0.38	0.45	0.54	0.12	0.11	0.07	0.63	0.31	0.16	0.22	0.04	0.22	0.20	0.18	0.48	0.08	-0.58	0.29	0.46	0.29	
Ln_Cl	0.54	0.42	-0.15	0.69	0.69	-0.29	-0.12	0.54	0.33	0.54	0.33	1.00	0.44	0.91	0.53	0.73	0.44	0.50	0.81	-0.12	-0.32	0.53	0.64	0.29	-0.42	-0.16	-0.30	0.15	0.24	-0.20	0.46	0.10	0.24	0.06	-0.27	-0.08	
Ln_SO4	0.30	-0.15	0.22	0.88	0.88	-0.13	0.13	0.62	0.04	0.62	0.47	0.44	1.00	0.71	0.82	0.57	0.89	0.84	0.73	0.24	0.36	0.55	0.67	0.16	-0.12	0.35	0.07	0.45	0.56	0.30	1.00	0.32	0.21	0.20	-0.20	0.34	
Ln_Na	0.53	0.27	-0.06	0.88	0.88	-0.17	-0.07	0.68	0.38	0.68	0.54	0.91	0.71	1.00	0.84	0.74	0.84	0.72	0.72	0.91	-0.03	-0.07	0.54	0.90	0.26	-0.39	0.05	-0.34	0.22	0.37	-0.09	0.73	0.13	0.32	0.13	-0.15	0.04
Ln_Mg	0.48	0.14	0.08	0.90	0.90	-0.10	-0.08	0.85	0.43	0.85	0.53	0.53	0.82	0.74	1.00	0.84	0.84	0.84	0.84	-0.04	0.02	0.49	0.65	0.39	-0.35	0.13	-0.20	0.20	0.55	-0.09	0.82	0.12	0.03	0.48	0.17	0.05	
Ln_K	0.50	0.21	0.02	0.80	0.80	-0.24	-0.09	0.71	0.59	0.70	0.70	0.73	0.57	0.84	0.73	1.00	0.63	0.67	0.81	-0.09	-0.13	0.49	0.72	0.42	-0.40	0.13	-0.22	0.13	0.24	-0.05	0.59	0.21	0.31	0.23	0.08	0.07	
Ln_Ca	0.40	0.07	0.15	0.90	0.90	-0.01	-0.03	0.79	0.02	0.79	0.38	0.44	0.89	0.72	0.91	0.63	1.00	0.91	0.78	0.12	0.18	0.54	0.57	0.23	-0.40	0.26	-0.22	0.23	0.56	-0.06	0.89	0.18	0.08	0.38	0.08	0.06	
Ln_Sr	0.37	0.14	0.10	0.88	0.88	-0.04	0.01	0.67	0.25	0.68	0.45	0.80	0.84	0.72	0.84	0.67	0.91	1.00	0.88	0.09	0.13	0.58	0.62	0.33	-0.48	0.21	-0.21	0.28	0.44	0.05	0.84	0.32	0.21	0.18	0.04	0.06	
Ln_Li	0.47	0.24	0.06	0.90	0.90	-0.32	0.00	0.67	0.39	0.67	0.54	0.81	0.73	0.91	0.80	0.81	0.78	0.80	1.00	0.04	-0.12	0.57	0.84	0.26	-0.46	-0.01	-0.18	0.33	0.40	-0.07	0.74	0.23	0.27	0.23	0.04	0.00	
Ln_SiO2	-0.10	-0.47	0.20	0.08	0.08	-0.18	0.17	-0.17	-0.55	-0.16	0.12	-0.12	0.24	-0.03	-0.04	-0.09	0.12	0.09	0.04	1.00	0.44	0.04	0.01	-0.02	0.73	0.58	0.45	0.41	0.11	0.70	0.25	0.34	0.26	-0.14	0.18	0.77	
Ln_Al	-0.24	-0.81	0.48	0.11	0.11	0.14	0.48	-0.06	-0.45	-0.05	0.11	-0.32	0.36	-0.07	0.02	-0.13	0.18	0.13	-0.12	0.44	1.00	0.12	-0.03	-0.18	0.68	0.83	0.62	0.66	0.12	0.65	0.35	0.12	0.03	-0.03	-0.28	0.75	
Ln_As	0.11	0.16	0.02	0.57	0.57	0.02	-0.15	0.47	0.00	0.47	0.07	0.53	0.55	0.54	0.49	0.49	0.54	0.58	0.57	0.04	0.12	1.00	0.31	0.27	-0.56	0.52	-0.09	0.20	0.59	-0.06	0.57	0.23	0.65	0.61	-0.16	0.20	
Ln_B	0.54	0.19	-0.08	0.85	0.85	-0.44	0.08	0.43	0.39	0.43	0.63	0.84	0.67	0.90	0.65	0.72	0.57	0.62	0.84	0.01	-0.03	0.31	1.00	0.03	-0.24	0.26	-0.10	0.43	0.24	0.20	0.68	0.42	0.42	-0.01	-0.16	0.11	
Ln_Ba	0.17	0.17	-0.12	0.29	0.29	0.09	-0.19	0.36	0.13	0.36	0.31	0.29	0.16	0.26	0.39	0.42	0.23	0.33	0.26	-0.02	-0.18	0.27	0.03	1.00	-0.19	-0.10	-0.20	0.06	0.04	-0.14	0.15	0.20	-0.11	0.14	0.10	0.06	
Ln_Co	-0.12	-0.74	0.39	-0.37	-0.37	-0.34	0.38	-0.57	-0.13	-0.57	0.16	-0.42	-0.12	-0.39	-0.35	-0.40	-0.40	-0.48	-0.46	0.73	0.68	-0.56	-0.24	-0.19	1.00	0.67	0.75	0.85	-0.05	0.84	-0.12	-0.40	0.15	-0.32	-0.02	0.69	
Ln_Cu	0.01	-0.68	0.44	0.22	0.22	0.15	0.33	0.36	0.06	0.36	0.22	-0.16	0.35	0.05	0.13	0.13	0.26	0.21	-0.01	0.58	0.85	0.52	0.26	-0.10	0.67	1.00	0.58	0.49	0.37	0.72	0.36	0.06	0.46	0.08	0.25	0.83	
Ln_Fe	-0.27	-0.83	0.54	-0.13	-0.13	-0.59	0.63	-0.38	-0.14	-0.38	0.04	-0.30	0.07	-0.34	-0.20	-0.22	-0.22	-0.21	-0.18	0.45	0.62	-0.09	-0.10	-0.20	0.75	0.58	1.00	0.75	-0.18	0.70	0.05	0.07	0.12	-0.23	-0.28	0.86	
Ln_Mn	-0.11	-0.56	0.41	0.35	0.35	-0.18	0.46	0.01	0.06	0.02	0.22	0.15	0.45	0.22	0.20	0.13	0.23	0.28	0.33	0.41	0.66	0.20	0.43	0.06	0.85	0.49	0.75	1.00	0.08	0.72	0.44	0.27	0.32	-0.08	-0.27	0.75	
Ln_Mo	0.22	0.08	-0.36	0.42	0.42	-0.12	-0.41	0.17	-0.32	0.18	0.20	0.24	0.56	0.37	0.55	0.24	0.56	0.44	0.40	0.11	0.12	0.59	0.24	0.04	-0.05	0.37	-0.18	0.08	0.08	1.00	0.11	0.57	-0.07	0.07	0.63	-0.08	0.01
Ln_Ni	-0.04	-0.65	0.46	0.06	0.06	-0.14	0.49	-0.17	0.27	-0.17	0.18	-0.20	0.30	-0.09	-0.09	-0.05	-0.06	0.05	-0.07	0.70	0.65	-0.05	0.20	-0.14	0.94	0.72	0.70	0.72	0.11	1.00	0.30	-0.03	0.28	-0.26	-0.16	0.70	
Ln_S	0.32	-0.15	0.20	0.88	0.88	-0.13	0.12	0.62	0.05	0.62	0.48	0.46	1.00	0.73	0.82	0.59	0.89	0.84	0.74	0.25	0.35	0.57	0.68	0.15	-0.12	0.36	0.05	0.44	0.57	0.30	1.00	0.30	0.24	0.21	-0.18	0.35	
Ln_Ti	-0.04	-0.10	0.30	0.23	0.23	-0.17	0.26	-0.01	0.00	0.00	0.08	0.10	0.32	0.13	0.12	0.21	0.18	0.32	0.23	0.34	0.12	0.23	0.42	0.20	-0.40	0.06	0.07	0.27	-0.07	-0.03	0.30	0.88	0.20	-0.04	0.14	0.10	
Ln_Tl	-0.14	-0.15	0.30	0.48	0.48	-0.02	0.29	0.07	0.37	0.07	-0.58	0.24	0.21	0.32	0.03	0.31	0.08	0.21	0.27	0.26	0.03	0.65	0.42	-0.11	0.15	0.46	0.12	0.32	0.07	0.28	0.24	0.20	1.00	-0.71	-0.56	0.45	
Ln_U	0.33	0.08	-0.28	0.20	0.20	-0.17	-0.42	0.54	-0.14	0.54	0.29	0.06	0.20	0.13	0.48	0.23	0.38	0.18	0.23	-0.14	-0.03	0.61	0.01	0.14	-0.32	0.08	-0.23	-0.08	0.63	-0.26	0.21	-0.04	-0.71	1.00	0.25	-0.21	
Ln_V	0.12	0.04	-0.09	-0.01	-0.01	-0.06	-0.27	0.24	0.29	0.24	0.46	-0.27	-0.20	-0.15	0.17	0.08	0.08	0.04	0.04	0.18	-0.28	-0.16	-0.16	0.10	-0.02	0.25	-0.2										



6.6. ANÁLISIS CLUSTER

Se realizó un análisis cluster cuyas variables se conforman por los parámetros fisicoquímicos, elementos mayoritarios y minoritarios de las estaciones de agua subterránea y superficial tomados en la temporada de estiaje y avenida de la microcuenca Crucero.

La Tabla 29 y 30 muestra la matriz de componentes rotados lo cual permite identificar y dividir grupos a nivel de cada variable analizada para la temporada de estiaje y avenida, según los cuadros desarrollados se puede ver que existe correlaciones marcadas para el pH, CE, TDS, HCO₃, Cl, SO₄, Na, Mg, Ca, Sr, SiO₂ y B para la temporada de estiaje, mientras que las variables como CE, TDS, HCO₃, Na, Sr, B se presenta para la temporada de avenida.

Por otro lado, la Figura 112 y 113 muestra las cargas de todos los datos trabajados para ambas temporadas, donde evidencia que para la ejecución del análisis cluster se van a tener 4 grupos marcados de agrupamiento de datos, esto se puede analizar con la inclinación y/o descensos de datos donde el autovalor tienen desvíos, así mismo la línea de tendencia genera desviaciones a manera de gradas para ambas temporadas, esto confirma la conformación de grupos que se tendrá a nivel de análisis cluster y análisis de componentes principales.

Tabla 29 Matriz de Componentes Rotados, temporada de estiaje

Analitos	Matriz de componente			
	1	2	3	4
Ln_T (°C)_2015	-0.33	-0.34	0.12	0.87
Ln_pH_2015	0.89	0.14	0.23	0.38
Ln_Eh (mV)_2015	0.32	0.87	-0.34	-0.16
Ln_CE (uS/cm)_2015	0.99	-0.04	-0.11	0.06
Ln_TDS (mg/L)_2015	0.99	0.00	-0.09	0.05
Ln_OD (%Sat)_2015	-0.53	0.58	-0.20	0.58
Ln_ORP (mV)_2015	0.36	0.92	-0.09	-0.10
Ln_HCO3_2015	0.95	0.21	0.21	0.06
Ln_F_2015	-0.24	-0.13	0.96	-0.10
Ln_Cl_2015	0.98	0.17	-0.11	0.02
Ln_SO4_2015	0.81	-0.55	0.19	-0.11
Ln_Na_dis_2015	0.99	0.13	-0.02	0.01
Ln_Mg_dis_2015	0.95	-0.32	0.01	-0.03
Ln_K_dis_2015	0.98	0.18	-0.03	0.07
Ln_Ca_dis_2015	0.88	-0.46	-0.07	-0.01
Ln_Sr_dis_2015	0.95	-0.29	-0.12	0.03
Ln_SiO2_dis_2015	0.81	-0.31	-0.43	0.25
Ln_B_dis_2015	0.82	0.30	0.45	-0.19
Ln_Fe_dis_2015	0.40	0.60	0.64	0.28

Fuente: Elaboración propia.

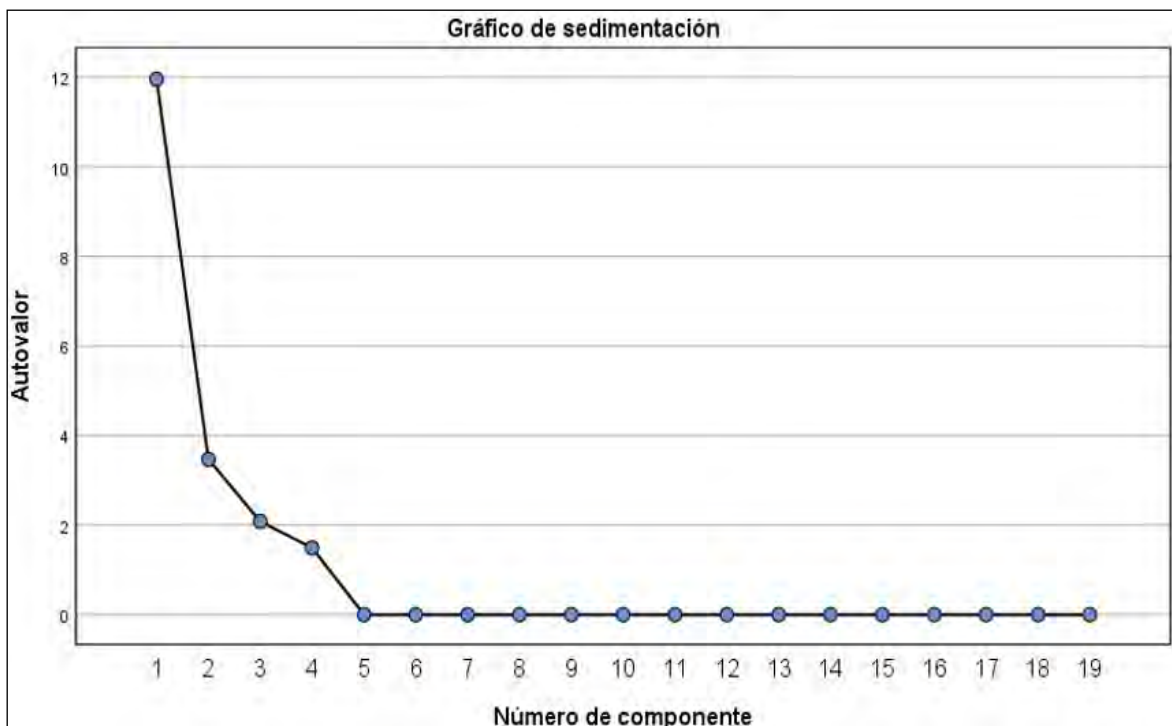


Tabla 30 Matriz de Componentes Rotados, temporada de avenida

Matriz de componente				
Analitos	Componente			
	1	2	3	4
Ln_T (°C)_2016	0.20	-0.33	0.54	0.67
Ln_pH_2016	0.73	-0.45	-0.17	-0.42
Ln_Eh (mV)_2016	0.60	-0.02	-0.70	-0.20
Ln_CE (uS/cm)_2016	0.97	0.08	0.16	0.06
Ln_TDS (mg/L)_2016	0.97	0.09	0.17	0.05
Ln_OD (%Sat)_2016	0.44	0.86	0.01	-0.11
Ln_ORP (mV)_2016	0.46	-0.07	-0.78	-0.26
Ln_HCO3_2016	0.75	-0.52	0.30	-0.10
Ln_F_2016	0.58	-0.49	0.60	-0.23
Ln_Cl_2016	0.71	-0.01	-0.64	0.12
Ln_SO4_2016	0.70	0.67	0.21	-0.02
Ln_Na_dis_2016	0.84	-0.15	-0.49	0.13
Ln_Mg_dis_2016	0.62	-0.18	0.74	-0.13
Ln_K_dis_2016	0.59	-0.80	0.08	0.00
Ln_Ca_dis_2016	0.61	0.63	0.46	-0.15
Ln_Sr_dis_2016	0.80	0.34	0.32	-0.16
Ln_SiO2_dis_2016	0.16	0.98	0.07	0.06
Ln_B_dis_2016	0.77	-0.15	-0.22	0.47
Ln_Fe_dis_2016	0.66	0.20	-0.40	0.46

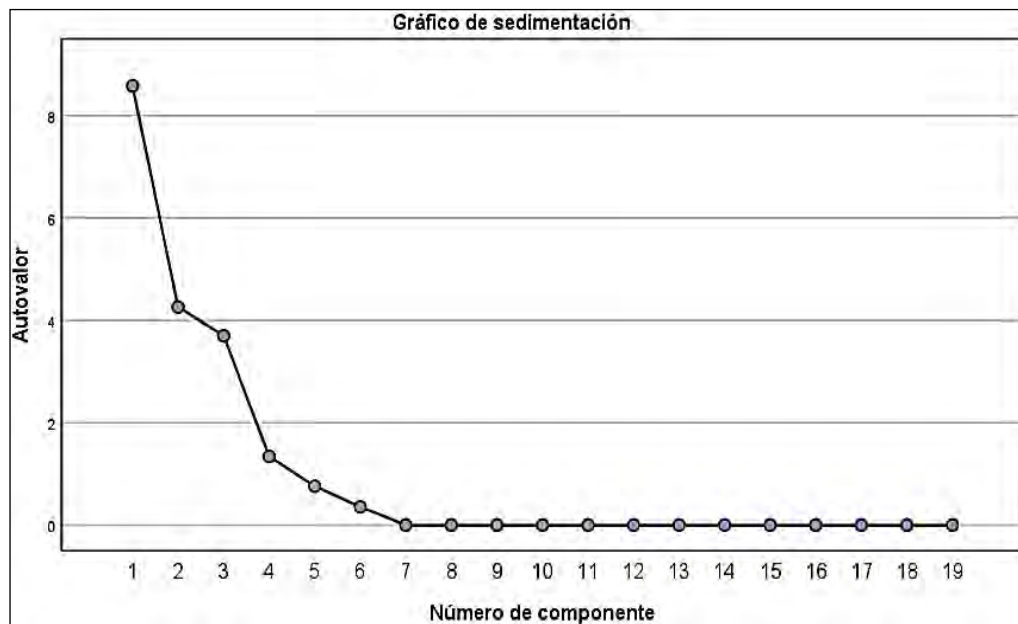
Fuente: Elaboración propia.

Figura 112 Gráfico de Sedimentación, temporada de estiaje



Fuente: Elaboración propia.

Figura 113 Gráfico de Sedimentación, temporada de estiaje



Fuente: Elaboración propia.

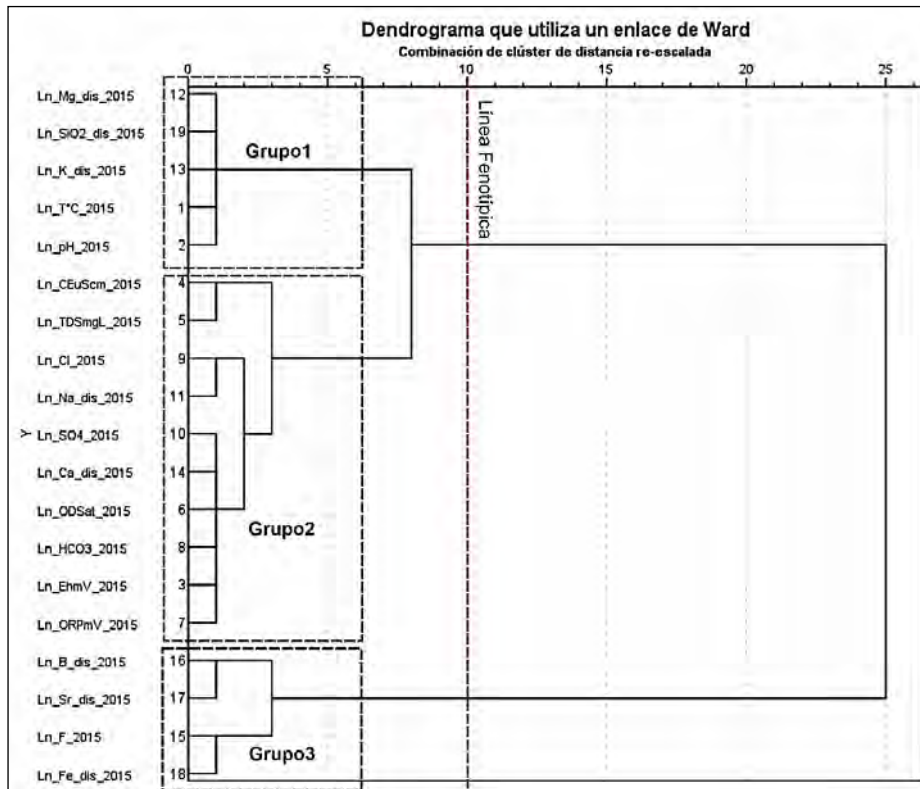
La Figura 114 presenta el gráfico de dendograma, que determina que para la temporada de estiaje se presenta tres (3) grupos definidos, a continuación, se describen:

- **Grupo 1:** Se determina que los parámetros fisicoquímicos de Temperatura y pH tienen una relación directa con los analitos de Mg, SiO₂ y K, en general pueden representar procesos de actividad antrópica, debido a las actividades de abono y fertilizantes que suma importantes concentraciones de nitrógeno y potasio, se precisa que el fósforo como elemento solvente es rápidamente movilizado del suelo y por lo que no se encuentra en este grupo analizado.
- **Grupo 2:** El parámetro de CE, TDS, OD, ORP, Eh, y los analitos como el Cl Na, SO₄, Ca, HCO₃ tienen una alta correlación y de cierta forma se puede determinar que las estaciones de agua tienen preponderancia de dichos elementos, siendo elementos constituyentes que dan la mayor mineralización del agua y este aspecto se debe a que existe una interacción del flujo subterráneo y superficial con el sustrato rocoso de la microcuenca Crucero.
- **Grupo 3:** Los analitos como el B, Sr, F y Fe tienen una asociación directa y probablemente estos analitos estén condicionados al medio volcánico y zonas de oxidación y de sulfuros.

Por otro lado, la Figura 115 referente al dendograma ejecutado en temporada de avenida expone que los parámetros fisicoquímicos y los analitos tienen la misma semejanza de correlación a nivel de los tres (3) grupos en temporada de estiaje, por lo que se concluye que existe una interdependencia de variables en ambas épocas y donde influye el basamento rocoso de naturaleza volcánica sedimentaria de unidades más recientes del Cenozoico, así mismo las secuencias de naturaleza marina del Cenozoico, donde los procesos de oxidación y reducción predominan para la incorporación y solubilidad de analitos para la microcuenca Crucero.

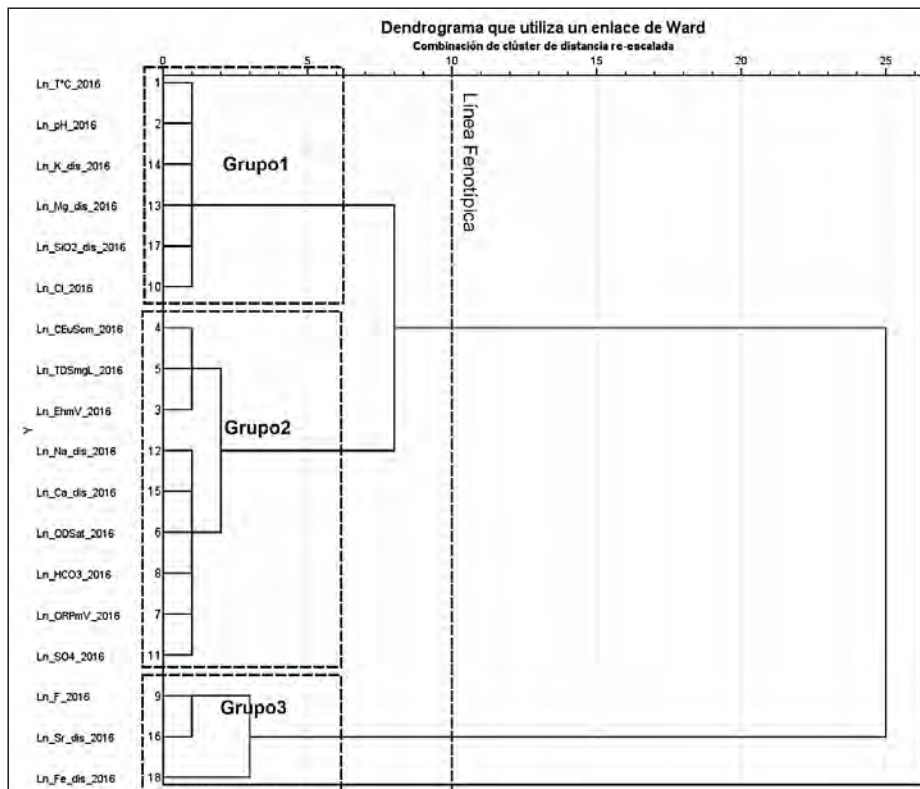


Figura 114 Gráfico de Dendrograma, temporada de estiaje



Fuente: Elaboración propia.

Figura 115 Gráfico de Dendrograma, temporada de avenida



Fuente: Elaboración propia.

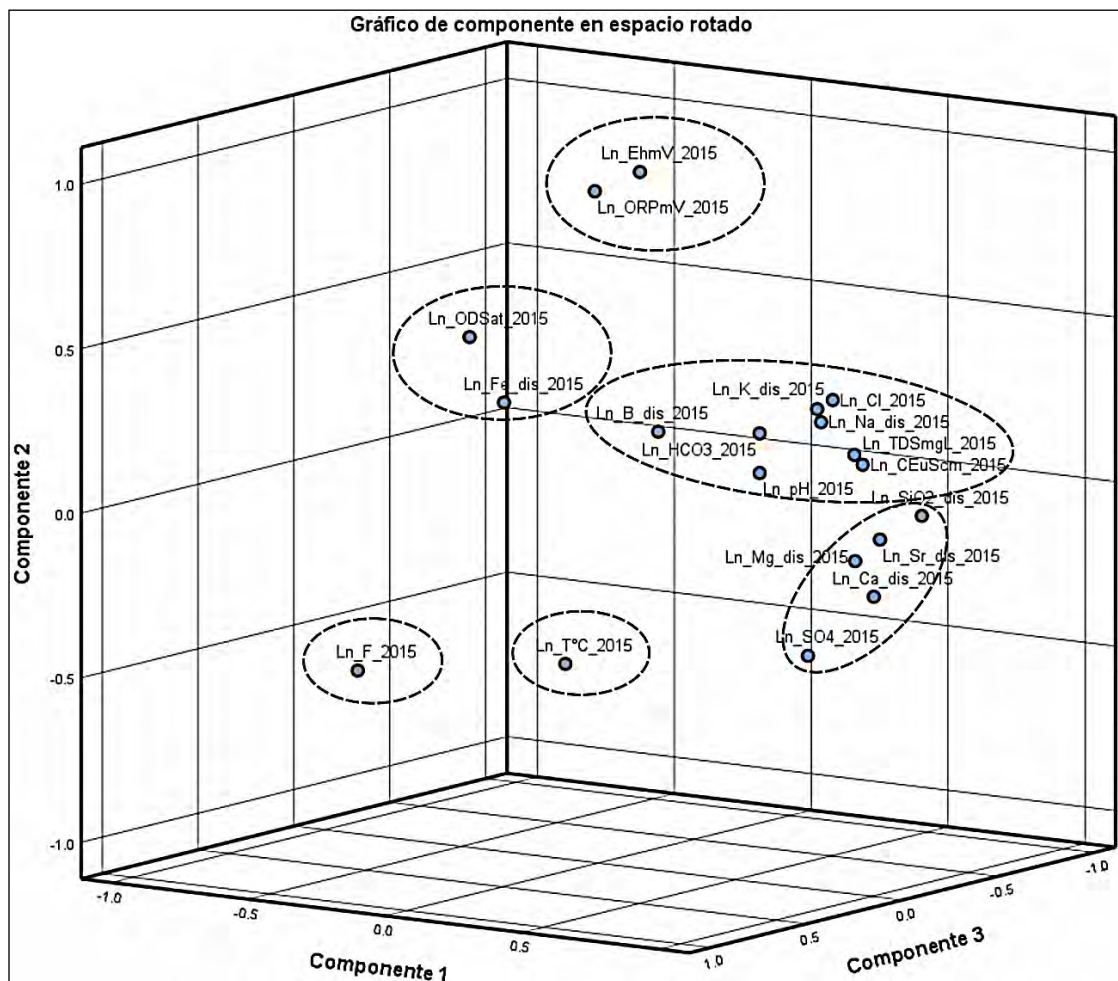


6.7. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)

La técnica de ACP se desarrolló por Pearson (1901) para luego ser retomada por Hotelling (1933), se define como técnica estadística multivariante que de forma resumida permite transformar las variables y ejecutar las correlaciones entre sí, a través de un conjunto o grupo de variables ni correlacionados y donde se denominan factores o componentes principales. Así mismo, los datos se escalan a una varianza unitaria para eliminar el efecto de las distintas unidades en las que puedan estar medidas los datos (Hervé y Williams, 2010).

En ese sentido, el ACP se ha rotado en forma ortogonal (varimax) para detallar y dar una mejor explicación de las variables a nivel de componentes principales desarrollados para la temporada de estiaje, la Figura 116 determina que las variables más correlacionadas y de forma positiva para el primer componente son las variables CE, TDS, pH, HCO₃, SO₄, Cl, Ca, Mg, Na, K, B y Sr, mientras que de forma negativa se tienen las variables como el OD, T y F. Por otro lado, el segundo componente presenta una correlación positiva las variables ORP y Eh, y en correlación negativa se tienen las variables CE, T, F, SO₄, SiO₂, Mg, Ca y Sr; finalmente se tiene que para el tercer componente se tiene que las variables como T y OD muestran una correlación positiva, mientras que se tendrá una correlación negativa las variables como Eh, ORP, SO₄, Mg, Ca, F y B.

Figura 116 Asociaciones Geoquímicas, temporada de estiaje



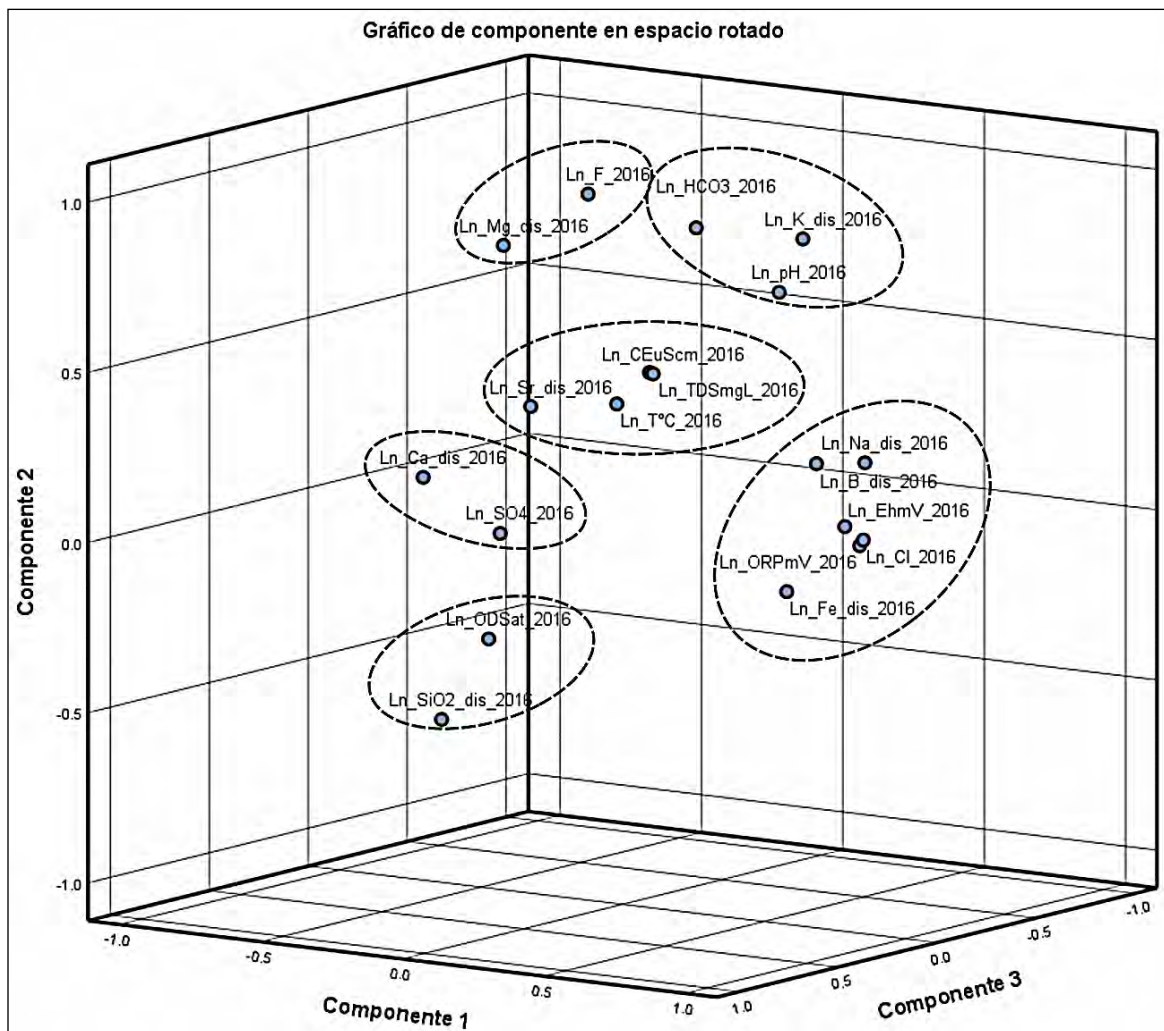
Fuente: Elaboración propia.



Por otro lado, la Figura 117 presenta las relaciones de variables para la temporada de avenida, donde el primer componente tiene variables correlacionadas positivamente como el CE, TDS, pH, Eh, HCO₃, Cl, SO₄, Na, Mg, K, Ca, F, Fe, B y Sr, no se identificó una correlación negativa con alguna variable y/o analito. Así mismo, el segundo componente presenta una correlación positiva para las variables OD, SO₄, SiO₂ y Ca, y una correlación negativa para las variables T, pH, Eh, ORP, HCO₃, F, Cl, Na, Mg, K y B, finalmente se tiene que el tercer componente presenta una correlación positiva de la variable T y Mg, mientras hay una variabilidad negativa pH, Eh, ORP, Cl, Na, B y Fe.

En general, se interpreta que la característica química del agua para las estaciones inventariadas mantiene una cierta tendencia a tener en el primer componente las CE, TDS, pH, Eh, HCO₃, Cl, SO₄, Na, Mg, K, Ca, F, Fe, B y Sr, mientras que el segundo y tercer componente tienen un similar comportamiento esto condicionado por el basamento rocoso de la microcuenca Crucero.

Figura 117 Asociaciones Geoquímicas, temporada de avenida



Fuente: Elaboración propia.



CAPÍTULO VII CONCLUSIONES

1. Determinar la hidrogeoquímica de aguas superficiales y subterráneas en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo.
 - La microcuenca Crucero presenta escurrimientos superficiales conformado por el río Crucero y cursos tributarios como el río Chaje, Yanquiri y Laramacota los cuales drenan hacia el río Ichuña e interactúan con las unidades litoestratigráficas donde los procesos de oxidación y reducción pueden generar la solubilidad de determinados minerales y en otros casos desarrollar la movilización y precipitación de elementos.
 - Las estaciones de agua subterránea y superficial inventariados en la microcuenca Crucero, muestran las siguientes facies hidroquímicas:
 - La primera facie es del tipo Bicarbonatada Cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$), corresponde aguas de infiltración que están conformadas por manantiales y ríos, provenientes altas partes altas y su recarga e interacción se relacionan a las unidades sedimentarias del Grupo Yura que aflora al sur y suroeste de la microcuenca Crucero, y en menor proporción a las secuencias volcano sedimentarias de la Formación Llallahui, Grupo Maure y Barroso.
 - La segunda facie es de tipo Sulfatada Cálcica ($\text{SO}_4\text{-Ca}$), se presenta en mayor proporción en los cursos y quebradas tributarios al río Crucero, estas aguas provienen en general de la recarga e interacción con las rocas volcano sedimentarias del Grupo Barroso y rocas intrusivas de composición andesítica ubicadas al norte y este de la microcuenca Crucero.
 - La tercera facie es de tipo Sulfatada Sódica ($\text{SO}_4\text{-Na}$), se conforman las aguas provenientes de la fuente termal Calizaya (GW-005), donde se mantiene su característica hidroquímica hacia las fuentes monitoreadas aguas abajo en el río Crucero, así mismo interactúa con las areniscas cuarzosas de la Formación Huallhuani.
 - La cuarta facie es de tipo Clorurada Sódica (Cl-Na), está conformada por las aguas provenientes de la fuente termal Jesús María (GW-035), las cuales aportan al río San Antonio y aguas abajo confluencia con el río Crucero forman el río Ichuña. Las aguas de esta facie interactúan con las rocas las rocas volcano sedimentarias del Grupo Maure.
2. Describir las características geológicas e hidrogeológicas de las unidades litológicas presentes en la microcuenca Crucero, parte alta de la cuenca del río Tambo.
 - La microcuenca Crucero presenta afloramientos rocosos del mesozoico que corresponden al Grupo Yura conformado por secuencias silicoclásticas y carbonatadas propias de un ambiente marino, sobreyaciendo casi concordante se tienen las unidades cenozoicas del Grupo Puno; formaciones Pichu, Capillune, Sencca y Llallahui, y Grupo Maure y Barroso, estas presentan litologías predominantes como lavas y cenizas volcánicas, aglomerados, areniscas tobáceas y conglomerados los cuales se relacionan a ambientes deposicionales del tipo fluvial, aluvial, lagunas y volcánico.
 - La distribución de las unidades hidrogeológicas en la microcuenca Crucero, define la siguiente distribución:
 - En primer lugar, se conforman acuíferos origen volcánico, estos representan un 33 % del área total y se encuentran ubicados en mayor proporción al noreste de la



microcuenca Crucero, relacionado principalmente a las unidades geológicas del Grupo Maure, la Formación Pichu y el estratovolcán San Miguel.

- En segundo lugar, se tienen los acuíferos fisurados de origen sedimentario donde representan el 15 % del área total, se ubican al suroeste de la microcuenca Crucero y se constituyen por las unidades del Grupo Yura.
- En tercer lugar, se exponen los acuíferos porosos no consolidados con un 7 %, estos materiales se conforman por los depósitos cuaternarios.
- Finalmente, se tienen como rocas impermeables conformado por los acuitardos volcánicos y volcano sedimentarios, constituyen un 54 % del área total de la microcuenca Crucero.

3. Definir el comportamiento fisicoquímico y distribución hidrogeoquímica de las aguas superficiales y subterráneas en la microcuenca Crucero.

- Las aguas por efectos de precipitación que no llegan a escurrir por cursos, se percolan e infiltran por el terreno desarrollando un tiempos de residencia en los afloramiento rocosos y materiales superficiales dispuestos lo cual generará procesos químicos de precipitación, disolución, absorción, intercambio catiónico y reacciones redox que permiten desarrollar disociaciones de elementos en minerales que conforman el basamento rocoso, esto pueden conllevar a producir drenaje ácido de roca asociado a determinados sulfuros como la pirita, reducción del sulfato, nitrificación aeróbica, entre otros casos.
- Se determina que el sistema de flujo de agua subterránea predominante en la microcuenca Crucero es del tipo local, condicionado a zona de recarga durante procesos de precipitación local, mientras que en menor proporción se tienen estaciones que se relacionan a flujos regionales, esto conlleva a condicionarse para las estaciones de agua ligadas a la fuente termal Calazaya y Jesús María.

4. Identificar la variación de concentración de los elementos traza que presentan las aguas superficiales y subterráneas en la microcuenca Crucero.

- Los materiales pre existentes en el área de estudio se infiere que los afloramientos rocosos del Grupo Yura que interactúa con flujos de aguas superficial y subsuperficial que origina procesos químicos que desarrollan disolución y precipitación de elementos, por lo que se interpreta que la composición química del agua tendrá predominancia de iones SO_4^- , CO_3H^- , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Cl^- , Fe^{++} y S^- . Así mismo, las formaciones cenozoicas conformadas por el Grupo Puno, Formación Pichu, Capillune, Sencca y Lllallhui; Grupo Maure y Barroso los flujos de agua tendrán iones predominantes confirmados por CO_3H^- , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ y SiO_2 . Finalmente, las ocurrencias mineralizantes y alteraciones hidrotermales, así como la actividad antrópica en el área de estudio dará como resultado elevadas concentraciones de elementos traza como Br^- , S , S^- , $\text{PO}_4\text{-3}$, BO_3H_2^- , NO_2^- , OH^- , I^- , Fe^{+++} , Mn^{++} , NH_4^+ , H^+ , Al^{+++} y metales como As, Sb, Cr, Pb, Cu, Zn, Ba, V, Hg, U y otros.



CAPÍTULO VIII RECOMENDACIONES

- Realizar el monitoreo de las diferentes fuentes inventariadas para llevar un registro de las variaciones y fluctuaciones de los parámetros fisicoquímicos de las aguas subterráneas y superficiales en la microcuenca Crucero.
- Realizar un análisis de isotópicos conformado por deuterio (δD) y oxígeno 18 (δ^{18}), los cuales nos ayudaran a determinar el origen y zona de recarga del agua subterránea y superficial, así como el tiempo permanencia en el acuífero.
- Realizar estudios geofísicos como sondeos eléctricos verticales (SEV), tomografía eléctrica y métodos magnetotelúricos, con el objetivo de dimensionar el reservorio geotermal en las zonas geotermales de Jesús María y Calazaya, este aspecto relacionado al aprovechamiento geotermal para generación de energía eléctrica y uso doméstico (baño termal).
- Realizar estudios de hidrogeoquímica detallados a nivel de proyectos mineros, que evalúen el comportamiento de las aguas subterráneas y superficiales a lo largo cuencas, subcuencas y microcuencas hidrográficas, con el fin de establecer una Línea Base Geoambiental y de esa forma sustentar con rigor técnico las condiciones del agua y su relación con el contexto litoestratigráfico.



CAPÍTULO IX BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, P., Santos, P., & Castaño, S. (2006). Fundamentos de hidrogeología. Mundi-Prensa Libros.
- Amaya Arévalo, A. J. (2015). Evaluación hidrogeoquímica e hidroquímica de la subcuenca del río Aranchacal (Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador).
- ANA. (2015). Actualización de Unidades Hidrográficas y Codificación de Fuentes de Agua Superficial en Ámbitos de Administraciones Locales de Agua. Lima: Ministerio de Agricultura y Riego.
- ANA. (2015). Actualización de Unidades Hidrográficas y Codificación de Fuentes de Agua Superficial en Ámbitos de Administraciones Locales de Agua. Lima: Ministerio de Agricultura y Riego.
- Benavente, C., Delgado, F., García, B., Aguirre, E., & Audin, L. (2018). Neotectónica, evolución del relieve y peligro sísmico en la región Arequipa. Lima, Perú: INGEMMET.
- Benavides, V. (1962). Estratigrafía pre-terciaria de la región de Arequipa. Lima: Boletín de la Sociedad geológica del Perú.
- Bustamante Ibañez, E. A. (2017). Identificación de procesos hidrogeoquímicos aplicando modelación inversa en el acuífero Soconusco, Chiapas (Master's thesis).
- Carlotto, V., Jaillard, E., Carlier, G., Cárdenas, J., Cerpa, L., Flores, T., . . . Ibarra, I. (2005). Las Cuenas Terciarias Sinorogénicas en el Altiplano y en la Cordillera Occidental del Sur del Perú. Sociedad Geológica del Perú, 6, 103-126.
- Carpio, J. (2013). Estudio Hidrogeológico de la cuenca del río Tambo - en los Departamentos Arequipa, Moquegua y Puno. Arequipa: UNSA.
- Carrasco Viza, S. R. (2002). Características petrográficas y geoquímicas del Grupo Barroso en los cuadrantes III y IV del cuadrángulo de Ichuña (33 u). UNSA, Arequipa.
- Cereceda, C., Vásquez, S., Maquera, V., Chapilliquen, P., García, A., Santos, B., & NG, W. (2016). Fuentes naturales de drenaje ácido: cuenca del río Tambo (Puno – Moquegua). XVIII Congreso Peruano de Geología.
- Cerpa, L., & Meza, P. (2001). Las cuencas neógenas del sur del Perú, la Cuenca Descanso-Yauri (Mioceno): evolución sedimentológica y tectónica. Cusco: Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.
- Cerpa, L., Cereceda, C., Torres, D. M., Aguilar, R., Martínez, J., Siesquen, D., & Chacon, A. (2012). Controles Tectono-Magmáticos en el Sur del Perú (72°-70°30'W). Implicancias metalogenéticas. XVI Congreso Peruano de Geología, 23-26.
- Chapilliquén, P., Maquera, V., & Cereceda, C. (2016). Caracterización litogeoquímica de las rocas Mesozoicas del Grupo Yura – Cuenca del río Tambo – Moquegua. XVIII Congreso Peruano de Geología.
- Collins, W. (1923). Graphic representation of water analyses (Vol. 15). Indust. and Chemistry.
- Colombia, U. N. (12 de diciembre de 2017). Curso Virtual de Acueductos y Alcantarillado. Obtenido de http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_5/Pages/captacion_subterranas.htm
- Condori Quispe, E. (2016). Evaluación hidrogeológica de la microcuenca Mariño - Apurímac. Puno.



- Copa Huayhua, S. B., & Roque Quico, K. R. (2016). Caracterización hidroquímica e hidrodinámica del manantial de la Quebrada de Huayunca y su potabilización en el distrito de Uñon provincia de Castilla.
- Copa Huayhua, S. B., & Roque Quico, K. R. (2016). Caracterización hidroquímica e hidrodinámica del manantial de la Quebrada de Huayunca y su potabilización en el distrito de Uñon provincia de Castilla. Arequipa: UNSA.
- Cuellar Bohorquez, F. (2001). Estratigrafía, Sedimentología y Tectónica de las Series Meso-Cenozoicas del cuadrángulo de Pichacani (33-v), cuadrante II (SE), Sur del Perú. UNSAAC, Cusco.
- Cuellar, F. (2011). Estratigrafía, Sedimentología y Tectónica de las Series Meso-Cenozoicas del cuadrángulo de Pichacani. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Custodio, E., & Llamas, M. (1976). Hidrología subterránea (Vol. 1). Barcelona: Omega.
- Custodio, E., & Llamas, M. (1996). Hidrología subterránea. Barcelona: Omega.
- Davis, S. N. (1969). Porosity and Permeability in natural materials. (A. Press, Ed.) Flow through porous, 53-89.
- Deutsch, W. (1997). Groundwater Geochemistry, Fundamentals and Applications to Contamination.
- DUPUIT, J. (1863). Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables. 2ème édition. Dunod. Paris.
- FCIHS. (2009). Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea. (C. D. Subterránea, Ed.) Barcelona, España: Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea.
- García, A. (2017). Litogeoquímica y Petrografía de la Formación Pichu en la parte alta de la cuenca del río Tambo (Moquegua-Puno, Sur del Perú). Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- García, W. (1978). Geología de los cuadrángulos de Puquina, Omate, Huaitire, Mazo Cruz y Pizacona, hojas 34-t, 34-u, 34-x, 34-y. Lima: INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional.
- HANTUSH, M.S. (1964). «Hydraulics of wells». Advances in Hydroscience. Ven Te Chow. Academic Press. 1: 281-432.
- HANTUSH, M.S. (1964). «Hydraulics of wells». Advances in Hydroscience. Ven Te Chow. Academic Press. 1: 281-432.
- Henao, S. (1988). Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Bogota, Colombia: Universidad Santo Tomás, Centro de enseñanza desescolarizada.
- Hennig, D. (2005). Geology and geochemistry of the Cerro Millo gold prospect, southern Peru. Institute of Mineralogy and Mineral Resources Technical University of Clausthal.
- Hennig, D., Lehmann, B., Burgess, R., & Nekouvaght, Mohammad Ali Tak. (2008). Geology, geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the Cerro Millo epithermal high-sulfidation gold prospect, southern Peru. Ore Geology Reviews, 304-316.
- Hergt, T. (2009). Diseño optimizado de redes de monitoreo de la calidad del agua de los sistemas de flujo subterráneo en el acuífero 2411" San Luis Potosí": hacia un manejo sustentable. San Luis Potosí.
- Hermoza, W. (2005). Dinámica tectono-sedimentaria y restauración secuencial de la cuenca de antepais de los Andes Centrales. Universidad Paul Sabatier Toulouse III.
- Herrera Lameli, C. (2001). Caracterización hidrogeoquímica del macizo de Betancuria. Fuerteventura, Archipiélago de Canarias. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Holdridge, L. R. (1987). Ecología basada en zonas de vida (Vol. 83). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura – IICA.



- Hotelling, H. (1936). Simplified calculation of principal components. *Psychometrika*, 1(1), 27-35.
- Hubbert, M. (1940). The Theory of groundwater motion. *Jour. Geology*, 48, 785-944.
- Jenks, W. (1948). Geología de la hoja de Arequipa al 200,000. Lima: INGEMMET.
- Jolliffe, I. T. (2002). Principal component analysis and factor analysis. *Principal component analysis*, 150-166.
- Kehew, A. E. (2001). *Applied Chemical Hydrogeology*. Prentice. Hall.
- Kresic, N. (2009). *Groundwater Resources: sustainability, Management and Restoration*. New York: McGraw-Hill.
- León, I. (1981). Antecedentes sedimentológicos del Jurásico Cretácico Inferior en la Zona de Yura. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Lillo, J. (8 de Diciembre de 2013). Técnicas Hidrogeoquímicas. Obtenido de www.escet.urjc.es/~jlillo/Tecnicas_Hidrogeoquimicas.pdf
- Lipa, V., Valdivia, W., & Carrasco, S. (2001). Memoria explicativa de la revisión geológica del cuadrángulo de Ichuña (33-u). Lima: INGEMMET.
- Leyva Suárez, E., Zamarrón, H., & del Socorro, G. (2010). Acuíferos semiconfinados y su modelación: Aplicaciones al acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México. Master. Mexico, DF.
- Maderey, L. (2005). Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Marocco, R., & Del Pino, M. (1966). Geología del Cuadrángulo de Ichuña (hoja 33-u). Boletín, INGEMMET, Moquegua.
- Marocco, R., & Del Pino, M. (1966). Geología del Cuadrángulo de Ichuña (hoja 33-u). Lima: INGEMMET.
- Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P., & Castaño Castaño, S. (2005). *Fundamentos de Hidrogeología*. Barcelona: Mundi-Prensa.
- Martinod, J., Husson, I., Roperch, P., Guillaume, B., & Espurt, N. (2010). Horizontal subduction zones, convergence velocity and the building of the Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, 299-309.
- Mazor, M., & Pettitt, B. (1991). Convergence of the chemical potential in aqueous simulations (Vol. 6). *Molecular simulation*.
- Mendivil, S. (1965). Geología de los cuadrángulos de maure y antajave (hojas 35-x, 35-y). Lima: INGEMMET.
- MINAM. (2015). Mapa nacional de cobertura vegetal : memoria descriptiva. Lima: Ministerio del Ambiente, Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural.
- Miranda, R. (2015). Análisis multivariable de alteraciones. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Nuñez, S. (2018). Estudio de riesgos geológicos de la cuenca Tambo - Preliminar. Lima: INGEMMET.
- Peña, F., Sánchez, M., & Pari, W. (2010). hidrogeología de la cuenca del río Ica (Regiones Ica y Huancavelica) (Boletín, Serie H: Hidrogeología ed.). Lima: INGEMMET.
- Peñuela Arévalo, L. A. (2007). Proceso de recarga-descarga de agua subterránea en zonas receptoras de pago por servicio ambiental hidrológico, Sierras Nevada y Las Cruces-México (Vol. Doctoral dissertation). (T. d. Maestría, Ed.) Mexico: UNAM.
- Peyton, G. R. (1986). Effective porosity of geologic material. (EPA, Ed.) *Proceedings of the 12th Annual Research Symposium*, 21-28.



- Piper, A. (1994). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Am. Geophys. Union. Trans.*, 25, 914-943.
- Prado Pérez, A. (2011). El Sistema Termal de Alicún de las Torres (Granada) como Análogo Natural de Escape de CO₂ en Forma de DIC: implicaciones paleoclimáticas y como Sumidero de CO₂.
- Quispesivana, L., & Zapata, A. (2000). Memoria descriptiva de la geología del cuadrángulo de omate (34-u). Lima: INGEMMET.
- Remigio, F. (2012). Domos, diatremas y piroclastos del complejo volcánico Chucapaca, evidencias de sistemas epitermales (Tesis de Grado ed.). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Remigio, F. (2012). Domos, diatremas y piroclastos del Complejo Volcánico Chucapaca, evidencias de sistemas epitermales. UNI, Lima.
- Rodríguez, R., Cuellar, F., Loza, M., Palomino, F., & Valdivia, E. (2002). Descripciones del relleno Oligoceno-Mioceno entre las cuencas Tincopalca y Huacochullo, borde oriental de la Cordillera Occidental entre los departamentos de Puno y Arequipa. *Congreso Peruano de Geología*, 11.
- Sander, L. (1998). A manual of field hydrogeology. Prentice-Hall.
- Schoeller, H. (1995). *Geochimie des eaux souterraines* (Vol. 10). Revue de l'Institut Français du pétrole.
- SENAMHI. (06 de agosto de 2018). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Obtenido de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- Shilomanov, I. A. (1997). Comprehensive assessment of the freshwater resources of the World. World Meteorological Organization.
- Simkin, T., Unger, J. D., Tilling, R. I., Vogt, P. R., & Spall, H. (1994). This dynamic planet. World map of volcanoes, earthquakes, impact craters and plate tectonics.
- Stiff, H. (1951). The interpretation of Chemical water analysis by means of patterns (Vol. 3). *Jour. Petroleum Technology*.
- Strahler, A. N., & Strahler, A. H. (1969). *Geografía física*. Barcelona, España: Ediciones OMEGA S.A.
- Struckmeier, W. F., & Margat, J. (1995). *Hydrogeological maps: a guide and a standard*. Hannover: International Association of Hydrogeologists, International.
- Schoeller, H. (1955). «Geochimie des eaux souterraines». *Revue de l'Institut Français du pétrole*, 10: 230-244.
- Schoeller, H. (1962). *Les eaux souterraines*. Paris: Masson and Cie.
- Torres, D., Cerpa, L., Muñoz, L., & Carlotto, V. (2010). Evolución Tectónica-Estructural de una cuenca intramontañosa transpresiva: la cuenca Condoroma, Arequipa, Sur del Perú. *XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes*, 822-825.
- Tóth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J Geoph Res*, 68(16), 4795-4812.
- Tóth, J. (1970). A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. *Journal of Hydrology*, 164-176.
- Tóth, J. (1995). Hydraulic continuity in large sedimentary basins. *Hydrogeology Journal*, 3(4), 4-17.
- Tóth, J. (1999). Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology journal*, 1-14.
- Tóth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. (Vol. 111). Madrid: Boletín Geológico y Minero; Instituto Geológico y Minero de España.



- Tupak Obando, R. (2010). Fundamentos y métodos de la hidrogeología. Obtenido de Monografias.com: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf4/fundamentos-metodos-hidrogeologia/>
- Thornthwaite, C.W. (1948). «An approach toward a rational classification of climate». *Geologic. Rev.*, 38: 55-94.
- Thornthwaite, C.W. y WILMS, H.G. (1944). Report of the Committee on Transpiration and Evaporation. *American Geophys. Union.* 25(5): 683-693.
- TURC, L. (1961). «Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle. (Formule climatique simplifiée et mise à jour)». *Ann Agron.*, 12(1): 13-49.
- Vaca, A. (2016). Estudio para la Reactivación de Pozos Inactivos que Presentan Problemas Mecánicos en el Campo Alfa. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
- Valdivia, E., & Rodríguez, R. (2003). Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de lagunillas (32-u), escala 1:100 000. Lima: INGEMMET.
- Vargas Rodríguez, L., Perez Tarrillo, V., Castañeda Salazar, D., Tacuche López, E., Pajares Terrones, C., Aguilar Julca, P., . . . Vargas Guevara, J. (2017). Prospección Geoquímica de Segunda Fase en la Cuenca Tambo: Subcuencas Medio Tambo, Coralaque, Medio Alto Tambo, Ichuña y Alto Tambo. *Boletín B: Geología Económica, INGEMMET.*
- Vázquez Suñé, E., & Ayora Ibáñez, C. (2014). Hidroquímica aplicada a la hidrogeología. (pág. 136). Chile: AIH - GHS.
- Vásquez, R. (2009). Distribución de Tierras Raras y otros elementos traza en la franja Polimetálica 9°-10°S del Perú Central. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Vicente, J.-C., Sequeiros Paredes, F. S., Valdivia, M. A., & Zavala, J. (Junio de 1979). El sobre-escurrimiento de Cincha-Lluta: elemento del accidente mayor andino al NW de Arequipa. *IV Congreso Peruano de Geología(61)*, 67-99.
- Wasteneys, H. A. (1990). Epithermal silver mineralization associated with a mid-Tertiary diatreme: Santa Bárbara, Santa Lucía district, Puno, Peru. Kingston, Ontario, Canada: Queen's University.
- Pearson, K. (1901). Principal components analysis. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 6(2), 559.
- Ruiz, C. Y. (2012). Aplicación del análisis de componentes principales como técnica para obtener índices sintéticos de calidad ambiental. *UCV-Scientia*, 4(2), 145-153.
- Zavaleta, A. D. G. (2018). Litoestratigrafía de la formación Pichu en la parte alta de la cuenca del río Tambo (Moquegua-Puno, sur del Perú) (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Mayor de San Marcos).
- Zarate Olaya, B. Y. (2023). Influencia del contexto geológico en la calidad del agua superficial: caso reserva nacional de Tumbes, Tumbes 2022.



ANEXOS



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



Anexo 1 Inventario de estaciones de agua subterránea y superficial en temporada de estiaje

N°	Código	Nombre completo	Fecha	Hora	Norte	Este	Cota	Lugar	Vertiente	Cuenca	Subcuenca	Microcuenca	Tipo de Fuente	Clase
1	13188-15-GW-001	Manantial Patty	13/09/2015	09:44	8186623	346025	4528	Patty	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
2	13188-15-GW-002	Manantial Sorocucho	13/09/2015	14:30	8186050	350364	4436	Sarocucho-Jacumarini	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
3	13188-15-GW-003	Manantial Collantane pujo	13/09/2015	15:49	8188846	352786	4475	Callantani	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
4	13188-15-GW-004	Manantial Sayhuani	14/09/2015	15:30	8192208	350981	4374	Huertani	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
5	13188-15-GW-005	Manantial Baño Termal de Calazaya	15/09/2015	09:06	8191845	347771	4382	Calazaya	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Termal
6	13188-15-GW-007	Manantial Laurajano	16/09/2015	15:00	8200995	345366	4180	Laurajani	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial captado
7	13188-15-GW-008	Manantial Cerro Pampa	16/09/2015	16:40	8196925	344007	4450	Qda. Condorani	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
8	13188-15-GW-009	Manantial Pujucucho	16/09/2015	08:40	8195182	347837	4268	Llusta	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
9	13188-15-GW-011	Manantial Ccaccopunco	18/09/2015	10:25	8193458	337870	4590	Patoqueña	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
10	13188-15-GW-012	Manantial Rumihuasi	18/09/2015	11:40	8194037	339978	4655	Pillicone	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
11	13188-15-GW-014	Manantial Oquellacle Chaqui	19/09/2015	11:25	8201168	342545	4205	Canchapampa	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
12	13188-15-GW-018	Manantial Apacheta cucho	20/09/2015	08:10	8203641	336113	4765	Apacheta cacho	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
13	13188-15-GW-019	Manantial Pitine Pujio	21/09/2015	10:45	8202227	353206	4834	Chiuchine	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
14	13188-15-GW-020	Manantial Pujú Cucho	21/09/2015	13:30	8201862	351540	4670	Ajullina	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
15	13188-15-GW-007	Río San Antonio	25/09/2015	13:30	8214437	343398	3855	Jesús María	Pacífico	Tambo	Ichuña	San Antonio	Agua superficial	Río
16	13188-15-SW-045	Qda. Canchitayo	20/09/2015	09:00	8205587	338980	4550	Canchitayoc	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
17	13188-15-SW-046	Qda. Pallca	19/09/2015	09:15	8195855	338328	4458	Pillconi-Chaje	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
18	13188-15-SW-047	Qda. Huarincunca	24/09/2015	12:09	8213710	342824	3861	Crucero	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
19	13188-15-SW-048	Qda. Chahuana	24/09/2015	09:52	8210301	344527	3960	Chalhuana	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
20	13188-15-SW-049	Río Chaje	19/09/2015	10:20	8198400	340492	4325	Chaje	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
21	13188-15-SW-050	Qda. Potosimayo	20/09/2015	10:20	8205292	340440	4480	Challhuane	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
22	13188-15-SW-051	Qda. Tapioca	22/09/2015	10:00	8206575	352256	4527	Tapioca	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
23	13188-15-SW-052	Río Crucero	24/09/2015	10:57	8213529	343474	3875	Crucero	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
24	13188-15-SW-053	Qda. Pachacahua	22/09/2015	14:10	8206019	350518	4458	Kakalaya	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
25	13188-15-SW-054	Río Chaje	17/09/2015	11:05	8201470	342727	4193	Mal paso	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
26	13188-15-SW-055	Río Liuchue	23/09/2015	10:45	8206559	345641	4079	Liuchune	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
27	13188-15-SW-056	Qda. Taipana	19/09/2015	12:50	8204045	344682	4135	Tapinaca	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
28	13188-15-SW-057	Qda. Huanacamaya	30/09/2015	12:00	8208917	341190	4348	Huanacamaya	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
29	13188-15-SW-058	Río Crucero	24/09/2015	08:20	8209222	345050	3968	Ayoma	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
30	13188-15-SW-059	Qda. Ancoascata	22/09/2015	12:45	8207117	348788	4350	Ancoascata 2	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
31	13188-15-SW-060	Qda. Anjuascata	22/09/2015	11:50	8207008	348959	4329	Anjuascata	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
32	13188-15-SW-061	Río Collpapampa	19/09/2015	14:15	8204756	345780	4080	Collpapampa-Cotari	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
33	13188-15-SW-062	Qda. Huchuyoceta	17/09/2015	12:00	8202970	344534	4135	Cruz Coaca-Ichuña	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
34	13188-15-SW-064	Río Salvianipampa	23/09/2015	11:57	8207273	345461	4024	Salvianipampa	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
35	13188-15-SW-065	Qda. Condorioc	16/09/2015	14:30	8199248	344995	4193	Mayuhuasi	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
36	13188-15-SW-068	Qda. Cochampa	13/09/2015	10:30	8187041	347618	4422	Jucumarine	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
37	13188-15-SW-069	Qda. Coramcota	14/09/2015	10:00	8190707	352628	4420	Callantani	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
38	13188-15-SW-070	Qda. Huanune	21/09/2015	11:40	8201242	353289	4622	Llanquiri/ Huanune	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
39	13188-15-SW-070A	Qda. Vilapacheta	23/09/2015	09:40	8205227	345890	4083	Pampa Vilapacheta	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
40	13188-15-SW-071	Río Jucumarine	15/09/2015	14:00	8195770	347352	4254	Llusta	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
41	13188-15-SW-072	Qda. Calazaya	15/09/2015	10:02	8193805	348214	4313	Calazaya	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
42	13188-15-SW-073	Río Alto tambo	17/09/2015	14:00	8202836	345125	4130	Sector Callpa	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
43	13188-15-SW-074	Qda. Halactaña	21/09/2015	14:45	8200292	350196	4505	Halactaña/Erucchure	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
44	13188-15-SW-075	Qda. Soncoyane	16/09/2015	10:00	8197475	346636	4236	Qda. Soncoyane	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
45	13188-15-SW-076	Río Llusta	15/09/2015	12:30	8193900	349328	4319	Río Llusta, Huacullune	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
46	13188-15-SW-077	Qda. Llanqueri	16/09/2015	12:30	8199333	345731	4204	Qda. Llanqueri	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
47	13188-15-SW-078	Río Jucumarine	15/09/2015	11:00	8193681	349168	4305	Jucumarine	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
48	13188-15-SW-079	Qda. Huachune	14/09/2015	15:49	8191597	351295	4368	Huachune	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
49	13188-15-SW-080	Río Jucumarine	16/09/2015	11:10	8198969	346028	4190	Sector Condorioc	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



50	13188-15-SW-081	Qda. Patilloda	15/09/2015	15:30	8196135	346712	4278	Qda. Patilloda	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
51	13188-15-SW-083	Qda. Piscota	14/09/2015	11:42	8191316	351216	4327	Qda. Piscota	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
52	13188-15-SW-120	Río Ichuña	29/09/2015	08:50	8214646	341145	3828	Mucurina	Pacífico	Tambo	Ichuña	Ichuña	Agua superficial	Río

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2 Inventario de estaciones de agua subterránea y superficial en temporada de avenida

N°	Código	Nombre completo	Fecha	Hora	Norte	Este	Cota	Lugar	Vertiente	Cuenca	Subcuenca	Microcuenca	Tipo de Fuente	Clase
1	13188-16-GW-001	Manantial Patty	06/05/2016	12:30	8186623	346025	4528	Jucumarine	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
2	13188-16-GW-002	Manantial Amani	06/05/2016	16:00	8186050	350364	4436	Jucumarine	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
3	13188-16-GW-003	Manantial Collantane pujo	09/05/2016	09:30	8188846	352786	4475	Huaychujay	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
4	13188-16-GW-004	Manantial Sayhuani	09/05/2016	14:00	8192208	350981	4374	Huachune	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
5	13188-16-GW-005	Termal Calazaya	04/05/2016	11:20	8191843	347771	4382	Calazaya	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Termal
6	13188-16-GW-007	Manantial Jatum Pampa	05/05/2016	16:30	8200995	345366	4180	Jatum Pampa	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial captado
7	13188-16-GW-008	Manantial Otoroncani	12/05/2016	14:00	8196925	344007	4450	C. Chaje	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
8	13188-16-GW-009	Manantial Collpapampa	12/05/2016	09:20	8195182	347837	4268	C. Condorani	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
9	13188-16-GW-012	Manantial Rumihuasi	03/05/2016	12:00	8194037	339978	4655	Rumihuasi	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
10	13188-16-GW-014	Manantial Quelloclla Chaqui	03/05/2016	15:00	8201168	342545	4205	Cruz Ccaca	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
11	13188-16-GW-018	Manantial Señorahoc	28/04/2016	11:30	8203641	336113	4765	Apacheta cacho	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
12	13188-16-GW-019	Manantial Pitine pujo	09/05/2016	11:30	8202203	353198	4822	Chiuchine	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
13	13188-16-GW-020	Manantial Pujucucho	09/05/2016	10:00	8201843	351517	4671	Ajullina	Pacífico	Tambo	Ichuña	Ichuña	Agua subterránea	Manantial
14	13188-16-GW-051	Manantial Cuchuchune	18/05/2015	10:10	8188426	348895	4445	Jucumarine	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua subterránea	Manantial
15	13188-16-SW-007	Río San Antonio	05/05/2016	11:20	8214465	343436	3872	Jesús María	Pacífico	Tambo	Ichuña	San Antonio	Agua superficial	Río
16	13188-16-SW-045	Qda. Huancamayoc	28/04/2016	12:40	8205587	338980	4550	Huancamayoc	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
17	13188-16-SW-046	Qda. Pataqueñe	03/05/2016	11:00	8195855	338328	4458	Palca - Pillconi	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
18	13188-16-SW-047	Río Huancacomoyoc	01/05/2016	17:30	8213710	342824	3861	Cuchuchune	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
19	13188-16-SW-048	Qda. Chalhuana	05/05/2016	15:10	8210301	344527	3960	Chalhuana	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
20	13188-16-SW-049	Río Chaje	03/05/2016	13:00	8198400	340492	4325	Chaje	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
21	13188-16-SW-050	Qda. Challhuani	04/05/2016	16:00	8203676	340670	4460	Pucusi Punucu	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
22	13188-16-SW-051	Qda. Tapioca	12/05/2016	09:35	8206571	352265	4529	Tapioca	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
23	13188-16-SW-052	Río Crucero	05/05/2016	14:30	8213531	343479	3868	Crucero	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
24	13188-16-SW-053	Qda. Pachacahua	12/05/2016	10:35	8206017	350518	4457	Kakalaya	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
25	13188-16-SW-054	Río Chaje	03/05/2016	16:00	8201470	342727	4193	Mal paso	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
26	13188-16-SW-055	Río Lluchune	05/05/2016	13:10	8206559	345641	4079	Lluchune	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
27	13188-16-SW-056	Río Cuturi-Taipinocu	30/04/2016	10:35	8204045	344682	4135	Taipinocu	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
28	13188-16-SW-057	Río Huancamaya	28/04/2016	14:45	8208917	341190	4348	Huancamaya	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
29	13188-16-SW-058	Río Crucero	05/05/2016	15:00	8209222	345050	3968	Ayoma	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
30	13188-16-SW-059	Qda. Ancoascata	12/05/2016	12:23	8207258	348816	4368	Ancoascata 2	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
31	13188-16-SW-060	Qda. Anjuascata	12/05/2016	11:55	8207004	348973	4341	Anjuascata	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
32	13188-16-SW-061	Río Crucero	30/04/2016	14:45	8204756	345780	4080	Cutire	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
33	13188-16-SW-062	Río Chaje	30/04/2016	12:30	8202970	344534	4135	Chaje	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
34	13188-16-SW-063	Qda. Cobremoni	05/05/2016	13:30	8207591	345524	4049	Piscane	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
35	13188-16-SW-064	Río Crucero	05/05/2016	14:10	8207273	345461	4024	Salvianipampa	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
36	13188-16-SW-065	Qda. Condoriyoc	17/05/2015	13:06	8199248	344995	4193	Mayuhuasi	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
37	13188-16-SW-066	Qda. Amani	06/05/2016	15:45	8185976	350407	4445	Soracucho	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
38	13188-16-SW-067	Río Culta	06/05/2016	11:20	8190012	346040	4511	Pescata	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



39	13188-16-SW-068	Qda. Cochapampa	06/05/2016	13:15	8187041	347618	4422	Cochapampa	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
40	13188-16-SW-069	Río Larancota	09/05/2016	10:10	8190707	352628	4420	Huaychune	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
41	13188-16-SW-070	Qda. Huanune	09/05/2016	12:25	8201255	353385	4640	Llanquiri	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
42	13188-16-SW-070A	Qda. Vilapacheta	30/04/2016	15:00	8205227	345890	4083	Pampa Vilapacheta	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
43	13188-16-SW-071	Río Crucero	12/05/2016	10:30	8195770	347352	4254	Llusta Pampa	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
44	13188-16-SW-072	Río Calazaya	04/05/2016	10:25	8193805	348214	4313	Cabaña Jucune	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
45	13188-16-SW-073	Río Crucero	30/04/2016	13:30	8202836	345125	4130	Río Crucero	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
46	13188-16-SW-074	Qda. Halactaña	09/05/2016	14:30	8200291	350201	4505	Halactaña	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
47	13188-16-SW-075	Qda. Soncoyane	17/05/2015	11:20	8197475	346636	4236	Llunquiri	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
48	13188-16-SW-076	Río Llucta	10/05/2016	15:00	8193900	349328	4319	Huertoni	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
49	13188-16-SW-077	Río Llanquiri	05/05/2016	16:00	8199333	345731	4204	Río Llanquiri	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
50	13188-16-SW-078	Río Crucero	10/05/2016	11:00	8193648	349185	4300	Huertani	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
51	13188-16-SW-079	Qda. Huachusuma	09/05/2016	12:30	8191597	351295	4368	Huachune	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
52	13188-16-SW-080	Río Crucero	17/05/2015	12:10	8198969	346028	4190	Condorani	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
53	13188-16-SW-081	Qda. Puncuhuasi	12/05/2016	11:10	8196135	346712	4278	Puncuhuasi	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
54	13188-16-SW-082	Qda. Jucumarine	06/05/2016	15:10	8190378	351577	4411	Jucumarine	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Quebrada
55	13188-16-SW-083	Río Piscota	09/05/2016	11:30	8191316	351216	4327	Huachune	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
56	13188-16-SW-120	Río Ichuña	05/05/2016	15:30	8214620	341157	3638	Mucurani	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río
57	13188-16-SW-147	Laguna Jucumarine	06/05/2016	14:50	8188730	349459	4413	Jucumarine	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Laguna
58	13188-16-SW-182	Río Llucta	10/05/2016	12:30	8194515	349168	4440	Chapioni	Pacífico	Tambo	Ichuña	Crucero	Agua superficial	Río

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3 Resumen de parámetros fisicoquímicos de estaciones de agua inventariadas en temporada de estiaje

Código	Caudal (L/s) ₂₀₁₅	T (°C) ₂₀₁₅	pH ₂₀₁₅	Eh ₂₀₁₅	CE_uS/cm ₂₀₁₅	TDS_mg/L ₂₀₁₅	Salinidad_psu ₂₀₁₅	Resistividad_Kohm-cm ₂₀₁₅	OD_%Sat ₂₀₁₅	OD_mg/L ₂₀₁₅	ORP_mv ₂₀₁₅
13188-15-GW-001	0.8	8.8	6.51	622.4	204.7	100.8	0.143	4.886	91.1	6.13	402.4
13188-15-GW-002	10	10.4	7.03	448.5	70.88	35.32	0.084	14.07	83.3	5.47	228.5
13188-15-GW-003	2	9.6	7.5	448.2	67.18	33.42	0.081	14.8	87.1	5.82	228.2
13188-15-GW-004	4	12.4	7.3	259.8	561.9	275.8	0.315	1.680	89.4	6.24	39.8
13188-15-GW-005	3	44.3	6.46	66.6	3208	1572	1.718	0.3118	1.7	0.06	-153.4
13188-15-GW-007	0.9	11.9	7.09	63.1	1242	609.2	0.650	0.8050	45.8	2.99	-156.9
13188-15-GW-008	7	9.5	7.03	151	38.21	19.22	0.075	26.17	90.7	6.13	-69
13188-15-GW-009	0.8	9.1	6.5	458	624.9	306.7	0.341	1.6	9.3	0.5	238
13188-15-GW-011	1.5	7.5	8.16	227.64	77.72	35.5	0.085	12.87	109.9	7.64	7.64
13188-15-GW-012	2	7.4	7.1	220.9	56.6	28.23	0.750	17.67	9.8	6.75	0.9
13188-15-GW-014	0.5	11.7	5.11	368.5	365.7	179.7	0.220	2.735	16.8	1.1	148.5
13188-15-GW-018	0.8	4.5	8.38	188.3	48.79	24.39	0.071	20.510	102.6	7.4	-31.7
13188-15-GW-019	8	6.8	7.33	291.1	57.19	28.52	0.076	17.310	55.8	3.76	71.1
13188-15-GW-020	3	16.4	7.73	473.7	155.4	76.66	0.124	6.434	186.6	10.09	253.7
13188-15-SW-045	8	8.6	8.01	347	70.25	34.92	0.082	14.23	114.8	7.19	127
13188-15-SW-046	7	9.3	7.91	189.6	372.6	183.1	0.220	2.684	112.2	7.56	-30.4
13188-15-SW-047	1	21.1	8.76	440.8	488.4	239.8	0.285	2.048	133.3	7.42	220.8
13188-15-SW-048	0.1	14.2	7.43	432.8	313.3	154	0.196	3.192	100.4	6.42	212.8
13188-15-SW-049	3	15.9	8.26	175.9	290.3	142.8	0.189	3.444	139.4	8.17	-44.1
13188-15-SW-050	4	14.1	8.2	358.3	497.5	244.3	0.285	2.01	115.8	6.93	138.3



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



13188-15-SW-051	10	9.4	4.68	501.8	434.1	213.2	0.249	2.303	103.8	6.9	281.8
13188-15-SW-052	40	15.9	8.29	438.8	829.1	406.7	0.451	1.206	113.3	6.98	218.8
13188-15-SW-053	5	9.4	6.86	291.4	805.2	395	0.430	1.242	99.2	6.62	71.4
13188-15-SW-054	1.5	17.6	8.2	250.8	434.2	213.3	0.257	2.303	107	6.23	30.8
13188-15-SW-055	10	12.8	6.28	464.1	437.2	214.7	0.255	2.287	113.7	7.25	244.1
13188-15-SW-056	2	16.1	8.07	114.4	328.7	161.6	0.205	3.042	115.2	6.88	-105.6
13188-15-SW-057	0.5	14.3	6.49	717.9	197.3	97.16	0.143	5.069	126.7	7.33	497.9
13188-15-SW-058	35	6.9	7.49	415.7	885.5	434.7	0.462	1.129	104.4	7.62	195.7
13188-15-SW-059	5	16	7.1	469.1	461.9	226.8	0.268	2.165	110.5	6.46	249.1
13188-15-SW-060	6	16.4	4.57	512.5	439.8	216	0.259	2.274	103.5	6.02	292.5
13188-15-SW-061	35	13.2	7.38	103.8	951.4	466.7	0.508	1.051	105.5	6.74	-116.2
13188-15-SW-062	8	21.8	8.53	184.3	428.5	210.5	0.256	2.334	140.4	7.47	-35.7
13188-15-SW-064	30	14.1	7.6	462.9	783.4	384.4	0.425	1.277	105.6	6.7	242.9
13188-15-SW-065	7	16.1	6.7	32.3	554.4	273.1	0.317	1.799	115.3	6.29	-187.7
13188-15-SW-068	3	11.3	7.26	435.6	196.9	96.8	0.141	5.079	123.8	7.77	215.6
13188-15-SW-069	15	7.3	7.4	452.5	479.6	235.5	0.269	2.085	107.1	7.69	232.5
13188-15-SW-070	10	12.9	3.64	677	685.7	336.5	0.376	1.158	105.5	6.43	457
13188-15-SW-070A	5	11.1	8.07	416.1	488.1	239.7	0.278	2.049	111.9	7.53	196.1
13188-15-SW-071	25	19.7	8.12	340.7	1347	661.3	0.719	0.7422	122.2	6.62	120.7
13188-15-SW-072	30	10.4	7.52	284.6	2769	1357	1.430	0.3612	101.3	6.75	64.6
13188-15-SW-073	30	21	6.8	234.7	1205	502.8	0.553	0.9756	119.9	6.52	14.7
13188-15-SW-074	5	15.2	4.38	549.3	608.5	298.5	0.340	1.643	102.9	6.05	329.3
13188-15-SW-075	5	10.4	7.4	-5.7	1440	705.7	0.746	0.6947	106.3	7.61	-225.7
13188-15-SW-076	5	19.5	6.02	314.6	776.7	381.1	0.427	1.287	120.9	6.58	94.6
13188-15-SW-077	17	18.8	7.88	320.7	648.1	318	0.363	1.543	107.4	6.02	100.7
13188-15-SW-078	12	12.1	7.24	299.4	610.8	299.8	0.339	1.628	113.8	7.32	79.4
13188-15-SW-079	1	13.9	6.42	398.9	324.7	159.6	0.202	3.08	108.2	6.57	178.9
13188-15-SW-080	30	16.5	7.42	8.2	1103	540.9	0.590	0.9067	129.1	7.56	-211.8
13188-15-SW-081	5	10.5	6.9	350.8	268.9	132.3	0.175	3.719	120.6	7.51	130.8
13188-15-SW-083	3	14.1	6.8	459	393	193.1	0.235	2.544	159.3	9.69	239
13188-15-SW-007	180	20.3	8.47	414.4	13190	6464	7.589	0.07581	132.4	7.50	194.4
13188-15-SW-120	200	5.4	7.45	567.2	8880	4352	4.683	0.1126	110.3	8.73	347.2

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4 Resumen de parámetros fisicoquímicos de estaciones de agua inventariadas en temporada de avenida

Código	Caudal (L/s)_2016	T (°C)_2016	pH_2016	CE_uS/cm_2016	TDS_mg/L_2016	Salinidad_psu_2016	Resistividad_Kohm-cm_2016	OD_%Sat_2016	OD_mgL_2016	OD_%Sat_2016	OD_mgL_2016	Eh_2016	ORP_mv_2016
13188-16-GW-001	1	9.3	7.48	243.8	120	0.161	4.102	81.9	5.38	81.9	5.38	359.4	139.4
13188-16-GW-002	3	10.5	7.77	77.51	38.48	0.087	12.9	94.1	6.24	94.1	6.24	398.8	178.8
13188-16-GW-003	1.5	9.4	7.58	47.82	23.93	0.079	20.91	103.9	6.94	103.9	6.94	325.1	105.1
13188-16-GW-004	1.5	14.1	7.59	708.7	348.7	0.389	1.411	138.7	8.19	138.7	8.19	418.5	198.5
13188-16-GW-005	3	43.9	6.73	3557	1744	1.91	0.281	1.2	0.04	1.2	0.04	196.5	-23.5
13188-16-GW-007	1	10.9	7.04	1328	651.4	0.693	0.758	48.3	3.23	48.3	3.23	350.4	130.4
13188-16-GW-008	4	10.4	7.59	66	33.14	0.082	15.01	90.8	5.97	90.8	5.97	474.3	254.3
13188-16-GW-009		12.8	8.23	145.2	71.64	0.118	6.888	136.4	8.68	136.4	8.68	484.4	264.4



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



13188-16-GW-012		7.1	7.43	62.92	31.33	0.078	15.89	109.3	7.59	109.3	7.59	335.4	115.4
13188-16-GW-014	0.5	13.4	5.36	383.4	188.8	0.233	2.608	17.8	1.12	17.8	1.12	610	390
13188-16-GW-018	1.5	8.4	8.3	51.24	25.61	0.074	19.52	120.7	8.07	120.7	8.07	473.8	253.8
13188-16-GW-019	2	5.3	5.77	57.71	28.8	0.075	17.32	14.6	0.84	14.6	0.84	421.8	201.8
13188-16-GW-020	10	8	7.7	174.6	87.06	0.129	5.601	93	6.18	93	6.18	500.5	280.5
13188-16-GW-051	2	8.4	6.95	41.86	21.01	0.07	23.89	102.2	7.07	102.2	7.07	114.6	-105.4
13188-16-SW-045	15	12.5	6.85	120.1	59.27	0.106	8.337	112.2	6.9	112.2	6.9	362.8	142.8
13188-16-SW-046	4	10.5	7.66	288.7	141.5	0.189	3.475	114	7.49	114	7.49	576.7	356.7
13188-16-SW-047	8	13.2	8.38	296.5	145.8	0.188	3.372	111	7.32	111	7.32	354	134
13188-16-SW-049		14.7	7.25	299.7	147.4	0.191	3.336	131.7	7.93	131.7	7.93	375.7	155.7
13188-16-SW-050	6	8.9	7.54	285.1	140.2	0.188	3.507	112.2	7.69	112.2	7.69	309.5	89.5
13188-16-SW-051	12	5.3	4.37	470	232.2	0.263	2.104	102.5	7.52	102.5	7.52	774.2	554.2
13188-16-SW-052	50	17.5	8.59	706.3	346.7	0.391	1.414	108.6	6.43	108.6	6.43	483.4	263.4
13188-16-SW-053	3	9.1	7.62	930.8	457.8	0.491	1.07	110.4	7.44	110.4	7.44	540.7	320.7
13188-16-SW-054	30	14.8	7.01	426.8	209.2	0.252	2.343	117.5	7.19	117.5	7.19	582.7	362.7
13188-16-SW-055	30	11.7	5.1	406.3	199.9	0.24	2.461	110.9	7.41	110.9	7.41	444.2	224.2
13188-16-SW-056	12	14.8	6.97	296.6	145.8	0.189	3.372	115.2	7.09	115.2	7.09	325.2	105.2
13188-16-SW-057	4	12.8	6.97	184.8	91.06	0.136	5.411	107.4	6.74	107.4	6.74	428.7	208.7
13188-16-SW-058	70	15.1	7.26	768.3	377	0.419	1.303	114.7	7.15	114.7	7.15	381.5	161.5
13188-16-SW-059	4	9.4	8.41	442.4	217.9	0.255	2.248	110.7	7.55	110.7	7.55	446.8	226.8
13188-16-SW-060	14	11.1	4.56	488.8	240.6	0.279	2.036	103.1	6.76	103.1	6.76	667.9	447.9
13188-16-SW-061	45	18	7.95	649.3	318.7	0.363	1.54	114	6.63	114	6.63	327.7	107.7
13188-16-SW-062	15	16.2	7.82	375.4	184.4	0.229	2.647	115.5	6.79	115.5	6.79	306.2	86.2
13188-16-SW-064		14.7	7.35	781.7	383.5	0.426	1.279	111.6	6.97	111.6	6.97	348.2	128.2
13188-16-SW-065	2	15.8	7.58	545.4	267.7	0.301	1.834	108.9	6.53	108.9	6.53	293.4	73.4
13188-16-SW-067	3	12.5	7.42	224.3	110.4	0.154	4.459	111.9	6.49	111.9	6.49	352	132
13188-16-SW-068	4	17.5	7.64	154.2	76.8	0.126	6.484	144.2	8.02	144.2	8.02	379.1	159.1
13188-16-SW-069	10	5.3	7.24	516	253.3	0.281	1.938	112	8.39	112	8.39	340	120
13188-16-SW-070	18	8.4	3.62	538.3	264.5	0.299	1.849	102.9	6.87	102.9	6.87	837	617
13188-16-SW-071		7.8	8.3	712.8	349.8	0.398	1.403	118	8.49	118	8.49	440.7	220.7
13188-16-SW-072	10	13.7	8.6	2768	1357	1.452	0.361	126	7.64	126	7.64	680.5	460.5
13188-16-SW-073	40	18.5	8.61	730.7	358.5	0.404	1.369	119.9	6.79	119.9	6.79	346.7	126.7
13188-16-SW-074	22	10.4	4.48	566.4	278.4	0.315	1.759			122	7.89	695.3	475.3
13188-16-SW-075	2.5	12.3	7.98	1500.29	750	0.799	0.654	122	7.89	113.6	6.81	272.7	52.7
13188-16-SW-076	6	14.5	8.4	717.6	352.1	0.394	1.393	113.6	6.81	112.7	7.11	468.7	248.7
13188-16-SW-077	20	13.1	7.28	515.4	253	0.293	1.94	112.7	7.11	115.6	8.23	383.8	163.8
13188-16-SW-078	20	8.6	7.42	598.2	293.6	0.327	1.672	115.6	8.23	110.3	7.07	403.1	183.1
13188-16-SW-079	2	11.9	7.74	293.6	144.4	0.186	3.406	110.3	7.07	109.1	6.76	189.2	-30.8
13188-16-SW-080	40	14.3	7.57	993.1	487.1	0.531	1.007	109.1	6.76	102.9	6.35	280.1	60.1
13188-16-SW-081	3.5	11.5	8.22	197.8	97.41	0.138	5.056	102.9	6.35	155.5	9.65	454.2	234.2
13188-16-SW-083	2.5	13.2	8.05	275.7	135.6	0.183	3.627	155.5	9.65	83.9	5.27	178.89	-41.11
13188-16-SW-147		12.4	8.3	699.5	343.2	0.38	1.43	83.9	5.27	110.1	7.03	350.1	130.1
13188-16-SW-182	10	11.5	7.9	661.9	324.8	0.363	1.511	110.1	7.03			505.5	285.5
13188-16-SW-007	140	14.2	8.9	5032	2467	2.695	0.1987	118.8	7.57	118.8	7.57	432.9	212.9
13188-16-SW-120	180	18.1	9.09	3420	1677	1.827	0.292	114.5	6.63	114.5	6.63	471.2	251.2

Fuente: Elaboración propia.



"HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUEENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO"



Anexo 5 Resúmen de análisis de aniones y metales disueltos de estaciones de agua inventariadas en temporada de estiaje

N°	Código	CO3	HCO3	F	Cl	NO3	SO4	NO2	Na_dis	Mg_dis	K_dis	Ca_dis	Sr_dis	Li_dis	SiO2_dis	Ag_dis	Al_dis	As_dis	B_dis	Ba_dis	Be_dis	Bi_dis	Cd_dis
1	13188-15-GW-001	2	104	<0.2	0.9	0.7	6	<0.5	3.9	9.8	5.4	18	0.1879	0.0062	38.4	<0.0003	0.006	0.003	<0.05	0.0663	<0.0002	<0.0002	<0.0002
2	13188-15-GW-002	*	*	<0.2	0.6	<0.5	5	<0.5	3.6	1.4	2.4	6.6	0.0361	0.001	38.3	<0.0003	0.017	0.002	<0.05	0.0145	<0.0002	<0.0002	<0.0002
3	13188-15-GW-003	<1	14	<0.2	0.6	2.1	12	<0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	13188-15-GW-004	6	174	0.2	13.4	<0.5	110	<0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	13188-15-GW-005	4	290	1.3	194.9	<0.5	1095	<0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	13188-15-GW-007	3	166	0.3	15.2	<0.5	466	<0.5	111	31.4	4.9	140.3	0.5201	0.1979	29.4	<0.0003	<0.005	0.054	<0.05	0.0079	<0.0002	<0.0002	<0.0002
7	13188-15-GW-008	<1	21	<0.2	0.7	<0.5	8	<0.5	1.4	2	1.9	4.9	0.0332	0.0004	18.2	<0.0003	0.01	<0.001	<0.05	0.0182	<0.0002	<0.0002	<0.0002
8	13188-15-GW-009																						
9	13188-15-GW-011	<1	18	<0.2	0.7	1.5	15	<0.5	4.3	1	1.4	7.4	0.0365	0.0023	26.7	<0.0003	<0.005	0.002	<0.05	0.0011	<0.0002	<0.0002	<0.0002
10	13188-15-GW-012	<1	19	<0.2	0.5	1.1	6	<0.5	2.2	1.6	1.9	4.7	0.0192	0.0008	36	<0.0003	<0.005	0.003	<0.05	0.0099	<0.0002	<0.0002	<0.0002
11	13188-15-GW-014	<1	<1	<0.2	1.3	<0.5	140	<0.5	8.7	19	5	15.6	0.0583	0.0217	55.1	<0.0003	0.025	0.008	0.09	0.0804	<0.0002	<0.0002	<0.0002
12	13188-15-GW-018	<1	15	<0.2	0.5	1.5	6	<0.5	3.2	0.6	0.9	4.9	0.0251	0.0019	17.3	<0.0003	<0.005	<0.001	<0.05	0.0017	<0.0002	<0.0002	<0.0002
13	13188-15-GW-019	<1	13	<0.2	0.7	<0.5	8	<0.5	1.5	1.5	3.3	3.4	0.0219	<0.0004	31.6	<0.0003	<0.005	<0.001	<0.05	0.0124	<0.0002	<0.0002	<0.0002
14	13188-15-GW-020	<1	41	<0.2	0.5	<0.5	28	<0.5	4.3	5.9	2.1	15.3	0.2678	0.0048	4	<0.0003	0.007	0.019	<0.05	0.0047	<0.0002	<0.0002	<0.0002
15	13188-15-SW-007	4	258	0.3	3699.3	6.1	697	<0.5	2171	63.2	61.3	211.6	6.901	2.3281	44.8	<0.0003	0.022	0.142	8.57	0.11	<0.0002	0.0004	0.0003
16	13188-15-SW-045	<1	27	<0.2	0.9	<0.5	7	<0.5	4.2	1	2	7.5	0.0294	0.0013	45.4	<0.0003	<0.005	<0.001	<0.05	0.0168	<0.0002	<0.0002	<0.0002
17	13188-15-SW-046	4	145	<0.2	1.3	<0.5	49	<0.5	5.3	12.9	2.4	48.6	0.0824	0.0045	20.9	<0.0003	<0.005	0.004	<0.05	0.0114	<0.0002	<0.0002	<0.0002
18	13188-15-SW-047	5	160	<0.2	7.4	<0.5	105	<0.5	21.4	24	3.4	48.3	0.4722	0.014	24.4	<0.0003	0.028	0.008	0.28	0.0689	<0.0002	<0.0002	<0.0002
19	13188-15-SW-048	5	147	<0.2	1.8	<0.5	22	<0.5	8	19.2	3.5	29.7	0.2304	0.0048	22.1	<0.0003	<0.005	0.016	0.12	0.0645	<0.0002	<0.0002	<0.0002
20	13188-15-SW-049	3	129	<0.2	1	<0.5	28	<0.5	4.3	9.6	3.3	37.1	0.1096	0.0028	18.1	<0.0003	0.005	0.002	<0.05	0.0199	<0.0002	<0.0002	<0.0002
21	13188-15-SW-050	3	123	<0.2	1.1	<0.5	142	<0.5	11.6	20.2	3.8	61.2	0.4255	0.0079	33.5	<0.0003	<0.005	0.022	0.06	0.0382	<0.0002	<0.0002	<0.0002
22	13188-15-SW-051	<1	<1	0.6	0.4	<0.5	219	<0.5	9.9	7.8	3.5	36.6	0.2327	0.0061	60.2	<0.0003	12.643	<0.001	<0.05	0.023	0.001	<0.0002	0.0003
23	13188-15-SW-052	3	125	0.5	21	<0.5	263	<0.5	57	24.4	6	84.5	1.0498	0.0747	29.1	<0.0003	0.424	0.026	0.67	0.0409	<0.0002	<0.0002	<0.0002
24	13188-15-SW-053	<1	137	0.3	0.6	<0.5	330	<0.5	5.7	22.6	4.8	131.7	4.3267	0.0472	37.1	<0.0003	<0.005	0.036	0.09	0.0385	<0.0002	<0.0002	<0.0002
25	13188-15-SW-054	5	167	<0.2	1.7	<0.5	69	<0.5	14.6	17	4.2	48.4	0.1441	0.007	20.3	<0.0003	0.007	0.002	<0.05	0.0245	<0.0002	<0.0002	<0.0002
26	13188-15-SW-055	<1	<1	0.5	0.5	<0.5	218	<0.5	9.5	10.6	4.3	50	0.6052	0.012	46.9	<0.0003	2.431	<0.001	0.05	0.0246	0.0006	<0.0002	0.0002
27	13188-15-SW-056	2	114	<0.2	1.6	<0.5	58	<0.5	10.2	13.2	4.3	36.3	0.1514	0.0033	26.7	<0.0003	<0.005	0.016	<0.05	0.0264	<0.0002	<0.0002	<0.0002
28	13188-15-SW-057	2	91	<0.2	1.2	<0.5	22	<0.5	6.9	6.6	2.7	25.1	0.0859	0.0034	32.2	<0.0003	0.069	0.01	0.06	0.0334	<0.0002	<0.0002	<0.0002
29	13188-15-SW-058	3	148	0.4	22.1	<0.5	276	<0.5	63.5	24	6.1	92.4	1.137	0.0809	31	<0.0003	0.182	0.029	0.75	0.0396	<0.0002	<0.0002	<0.0002
30	13188-15-SW-059	5	174	<0.2	0.6	<0.5	80	<0.5	10.7	15.7	5.7	61.7	1.5498	0.0265	29.5	<0.0003	0.006	0.022	0.13	0.0335	<0.0002	<0.0002	<0.0002
31	13188-15-SW-060	<1	<1	0.5	0.5	<0.5	217	<0.5	9.7	9.9	4.4	49.7	0.6611	0.013	53.7	<0.0003	6.3	0.001	<0.05	0.0292	0.0007	<0.0002	0.0002
32	13188-15-SW-061	4	163	0.3	20.6	<0.5	305	<0.5	60.3	26.1	6.1	97	1.3049	0.094	27.7	<0.0003	0.023	0.051	0.05	0.0299	<0.0002	<0.0002	<0.0002
33	13188-15-SW-062	4	153	<0.2	2.2	<0.5	80	<0.5	13	16.7	4.9	47.7	0.143	0.005	20.4	<0.0003	<0.005	0.002	<0.05	0.0217	<0.0002	<0.0002	<0.0002
34	13188-15-SW-064	3	125	0.4	13.2	<0.5	271	<0.5	42.9	22.1	5.4	79.2	1.124	0.0655	34	<0.0003	0.223	0.026	0.59	0.0398	<0.0002	<0.0002	<0.0002
35	13188-15-SW-065	3	138	0.3	1.4	<0.5	141	<0.5	24.8	25.3	5.4	45.9	0.1986	0.0135	20.7	<0.0003	0.005	0.004	<0.05	0.0273	<0.0002	<0.0002	<0.0002
36	13188-15-SW-068	1	103	<0.2	1.7	0.7	11	<0.5	10.7	8.5	5.5	16.6	0.1401	0.0062	23.7	<0.0003	0.127	0.002	<0.05	0.045	<0.0002	<0.0002	<0.0002
37	13188-15-SW-069	<1	50	<0.2	0.7	<0.5	179	<0.5	10.9	11.6	3.1	55.3	0.5836	0.0074	34	<0.0003	0.937	0.004	<0.05	0.0295	<0.0002	<0.0002	<0.0002
38	13188-15-SW-070	<1	<1	1	0.2	<0.5	338	<0.5	9.3	9.3	3.6	47.1	0.3046	0.0069	52	<0.0003	24.975	0.001	<0.05	0.0147	0.001	<0.0002	0.0024
39	13188-15-SW-070A	4	167	0.4	0.6	<0.5	73	<0.5	4.7	23.2	4.1	51.8	1.2123	0.0385	34.3	<0.0003	0.019	0.182	0.08	0.0473	<0.0002	<0.0002	<0.0002
40	13188-15-SW-071	7	208	0.4	69.9	<0.5	396	<0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	13188-15-SW-072	6	218	0.8	183.5	<0.5	979	<0.5	388.6	44.1	18.9	132.5	2.4083	0.5854	20.9	<0.0003	<0.005	0.006	13.14	0.0833	<0.0002	<0.0002	<0.0002
42	13188-15-SW-073	3	155	0.3	19.3	<0.5	342	<0.5	60.1	27.5	6.7	106.7	1.5821	0.1049	30	<0.0003	0.022	0.055	0.05	0.0333	<0.0002	<0.0002	<0.0002
43	13188-15-SW-074	<1	<1	1	0.3	<0.5	343	<0.5	10.4	11.8	4.6	56.6	0.509	0.0126	52.1	<0.0003	22.297	<0.001	<0.05	0.0216	0.0009	<0.0002	0.0022
44	13188-15-SW-075	5	226	0.7	3.7	<0.5	614	<0.5	32.2	53	7	223	0.0352	0.0048	34.2	<0.0003	<0.005	0.141	0.08	0.0071	<0.0002	<0.0002	<0.0002
45	13188-15-SW-076	3	135	<0.2	5.3	<0.5	216	<0.5	35	19.1	5.6	73.3	0.9686	0.029	23	<0.0003	<0.005	0.02	0.23	0.0391	<0.0002	<0.0002	<0.0002
46	13188-15-SW-077	-	-	-	-	-	-	-	11.4	22.6	5.3	96.4	1.1714	0.0297	30	<0.0003	0.042	0.009	0.07	0.0473	<0.0002	<0.0002	<0.0002
47	13188-15-SW-078	2	129	0.2	16.4	<0.5	157	<0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	13188-15-SW-079	-	-	<0.2	4.9	<0.5	66	<0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	13188-15-SW-080	6	199	0.3	45.5	<0.5	313	<0.5	114	28.3	9	99	1.5311	0.173	29.6	<0.0003	0.007	0.18	0.11	0.0498	<0.0002	<0.0002	<0.0002



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



45	13188-15-SW-076	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0009	<0.01	<0.0002	<0.0002	0.0063	0.0009	<0.0005	72.3	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0018	<0.0001	0.0013	0.0011	<0.0005	<0.0005	<0.001
46	13188-15-SW-077	0.0004	0.0036	<0.001	0.0015	0.15	<0.0002	0.1524	0.0029	0.0084	<0.0005	<0.3	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.002	0.0003	0.0005	0.0007	<0.0005	<0.0005	0.002
47	13188-15-SW-078	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	13188-15-SW-079	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	13188-15-SW-080	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0016	0.02	<0.0002	0.0082	0.0044	<0.0007	<0.0005	106.6	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0026	<0.0001	0.0021	0.0014	<0.0005	<0.0005	0.003
50	13188-15-SW-081	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	13188-15-SW-083	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0006	0.06	<0.0002	0.0106	0.0036	<0.0007	<0.0005	11.1	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0009	<0.0001	0.0022	0.0007	<0.0005	<0.0005	0.005
52	13188-15-SW-120	<0.0002	0.0004	<0.001	0.0023	0.03	<0.0002	0.0145	0.0034	<0.0007	<0.0005	188.1	<0.0008	<0.002	0.0008	<0.0002	<0.0006	0.0019	0.0009	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.033

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7 Resumen de análisis de metales totales de estaciones de agua inventariadas en temporada de estiaje

N°	Código	Na_tot	Mg_tot	K_tot	Ca_tot	Sr_tot	Li_tot	SiO2_tot	Ag_tot	Al_tot	As_tot	B_tot	Ba_tot	Be_tot	Bi_tot	Cd_tot	Ce_tot	Co_tot	Cr_tot
1	13188-15-GW-001	4.1	10.4	5.8	18.4	0.2005	0.0074	40.5	<0.0003	0.012	0.005	<0.05	0.0874	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
2	13188-15-GW-002	3.7	1.4	2.6	6.7	0.038	0.0012	39.3	<0.0003	0.027	0.003	<0.05	0.0182	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
3	13188-15-GW-003	5.3	1.1	2.6	5	0.0336	0.0011	47.4	<0.0003	0.051	0.01	0.05	0.0221	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0007	<0.0002	<0.001
4	13188-15-GW-004	36.1	19.5	2	59.5	0.8785	0.0273	30.6	<0.0003	0.114	0.013	0.9	0.029	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0013	0.0004	<0.001
5	13188-15-GW-005	485.6	48.1	25.1	168.1	2.7559	0.9122	32.9	<0.0003	0.018	0.005	14.77	0.0307	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0005	0.0003	<0.001
6	13188-15-GW-007	112.5	31.7	5.1	142.5	0.553	0.3961	32.5	<0.0003	0.136	0.31	0.49	0.0091	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0002	0.002
7	13188-15-GW-008	1.7	2.2	2	6	0.0421	0.0012	19.6	<0.0003	0.461	0.222	<0.05	0.0206	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.004
8	13188-15-GW-009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	13188-15-GW-011	5	1	1.5	7.8	5.6766	0.491	28.6	<0.0003	0.578	0.654	<0.05	0.0536	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0004	0.002
10	13188-15-GW-012	2.3	1.7	1.9	5.2	0.0199	0.0009	40.1	<0.0003	0.059	0.004	<0.05	0.0117	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
11	13188-15-GW-014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	13188-15-GW-018	3.3	0.7	0.9	4.9	0.0258	0.0019	18.3	<0.0003	0.345	<0.001	<0.05	0.003	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
13	13188-15-GW-019	1.6	1.5	3.4	3.4	0.0243	0.0004	32.3	<0.0003	0.008	<0.001	<0.05	0.0134	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0006	<0.001
14	13188-15-GW-020	4.4	6.1	2.2	15.4	0.278	0.0049	4.5	<0.0003	0.031	0.02	<0.05	0.0049	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
15	13188-15-SW-007	2319.8	64.8	65.6	214.5	7.3535	2.3366	46.3	0.0835	0.029	0.185	9.13	0.1336	0.0004	0.0681	0.0011	0.0006	0.0006	0.041
16	13188-15-SW-045	4.3	1	2.1	7.7	0.0296	0.0014	46.4	<0.0003	0.015	<0.001	<0.05	0.0193	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
17	13188-15-SW-046	6.3	14.8	2.8	50.4	0.0914	0.0046	23.1	<0.0003	0.32	0.005	<0.05	0.0122	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
18	13188-15-SW-047	23.5	26.1	3.7	51	0.4782	0.0143	24.8	<0.0003	0.183	0.009	0.3	0.071	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
19	13188-15-SW-048	8.1	19.4	3.5	30.8	0.2331	0.0051	22.8	<0.0003	0.054	0.018	0.12	0.0684	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
20	13188-15-SW-049	4.3	10	3.8	38.8	0.1281	0.0029	20	<0.0003	0.422	0.003	0.06	0.0217	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
21	13188-15-SW-050	12.4	20.6	3.9	63.7	0.4389	0.0088	35.3	<0.0003	0.018	0.023	0.07	0.0397	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0003	<0.0002	<0.001
22	13188-15-SW-051	10.3	8.1	3.5	38.1	0.2541	0.0066	62.4	<0.0003	12.91	<0.001	<0.05	0.0232	0.0011	<0.0002	0.0003	0.0098	0.0181	<0.001
23	13188-15-SW-052	58.1	24.5	6.2	89.1	1.1853	0.0811	30.4	<0.0003	0.938	0.029	0.82	0.0447	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0005	0.0009	<0.001
24	13188-15-SW-053	5.9	23.3	4.9	136.3	4.709	0.0494	39	<0.0003	0.009	0.043	0.1	0.0408	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
25	13188-15-SW-054	15.9	20.3	4.8	52.7	0.1742	0.0075	22.8	<0.0003	0.127	0.002	0.14	0.028	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
26	13188-15-SW-055	10.3	11.7	4.6	56.3	0.6755	0.0132	47.6	<0.0003	4.828	0.002	0.05	0.0262	0.0007	<0.0002	0.0002	0.0065	0.0104	<0.001
27	13188-15-SW-056	11.4	13.8	4.8	37.4	0.1792	0.0034	29.3	<0.0003	0.097	0.027	<0.05	0.0326	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
28	13188-15-SW-057	7	7.6	3	28.8	0.0926	0.0045	33.1	<0.0003	0.104	0.01	0.07	0.036	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
29	13188-15-SW-058	63.7	26.4	6.6	96	1.2815	0.0904	36.6	<0.0003	1.766	0.033	0.85	0.0432	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0012	0.0026	<0.001
30	13188-15-SW-059	11.2	16.3	5.8	65.1	1.6405	0.0275	31	<0.0003	0.043	0.025	0.14	0.035	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
31	13188-15-SW-060	10	10.3	4.5	53.1	0.7461	0.0143	55	<0.0003	7.531	0.003	0.05	0.0292	0.0008	<0.0002	0.0002	0.007	0.0125	<0.001
32	13188-15-SW-061	62.7	29.8	7.1	98.4	1.6117	0.1196	30.7	<0.0003	0.318	0.087	0.59	0.0402	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0003	<0.001
33	13188-15-SW-062	14.8	18.7	5.6	48.9	0.1624	0.0054	22.4	<0.0003	0.342	0.003	0.11	0.0233	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001
34	13188-15-SW-064	45	22.8	5.6	88.5	1.2098	0.0681	34.5	<0.0003	2.93	0.034	0.61	0.0412	0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0019	0.0036	<0.001
35	13188-15-SW-065	25.8	29.1	6.4	46.3	0.2217	0.0244	22.2	<0.0003	0.386	0.265	0.14	0.0306	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0002	0.003
36	13188-15-SW-068	11.4	8.8	5.9	17.6	0.1737	0.0135	29.2	<0.0003	0.245	0.003	0.06	0.1085	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0022	0.0008	<0.001
37	13188-15-SW-069	11.8	11.9	3.2	57.9	0.6074	0.0091	34.4	<0.0003	1.051	0.006	<0.05	0.0406	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0009	0.0007	<0.001
38	13188-15-SW-070	9.8	9.6	3.7	49.5	0.3271	0.0079	52.6	<0.0003	25.139	0.005	<0.05	0.0149	0.0012	<0.0002	0.0026	0.01	0.0517	0.008
39	13188-15-SW-070A	4.9	24.4	4.2	54.2	1.3538	0.041	35.7	<0.0003	0.397	0.216	0.08	0.0488	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0004	<0.0002	<0.001



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



40	13188-15-SW-071	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	13188-15-SW-072	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	13188-15-SW-073	62	31.1	7.5	109.6	1.8782	0.1224	32.8	<0.0003	0.469	0.087	0.56	0.0418	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0004	<0.001	
43	13188-15-SW-074	10.8	12.4	4.6	59.5	0.6018	0.0149	54.2	<0.0003	22.742	0.004	<0.05	0.0233	0.0012	<0.0002	0.0025	0.0101	0.0489	0.004	
44	13188-15-SW-075	34.6	56.8	7.6	229.7	5.5765	0.2825	35.4	<0.0003	0.195	0.218	0.19	0.0564	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0002	0.003	
45	13188-15-SW-076	36	22.6	6.6	77.8	1.0153	0.0511	26.7	<0.0003	0.005	0.059	0.24	0.0649	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0002	<0.001	
46	13188-15-SW-077	11.5	22.6	5.3	97.4	1.2394	0.0778	30.9	<0.0003	0.19	0.013	0.2	0.0474	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0023	0.0046	0.003	
47	13188-15-SW-078	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
48	13188-15-SW-079	15.4	12.6	1.3	31.5	0.3917	0.0102	24.3	<0.0003	0.016	0.001	0.32	0.0272	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0008	0.0002	<0.001	
49	13188-15-SW-080	117.3	28.9	9.2	104.9	1.6696	0.3415	32.6	<0.0003	0.363	0.659	2.55	0.0516	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0003	0.003	
50	13188-15-SW-081	5.3	13.4	2.8	27.4	0.1149	0.0072	16.6	<0.0003	0.071	0.003	0.08	0.0432	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0008	<0.0002	<0.001	
51	13188-15-SW-083	41.8	10.1	6.1	20.9	0.2581	0.0524	14.3	<0.0003	0.035	0.194	0.3	0.1912	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	
52	13188-15-SW-120	1520.8	53.7	45.9	183.3	5.3861	1.5528	37.6	0.2358	0.138	0.101	5.76	0.1246	<0.0002	0.0019	0.0005	<0.0002	0.0004	0.002	

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 8 Resumen de análisis de metales totales de estaciones de agua inventariadas en temporada de estiaje

N°	Código	Cu_tot	Fe_tot	La_tot	Mn_tot	Mo_tot	Ni_tot	Pb_tot	S_tot	Sb_tot	Se_tot	Sn_tot	Th_tot	Ti_tot	Tl_tot	U_tot	V_tot	W_tot	Y_tot	Zn_tot
1	13188-15-GW-001	<0.0005	0.02	<0.0002	0.0011	0.0005	<0.0007	<0.0005	2.6	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0009	<0.0001	0.0009	0.0101	<0.0005	<0.0005	0.003
2	13188-15-GW-002	<0.0005	0.01	<0.0002	0.0004	0.0002	<0.0007	<0.0005	1.9	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	<0.0006	<0.0001	0.0002	0.0018	<0.0005	<0.0005	<0.001
3	13188-15-GW-003	<0.0005	0.05	<0.0002	0.0006	<0.0002	<0.0007	<0.0005	5.3	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0011	<0.0001	<0.0001	0.001	<0.0005	<0.0005	<0.001
4	13188-15-GW-004	0.0013	0.64	<0.0002	0.111	0.0082	0.0016	<0.0005	37.4	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0066	<0.0001	0.0005	0.0014	0.0012	<0.0005	0.005
5	13188-15-GW-005	0.0006	<0.01	<0.0002	0.0333	<0.0002	0.0023	<0.0005	375.4	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0073	<0.0001	<0.0001	<0.0005	0.002	<0.0005	0.002
6	13188-15-GW-007	0.0032	0.02	<0.0002	0.005	0.0102	<0.0007	<0.0005	159.9	<0.0008	<0.002	0.0008	<0.0002	0.0244	<0.0001	0.0021	0.1481	0.001	<0.0005	0.015
7	13188-15-GW-008	0.0014	0.03	<0.0002	0.0022	<0.0002	<0.0007	<0.0005	5.7	<0.0008	<0.002	0.0005	<0.0002	0.0177	<0.0001	<0.0001	0.1923	<0.0005	<0.0005	0.005
8	13188-15-GW-009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	13188-15-GW-011	0.0052	0.02	<0.0002	0.0038	0.0241	<0.0007	<0.0005	9.3	<0.0008	<0.002	0.0006	<0.0002	0.0314	<0.0001	0.0054	0.1739	<0.0005	<0.0005	0.011
10	13188-15-GW-012	<0.0005	<0.01	<0.0002	0.0006	0.0016	<0.0007	<0.0005	4	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0012	<0.0001	<0.0001	0.0016	<0.0005	<0.0005	0.002
11	13188-15-GW-014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	13188-15-GW-018	0.0007	0.17	<0.0002	0.0074	<0.0002	<0.0007	<0.0005	2.4	<0.0008	0.004	<0.0005	<0.0002	0.0019	<0.0001	0.0001	0.0006	<0.0005	<0.0005	0.005
13	13188-15-GW-019	<0.0005	1.17	<0.0002	0.1881	<0.0002	<0.0007	<0.0005	2.8	<0.0008	0.005	<0.0005	<0.0002	<0.0006	<0.0001	<0.0001	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.006
14	13188-15-GW-020	0.0008	0.15	<0.0002	0.0061	0.0013	<0.0007	<0.0005	10.4	<0.0008	0.006	<0.0005	<0.0002	0.0006	<0.0001	<0.0001	0.0011	<0.0005	<0.0005	0.003
15	13188-15-SW-007	0.0162	0.2	0.006	0.0644	0.0054	0.0019	0.0797	246	0.0038	0.003	0.0374	0.0501	0.0451	0.0045	0.0095	0.062	0.0253	0.0027	0.074
16	13188-15-SW-045	0.0008	0.03	<0.0002	0.0016	<0.0002	<0.0007	<0.0005	2.6	<0.0008	0.005	<0.0005	<0.0002	<0.0006	<0.0001	<0.0001	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.004
17	13188-15-SW-046	0.0012	0.09	<0.0002	0.0116	0.0005	<0.0007	<0.0005	18.2	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0085	<0.0001	0.0006	0.0018	<0.0005	<0.0005	0.001
18	13188-15-SW-047	0.0016	0.02	<0.0002	0.0061	0.0012	<0.0007	<0.0005	36.2	<0.0008	0.007	<0.0005	<0.0002	0.0011	<0.0001	0.0012	0.0067	<0.0005	<0.0005	0.002
19	13188-15-SW-048	0.0011	0.04	<0.0002	0.002	0.0007	<0.0007	<0.0005	8.3	<0.0008	0.006	<0.0005	<0.0002	0.0009	<0.0001	0.0011	0.0032	<0.0005	<0.0005	0.002
20	13188-15-SW-049	0.0011	0.07	<0.0002	0.0082	0.0003	<0.0007	<0.0005	10.8	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.007	<0.0001	0.0003	0.0017	<0.0005	<0.0005	0.002
21	13188-15-SW-050	0.0022	0.03	0.0003	0.008	0.0013	<0.0007	<0.0005	48	<0.0008	0.005	<0.0005	<0.0002	0.0014	0.0004	0.0008	0.0012	<0.0005	<0.0005	0.006
22	13188-15-SW-051	0.0104	3.23	0.0039	1.2647	<0.0002	0.0185	<0.0005	74.6	<0.0008	0.005	<0.0005	<0.0002	0.0024	0.0001	0.0001	<0.0005	<0.0005	0.008	0.109
23	13188-15-SW-052	0.0018	0.06	0.0002	0.0321	0.0048	0.0024	<0.0005	92.9	<0.0008	0.008	<0.0005	<0.0002	0.0026	0.0001	0.0016	0.0013	<0.0005	<0.0005	0.006
24	13188-15-SW-053	0.001	0.02	<0.0002	0.0008	0.0259	<0.0007	<0.0005	112.1	<0.0008	0.007	<0.0005	<0.0002	0.003	<0.0001	0.0006	0.0012	<0.0005	<0.0005	0.002
25	13188-15-SW-054	0.0012	0.05	<0.0002	0.0018	0.0012	<0.0007	<0.0005	24.9	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0023	<0.0001	0.0004	0.0007	<0.0005	<0.0005	0.004
26	13188-15-SW-055	0.0057	0.39	0.0028	0.7556	0.0007	0.0132	<0.0005	73.6	<0.0008	0.007	<0.0005	<0.0002	0.0019	<0.0001	0.0003	<0.0005	<0.0005	0.0053	0.07
27	13188-15-SW-056	0.0016	0.02	<0.0002	0.0026	0.0172	<0.0007	<0.0005	20.5	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0019	0.0004	0.0024	0.0023	<0.0005	<0.0005	0.002
28	13188-15-SW-057	0.0037	0.05	<0.0002	0.0012	0.0011	<0.0007	<0.0005	7.8	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	<0.0006	0.0002	0.0017	0.002	<0.0005	<0.0005	0.002
29	13188-15-SW-058	0.0022	0.12	0.0005	0.2017	0.0053	0.0041	<0.0005	96.2	<0.0008	0.009	<0.0005	<0.0002	0.0025	0.0002	0.0015	0.0008	<0.0005	0.001	0.015
30	13188-15-SW-059	0.0011	0.07	<0.0002	0.0016	0.0066	<0.0007	<0.0005	27.5	<0.0008	0.006	<0.0005	<0.0002	0.0012	<0.0001	0.0026	0.0026	<0.0005	<0.0005	0.002
31	13188-15-SW-060	0.0083	1.14	0.0029	0.9122	0.0004	0.014	<0.0005	72.6	<0.0008	0.006	<0.0005	<0.0002	0.0022	0.0001	0.0002	<0.0005	<0.0005	0.0056	0.079
32	13188-15-SW-061	0.0017	0.08	<0.0002	0.0091	0.0088	<0.0007	<0.0005	107.6	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0056	0.0002	0.0023	0.0018	<0.0005	<0.0005	0.004
33	13188-15-SW-062	0.0013	0.06	<0.0002	0.0028	0.0018	<0.0007	<0.0005	27.9	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0038	<0.0001	0.0012	0.001	<0.0005	<0.0005	0.003
34	13188-15-SW-064	0.0026	0.14	0.0008	0.2677	0.0052	0.0048	<0.0005	94	<0.0008	0.008	<0.0005	<0.0002	0.0024	0.0001	0.0014	0.001	<0.0005	0.0016	0.021



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



35	13188-15-SW-065	0.0024	0.07	<0.0002	0.0032	0.0075	<0.0007	<0.0005	51.7	<0.0008	<0.002	0.0005	<0.0002	0.0196	<0.0001	0.0013	0.1737	0.0005	<0.0005	0.009
36	13188-15-SW-068	0.0026	1.01	0.0011	0.1021	0.0006	0.0013	0.001	5.5	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.081	<0.0001	0.0005	0.0087	<0.0005	0.0007	0.028
37	13188-15-SW-069	0.0013	0.54	0.0004	0.099	0.0009	0.0023	<0.0005	62.2	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0114	<0.0001	0.0002	0.0011	<0.0005	<0.0005	0.006
38	13188-15-SW-070	0.0247	14.14	0.0038	1.6575	<0.0002	0.0828	<0.0005	117	<0.0008	0.006	<0.0005	<0.0002	0.003	0.0011	0.0004	0.0025	<0.0005	0.0115	0.146
39	13188-15-SW-070A	0.0019	0.21	<0.0002	0.0044	0.0208	<0.0007	<0.0005	25.6	<0.0008	0.007	<0.0005	<0.0002	0.0057	<0.0001	0.0054	0.0045	<0.0005	<0.0005	0.002
40	13188-15-SW-071	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	13188-15-SW-072	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	13188-15-SW-073	0.0017	0.14	<0.0002	0.0149	0.0054	<0.0007	<0.0005	120.2	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0063	<0.0001	0.0019	0.0023	0.0006	<0.0005	0.004
43	13188-15-SW-074	0.0218	6.34	0.0039	1.5141	0.0004	0.0769	<0.0005	115.5	<0.0008	0.007	<0.0005	<0.0002	0.005	0.0008	0.0004	0.0018	<0.0005	0.0116	0.136
44	13188-15-SW-075	0.0025	0.05	<0.0002	0.0014	0.0254	<0.0007	<0.0005	211.2	<0.0008	<0.002	0.0005	<0.0002	0.0147	<0.0001	0.0059	0.1893	<0.0005	<0.0005	0.006
45	13188-15-SW-076	0.0017	0.03	<0.0002	0.0104	0.0079	0.0011	<0.0005	76.1	<0.0008	<0.002	0.0009	<0.0002	0.0698	<0.0001	0.0019	0.0014	0.0005	<0.0005	0.005
46	13188-15-SW-077	0.0033	0.15	<0.0002	0.2032	0.0029	0.0103	<0.0005	<0.3	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0034	0.0003	0.0005	0.0015	0.0005	<0.0005	0.004
47	13188-15-SW-078	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	13188-15-SW-079	0.0009	0.04	<0.0002	0.0207	0.0029	0.0011	<0.0005	22.8	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.001	<0.0001	0.0008	0.0006	0.0008	<0.0005	0.002
49	13188-15-SW-080	0.0031	0.1	<0.0002	0.0131	0.0045	<0.0007	<0.0005	107.8	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0197	<0.0001	0.0021	0.1561	<0.0005	<0.0005	0.006
50	13188-15-SW-081	0.001	0.06	<0.0002	0.0033	0.0003	0.0014	<0.0005	20.7	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0026	<0.0001	<0.0001	<0.0005	0.0008	<0.0005	0.002
51	13188-15-SW-083	0.0006	0.06	<0.0002	0.0111	0.0036	<0.0007	<0.0005	11.7	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0016	<0.0001	0.0026	0.0008	<0.0005	<0.0005	0.005
52	13188-15-SW-120	0.0148	0.18	<0.0002	0.0186	0.0038	0.0018	0.0025	200	<0.0008	<0.002	0.0011	0.0006	<0.0006	0.0021	0.0009	0.016	<0.0005	<0.0005	0.033

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9 Resumen de análisis de aniones y metales disueltos de estaciones de agua inventariadas en temporada de avenida

N°	Código	Alcalinidad	CO3=	HCO3-	F-	Cl-	NO3-	SO4=	NO2-	Na_dis	Mg_dis	K_dis	Ca_dis	Sr_dis	Li_dis	SiO2_dis	Ag_dis	Al_dis	As_dis	B_dis	Ba_dis	Be_dis	Bi_dis	Cd_dis
1	13188-16-GW-001	110	<1	109	<0.2	0.9	<0.5	7.0	<0.5	4.1	10.1	5.3	20.8	0.2275	0.0085	40.4	<0.0003	<0.005	0.002	<0.05	0.0538	<0.0002	<0.0002	<0.0002
2	13188-16-GW-002	27	<1	26	<0.2	0.6	0.8	5.9	<0.5	3.5	1.3	2.2	6.8	0.0494	0.0013	38.0	<0.0003	0.008	0.001	<0.05	0.0110	<0.0002	<0.0002	<0.0002
3	13188-16-GW-003	15	<1	15	<0.2	0.6	2.2	9.9	<0.5	3.7	0.7	1.9	4.2	0.0307	0.0010	47.1	<0.0003	0.033	0.009	<0.05	0.0216	<0.0002	<0.0002	<0.0002
4	13188-16-GW-004	31	<1	31	<0.2	11.5	<0.5	271.9	<0.5	36.6	16.5	3.7	60.2	0.7688	0.0277	23.5	<0.0003	0.063	0.003	0.56	0.0255	<0.0002	<0.0002	<0.0002
5	13188-16-GW-005	379	4	375	1.3	203.6	<0.5	1103.2	<0.5	508.1	43.5	24.2	165.4	3.4004	1.0505	32.9	<0.0003	0.005	0.004	13.08	0.0190	<0.0002	<0.0002	<0.0002
6	13188-16-GW-007	178	<1	177	0.3	14.5	<0.5	439.5	<0.5	96.8	24.3	4.0	115.6	0.5256	0.2184	27.4	<0.0003	0.021	0.021	0.72	0.0072	<0.0002	<0.0002	<0.0002
7	13188-16-GW-008	17	<1	17	<0.2	0.9	0.6	8.7	<0.5	1.9	1.7	1.9	4.3	0.0408	<0.0004	17.3	<0.0003	0.008	<0.001	<0.05	0.0291	<0.0002	<0.0002	<0.0002
8	13188-16-GW-009	49	<1	48	<0.2	1.3	0.7	13.5	<0.5	3.1	3.1	2.2	14.2	0.1569	0.0030	25.5	<0.0003	0.006	0.003	0.07	0.1158	<0.0002	<0.0002	<0.0002
9	13188-16-GW-012	17	<1	17	<0.2	0.5	1.5	6.0	<0.5	2.7	1.4	1.7	4.5	0.0224	0.0022	32.5	<0.0003	0.010	0.001	<0.05	0.0089	<0.0002	<0.0002	<0.0002
10	13188-16-GW-014	<1	<1	<1	<0.2	8.7	<0.5	134.8	<0.5	8.0	16.2	3.9	13.0	0.0763	0.0285	103.8	<0.0003	0.026	0.006	0.10	0.0566	<0.0002	<0.0002	<0.0002
11	13188-16-GW-018	16	<1	16	<0.2	0.5	0.7	7.5	<0.5	2.1	0.7	0.8	5.4	0.0275	<0.0004	15.6	<0.0003	<0.005	<0.001	<0.05	0.0031	<0.0002	<0.0002	<0.0002
12	13188-16-GW-019	18	<1	18	<0.2	<0.2	<0.5	3.7	<0.5	1.0	1.2	1.9	2.9	0.0272	<0.0004	33.2	<0.0003	0.015	<0.001	<0.05	0.0194	<0.0002	<0.0002	<0.0002
13	13188-16-GW-020	61	<1	61	0.2	<0.2	<0.5	26.8	<0.5	3.5	5.8	1.6	15.8	0.2974	0.0041	4.3	<0.0003	<0.005	0.009	<0.05	0.0120	<0.0002	<0.0002	<0.0002
14	13188-16-GW-051	7	<1	7	<0.2	0.8	1.8	6.9	<0.5	2.2	0.7	1.6	2.3	0.0235	0.0008	27.2	<0.0003	0.016	<0.001	<0.05	0.0151	<0.0002	<0.0002	<0.0002
15	13188-16-SW-007	162	5	157	<0.2	1349.3	<0.5	260.2	<0.5	877.1	25.3	30.5	95.3	2.7395	1.1433	32.6	<0.0003	0.008	0.033	2.72	0.0391	<0.0002	<0.0002	0.002
16	13188-16-SW-045	48	<1	48	<0.2	0.9	<0.5	13.4	<0.5	4.1	1.9	1.7	15.3	<0.0005	<0.0004	26.7	<0.0003	<0.005	<0.001	<0.05	<0.0005	<0.0002	<0.0002	<0.0002
17	13188-16-SW-046	143	3	141	<0.2	1.1	<0.5	52.7	<0.5	12.2	9.8	3.2	45.4	0.1016	0.0179	21.7	<0.0003	0.019	0.003	0.09	0.0102	<0.0002	<0.0002	<0.0002
18	13188-16-SW-047	158	5	153	<0.2	1.2	<0.5	17.1	<0.5	8.9	15.1	2.7	32.3	0.2617	0.0080	24.9	<0.0003	0.007	0.004	0.11	0.0316	<0.0002	<0.0002	<0.0002
19	13188-16-SW-048	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	13188-16-SW-049	120	3	116	<0.2	1.1	<0.5	29.3	<0.5	5.6	8.2	3.1	35.9	0.1256	0.0070	17.3	<0.0003	0.011	0.001	0.09	0.0169	<0.0002	<0.0002	<0.0002
21	13188-16-SW-050	96	2	94	<0.2	0.9	<0.5	100.8	<0.5	8.1	10.8	2.8	40.8	0.3310	0.0058	27.1	<0.0003	0.013	0.011	0.08	0.0224	<0.0002	<0.0002	<0.0002
22	13188-16-SW-051	<1	<1	<1	0.6	0.3	<0.5	261.5	<0.5	9.0	6.7	2.9	36.7	0.2126	0.0040	57.2	<0.0003	15.500	<0.001	<0.05	0.0189	<0.0002	<0.0002	<0.0002
23	13188-16-SW-052	108	2	105	0.4	13.1	<0.5	250.2	<0.5	45.4	20.8	5.5	83.5	1.1141	0.0633	29.3	<0.0003	0.149	0.010	0.47	0.0324	<0.0002	<0.0002	<0.0002
24	13188-16-SW-053	118	2	116	0.3	0.4	<0.5	417.5	<0.5	5.2	22.5	4.3	138.0	4.5903	0.0380	31.7	<0.0003	0.016	0.018	0.09	0.0546	<0.0002	<0.0002	<0.0002
25	13188-16-SW-054	144	2	142	0.2	1.5	<0.5	65.2	<0.5	10.9	14.0	3.8	44.8	0.1605	0.0111	15.3	<0.0003	0.024	<0.001	0.16	0.0152	<0.0002	<0.0002	<0.0002
26	13188-16-SW-055	<1	<1	<1	0.5	0.4	<0.5	256.5	<0.5	9.2	10.8	3.6	56.1	0.6527	0.0123	49.0	<0.0003	14.154	<0.001	<0.05	0.0162	0.0006	<0.0002	<0.0002
27	13188-16-SW-056	104	1	103	<0.2	1.5	<0.5	56.6	<0.5	9.1	10.1	3.9	33.4	0.1753	0.0010	23.1	<0.0003	<0.005	0.012	0.05	0.0320	<0.0002	<0.0002	<0.0002
28	13188-16-SW-057	82	<1	81	<0.2	1.2	<0.5	19.7	<0.5	5.7	5.2	2.6	23.6	0.0740	<0.0004	30.2	<0.0003	<0.005	0.005	0.05	0.0198	<0.0002	<0.0002	<0.0002
29	13188-16-SW-058	107	<1	107	0.4	13.7	<0.5	254.8	<0.5	42.7	18.2	5.0	79.0	1.1774	0.0705	31.6	<0.0003	0.138	0.008	0.49	0.0305	<0.0002	<0.0002	<0.0002



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



30	13188-16-SW-059	181	5	176	<0.2	0.5	<0.5	72.8	<0.5	6.6	14.4	4.1	55.1	1.7601	0.0140	24.7	<0.0003	0.010	0.003	0.08	0.0320	<0.0002	<0.0002	<0.0002
31	13188-16-SW-060	<1	<1	<1	0.6	0.3	<0.5	268.7	<0.5	8.4	8.8	3.4	49.9	0.5503	0.0090	52.6	<0.0003	11.500	0.004	<0.05	0.0262	<0.0002	<0.0002	<0.0002
32	13188-16-SW-061	126	3	123	0.3	13.1	<0.5	238.9	<0.5	41.2	17.5	5.3	77.4	1.0944	0.0625	27.4	<0.0003	0.023	0.031	0.49	0.0357	<0.0002	<0.0002	<0.0002
33	13188-16-SW-062	131	2	129	0.2	1.7	<0.5	78.2	<0.5	11.0	12.8	4.2	48.6	0.1355	0.0083	18.4	<0.0003	<0.005	0.002	0.14	0.0249	<0.0002	<0.0002	<0.0002
34	13188-16-SW-063	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	13188-16-SW-064	93	<1	93	0.4	10.2	<0.5	256.2	<0.5	35.5	18.3	4.8	79.1	1.2328	0.0613	33.5	<0.0003	0.200	0.006	0.40	0.0300	<0.0002	<0.0002	<0.0002
36	13188-16-SW-065	132	2	130	0.4	1.5	<0.5	166.7	<0.5	20.2	24.0	6.0	44.6	0.1555	0.0204	17.8	<0.0003	0.014	0.002	0.15	0.0378	<0.0002	<0.0002	<0.0002
37	13188-16-SW-066	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	13188-16-SW-067	75	<1	75	<0.2	1.3	<0.5	22.7	<0.5	3.7	6.8	3.3	21.0	0.1134	0.0034	24.5	<0.0003	0.015	0.002	<0.05	0.0559	<0.0002	<0.0002	<0.0002
39	13188-16-SW-068	80	3	76	<0.2	0.7	<0.5	8.3	<0.5	6.9	6.7	3.1	15.2	0.1347	0.0079	20.5	<0.0003	0.011	0.001	<0.05	0.0345	<0.0002	<0.0002	<0.0002
40	13188-16-SW-069	30	<1	30	<0.2	0.3	<0.5	197.4	<0.5	9.8	11.0	2.4	58.2	0.4546	0.0060	41.0	<0.0003	0.046	0.002	<0.05	0.0232	<0.0002	<0.0002	<0.0002
41	13188-16-SW-070	<1	<1	<1	<0.2	0.2	<0.5	239.2	<0.5	7.0	5.8	2.4	33.0	0.2395	0.0053	46.8	<0.0003	14.400	<0.001	<0.05	0.0130	0.0006	<0.0002	0.0013
42	13188-16-SW-070A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	13188-16-SW-071	178	4	173	0.3	41.2	<0.5	303.1	<0.5	91.2	17.4	6.5	71.7	0.7851	0.1310	28.4	<0.0003	0.016	<0.001	0.10	0.0566	<0.0002	<0.0002	<0.0002
44	13188-16-SW-072	276	7	269	0.7	151.1	<0.5	828.9	<0.5	382.5	35.9	18.4	119.5	2.7507	0.7008	21.5	<0.0003	0.007	0.008	9.95	0.0676	<0.0002	<0.0002	<0.0002
45	13188-16-SW-073	<1	<1	<1	<0.2	12.5	1039.8	43.1	<0.5	16.5	5.5	2.1	16.4	0.1652	0.0096	23.5	<0.0003	0.017	<0.001	0.13	0.0204	<0.0002	<0.0002	<0.0002
46	13188-16-SW-074	<1	<1	<1	0.3	0.3	<0.5	275.2	<0.5	8.6	9.5	3.2	49.6	0.4986	0.0126	50.7	<0.0003	17.600	<0.001	<0.05	0.0223	0.0007	<0.0002	0.0016
47	13188-16-SW-075	251	4	246	0.9	3.8	<0.5	717.3	<0.5	30.3	54.4	8.4	252.7	5.1263	0.2626	33.9	<0.0003	0.029	0.082	0.22	0.1039	<0.0002	<0.0002	<0.0002
48	13188-16-SW-076	143	3	140	0.2	2.0	<0.5	219.4	<0.5	16.4	17.2	4.8	80.2	0.9285	0.0197	28.6	<0.0003	0.026	0.010	0.22	0.0022	<0.0002	<0.0002	<0.0002
49	13188-16-SW-077	18	<1	18	0.3	0.3	<0.5	205.6	<0.5	8.7	12.4	3.7	58.9	1.1217	0.0280	30.8	<0.0003	0.059	0.002	<0.05	0.0194	<0.0002	<0.0002	0.0002
50	13188-16-SW-078	99	1	98	0.2	10.1	<0.5	174.4	<0.5	31.6	11.6	3.2	51.2	0.4601	0.0270	28.8	<0.0003	0.059	0.019	0.30	0.0362	<0.0002	<0.0002	<0.0002
51	13188-16-SW-079	64	<1	63	<0.2	3.8	<0.5	64.2	<0.5	13.3	8.4	0.7	24.5	0.3067	0.0077	21.9	<0.0003	<0.005	0.001	0.21	0.0198	<0.0002	<0.0002	<0.0002
52	13188-16-SW-080	189	4	185	0.3	34.9	<0.5	302.4	<0.5	82.7	20.4	7.4	77.2	1.1844	0.1361	29.0	<0.0003	0.013	0.085	1.10	0.0635	<0.0002	<0.0002	<0.0002
53	13188-16-SW-081	38	<1	38	0.2	0.6	<0.5	46.9	<0.5	3.5	7.1	1.9	13.3	0.0816	0.0020	13.1	<0.0003	0.006	0.002	<0.05	0.0295	<0.0002	<0.0002	<0.0002
54	13188-16-SW-082	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	13188-16-SW-083	160	2	157	0.4	3.7	<0.5	16.5	<0.5	22.0	9.5	5.3	22.3	0.1906	0.0186	12.0	<0.0003	0.016	0.010	0.14	0.1514	<0.0002	<0.0002	<0.0002
56	13188-16-SW-120	128	3	124	<0.2	867.3	<0.5	250.7	<0.5	581.3	23.6	21.4	87.1	2.1467	0.8064	30.0	<0.0003	0.075	0.026	2.07	0.0413	<0.0002	<0.0002	<0.0002
57	13188-16-SW-147	289	28	261	0.7	12.7	<0.5	44.3	<0.5	64.3	25.1	23.9	22.2	0.3393	0.0287	1.9	<0.0003	0.015	0.008	0.46	0.0511	<0.0002	<0.0002	<0.0002
58	13188-16-SW-182	112	2	110	0.2	0.8	<0.5	215.9	<0.5	11.3	15.2	3.2	76.7	1.0392	0.0150	30.5	<0.0003	0.056	0.009	0.14	0.0443	<0.0002	<0.0002	<0.0002

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10 Resumen de análisis de metales disueltos de estaciones de agua inventariadas en temporada de avenida

N°	Código	Ce_dis	Co_dis	Cr_dis	Cu_dis	Fe_dis	Hg_dis	La_dis	Mn_dis	Mo_dis	Ni_dis	Pb_dis	S_dis	Sb_dis	Se_dis	Sn_dis	Th_dis	Ti_dis	Tl_dis	U_dis	V_dis	W_dis	Y_dis	Zn_dis	
1	13188-16-GW-001	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	2	<0.01	<0.020	2	2	0.0003	7	5	3.0	8	<0.002	5	2	6	1	0.0009	0.0085	5	5	<0.001
2	13188-16-GW-002	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	2	<0.01	<0.020	2	0.0002	2	7	5	2.9	8	<0.002	5	2	6	1	0.0001	0.0017	5	5	<0.001
3	13188-16-GW-003	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	2	0.02	<0.020	2	0.0005	2	7	5	3.5	8	<0.002	5	2	0.0020	1	1	0.0007	5	5	0.001
4	13188-16-GW-004	0.0003	0.0006	1	0.0013	0.39	<0.020	2	0.0793	0.0034	0.0008	5	91.6	8	<0.002	5	2	0.0012	1	0.0002	0.0008	5	5	0.002	
5	13188-16-GW-005	<0.000	<0.000	2	0.005	0.0009	<0.01	<0.020	2	0.0290	2	0.0031	5	416.2	8	<0.002	5	2	0.0034	1	1	5	0.0007	5	0.002
6	13188-16-GW-007	<0.000	<0.000	<0.000	2	0.0006	<0.01	<0.020	2	2	0.0076	0.0024	5	162.2	8	<0.002	5	2	0.0018	1	0.0017	0.0020	5	5	0.001
7	13188-16-GW-008	<0.000	<0.000	<0.000	2	0.0005	<0.01	<0.020	2	2	2	7	5	2.9	8	<0.002	5	2	0.0038	1	1	5	5	5	0.001
8	13188-16-GW-009	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	2	<0.01	<0.020	2	2	0.0005	7	5	4.5	8	<0.002	5	2	0.0024	1	0.0004	0.0018	5	5	0.002



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



9	13188-16-GW-012	<0.000	<0.000	<0.00	<0.000	<0.01	<0.020	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	2.6	<0.002	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	0.0011	5	5	<0.001
10	13188-16-GW-014	<0.000	0.0393	<0.00	<0.000	19.25	<0.020	<0.000	2.2558	0.0350	53.1	<0.002	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	0.0016	5	5	0.105
11	13188-16-GW-018	<0.000	<0.000	<0.00	<0.000	<0.01	<0.020	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	2.5	<0.002	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	0.0007	5	5	<0.001
12	13188-16-GW-019	0.0002	0.0011	1	0.0006	3.48	<0.020	<0.000	0.3661	0.0012	1.2	<0.002	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	0.0023	5	5	<0.001
13	13188-16-GW-020	<0.000	<0.000	<0.00	<0.000	0.13	<0.020	<0.000	0.0185	0.0008	10.6	<0.002	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	0.0008	5	5	<0.001
14	13188-16-GW-051	<0.000	<0.000	<0.00	<0.000	0.02	<0.020	<0.000	0.0011	2	7	4.4	<0.002	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	0.0016	5	5	0.003
15	13188-16-SW-007	<0.000	0.0004	0.03	0.0019	0.03	<0.020	<0.000	0.1943	0.0015	109.7	0.0008	<0.002	<0.000	<0.000	0.0037	0.001	0.0002	5	5	0.035
16	13188-16-SW-045	<0.000	<0.000	<0.00	<0.000	0.05	<0.020	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	5.1	<0.002	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	6	5	<0.001
17	13188-16-SW-046	<0.000	<0.000	<0.00	0.0017	0.01	<0.020	<0.000	0.0047	0.0008	0.0012	19.6	<0.002	<0.000	<0.000	0.0008	0.001	0.0023	5	5	0.001
18	13188-16-SW-047	<0.000	<0.000	<0.00	0.0011	0.01	<0.020	<0.000	0.0025	0.0005	0.0008	6.7	<0.002	<0.000	<0.000	6	1	0.001	0.0053	5	0.002
19	13188-16-SW-048	<0.000	<0.000	<0.00	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
20	13188-16-SW-049	<0.000	<0.000	<0.00	0.0011	0.02	<0.020	<0.000	0.0018	0.0003	0.0010	10.8	<0.002	<0.000	<0.000	6	1	0.0003	0.0012	5	0.001
21	13188-16-SW-050	<0.000	<0.000	<0.00	0.0017	0.03	<0.020	<0.000	0.0008	0.0009	0.0015	37.7	<0.002	<0.000	<0.000	0.0013	0.0002	0.0006	0.0008	5	0.002
22	13188-16-SW-051	<0.000	<0.000	<0.00	<0.000	2.34	<0.020	<0.000	1.0040	2	0.0030	87.8	<0.002	<0.000	<0.000	0.0039	0.0002	1	5	5	0.071
23	13188-16-SW-052	<0.000	0.0021	0.002	0.0017	<0.01	<0.020	<0.000	0.1489	0.0030	0.0049	96.7	<0.002	<0.000	<0.000	0.0031	0.0001	0.0009	0.0012	5	0.002
24	13188-16-SW-053	<0.000	0.0002	1	0.0010	<0.01	<0.020	<0.000	0.0023	0.0020	7	140.8	<0.002	<0.000	<0.000	0.0023	1	0.0006	0.0009	5	0.002
25	13188-16-SW-054	<0.000	<0.000	<0.00	0.0012	<0.01	<0.020	<0.000	0.0017	0.0012	0.0018	24.8	<0.002	<0.000	<0.000	0.0007	1	0.0005	5	5	0.002
26	13188-16-SW-055	0.0069	0.0156	1	0.0119	0.32	<0.020	0.0027	0.8021	2	0.0178	91.1	<0.002	<0.000	<0.000	0.0019	0.0001	0.0004	5	5	0.045
27	13188-16-SW-056	<0.000	<0.000	<0.00	0.0012	<0.01	<0.020	<0.000	0.0029	0.0066	7	21.7	<0.002	<0.000	<0.000	0.0009	0.0001	0.0014	0.0011	5	<0.001
28	13188-16-SW-057	<0.000	<0.000	<0.00	0.0009	<0.01	<0.020	<0.000	0.0032	0.0006	7	12.7	<0.002	<0.000	<0.000	0.0012	0.0001	0.0007	0.0015	5	0.003
29	13188-16-SW-058	<0.000	0.0037	1	0.0014	<0.01	<0.020	<0.000	0.2284	0.0031	0.0067	94.0	<0.002	<0.000	<0.000	0.0016	0.0001	0.0008	5	5	0.002
30	13188-16-SW-059	<0.000	<0.000	<0.00	0.0005	<0.01	<0.020	<0.000	0.0004	0.0008	7	24.9	<0.002	<0.000	<0.000	0.0018	1	0.0002	0.0021	5	0.001
31	13188-16-SW-060	<0.000	<0.000	<0.00	<0.000	0.49	<0.020	<0.000	0.8405	0.0003	7	89.8	<0.002	<0.000	<0.000	0.0053	0.0001	1	5	5	0.060
32	13188-16-SW-061	<0.000	0.0007	1	0.0011	<0.01	<0.020	<0.000	0.0370	0.0034	0.0032	118.8	<0.002	<0.000	<0.000	0.0014	1	0.001	0.0010	5	<0.001
33	13188-16-SW-062	<0.000	<0.000	<0.00	0.0009	<0.01	<0.020	<0.000	0.0016	0.0017	0.0012	28.4	<0.002	<0.000	<0.000	0.0008	1	0.0008	5	5	<0.001
34	13188-16-SW-063	<0.000	<0.000	<0.00	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000
35	13188-16-SW-064	<0.000	0.0044	1	0.0014	<0.01	<0.020	<0.000	0.2522	0.0031	0.0074	91.3	<0.002	<0.000	<0.000	0.0016	1	0.0007	5	5	0.002
36	13188-16-SW-065	<0.000	<0.000	<0.00	0.0009	0.01	<0.020	<0.000	0.0008	0.0069	0.0011	58.9	<0.002	<0.000	<0.000	0.0013	1	0.0011	5	5	0.003



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



5	13188-16-GW-005	514.6	43.6	24.5	167.0	3.5588	1.0723	34.2	<0.0003	0.012	0.006	15.91	0.0209	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.005	0.0009
6	13188-16-GW-007	97.0	25.2	4.1	122.0	0.5565	0.2190	27.6	<0.0003	0.029	0.034	0.86	0.0078	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0010
7	13188-16-GW-008	1.9	1.7	1.9	4.4	0.0430	0.0010	18.2	<0.0003	0.192	0.003	<0.05	0.0902	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0008
8	13188-16-GW-009	3.2	3.2	2.3	14.6	0.1672	0.0059	26.5	<0.0003	0.076	0.009	0.08	0.1506	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0006
9	13188-16-GW-012	2.8	1.4	1.7	4.7	0.0297	0.0023	33.6	<0.0003	0.012	0.002	<0.05	0.0108	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	<0.0005
10	13188-16-GW-014	8.8	17.3	5.0	14.2	0.1031	0.0484	125.1	<0.0003	6.177	0.658	0.11	0.1112	0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0037	0.0543	0.006	0.0070
11	13188-16-GW-018	2.3	0.7	0.9	5.6	0.0367	0.0010	16.8	<0.0003	0.094	<0.001	<0.05	0.0038	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0006
12	13188-16-GW-019	1.1	1.4	2.1	3.2	0.0293	0.0006	34.6	<0.0003	0.037	<0.001	<0.05	0.0230	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0003	0.0011	<0.001	0.0013
13	13188-16-GW-020	3.6	7.0	1.9	18.1	0.3221	0.0043	4.4	<0.0003	0.022	0.016	<0.05	0.0122	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	<0.0005
14	13188-16-GW-051	2.5	0.8	1.9	2.8	0.0260	0.0008	32.5	<0.0003	0.068	<0.001	<0.05	0.0157	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	<0.0005
15	13188-16-SW-007	934.9	26.1	33.8	95.5	2.9481	1.2372	33.0	<0.0003	0.048	0.040	3	0.0474	<0.0002	<0.0002	0.0002	<0.0002	0.0004	0.043	0.0021
16	13188-16-SW-045	4.2	2.0	1.9	16.2	0.0728	<0.0004	28.5	<0.0003	0.007	<0.001	<0.05	0.0271	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0010
17	13188-16-SW-046	12.3	10.1	3.2	47.2	0.1041	0.0183	22.0	<0.0003	0.148	0.005	0.11	0.0114	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0019
18	13188-16-SW-047	8.9	17.3	2.8	32.3	0.2682	0.0092	25.4	<0.0003	0.045	0.006	0.11	0.0326	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0011
19	13188-16-SW-048	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	13188-16-SW-049	5.8	8.6	3.2	37.8	0.1303	0.0072	17.7	<0.0003	0.023	0.003	0.11	0.0204	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0012
21	13188-16-SW-050	8.2	12.7	2.9	44.3	0.3373	0.0059	28.1	<0.0003	0.027	0.019	0.1	0.0260	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0017
22	13188-16-SW-051	10.1	6.8	2.9	37.7	0.2255	0.0061	61.4	<0.0003	15.712	0.003	0.16	0.0255	<0.0009	<0.0002	0.0003	0.0166	0.0262	<0.001	0.0159
23	13188-16-SW-052	48.6	21.6	6.0	84.1	1.1307	0.0645	34.0	<0.0003	3.142	0.016	0.55	0.0349	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0018	0.0036	0.002	0.0042
24	13188-16-SW-053	5.3	23.0	4.3	142.7	4.9790	0.0479	33.3	<0.0003	0.048	0.024	1.27	0.0588	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0006	0.012	0.0011
25	13188-16-SW-054	11.0	14.1	3.8	46.7	0.1608	0.0112	15.6	<0.0003	0.087	<0.001	0.2	0.0174	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0012
26	13188-16-SW-055	9.4	11.7	3.6	62.2	0.7061	0.0123	49.2	<0.0003	14.703	0.002	0.06	0.0167	<0.0009	<0.0002	0.0003	0.0075	0.0159	<0.001	0.0130
27	13188-16-SW-056	9.5	10.5	4.0	34.4	0.1840	0.0048	23.7	<0.0003	0.035	0.016	0.06	0.0329	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0016
28	13188-16-SW-057	6.1	5.6	2.7	23.8	0.0920	0.0030	31.4	<0.0003	0.165	0.006	0.05	0.0244	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0015
29	13188-16-SW-058	44.0	18.8	5.0	82.0	1.2478	0.0727	32.5	<0.0003	4.210	0.015	0.6	0.0309	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.002	0.0046	<0.001	0.0043
30	13188-16-SW-059	6.7	14.8	4.1	58.1	1.8643	0.0185	25.5	<0.0003	0.020	0.025	0.18	0.0519	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0013
31	13188-16-SW-060	8.6	9.0	3.5	51.8	0.5892	0.0116	55.1	<0.0003	11.600	0.004	0.11	0.0913	<0.0007	<0.0002	0.0002	0.013	0.0212	<0.001	0.0124
32	13188-16-SW-061	42.6	18.1	5.4	82.0	1.1815	0.0679	28.2	<0.0003	0.346	0.041	0.55	0.0368	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0009	<0.001	0.0016
33	13188-16-SW-062	11.5	13.9	4.4	49.9	0.1390	0.0086	19.0	<0.0003	0.025	0.002	0.14	0.0266	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0009
34	13188-16-SW-063	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	13188-16-SW-064	36.6	19.1	4.9	79.7	1.2533	0.0641	33.5	<0.0003	4.366	0.015	0.49	0.0308	0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0021	0.005	<0.001	0.0045
36	13188-16-SW-065	23.4	27.2	6.7	51.0	0.1986	0.0254	20.1	<0.0003	0.095	0.002	0.15	0.0395	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0015
37	13188-16-SW-066	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	13188-16-SW-067	3.9	7.1	3.4	21.5	0.1154	0.0044	25.3	<0.0003	0.562	0.002	0.06	0.0565	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0005	<0.0002	<0.001	0.0017
39	13188-16-SW-068	7.1	6.7	3.2	15.3	0.1370	0.0079	20.6	<0.0003	0.202	0.002	0.05	0.0386	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0013
40	13188-16-SW-069	10.6	11.6	2.7	58.9	0.4951	0.0069	42.4	<0.0003	2.144	0.003	<0.05	0.0265	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0025	0.0031	<0.001	0.0018
41	13188-16-SW-070	7.5	6.7	2.7	37.0	0.2590	0.0064	49.2	<0.0003	16.800	0.004	<0.05	0.0141	0.0008	<0.0002	0.0016	0.008	0.0398	0.007	0.0161
42	13188-16-SW-070A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	13188-16-SW-071	93.1	17.9	6.5	74.3	0.8523	0.1552	30.2	<0.0003	0.037	0.131	1.57	0.0876	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0003	0.001	0.0013
44	13188-16-SW-072	388.5	36.1	19.2	125.6	2.7862	0.7173	22.7	<0.0003	0.029	0.011	11.68	0.0725	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0003	0.005	0.0016
45	13188-16-SW-073	17.3	5.8	2.2	16.5	0.1963	0.0121	24.0	<0.0003	0.051	<0.001	0.13	0.0230	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0011
46	13188-16-SW-074	8.9	10.3	3.3	51.5	0.5527	0.0157	51.1	<0.0003	18.000	0.006	<0.05	0.0239	0.001	<0.0002	0.0019	0.0098	0.0463	0.007	0.0166
47	13188-16-SW-075	32.2	57.9	8.9	255.2	6.2283	0.3267	40.7	<0.0003	0.032	0.113	0.24	0.1044	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0005	0.002	0.0045
48	13188-16-SW-076	16.5	17.2	4.9	82.4	0.9580	0.0198	29.8	0.0006	0.058	0.011	1.35	0.0519	0.0017	0.002	0.0022	0.0021	0.0015	0.017	0.0019
49	13188-16-SW-077	9.2	12.9	3.8	61.3	1.1248	0.0281	36.8	<0.0003	6.349	0.011	0.06	0.0198	<0.0002	<0.0002	0.0002	0.0015	0.0076	0.002	0.0044
50	13188-16-SW-078	31.8	11.7	3.3	52.5	0.4758	0.0295	29.7	<0.0003	0.106	0.032	1.44	0.0693	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0004	0.015	0.0012
51	13188-16-SW-079	13.3	8.6	0.9	24.5	0.3311	0.0081	23.2	<0.0003	0.018	0.002	0.26	0.0204	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0009



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



52	13188-16-SW-080	91.4	23.4	8.7	82.2	1.4382	0.1591	31.2	<0.0003	0.039	0.124	1.11	0.0654	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0003	<0.001	0.0017
53	13188-16-SW-081	3.6	7.5	1.9	14.0	0.0866	0.0038	14.3	<0.0003	0.648	0.005	0.06	0.0661	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0002	<0.0002	<0.001	0.0018
54	13188-16-SW-082	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	13188-16-SW-083	24.4	10.6	5.7	24.4	0.1974	0.0198	12.4	<0.0003	0.131	0.015	0.18	0.1592	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0003	<0.001	0.0011
56	13188-16-SW-120	630.9	24.3	23.5	88.0	2.2178	0.8772	31.6	<0.0003	1.042	0.029	2.31	0.0464	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0006	0.0012	0.034	0.0024
57	13188-16-SW-147	65.5	25.5	24.0	22.3	0.3563	0.0295	1.9	<0.0003	0.023	0.014	0.56	0.0576	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	0.0005
58	13188-16-SW-182	11.4	15.2	3.3	78.5	1.0710	0.0184	32.0	<0.0003	0.500	0.019	1.41	0.0683	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0007	0.0007	0.012	0.0013

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 12 Resumen de análisis de metales totales de estaciones de agua inventariadas en temporada de avenida

N°	Código	Fe_tot	Hg_tot	La_tot	Mn_tot	Mo_tot	Ni_tot	Pb_tot	S_tot	Sb_tot	Se_tot	Sn_tot	Th_tot	Ti_tot	Tl_tot	U_tot	V_tot	W_tot	Y_tot	Zn_tot
1	13188-16-GW-001	0.04	<0.020	<0.0002	0.0010	0.0004	<0.0007	<0.0005	3.2	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0037	<0.0001	0.0009	0.0087	<0.0005	<0.0005	0.001
2	13188-16-GW-002	0.01	<0.020	<0.0002	0.0005	<0.0002	<0.0007	<0.0005	3.0	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0013	<0.0001	0.0001	0.0017	<0.0005	<0.0005	0.001
3	13188-16-GW-003	9.91	<0.020	<0.0002	0.0017	<0.0002	<0.0007	<0.0005	3.8	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0028	<0.0001	<0.0001	0.0011	<0.0005	<0.0005	0.001
4	13188-16-GW-004	271.86	<0.020	0.0002	0.0895	0.0035	0.0013	<0.0005	96.8	0.0009	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0022	<0.0001	0.0003	0.0012	<0.0005	<0.0005	0.004
5	13188-16-GW-005	<0.01	<0.020	<0.0002	0.0303	<0.0002	0.0037	<0.0005	498.9	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0038	<0.0001	<0.0001	<0.0005	0.0007	<0.0005	0.002
6	13188-16-GW-007	<0.01	<0.020	<0.0002	0.0007	0.0078	0.0028	<0.0005	174.5	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0023	<0.0001	0.0018	0.0021	<0.0005	<0.0005	0.002
7	13188-16-GW-008	0.03	<0.020	<0.0002	0.0008	0.0004	<0.0007	0.0005	3.4	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0038	<0.0001	0.0005	0.0006	<0.0005	<0.0005	0.002
8	13188-16-GW-009	0.02	<0.020	<0.0002	0.0015	0.0009	<0.0007	<0.0005	5.1	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0024	<0.0001	0.0046	0.0027	<0.0005	<0.0005	0.003
9	13188-16-GW-012	<0.01	<0.020	<0.0002	0.0004	0.0012	<0.0007	<0.0005	2.8	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	<0.0006	<0.0001	<0.0001	0.0012	<0.0005	<0.0005	0.003
10	13188-16-GW-014	250.31	<0.020	0.0013	3.1697	0.01	0.0512	0.0051	88.6	<0.0008	<0.002	0.0005	0.001	0.1326	0.0003	0.0002	0.0135	<0.0005	0.0023	0.205
11	13188-16-GW-018	0.03	<0.020	<0.0002	0.0050	<0.0002	<0.0007	<0.0005	3.5	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0017	<0.0001	<0.0001	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.002
12	13188-16-GW-019	3.66	<0.020	<0.0002	0.4063	<0.0002	0.0017	<0.0005	1.4	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0034	<0.0001	0.0003	0.0016	<0.0005	<0.0005	0.002
13	13188-16-GW-020	26.79	<0.020	<0.0002	0.0210	0.0009	<0.0007	<0.0005	10.7	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0008	<0.0001	<0.0001	0.0009	<0.0005	<0.0005	<0.001
14	13188-16-GW-051	0.05	<0.020	<0.0002	0.0015	<0.0002	<0.0007	<0.0005	4.4	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0024	<0.0001	<0.0001	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.007
15	13188-16-SW-007	0.01	0.022	<0.0002	0.1997	0.0017	0.0029	<0.0005	111.1	0.001	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0070	0.0013	0.0003	<0.0005	0.0006	<0.0005	0.039
16	13188-16-SW-045	0.06	<0.020	<0.0002	0.0029	0.0003	<0.0007	<0.0005	5.3	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0013	<0.0001	0.0002	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.002
17	13188-16-SW-046	0.06	<0.020	<0.0002	0.0074	0.0008	0.0014	<0.0005	20.5	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0036	<0.0001	0.0011	0.0023	<0.0005	<0.0005	0.002
18	13188-16-SW-047	0.02	<0.020	<0.0002	0.0043	0.0006	0.0008	<0.0005	7.3	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0019	<0.0001	0.0011	0.0053	<0.0005	<0.0005	0.003
19	13188-16-SW-048	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	13188-16-SW-049	0.03	<0.020	<0.0002	0.0019	0.0003	0.0010	<0.0005	11.6	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0009	<0.0001	0.0003	0.0014	<0.0005	<0.0005	0.007
21	13188-16-SW-050	0.06	<0.020	<0.0002	0.0013	0.001	0.0015	<0.0005	40.5	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0013	0.0002	0.0007	0.0009	<0.0005	<0.0005	0.002
22	13188-16-SW-051	2.35	<0.020	0.0064	1.2339	<0.0002	0.0236	<0.0005	88.4	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0039	0.0002	0.0004	<0.0005	<0.0005	0.0117	0.098
23	13188-16-SW-052	35.44	<0.020	0.0007	0.1814	0.0035	0.0068	<0.0005	101.6	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0038	0.0001	0.0009	0.0012	<0.0005	0.0016	0.017
24	13188-16-SW-053	0.02	<0.020	<0.0002	0.0036	0.0268	0.0011	<0.0005	149.0	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0023	<0.0001	0.0008	0.0012	<0.0005	<0.0005	0.004
25	13188-16-SW-054	0.06	<0.020	<0.0002	0.0027	0.0012	0.0018	<0.0005	27.9	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0016	<0.0001	0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.002
26	13188-16-SW-055	1.47	<0.020	0.003	0.8603	0.0005	0.0187	<0.0005	104.8	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0058	0.0001	0.0004	0.0005	<0.0005	0.0074	0.086
27	13188-16-SW-056	0.02	<0.020	<0.0002	0.0043	0.0074	0.0011	<0.0005	24.6	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0017	0.0002	0.0015	0.0014	<0.0005	<0.0005	0.001
28	13188-16-SW-057	0.04	<0.020	<0.0002	0.0093	0.0007	0.0010	0.0006	13.2	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0044	0.0001	0.0009	0.0022	<0.0005	<0.0005	0.006
29	13188-16-SW-058	0.38	<0.020	0.0008	0.2363	0.0031	0.0074	0.0039	112.6	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0035	0.0001	0.001	0.0008	<0.0005	0.0021	0.014
30	13188-16-SW-059	<0.01	<0.020	<0.0002	0.0013	0.0083	<0.0007	<0.0005	25.1	<0.0008	<0.002	0.0006	<0.0002	0.0018	<0.0001	0.0029	0.0029	<0.0005	<0.0005	0.002
31	13188-16-SW-060	1.02	<0.020	0.0052	1.0150	0.0009	0.0209	<0.0005	92.8	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0053	0.0001	0.0004	<0.0005	<0.0005	0.0094	0.079
32	13188-16-SW-061	0.13	<0.020	<0.0002	0.0525	0.004	0.0043	<0.0005	120.5	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0024	0.0001	0.0011	0.0012	<0.0005	<0.0005	0.003
33	13188-16-SW-062	0.02	<0.020	<0.0002	0.0021	0.0018	0.0012	<0.0005	32.6	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0011	<0.0001	0.0008	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001
34	13188-16-SW-063	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



**“HIDROGEOQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES
EN LA MICROCUENCA CRUCERO, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO TAMBO”**



35	13188-16-SW-064	0.42	<0.020	0.0008	0.2533	0.0033	0.0079	<0.0005	110.7	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0037	0.0001	0.001	0.0009	<0.0005	0.0023	0.014
36	13188-16-SW-065	0.11	<0.020	<0.0002	0.0026	0.0082	0.0011	<0.0005	60.0	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0025	<0.0001	0.0011	0.0005	<0.0005	<0.0005	0.004
37	13188-16-SW-066	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	13188-16-SW-067	0.22	<0.020	0.0003	0.0225	0.0004	0.0007	0.0007	9.4	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0128	<0.0001	0.0002	0.0023	<0.0005	<0.0005	0.003
39	13188-16-SW-068	0.18	<0.020	<0.0002	0.0089	0.0003	<0.0007	<0.0005	3.8	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0062	<0.0001	0.0003	0.0037	<0.0005	<0.0005	0.001
40	13188-16-SW-069	197.44	<0.020	0.001	0.3275	0.0009	0.0042	<0.0005	69.2	<0.0008	<0.002	0.0006	<0.0002	0.0023	<0.0001	0.0003	0.0006	<0.0005	0.0017	0.015
41	13188-16-SW-070	239.21	<0.020	0.0031	1.3330	<0.0002	0.0579	<0.0005	103.6	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0051	0.001	0.0004	0.0045	<0.0005	0.0095	0.085
42	13188-16-SW-070A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	13188-16-SW-071	0.05	<0.020	<0.0002	0.0695	0.0032	0.0007	<0.0005	106.6	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0022	<0.0001	0.0018	0.0013	<0.0005	<0.0005	0.002
44	13188-16-SW-072	0.15	<0.020	<0.0002	0.0226	0.0008	0.0034	<0.0005	346.4	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0030	0.0001	0.0005	0.0008	<0.0005	<0.0005	0.003
45	13188-16-SW-073	0.01	<0.020	<0.0002	0.0022	0.0003	0.0010	<0.0005	16.9	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0010	<0.0001	<0.0001	0.0013	0.0009	<0.0005	0.001
46	13188-16-SW-074	275.23	<0.020	0.0039	1.5589	0.0009	0.0639	<0.0005	110.7	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0060	0.0009	0.0006	0.0069	<0.0005	0.0116	0.096
47	13188-16-SW-075	0.02	<0.020	<0.0002	0.0050	0.0261	0.0016	<0.0005	273.0	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0039	<0.0001	0.0055	0.0069	<0.0005	<0.0005	0.007
48	13188-16-SW-076	0.05	<0.020	0.0019	0.0201	0.0034	0.0017	0.0021	77.5	<0.0008	0.019	0.0024	0.0022	0.0021	0.0021	0.0021	0.0018	0.0029	0.0018	0.018
49	13188-16-SW-077	2.73	<0.020	0.0006	0.4410	0.0023	0.0130	<0.0005	87.8	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0066	0.0002	0.0003	0.0020	<0.0005	0.0022	0.011
50	13188-16-SW-078	0.05	<0.020	<0.0002	0.0459	0.0027	0.0009	<0.0005	65.6	<0.0008	<0.002	0.0007	<0.0002	0.0029	0.0002	0.0014	0.0019	<0.0005	<0.0005	0.005
51	13188-16-SW-079	64.22	<0.020	<0.0002	0.0140	0.0022	<0.0007	0.0046	22.9	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0010	<0.0001	0.0002	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001
52	13188-16-SW-080	0.05	<0.020	<0.0002	0.0238	0.0049	0.0010	<0.0005	129.2	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0026	<0.0001	0.002	0.0019	<0.0005	<0.0005	0.004
53	13188-16-SW-081	0.08	<0.020	<0.0002	0.0040	0.0005	0.0011	<0.0005	16.5	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0088	<0.0001	0.0002	0.0008	<0.0005	<0.0005	0.002
54	13188-16-SW-082	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	13188-16-SW-083	16.45	<0.020	<0.0002	0.0593	0.0029	<0.0007	<0.0005	7.3	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0020	<0.0001	0.0019	0.0010	<0.0005	<0.0005	0.001
56	13188-16-SW-120	56.65	<0.020	0.0002	0.1316	0.0023	0.0037	<0.0005	111.5	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0056	0.0008	0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005	0.022
57	13188-16-SW-147	0.01	<0.020	<0.0002	0.0173	0.0008	0.0007	<0.0005	19.4	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0012	<0.0001	0.0009	0.0014	<0.0005	<0.0005	0.001
58	13188-16-SW-182	0.29	<0.020	0.0003	0.0888	0.0028	0.0016	<0.0005	79.0	<0.0008	<0.002	<0.0005	<0.0002	0.0072	<0.0001	0.0007	0.0013	<0.0005	<0.0005	0.005

Fuente: Elaboración propia.