

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA**



## **TESIS**

**“EVALUACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LA SUBCUENCA HORNILLOS ALTO PARA DETERMINAR EL ORIGEN DE MATERIAL CONTAMINANTE PARA ENCONTRAR ZONAS APTAS DE USO AGROPECUARIO-AREQUIPA”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO GEÓLOGO**

**ELABORADO POR  
ALONSO OTINIANO ZAVALA**

**ASESOR  
M.Sc. ING. ESTEBAN DIONICIO MANRIQUE ZÚÑIGA**

**Lima - Perú  
2023**

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo a mi familia  
por el apoyo constante en mi  
desarrollo profesional como  
ingeniero que cultiva el amor  
por el conocimiento y la  
naturaleza.*

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Nacional de Ingeniería, por formarme para ser un profesional de nivel mundial dispuesto a contribuir con el crecimiento del país.

De igual manera, al equipo de Línea Base Geoambiental del INGEMMET, en especial al Ing. Jhonn Ortiz y a la Ing. Mary Carrasco, compañeros y guías de trabajo, por el apoyo en todo el proceso del desarrollo de esta tesis.

Finalmente, a mi compañero Joseps Andrade por sus brillantes ideas y consejos geomatemáticos brillantes.

## RESUMEN

El presente trabajo se realizó en la subcuenca Hornillos Alto – Arequipa e integra información geológica y antrópica con el fin de obtener la calidad de aguas superficiales, y determinar el origen de fuentes contaminantes y zonas para uso agropecuario mediante el análisis estadístico geo-temporal univariante y multivariante.

La parte teórica se llevó a cabo referenciándose en trabajos nacionales e internacionales relacionados con el tema tratado, además de las consideraciones conceptuales en geología y geomorfología, hidroquímica, estándares de calidad ambiental y estadística.

La geología de la subcuenca se compone principalmente de rocas volcánicas de edad Cenozoica (aproximadamente 90%) y la sedimentación Jurásica y Cretácica restringida a esporádicos afloramientos (aproximadamente 10%), remarcando la importancia de afloramientos volcánicos.

El análisis hidroquímico determina para la temporada de avenida tendencias de desviación menores de la concentración de elementos mayoritarios y parámetros físico químicos, mientras que la temporada de estiaje presenta un comportamiento inverso, lo cual marca que la carga contaminante es más activa en la temporada de estiaje. Los valores de correlación de concentración de elementos pesados determinan que las fuentes contaminantes se originan en la parte baja de la microcuenca Apurímac 1, en menor medida en la microcuenca Apurímac 2, y no se encuentran fuentes contaminantes en la microcuenca Hornillos.

Las distribuciones de los elementos mayoritarios y las concentraciones de metales pesados potencialmente contaminantes son lognormales, y tienden a aumentar

para la temporada de estiaje y a disminuir en temporada de avenida, a partir de la cual se ubican hacia valores medianos.

El análisis bivariado y de componentes principales determinó asociaciones de alta covarianza con respecto a factores geológicos del Grupo Tacaza y las Formaciones Labra, Ichocollo, Orcopampa y factores antrópicos de las actividades realizadas en la microcuenca Apurímac1 que determinan posibles fuentes contaminantes.

Se identificaron dos zonas aptas para uso agropecuario (excelente calidad acuífera) encontrándose la primera en la microcuenca Hornillos Alto y, la segunda en la parte alta de la microcuenca Apurímac 1. La microcuenca Hornillos Alto y, Apurímac 1 no superan los estándares de Calidad (ECAs) y *Hazard Quantite* (HQ), además geo-espacialmente, los valores multivariados son clasificados de moderados a bajos y los factores de balance geológico no están asociados a zonas de alteración detectadas ni estructuras con alto fallamiento, minas cercanas o pasivos ambientales.

Finalmente, se realizó la propuesta ingenieril para poder tomar medidas de acción en el proceso de identificación a escala de detalle de fuentes contaminantes y el posible proceso de remediación para poder detener la contaminación en la Subcuenca.

## ABSTRACT

This work was carried out in the Hornillos Alto - Arequipa sub-basin and integrates geological and anthropic information in order to obtain surface water quality, and determine the origin of contaminating sources and areas for agricultural and livestock use by means of univariate and multivariate geo-temporal statistical analysis.

The theoretical part was carried out by referencing national and international works related to the following thesis, in addition to conceptual considerations in geology and geomorphology, hydrochemistry, environmental quality standards and statistics.

The geology of the sub-basin is mainly composed of volcanic rocks of Cenozoic age (approximately 90%) and Jurassic and Cretaceous sedimentation restricted to sporadic outcrops (approximately 10%), emphasizing the importance of volcanic outcrops.

The hydrochemical analysis determines for the flood season minor deviation trends in the concentration of major elements and physical-chemical parameters, while the dry season shows an inverse behavior, which indicates that the pollutant load is more active in the dry season. The correlation values of the concentration of heavy elements determine that the polluting sources originate in the lower part of the Apurimac 1 micro-watershed, to a lesser extent in the Apurimac 2 micro-watershed, and no polluting sources are found in the Hornillos micro-watershed.

The distributions of the majority elements and the concentrations of potentially contaminating heavy metals are lognormal, and tend to increase during the dry season and decrease during the flood season, after which they move towards medium values.

The bivariate and principal component analysis determined associations of high covariance with respect to geological factors of the Tacaza Group and the Labra, Ichocollo, Orcopampa Formations and anthropic factors of the activities carried out in the Apurimac1 micro-watershed that determine possible contaminating sources.

Two zones suitable for agricultural use (excellent aquifer quality) were identified, the first in the Hornillos Alto micro-watershed and the second in the upper part of the Apurimac 1 micro-watershed. The Hornillos Alto and Apurimac 1 micro-watersheds do not exceed the quality standards (ECAs) and Hazard Quantite (HQ), in addition, geo-spatially, the multivariable values are classified as moderate to low and the geological balance factors are not associated with detected alteration zones or structures with high faulting, nearby mines or environmental liabilities.

Finally, an engineering proposal was made to be able to take action measures in the process of identification at a detailed scale of contaminant sources and the possible remediation process to stop contamination in the sub-basin.

## ÍNDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Ubicación y accesibilidad	1
1.2 Clima, temperatura e hidrografía	4
1.3 Planteamiento del problema	6
1.3.1 Situación problemática	6
1.3.2 Formulación del problema	7
1.3.3 Justificación de la investigación	7
1.4 Objetivos	7
1.4.1 General	7
1.4.2 Específicos	8
1.5 Hipótesis	8
1.5.1 General	8
1.5.2 Específicas	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	9
2.1 Antecedentes referenciales	9

2.1.1	Antecedentes internacionales	9
2.1.2	Antecedentes nacionales	10
2.2	Geología y geomorfología	13
2.3	Hidroquímica	14
2.4	Estándares de Calidad Ambiental (ECA)	14
2.5	Estadística	15
CAPÍTULO III: MARCO GEOLÓGICO		17
3.1	Geomorfología	18
3.2	Estratigrafía	23
3.2.1	Mesozoico	23
3.2.2	Cenozoico	28
3.2.3	Depósitos Cuaternarios	32
3.3	Geología estructural	35
3.4	Minas en el área de estudio	36
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICO - QUÍMICOS E HIDROQUÍMICOS		39
4.1	Metodología y recolección de información	39
4.2	Estaciones de muestreo y aforo (Avenida/Estiaje)	40
4.3	QA/QC hidroquímico (Estiaje/Avenida)	43
4.4	Hidroquímica	44
4.4.1	Iones mayoritarios	45
4.4.2	Caracterización hidroquímica	49
4.4.3	Diagrama de Gibbs	58
4.4.4	Parámetros físico-químicos	61

CAPÍTULO V: ANÁLISIS ESTADÍSTICO GEOAMBIENTAL DEL RECURSO HÍDRICO	76
5.1 Análisis estadístico univariante de pH-Ce y elementos disueltos potencialmente contaminantes	76
5.1.1 Potencial de hidrógeno (pH)	80
5.1.2 Conductividad eléctrica (Ce)	83
5.1.3 Análisis de elementos potencialmente contaminantes (Al, As, B, Ba, Cu, Fe, Mn, Pb, Ti y Zn)	86
5.2 Análisis de hazard quantite (HQ)-estándares de calidad ambiental (ECAs) por microcuenca en ambas temporadas	108
5.3 Análisis multivariado tempo-espacial	119
5.3.1 Análisis bivariado (AB)	119
5.3.2 Análisis de componentes principales (ACP)	130
CAPÍTULO VI: INTEGRACIÓN DE RESULTADOS Y GENERACIÓN DE MAPA CLUSTERIZADO	138
6.1 Fuentes de origen contaminante	138
6.2 Generación de mapa geoambiental basado en comportamiento multivariable clusterizado	139
CAPÍTULO VII: PROPUESTA INGENIERIL	142
7.1 Soluciones ingenieriles	142
CONCLUSIONES	146
RECOMENDACIONES	149
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Ubicación de la zona de estudio	3
Figura 1.2	Tipos de climas en la subcuenca Hornillos Alto	5
Figura 1.3	Estaciones meteorológicas: La Angostura (SENAMHI, 2020)	6
Figura 3.1	Relieve característico por zonas: subcuenca Hornillos Alto	19
Figura 3.2	Áreas ocupadas según tipo de subunidad geomorfológica	20
Figura 3.3	Trabajo de campo cercano a la quebrada Pesccomayo	21
Figura 3.4	Trabajo de campo en la quebrada Pausa Huayo	21
Figura 3.5	Geomorfología de la subcuenca Hornillos Alto	22
Figura 3.6	Columna estratigráfica de la subcuenca Hornillos Alto	24
Figura 3.7	Mapa geológico de la subcuenca Hornillos Alto	25
Figura 3.8	Areniscas cuarzosas de la Formación Labra	27
Figura 3.9	Areniscas cuarzosas de la Formación Labra (Grupo Yura)	28
Figura 3.10	Reconocimiento de afloramientos volcánicos del Grupo Tacaza	31
Figura 3.11	Reconocimiento de diques andesíticos cortando secuencias volcánicas alterando roca caja	32
Figura 3.12	Reconocimiento de depósitos cuaternarios ubicados al margen de los ríos en formas de terrazas aluviales	33
Figura 3.13	Quebrada Utahuanta se encuentran lavas andesíticas afaníticas del Complejo Volcánico Cosana	34
Figura 3.14	Trabajo de campo río Mismi presentando extensas terrazas aluviales con depósitos fluvioglaciares	34
Figura 3.15	Trabajo de campo en la quebrada Callampure presentando	

	depósitos cuaternarios en la base del río	34
Figura 3.16	Reconocimiento de campo de areniscas cuarzosas de la Formación Labra en contacto fallado (NO-SE)	35
Figura 3.17	Reconocimiento de campo de areniscas cuarzosas de la Formación Labra completamente deformadas	36
Figura 4.1	Inventario de las fuentes en la subcuenca Hornillos Alto.	41
Figura 4.2	Sección transversal del río Hornillos	42
Figura 4.3	Sección transversal del río Apurímac	43
Figura 4.4	Análisis de errores de balance iónico en avenida y estiaje	44
Figura 4.5	Variación de iones mayoritarios en la microcuenca Hornillos - temporada de avenida	46
Figura 4.6	Variación de iones mayoritarios en la microcuenca Hornillos - temporada de estiaje	46
Figura 4.7	Variación de iones mayoritarios en la microcuenca Apurímac 1 - temporada de avenida	48
Figura 4.8	Variación de iones mayoritarios en la microcuenca Apurímac 1 - temporada de estiaje	48
Figura 4.9	Variación de iones mayoritarios en la microcuenca Apurímac 2 - temporada de avenida	49
Figura 4.10	Variación de iones mayoritarios en la microcuenca Apurímac 2 - temporada de estiaje	49
Figura 4.11	Proporción porcentual de facies hidroquímicas de la subcuenca Hornillos Alto en ambas temporadas	51
Figura 4.12	Diagrama Piper de la subcuenca Hornillos Alto en	

	avenida y estiaje en ambas temporadas	51
Figura 4.13	Estación de muestreo SW-040 en la temporada de avenida	53
Figura 4.14	Estación de muestreo GW-040 en estiaje	57
Figura 4.15	Diagrama de Gibbs para la microcuenca Hornillos	59
Figura 4.16	Diagrama de Gibbs para la microcuenca Apurímac 1	60
Figura 4.17	Diagrama de Gibbs para la microcuenca Apurímac 2	61
Figura 4.18	Variación del pH para la microcuenca Hornillos	64
Figura 4.19	Variación de la CE para la microcuenca Hornillos	65
Figura 4.20	Variación de la salinidad para la microcuenca Hornillos	65
Figura 4.21	Variación de la temperatura para la microcuenca Hornillos	66
Figura 4.22	Estación de muestreo SW-097 en temporada de avenida	67
Figura 4.23	Variación del pH para la microcuenca Apurímac 1	68
Figura 4.24	Estación de muestreo SW-097 en temporada de estiaje	69
Figura 4.25	Variación de la CE para la microcuenca Apurímac 1	69
Figura 4.26	Variación de la salinidad para la microcuenca Apurímac 1	70
Figura 4.27	Variación de la temperatura para la microcuenca Apurímac 1	71
Figura 4.28	Variación del pH para la microcuenca Apurímac 2	71
Figura 4.29	Variación de la CE para la microcuenca Apurímac 2 en avenida y estiaje	72
Figura 4.30	Variación de la salinidad para la microcuenca Apurímac 2 en avenida y estiaje	73
Figura 4.31	Variación de la temperatura para la microcuenca Apurímac 2 en avenida y estiaje	73
Figura 4.32	Mapa hidroquímico de la subcuenca Hornillos Alto	75

Figura 5.1	Gráficos de distribución y test de normalidad pH	80
Figura 5.2	Gráficos de distribución y test de normalidad Ce	83
Figura 5.3	Gráficos de distribución y test de normalidad Al	86
Figura 5.4	Gráficos de distribución y test de normalidad As	88
Figura 5.5	Gráficos de distribución y test de normalidad B	91
Figura 5.6	Gráficos de distribución y test de normalidad Ba	93
Figura 5.7	Gráficos de distribución y test de normalidad Cu	96
Figura 5.8	Gráficos de distribución y test de normalidad Fe	98
Figura 5.9	Gráficos de distribución y test de normalidad Mn	100
Figura 5.10	Gráficos de distribución y test de normalidad Pb	103
Figura 5.11	Gráficos de distribución y test de normalidad Ti	105
Figura 5.12	Gráficos de distribución y test de normalidad Zn	107
Figura 5.13	Estándares de calidad ambiental, categoría 3: riego de vegetales (D1) y bebida de animales (D2)	109
Figura 5.14	HQ para la temporada de avenida y estiaje en Hornillos Alto	110
Figura 5.15	HQ para la temporada de avenida y estiaje según microcuenca	112
Figura 5.16	Límites de ECA D1-D2 según temporada – microcuenca – clase de fuente (As, B, Cr, Li)	113
Figura 5.17	Límites de ECA D1-D2 según temporada – microcuenca – clase de fuente (Mn, $\text{HCO}_3^-$ , Cl)	114
Figura 5.18	Límites de ECA D1-D2 según temporada – microcuenca – clase de fuente (Ce, pH, OD)	115
Figura 5.19	Plot de correlación de parámetros físico-químicos según temporada (Ce log)	120

Figura 5.20	Plot de correlación de parámetros físico-químicos de avenida según distribución espacial (microcuenca)	121
Figura 5.21	Plot de correlación de parámetros físico-químicos de estiaje según distribución espacial (microcuenca)	122
Figura 5.22	Plot de correlación de elementos mayoritarios según Temporada	124
Figura 5.23	Plot de correlación de elementos mayoritarios de avenida según distribución espacial (microcuenca)	125
Figura 5.24	Plot de correlación de elementos mayoritarios de estiaje según distribución espacial (microcuenca)	126
Figura 5.25	Plot de correlación de elementos potencialmente tóxicos según temporada	127
Figura 5.26	Plot de correlación de elementos potencialmente tóxicos de avenida según distribución espacial	128
Figura 5.27	Plot de correlación de elementos potencialmente tóxicos de estiaje según distribución espacial	129
Figura 5.28	Porcentaje de varianza explicada según los componentes principales	131
Figura 5.29	Porcentaje de varianza explicada según los componentes principales	132
Figura 5.30	Círculo de correlaciones entre variables y principales componentes	132
Figura 5.31	Gráfico de calidad de individuales en los componentes principales	133

Figura 5.32	PCA-Biplot de totalidad de parámetros físico-químicos según unidad litoestatigráfica	134
Figura 5.33	PCA-Biplot de parámetros físico-químicos representativos según unidad litoestatigráfica	135
Figura 5.34	PCA-Biplot de parámetros físico-químicos representativos por unidad litoestatigráfica	136
Figura 5.35	Mapa de PCA-Biplot de parámetros físico-químicos representativos por unidad litoestatigráfica	136
Figura 5.36	Mapa de PCA-Biplot esquemático parámetros físico-químicos Representativos y clusterizado por unidad litoestatigráfica	137
Figura 6.1	Zonas de comportamiento multivariable (geológico – antropogénico) clusterizado	141

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Acceso al área de trabajo	2
Tabla 1.2	Estación meteorológica La Angostura	5
Tabla 4.1	Resumen del número de estaciones de muestreo y aforos de la subcuenca Hornillos Altos en ambas temporadas	41
Tabla 4.2	Facies hidroquímicas de las fuentes de aguas superficiales de la subcuenca Hornillos	50
Tabla 4.3	Resumen de estadísticas de parámetros físico-químicos de la subcuenca Hornillos Alto (por microcuenca) en avenida y estiaje	63
Tabla 5.1	Resumen de las muestras según porcentaje de valor de medición en la subcuenca Hornillos Alto	77
Tabla 5.2	Resumen de las estadísticas de las variables de parámetros físico-químicos y elementos disueltos en avenida	79
Tabla 5.3	Resumen de las estadísticas de las variables de parámetros físico-químicos y elementos disueltos en estiaje	79
Tabla 5.4	Clasificación cualitativa de rangos de pH en ambas temporadas	81
Tabla 5.5	Clasificación cualitativa de rangos de Ce en ambas temporadas	84
Tabla 5.6	Clasificación cualitativa de rangos de Al en ambas temporadas	87
Tabla 5.7	Clasificación cualitativa de rangos de As en ambas temporadas	90
Tabla 5.8	Clasificación cualitativa de rangos de B en ambas temporadas	92
Tabla 5.9	Clasificación cualitativa de rangos de Ba en ambas temporadas	94
Tabla 5.10	Clasificación cualitativa de rangos de Cu en ambas temporadas	97
Tabla 5.11	Clasificación cualitativa de rangos de Fe en ambas temporadas	99

Tabla 5.12	Clasificación cualitativa de rangos de Mn en ambas temporadas	102
Tabla 5.13	Clasificación cualitativa de rangos de Pb en ambas temporadas	104
Tabla 5.14	Clasificación cualitativa de rangos de Ti en ambas temporadas	106
Tabla 5.15	Clasificación cualitativa de rangos de Zn en ambas temporadas	108
Tabla 5.16	Análisis booleano multielemental	117
Tabla 7.1	Costos de contenedores de nanoabsorbentes	145

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

En este apartado se detallan aspectos relevantes de la subcuenca Hornillos Altos, tales como ubicación y accesibilidad, clima, temperatura e hidrografía.

### **1.1 Ubicación y accesibilidad**

La zona de estudio se encuentra ubicada en la región de Arequipa, al suroeste del Perú, y forma parte de la vertiente hidrográfica del Atlántico.

La subcuenca Hornillos Alto se encuentra enmarcada en los cuadrángulos de: Caylloma (31s) y Chivay (32s), y abarca la mayor parte del área de estudio en el primero y en menor medida en el segundo cuadrante. El área de estudio está enmarcada dentro de las siguientes coordenadas geográficas:

Latitud        15° 04' 03.21" - 15° 31' 26.13"

Longitud      71° 56' 50.64" - 71° 32' 45.48"

La subcuenca Hornillos Alto se ubica en la provincia de Caylloma, en la región de Arequipa (ver Figura 1.1). La extensión del área total de estudio es de 1376.600 km<sup>2</sup> aproximadamente. Esta subcuenca presenta una topografía de agreste a moderada con altiplanicies que fueron modeladas por los diferentes agentes geológicos. El rango

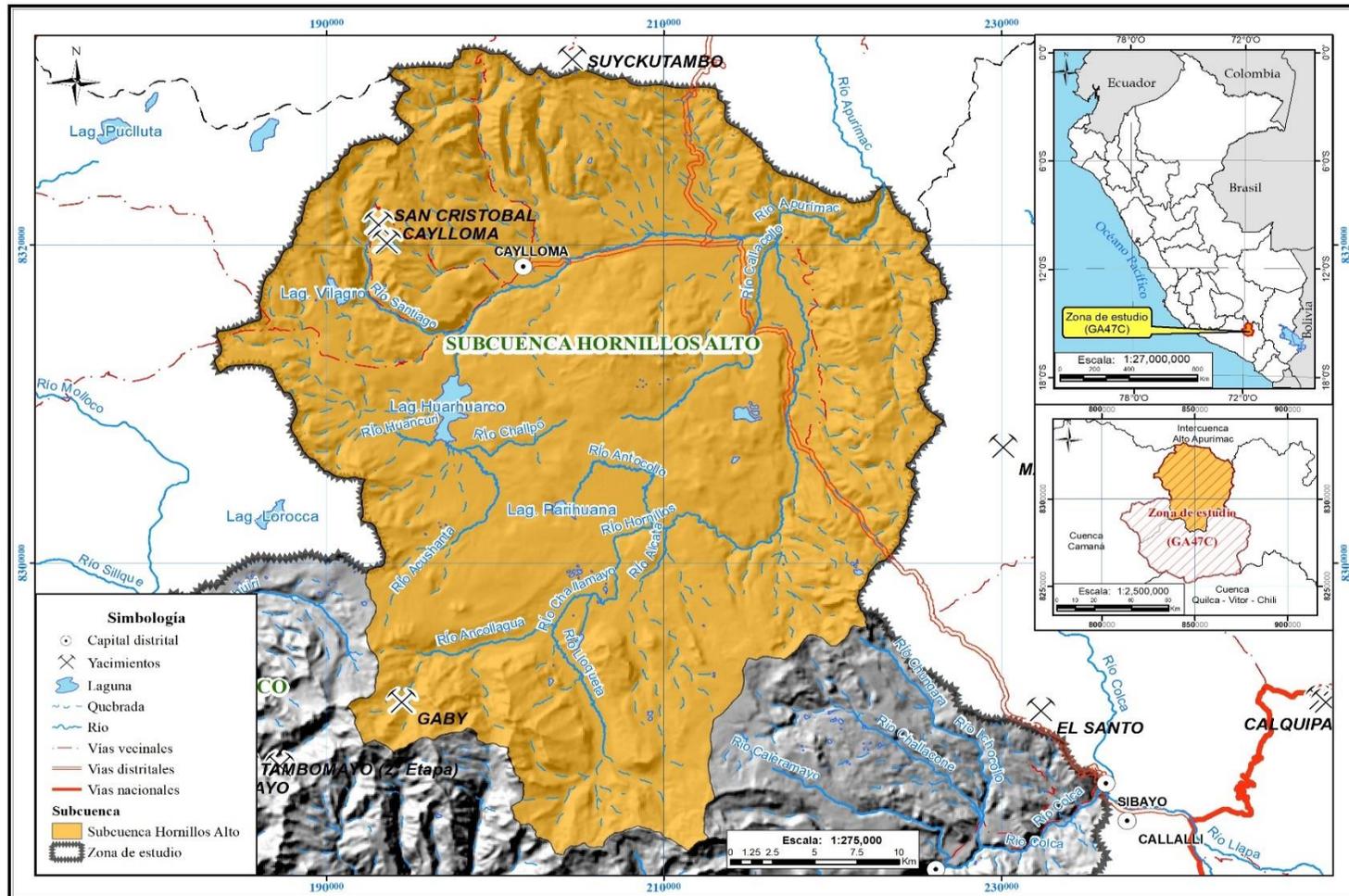
de alturas para esta subcuenca varía desde los 4100 y 5550 m.s.n.m.

**Tabla 1.1**  
***Acceso al área de trabajo***

Lugar	Vía	km	Tiempo
Lima – Arequipa	Aérea	763	1h 30min
Lima – Camaná – Chivay – Cailloma	Terrestre	1232	14h 21min
Lima – Arequipa – Chivay – Cailloma	Terrestre	1260	15h

**Fuente:** Elaboración propia

La Tabla 1.1 muestra las formas de acceso al área de trabajo. El acceso se realiza, en general, por vía afirmada y trocha carrozable (otra posibilidad es por vía aérea desde la ciudad de Arequipa al poblado de Cailloma), por un conjunto de vías que integra los principales centros poblados de Chivay, Cailloma, así mismo las mineras Tambomayo, Bateas, Arcata, entre otras.



**Figura 1.1** Ubicación de la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia

## 1.2 Clima, temperatura e hidrografía

En la región Arequipa, existen 6 tipos de climas. Según la clasificación de Warren Thornthwaite (SENAMHI, 2020), la zona de estudio presenta 2 tipos de climas: B(o,i)D'H3 (semifrío lluvioso) y N (nieve). Adicionalmente, se explican los tipos de climas circundantes para entender la variabilidad climática; el mapa de la Figura 1.2 se genera con datos meteorológicos de veinte años (1965-1984) (SENAMHI, 2020).

Los climas que presenta la subcuenca Hornillos Alto se detallan a continuación de acuerdo con (SENAMHI, 2020).

– **B(o,i)D'H3:** Zona de clima semifrío lluvioso, con deficientes lluvias en otoño e invierno, y con humedad relativa calificada como húmeda.

– **N:** Zona clasificada como cobertura de nieve constante.

Los climas circundantes son los siguientes:

– **C(o,i,p)C'H2:** Zona de clima frío, semiseco, con deficiencia de lluvias en otoño, invierno y primavera, y con humedad relativa calificada como seca.

**D(o,i,p)B'2H2:** Zona de clima semiárido, templado, con deficiencia de lluvias en otoño, invierno y primavera, y con humedad relativa calificada como seca.

Para los índices climáticos, se tomó variables claves como precipitación y temperatura del aire (incluyendo humedad del aire), además se añadieron algunos factores que condicionan el clima de un lugar, tales como latitud geográfica, altitud, Cordillera de los Andes, Corriente Fría Marítima Peruana, el Anticiclón del Pacífico Sur, la Continentalidad, vientos predominantes, distancia al mar y relieve (SENAMHI, 2020).

Como se observa en la Figura 1.2, en la zona de estudio predomina el clima tipo **B(o,i)D'H3** y en segundo lugar el tipo **N**.

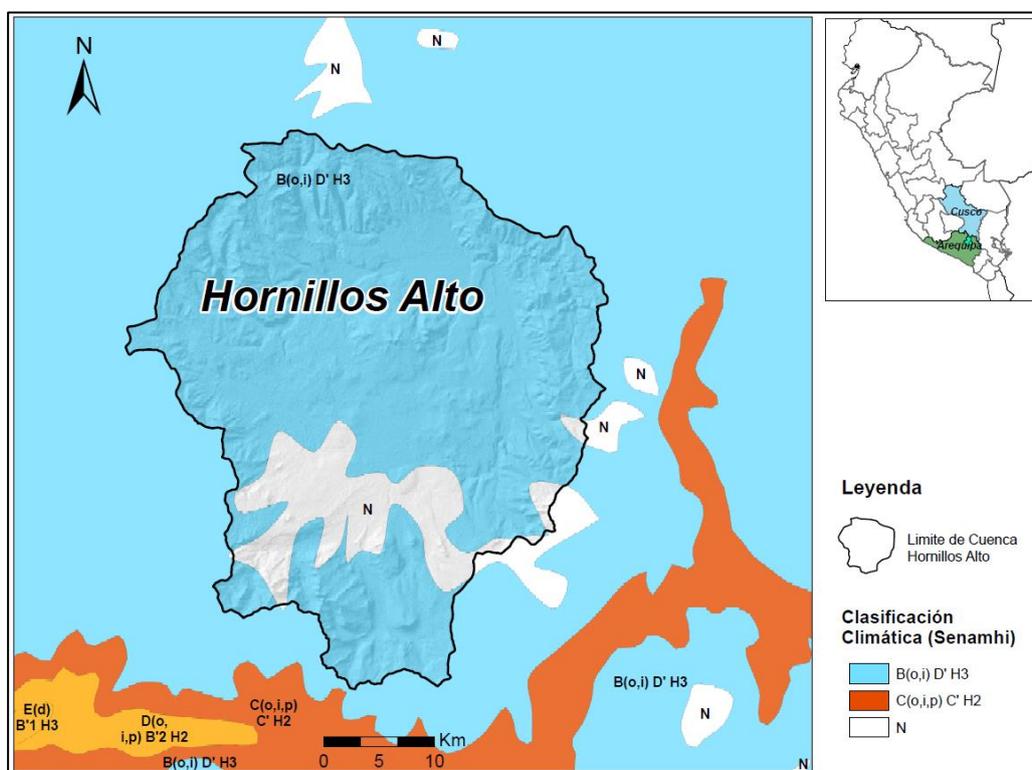
En la zona de estudio se encuentra una estación meteorológica automática que recolecta los datos en diferentes épocas. La ubicación de la estación se detalla en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.2**  
**Estación meteorológica La Angostura**

Tipo	Longitud	Latitud	Altitud	Distrito	Provincia	Región
Automática	71°39'4.46"	15°10'57.18"	4258	Caylloma	Caylloma	Arequipa

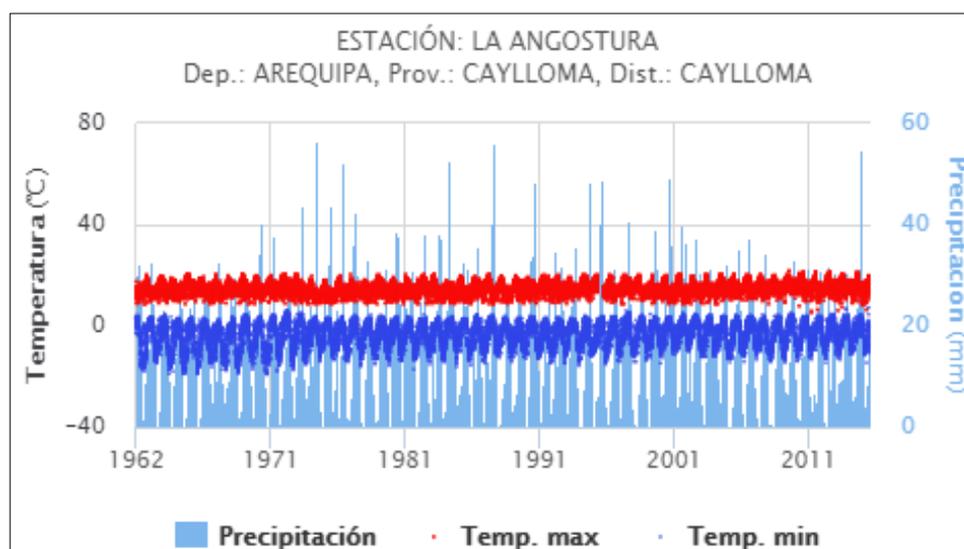
**Fuente: Elaboración propia**

En la zona de estudio las temperaturas máximas varían entre los 20 a los 25°C y temperaturas mínimas de -14 y -8°C.



**Figura 1.2** Tipos de climas en la subcuenca Hornillos Alto  
**Fuente: Elaboración propia**

Se puede observar en la Figura 1.3 la variación de la temperatura de acuerdo con los datos de la estación La Angostura (SENAMHI, 2020).



**Figura 1.3 Estación meteorológica La Angostura**  
Fuente: SENAMHI, 2020

### 1.3 Planteamiento del problema

En este apartado, se plantea la situación problemática, la formulación del problema y la justificación de la investigación.

#### 1.3.1 Situación problemática

En el área de estudio, se están realizando diversas actividades antrópicas (a setiembre del 2021), entre ellas mineras (Mina Bateas - Compañía Minera Bateas S.A.C – Ag y Au), agropecuarias, geoturísticas y geotermales (Proyecto Geotermal del Valle del Colca - Cooperación Internacional Perú-México, 1992), además de la existencia de pasivos ambientales (Ministerio de Energía y Minas [MINAM], 2020) correspondientes al cauce del río Apurímac, que ocasionan un riesgo -potencial de contaminación (pasivos en la zona de Caylloma) debido a que el río Apurímac discurre

por el área de conservación regional Tres Cañones. Además, se presentan zonas de alteración (óxidos y arcillas), ocurrencias minerales (Tambomayo, Bateas, Madrigal, San Cristóbal y Caylloma) y surgencias de agua termal (La Calera, Yanque, El Oasis - Sangalle). Todas estas actividades impactan el medio ambiente y principalmente los suelos agrícolas.

Además, se desconoce la relación entre los factores condicionantes antrópicos (humanos) y naturales (geológicos); por lo tanto, se requiere caracterizar hidrogeoquímicamente el área, con el fin de determinar zonas aptas para uso agrícola, el origen de material contaminante y realizar remediaciones futuras de las zonas agrícolas.

### **1.3.2 Formulación del problema**

¿De qué manera se caracteriza hidrogeoquímicamente una subcuenca para delimitar zonas aptas para el cultivo agrícola y zonas de origen de contaminantes?

### **1.3.3 Justificación de la investigación**

Es importante realizar la presente investigación debido a que se necesita dar lineamientos geoambientales generales a todos los futuros estudios geológicos e hidrogeoquímicos de la cuenca Hornillos Alto, además de generar nuevos aportes con el análisis de la información obtenida de campo que permitirá determinar zonas aptas para riego y ubicación de zonas de origen contaminante.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 General**

- Caracterizar hidrogeoquímicamente la subcuenca Hornillos Alto para determinar el origen de material contaminante para encontrar zonas aptas de uso agropecuario.

### **1.4.2 Específicos**

- Caracterizar geológicamente la subcuenca Hornillos Alto para identificar los componentes que modifican el recurso hídrico.
- Caracterizar hidroquímicamente la subcuenca Hornillos Alto para obtener los hidrotipos predominantes y su relación con los parámetros físico-químicos.
- Correlacionar mediante estadística los datos químicos del agua con los aspectos antropogénicos y geológicos.

## **1.5 Hipótesis**

### **1.5.1 General**

- Al caracterizar hidrogeoquímicamente la subcuenca Hornillos Alto, se va a lograr determinar el origen de material contaminante, lo que hace posible luego encontrar zonas aptas de uso agropecuario.

### **1.5.2 Específicas**

- Al caracterizar geológicamente la subcuenca Hornillos Alto, se reconocerán los factores geológicos que modifican el recurso hídrico.
- Al caracterizar hidroquímicamente la subcuenca Hornillos Alto, se obtendrán los tipos de agua y condicionantes físico-químicos de la calidad del recurso hídrico.
- Correlacionando los datos químicos del agua con los aspectos antropogénicos y geológicos, se determinará zonas aptas de uso agropecuario.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes referenciales

##### 2.1.1 Antecedentes internacionales

Kacmaz (2020), en su investigación *Assessment of heavy metal contamination in natural waters of Dereli, Giresun: an area containing mineral deposits in northeastern Turkey*, afirma que los niveles elevados de metales en el agua tienen un efecto negativo en la calidad del agua. Esta concentración en aguas naturales está asociada con la geología de la región, y además las concentraciones de elementos metálicos en aguas de áreas mineralizadas pueden ser naturalmente altas. Además, menciona que se deben analizar los controles de interacciones agua-roca y sus hidrotipos. Finalmente, indica que no existe contaminación significativa de metales pesados en las aguas del área, probablemente a causa de aguas carbonatadas.

Iqbal et al. (2014), en su investigación *Dissolved Concentrations, Sources, and Risk Evaluation of Selected Metals in Surface Water from Mangla Lake, Pakistan*, expresan que se deben considerar las variaciones existentes en el recurso hídrico por temporada (que mencionan como *verano* e *invierno*), y además indican que se debe realizar la comparación de metales potencialmente contaminantes con los estándares

nacionales e internacionales establecidos, con el fin de determinar el riesgo en el ecosistema. Finalmente, mencionan que el análisis PCA ayuda a encontrar las contribuciones de elementos o parámetros físico-químicos y sus asociaciones porque es de vital importancia para el planeamiento y creación de estrategias de gestión para la restauración de la calidad del agua.

Ramalle-Gomará (2003), en su estudio *Utilización de métodos robustos en la estadística inferencial*, mencionan que para la solución a los problemas de datos no disponibles y con valores atípicos (ausencia de normalidad) se debe aplicar métodos robustos que puedan completar los valores de manera que no deformen la distribución inicial de la variable de entrada distribución inicial de la variable de entrada.

Carbonero et al. (2005), en su estudio *Estimadores Robustos de Estadísticos de Posición*, proponen que, al no poseer normalidad en los datos, se debe usar la construcción de intervalos de confianza bilaterales que sirvan de base a operadores de cruce multipadres para algoritmos genéticos con codificación real.

### **2.1.2 Antecedentes nacionales**

Pari et al. (2014), en el Estudio Geoambiental en la cuenca del Río Colca, mencionan que existe una marcada influencia volcánica pasada y actual en el relieve de edad cuaternaria y recientes. Además, el hidrotermalismo manifiesto en zonas del valle Colca permite deducir una actividad volcánica activa y en muchos casos latente.

Asimismo, mencionan que se contrastó la presencia de pasivos ambientales generados por la minería pasada con impactos importantes de la actividad mineral actual, que afectan el suelo, flora, fauna y el paisaje natural. Del mismo modo, indican que el desarrollo antrópico (historia, población y niveles socioeconómicos,

desarrollo humano, infraestructuras básicas y actividades económicas), así como naturales (suelo, vegetación, agua, minerales, paisajes y áreas reservadas) son potencialmente importantes para realizar cualquier estudio de evaluación geoambiental o línea base geoambiental. Pari et al. (2014) indican que el estudio geoquímico ambiental para determinar la calidad de aguas superficiales se realiza considerando las condiciones climáticas en la cuenca para caracterizarla. La calidad se refiere a los estándares nacionales de calidad ambiental para agua de uso poblacional y recreacional (categoría 1), así como para uso de riego de vegetales y bebida de animales (categoría 3). La calidad se debe determinar con los datos de conductividad eléctrica tomados *in situ* en cada estación de muestreo de los límites estables; además, para ello se elaboran los diagramas de Wilcox a fin de obtener el riesgo de sodificación y salinidad. Del resultado del análisis de parámetros físico-químicos (Pari et al., 2014), se determina que en la temporada de estiaje el pH es más ácido y aumentan los valores de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos en el agua.

Finalmente, indican que el tipo de agua sulfatada cálcica caracteriza a una mina u ocurrencia mineral, y los procesos naturales están asociados a mayores concentraciones de Boro, como la erosión de rocas sedimentarias e intrusivas ácidas, aunque una fuente antrópica como el uso de detergentes o plaguicidas puede aumentar la concentración de Boro.

Basados en el análisis HQ (Hazard Quantity), Ccancapa-Cartagena et al. (2021), en Occurrence and probabilistic health risk assessment (PRA) of dissolved metals in surface water sources in Southern Peru, afirman que en el sur del Perú las aguas más contaminadas siguen el orden de aguas subterráneas > aguas de río > aguas lago. Además, señalan que los valores de boro, arsénico, aluminio, fósforo, hierro y

bario muestran las más altas concentraciones en todas las aguas analizadas. Arsénico, aluminio, cadmio, cromo, hierro, manganeso, fósforo, plomo y selenio exceden el límite máximo permisible para las regulaciones peruanas en aguas superficiales. Asimismo, indican que usando la evaluación probabilística de riesgos para la salud (*probabilistic health risk assessment* (PRA por su sigla en inglés)), tanto el Mo, Mn, Al, Zn, Cu, Pb y Ba como el Sr muestran las mayores contribuciones relacionadas a riesgo no cancerígeno, mientras que el As tiene contribución dominante con el riesgo de cáncer.

Finalmente, los autores indican que una técnica poderosa multivariable (PCA) provee pistas acerca del potencial recurso de contaminación metálica multielemental. Ti, Cu, Al, Co, Ni, Sc, Mo, Pt, Cd, y Cr son los recursos antropogénicos potenciales (presentes en relaves mineros, curtiembre, plantas de tratamientos de agua), mientras que As, B y Li son originados por recursos naturales en las cuencas del sur.

Wai Long. et al. en Hidrogeoquímica de aguas subterráneas en la cuenca del río Ilo-Moquegua – Perú indican que las fuentes con predominancia bicarbonatada cálcicas representan surgencias de aguas muy jóvenes con sistemas de flujos locales de corto recorrido. Esto se debe la reacción del CO<sub>2</sub> proveniente de la zona superficial del suelo (zona no saturada). Además, la predominancia del catión calcio con aportes de sodio y ligeras cantidades de Mg, tienen origen en las plagioclasas intermedias, y en menor grado de biotitas, hornblendas y/o augitas presentes en lavas andesíticas principalmente. La sulfatadas sódicas obtienen elementos iónicos cargados por el contacto de las aguas con la dilución de rocas volcánicas, proveniente de la

meteorización de silicatos y la disolución de rocas volcánicas con contenido intemperizado de arenas y limos.

## **2.2 Geología y geomorfología**

La información geológica que aquí se emplea es del Instituto Minero Geológico y Metalúrgico (INGEMMET). Se ha usado como base cartográfica geológica nacional la escala 1: 100 000 en la subcuenca Hornillos Altos que comprende las Hojas 31-S y 31-T, además de las actualizaciones al 1:50 000 de las hojas 31s1, 31s2, 31s3, 31t3 y 31t4 que sirven para hacer el análisis geológico y de clusterización.

Según Dávila (1998), en la subcuenca Hornillos Alto la mayor parte comprende el cuadrángulo de Cailloma (31 s), donde afloran principalmente unidades volcánicas y sedimentarias con rango de edad que abarca desde el Jurásico hasta el Cuaternario, y cuya unidad más antigua es el Grupo Yura y depósitos cuaternarios más recientes. El autor, además, indica que existen zonas de alteración y afloramientos pertenecientes a la Formación Labra.

Alternativamente, Quispesivana (2003) divide la columna estratigráfica dispuesta por Dávila considerando una variación importante dentro del Grupo Barroso, dividiendo en unidades volcánicas (unidad lávica, tobácea, caldera y complejo volcánico) y dando una mejor división categórica para el análisis *cluster* y su aplicación en el criterio de factor del análisis de componentes principales.

Finalmente, Becerra et al. (2021), con respecto a la parte estructural de la subcuenca Hornillos Altos, indican que las fallas principales se ubican en la parte alta de la cuenca perteneciente al río Apurímac, y que son paralelas y transversales a los cuerpos de agua y zonas de alteración. Además, señalan la existencia de fallas inversas

regionales mayores con dirección del rumbo andino en la parte noreste de la subcuenca Hornillos Altos.

### **2.3 Hidroquímica**

Según Custodio y Llamas (1983), para realizar el análisis hidroquímico en recursos hídricos se debe usar el diagrama de Collins para la representación comparativa de aniones y cationes, el diagrama pie para la proporción total de sales disueltas, el diagrama de Stiff para comparar  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}^{-3}$ ,  $\text{NO}^{-3}$  en la zona de aniones, y  $\text{Na}^{+1}$ ,  $\text{H}^{+1}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  en la de los cationes y obtener el tipo de agua (clorurada, sulfata, sódica, potásica); finalmente, los diagramas triangulares o de Piper en los que se plotean los tres aniones principales y cationes principales, donde quedan puntos agrupados que definen familias hídricas de características químicas semejantes en contenido iónico. El análisis de los diagramas de cajas y bigotes según Tukey (1962) debe resumir la información obtenida respecto a parámetros físico-químicos y concentración de elementos metálicos para detectar los valores aislados o extremos de manera numérica y gráfica, además de determinar la distribución de la data, y así clasificarla según rangos categorizados.

### **2.4 Estándar de Calidad Ambiental (ECA)**

Los elementos totales, disueltos y los parámetros físico-químicos fueron comparados con lo establecido en la legislación peruana de acuerdo con el DS N° 004-2017-MINAM: Modificación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua (ECA). Así mismo, de acuerdo con la Resolución Jefatural N° 270-2017-ANA, la subcuenca Hornillos Alto está clasificada con la Categoría 3: Riego de

vegetales y bebida de animales. Se realizaron gráficos y mapas para la interpretación de los datos.

## 2.5 Estadística

El análisis univariante en hidrogeoquímica moderna fue introducido por Hesel y Hirsch (2012), quienes se enfocan en determinar los resúmenes descriptivos estadísticos básicos en aguas. Además, este procedimiento analítico determina la tendencia de variaciones químicas de elementos y parámetros físico-químicos según correlaciones geológicas e hidroquímicas.

Menciona De Llano (2003) que el método más eficiente para completar datos debajo del límite de detección en aguas es el semiparamétrico, denominado *Robust Regression of Order Statistics (ROS)* y este autor indica que se debe tener en especial consideración este método en las características de tiempo y espacio al momento de completar la información.

Según Pulido (2007), se debe tener una consideración especial al detectar los valores máximos y mínimos de la conductividad eléctrica y potencial de hidrógeno para determinar variaciones composicionales importantes en el recurso hídrico.

Dentro del análisis exploratorio de datos (AED), se realiza principalmente el gráfico cuantil-cuantil (*qqplot*) que ayuda a determinar si la distribución de partida se ajusta a una distribución requerida, además de la prueba de Shapiro-Wilks, que es aplicable para probar de manera estadística la normalidad de la data por variable, según EPA QA/G-9S (2006).

Para el análisis estadístico multivariable en aguas, según Güler et al. (2002), se necesita disponer un esquema sólido de clasificación química de muestras de agua en

grupos homogéneos, lo cual es una herramienta importante para la caracterización de sistemas hidrológicos. Los esquemas de clasificación hidroquímica deben estar basados en análisis jerárquicos de conglomerados en modo-Q, K-medias, análisis de componentes principales (PCA) y conglomerados difusos de k-medias. Los resultados más efectivos se logran mediante técnicas estadísticas de agrupamiento, aunque no proporcionan información detallada sobre la química de los grupos. Por ende, la combinación de técnicas gráficas y estadísticas posibilita un enfoque coherente y objetivo para clasificar números elevados de muestras y, a la vez, mantener la facilidad de las presentaciones gráficas convencionales.

### **CAPÍTULO III**

#### **MARCO GEOLÓGICO**

El presente capítulo tiene como finalidad explicar los aspectos geológicos principales con el fin de interrelacionarlos con los datos de muestras de agua superficial y subterránea obtenidos, siendo base fundamental para la comprensión de la interacción roca-agua.

La geología en las subcuencas es compleja y diversa, y está compuesta principalmente de rocas volcánicas de edad Cenozoica (aproximadamente 90% del total corresponden a afloramientos de rocas volcánicas) y la sedimentación jurásica y cretácica está restringida a esporádicos afloramientos (10% de afloramientos). El tectonismo y la geología estructural han jugado un rol importante en la sedimentación y exposición de las rocas, pero gran parte de su registro ha sido borrado (ocultado) por la depositación de material volcánico, que tuvo un comportamiento de relleno en las grandes cuencas del sur peruano. Los principales trabajos realizados en esta área que dieron el conocimiento y establecieron la estratigrafía en la Cordillera Andina y el Altiplano fueron los de Jenks, (1946) y Newell, (1949). Otro aporte importante fue el cartografiado de la Comisión de la Carta Geológica por Wilson y García (1962), que

establecieron la estratigrafía cenozoica, la que subsecuentemente es aplicada en todo el sur del Perú.

En el marco de la Carta Geológica Nacional, la subcuenca Hornillos Alto se ubica en la parte nororiental de la región Arequipa, y limita con el sur de Cusco, abarcando los cuadrángulos de Condoroma (hoja 31t3), Callalli (hoja 32t4), Cailloma (hojas 31s1, 31s2, 31s3 y 31s4), Chivay (hojas 32s1, 32s2, 32s3 y 32s4), Huambo (hoja 32r1) y Orcopampa (Hoja 31r2). La base geológica fue realizada por el INGEMMET a escala 1:100 000 y 1:50 000 la empleada en el presente trabajo.

### **3.1 Geomorfología**

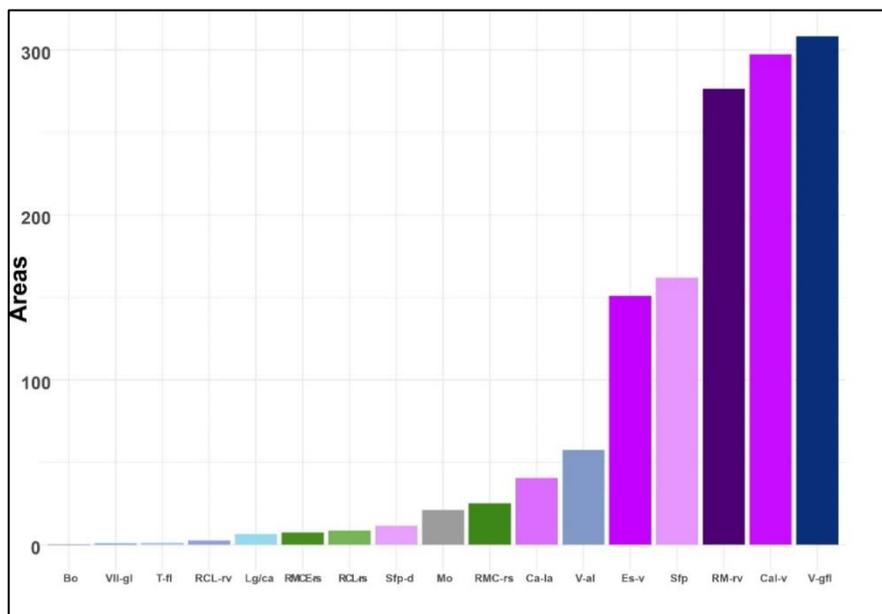
El área de trabajo muestra un relieve característico de las altas cordilleras. La cota más baja es de aproximadamente 4100 m.s.n.m. y en ella predomina el modelado glaciar controlado por los procesos volcano-tectónicos ocurridos principalmente en el Neógeno y en el Cuaternario. Los agentes que influyen en el desarrollo geomorfológico del área son variados; los principales son la topografía, la altura, la litología, las estructuras, la hidrografía y el clima. La topografía accidentada (Figura 3.1) corresponde a la Cordillera Occidental de los Andes Peruanos, que recorre paralela al litoral y determina desniveles de hasta 6000 msnm a una distancia menor de 160 kilómetros. En la Figura 3.1 se muestra el relieve característico, que diferencia dos zonas de color blanco por donde discurren los dos ríos principales Apurímac (Cailloma) y Hornillos (Anchachorcro).



**Figura 3.1** Relieve característico por zonas: subcuenca Hornillos Alto  
Fuente: Google Earth (2020)

La Figura 3.2 muestra el mapa geomorfológico de la subcuenca Hornillos Alto, se observa geomorfología variada y existencia de muy poco material relacionado a geomorfología de rocas sedimentarias, que se limitan al Sureste y a la zona de influencia del río Hornillos (línea de color blanco). En las partes altas de los ríos Apurímac y Hornillos, las principales características son geoformas volcánicas. La descripción de las geoformas volcánicas en función al área ocupada se muestra en la Figura 3.2, y en el mapa geomorfológico en la Figura 3.3. Los principales componentes son los valles glaciofluviales (V-gfl), con 300 km<sup>2</sup> distribuidos ampliamente en la zona Sur y cerca de la unión de los ríos Apurímac y Hornillos. También se tienen calderas volcánicas (Cal-v), con 290 km<sup>2</sup> y que representa la zona central de la subcuenca como un “núcleo”. Se aprecia también montaña en roca volcánica (RM-rv), con 270 km<sup>2</sup>, predominante en la zona norte de la subcuenca. Hacia los bordes de la Montaña en roca volcánica, en menor proporción areal respecto a las primeras geoformas mencionadas, se encuentran las superficies de flujo piroclástico (Sfp) 160 km<sup>2</sup>

distribuidas de manera homogénea y los Estratovolcanes (Es-v) con 150 km<sup>2</sup>, que abarcan gran parte de la zona sur de la subcuenca.



**Figura 3.2 Áreas ocupadas según tipo de subunidad geomorfológica en Hornillos Alto**  
Fuente: Elaboración propia

En menor proporción, se tienen Vertiente o Piedemonte aluvial (V-al) 55 km<sup>2</sup> distribuida a lo largo del río Apurímac. Se aprecia coladas o campos de lava basalto-andesítica (Ca-la) 45 km<sup>2</sup> distribuidos en mayor medida hacia el noroeste de la subcuenca. Se ve también montañas y colinas en roca sedimentaria (RMC-rs) por 25 km<sup>2</sup>, como se mencionó anteriormente, en la zona sureste y asociada al río Hornillos. Las morrenas (Mo) ocupan un área de 24 km<sup>2</sup>, en la zona Noroeste y Oeste, principalmente en las nacientes del río Apurímac. Área menores a 10km<sup>2</sup>, pero igual de importantes para el estudio, están la superficie de flujo piroclástico disectado o erosionado (Sfp-d); colina y lomada en roca sedimentaria (RCL-rs); las montañas y colinas en roca sedimentaria (RMCE-rs); las lagunas y cuerpos de agua (Lg/ca) son modificadores directos de la calidad-cantidad del recurso hídrico; colina y lomada en

roca volcánica (RCL-rv); terrazas fluviales (T-fl); valles glaciales (VII-gl) y bofedales (Bo), estos dos últimos de gran importancia debido a que son fuentes de agua y modifican directamente la calidad-cantidad del recurso hídrico. La Figura 3.1 y Figura 3.2 muestran el reconocimiento en campo de unidades geomorfológicas.



**Figura 3.3** Trabajo de campo cercano a la quebrada Pesccomayo, (código SW-032). Se clasificó como valle glacio-fluvial con presencia de bofedales.

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 3.4** Trabajo de campo en la quebrada Pausa Huayo, (código SW-033). Presencia de grandes zonas bofedales.

**Fuente:** Elaboración propia

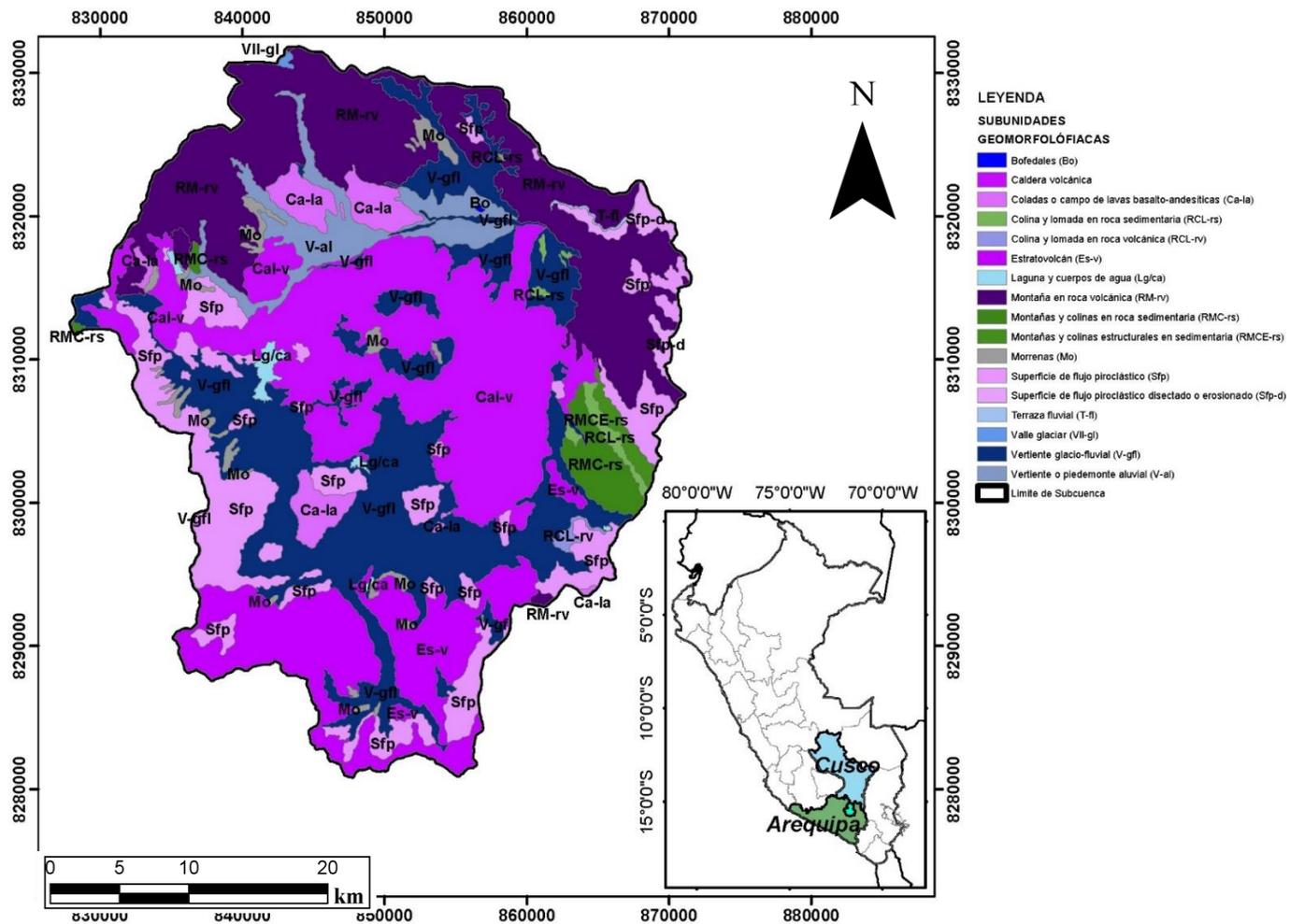


Figura 3.5 Geomorfología de la subcuenca Hornillos Alto  
Fuente: Elaboración propia

## 3.2 Estratigrafía

La subcuenca Hornillos Alto se encuentra dentro del cuadrángulo de Cailloma (31s), afloran unidades sedimentarias y volcánicas, cuyo rango de edad abarca desde Jurásico hasta el Cuaternario. Esta subcuenca posee como unidad más antigua al Grupo Yura, encontrándose alrededor de la Mina Bateas, afloramientos de la Formación Labra. La columna estratigráfica se presenta en la Figura 3.6.

En el Jurásico, en el Grupo Yura se han diferenciado las Formaciones Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani constituidas principalmente por sedimentos clásticos que subyacen en forma concordante por la Formación Murco, Dávila (1998). El Cenozoico está representado por el Grupo Tacaza, que cubre las unidades anteriores en discordancia angular, donde se distinguen las Formaciones Orcopampa e Ichocollo. Sobreyaciendo en discordancia angular, se tiene a las tobas de la Formación Sencca, del Plioceno y la Formación Pusa de ambiente lacustrino. En el Cuaternario se emplazaron los volcánicos andesíticos del Grupo Barroso, que se les ha clasificado de acuerdo con su tipo y modo de emplazamiento como estratovolcán, lava-domo, domo, complejo volcánico y caldera. Como última actividad volcánica, se tiene los depósitos del Grupo Andagua, que constan de andesitas basálticas, donde coetáneamente se desarrollaron los depósitos pleistocénicos y recientes. En la Figura 3.7 se muestra el plano geológico del área de estudio.

### 3.2.1 Mesozoico

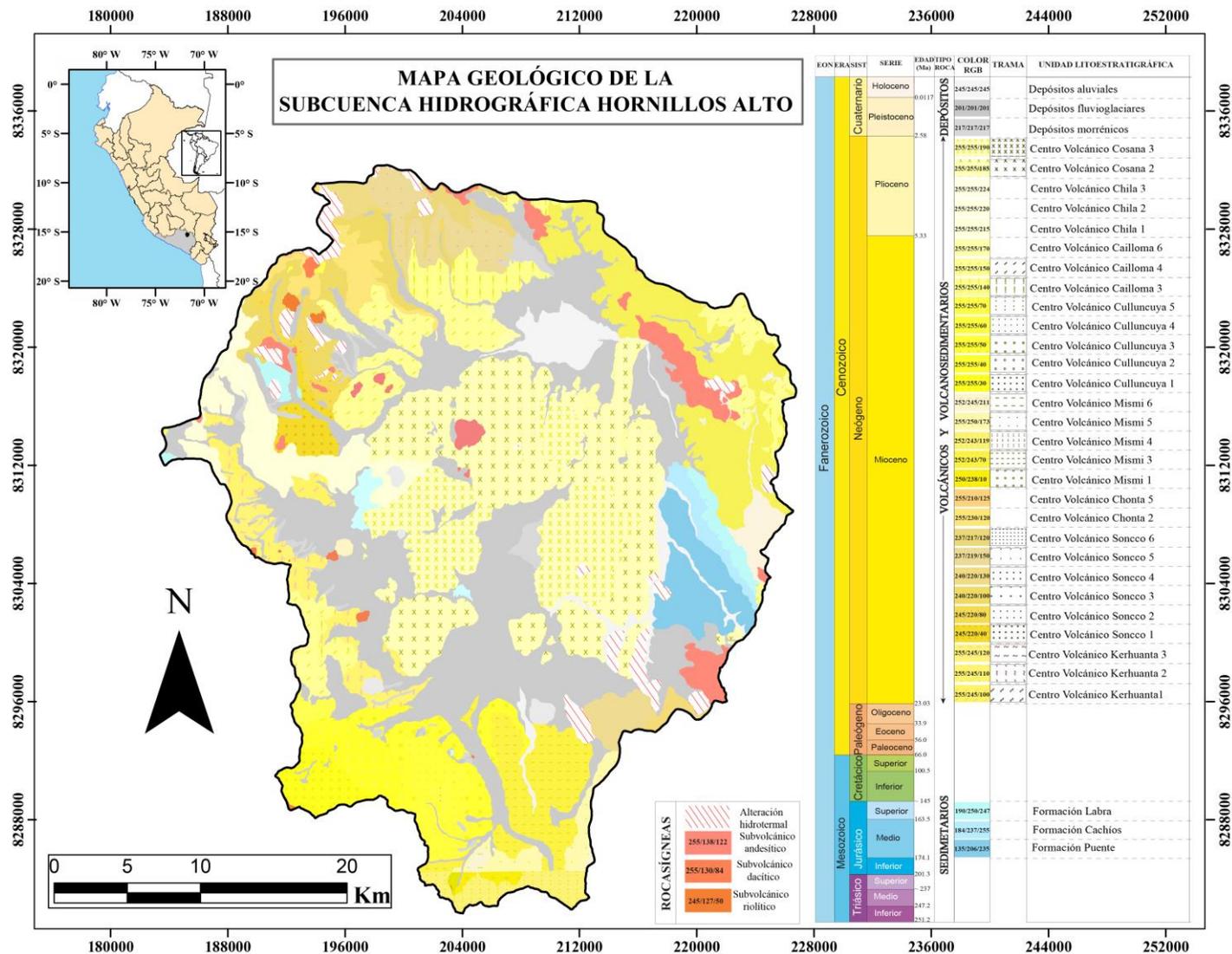
#### Grupo Yura

Inicialmente estudiado en Arequipa por Jenks (1948), con la denominación estratigráfica de *Formación*, luego dividido por la variación vertical de sus facies en las formaciones Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani. (Benavides, 1962).

COLUMNA ESTATIGRÁFICA DE LA SUBCUENCA HORNILLOS ALTO

EÓN	ERA	SISTEMA	SERIE	PISO Edad (M.a)	UNIDAD LITOSTRATIGRÁFICA	COLUMNA	PLUTONES	DESCRIPCIÓN	LITOLOGÍA			
FANEROZOICO	CENOZOICO	CUATERNARIO	PLEISTOCENO	MEDIO	DEPÓSITOS ALUVIALES Q-al			Acumulaciones de arenas y limos depositadas en los cauces de los ríos y quebradas conformando terrazas recientes.	Arenas Limos			
					DEPÓSITOS FLUVIOGLACIARES Q-fg			Depósitos de cantos, gravas y arenas, de composición heterogénea, subangulosos, sedimentados por corrientes de agua.	Cantos Gravas y arenas			
					DEPÓSITOS MORRÉNICOS Q-mo			Acumulaciones de gravas y bloques angulosos a subangulosos, consolidados en matriz limosa.	Gravas Bloques en matriz limosa			
				0.781	CALABRIANO	GRUPO BARRONSO	1.8	CENTRO VOLCÁNICO COSANA Np-co		Np-da	Caracterizado por lavas afaníticas al piso y depósitos de tobas al techo.	Tobas de pómez Lavas afaníticas
				ZANCLEANO			CENTRO VOLCÁNICO CHILA Np-chi			Depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza gris y depósitos de flujos de lava afanítica de color gris verdoso.	Piroclastos de pómez Lavas afaníticas	
				5.333			TORTONIANO	CENTRO VOLCÁNICO CAILLOMA Nm-ca			Localizada en el sector central del cuadrángulo de Cailloma. Sus depósitos se extienden y cubren gran porcentaje de la Hoja, y se los ha agrupado en seis eventos. Principalmente conformado por domos y flujos andesíticos, tobas de lapilli	Domos y flujos de andesitas Tobas de lapilli y cristales Tobas soldadas cristalíticas Tobas de cristales no soldadas Andesitas álficas vesiculadas Flujos de andesitas vesiculadas
		11.63	SERRAVALLIANO	GRUPO PALCA	CENTRO VOLCÁNICO MISMI Nm-mi		Nm-an	Sus depósitos han sido agrupados en tres eventos.	Flujos piroclásticos de bloques Depósitos de pómez, ceniza y lavas			
		CENTRO VOLCÁNICO CULLUNCUYA Nm-cu					Intercalaciones de depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, depósitos de pómez, ceniza y lavas	Flujos piroclásticos de bloques Depósitos de pómez, ceniza				
		13.82	LANGIANO	CENTRO VOLCÁNICO CHONTA Nm-cho		Nm-to	Afloramientos volcánicos, flujos lavicos dacíticos y traquiandesíticos porfiríticos con fenos de plagioclasa	Flujos lavicos dacíticos				
		15.97	BURDIGALLIANO	GRUPO YURA	CENTRO VOLCÁNICO SONCCO Nm-son		Nm-an	Ha sido reconocido en tres facies de un evento volcánico; principalmente conformados por tobas soldadas y tobas vitroclásticas.	Tobas soldadas Tobas vitroclásticas			
		20.44			CENTRO VOLCÁNICO KERHUANTA Nm-ke			Intercalaciones de depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza ricos en cristales y fragmentos líticos.	Piroclastos de pómez y ceniza			
		23.03	AQUITANIANO	FORMACIÓN ICHOCOLLO Po-ich			Está constituido por lavas y domos dacíticos en la base, así como por lavas andesíticas en el techo. A través de toda la secuencia se observa areniscas y brechas.	Lavas porfiríticas Areniscas Lavas y domos dacíticos				
		145.0	MESOZOICO	JURÁSICO	INFERIOR SUPERIOR	152.1 ± 0.9	FORMACIÓN LABRA Jl-la			Areniscas gris a gris oscuras intercaladas con limolitas gris oscuras.	Areniscas Limolitas	
		157.3 ± 1.0				FORMACIÓN CACHIOS Jm-ca			Limolitas grises oscuras a negras con algunas intercalaciones de areniscas negras de grano fino.	Limolitas Areniscas		
		163.5 ± 1.0				FORMACIÓN PUENTE Jm-pu			Secuencia de areniscas y euarcitas intercaladas con limolitas gris oscuras a claras.	Areniscas Limolitas		
		166.1 ± 1.2										

Figura 3.6 Columna estratigráfica de la subcuenca Hornillos Alto  
 Fuente: Compilado de los boletines INGEMMET hojas 31s1, 31s2, 31s3, 31s4, 32s1, y 32s4



**Figura 3.7** Mapa geológico de la subcuenca Hornillos Alto (Modificado, INGENMET 2019)  
**Fuente:** Compilado de las hojas 31s1, 31s2, 31s3, 31s4, 32s1, y 32s4

### **Formación Puente (Jm-pu)**

La subcuenca Hornillos Alto, ubicada en el cuadrángulo de Cailloma (31s), presenta un solo afloramiento de la Fm. Puente situado en ambos márgenes de la Quebrada Ichuhuayjo. Litológicamente, está constituida por una secuencia de areniscas y areniscas cuarzosas gris oscuras a pardas, que van de grano medio a fino, en estratos de 10 a 20 centímetros, intercaladas con limolitas gris oscuras a claras, en estratos de 5 a 10 centímetros. Se estima un espesor de 1000 metros para la Formación Puente (Dávila, 1998).

### **Formación Cachíos (Jm-ca)**

La Formación Cachíos aflora formando parte del flanco oriental del anticlinal de Ichuhuayjo, en la quebrada del mismo nombre. La Formación Cachíos está representada litológicamente por limolitas gris oscuras a negras en estratos de 5 a 10 centímetros con algunas intercalaciones de areniscas negras de grano fino en estratos de 10 a 20 centímetros. En la Quebrada Pallca, cerca del caserío de Mainuyta, la secuencia presenta niveles lenticulares e irregulares de lutitas carbonosas. La base de esta unidad yace en contacto gradacional sobre la Formación Puente e infrayace en concordancia a la Formación Labra. Se le estima un espesor de más o menos 400 metros (Dávila, 1998).

### **Formación Labra (Js-la)**

Esta Formación está compuesta por areniscas cuarzosas de color gris de grano medio a grueso. Además, existe alteración de areniscas en la zona por fallamiento inverso (debido al subvolcánico de composición andesítica) con presencias de zonas de alteración hidrotermal. Se observan afloramientos desde la Quebrada Chuaña hasta el caserío Huilahuaraya, en la margen izquierda de la Quebrada Pururya.

Litológicamente, está constituida por una intercalación de arenisca gris a gris oscura de grano medio a fino, en estratos de 10 a 20 centímetros, con limolitas gris oscuras en estratos de 5 a 15 centímetros. La Formación Labra en el Cerro Ccella Ccella presenta estratos de areniscas ferruginosas de colores pardo a marrón claro y limolitas de color gris a gris claro. Esta unidad yace concordantemente sobre la Formación Cachíos, y subyace en la misma forma a la Formación Gramadal. El espesor de esta unidad se ha estimado en más o menos 1200 metros (Dávila,1998). El reconocimiento en trabajo de campo se muestra en la Figura 3.8 y Figura 3.9.



**Figura 3.8 Trabajo de campo, reconocimiento de areniscas cuarzosas de la Formación Labra en contacto fallado (NO-SE) con cuerpos volcánicos andesíticos.**

**Fuente: Elaboración propia**



**Figura 3.9 Trabajo de campo, reconocimiento de areniscas de la Formación Labra aflorando en la zona oeste de la Subcuenca Hornillos Alto, cerca al poblado Condorcuyo.  
Fuente: Elaboración propia**

### **3.2.2 Cenozoico**

#### **Grupo Tacaza**

En el Grupo Tacaza, se han diferenciado las Formaciones Orcopampa e Ichocollo. El Grupo Tacaza cubre aproximadamente la mitad de la subcuenca Hornillos Alto que se encuentra dentro del cuadrángulo de Cailloma (31s) y presenta una secuencia completa fuera del área de estudio, entre Chivay y Sibayo, donde se han logrado diferenciar a las formaciones citadas con sus respectivas unidades.

#### **Formación Ichocollo**

Se designa como Formación Ichocollo a la última etapa del volcanismo Tacaza cuyos afloramientos se encuentran mejor desarrollados en el Cerro Ichocollo. También se le encuentra en la esquina noreste del cuadrángulo de Cailloma (31s). Litológicamente, está constituida por lavas y domos dacíticos; en la base, está

conformada por lavas andesíticas y en la parte superior por lavas grises. A través de toda la secuencia se observan niveles arenáceos y brechas andesíticas. La base de la Formación Ichocollo sobreyace en ligera discordancia a la Formación Orcopampa y subyace a la Formación Sencca en discordancia angular. Se estima un espesor aproximado de 800 metros, Dávila (1998).

### **Grupo Barroso**

Los depósitos volcánicos del Grupo Barroso (Pleistoceno) fueron anteriormente agrupados como morfoestructuras, principalmente, estratovolcán, domo-lava, domo y otros aparatos volcánicos (Dávila, 1998). Posteriormente, en la actualización geológica realizada por Quispesivana y Navarro. (2003), estos depósitos han sido asociados a las siguientes estructuras volcánicas: Caldera Cailloma y complejos volcánicos Jañuma y Mismi, sobre la base de su morfología y naturaleza (dinámica eruptiva). Una clasificación más detallada por secuencias es mostrada a continuación:

### **Secuencia Volcánica Ichocollo (Po-ich)**

Se encuentra ubicado al sureste de Caylloma, litológicamente está conformado por intercalación de lavas andesíticas a riolíticas y depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas de color gris oscuro, con flujos piroclásticos de pómez y cenizas gris violácea y gris blanquecina con una potencia máxima de 250 metros; en su base sobreyace en discordancia la Formación Orcopampa y subyace a la Formación Sencca en discordancia angular con un espesor promedio de 800 metros.

### **Centro Volcánico Kerhuanta (Nm-ke)**

Se observa al norte de la comunidad de Cullahuane, se divide en dos partes, centro volcánico Kerhuanta 1 y centro volcánico Kerhuanta 2; Kerhuanta 1 está compuesto litológicamente por intercalación de depósitos de flujos piroclásticos de

pómez y ceniza de color gris blanquecinos a gris verdosos, ricos en cristales y fragmentos líticos y el Kerhuanta 2 está compuesto por flujos piroclásticos de bloques y cenizas de color gris verdosos intercalado con flujos de lava gris azulados.

#### **Centro Volcánico Soncco (Nm-son)**

Aflora al suroeste de la Mina Bateas, posee dos secuencias volcánicas Soncco 1, que está conformada por depósitos de flujos piroclásticos de ceniza intercalados con flujos piroclásticos de bloques y cenizas de color gris verdoso y Soncco 2, conformado por depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza de color blanquecino, rico en fragmentos líticos, hacia la base presenta flujos de lavas afaníticas de color gris azulado.

#### **Centro Volcánico Chonta (Nm-cho)**

Depósitos de flujos piroclásticos de ceniza, intercalado con flujos piroclásticos de bloques y ceniza de color gris verdoso, aflora en la parte noroeste de la subcuenca Hornillos Alto.

#### **Centro Volcánico Culluncuya (Nm-cu)**

Intercalaciones de depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas gris verdosa, depósitos de pómez, ceniza y lavas andesíticas., aflora en la parte sur oeste de la subcuenca Hornillos Alto.

#### **Centro Volcánico Mismi (Nm-mi)**

Depósitos de flujos de lavas gris verdosas de textura porfídica, de composición riolítica con fenocristales de sanidina, cuarzo y plagioclasas, aflora en la parte centro sur de la subcuenca Hornillos Alto.

#### **Centro Volcánico Caylloma (Np-ca)**

Aflora al norte de la hacienda Huancane, y está compuesto por lavas andesíticas

a riolíticas intercalado con depósitos volcanoclásticos, limolitas y esporádicos conglomerados de color gris blanquecinos y amarillentos; presenta disyunción columnar en su estructura.

#### **Centro Volcánico Chila (Np-chi)**

Depósitos de flujos piroclásticos de pómez y ceniza gris blanquecino intercalado con depósitos de flujos de lavas afaníticas de color gris verdoso, aflora en la parte oeste de la subcuenca Hornillos Alto.

#### **Centro Volcánico Cosana (Np-co)**

Aflora al noreste del centro poblado Pucacancha en la quebrada Utahuanta, la litología está conformada por intercalaciones de depósitos de flujos de lava dacítica de textura afanítica de color gris verdoso y flujos piroclásticos de pómez y ceniza gris claro a gris verdosa. El trabajo de campo se muestra en la Figura 3.10 y Figura 3.11.

El Grupo Tacaza presenta piroclastos permeables que permiten el paso de aguas proveniente de lluvias, pudiendo funcionar como un acuífero no consolidado.



**Figura 3.10 Trabajo de campo, reconocimiento de afloramientos volcánicos del Gp. Tacaza - Caylloma.**  
**Fuente: Elaboración propia**

Los diques andesíticos en la zona tienen gran potencia y pueden generar conexiones de capas litológicas, así como zonas de debilidad que permite el almacenamiento de aguas.



**Figura 3.11** Trabajo de campo, reconocimiento de diques andesíticos cortando secuencias volcánicas alterando roca caja.  
Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3 Depósitos Cuaternarios

#### Depósitos Pleistocénicos (Q-fg)

Generalmente son de origen glaciar y se han agrupado en depósitos de morrenas y glaciofluviales, El material consta de grava, arena y limo inconsolidados. Estos depósitos se emplazan cubriendo unidades mesozoicas y cenozoicas, y su distribución está controlada por la depresión de Cailloma, que ocupa generalmente áreas bajas. Los depósitos morrénicos y glaciofluviales están parcialmente cubiertos por depósitos

recientes tales como material de deslizamiento y/o aluviales (así como por los volcánicos del Grupo Andagua).

### **Depósitos Holocenos (Q-al)**

Los depósitos recientes están representados por aluviales, conos de deyección y material de deslizamiento. Los dos primeros se distribuyen a lo largo de los cursos de los ríos, como el río Apurímac y Molloco; en cambio, el tercero presenta un control litológico–estructural. El material de estos depósitos consta de grava, arena y limo. Estos depósitos recientes, como su nombre lo indica, se han formado en los últimos 10 000 años y revelan el grado de erosión actual. La Figura 3.12, Figura 3.13, Figura 3.14 y Figura 3.15 muestran los reconocimientos realizados en los trabajos de campo en depósitos cuaternarios.



***Figura 3.12*** Trabajo de campo, reconocimiento de depósitos cuaternarios ubicados ambas márgenes del río en forma de terrazas aluviales.

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 3.13** Quebrada Utahuanta, (código SW-018), se encuentran lavas andesíticas afaníticas del Complejo Volcánico Cosana. Se observa el cauce de río con lavas afaníticas fragmentadas.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.14** Trabajo de campo en el río Mismi, (código SW-041), obsérvese la extensa terraza aluvial con depósitos fluvioglaciares, arena fina, media y gruesa con bloques de 10 a 50 cm.

Fuente: Elaboración propia



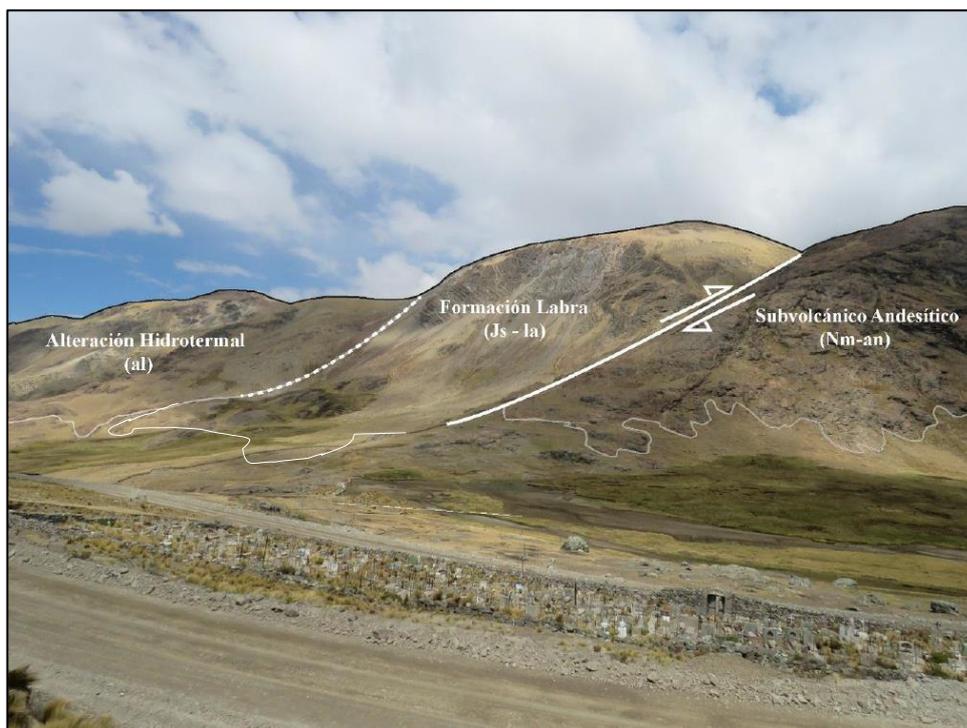
**Figura 3.15** Trabajo de campo en la quebrada Callampure, (código SW-080). En la base del río, se tiene depósitos cuaternarios (gravas, cantos y bloques). En la margen izquierda, existen zonas de alteración hidrotermal y en la margen derecha afloran lavas andesíticas del centro volcánico Cosana.

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Geología estructural

Gran parte del área de las subcuencas se encuentra en el segmento de la Cordillera de los Andes. Los lineamientos tienen dos tendencias: una andina, paralela al borde litoral actual del territorio peruano (estructuras y/o lineamientos de dirección noroeste–sureste); y otra transversal al rumbo andino con dirección noreste – suroeste, que segmenta la cadena andina, (ver Figura 3.16). En la intersección de estos lineamientos estructurales, se localizan algunos yacimientos minerales.

Las unidades mesozoicas están plegadas (Figura 3.17) y falladas en su mayor parte, en tanto que las rocas cenozoicas tienen menor deformación y a su vez han ocultado las evidencias de los afloramientos deformados y/o afectados estructuralmente.



**Figura 3.16** Reconocimiento de campo de areniscas cuarzosas de la Formación Labra en contacto fallado (NO–SE) con un cuerpo volcánico andesítico, alrededores de la Mina Bateas.

Fuente: Elaboración propia

Es posible que la Fm. Labra por poseer alto fracturamiento pueda servir como acuífero. En la zona existe alta presión litostática sin presencia de fracturas, ha profundidad pueda generar porosidad secundaria y permitir comunicación del flujo hídrico (flujo de agua subterránea).



**Figura 3.17** Trabajo de campo, reconocimiento de areniscas cuarzosas de la Formación Labra (Grupo Yura), completamente deformadas, al oeste de la localidad Flor de Mundo en los alrededores de la Mina Bateas.

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.4 Minas en el área de estudio

Se menciona las principales minas en el área con el fin de determinar la relación probable que existiría entre las minas y los valores químicos en el recurso hídrico. En el área de estudios (subcuenca Hornillos Alto), la actividad minera principalmente se dedica a la extracción de Au y Ag, y su referente es la Mina Bateas (anteriormente conocida como Mina Caylloma) de la compañía Fortuna Silver Mines. En la

actualidad, los principales centros mineros que están en actividad son Tambomayo (Compañía Minera Buenaventura), Mina Bateas (Compañía Fortuna Silver) y los proyectos Mayra y Gaby. Estos últimos se encuentran en la fase de exploración (concesiones de la Compañía Minera Buenaventura).

### **Minera Bateas**

El yacimiento (históricamente conocido como mina Caylloma) actualmente se encuentra en operaciones y es considerada la segunda mina más antigua de Latinoamérica (aproximadamente 478 años de vida). Minera Bateas es conocida desde el incanato y trabajada casi en forma continua desde la época colonial (año 1541) hasta la fecha. Los minerales extraídos en Minera Bateas son esfalerita, galena, calcopirita, marcasita, pirita, tetraedrita, polibasita, pirargirita, estibina y oro nativo, además hay cuarzo, rodonita y calcita, que indican un origen epitermal. Se explota principalmente Pb, Ag, Zn y Cu.

### **Proyecto minero Mayra**

La Compañía Minera Buenaventura está a cargo del proyecto Mayra, que se encuentra ubicado en el distrito de Madrigal – Caylloma (Arequipa). El proyecto Mayra se ejecutará con la finalidad de reconocer y cuantificar los recursos en zonas con evidencia superficial de mineralización a través de 3 trabajos de exploración minera en trincheras, perforación diamantina y labores subterráneas, donde se habilitarán 67 plataformas de perforación diamantina en las cuales se ejecutarán 85 sondajes con un avance de 25 m/día. La compañía indicó que su planificación considera 60 meses para el desarrollo de las diferentes actividades del proyecto Mayra (incluyendo las fases de habilitación de accesos), (Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina (OCMAL, 2018).

### **Proyecto minero Gaby**

La Compañía Minera Buenaventura comenzó su primera campaña de exploraciones en el proyecto Gaby en el 2018. Este proyecto está ubicado en la zona de Caylloma (Arequipa). Para realizar esta actividad minera, realizaron la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) al Ministerio de Energía y Minas (MEM), documento en el que se habría precisado que el proyecto comprende la construcción de 20 plataformas de perforación diamantina desde superficie, para lo cual se realizaron, en alguno de los casos, hasta 5 sondajes exploratorios por cada plataforma, con un total de 49 sondajes. Según su planificación, se comentó que el programa de exploración duraría aproximadamente de 3 a 5 años, (Rumbo Minero, 2017).

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E HIDROQUÍMICOS**

#### **4.1 Metodología y recolección de información**

La metodología se dividió en 5 fases que representan los trabajos Precampo, Campo-Análisis de Laboratorio y Postcampo.

**Fase 1:** En la etapa de gabinete, se recopiló y sintetizó la bibliografía de la zona correspondiente a tópicos geológicos, hidrogeológicos, ambientales, estadísticos, hidroquímicos. A partir de la información generada se elaboró la malla de muestreo representativa y se programó las salidas de campo.

**Fase 2:** Etapa de recolección de la información de campo en avenida (Abril-Mayo, 2018).

**Fase 3:** En la etapa de gabinete, se procesó la información obtenida en campo y los resultados analíticos de laboratorio. Para la temporada de avenida, se elaboró la base de datos de línea base inicial, mapas base, diagramas hidroquímicos y análisis estadísticos preliminares.

**Fase 4:** Etapa de recolección de información de campo en temporada de estiaje (Octubre-Noviembre, 2019).

**Fase 5:** Etapa de validación y procesamiento de la información de campo y laboratorio en la temporada de estiaje, que se finalizó con la correlación e interpretación de la información obtenida en ambas temporadas con tablas, gráficas y mapas de geología, hidrogeoquímica, estadísticas e integración-análisis de base de datos.

#### **4.2 Estaciones de muestreo y aforo**

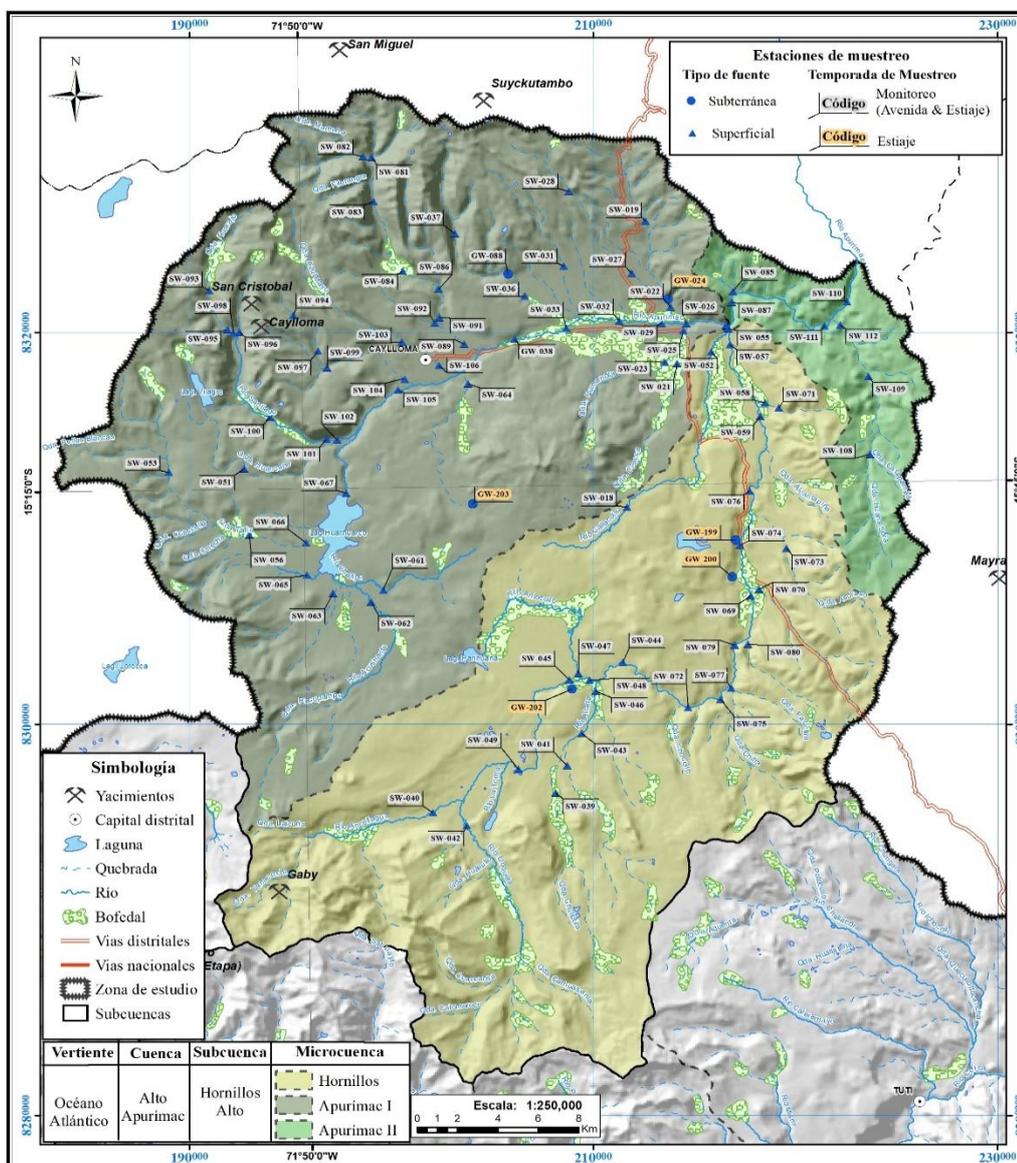
La subcuenca Hornillos Alto pertenece a la región hidrográfica del Atlántico, con una extensión de 1376.6 km<sup>2</sup>, formada por la confluencia de los ríos Hornillos y Apurímac. Las estaciones de muestreo se muestran en la Figura 4.1.

Durante los trabajos de campo la cantidad de muestras se seleccionaron a partir de un análisis integrado de imágenes espectrales en la zona para detección de cuerpos de agua, mapa de drenaje, mapa de pasivos ambientales, cercanía a proyectos minero, mapa geológico base 1:100 000, curva hipsométrica para la acumulación de sedimentos, accesibilidad, criterio de uniformidad geoespacial con el fin de evitar el sesgo y generar muestras equiprobables. Se obtuvieron 84 muestras de agua en la temporada de avenida y 80 en la temporada de estiaje (ver Tabla 4.1). Para la temporada de estiaje, 9 estaciones de muestreo (GW-038, SW-018, SW-041, SW-047, SW-070, SW-071, SW-080, SW-085, SW-086) no presentaba escorrentía; por lo tanto, no se realizó la medición de parámetros físico-químicos ni el muestreo respectivo (Figura 4.1). Las muestras recolectadas fueron analizadas en el laboratorio INGEMMET (para la temporada de avenida) y en ALS GLOBAL (para la temporada de estiaje). ALS GLOBAL está acreditado por INACAL (Instituto Nacional de Calidad). La subcuenca Hornillos Alto se dividió en 3 microcuencas con la finalidad de una mejor interpretación hidrogeoquímica.

**Tabla 4.1**  
**Resumen del número de estaciones de muestreo y aforos de la subcuenca Hornillos Altos en ambas temporadas**

Microcuenca	Río Principal	Área (km <sup>2</sup> )	N° de muestras de agua superficiales		N° de muestras de agua subterráneas				N° de estaciones sin escorrentía		N° de estaciones de aforo (estiaje)	N° de estaciones de aforo (avenida)	
			Temporada de avenida	Temporada de estiaje	Termales (Avenida)	Termales (Estiaje)	Manantiales (Avenida)	Manantiales (Estiaje)	Temporada de avenida	Temporada de estiaje			
			Hornillos	Hornillos	607.32	28	22	0	0	0			3
Apurímac 1	Apurímac	684.63	47	46	1	1	1	2	0	2	1	1	
Apurímac 2	Apurímac	84.65	7	6	0	0	0	0	0	1	0	0	
Subcuenca Hornillos Alto			1376.6	82	74	1	1	1	5	0	9	2	2

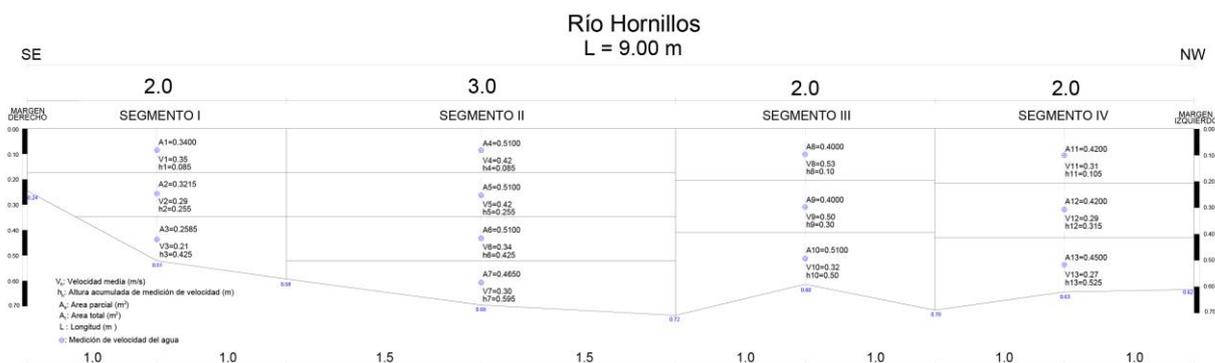
Fuente: Elaboración propia



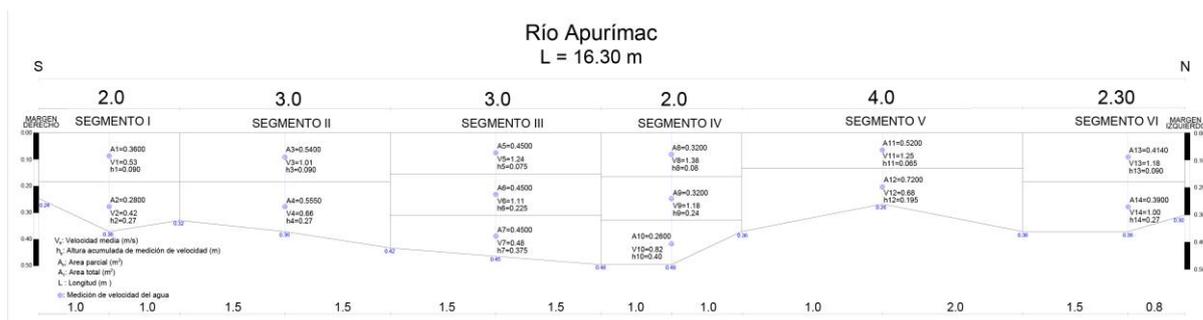
**Figura 4.1** Inventario de las Fuentes en la subcuenca Hornillos Altos  
Fuente: Elaboración propia

En cada estación de muestreo, se realizó la medida de parámetros físico-químicos que fueron codificados siguiendo Normas ISO de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (estaciones de muestreo de aguas superficiales, sedimentos de quebrada y rocas, (código de la subcuenca – año de muestreo - código de la fuentes superficial o subterránea - número correlativo según corresponda)). Cada estación de muestreo registra datos e información de campo como coordenadas, altitud, clasificación, aspectos geológicos, lugar, parámetros físico-químicos, resultados químicos de laboratorio y observaciones de campo consideradas para alcanzar el objetivo de la tesis.

En la subcuenca de Hornillos Alto se realizaron aforos: dos en la temporada de avenida y estiaje, ubicados en los ríos Hornillos y Apurímac 1, para el cálculo de caudales, que se realizó mediante secciones transversales, y se obtuvo caudales de 5544.12, 1956.52 l/seg en la temporada de avenida y 948.24, 660.18 l/seg para la temporada de estiaje, y una disminución aproximadamente del 80% para el río Apurímac y 30% para el río Hornillos (ver Figuras 4.2 y 4.3).



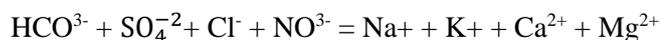
**Figura 4.2 Sección transversal del río Hornillos**  
**Fuente: Elaboración propia**



**Figura 4.3** Sección transversal del río Apurímac  
Fuente: Elaboración propia

### 4.3 QA/QC hidroquímico (avenida/estiaje)

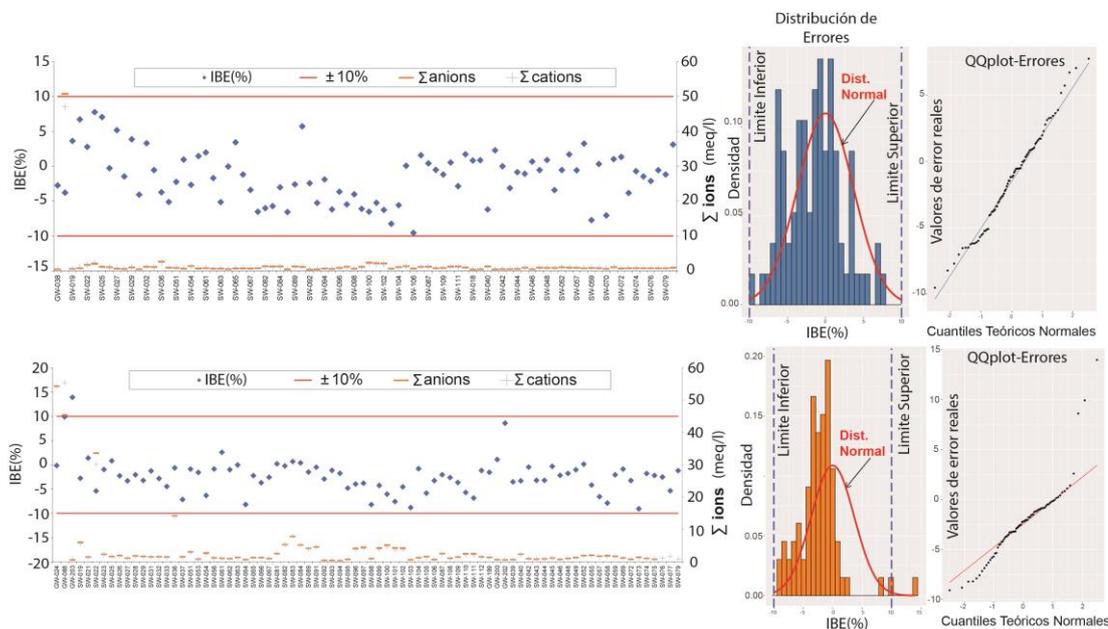
En el análisis químico de agua, de acuerdo con Penn (1976) se debe cumplir que la suma de equivalentes de aniones ha de ser igual a la de cationes. De no ser así, se puede tratar de un error analítico, o que no se ha determinado algún ion mayoritario. Normalmente se cumple que:



En la práctica, no existe una coincidencia total, consecuencia de los errores en las determinaciones de concentraciones de cada ion. El error de balance de un análisis químico viene dado por la expresión (Custodio y Llamas, 1983):

$$\text{ERROR (\%)} = 200 \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

Şen (2015) es más flexible y propone la misma expresión, pero en porcentaje estricto (multiplicado por 100 en lugar de 200). El error admisible está en función del tipo de análisis y de las concentraciones, y es mayor cuanto mayor es el contenido salino total y viceversa. En la Figura 4.4 se muestra donde se realiza el análisis de control y aseguramiento químico.



**Figura 4.4** Análisis de errores de balance iónico en avenida y estiaje  
Fuente: Elaboración propia

En la subcuenca Hornillos Alto, se realizó un balance iónico de los iones mayoritarios para calcular el porcentaje de error del balance (% Error de balance iónico - EBI), se tiene como rangos +/-10% para ser considerado aceptable. Del cálculo se obtuvo que para la temporada de avenida el porcentaje EBI se encuentra dentro del rango establecido y en la temporada de estiaje solo una estación de muestreo (GW-203) se encuentra fuera del rango, debido a que la muestra es subterránea y tiene valores de conductividad muy altos debido a la mayor cantidad de sólidos disueltos totales que genere que el porcentaje EBI esté fuera.

#### 4.4 Hidroquímica

El análisis hidroquímico tiene como objetivo determinar las características químicas de los elementos mayoritarios (cationes y aniones) de las fuentes de aguas superficiales y subterráneas en la subcuenca Hornillos Alto, sus relaciones con las unidades geológicas, características litológicas, ocurrencias minerales, alteraciones y

actividades antrópicas. Así mismo, se pretende determinar a qué tipo de facies o clase pertenece cada fuente acorde a su distribución espacial.

#### **4.4.1 Iones mayoritarios**

En las aguas naturales, las sustancias disueltas están esencialmente en forma iónica; existen unos pocos iones que constituyen el grueso de la mineralización, iones mayoritarios, conformados principalmente por los cationes (calcio, magnesio, sodio y potasio) y los aniones (bicarbonatos, carbonatos, sulfatos y cloruros). Los valores de concentraciones de los iones están en miliequivalentes litro (meq/l) y se usan cuando se quiere analizar químicamente el agua mediante reacciones.

A continuación, se hace una descripción de los iones en cada microcuenca.

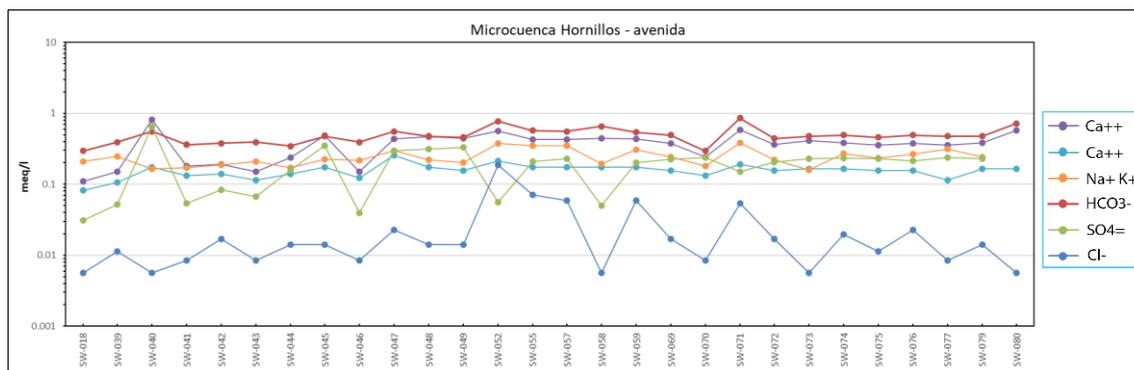
##### **Microcuenca Hornillos**

Ubicada en la parte suroeste de la subcuenca Hornillos Alto, y como curso principal está el río Hornillos; en esta microcuenca se encuentra la naciente del río Amazonas. En la temporada de avenida, las concentraciones de los iones son menores y presentan mayor homogeneidad con respecto a la temporada de estiaje, probablemente debido a las mayores precipitaciones que ocasionan un aumento de aguas meteóricas, que genera una mayor dilución en las concentraciones. En las Figuras 4.6 y 4.7, se puede observar que, en relación con los aniones, el que presenta mayor concentración es el bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), indicando que uno de los factores predominantes en esta microcuenca son las precipitaciones.

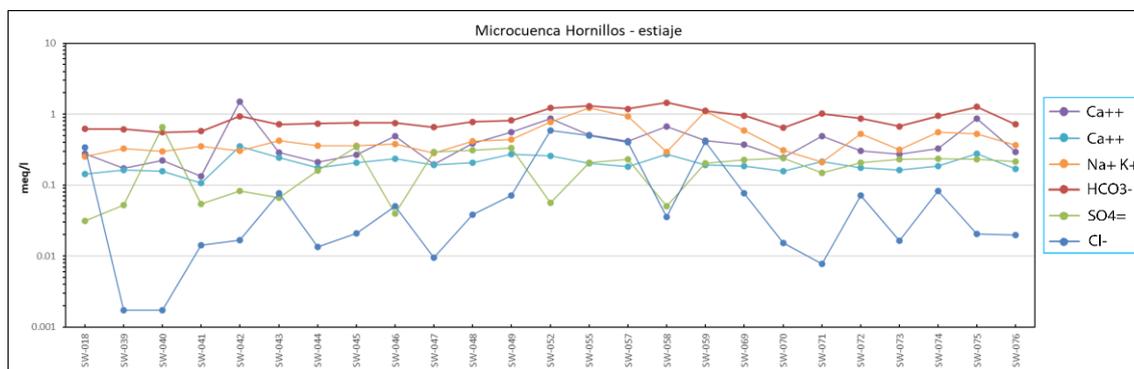
En relación con los cationes, en la temporada de estiaje, los valores de concentración de sodio y potasio son mayores que los de calcio respecto a la temporada de avenida, que indica que otro de los factores predominantes en esta temporada es la interacción agua-roca, puesto que en la microcuenca Hornillos predominan rocas

volcánicas constituidas principalmente de lavas andesíticas.

En las Figuras 4.5 y 4.6, se observa para ambas temporadas la mayor concentración de magnesio en el punto de muestreo generado a consecuencia de la existencia de alteraciones geológicas aguas arriba.



**Figura 4.5** Variación de iones mayoritarios en la microcuenca Hornillos - temporada de avenida  
**Fuente:** Elaboración propia



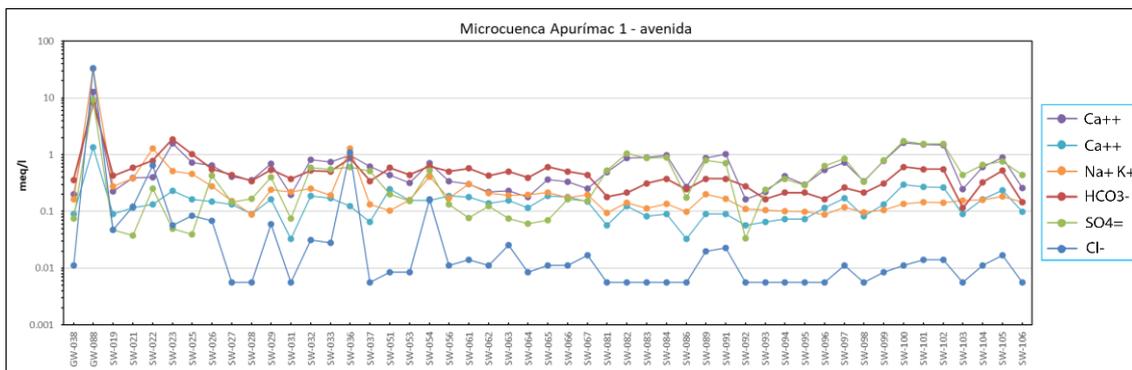
**Figura 4.6** Variación de iones mayoritarios en la microcuenca Hornillos - temporada de estiaje  
**Fuente:** Elaboración propia

### Microcuenca Apurímac 1

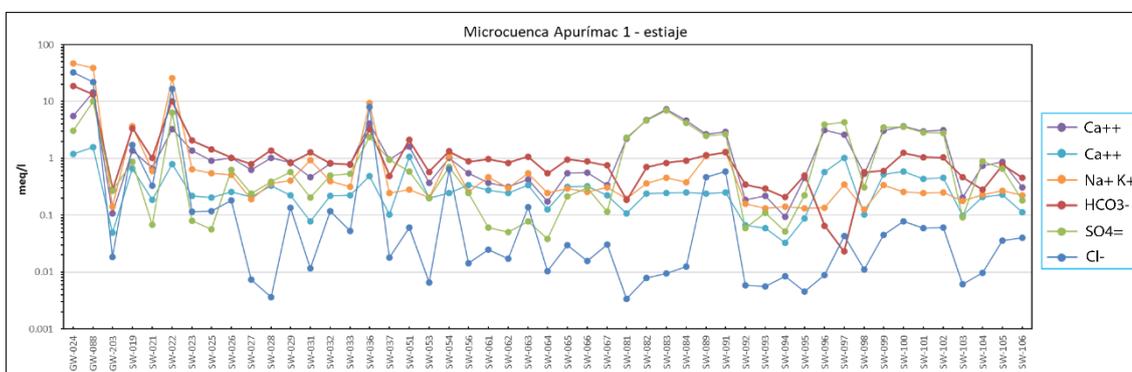
Esta microcuenca se encuentra ubicada en la parte noreste de la subcuenca Hornillos Alto, y tiene como curso principal el río Apurímac, donde se encuentran proyectos mineros, así como antiguas actividades antrópicas abandonadas. En la temporada de avenida, las concentraciones de los iones son menores y presentan mayor

homogeneidad respecto a la temporada de estiaje, a consecuencia del aumento de precipitaciones, que produce una mayor dilución en las concentraciones. En las Figuras 4.8 y 4.9, se observa que la distribución de los iones es más heterogénea en comparación con la microcuenca Hornillos debido a la existencia de alteraciones geológicas, yacimientos minerales, antiguas actividades extractivas y fuentes termales diversas en Apurímac 1. Las estaciones de muestreo GW-024 y GW-088 presentan mayores concentraciones iónicas por pertenecer a fuentes termales, Gibbs (1970) indica que para sistemas termodinámicos las condiciones de entalpía y entropía del sistema varía en forma constante, considerando que, si el factor de temperatura aumenta, se genera la condición de disolución de la reacción espontánea (aumento de temperatura genera un avance de reacciones espontáneas en dirección normal), por tanto, mayor disolución de iones. Adicionalmente, las estaciones superficiales SW-022 y SW-036 presentan concentraciones mayores, debido a que se encuentran por debajo de las fuentes termales mencionadas y por ende son modificadas por las fuentes termales.

En relación con los aniones, la mayor concentración se presenta en el bicarbonato  $HCO_3^-$ . Se infiere que uno de los factores predominantes en esta microcuenca son las precipitaciones, esto es explicado a detalle en los diagramas de Gibbs realizados, que se pueden ver en la Figura 4.15. En las Figuras 4.7 y 4.8, se observa que las mayores concentraciones de sulfatos se encuentran en las estaciones de muestreo SW-081, SW-082, SW-083, SW-084, SW-089, SW-091 (ubicadas en la quebrada Pullumayo y afluentes), SW-096, SW-097, SW-099, SW-100, SW-101, SW-102 (ubicadas el río Santiago y quebrada Lama Mayo), afectadas por los diferentes proyectos mineros y antiguas actividades extractivas.



**Figura 4.7** Variación de iones mayoritarios en la microcuenca Apurímac 1 - temporada de avenida.  
Fuente: Elaboración propia

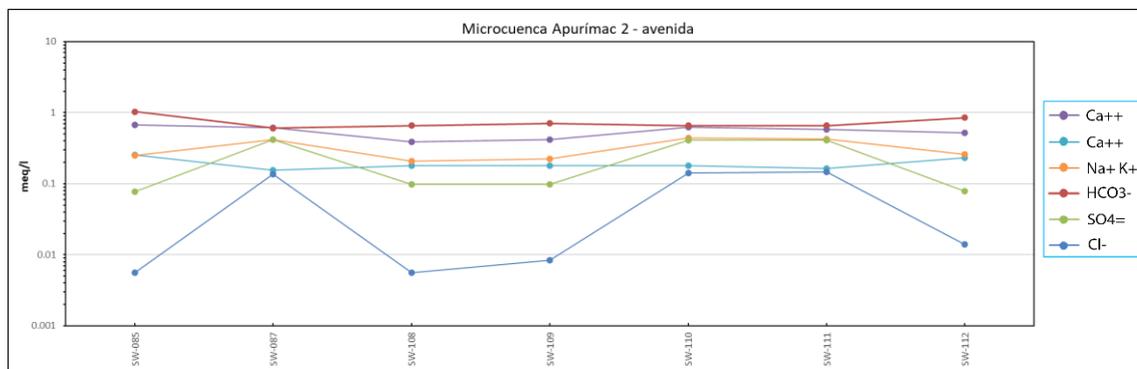


**Figura 4.8** Variación de iones mayoritarios en la microcuenca Apurímac 1 - temporada de estiaje.  
Fuente: Elaboración propia

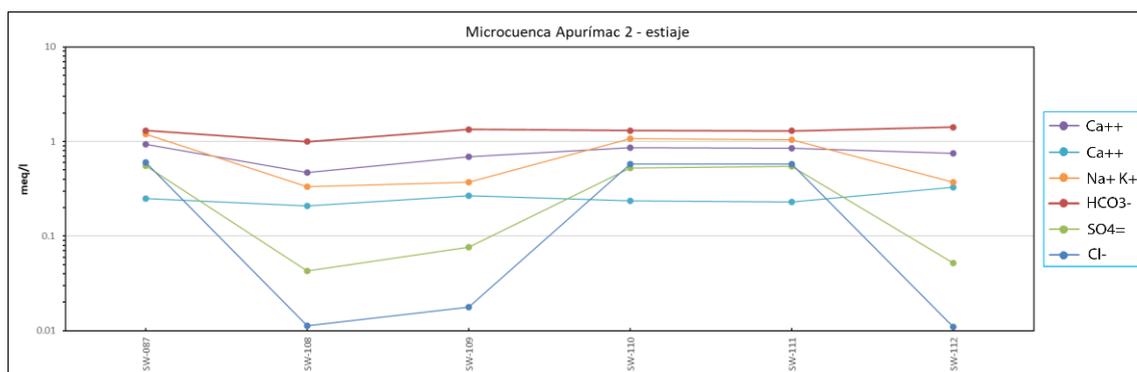
### Microcuenca Apurímac 2

Esta microcuenca geográficamente se delimitó a la parte noroeste de la subcuenca Hornillos Alto, después de la confluencia de los ríos Hornillos y Apurímac. Está constituida de 7 estaciones de muestreo para la temporada de avenida y 6 para estiaje. En la Figura 4.9 y en la Figura 4.10, se observan los valores de concentración de los diferentes iones mayoritarios en las diferentes estaciones de muestreo. En la mayoría de las estaciones se observa una tendencia regular (se considera regular cuando los cambios son menores a 2 desviaciones estándar en los valores de concentración de acuerdo con Tukey, 1962) tanto en la temporada de avenida como de

estiaje; y también se observa que existe un ligero aumento de las concentraciones en estiaje respecto a avenida.



**Figura 4.9** Variación de iones mayoritarios en la microcuenca Apurímac 2 - temporada de avenida  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.10** Variación de iones mayoritarios en la microcuenca Apurímac 2 - temporada de estiaje  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.2 Caracterización hidroquímica

Las facies hidroquímicas se determinaron por la metodología del ion predominante que consiste en nombrar el agua por el anión o catión que sobrepasa el 50 % de sus sumas respectivas. Si ninguno supera al 50 %, se nombran los dos más abundantes. Si conviene, se puede añadir el nombre de algún ion de menor de interés y que esté en concentración anormalmente alta. Como resultado se diferenciaron 4 facies hidroquímicas en la temporada de avenida y estiaje, predominando la facie

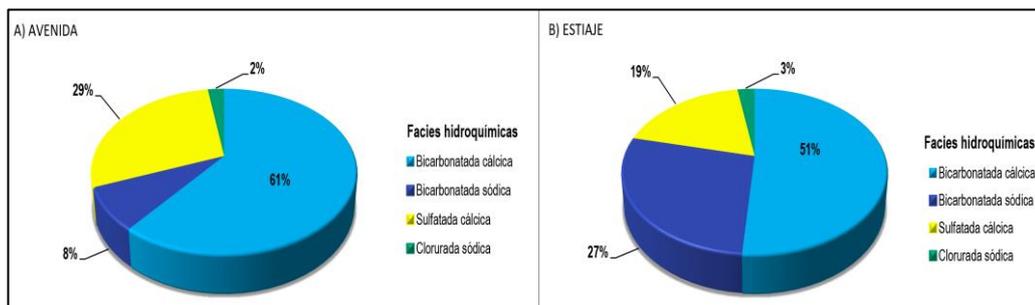
hidroquímica bicarbonatada cálcica seguida de la sulfatada cálcica en ambas temporadas (Tabla 4.2).

**Tabla 4.2**  
*Facies hidroquímicas de las fuentes de aguas superficiales de la subcuenca Hornillos*

<b>FACIES HIDROQUÍMICAS</b>					
<b>Temporada de avenida</b>					
Subcuenca	Microcuenca	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada sódica	Sulfatada cálcica	Clorurada sódica
Hornillos Alto	Hornillos	23	4	1	0
	Apurímac 1	21	3	23	2
	Apurímac 2	7	0	0	0
<b>Total</b>		51	7	24	2
<b>Porcentaje</b>		61%	8%	29%	2%
<b>Temporada de estiaje</b>					
Subcuenca	Microcuenca	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada sódica	Sulfatada cálcica	Clorurada sódica
Hornillos Alto	Hornillos	12	12	1	0
	Apurímac 1	26	7	14	2
	Apurímac 2	3	3	0	0
<b>Total</b>		41	22	15	2
<b>Porcentaje</b>		51%	28%	19%	3%

**Fuente:** Elaboración propia

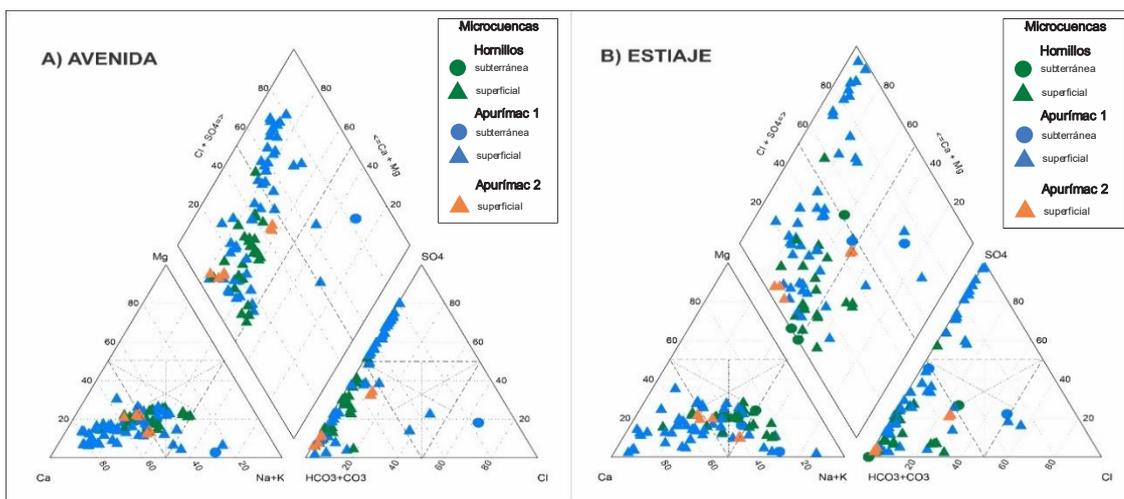
En la Figura 4.11, se observa la representación pastel de las facies hidroquímicas de acuerdo con el porcentaje que presentan en cada temporada. Luego de caracterizar cada estación de muestreo, se realizó un mapa hidroquímico (ver Figura 4.32), donde se presenta la distribución espacial de las facies hidroquímicas.



**Figura 4.11** Proporción porcentual de facies hidroquímicas de la subcuenca Hornillos Alto en ambas temporadas  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.12 se observa para la temporada de avenida (A), la facies hidroquímica predominante, que es la bicarbonatada cálcica (61 %), seguida de la sulfatada cálcica (29%) y en menor las facies: bicarbonatada sódica (8%) y clorurada sódica (2%). Para la temporada de estiaje (B), predomina la bicarbonatada cálcica (51%) seguida de la bicarbonatada sódica (27%) y en menor las facies: sulfatada cálcica (19%) y clorurada sódica (3 %).

En la subcuenca de Hornillos Alto, la representación de las facies hidroquímicas de las muestras de aguas (superficiales y subterráneas), se realizó con el diagrama hidroquímico Piper para cada temporada, como se observa a continuación:



**Figura 4.12** Diagrama Piper de la subcuenca Hornillos Alto en avenida y estiaje en ambas temporadas  
Fuente: Elaboración propia

Para un mejor análisis e interpretación se realiza una descripción por microcuena.

### **Microcuena Hornillos**

Se obtuvieron 28 estaciones de muestreo en avenida y 25 en estiaje. La facies que predomina es la bicarbonatada cálcica en avenida, generada por el aumento de precipitaciones (uno de los orígenes del ion bicarbonato son las aguas meteóricas). En estiaje, predomina las bicarbonatadas sódica, debido a que existe una mejor interacción agua-roca (menor velocidad del flujo, mayor tiempo de permanencia), por ende, la presencia del ion sodio se daría en su mayoría por el aporte de las rocas de lavas andesíticas de los Centros Volcánicos Culluncuna, Cosana, Ichocollo, además de las rocas de las Formaciones Puente, Cachíos, Labra. A excepción de todo el conjunto de muestras en esta microcuena que pertenece a una facies bicarbonatada, la estación de muestreo SW-040 (ubicada en el río Ancollagua) pertenece a una sulfatada cálcica en ambas temporadas, posiblemente influenciada por la interacción del agua con la alteración geológica (óxidos) la obtención del  $\text{Ca}^{2+}$  es principalmente por descomposición de aluminosilicatos primarios (feldespatos) particularmente las plagioclasas que se transforman en minerales de arcilla como montmorillonita, caolinita y gibbsita; en campo se identificó anortita en mayores cantidades y presencia de caolinita en la zona, lo cual explica la mayor cantidad de Ca en las aguas sustentado en la siguiente ecuación:



Anortita

Caolinita

Por otro lado, la presencia del sulfato es posible por hidratación de la esfalerita y galena. Las siguientes ecuaciones generan el aporte de sulfatos, considerando

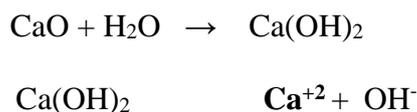


En el diagrama de Piper (Figura 4.12), se observa para la microcuenca Hornillos en la temporada de avenida en relación a los cationes, que no hay un ion que predomine mayor al 50%, sino que se encuentra en una zona de mezcla de calcio y sodio, a diferencia de la temporada de estiaje donde se observa una tendencia de predominancia del sodio, que indica los factores predominantes en la modificación y caracterización química de las fuentes (aguas superficiales y subterráneas), que son la precipitación para la temporada de avenida y la interacción agua - roca para la temporada de estiaje.

### **Microcuenca Apurímac 1**

En esta microcuenca, se obtuvieron 49 estaciones de muestreo tanto en avenida como en estiaje y según el ion dominante predominan la facie bicarbonatada cálcica y la facie sulfatada cálcica.

Al sur de esta microcuenca, en la parte alta, las estaciones de muestreo ubicadas en el río Huarhuarco y sus afluentes principales (ríos Chalpo y Huancuri, quebradas Musca y Talla) pertenecen en su mayoría a la facies bicarbonatada cálcica en ambas temporadas, debido a la interacción con las rocas volcánicas, esto se sustenta en la influencia de elementos mayoritarios de óxidos de aluminio y óxidos de calcio que en baja temperatura reaccionan con agua, la ecuación siguiente muestra el funcionamiento del proceso:

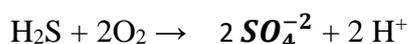


El OH<sup>-</sup> aumenta la basicidad del agua. Por otro lado, las precipitaciones generan bicarbonato, mediante la siguiente ecuación:

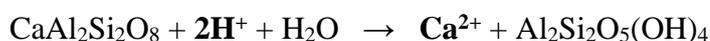




De acuerdo con las ecuaciones se observa que hay mayor proporción de los iones predominantes. La Microcuenca Apurímac 1 es naciente y las aguas tienen poco recorrido, que es característico para generar la facies bicarbonatada cálcica. Al noreste, hay predominancia de la facies sulfatada cálcica, las aguas en contacto con zonas de alteración donde hay arcillas; contacto y tiempo de retención de materiales no consolidados, rellenos cuaternarios, con presencia de arcillas y disolución de minerales sulfurosos que se encuentran en esta zona provenientes de las minas, pasivos, fuentes termales y alteraciones geológicas arcillosas identificadas en campo generan este tipo de aguas (facies sulfatada cálcica). Las ecuaciones que justifican estos intercambios y generaciones de sulfatos y calcio son las siguientes:

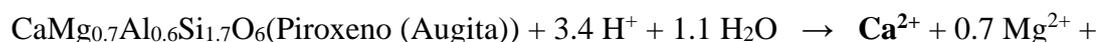


Las aguas de procedencia magmática proveniente de fuentes termales, características de esta zona dan el sulfuro de hidrógeno que en reacción con el oxígeno y genera el sulfato.



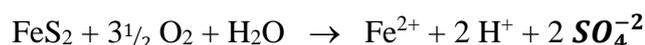
Anortita

Caolinita

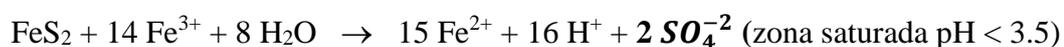


La descomposición de silicatos primarios de aluminio (feldespatos), particularmente

las plagioclasas que se transforman en minerales de arcilla como montmorillonita son aportantes principales de calcio. Los pasivos mineros por su parte son generadores de sulfatos, durante la secuencia de oxidación del sulfuro de hierro y acidificación del agua. Las siguientes ecuaciones explican el proceso:

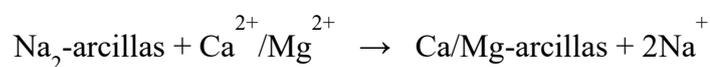


$\text{Fe}^{2+} + \frac{1}{4} \text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$  (catalizada por *Thiobacillus ferrooxidans* y otras bacterias aeróbicas y acidófilas)



Esta facies sulfatada cálcica está caracterizando a los cursos de los ríos Santiago (y afluentes), Apurímac (parte alta), quebradas: Lama Mayo, Azul Mayo, Chonta, Pullumayo.

La facies clorurada sódica se presenta en las estaciones de muestreo GW-024, GW-088, debido a que pertenecen a fuentes termales, en donde el intercambio de cationes se sustenta mayormente absorbiendo  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  en la superficie de minerales y liberando  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ . Hay liberación de  $\text{Na}^+$  por descomposición de feldespatos. La siguiente ecuación explica el proceso:



El ion cloruro en las rocas se presenta en escasa proporción, con elevada solubilidad de sus sales, pasan rápidamente a la fase acuosa, pudiendo alcanzar concentraciones muy altas. No forma sales de baja solubilidad, no se oxida, ni se reduce en aguas naturales, tampoco es adsorbido significativamente, ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, por lo tanto, la surgencia de este anión predominante interpreta que

poseen un tiempo de retención considerable y provienen de flujos regionales.

Las estaciones SW-022 y SW-036 son cloruradas sódicas, debido a que estas fuentes se encuentran por debajo de las fuentes termales y por ende son modificadas por dichas fuentes. (ver Figura 4.14).



**Figura 4.14** Estación de muestreo GW-040 (Termal Santa María) en la temporada de estiaje

**Fuente: Elaboración propia**

En el diagrama de Piper (Figura 4.12) se observa para la microcuenca Apurímac 1, que los aniones predominantes son el bicarbonato y sulfato. Con relación a los cationes, predomina el calcio en la temporada de avenida y en estiaje tienen una tendencia de incremento del sodio en un 15%, indicando que uno de los principales modificadores en avenida son las precipitaciones y en estiaje la interacción agua-roca, según Gibbs (1970).

## Microcuenca Apurímac 2

Esta microcuenca se encuentra al Noroeste y se delimitó después de la confluencia de los ríos Hornillos y Apurímac. Se tomaron 7 estaciones de muestreo en avenida y 6 en estiaje; al analizarlas en la temporada de avenida todas pertenecen a la facies bicarbonatada cálcica, y en la temporada de estiaje están divididas en facies bicarbonatadas cálcicas y sódicas.

La estación de muestreo SW-07, tomada en el río Apurímac, después de la confluencia de los ríos principales de las microcuencas Apurímac 1 y Hornillos, pertenece en la temporada de avenida a una facies bicarbonatada cálcica y en estiaje a bicarbonatada sódica. Esto determina la influencia en gran parte por el aporte de caudal del río Hornillos, debido a que el río Hornillos antes de su confluencia, presenta las mismas facies en ambas temporadas.

En la Figura 4.12, se observa que al igual que en las otras microcuencas, que el sodio tiende a aumentar en la temporada de estiaje respecto a la de avenida.

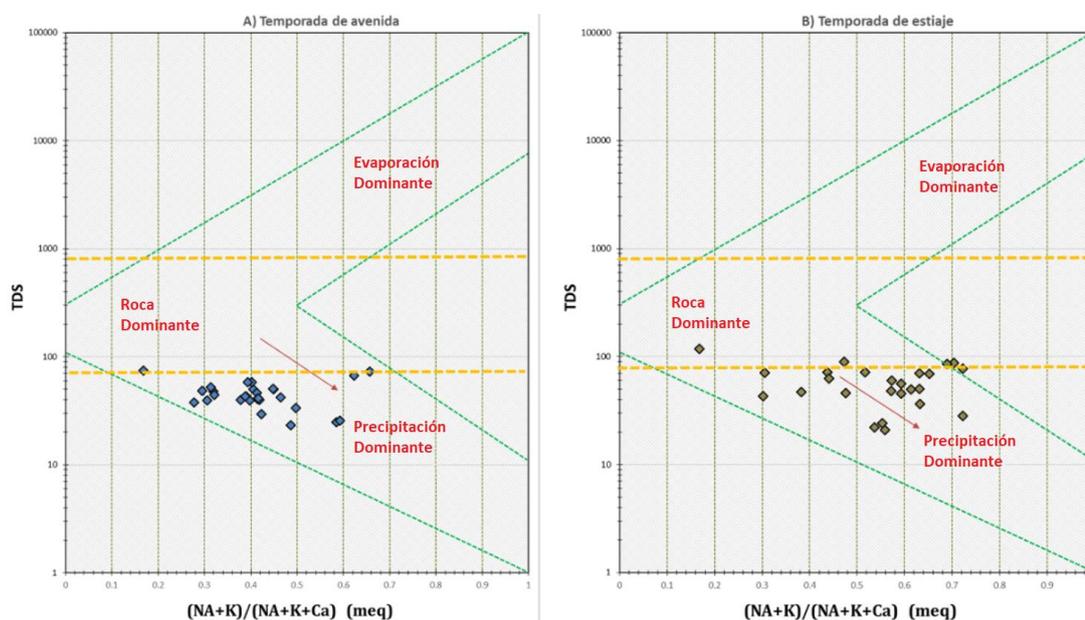
### 4.4.3 Diagrama de Gibbs

Este diagrama fue desarrollado por Gibbs (1970) para el análisis del estudio del agua superficial. Actualmente, se está utilizando también para agua subterránea. Este diagrama muestra la concentración de los sólidos disueltos y la relación de  $\text{Na}/(\text{Na}+\text{K})$ , para cationes y para aniones  $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HCO}_3^-)$ . En el diagrama es posible identificar tres procesos que ocurren en la dinámica del agua superficial-subterránea, proceso de precipitación meteórica (lluvia y su rápida infiltración), proceso de intemperismo (interacción agua-roca), y proceso de evaporación – cristalización (tomando como factor la temperatura).

En la subcuenca de Hornillos Alto, se desarrollaron diagramas de Gibbs en

relación con los sólidos totales disueltos (TDS) que presentan similar ratio  $Cl/(Cl+HCO_3^-)$  y de los cationes  $Na/(Na+K)$ . Se tomaron concentraciones disueltas convertidas en unidades de miliequivalentes por litro (meq/l), que se desarrolló para cada microcuenca y temporada con el fin de diferenciar cuáles son los factores que predominan en las zonas de estudio.

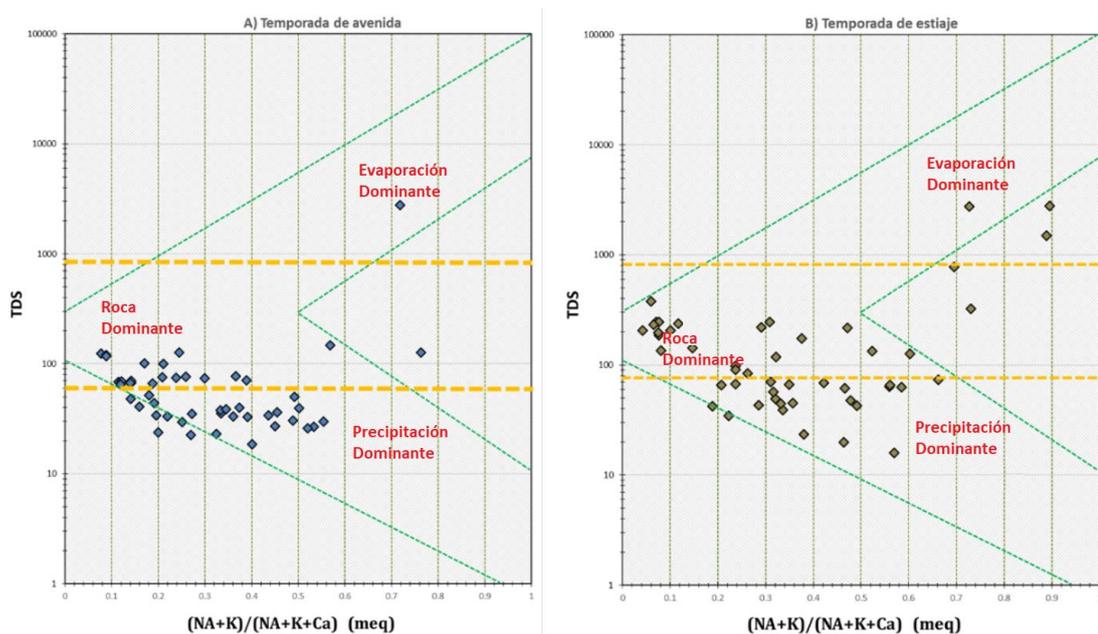
En la Figura 4.15, se observa el análisis realizado para la microcuenca Hornillos, las aguas superficiales y subterráneas están dominadas por la precipitación, que es el principal factor influyente en la modificación y caracterización química de las aguas en esta zona. En esta microcuenca, las estaciones muestreadas se tomaron en las nacientes de la subcuenca Hornillos Alto.



**Figura 4.15** Diagrama Gibbs para la microcuenca Hornillos ambas temporadas  
Fuente: Elaboración propia

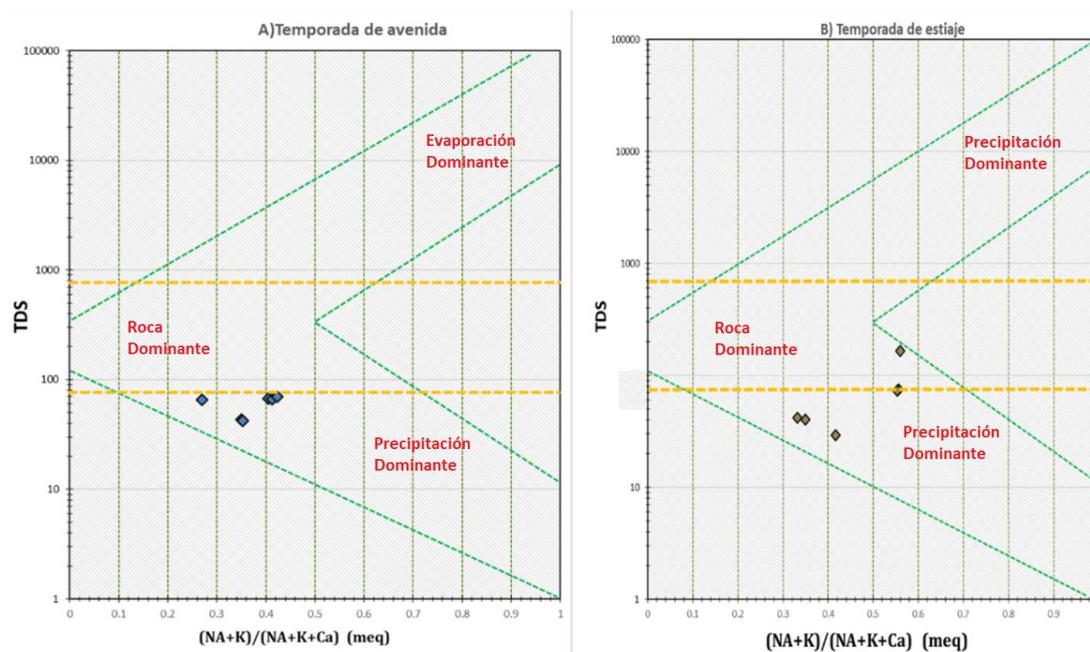
En la Figura 4.16, se observa el análisis realizado para la microcuenca Apurímac 1. Existen dos factores predominantes que son la precipitación

principalmente en la parte alta de esta microcuenca y el intemperismo (interacción agua-roca), mayormente en las zonas donde se encuentra los yacimientos mineros, alteraciones geológicas y antiguas actividades extractivas. Solo unas cuantas muestras de las estaciones de muestreo se producen por el factor de evaporación, a consecuencia de poseer las mayores temperaturas (fuentes termales).



**Figura 4.16** Diagrama Gibbs para la microcuenca Apurímac 1, ambas temporadas  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.17, se observa que el factor predominante en esta microcuenca es la precipitación, además de existir una tendencia al intemperismo a causa de que la mitad de los puntos muestreados pertenecen al río Apurímac, que recibe el aporte de las microcuencas Hornillos y Apurímac 1.



**Figura 4.17** Diagrama Gibbs para la microcuenca Apurímac 2, ambas temporadas  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.4 Parámetros físico-químicos

La capacidad de disolvente que presenta el agua y la interacción con el medio (roca o suelo) causan que se cargue de diferentes iones y presente características propias y singulares, cambiando sus características físico-químicas como el pH, conductividad eléctrica, salinidad, temperatura, resistividad, entre otros.

El potencial hidrógeno (pH) es una medida de la acidez del agua, se obtiene del inverso del logaritmo de la concentración de iones hidrógenos, es adimensional, y es 7 el valor que corresponde al pH neutro. Los valores de pH inferiores a 7 corresponden a medios ácidos y los valores superiores a 7 a medios básicos (o alcalinos). En las aguas naturales, el pH oscila generalmente entre 6.5 y 8 (Martínez et al., 2006).

La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad que tiene el agua para conducir la corriente eléctrica, y depende de la cantidad, carga y movilidad de iones disueltos. La unidad de medida es microsiemens/cm (uS/cm), los cambios en el pH y

la temperatura influyen en la solubilidad de las sales y por lo tanto en la conductividad eléctrica (Martínez et al., 2006).

La salinidad es la concentración de los sólidos totales disueltos (TDS) en el agua o específicamente como la concentración total de minerales y/o sales inorgánicas disueltas en el agua. En estudios oceanográficos, es la medición de la cantidad de sales (en gramos) disueltos en 1000 g de agua de mar presentados en partes por mil (ppt). En el agua dulce, el contenido de sales debe ser menor a 0.5 ppt, las aguas salobres están comprendidas en el rango 0.5 - 30 ppt, las aguas saladas registran valores entre 30 - 50 ppt y las salmueras serán aquellas aguas con valores mayores a 50 ppt (Poehls y Smith, 2011). La salinidad actualmente es expresada en Unidades Prácticas de Salinidad (UPS ó PSU), adimensional y que corresponden exactamente al mismo valor de partes por mil (ppt = partes por miles).

Las aguas se pueden clasificar de acuerdo con diferentes escalas de temperatura, de modo que las aguas menores a 0°C se consideran como extremadamente frías; si están entre 0-4°C, serán aguas muy frías; de 4-20°C, aguas frías; de 20-35°C, aguas termales débiles; de 35-42°C, aguas termales medias; de 42-100°C, aguas termales calientes; y aquellas que estén por encima de los 100°C serán consideradas como aguas extremadamente calientes.

La Tabla 4.3 muestra los máximos, mínimos, media y mediana de los datos obtenidos en campo durante las campañas de muestreo. Estas mediciones se realizaron con el objetivo de evaluar la variabilidad de los parámetros físico-químicos.

Los parámetros físico-químicos fueron comparados con lo establecido en la legislación peruana de acuerdo con el DS N° 004-2017-MINAM: Modificación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua (ECA). Así mismo, de

acuerdo con la Resolución Jefatural N° 270-2017-ANA, la subcuenca Hornillos Alto está clasificada con la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales. Se realizaron gráficos y mapas para la interpretación de los datos. A continuación, se hace la descripción de los parámetros por microcuenca.

**Tabla 4.3**

**Resumen de las estadísticas de los parámetros físico-químicos de la subcuenca Hornillos Alto (por microcuenca) en avenida y estiaje**

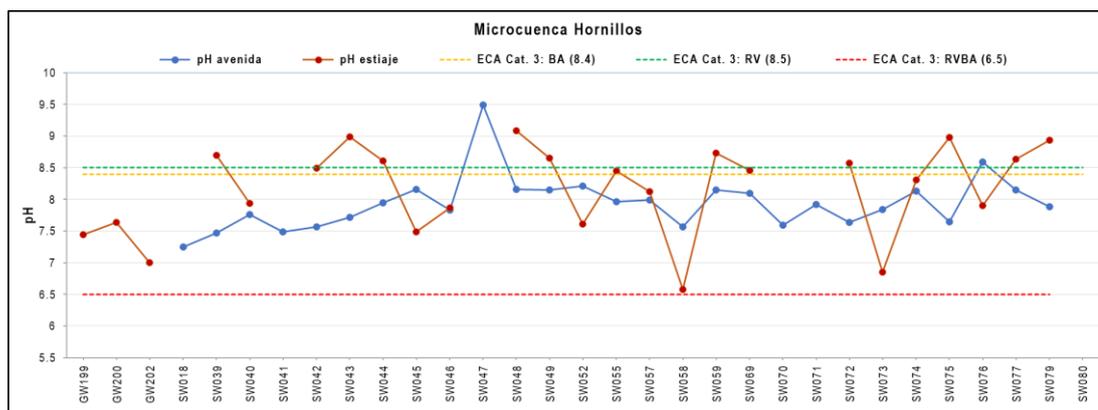
Temporada	AVENIDA					ESTIAJE				
Parámetro	N° Datos	Máximo	Mínimo	Media	Mediana	N° Datos	Máximo	Mínimo	Media	Mediana
<b><i>M. Hornillos</i></b>										
T_°C	28	16.5	6.3	11.06	11.15	25	21.2	7.3	15.79	15.3
pH	28	9.49	7.25	7.94	7.9	25	9.08	6.58	8.16	8.45
ORP_mV	28	340	-67.5	171.69	234.35	25	536.7	47.8	198.02	137.5
CE_uSCm	28	151.2	46.3	90.86	86.61	25	239.5	41.12	117.36	113.2
TDS_mgL	28	74.78	23.19	45.13	42.975	25	117.8	20.87	58.00	55.97
Salinidad_PSU	28	0.118	0.072	0.09	0.092	25	0.163	0.072	0.11	0.104
OD_mgL	28	8.37	5.66	6.96	6.965	25	8.35	4.84	6.84	6.81
<b><i>M. Apurímac 1</i></b>										
T_°C	49	39	7.9	13.06	13	49	48.8	7.5	16.50	15.5
pH	49	9.35	6.21	7.63	7.64	49	9.49	5.65	7.92	7.92
ORP_mV	49	414	-103.2	125.23	154	49	553.8	71.1	242.69	149.7
CE_uSCm	49	5671	36.9	231.48	96.54	49	5669	31.4	551.89	183.8
TDS_mgL	49	2779	18.58	114.02	47.8	49	2778	15.89	269.65	90.56
Salinidad_PSU	49	3.117	0.069	0.17	0.096	49	3.098	0.065	0.33	0.137
OD_mgL	49	7.81	4.58	6.53	6.43	49	10.75	0.57	6.41	6.47
<b><i>M. Apurímac 2</i></b>										
T_°C	7	16.7	12.5	14.27	14.1	6	16.1	12.1	14.18	14.55
pH	7	8.37	7.66	8.09	8.1	6	8.95	7.83	8.44	8.455
ORP_mV	7	275.3	136	230.84	252	6	417.3	169.6	223.40	189.45
CE_uSCm	7	142.2	85.33	117.32	132.8	6	336.4	58.51	143.54	116.53
TDS_mgL	7	70.18	42.31	58.04	65.74	6	164.7	29.17	70.76	57.685
Salinidad_PSU	7	0.117	0.091	0.11	0.113	6	0.207	0.079	0.12	0.1065
OD_mgL	7	7.82	6.34	6.97	6.86	6	8.53	6.77	7.67	7.88
Total Datos	84					80				

**Fuente: Elaboración propia**

### Microcuenca Hornillos

En esta microcuenca, la mayoría de los datos de pH se encuentran dentro del rango de 6.5 a 8.5, que presenta una media de 7.94 para avenida y 8.16 para estiaje,

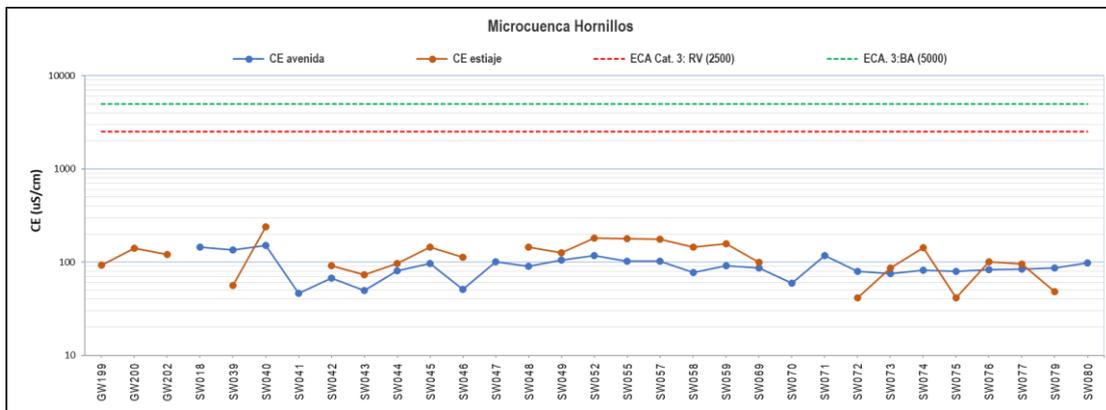
así como una mediana de 7.9 para avenida y 8.45 para estiaje (Tabla 4.3). La Figura 4.18 muestra la variación de pH en ambas temporadas, observándose una tendencia irregular. Además, la mayoría de los valores de pH aumenta en la época de estiaje, por disminución de lluvias, así como, por la interacción con rocas básicas (andesitas). En esta microcuenca, no se tiene actividades mineras de explotación.



**Figura 4.18 Variación del pH para la microcuenca Hornillos en avenida y estiaje**  
Fuente: Elaboración propia

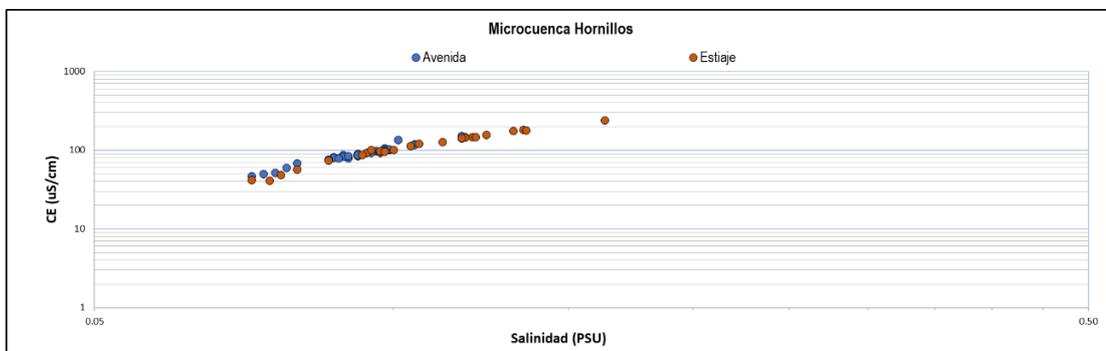
Para el análisis de la variación de la CE en la subcuenca Hornillos Alto, se comparó los valores con los ECA para el agua categoría 3, donde se clasifica a la CE para el Riego de vegetales como apto para valores menores a 2500 uS/cm y para Bebida de animales menores a 5000 uS/cm. De acuerdo con el análisis estadístico, presenta un valor mínimo de 46.30 uS/cm, uno máximo de 151.20 uS/cm, media de 90.86 uS/cm, mediana de 86.61 uS/cm en la temporada de avenida; y como valor mínimo de 41.12 uS/cm, máximo de 239.5 uS/cm, media de 117.36 uS/cm, mediana de 113.20  $\mu$ S/cm para la temporada de estiaje (ver, Tabla 4.3). Con respecto a la calidad de agua, al comparar los valores con la categoría 3 del ECA para agua, se determinó que ninguna estación de muestreo excede los límites en ambas subcategorías (D1: Riego de vegetales, D2: Bebida de animales), como se puede

observar en la Figura 4.19. Además, en la mayoría de las estaciones muestreadas, hay una tendencia de un aumento en la temporada de estiaje con respecto a la de avenida.



**Figura 4.19 Variación de la CE para la microcuenca Hornillos en avenida y estiaje**  
Fuente: Elaboración propia

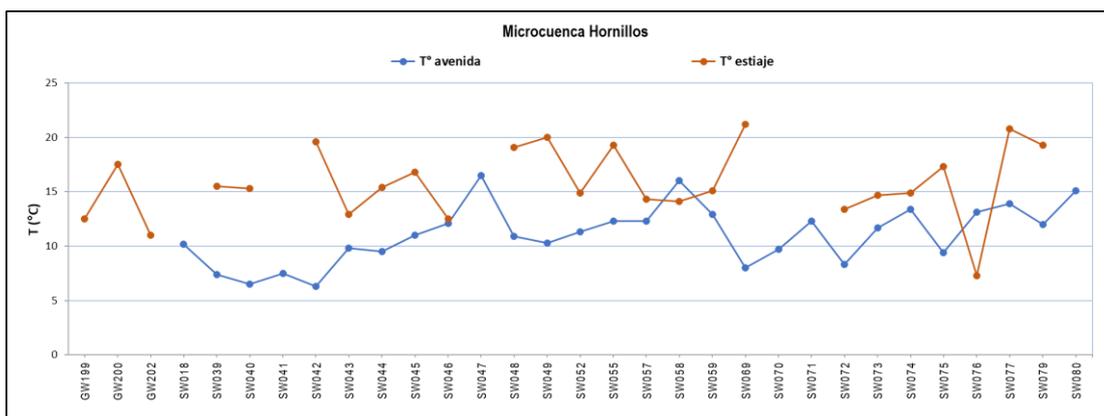
De acuerdo con el análisis estadístico, el parámetro salinidad presenta como valor mínimo 0.072 psu, máximo de 0.118 psu, media de 0.09 psu y mediana de 0.092 psu en la temporada de avenida; y como valor mínimo de 0.072 psu, máximo de 0.163 psu, media de 0.11 psu y mediana de 0.104 psu para la temporada de estiaje (Tabla 4.3). En la Figura 4.20, se observa que, de acuerdo con los valores de salinidad, todas las estaciones de muestreo son aguas dulces, ya que presentan valores menores a 0.5 psu.



**Figura 4.20 Variación de la Salinidad para la microcuenca Hornillos en avenida y estiaje**  
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el análisis estadístico, el parámetro temperatura presenta

como valor mínimo 6.3, máximo de 16.5, media de 11.06 y mediana de 11.15 en la temporada de avenida; y como valor mínimo de 7.30 °C, máximo de 21.20 °C, media de 15.79 °C y mediana de 15.30 °C para la temporada de estiaje (Tabla 4.3). En la Figura 4.21, se observa que los valores de temperatura en la temporada de avenida en su totalidad oscilan entre 5 a 20 °C, y el tipo es de aguas frías; en la temporada de estiaje casi en su totalidad las estaciones de muestreo también pertenecen a un tipo de aguas frías, a excepción de las estaciones de muestreo SW-069 y SW-077, que presentan valores de 21 y 20.8 °C, que configura como aguas termales débiles.



**Figura 4.21** Variación de la Temperatura para la microcuenca Hornillos en avenida y estiaje

Fuente: Elaboración propia

### Microcuenca Apurímac 1

En esta microcuenca, la mayoría de los valores de pH se encuentran dentro del rango de 6.5 a 8.5 y presenta una media de 7.63 para avenida y 7.92 para estiaje, así como una mediana de 7.64 para estiaje y 7.92 para avenida (Tabla 4.3).

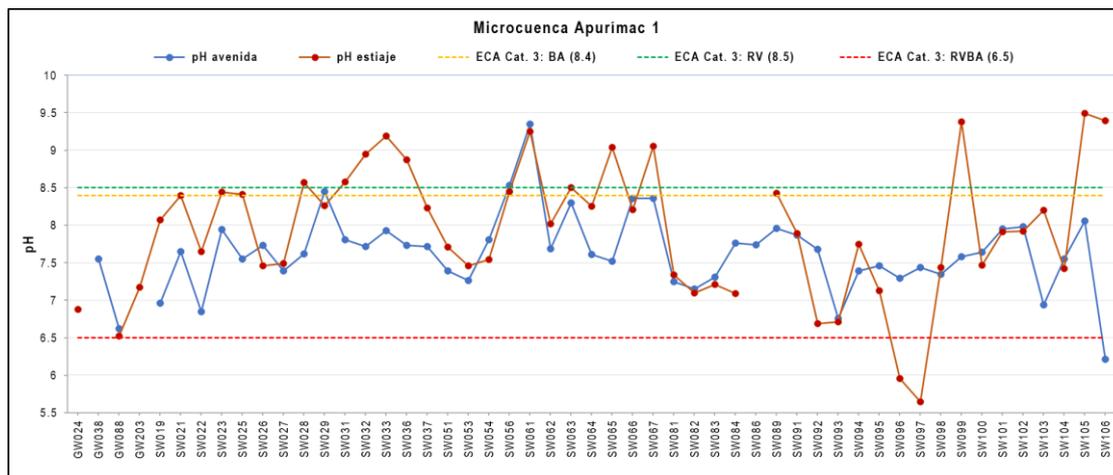
La Figura 4.23 muestra la variación de pH en ambas temporadas, y se observa que en la mayoría presentan una tendencia irregular. Además, la mayoría de los valores de pH aumenta en la época de estiaje, debido a la disminución de lluvias, así como a

la interacción con rocas básicas (andesitas). Por otro lado, se observa un gran incremento de pH a un carácter más básico en las estaciones SW-033, SW-099, SW-105 y SW-106; caso contrario en las estaciones SW-096 y SW-097, donde existe una disminución de pH, que muestra un carácter más ácido.

La estación de muestreo SW-097 es la que presenta mayor variación respecto de la temporada de avenida con la de estiaje, que obtiene un carácter de acidez en esta microcuenca, debido a que aguas arriba se encuentra alteración hidrotermal, así como pasivos ambientales mineros



**Figura 4.22 Estación de muestreo SW-097 en temporada de avenida**  
**Fuente: Elaboración propia**



**Figura 4.23** Variación del pH para la microcuenca Apurímac 1 en avenida y estiaje  
Fuente: Elaboración propia

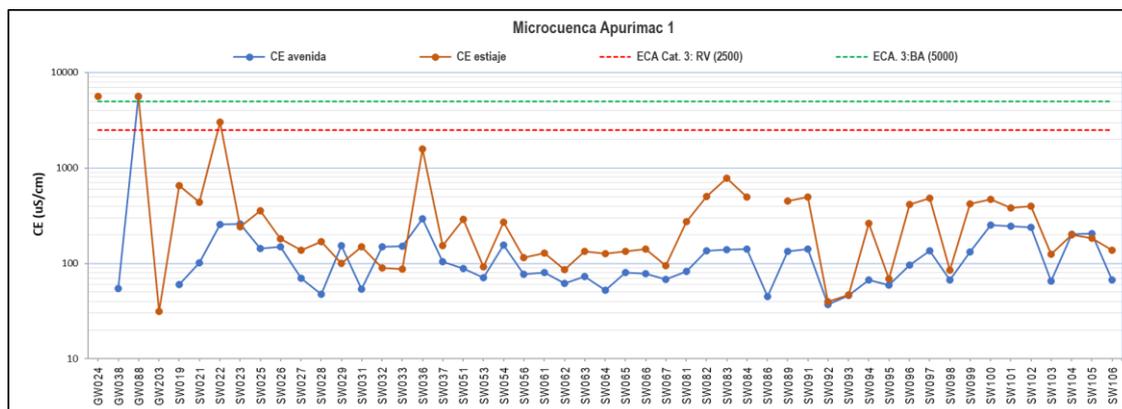
La CE presenta como valor mínimo 36.90, uno máximo de 5671, media de 231.48 y mediana de 96.54 en la temporada de avenida; y valor mínimo de 31.40, máximo de 5669, media de 551.89 y mediana de 183.80  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para la temporada de estiaje (Tabla 4.3).

Con respecto a la calidad de agua, al comparar los valores con la categoría 3 del ECA para agua, se determina que casi en su totalidad, no exceden los límites en ambas subcategorías (D1: riego de vegetales, D2: bebida de animales), como se puede observar en la Figura 4.23.

En la Figura 4.24, se observa que en la estación de muestreo SW-022, en la temporada de estiaje, aumenta la CE, debido a que existe poco flujo y hay mayor concentración de sales y elementos; por lo tanto, supera los límites en la subcategoría D1 (riego de vegetales). Las estaciones GW-024 y GW-088 superan los límites tanto en la subcategoría D1 como D2, debido a que pertenecen a tipo de agua termal, que presenta altas concentraciones de sales.



**Figura 4.24** Estación de muestreo SW-022 en temporada de estiaje  
Fuente: Elaboración propia

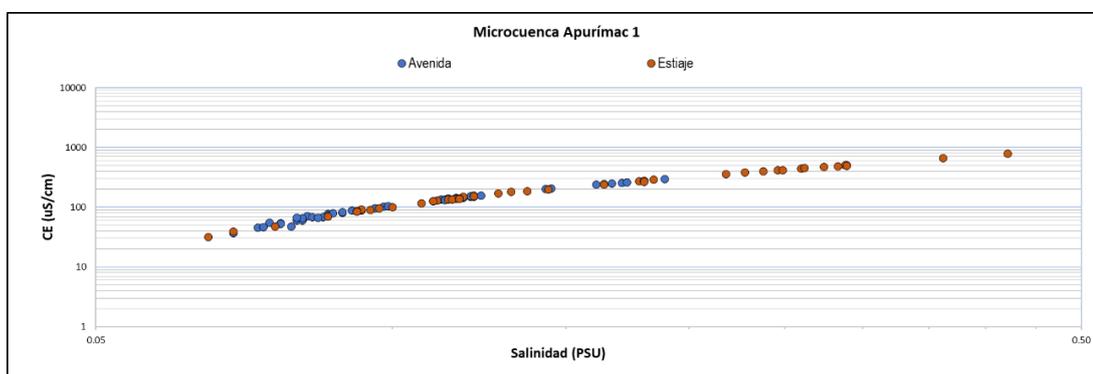


**Figura 4.25** Variación de la CE para la microcuenca Apurímac 1 en avenida y estiaje  
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el análisis estadístico, el parámetro salinidad presenta un valor mínimo de 0.069 psu, un máximo de 3.117 psu, una media de 0.17 psu y una mediana de 0.096 psu en la temporada de avenida; y un valor mínimo de 0.065 psu, un máximo de 3.098 psu, una media de 0.33 psu y una mediana de 0.137 psu para la temporada de estiaje (Tabla 4.3).

En la Figura 4.26, se observa que, de acuerdo con los valores de salinidad, la

mayoría de las estaciones de muestreo son aguas dulces, ya que presentan valores menores a 0.5 psu, a excepción de las estaciones de muestreo SW-036, SW-022 y GW-024, que presentan un valor de 0.0846, 1.637 y 3.085 psu, porque pertenecen a un tipo de agua salobre en la temporada de estiaje. La estación de muestreo GW-088 presenta un valor de 3.117 psu en avenida y 3.085 psu en estiaje, y también pertenece a un tipo de agua salobre.

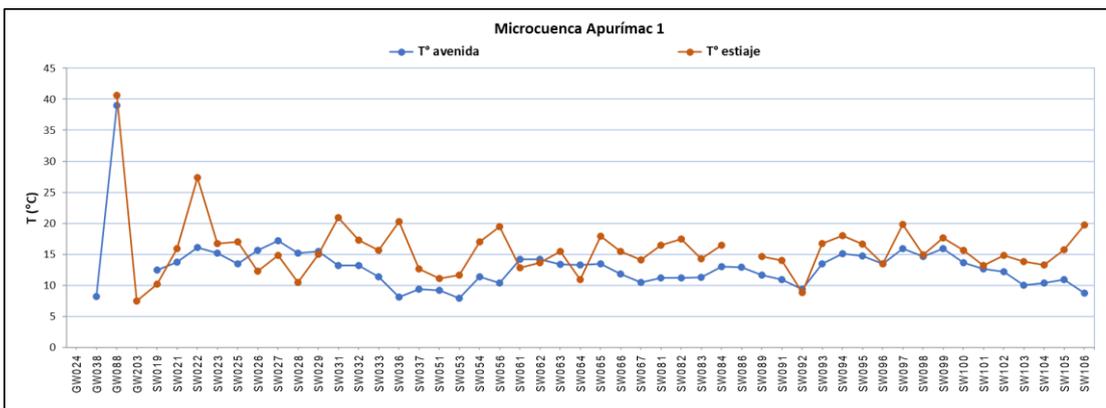


**Figura 4.26 Variación de la salinidad para la microcuenca Apurímac 1 en avenida y estiaje**

**Fuente: Elaboración propia**

De acuerdo con el análisis estadístico, el valor mínimo de temperatura presenta un valor mínimo de 7.90 °C, el máximo de 39.00 °C, la media de 13.06 °C y la mediana de 13.00 °C en la temporada de avenida; y un valor mínimo de 7.50 °C, uno máximo de 48.80 °C, una media de 16.50 °C y una mediana de 15.50 °C para la temporada de estiaje (Tabla 4.3).

En la Figura 4.27, se observa que los valores de temperatura en su mayoría oscilan entre 5 a 20 °C en ambas temporadas, por lo cual pertenecen a un tipo de aguas frías, a excepción de las estaciones de muestreo GW-088 y GW-024, que presentan valores de 40.6 y 48.8°C, y se clasifican como aguas termales calientes.

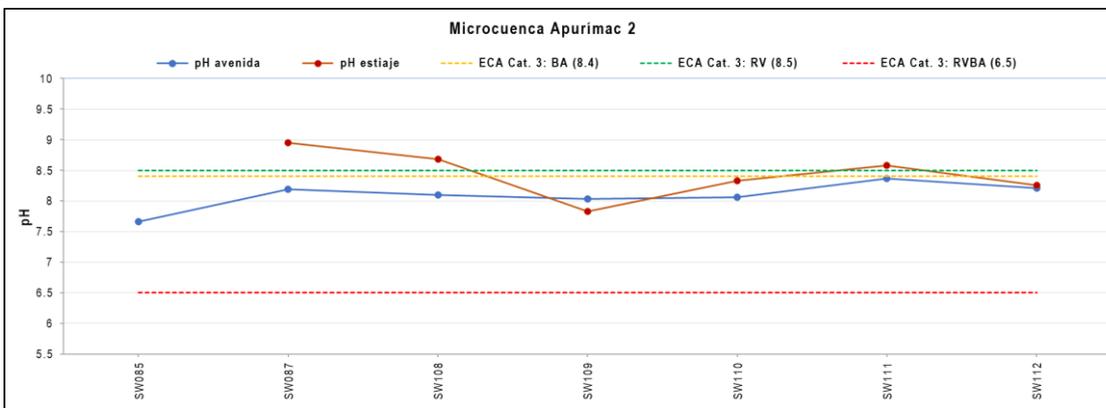


**Figura 4.27 Variación de la Temperatura para la microcuenca Apurímac 1 en avenida y estiaje**  
**Fuente: Elaboración propia**

### Microcuenca Apurímac 2

En esta microcuenca, la mayoría de los valores de pH se encuentran dentro del rango de 6.5 a 8.5, y presentan una media de 8.09 para avenida y 8.1 para estiaje, así como una mediana de 8.44 para estiaje y 8.455 para avenida (Tabla 4.3).

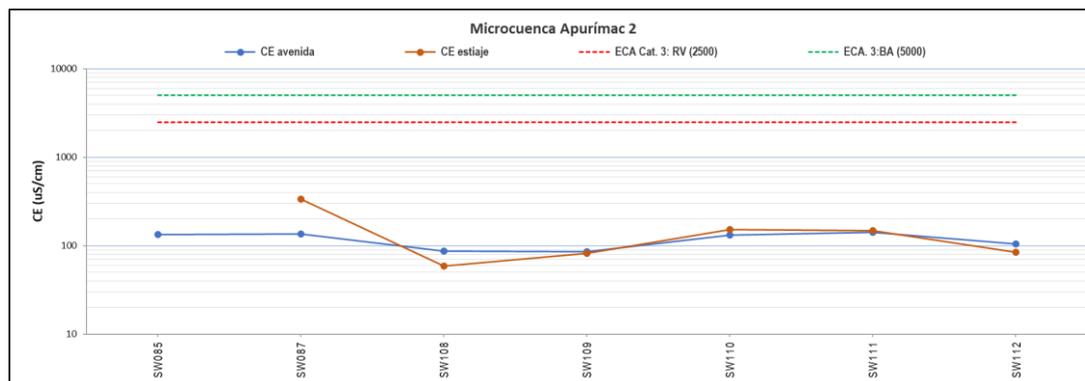
La Figura 4.28 muestra la variación de pH en ambas temporadas, y se observa que en la mayoría presenta una tendencia regular (cambios menores a 2 desviaciones estándar en los valores de concentración). Además, la mayoría de los valores de pH aumenta en la época de estiaje, debido a la disminución de lluvias, así como, a la interacción con rocas básicas (andesitas).



**Figura 4.28 Variación del pH para la microcuenca Apurímac 2 en avenida y estiaje**  
**Fuente: Elaboración propia**

En relación con la CE, los valores mínimos son de 85.33, el máximo es de 142.20, la media de 117.32 y la mediana de 132.80 en la temporada de avenida; y el valor mínimo de 58.51, el máximo de 336.40, la media de 143.54 y la mediana de 116.53  $\mu\text{S/cm}$  para la temporada de estiaje (Tabla 4.1).

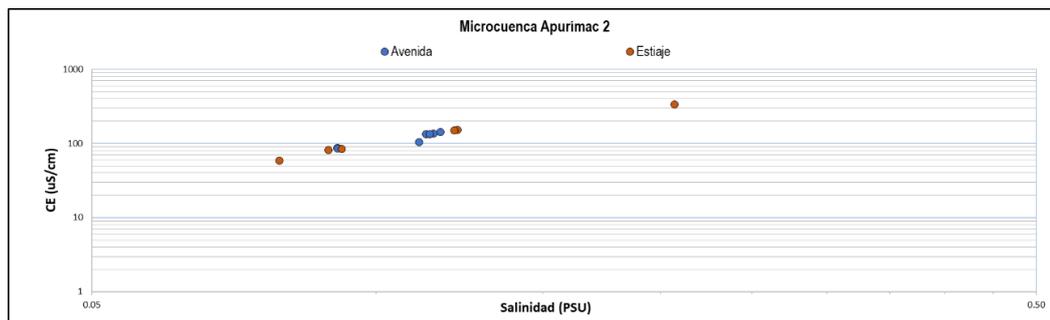
Con respecto a la CE, al comparar los valores con la categoría 3 del ECA para agua, se determina que, en su totalidad, no exceden los límites en ambas subcategorías (D1: riego de vegetales, D2: bebida de animales), como se puede observar en Figura 4.29.



**Figura 4.29** Variación de la CE para la microcuenca Apurímac 2 en avenida y estiaje  
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el análisis estadístico, el valor mínimo es de 0.091 psu, el máximo de 0.117 psu, la media de 0.11 psu y la mediana de 0.113 psu en la temporada de avenida; y el valor máximo es de 0.207 psu, el mínimo de 0.079 psu, la media de 0.12 psu y la mediana de 0.1065 psu para la temporada de estiaje (Tabla 4.3).

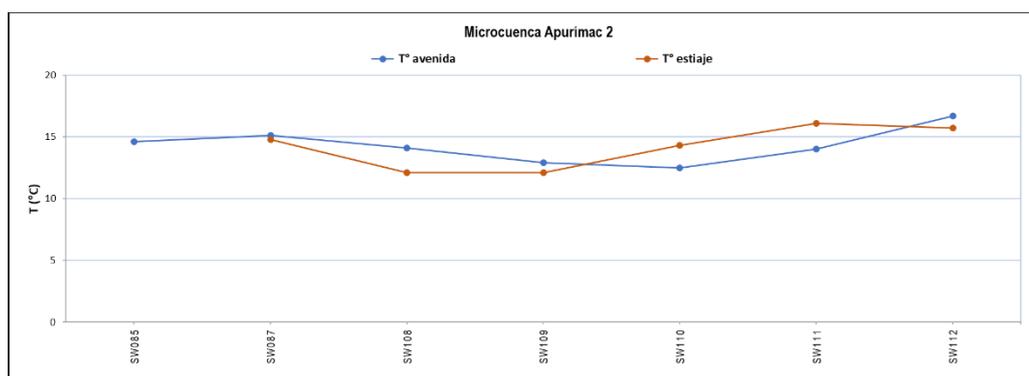
En la Figura 4.30, se observa que, de acuerdo con los valores de salinidad, todas las estaciones de muestreo son aguas dulces, ya que presentan valores menores a 0.5 psu.



**Figura 4.30: Variación de la Salinidad para la microcuenca Apurímac 2 en avenida y estiaje**  
Fuente: Elaboración propia

En relación con la temperatura, de acuerdo con el análisis estadístico, el valor mínimo es de 12.5 °C, el máximo de 16.7 °C, la media de 14.27 °C y la mediana de 14.1 °C en la temporada de avenida; y el valor mínimo es de 12.1 °C, el máximo de 16.1 °C, la media de 14.18 °C, y la mediana de 14.55 °C para la temporada de estiaje (Tabla 4.3).

En la Figura 4.31, se observa que los valores de temperatura en su totalidad oscilan entre 10 a 20 °C en ambas temporadas, por lo cual pertenecen a un tipo de aguas frías.



**Figura 4.31 Variación de la Temperatura para la microcuenca Apurímac 2 en avenida y estiaje**  
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se muestra en la Figura 4.32 el Mapa hidroquímico de la subcuenca Hornillos Altos, presenta la clasificación de por facies de agua y su

ubicación espacial para cada temporada, en la zona noreste de la subcuenca existen una gran cantidad de alteraciones geológicas asociadas a fallamientos y minas de las cuales presentan la facie sulfatada caracteriza de procesos físico-químicos detallados anteriormente mediante reacciones por microcuenca analizada.

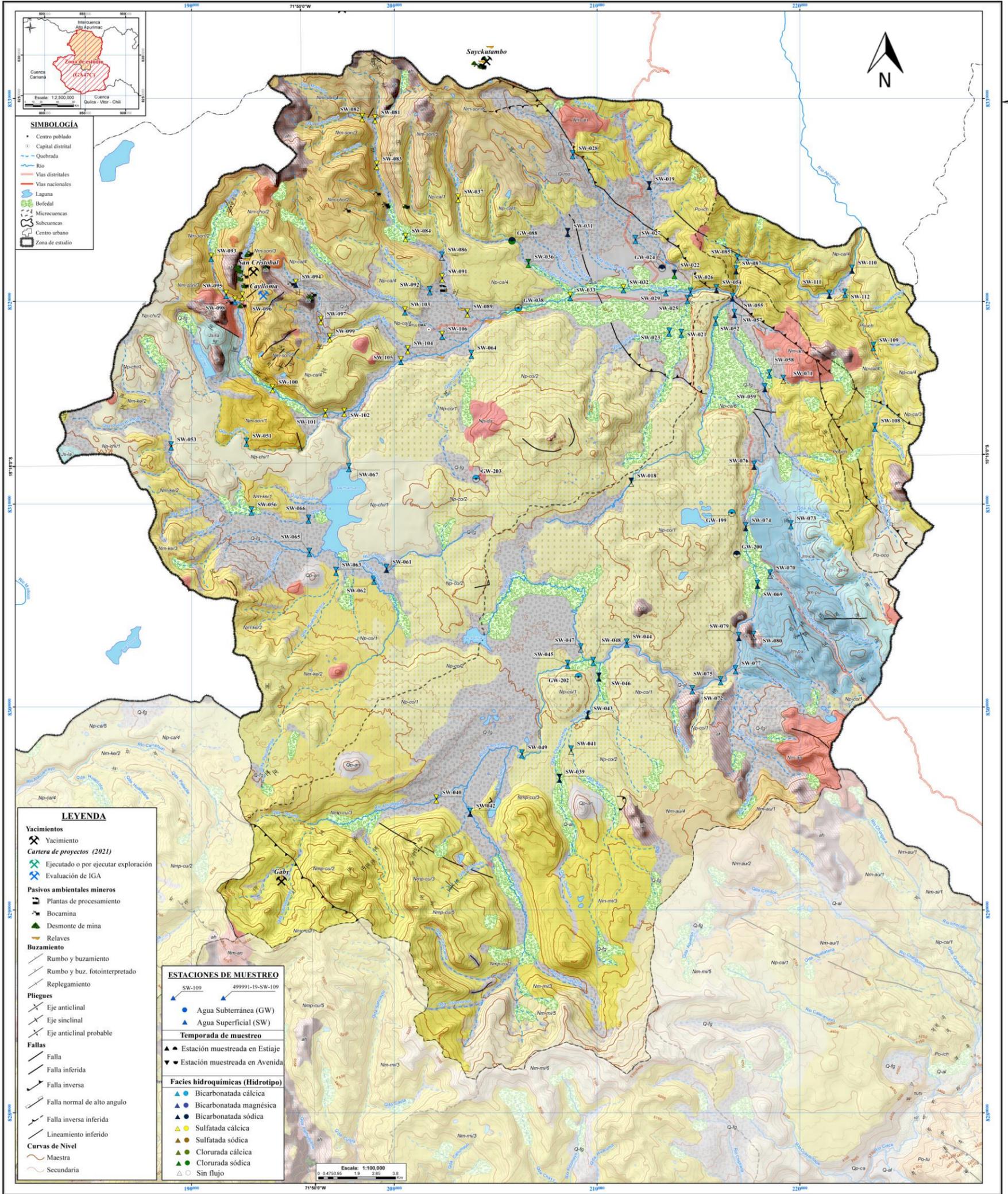


Figura 4.32 Mapa hidroquímico de la subcuenca Hornillos Alto  
Fuente: Elaboración propia

## **CAPÍTULO V**

### **ANÁLISIS ESTADÍSTICO GEOAMBIENTAL DEL RECURSO HÍDRICO**

El presente capítulo tiene como finalidad explicar las medidas de tendencia central, variación y dispersión, además de correlaciones estadísticas encontradas de los datos físico-químicos y de concentración de elementos considerados tóxicos en la zona de análisis para así entender los valores de fondo y anómalos, así como la posible distribución asociada a cada tipo de dato y/o entre datos, que es fundamental para la comprensión del nivel de fondo de los parámetros físico-químicos y de concentración de elementos para realizar la evaluación de la calidad actual del agua.

Según la metodología explicada en el capítulo II, se realizó un análisis global, tanto de la subcuenca Hornillos Alto, como de las microcuencas Apurímac1, Apurímac2 y Hornillos con la finalidad de obtener las posibles relaciones y diferencias significativas entre estas.

#### **5.1 Análisis estadístico univariante de pH-Ce y elementos disueltos potencialmente contaminantes en ambas temporadas**

El Análisis Estadístico Geoambiental en Aguas en la subcuenca Hornillos Alto se realizó tomando las variables de parámetros físico-químicos y elementos disueltos con un porcentaje mayor al 50% de datos por encima del límite de detección (Tabla

5.1) de acuerdo al método mencionado en el ítem 2.5 (ROS). Las filas resaltadas con gris en la Tabla 5.1 muestran los elementos considerados para el análisis. Las variables consideradas son las siguientes: conductividad eléctrica (Ce), potencial de hidrógeno (pH), sulfatos (SO<sub>4</sub>), Al, As, Ba, Cu, Fe, Mn, Pb, Ti y Zn disueltos, tanto en la temporada de avenida como la temporada de estiaje.

**Tabla 5.1**  
*Resumen de las muestras según porcentaje de valor de medición en la subcuenca Hornillos Alto*

Subcuenca	Hornillos Alto	
	Temporada	Estiaje
Variable Analizada	Porcentaje de datos con valor de medición (%)	
CE	100.00	100.00
pH	100.00	100.00
HCO <sub>3</sub>	100.00	100.00
Cl	78.57	91.11
F	1.19	98.77
SO <sub>4</sub>	100.00	97.56
NO <sub>3</sub>	0.00	43.75
Al disuelto	89.29	93.75
As disuelto	52.38	96.25
B disuelto	21.43	98.75
Ba disuelto	100.00	100.00
Be disuelto	0.00	3.75
Ca disuelto	100.00	100.00
Cd disuelto	2.38	1.25
Cr disuelto	0.00	2.50
Cu disuelto	91.67	100.00
Fe disuelto	89.29	90.00
Hg disuelto	0.00	0.00
K disuelto	100.00	100.00
Li disuelto	88.10	77.50
Mg disuelto	100.00	100.00
Mn disuelto	97.62	96.25
Na disuelto	100.00	100.00
Ni disuelto	11.90	46.25
Pb disuelto	10.71	50.00
Sb disuelto	19.05	40.00
Se disuelto	0.00	0.00
Sn disuelto	0.00	1.25
Sr disuelto	100.00	100.00
Ti disuelto	51.19	6.25
Zn disuelto	69.05	17.25

Fuente: Elaboración propia

En las Tablas 5.2 y 5.3 se muestran el resumen de las medidas estadísticas (tendencia central, localización, dispersión y asimetría) en las temporadas de avenida y estiaje respectivamente. Los valores atípicos son descritos en el ítem 5.3.1.

El valor de asimetría calculado es del coeficiente de Pearson, mientras que la curtosis (exceso de curtosis) es definida mediante  $m_4$  (momento central 4) y  $S$  (desviación estándar de la muestra). Todos los cálculos fueron modelados y realizados en el software libre R con los paquetes correspondientes. Seguidamente se describe con detalle cada variable.

**Tabla 5.2**

*Resumen de estadísticas de las variables de parámetros físico-químicos y elementos disueltos en la temporada de avenida*

Porcentaje con datos mayor al 50% de L.D	Temporada	Variable	Mínimo	Límite Inferior	Primer cuartil (Q1)	Mediana	Media	Media Cortada	Tercer cuartil (Q3)	Límite Superior	Máximo	Rango intercuartilico (RIC)	Desviación media absoluta (MAD)	Desviación estándar (SD)	Asimetría (As)	Curtosis (K)	Coefficiente Variación (CV-%)
100%	Avenida	<i>pH</i>	6.21000	6.78500	7.55000	7.75000	7.78500	7.77641	8.06000	8.82500	9.49000	0.51000	0.40030	0.48972	0.21441	2.44955	6.29062
		<i>Ce</i>	36.90000	-25.1750	71.50000	90.95000	109.5419	107.0053	135.9500	232.6250	293.5000	64.45000	41.84639	55.43603	1.00613	1.57466	50.60712
		<i>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></i>	1.50000	-19.7500	4.70000	11.00000	16.63171	15.43205	21.00000	45.45000	82.60000	16.30000	11.11950	16.68305	1.01271	4.09451	100.30871
		<i>Ba</i>	0.00170	-0.00313	0.00993	0.01330	0.01630	0.01532	0.01863	0.03168	0.07490	0.00870	0.00630	0.01150	0.78394	9.46248	70.52586
<i>Al</i>		0.00234	-0.02638	0.00925	0.02500	0.02825	0.02654	0.03300	0.06863	0.14100	0.02375	0.02150	0.02478	0.39323	4.35919	87.70753	
<i>As</i>		0.00003	-0.00221	0.00031	0.00100	0.00283	0.00201	0.00200	0.00453	0.04300	0.00169	0.00130	0.00638	0.85981	22.81403	225.51611	
<i>Cu</i>		0.00034	-0.00025	0.00073	0.00100	0.00112	0.00110	0.00138	0.00235	0.00290	0.00065	0.00044	0.00053	0.68748	0.82505	47.64928	
<i>Fe</i>		0.00350	-0.10000	0.02000	0.05500	0.06737	0.06431	0.10000	0.22000	0.26000	0.08000	0.05189	0.05849	0.63476	0.74524	86.80792	
<i>Mn</i>		0.00012	-0.04114	0.00353	0.00685	0.03867	0.03024	0.03330	0.07796	0.46750	0.02978	0.00815	0.08120	1.17561	11.81780	209.98415	
<i>Ti</i>		0.00018	-0.00039	0.00045	0.00061	0.00075	0.00073	0.00100	0.00183	0.00220	0.00055	0.00036	0.00042	0.98431	1.43001	56.25058	
<i>Zn</i>		0.00009	-0.00552	0.00079	0.00200	0.00472	0.00374	0.00500	0.01131	0.06800	0.00421	0.00216	0.00896	0.90878	28.50774	190.09954	

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.3**

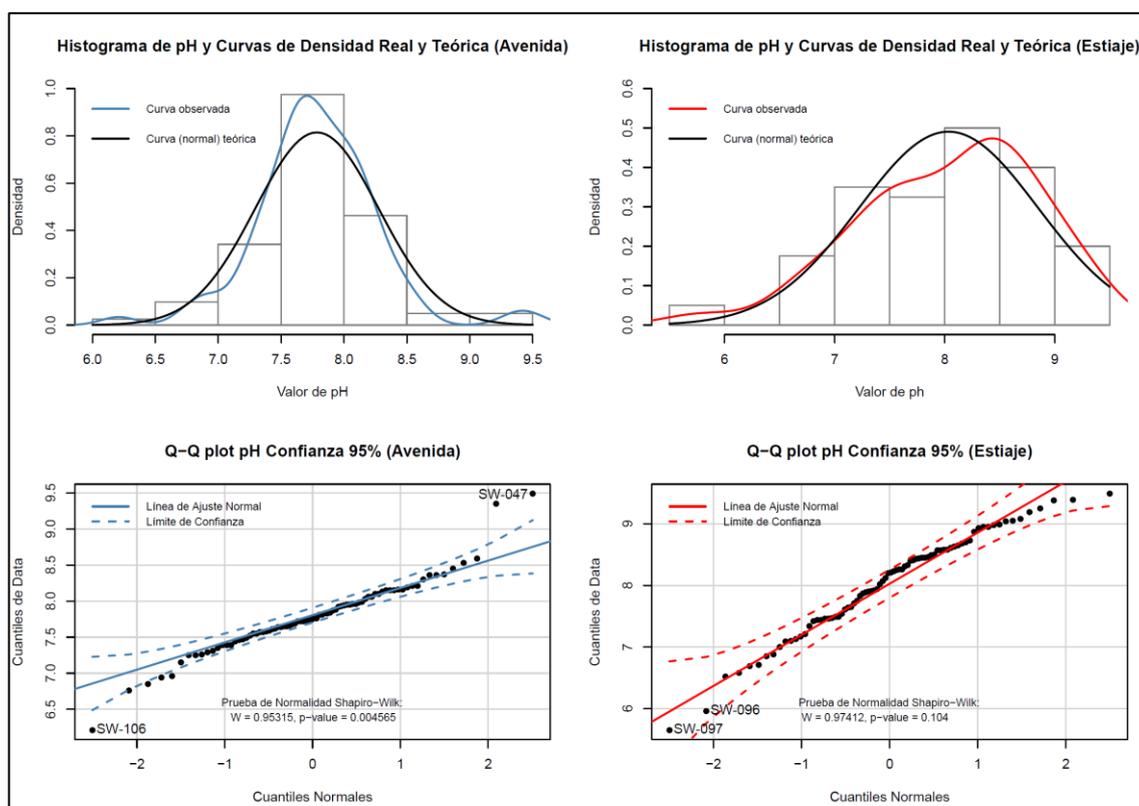
*Resumen de estadísticas de las variables de parámetros físico-químicos y elementos disueltos en la temporada de estiaje*

Porcentaje con datos mayor al 50% de L.D	Temporada	Variable	Mínimo	Límite Inferior	Primer cuartil (Q1)	Mediana	Media	Media Cortada	Tercer cuartil (Q3)	Límite Superior	Máximo	Rango intercuartilico (RIC)	Desviación media absoluta (MAD)	Desviación estándar (SD)	Asimetría (As)	Curtosis (K)	Coefficiente Variación (CV-%)
100%	Estiaje	<i>pH</i>	5.65000	5.95625	7.55750	8.25500	8.11068	8.12569	8.62500	10.22625	9.49000	1.06750	0.72647	0.79234	-0.54645	0.35256	9.76911
		<i>Ce</i>	39.4700	-173.525	95.0800	144.90000	259.07027	223.38514	274.15000	542.75500	3048.00000	179.07000	86.02045	397.86608	0.86087	31.38028	153.57458
		<i>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></i>	1.26100	-50.00750	3.96400	11.74500	88.92896	46.34003	39.94500	93.91650	3243.00000	35.98100	13.51761	378.90180	0.61111	61.89139	426.07245
		<i>Ba</i>	0.00530	-0.00909	0.01645	0.02560	0.02894	0.02831	0.03348	0.05901	0.09840	0.01703	0.01231	0.01863	0.53825	2.96842	64.38108
		<i>Cu</i>	0.00080	-0.00040	0.00133	0.00180	0.00280	0.00267	0.00248	0.00420	0.01380	0.00115	0.00074	0.00280	1.06962	5.31620	100.08236
<i>Al</i>		0.00395	-0.00638	0.01125	0.01650	0.02266	0.02020	0.02300	0.04063	0.21900	0.01175	0.00815	0.02625	0.70429	39.50178	115.82312	
<i>As</i>		0.00007	-0.00580	0.00080	0.00185	0.01710	0.00844	0.00520	0.01180	0.65770	0.00440	0.00193	0.08117	0.56368	49.92481	474.63979	
<i>B</i>		0.00700	-0.15788	0.01500	0.02950	0.49492	0.28093	0.13025	0.30313	16.39000	0.11525	0.02446	2.17718	0.64131	37.77826	439.90680	
<i>Fe</i>		0.00540	-0.12313	0.03025	0.06650	0.12309	0.11281	0.13250	0.28588	0.98100	0.10225	0.06005	0.17160	0.98941	10.60309	139.40528	
<i>Mn</i>		0.00021	-0.03853	0.00490	0.00900	0.05806	0.02770	0.03385	0.07728	2.30200	0.02895	0.01156	0.26833	0.54851	63.10655	462.15647	
<i>Pb</i>		0.00001	-0.00064	0.00011	0.00027	0.00068	0.00064	0.00060	0.00134	0.00480	0.00049	0.00032	0.00107	1.16058	5.75685	156.96427	

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.1 Potencial de hidrógeno (pH)

Para el análisis de la variable pH es necesario conocer su distribución en la subcuenca Hornillos Alto. Para ello, se necesita estudiar el histograma - curvas de densidad real y teórica para ambas temporadas. Además, se realiza el Q-Q plot y prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para constatar la hipótesis de normalidad: todos los gráficos y test se muestran en la Figura 5.1.



**Figura 5.1** Gráficos de Distribución y Test de Normalidad pH (adimensional)  
Fuente: Elaboración propia

Los gráficos de histogramas describen la distribución de pH por intervalos; adicionalmente, las curvas de densidad real y teórica ayudan a ver el ajuste normal de los datos: si la curva observada de campo se sobrepone o se acerca a la curva de densidad teórica normal, se deduce visualmente que los datos pueden tener un comportamiento normal. Para la temporada de avenida y estiaje, los valores de pH

presentan una tendencia normal para ambas temporadas. Respecto al *q-q plot*, la mayoría de datos cae sobre “línea normal”; en caso no sucede así, los datos que caen fuera de las líneas punteadas (consideran 95% de confiabilidad) se toman como datos anómalos (*outliers*) para el análisis. La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk da un p-valor =0.004565 en la temporada de avenida, que rechaza la hipótesis nula que se plantea, es decir, no existe una distribución normal en esta temporada (con confianza al 95%). Para la temporada de estiaje, el valor de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk es p-valor=0.104; en otras palabras, existe una distribución normal para estiaje (con confianza al 95%). Tal como se ha determinado en estiaje, existe una distribución normal de la data de pH; sin embargo, el p-valor<alpha=0.05 en avenida no corrobora esa hipótesis, que establece la carencia de normalidad en avenida y la normalidad en estiaje. Los puntos de análisis fueron el SW-047 y el SW-106 en avenida; y en estiaje el SW-096 y el SW-097, que se visualizan en la Figura 5.1 etiquetados en ambas temporadas.

Del *boxplot* realizado, sobre la base del análisis metodológico obtenido, la clasificación cualitativa de los valores de pH (concentración baja, moderada, alta y muy alta) se muestra en la Tabla 5.4.

**Tabla 5.4**  
***Clasificación cualitativa de rangos de pH en ambas temporadas***

Análisis	Rango Avenidas	Rango Estiaje	Concentración
<L.D - Q1	< 7.55	< 7.56	Baja
Q1 - Q3	[ 7.55 - 8.06 >	[ 7.56 - 8.63 >	Moderada
Q3 - Límite superior	[ 8.06 - 8.83 >	[ 8.63 - 10.23 >	Alta
>Límite superior	≥ 8.83	≥ 10.23	Muy alta
Valor promedio	7.79	8.11	
Rango de variación normal	8.83	10.23	

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5.4, se observa que el valor de fondo o media para avenida y estiaje es 7.79 y 8.11, respectivamente. Así mismo, los rangos de variación normal para la subcuenca Hornillos Alto son 8.83 y 10.23, respectivamente.

El análisis de manera específica o por grupos (de acuerdo con la clasificación cualitativa) de los valores de pH se realizó por sectores para la subcuenca Hornillos Alto y por temporada; sin embargo, se considera mencionar, para este análisis y los siguientes, los datos muy bajos (solo pH), altos o muy altos, debido a que generalmente se ocasionan por cambios físico-químicos importantes del recurso hídrico.

Para la variable pH (potencial de hidrógeno) se necesita conocer los valores bajos (indican acidez del medio, por tanto, mayor disolución de minerales) y los valores altos - muy altos que indican basicidad del medio.

#### **Temporada de avenida:**

Outlier Bajo: "SW-106"

Bajo: "SW-018" "SW-019" "SW-022" "SW-025" "SW-027" "GW-038" "SW-039" "SW-041" "SW-051" "SW-053" "SW-065" "SW-081" "SW-082" "SW-083" "GW-088" "SW-093" "SW-094" "SW-095" "SW-096" "SW-097" "SW-098" "SW-103" "SW-104"

Alto: "SW-029" "SW-045" "SW-048" "SW-049" "SW-052" "SW-056" "SW-059" "SW-063" "SW-066" "SW-067" "SW-069" "SW-074" "SW-076" "SW-077" "SW-087" "SW-108" "SW-111" "SW-112"

Muy Alto: "SW-047" "SW-061"

#### **Temporada de estiaje:**

Outlier Bajo: "SW-096" "SW-097"

Bajo: "SW-081" "SW-082" "SW-083" "GW-088" "SW-084" "SW-092" "SW-027"

"GW-199" "GW-024" "SW-073" "SW-058" "SW-026" "SW-054" "SW-093" "SW-095" "SW-098" "SW-100" "SW-104" "SW-053" "SW-045" "GW-202" "GW-203"

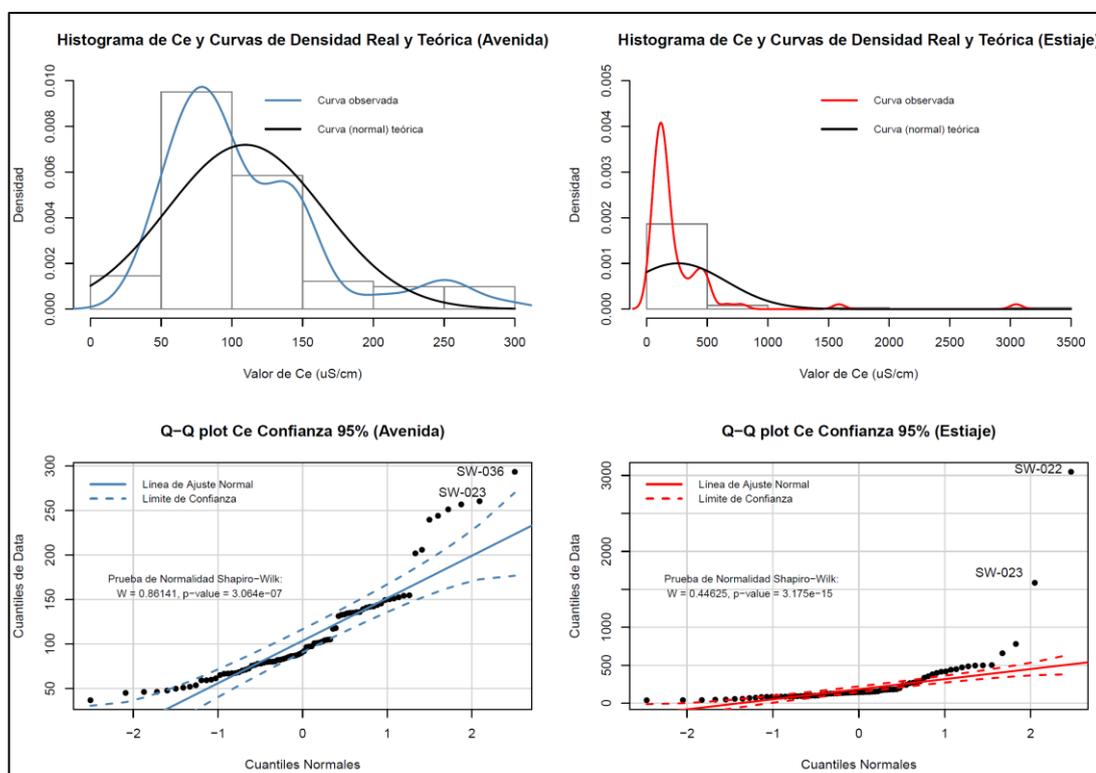
Alto: "SW-106" "SW-036" "SW-032" "SW-033" "SW-075" "SW-077" "SW-079"

"SW-059" "SW-108" "SW-087" "SW-099" "SW-105" "SW-043" "SW-039" "SW-067" "SW-048" "SW-065" "SW-049" "SW-061"

Muy Alto: Ninguno

### 5.1.2 Conductividad eléctrica (CE)

Para el análisis de la variable CE, es necesario conocer su distribución en la subcuenca Hornillos Alto. Para ello, se necesita estudiar los histogramas - curvas de densidad real y teórica para ambas temporadas, además de realizar el *q-q plot* y prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para constatar la hipótesis de normalidad, véase la Figura 5.2.



**Figura 5.2 Gráficos de Distribución y Test de Normalidad CE**  
Fuente: Elaboración propia

Para la temporada de avenida, la curva observada no presenta una tendencia normal, más bien concentraciones entre 50 y 150 uS/cm con una “cola derecha” que indica la existencia de valores altos o muy altos. Similarmente sucede en la temporada de estiaje, aunque con mayor cantidad de valores muy altos. Respecto al *q-q plot*, la mayoría de datos no caen sobre la “línea normal” ni dentro de las líneas punteadas (consideran 95% de confiabilidad) en la temporada de avenida, lo cual indica la ausencia de normalidad corroborada con la prueba de normalidad Shapiro-Wilk con su  $p\text{-valor}=3.06e-07$ , que rechaza la hipótesis nula, que demuestra que los datos de Ce no se distribuyen de manera normal. Para la temporada de estiaje, se tiene un mejor ajuste visual de los datos: se encuentran menos valores fuera de la “línea normal” y el rango de 95% de confianza. Sin embargo, continúan valores fuera del rango, que se corrobora con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk cuyo  $p\text{-valor}=3.17e-15$  rechaza la hipótesis nula de normalidad de los datos en esta temporada. Como se analizó, para ambas temporadas la data de CE no se distribuye de manera normal. Los puntos de análisis fueron el SW-023, SW-036 y SW-023, SW-022 para avenida y estiaje, respectivamente. Estos datos se visualizan en la Figura 5.2 etiquetados en ambas temporadas.

Del *boxplot* realizado, sobre la base del análisis metodológico obtenido, la clasificación cualitativa de los valores de CE (concentración baja, moderada, alta y muy alta) se muestra en la Tabla 5.5.

**Tabla 5.5**  
**Clasificación cualitativa de rangos de CE en ambas temporadas**

<b>Análisis</b>	<b>Rango Avenidas</b>	<b>Rango Estiaje</b>	<b>Concentración</b>
<b>&lt;L.D - Q1</b>	< 71.50	< 95.08	Baja
<b>Q1 - Q3</b>	[ 71.50 - 135.95 >	[ 95.08 - 274.15 >	Moderada
<b>Q3 - Límite superior</b>	[ 135.95 -232.63 >	[ 274.15 - 542.76 >	Alta
<b>&gt;Límite superior</b>	≥ 232.63	≥ 542.76	Muy alta

<b>Valor promedio</b>	109.54	259.07
<b>Rango de variación normal</b>	232.63	542.76

---

**Fuente: Elaboración propia**

En la Tabla 5.5, se observa que el valor de fondo o media para avenida y estiaje es 109.54 y 259.07 uS/cm, respectivamente. Así mismo, los rangos de variación normal son 232.63 y 542.76 uS/cm, respectivamente, para la subcuenca Hornillos Alto.

Las aguas con alta conductividad eléctrica indican mayor disolución mineral, por ende, mayor concentración de sales, que no son beneficiosas para el consumo de los seres bióticos, por lo cual se requieren los valores altos y muy altos en el análisis.

**Temporada de avenida:**

Alto: "SW-018" "SW-025" "SW-026" "SW-029" "SW-032" "SW-033" "SW-040" "SW-054" "SW-083" "SW-084" "SW-087" "SW-091" "SW-104" "SW-105" "SW-111"

Muy Alto: "SW-022" "SW-023" "SW-036" "GW-088" "SW-100" "SW-101" "SW-102"

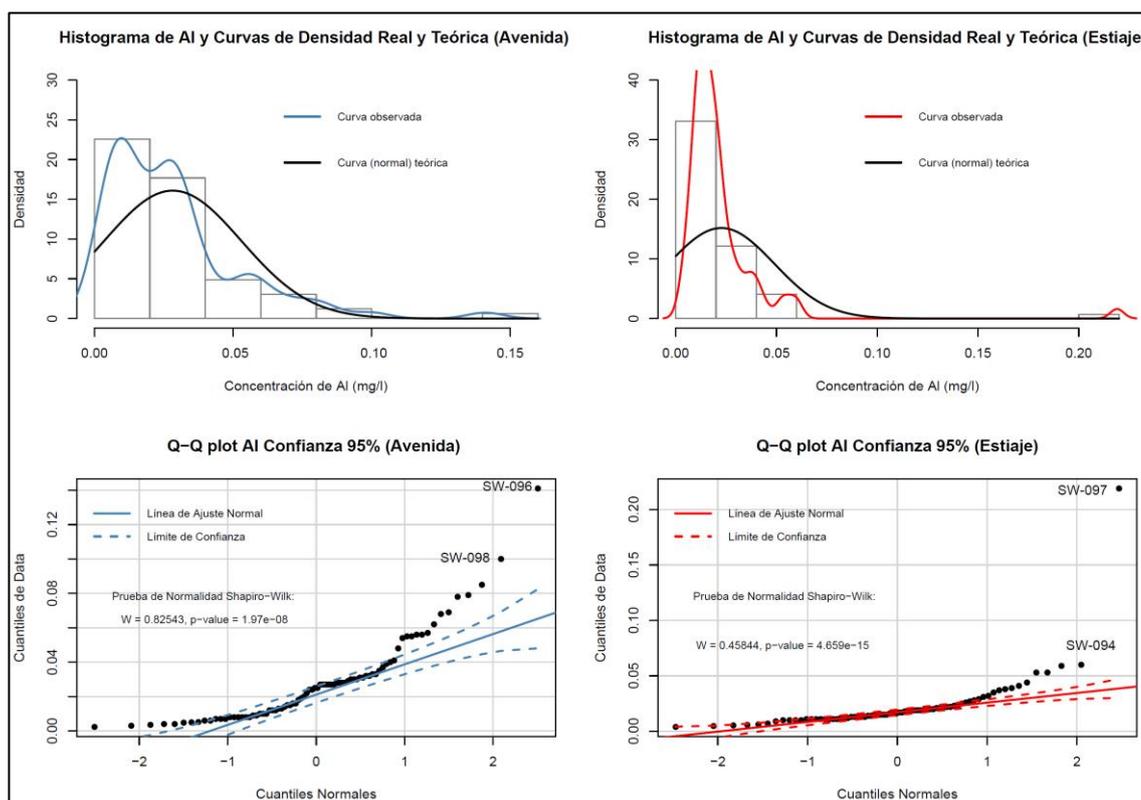
**Temporada de estiaje:**

Alto: "SW-081" "SW-082" "SW-084" "SW-091" "SW-021" "SW-025" "SW-087" "SW-096" "SW-097" "SW-099" "SW-100" "SW-101" "SW-102" "SW-051" "SW-089"

Muy Alto: "SW-036" "SW-083" "GW-088" "SW-019" "GW-024" "SW-022"

### 5.1.3 Análisis de Potenciales Elementos Contaminantes (Al, As, B, Ba, Cu, Fe, Mn, Pb, Ti y Zn)

**Aluminio (Al):** El análisis es idéntico al realizado con el pH y CE (ver Figura 5.3).



**Figura 5.3 Gráficos de Distribución y Test de Normalidad Al**  
Fuente: Elaboración propia

Para la temporada de avenida, la curva observada no presenta una tendencia normal; más bien, tiene una clara agrupación de datos hacia la derecha de la curva. Es decir, presenta concentración de valores bajos o valores altos dispersos. Para la temporada de estiaje, la tendencia no es marcada. Respecto al *q-q plot*, muchos datos no caen sobre la línea de normalidad ni dentro de los límites de confianza (95% de confiabilidad); además, se aprecia la forma asimétrica positiva de la curva y una forma de “bigote” que demuestra la existencia de dos poblaciones. La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk con  $p\text{-valor} = 1.97e-08$  comprueba la no normalidad. Para la

temporada de estiaje, la concentración de Al tiene un diferente arreglo, se visualiza un mejor ajuste; sin embargo, los mayores valores se desvían de la “línea de normalidad” y no caen dentro de los límites de confianza, por lo cual, no se distribuyen de modo normal, lo que se corrobora con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk con p-valor =  $4.659e-15$ . Como se analizó, para ambas temporadas la data de Al no se distribuye de manera normal. Los puntos analizados fueron SW-098, SW-096 y SW-094, SW-097 para avenida y estiaje, respectivamente; y se visualizan en la Figura 5.3 etiquetados en ambas temporadas.

Del *boxplot* realizado, sobre la base del análisis metodológico obtenido, la clasificación cualitativa de los valores de Al (concentración baja, moderada, alta y muy alta) se muestra en la Tabla 5.6.

**Tabla 5.6**  
***Clasificación cualitativa de rangos de Al en ambas temporadas***

<b>Análisis</b>	<b>Rango Avenidas</b>	<b>Rango Estiaje</b>	<b>Concentración</b>
<b>&lt;L.D - Q1</b>	<0.00925	<0.01125	Baja
<b>Q1 - Q3</b>	[0.00925 - 0.03300>	[0.01125 - 0.02300>	Moderada
<b>Q3 - Límite superior</b>	[0.03300 - 0.06863>	[0.02300 - 0.04063>	Alta
<b>&gt;Límite superior</b>	$\geq 0.06863$	$\geq 0.04063$	Muy alta
<b>Valor promedio</b>	0.02825	0.02266	
<b>Rango de variación normal</b>	0.06863	0.04063	

**Fuente:** Elaboración propia

En la Tabla 5.6, se observa que el valor de fondo o media para avenida y estiaje es 0.02825 y 0.02266 mg/l, respectivamente. Así mismo, los rangos de variación normal son 0.06863 y 0.04063 mg/l, respectivamente, para la subcuenca Hornillos Alto.

### Temporada de avenida:

Alto: "SW-049" "SW-070" "SW-056" "SW-100" "SW-102" "SW-101" "SW-082"  
 "SW-074" "SW-093" "SW-084" "SW-045" "SW-083" "SW-042" "SW-053"

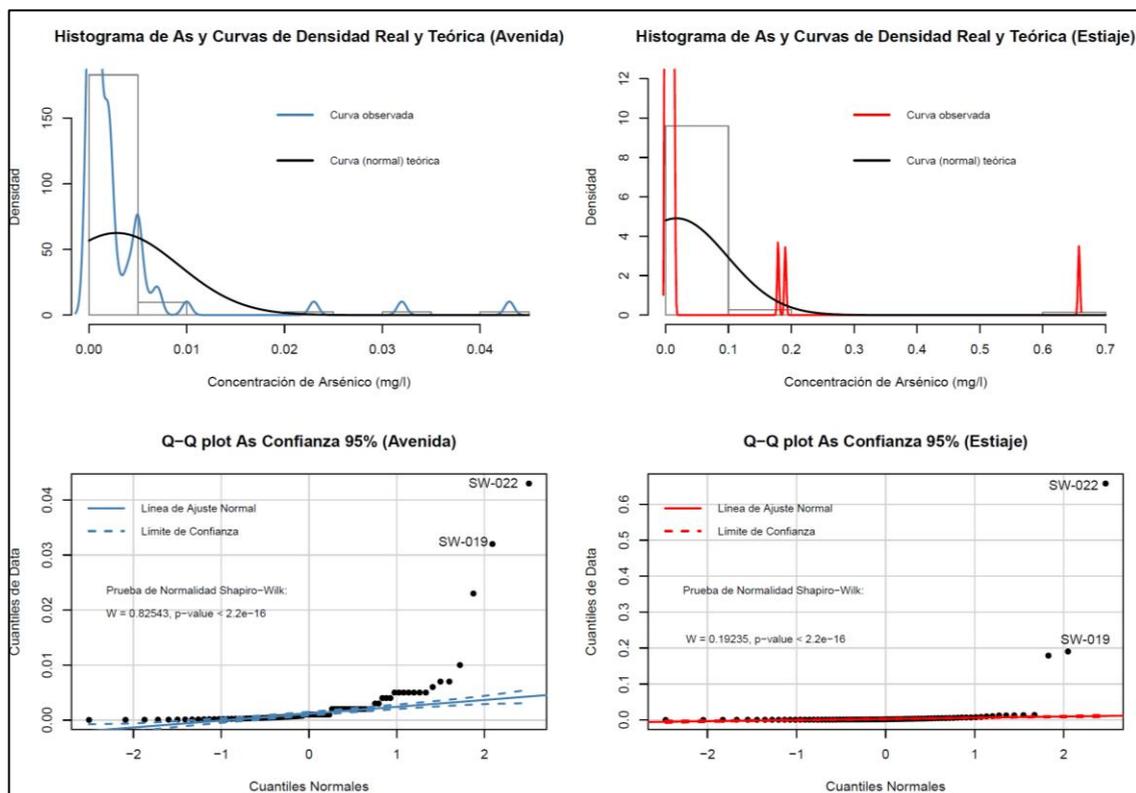
Muy Alto: "SW-048" "SW-096" "SW-098" "SW-095" "SW-089" "SW-091"

### Temporada de estiaje:

Alto: "SW-082" "SW-093" "SW-074" "SW-103" "SW-056" "SW-096" "SW-105"  
 "SW-100" "SW-102" "SW-033" "SW-040" "SW-029" "SW-028"

Muy Alto: "SW-097" "SW-106" "SW-101" "SW-099" "SW-081" "SW-067" "SW-094"

**Arsénico (As):** El análisis es idéntico al realizado con el pH y CE (ver Figura 5.4).



**Figura 5.4** Gráficos de Distribución y Test de Normalidad As  
 Fuente: Elaboración propia

Para la temporada de avenida, la curva observada no presenta una tendencia normal; más bien, tiene una clara agrupación de datos hacia la derecha de la curva. Es decir, presenta concentración de valores bajos o valores altos dispersos, que se observan como pequeños montículos de la curva. Para la temporada de estiaje, la tendencia es similar y se debe tener en cuenta que existe una mayor concentración de los datos de menor valor comparando con avenida. Respecto al *q-q plot*, la mayoría de los datos no caen sobre la línea de normalidad, ni dentro de los límites de confianza (95% de confiabilidad). Además, la forma de la curva denota asimetría positiva de los valores de concentración de As, y presenta una forma “escalonada de crecimiento”; la no normalidad es corroborada con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk con un p-valor  $< 2.2e-16$ . Para la temporada de estiaje, la concentración de Al tiene un diferente arreglo y se visualiza un mejor ajuste; sin embargo, los mayores valores se desvían de la “línea de normalidad” y no caen dentro de los límites de confianza, por lo cual no se considera normal (la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk tiene el p-valor  $< 2.2e-16$ ). Como se analizó, para ambas temporadas la data de As no se distribuye de manera normal y los puntos de análisis fueron SW-019 y SW-022 para avenida y estiaje, respectivamente. Estos datos se visualizan en la Figura 5.4 etiquetados en ambas temporadas.

Del *boxplot* realizado, en base al análisis metodológico obtenido, la clasificación cualitativa de los valores de As (concentración baja, moderada, alta y muy alta) se muestra en la Tabla 5.7.

**Tabla 5.7**  
**Clasificación cualitativa de rangos de As en ambas temporadas**

Análisis	Rango Avenidas	Rango Estiaje	Concentración
<L.D - Q1	< 0.000314	< 0.000800	Baja
Q1 - Q3	[0.000314 - 0.00200>	[0.000800 - 0.005200>	Moderada
Q3 - Límite superior	[0.00200 - 0.004529>	[0.005200 - 0.011800>	Alta
>Límite superior	≥ 0.004529	≥ 0.011800	Muy alta
Valor promedio	0.002828	0.017101	
Rango de variación normal	0.004529	0.011800	

**Fuente: Elaboración propia**

En la Tabla 5.7, se observa que el valor de fondo o media para avenida y estiaje es 0.002828 y 0.017101 mg/l, respectivamente. Así mismo, los rangos de variación normal son 0.004529 y 0.011800 mg/l, respectivamente, para la subcuenca Hornillos Alto.

**Temporada de avenida:**

Alto: "SW-105" "SW-099" "SW-031" "SW-032" "SW-033"

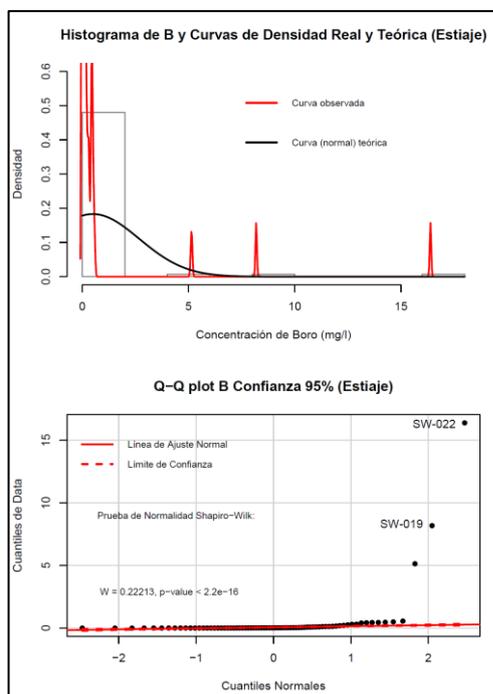
Muy Alto: "GW-088" "SW-110" "SW-111" "SW-100" "SW-102" "SW-101" "SW-036" "SW-028" "SW-019" "SW-022" "SW-027" "SW-054" "SW-026" "SW-029" "SW-087"

**Temporada de estiaje:**

Alto: "SW-091" "SW-059" "SW-057" "SW-027" "SW-055" "SW-101" "SW-100" "SW-102" "SW-033" "SW-029" "SW-032" "SW-028"

Muy Alto: "SW-022" "SW-110" "SW-111" "SW-019" "SW-036" "SW-031" "SW-054" "SW-087"

**Boro (B):** El análisis es idéntico al realizado con el pH y CE, ver Figura 5.5.



**Figura 5.5 Gráficos de Distribución y Test de Normalidad B**  
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica para la temporada de estiaje, se observa que existe una diferencia marcada entre la curva normal teórica y la observada, además de presentar valores altos separados que en el gráfico se observan como pequeños “montículos rojos”, que determina la no normalidad de los datos. Respecto al *q-q plot*, 3 puntos no caen dentro de la “línea de normalidad” ni dentro de los límites de confianza (95% de confiabilidad), por lo cual la data no se distribuye normal. Esto se corrobora con la prueba de Shapiro-Wilk, con  $p\text{-valor} < 2.2e-16$ , que rechaza la hipótesis nula de la distribución normal. Como se analizó, la data de B no se distribuye de manera normal y los puntos de análisis fueron SW-019 y SW-022 para avenida y estiaje, respectivamente. Estos datos se visualizan en la Figura 5.5 etiquetados en ambas temporadas.

Del *boxplot* realizado, sobre la base del análisis metodológico obtenido, la clasificación cualitativa de los valores de B (concentración baja, moderada, alta y muy alta) se muestra en la Tabla 5.8.

**Tabla 5.8**  
*Clasificación cualitativa de rangos de B en ambas temporadas*

Análisis	Rango Avenidas	Rango Estiaje	Concentración
<L.D - Q1	<	< 0.01500	Baja
Q1 - Q3	[ - >	[0.01500 - 0.13025>	Moderada
Q3 - Límite superior	[ - >	[0.13025 - 0.30313>	Alta
>Límite superior	≥	≥ 0.30313	Muy alta
Valor promedio		0.49492	
Rango de variación normal		0.30313	

*Fuente: Elaboración propia*

En la Tabla 5.8, se observa que el valor de fondo o media para estiaje es 0.49492 mg/l. Así mismo, el rango de variación normal es de 0.30313 mg/l para la subcuenca Hornillos Alto.

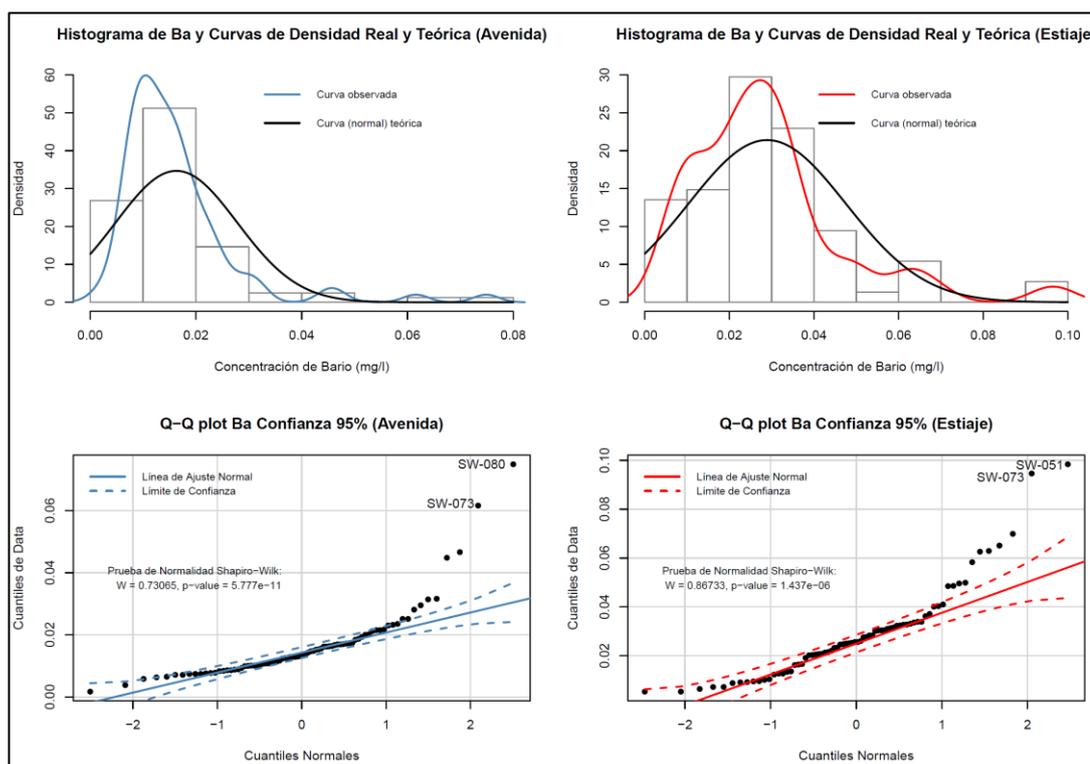
#### **Temporada de estiaje:**

Alto: "SW-069" "SW-076" "SW-063" "SW-057" "SW-077" "SW-021" "SW-026"

Muy Alto: "SW-073" "SW-082" "SW-084" "SW-022" "SW-083" "SW-109" "SW-110" "SW-093" "SW-111" "SW-045" "SW-112" "SW-098" "SW-053" "SW-051" "SW-025" "SW-019" "SW-046" "SW-049" "SW-052" "SW-072" "SW-091" "SW-079" "SW-036" "SW-075" "SW-059" "SW-089" "SW-108" "SW-031" "SW-104" "SW-092" "SW-058" "SW-044" "SW-103" "SW-095" "SW-055" "SW-097" "SW-064" "SW-106" "SW-056" "SW-066" "SW-101" "SW-099" "SW-054" "SW-105" "SW-100" "SW-102" "SW-040" "SW-081" "SW-067" "SW-087" "SW-032" "SW-

042" "SW-062" "SW-094" "SW-065" "SW-043" "SW-028" "SW-037"

**Bario (Ba):** El análisis es idéntico al realizado con el pH y CE (ver Figura 5.6).



**Figura 5.6 Gráficos de distribución y test de normalidad Ba**  
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica, se aprecia para la temporada de avenida la curva observada difiere de la curva normal teórica, además de la existencia de valores altos que se presentan como montículos pequeños por estar dispersos, que generan una distribución con asimetría positiva e indica la probable no normalidad de los datos. Para la temporada de estiaje, el comportamiento de los datos es parecido; sin embargo, existen más valores altos que no se encuentran dispersos en la misma forma. Respecto al *q-q plot*, para la temporada de avenida la mayoría de los datos caen en la “línea de normalidad” o dentro de los límites de normalidad con 95% de confiabilidad, aunque

se observan valores altos fuera de estos límites, cola hacia la derecha, con lo cual se determina la no normalidad de los datos de concentración de Ba. Además, la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk cuyo p-valor =  $5.777e-11$  indica el rechazo de la hipótesis nula (no normalidad de los datos para avenida). En estiaje, ocurre algo similar, aunque el p-valor =  $1.437e-06$  es diferente. Se concluye que en ambas temporadas los datos no se distribuyen de manera normal. Los puntos analizados fueron SW-073, SW-080 y SW-073, SW-051 para avenida y estiaje, respectivamente. Los datos se visualizan en la Figura 5.6 etiquetados en ambas temporadas.

Del *boxplot* realizado, sobre la base del análisis metodológico obtenido, la clasificación cualitativa de los valores de Ba (concentración baja, moderada, alta y muy alta) se muestra en la Tabla 5.9.

En la Tabla 5.9, se observa que el valor de fondo o media para avenida y estiaje es 0.016305 y 0.028943 mg/l, respectivamente. Así mismo, los rangos de variación normal son 0.031675 y 0.059013 mg/l, respectivamente, para la subcuenca Hornillos Alto.

**Tabla 5.9**  
***Clasificación cualitativa de rangos de Ba en ambas temporadas***

<b>Análisis</b>	<b>Rango Avenidas</b>	<b>Rango Estiaje</b>	<b>Concentración</b>
<b>&lt;L.D - Q1</b>	< 0.009925	< 0.016450	Baja
<b>Q1 - Q3</b>	[0.009925 - 0.018625>	[0.016450 - 0.033475>	Moderada
<b>Q3 - Límite superior</b>	[0.018625 - 0.031675>	[0.033475 - 0.059013>	Alta
<b>&gt;Límite superior</b>	$\geq 0.031675$	$\geq 0.059013$	Muy alta
<b>Valor promedio</b>	0.016305	0.028943	
<b>Rango de variación normal</b>	0.031675	0.059013	

*Fuente: Elaboración propia*

#### **Temporada de avenida:**

Alto: "SW-019" "SW-022" "SW-025" "SW-051" "SW-061" "SW-063" "SW-065"

"SW-066" "SW-067" "SW-074" "SW-081" "SW-082" "SW-083" "SW-084" "SW-085" "SW-097" "SW-108"

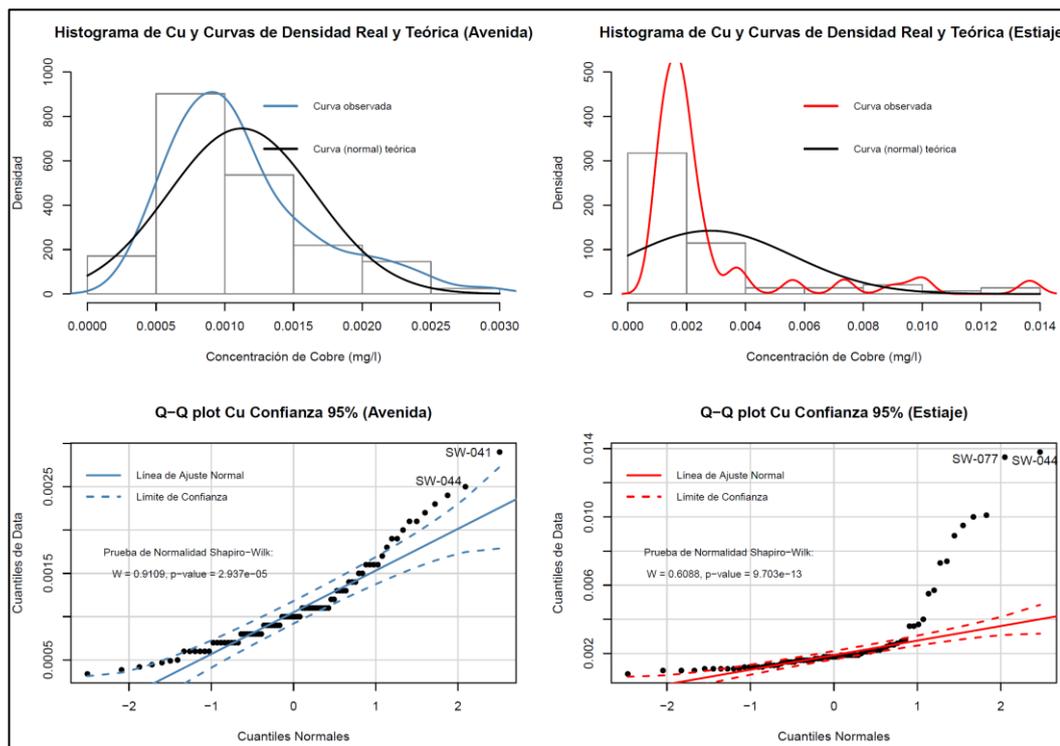
Muy Alto: "SW-023" "SW-071" "SW-073" "SW-080" "GW-088"

**Temporada de estiaje:**

Alto: "SW-081" "SW-082" "SW-036" "SW-083" "GW-088" "SW-091" "GW-024" "SW-077" "SW-023" "SW-099" "SW-042" "SW-063" "SW-045" "SW-062" "SW-089"

Muy Alto: "SW-084" "SW-019" "SW-022" "SW-073" "SW-097" "SW-051"

**Cobre (Cu):** El análisis es idéntico al realizado con el pH y Ce (ver Figura 5.7). En la gráfica, para la temporada de avenida la curva de densidad observada se aleja ligeramente de la curva normal teórica; además, existe una ligera asimetría positiva. Para la temporada de estiaje, la curva observada y curva normal teórica difieren drásticamente; además, la curva observada posee muchos valores altos dispersos que se observan como pequeños “montículos rojos”, lo cual determina no normalidad.



**Figura 5.7 Gráficos de distribución y test de normalidad Cu**  
Fuente: Elaboración propia

Respecto al *q-q plot*, para la temporada de avenida la mayoría de valores caen en la “línea de normalidad” o dentro de los límites de confianza de la distribución normal (95% de confianza), pero se observa una cola derecha e izquierda (valores altos fuera de los límites) lo que genera una distribución no normal. Esto se sustenta, además, con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk cuyo  $p\text{-valor}=2.937e-05$ . Para la temporada de estiaje, se tiene un mejor ajuste en los valores menores, los cuales caen en la “línea de ajuste normal” o dentro de los límites de confianza de la distribución normal (95% de confiabilidad). Además, tienen una marcada cola derecha debido a que los valores mayores son muy altos, que indica no normalidad de la data (todo esto es corroborado con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk con  $p\text{-valor} = 9.703e-13$ ). Como se analizó, para ambas temporadas la data de Cu no se distribuye de manera normal y los puntos de análisis fueron SW-044, SW-041 y SW-077, SW-

044 para avenida y estiaje, respectivamente. Esta información se visualiza en la Figura 5.7 etiquetada en ambas temporadas.

Del *boxplot* realizado, en base al análisis metodológico obtenido, la clasificación cualitativa de los valores de Cu (concentración baja, moderada, alta y muy alta) se muestra en la Tabla 5.10.

**Tabla 5.10**  
*Clasificación cualitativa de rangos de Cu en ambas temporadas*

<b>Análisis</b>	<b>Rango Avenidas</b>	<b>Rango Estiaje</b>	<b>Concentración</b>
<b>&lt;L.D - Q1</b>	<0.000725	<0.001325	Baja
<b>Q1 - Q3</b>	[0.000725 - 0.001375>	[0.001325 - 0.002475>	Moderada
<b>Q3 - Límite superior</b>	[0.001375 - 0.002350>	[0.002475 - 0.004200>	Alta
<b>&gt;Límite superior</b>	≥0.002350	≥0.004200	Muy alta
<b>Valor promedio</b>	0.001123	0.002799	
<b>Rango de variación normal</b>	0.002350	0.004200	

**Fuente:** Elaboración propia

En la Tabla 5.10, se observa que el valor de fondo o media para avenida y estiaje es 0.001123 y 0.002799 mg/l, respectivamente. Así mismo, los rangos de variación normal son de 0.002350 y 0.004200 mg/l, respectivamente, para la subcuenca Hornillos Alto.

**Temporada de avenida:**

Alto: "SW-073" "SW-071" "SW-048" "SW-097" "SW-096" "SW-043" "SW-098"  
"SW-028" "SW-099" "SW-063" "SW-039" "SW-022" "SW-046" "SW-067" "SW-066" "SW-065" "SW-108" "SW-061"

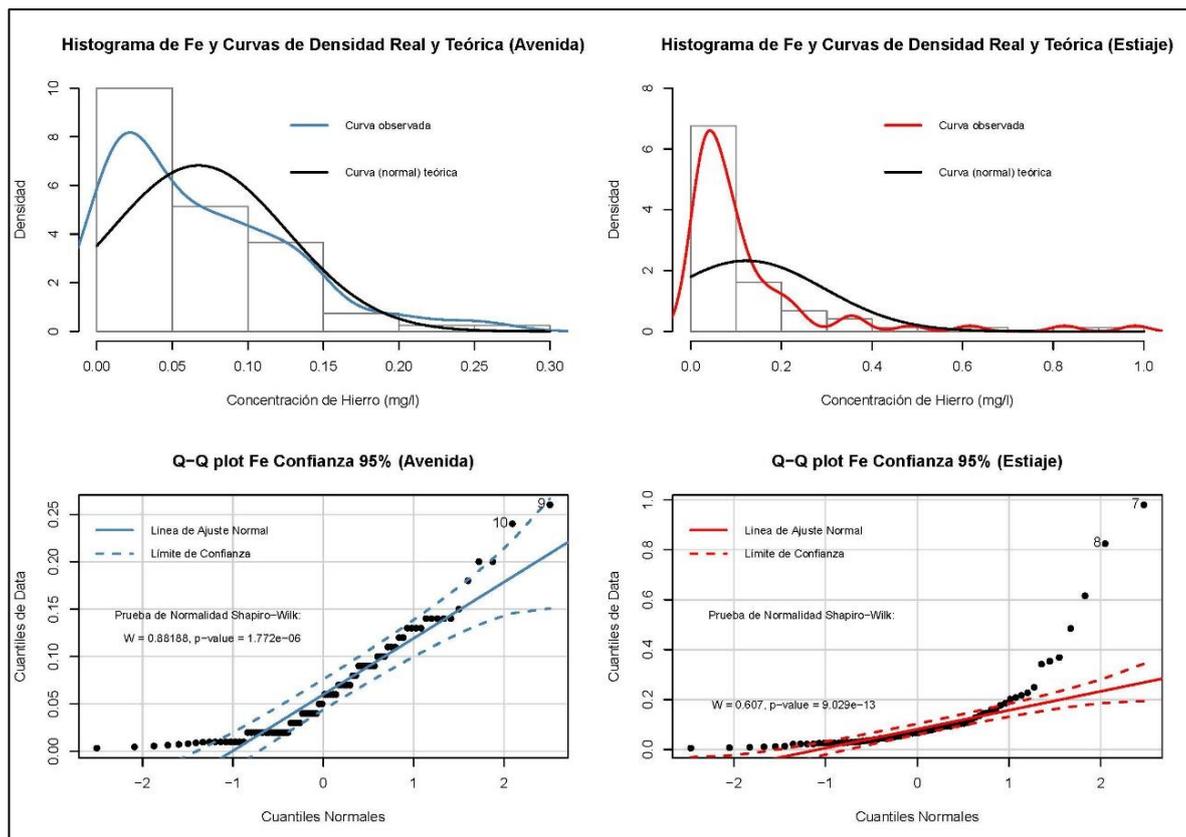
Muy Alto: "SW-044" "SW-074" "SW-041"

**Temporada de estiaje:**

Alto: "GW-088" "SW-073" "SW-108" "SW-087" "SW-096" "SW-099" "SW-040"  
"SW-049" "SW-045" "SW-037"

Muy Alto: "SW-077" "SW-021" "SW-055" "SW-095" "SW-097" "SW-044" "SW-066" "GW-202" "SW-028" "SW-103" "SW-064"

**Hierro (Fe):** El análisis es idéntico al realizado con el pH y Ce (ver Figura 5.8).



**Figura 5.8** Gráficos de distribución y test de normalidad Fe  
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica, para la temporada de avenida la curva densidad teórica se aleja ligeramente de la curva normal teórica; además, existe una “escalonada” asimetría positiva de los datos. Para la temporada de estiaje, la curva observada y curva normal teórica difieren drásticamente; además, la curva observada posee muchos valores altos dispersos que se observan como pequeños “montículos rojos”. Respecto al *q-q plot*, para la temporada de avenida la mayoría de valores caen en la “línea de normalidad”

o dentro de los límites de confianza de la distribución normal (95% de confianza); pero existen valores menores fuera de los límites, por lo cual no presentan una distribución normal, que se sustenta en la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk con el p-valor=1.772e-06. Para la temporada de estiaje, se tiene un mejor ajuste en los valores menores, que caen en la “línea de ajuste normal” o dentro de los límites de confianza de la distribución normal (95% de confiabilidad). Sin embargo, tienen una marcada cola derecha, que se debe a valores muy altos, que generan así la carencia de normalidad de los datos, todo lo cual se corrobora con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk con el p-valor = 9.029e-13. Como se analizó, para ambas temporadas el Fe no se distribuye de manera normal y los puntos de análisis fueron SW-042, SW-039 y SW-099, SW-062 para avenida y estiaje, respectivamente. Estos datos se visualizan en la Figura 5.8 etiquetados en ambas temporadas.

Del *boxplot* realizado, en base al análisis metodológico obtenido, la clasificación cualitativa de los valores de Fe (concentración baja, moderada, alta y muy alta) se muestra en la Tabla 5.11.

**Tabla 5.11**  
***Clasificación cualitativa de rangos de Fe en ambas temporadas***

<b>Análisis</b>	<b>Rango Avenidas</b>	<b>Rango Estiaje</b>	<b>Concentración</b>
<b>&lt;L.D - Q1</b>	<0.02	<0.03	Baja
<b>Q1 - Q3</b>	[0.02 - 0.10>	[0.03 - 0.13>	Moderada
<b>Q3 - Límite superior</b>	[0.10 -0.22 >	[0.13 - 0.29>	Alta
<b>&gt;Límite superior</b>	≥0.22	≥0.29	Muy alta
<b>Valor promedio</b>	0.07	0.12	
<b>Rango de variación normal</b>	0.22	0.29	

**Fuente: Elaboración propia**

En la Tabla 5.11, se observa que el valor de fondo o media para avenida y estiaje es 0.07 y 0.12 mg/l, respectivamente. Así mismo, los rangos de variación

normal son 0.22 y 0.29 mg/l, respectivamente, para la subcuenca Hornillos Alto.

**Temporada de avenida:**

Alto: "SW-051" "SW-048" "SW-049" "SW-072" "SW-075" "SW-079" "SW-076"  
 "SW-096" "SW-043" "SW-044" "SW-074" "SW-041" "SW-046" "SW-094" "SW-045" "SW-069" "SW-064" "SW-053"

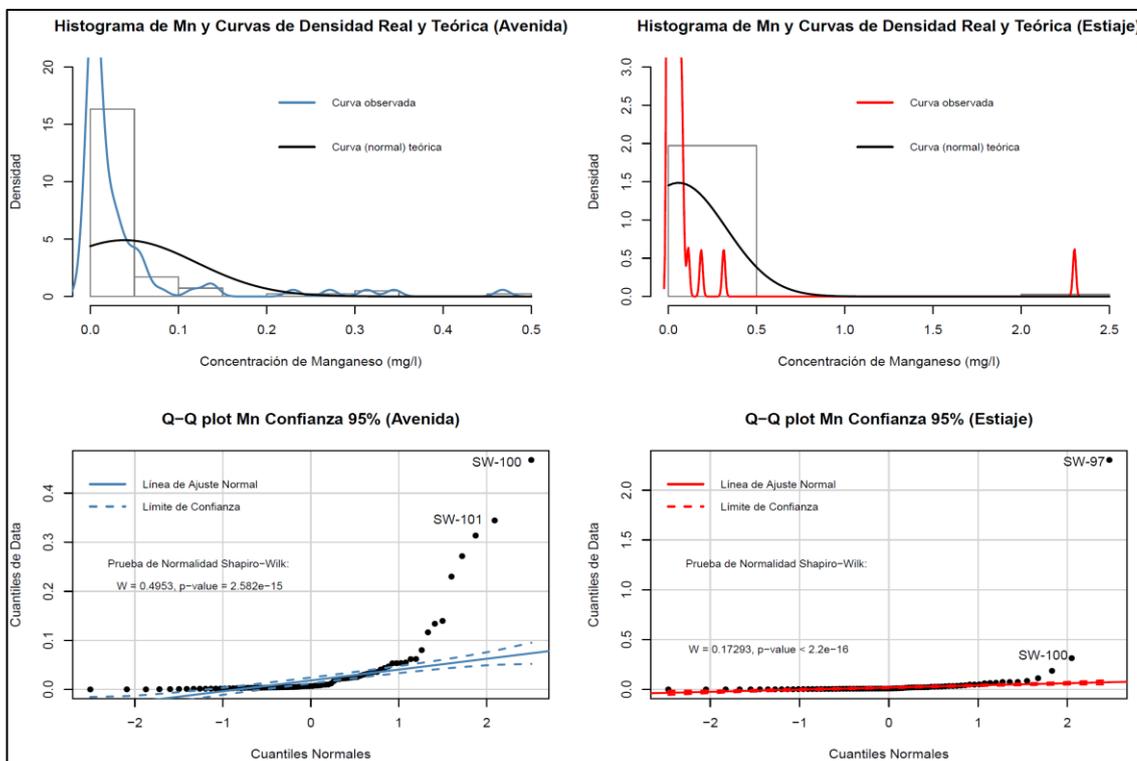
Muy Alto: "GW-088" "SW-039" "SW-042"

**Temporada de estiaje:**

Alto: "SW-093" "SW-045" "SW-112" "SW-053" "SW-051" "SW-025" "SW-046"  
 "SW-049" "SW-095" "SW-021" "SW-067" "SW-065"

Muy Alto: "SW-109" "SW-099" "SW-042" "SW-062" "SW-061" "SW-039" "SW-043"

**Manganeso (Mn):** El análisis es idéntico al realizado con el pH y Ce (ver Figura 5.9).



**Figura 5.9** Gráficos de distribución y test de normalidad Mn  
 Fuente: Elaboración propia

En la gráfica, para la temporada de avenida la curva de densidad teórica se aleja en gran medida de la curva normal teórica; además, existen muchos valores mayores dispersos que se ven como “montículos azules” y presentan asimetría positiva. Para la temporada de estiaje, la curva observada y curva normal teórica difieren ligeramente; asimismo, la curva observada posee pocos valores o un valor elevado del tipo “pico rojo al final de la curva”, lo que determina la distribución no normal. Respecto al *q-q plot*, para la temporada de avenida algunos valores caen en la “línea de normalidad” o dentro de los límites de confianza de la distribución normal (95% de confianza), aunque existen valores menores y altos fuera de los límites, lo que señala una distribución no normal, (esto sustentado en la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk en donde el p-valor=2.582e-15). Para la temporada de estiaje, se tiene un mejor ajuste en los valores menores, los cuales caen en la “línea de ajuste normal” o dentro de los límites de confianza de la distribución normal (95% de confiabilidad); sin embargo, tienen valores anómalos bien marcados que determinan la no normalidad de la data, lo cual se corrobora con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk en donde el p-valor<2.2e-16. Como se analizó para ambas temporadas el Mn no se distribuye de manera normal y los puntos de análisis fueron SW-100, SW-101 y SW-100, SW-97 para avenida y estiaje, respectivamente. Los datos se visualizan en la Figura 5.9 etiquetados en ambas temporadas.

Del *boxplot* realizado, sobre la base del análisis metodológico obtenido, la clasificación cualitativa de los valores de Mn (concentración baja, moderada, alta y muy alta) se muestra en la Tabla 5.12.

**Tabla 5.12**  
**Clasificación cualitativa de rangos de Mn en ambas temporadas**

Análisis	Rango Avenidas	Rango Estiaje	Concentración
<L.D - Q1	<0.003525	<0.004900	Baja
Q1 - Q3	[0.003525 - 0.033300>	[0.004900 - 0.033850>	Moderada
Q3 - Límite superior	[0.033300 - 0.077963>	[0.033850 - 0.077275>	Alta
>Límite superior	≥0.077963	≥0.077275	Muy alta
Valor promedio	0.038671	0.058060	
Rango de variación normal	0.077963	0.077275	

*Fuente: Elaboración propia*

En la Tabla 5.12, se observa que el valor de fondo o media para avenida y estiaje es 0.038671 y 0.058060 mg/l, respectivamente. Del mismo modo, los rangos de variación normal son 0.077963 y 0.077275 mg/l, respectivamente para la subcuenca Hornillos Alto.

**Temporada de avenida:**

Alto: "SW-098" "SW-082" "SW-093" "SW-081" "SW-094" "SW-054" "SW-083"  
"SW-095" "SW-026" "SW-029" "SW-032" "SW-053"

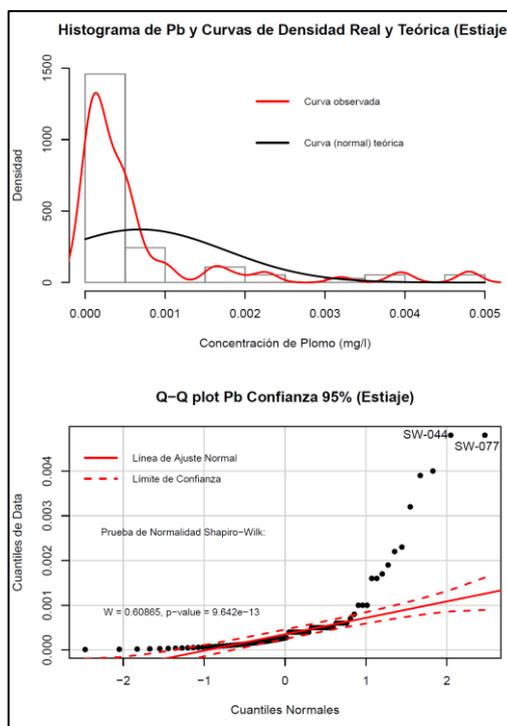
Muy Alto: "GW-088" "SW-097" "SW-100" "SW-096" "SW-102" "SW-101" "SW-105" "SW-103" "SW-106" "SW-033"

**Temporada de estiaje:**

Alto: "SW-084" "SW-022" "SW-083" "SW-109" "SW-110" "SW-093" "SW-101"  
"SW-054" "SW-102" "SW-081" "SW-067" "SW-087" "SW-026" "SW-065"

Muy Alto: "SW-082" "SW-097" "SW-106" "SW-096" "SW-100"

**Plomo (Pb):** El análisis es idéntico al realizado con el pH y Ce (ver Figura 5.10).



**Figura 5.10** Gráficos de distribución y test de normalidad Pb  
Fuente: Elaboración propia

El análisis para Plomo solo se realizó para la temporada de estiaje, debido a que se cuenta con un porcentaje mayor al 50% de datos completos. En la gráfica, la curva observada no se ajusta a la curva normal teórica y presenta agrupamientos pequeños de valores altos mostrados como “pequeños montículos” de color rojo, por lo cual existe una posible no normalidad de los datos. Respecto al *q-q plot*, existen valores que no caen en la “línea normal” o dentro de los límites de confiabilidad (95% confianza) y algunos de estos son valores de menor concentración. Sin embargo, la mayoría son valores altos que generan una cola derecha y, por tanto, asimetría positiva de los datos (la distribución no normal se corrobora con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk donde el p-valor =  $9.642 \times 10^{-13}$ ). Como se analizó para la temporada de estiaje, el Pb no se distribuye de manera normal y los puntos de análisis fueron SW-

044 y SW-077 para estiaje. En la Figura 5.10, se visualizan los valores etiquetados para ambas temporadas.

Del *boxplot* realizado, sobre la base del análisis metodológico obtenido, la clasificación cualitativa de los valores de Pb (concentración baja, moderada, alta y muy alta) se muestra en la Tabla 5.13.

**Tabla 5.13**  
*Clasificación cualitativa de rangos de Pb en ambas temporadas*

Análisis	Rango Avenidas	Rango Estiaje	Concentración
<L.D - Q1	<	<0.00011	Baja
Q1 - Q3	[ - >	[0.00011 - 0.00060>	Moderada
Q3 - Límite superior	[ - >	[0.00060 - 0.00134>	Alta
>Límite superior	≥	≥0.00134	Muy alta
<b>Valor promedio</b>		0.00068	
<b>Rango de variación normal</b>		0.00134	

*Fuente: Elaboración propia*

En la Tabla 5.13, se observa que el valor de fondo o media para estiaje es de 0.00068 mg/l. Asimismo, el rango de variación normal es de 0.00134 mg/l para la subcuenca Hornillos Alto.

#### **Temporada de estiaje:**

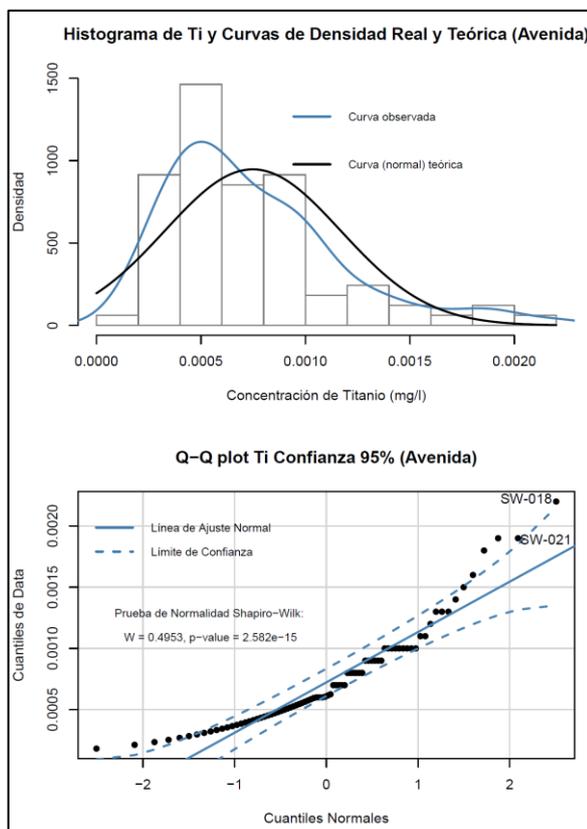
Alto: "SW-096" "SW-101" "SW-099" "SW-054" "SW-105" "SW-100" "SW-102"  
"SW-033" "SW-040"

Muy Alto: "SW-044" "SW-077" "SW-103" "SW-095" "SW-055" "SW-021" "SW-097" "SW-064" "SW-106" "SW-056" "SW-066"

**Titanio (Ti):** El análisis es idéntico al realizado con el pH y Ce (ver Figura 5.11).

El análisis del Titanio solo se realizó para la temporada de avenida, debido a que se cuenta con un porcentaje mayor al 50% de datos completos. En la Figura 5.11, la curva observada no se ajusta a la curva normal teórica; sin embargo, muestra una tendencia

que sigue la distribución normal. Respecto al *q-q plot*, existen valores que no caen en la “línea normal” o dentro de los límites de confiabilidad (95% confianza).



**Figura 5.11** Gráficos de distribución y test de normalidad Ti  
Fuente: Elaboración propia

Algunos de los son valores de menor concentración y en menor medida valores mayores; por esta razón, los datos no se distribuyen de manera normal, lo que se corrobora con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, donde el  $p$ -valor =  $2.582e-15$  indica no normalidad. Como se analizó para la temporada de avenida, los datos de Ti no se distribuyen de manera normal y los puntos de análisis son SW-018, SW-021 para avenida. En la Figura 5.11, se visualizan los valores etiquetados.

Del *boxplot* realizado, sobre la base del análisis metodológico obtenido, la clasificación cualitativa de los valores de Ti (concentración baja, moderada, alta y muy

alta) se muestra en la Tabla 5.14.

**Tabla 5.14**  
*Clasificación cualitativa de rangos de Ti en ambas temporadas*

Análisis	Rango Avenidas	Rango Estiaje	Concentración
<L.D - Q1	<0.000445	<	Baja
Q1 - Q3	[0.000445 - 0.001000>	[ - >	Moderada
Q3 - Límite superior	[0.001000 - 0.001832>	[ - >	Alta
>Límite superior	≥0.001832	≥	Muy alta
Valor promedio	0.000748		
Rango de variación normal	0.001832		

*Fuente: Elaboración propia*

En la Tabla 5.14, se observa que el valor de fondo o media para avenida es de 0.000748. Asimismo, el rango de variación normal es de 0.001832 mg/l para la subcuenca Hornillos Alto.

#### **Temporada de avenida:**

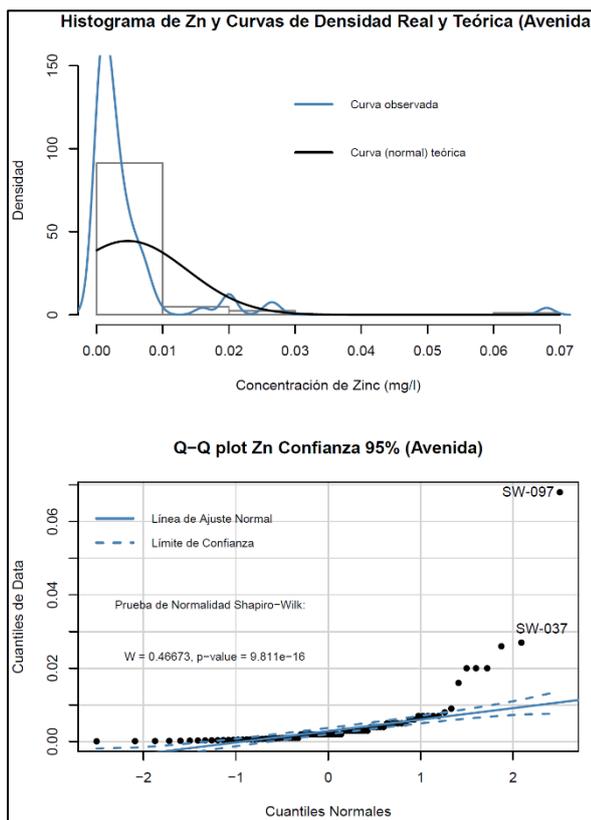
Alto: "SW-047" "SW-048" "SW-049" "SW-074" "SW-019" "SW-031" "SW-026"  
"SW-029" "SW-069" "SW-025"

Muy Alto: "SW-021" "SW-018" "SW-023"

**Zinc (Zn):** El análisis es idéntico al realizado con el pH y Ce

En la gráfica, la curva observada no se ajusta a la curva normal teórica, es decir, las gráficas no se superponen; sin embargo, señala una tendencia que sigue la distribución normal con pequeños picos azules en la parte superior. Respecto al *q-q plot* para esta temporada, existen valores que no caen en la "línea normal" o dentro de los límites de confiabilidad (95% confianza) y algunos de estos son valores de menor concentración y por lo general valores altos que generan asimetría positiva de los datos, por lo cual no se distribuyen de manera normal. Esto se corrobora con la prueba

de normalidad de Shapiro-Wilk donde el  $p$ -valor =  $2.582e-15$ , que indica no normalidad de datos. Como se analizó, para la temporada de estiaje, la data de Zn no se distribuye de manera normal y los puntos de análisis son SW-037, SW-097 para avenida. En la Figura 5.12, se visualizan los valores etiquetados.



**Figura 5.12** Gráficos de distribución y test de normalidad Zn  
Fuente: Elaboración propia

Del *boxplot* realizado, sobre la base del análisis metodológico obtenido, la clasificación cualitativa de los valores de Ti (concentración baja, moderada, alta y muy alta) se muestra en la Tabla 5.15.

**Tabla 5.15**  
**Clasificación cualitativa de rangos de Zn en ambas temporadas**

Análisis	Rango Avenidas	Rango Estiaje	Concentración
<L.D - Q1	<0.000794	<	Baja
Q1 - Q3	[0.000794 - 0.005000>	[ ->	Moderada
Q3 - Límite superior	[0.005000 - 0.01131>	[ ->	Alta
>Límite superior	≥0.01131	≥	Muy alta
<b>Valor promedio</b>	0.004715		
<b>Rango de variación normal</b>	0.01131		

*Fuente: Elaboración propia*

En la Tabla 5.15, se observa que el valor de fondo o mediana para avenida es de 0.004715 mg/l. Asimismo, el rango de variación normal es de 0.01131 mg/l para la subcuenca Hornillos Alto.

#### **Temporada de avenida:**

Alto: "SW-043" "SW-036" "SW-098" "SW-082" "SW-044" "SW-105" "SW-028"  
"SW-103" "SW-074"

Muy Alto: "SW-097" "SW-037" "SW-100" "SW-096" "SW-102" "SW-101" "SW-104"

## **5.2 Análisis de Hazard Quantite (HQ)-Estándares de Calidad Ambiental (ECA) por microcuenca en ambas temporadas**

Los estándares de calidad ambiental para la normativa actual usados fueron los establecidos en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, y tienen como descriptor temático el control de la calidad del agua continental y estándares de calidad ambiental. Es preciso considerar que los valores se realizan con concentraciones totales para los elementos químicos, a diferencia del análisis estadístico. Los estándares de calidad serán ECA Categoría D1 y D2 (según la Autoridad Nacional del Agua (ANA) para la zona de estudio); además, se añadirá una ratio importante, el valor

de *Hazard Quotient* (HQ), que es el índice de contaminación.

En la Figura 5.13, se presenta los estándares de calidad de la ANA.

**Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales**

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
<b>FÍSICOS- QUÍMICOS</b>				
Aceites y Grasas	mg/L	5		10
Bicarbonatos	mg/L	518		**
Cianuro Wad	mg/L	0,1		0,1
Cloruros	mg/L	500		**
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/ Co	100 (a)		100 (a)
Conductividad	(µS/cm)	2 500		5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	15		15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40		40
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,2		0,5
Fenoles	mg/L	0,002		0,01
Fluoruros	mg/L	1		**
Nitratos (NO <sub>3</sub> -N) + Nitritos (NO <sub>2</sub> -N)	mg/L	100		100
Nitritos (NO <sub>2</sub> -N)	mg/L	10		10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4		≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5		6,5 – 8,4
Sulfatos	mg/L	1 000		1 000
Temperatura	°C	Δ 3		Δ 3
<b>INORGÁNICOS</b>				
Aluminio	mg/L	5		5

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
Arsénico	mg/L	0,1		0,2
Bario	mg/L	0,7		**
Berilio	mg/L	0,1		0,1
Boro	mg/L	1		5
Cadmio	mg/L	0,01		0,05
Cobre	mg/L	0,2		0,5
Cobalto	mg/L	0,05		1
Cromo Total	mg/L	0,1		1
Hierro	mg/L	5		**
Litio	mg/L	2,5		2,5
Magnesio	mg/L	**		250
Manganeso	mg/L	0,2		0,2
Mercurio	mg/L	0,001		0,01
Níquel	mg/L	0,2		1
Plomo	mg/L	0,05		0,05
Selenio	mg/L	0,02		0,05
Zinc	mg/L	2		24

**Figura 5.13 Estándares de calidad ambiental, categoría 3: riego de vegetales (D1) y bebida de animales (D2)**

**Fuente: Autoridad Nacional del Agua (2017)**

Previo al análisis de los ECAS, se considera realizar el análisis de calidad sobre la base del coeficiente de riesgo de contaminación, cuyas siglas son HQ (“*Hazard Quotient*”), que relaciona la concentración en agua del objeto (analito) analizado en el agua con el valor del ECA, según la ecuación:

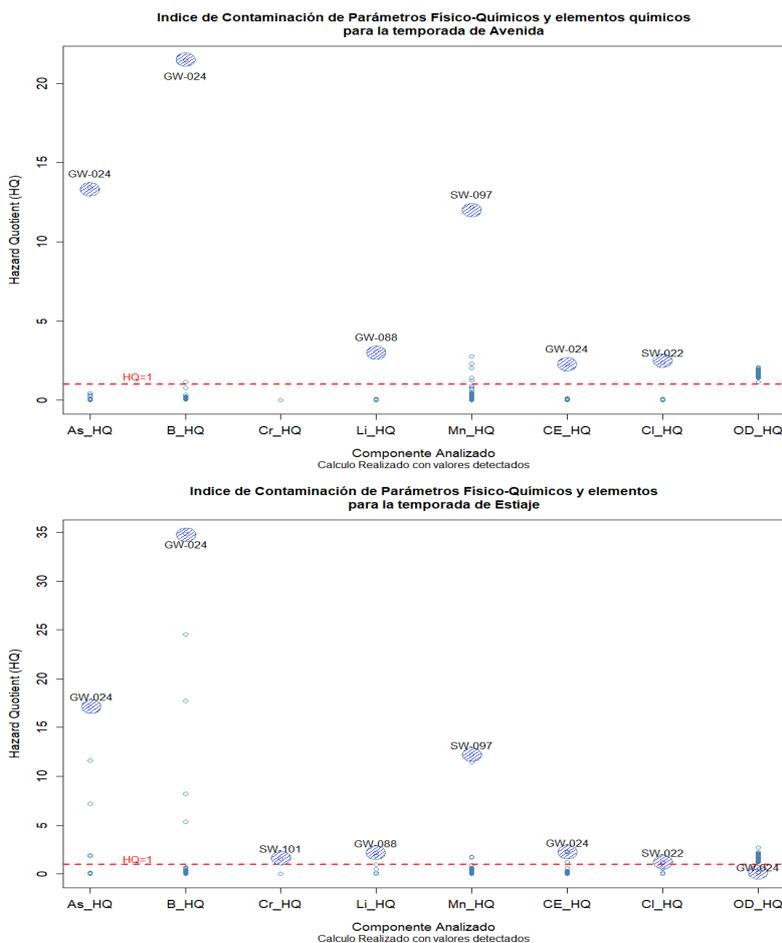
$$HQ = \frac{[X_{agua}]}{[X_{ECA}]}$$

Se tiene:

[X\_agua]: Concentración del elemento o compuesto analizado en agua.

[X\_ECA]: Valor establecido en el ECA respecto al elemento o compuesto analizado en agua.

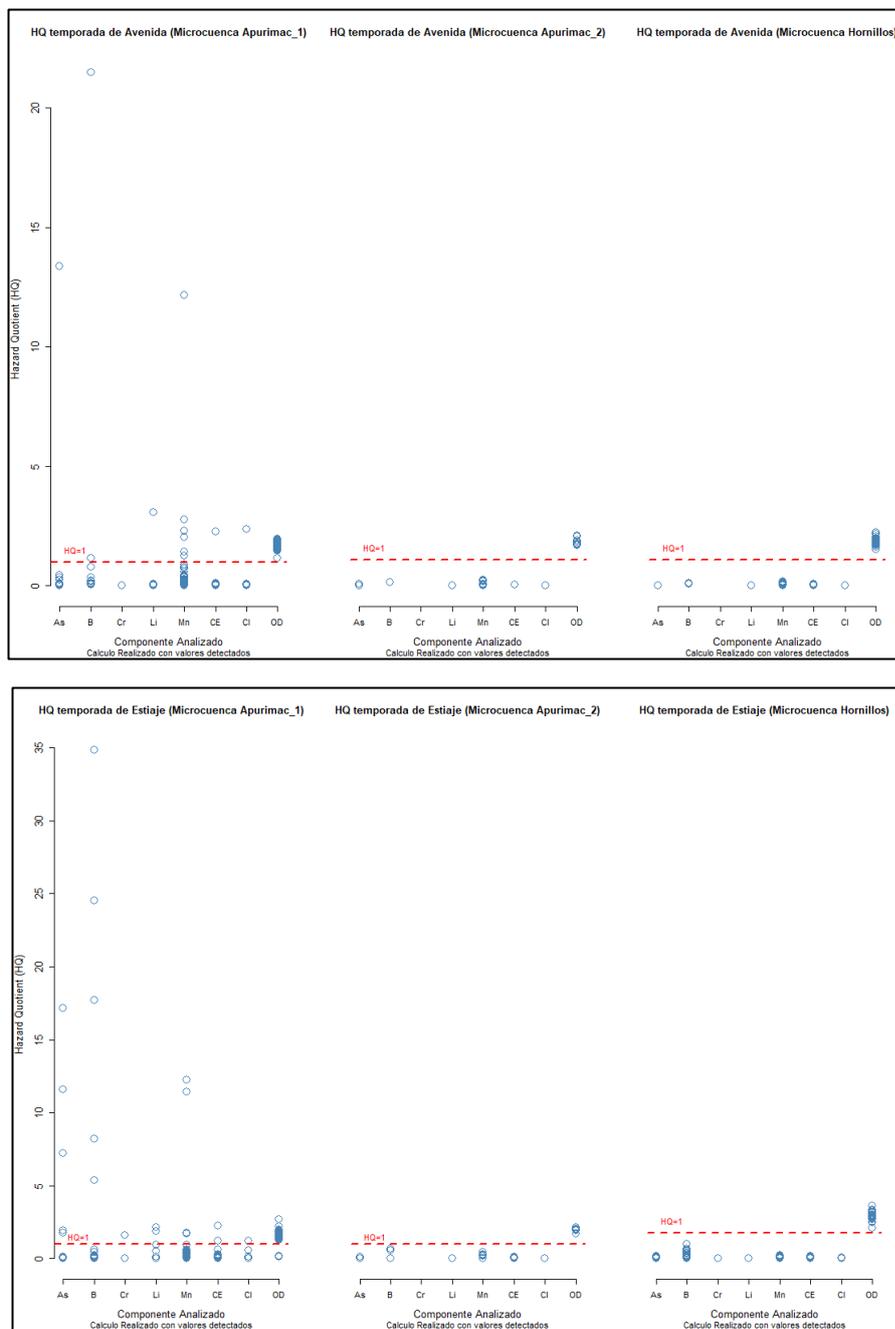
Esta ratio hallada permite encontrar de manera rápida los elementos o compuestos analizados que superan el ECA y por ende el “índice de contaminación”. Esto se muestra en una comparación inicial entre avenida y estiaje, luego dentro la temporada de avenida se dividió por microcuencas la subcuenca Hornillos (Hornillos\_I, Apurímac\_I y Apurímac\_II).



**Figura 5.14 HQ para la temporada de avenida y estiaje en la subcuenca Hornillos Alto Fuente: Elaboración propia**

Como se observa en la Figura 5.14, tanto en temporada de avenida como de estiaje se tiene que As, B, Li, Mn, CE, Cl superan el valor de  $HQ = 1$ ; es decir, muestran riesgo potencial de contaminación. En la temporada de estiaje, el As, B aumenta el valor de HQ de manera considerable, mientras que el Cr aparece superando el valor referencial del HQ solo en esta temporada. Se muestran los códigos de los puntos de máximo ratio de HQ para ambas temporadas. Para el As, B los valores que superan el HQ son de agua subterránea (GW-024) en ambas temporadas; para el Cr, solo supera el HQ en estiaje en el agua superficial (SW-101); para el Li, los valores superan el HQ en agua subterránea (GW-088); para el Mn, supera el HQ en ambas temporadas en agua superficial (SW-097), para la CE, supera el HQ para ambas temporadas en agua subterránea (GW-024); para los Cl, superan el HQ en ambas temporadas en agua superficial (SW-022); finalmente, el OD supera en el agua subterránea GW-024.

La Figura 5.15 muestra la comparación para avenida y estiaje por microcuenca. Esto se realiza con el fin de dar a conocer las diferencias observadas en campo de manera más detallada. El índice de contaminación solo es superado en ambas temporadas en la microcuenca Apurímac 1, que indica la diferencia marcada que existe en las microcuencas elegidas. No existe ningún parámetro físico u elemento químico que supere el HQ en la microcuenca Apurímac 2, ni en la microcuenca Hornillos en la subcuenca Hornillos Alto.



**Figura 5.15 HQ para la temporada de avenida y estiaje según microcuenca**  
**Fuente: Elaboración propia**

Para reforzar lo hallado con el HQ, se verificó los puntos que superan los ECAS en estas variables consideradas para ambas temporadas por microcuencas (ver Figuras 5.16, 5.17 y 5.18).

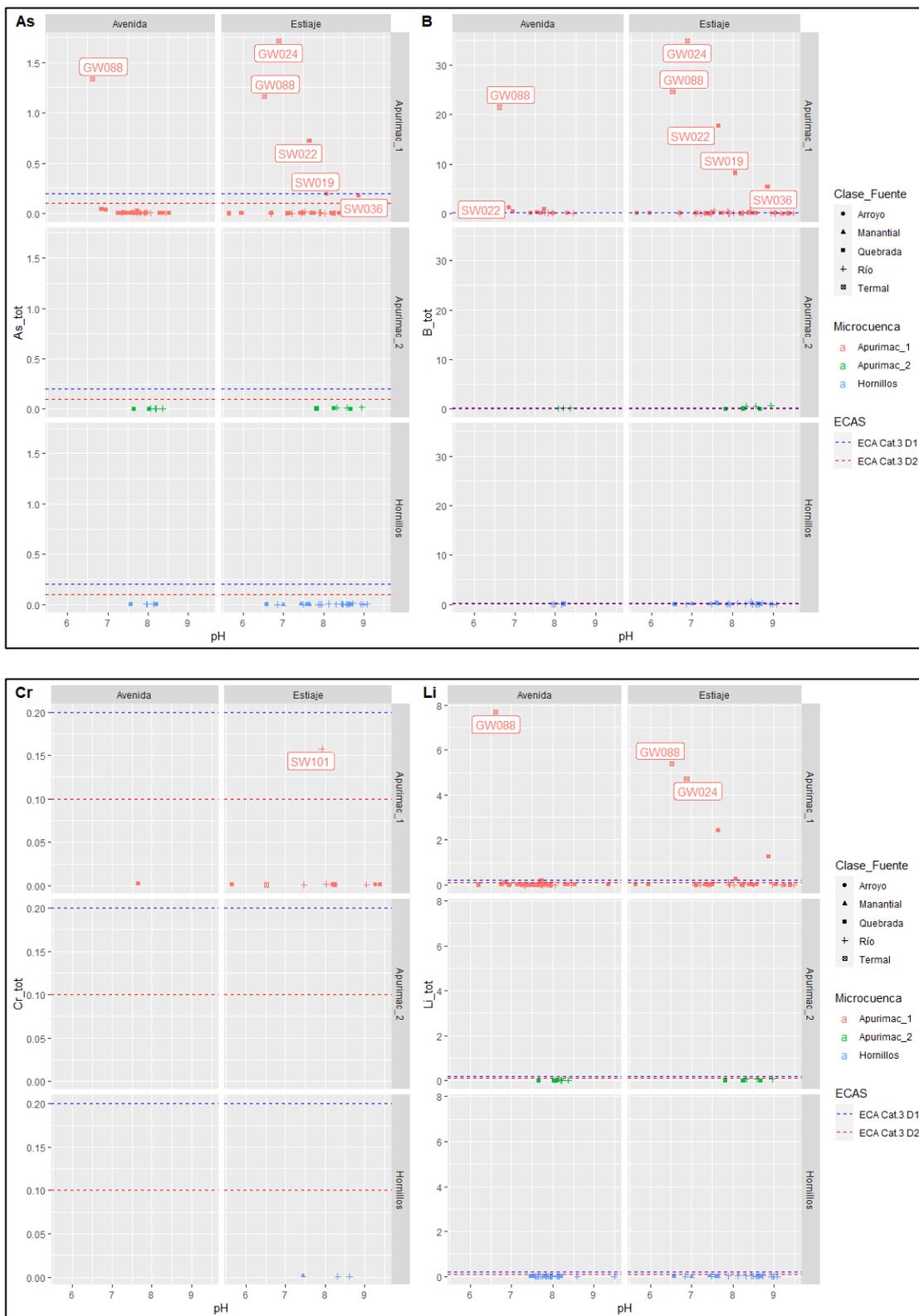
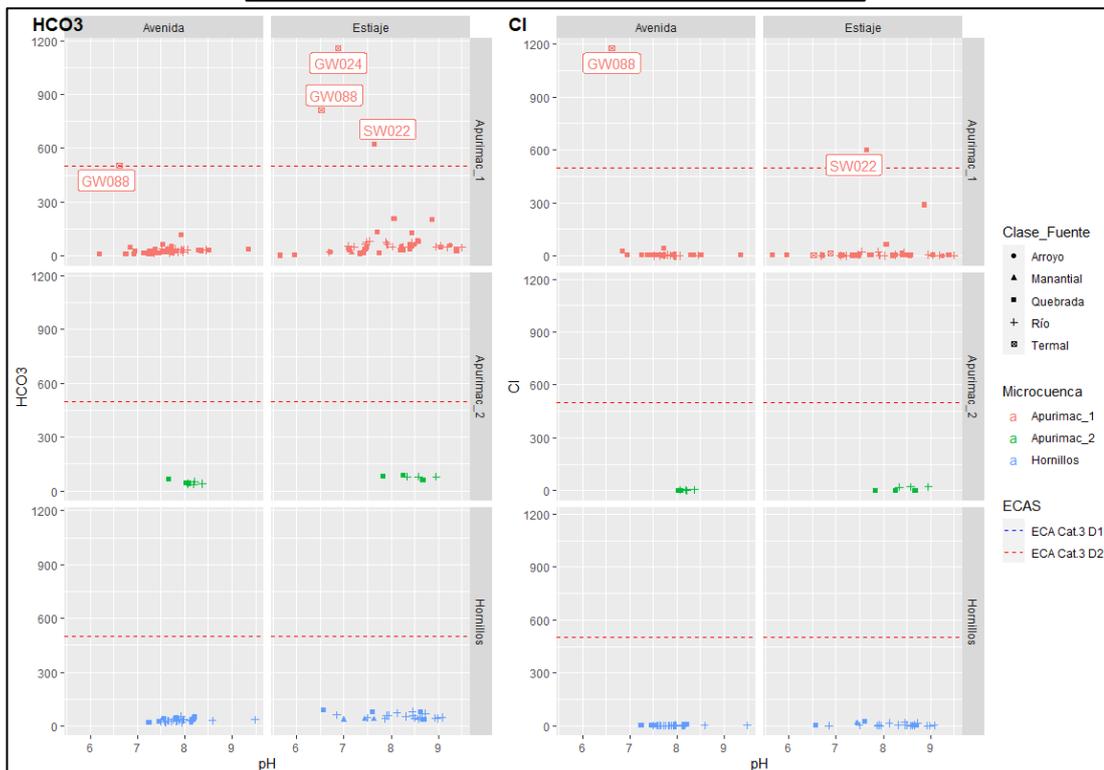
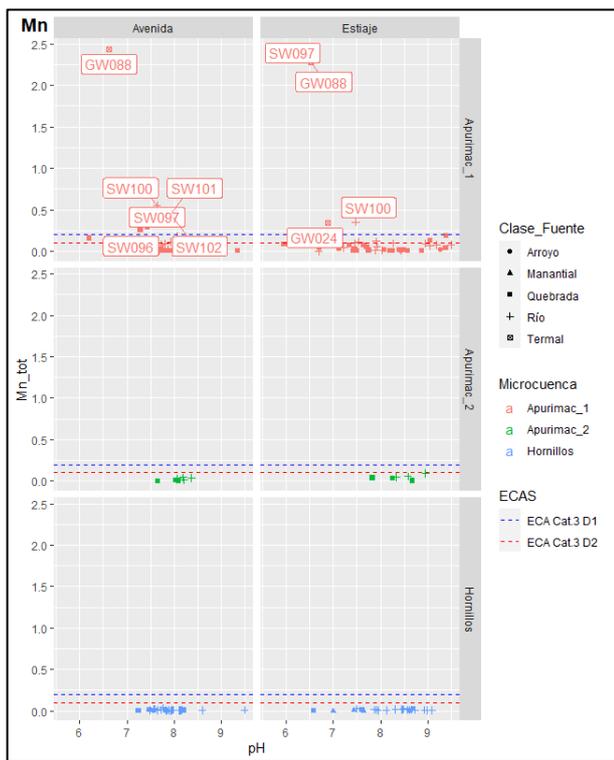
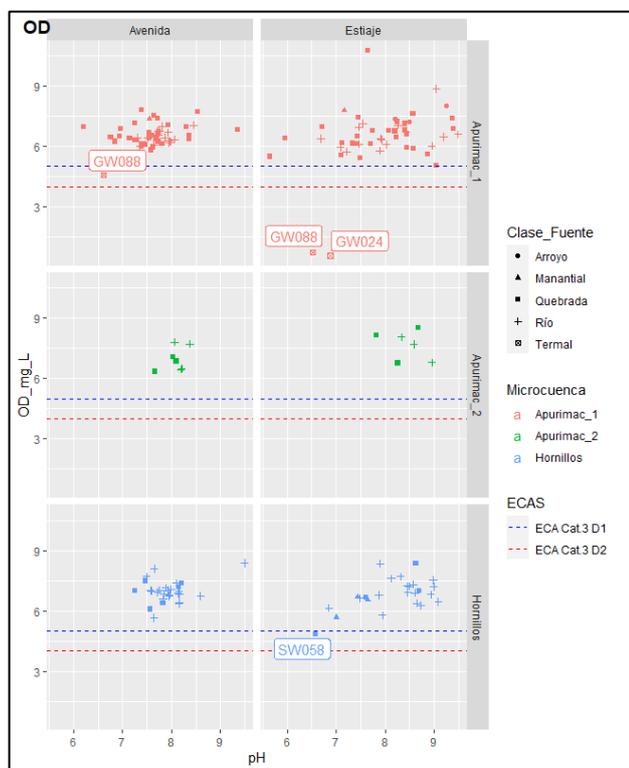
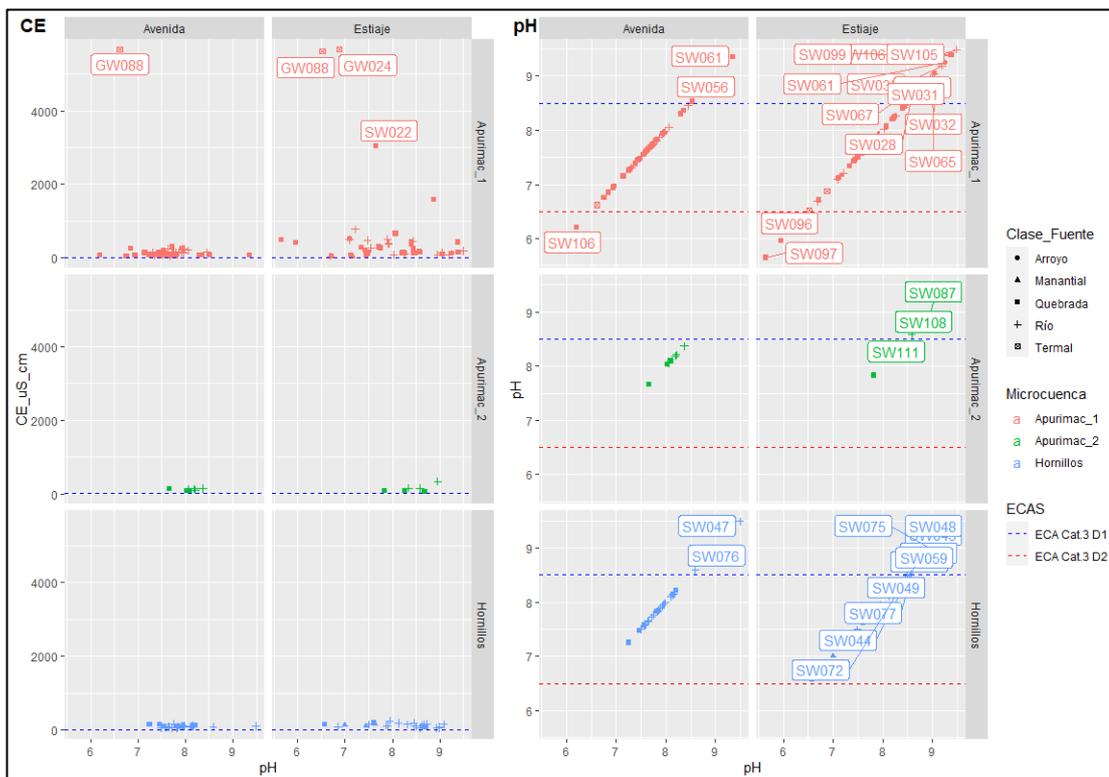


Figura 5.16 Límites de ECA D1-D2 según temporada – microcuenca – clase de fuente (As, B, Cr, Li)

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.17** Límites de ECA D1-D2 según temporada – microcuenca – clase de fuente (Mn,  $HCO_3^-$ , Cl)  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.18** Límites de ECA D1-D2 según temporada – microcuenca – clase de fuente (CE, pH, OD)

Fuente: Elaboración propia

En la subcuenca Hornillos Altos, el análisis de los resultados para los parámetros físico-químicos supera el ECA Cat. 3 D1 y D2, el potencial de hidrógeno (pH), la conductividad eléctrica (CE), el oxígeno disuelto (OD), y solamente para el D1 bicarbonatos y cloruros como ya fue analizado en el capítulo IV. Respecto a los parámetros inorgánicos (elementos metálicos) superan el ECA Cat. 3 D1 y D2 el arsénico, boro, cromo, litio y manganeso.

De las Figuras 5.16, 5.17 y 5.18 se obtuvo la Tabla 5.16 para el análisis puntual multielemental.

**Tabla 5.16****Análisis booleano multielemental**

Punto	Temporada	Microcuenca	As	B	Cr	Li	Mn	HCO3	Cl	CE	OD	Totales Si
GW-024	Estiaje	Apurímac_1	Si	Si	No	Si	Si	Si	No	Si	Si	7
GW-088	Avenida	Apurímac_1	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	8
GW-088	Estiaje	Apurímac_1	Si	Si	No	Si	Si	Si	No	Si	Si	7
SW-019	Estiaje	Apurímac_1	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	2
SW-022	Avenida	Apurímac_1	No	Si	No	No	No	No	No	No	No	1
SW-022	Estiaje	Apurímac_1	Si	Si	No	No	No	Si	Si	Si	No	5
SW-036	Estiaje	Apurímac_1	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	2
SW-096	Avenida	Apurímac_1	No	No	No	No	Si	No	No	No	No	1
SW-097	Avenida	Apurímac_1	No	No	No	No	Si	No	No	No	No	1
SW-097	Estiaje	Apurímac_1	No	No	No	No	Si	No	No	No	No	1
SW-100	Avenida	Apurímac_1	No	No	No	No	Si	No	No	No	No	1
SW-100	Estiaje	Apurímac_1	No	No	No	No	Si	No	No	No	No	1
SW-101	Avenida	Apurímac_1	No	No	No	No	Si	No	No	No	No	1
SW-101	Estiaje	Apurímac_1	No	No	Si	No	No	No	No	No	No	1
SW-102	Avenida	Apurímac_1	No	No	No	No	Si	No	No	No	No	1
<b>Totales Si</b>			6	7	1	3	10	4	2	4	3	40

**Fuente: Elaboración propia**

En la Tabla 5.16, los puntos que supera al ECA en la microcuenca Apurímac 1 en mayor cantidad de variables son las aguas subterráneas, como máximo 8 variables en el punto GW-088. Algo resaltante es el punto SW-022, que para la temporada de avenida supera solo en boro, mientras que para estiaje supera As, B, HCO<sub>3</sub>, Cl, CE. Finalmente, la variable manganeso es la que tiene mayor cantidad de valores que superan el ECA (10).

Solamente se describió el potencial de hidrógeno (pH) debido a la cantidad de puntos. Es el único parámetro físico químico que es superior al límite máximo del ECA en Apurímac 2 y Hornillos.

#### **MICROCUENCA APURÍMAC 1:**

El punto SW-106 es menor al valor del ECA en avenida, y SW-061 y SW-056 son mayores al ECA en avenida. Los puntos SW-096 y SW-097 son menores al ECA en estiaje; los puntos SW-099, SW-106, SW-105, SW-061, SW-034, SW-031, SW-067, SW-032, SW-028, SW-065 son también mayores al valor del ECA en estiaje.

#### **MICROCUENCA APURÍMAC 2:**

Los puntos SW-087, SW-108 y SW-111 son mayores al ECA en estiaje.

#### **MICROCUENCA HORNILLOS:**

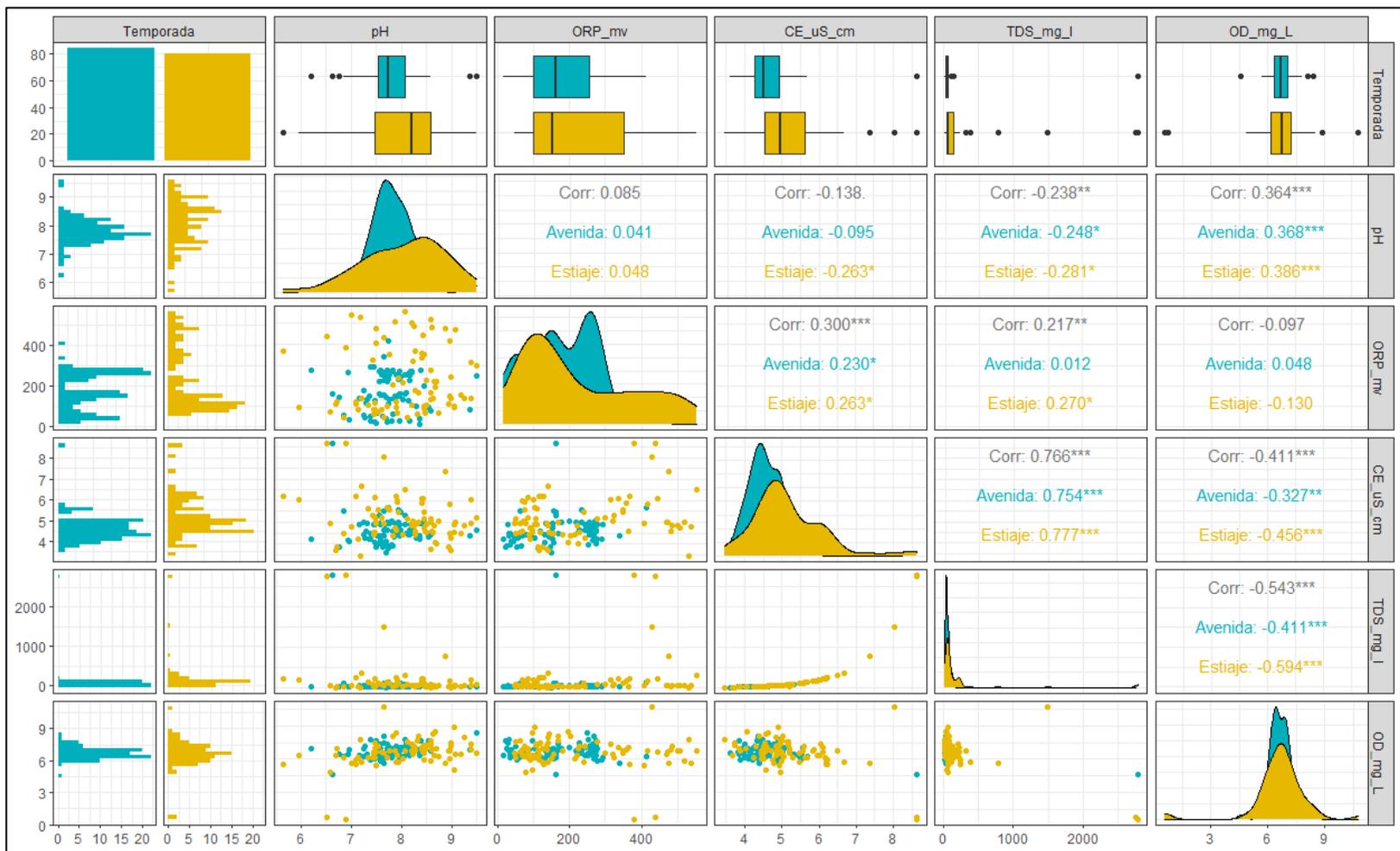
Los puntos SW-047 y SW-046 superan el ECA en avenida y SW-048, SW-043, SW-059, SW-075, SW-049, SW-077, SW-044 y SW-072 superan el ECA en estiaje.

### **5.3 Análisis multivariado tempo–espacial**

#### **5.3.1 Análisis bivariado (AB)**

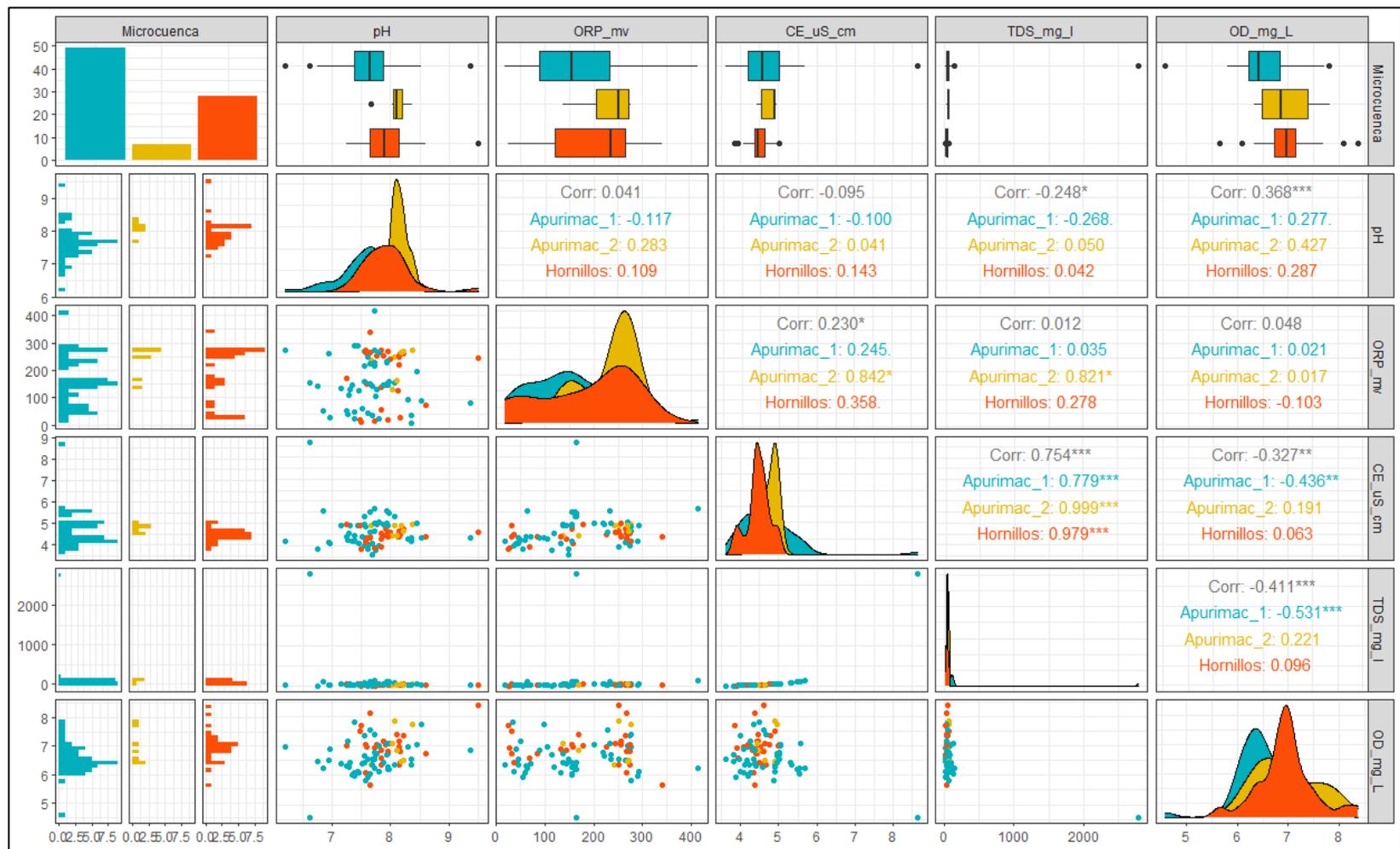
Para el análisis bivariado, se usó en los valores de correlación de Pearson y la distribución puntual de los valores por tiempo (temporada) de los parámetros físico-químicos, hidroquímicos y metales disueltos contaminantes de forma espacial (microcuenca) para ver cómo se comporta de manera multivariable y tempo-espacial el valor de correlación de las variables consideradas.

En la Figura 5.19, en la temporada de avenida, se observa que los valores los parámetros físico-químicos tienden a centrarse y son leptocúrticos; es decir, presentan menor rango y menor desviación hacia la medida de tendencia central. Se observa, además, que los valores de correlación de Pearson son similares tanto para avenida como para estiaje. Para la relación TDS y CE, el valor de correlación total es 0.766, en avenida 0.754 y estiaje 0.777, lo que ratifica el concepto de alta correlación entre estas dos variables. De la división espacial (microcuenca), se observa de las Figuras 5.20 y 5.21 que los parámetros físico-químicos tienen un amplio rango y son mayores en la microcuenca Apurímac 1, seguido por la microcuenca Apurímac 2 y finalmente la microcuenca Hornillos (esto se cumple en el tiempo, tanto en avenida como en estiaje). Los valores de correlación de Pearson son mayores en valor absoluto a 0.5 para la microcuenca Apurímac 2, y son más altos en valor absoluto para la microcuenca Hornillos que para la microcuenca Apurímac 1, que cual indica que las variables tienden a tener un comportamiento “estable” al momento de su confluencia en la microcuenca Apurímac 2.



**Figura 5.19** Plot de correlación de parámetros físico-químicos según temporada (CE log)

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.20** Plot de correlación de parámetros físico-químicos (Ce log) de avenida según distribución espacial (microcuenca)  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.21** Plot de correlación de parámetros físico-químicos (Ce log) de estiaje según distribución espacial (microcuenca)  
Fuente: Elaboración propia

Para las Figuras 5.22 y 5.23, se utilizó escala logarítmica en base 10 de las concentraciones de componentes mayoritarios y de la CE para su representación. En la Figura 5.22, el comportamiento respecto al tiempo (temporadas) para los elementos mayoritarios componentes del agua tiende a ser más alto en estiaje que avenida; porque en avenida la precipitación de aguas meteóricas homogeniza los valores de concentración, que hace más clara una tendencia en los valores de los componentes mayoritarios, mientras que en estiaje está ligado más a procesos de interacción agua-roca, erosión-sedimentación, que se analizó en el capítulo IV. Los coeficientes de correlación Mg-SO<sub>4</sub>, Ca-SO<sub>4</sub>, Na-Cl, K-Cl y Ca-HCO<sub>3</sub> son 0.908, 0.978, 1.000 y 0.963, que determina las combinaciones químicas óptimas de la hidroquímica.

En las Figuras 5.23 y 5.24 respecto al espacio (microcuenca) se aprecia un valor de correlación más alto en la microcuenca Apurímac 1 que en la microcuenca Hornillos para los elementos mayoritarios. Este valor es ligeramente más alto en avenida que en estiaje, lo que puede indicar la condición posible de mayor aporte o carga química en la microcuenca Apurímac 1.

En las Figuras 5.25, 5.26 y 5.27, que muestran la concentración de elementos tóxicos, se puede observar que el comportamiento es ligeramente diferente en tiempo (temporadas) y en espacio (microcuenca), y despliega valores mayores de correlación multielemental para la temporada de avenida. Considerando un valor *cutoff* (corte hidrogeoquímico) de 0.75 para correlación alta, la concentración de As supera este *cutoff* con las variables Ce, B, Fe y Mn. Este valor de correlación en la microcuenca Apurímac 1 entre el As, B, Fe y Mn sugiere que el fenómeno de adsorción-desorción sobre oxi-hidróxidos de Fe, Mn genera la solubilización o captación de arsénico y/o boro, principalmente en la temporada de avenida.



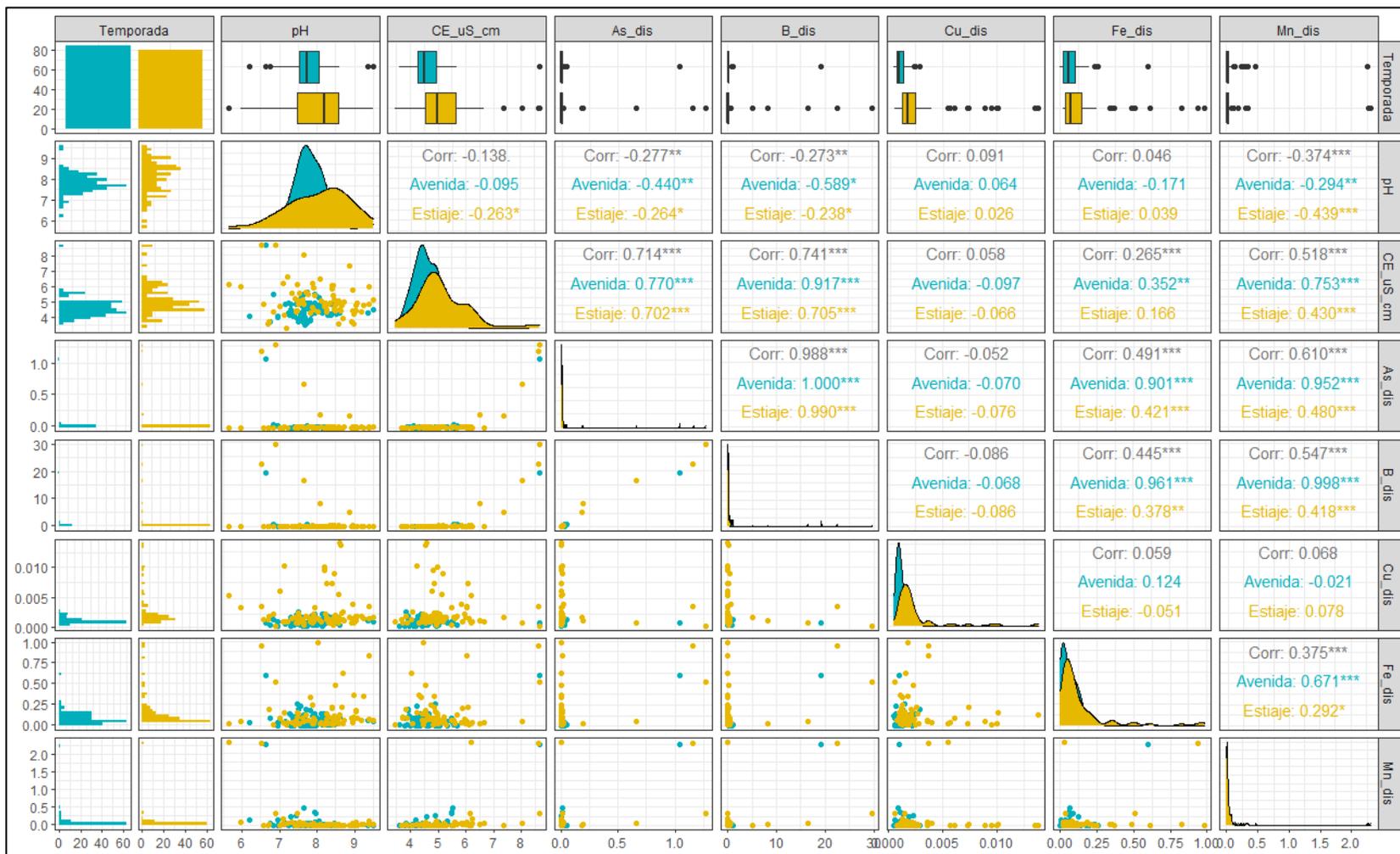
**Figura 5.22** Plot de correlación de elementos mayoritarios según temporada  
Fuente: Elaboración propia



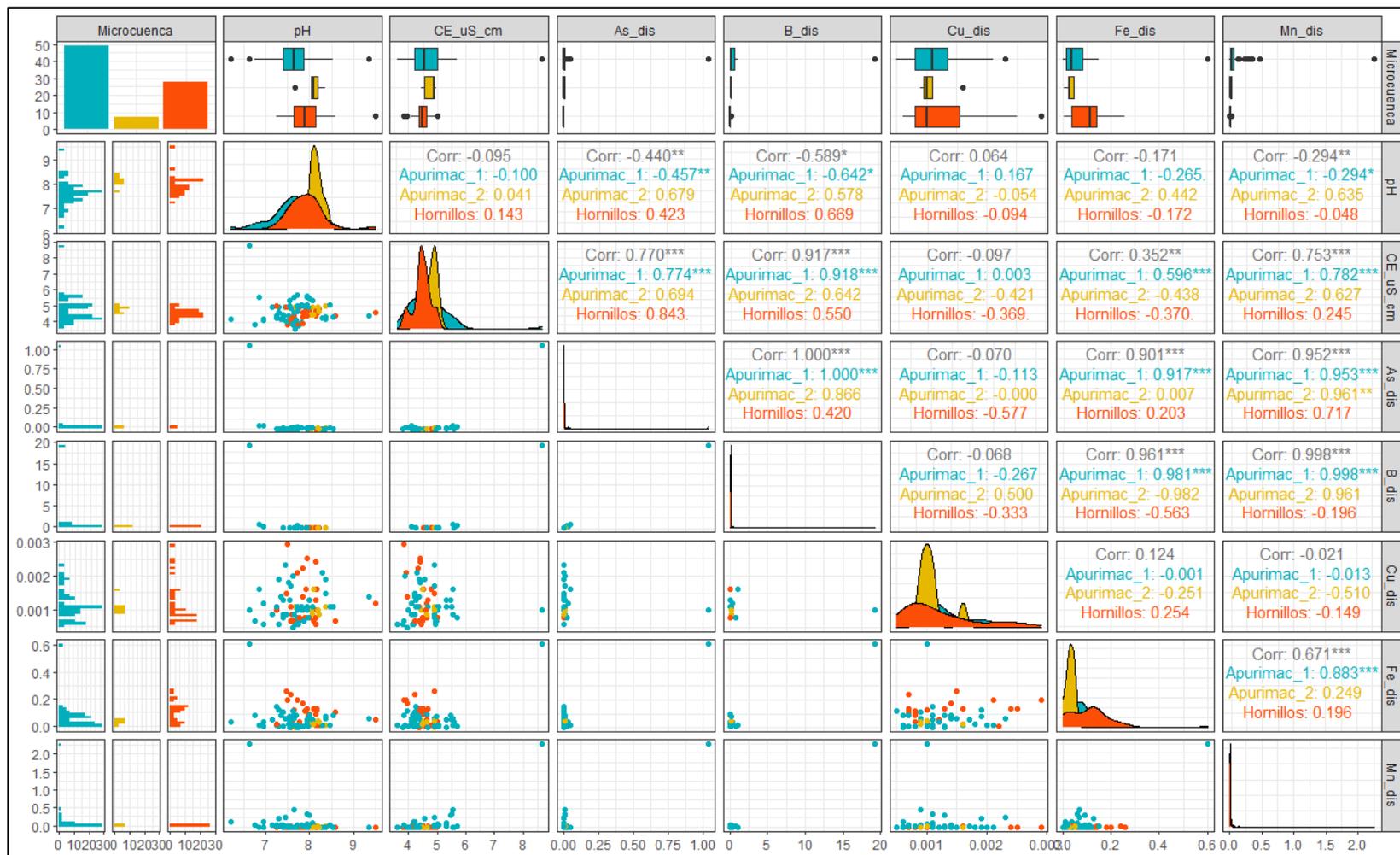
**Figura 5.23** Plot de correlación de elementos mayoritarios de avenida según distribución espacial (microcuenca)  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.24** Plot de correlación de elementos mayoritarios de estiaje según distribución espacial (microcuenca)  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.25** Plot de correlación de elementos potencialmente tóxicos según temporada  
**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 5.26** Plot de correlación de elementos potencialmente tóxicos de avenida según distribución espacial (microcuenca)  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.27** Plot de correlación de elementos potencialmente tóxicos de estiaje según distribución espacial (microcuenca)  
**Fuente:** Elaboración propia

### 5.3.2 Análisis de componentes principales (ACP)

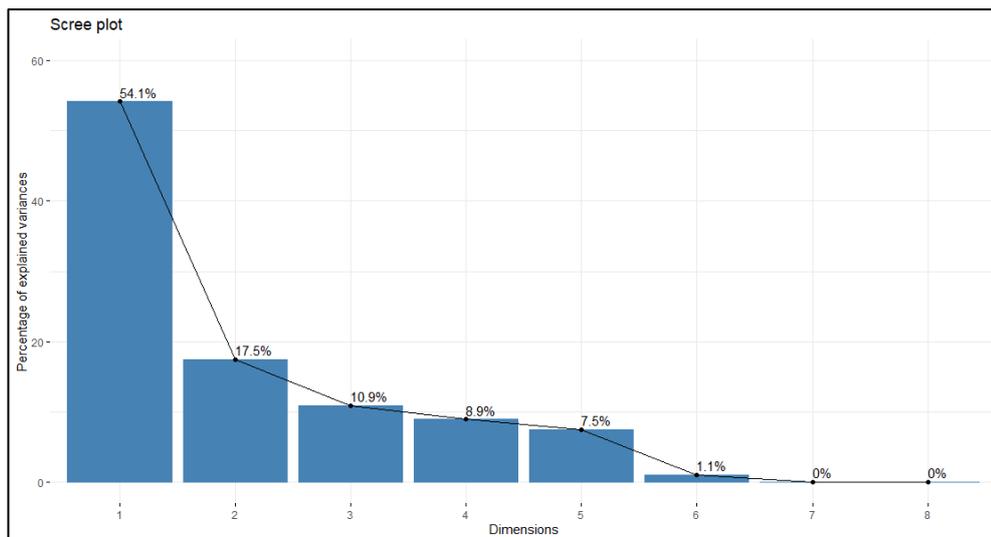
Después del análisis de correlaciones, se centró en el análisis de parámetros físico-químicos, porque dan a conocer de manera global el ambiente de los elementos disueltos en el agua; y analizar las relaciones con las unidades litoestratigráficas, por donde el agua circula. El análisis de parámetros físico-químicos se realiza mediante el Análisis de Componentes Principales (PCA) de las variables pH, CE, TDS, salinidad, resistividad, ORP y OD mostrando su relación con la variable factor unidad litoestratigráficas (formaciones o grupos). Es necesario mencionar que para estudios posteriores se debe complementar el análisis de aguas con estudios geoquímicos de sedimento-suelo en paralelo, con el fin de una comparación integral de factores.

El análisis PCA se basó en Härdle y Simar, (2015) y Kassambara, (2017). Se utilizó también el análisis de correlación de Pearson y el conocimiento de la distribución puntual de los valores por tiempo (temporada) de los parámetros físico-químicos, hidroquímicos y metales disueltos contaminantes (visto en el capítulo IV y V) de forma espacial. Con ello, se determina el comportamiento multivariable y tempo-espacial básico de la información hidrogeoquímica.

El PCA sirve para encontrar patrones escondidos en la data de variables numéricas, reducir la dimensionalidad de estas removiendo el ruido y la redundancia e identificar variables correlacionadas (Kassambara, 2017). Debido a la diferencia de escala en los parámetros físico-químicos, se previó realizar escalamiento (estandarización) de las variables para hacerlas comparables.

Lo primero que se analizó fueron los *eigenvalores* obtenidos al aplicar el algoritmo de PCA. La varianza explicada por el primer eigenvalor calculado es 54.12%

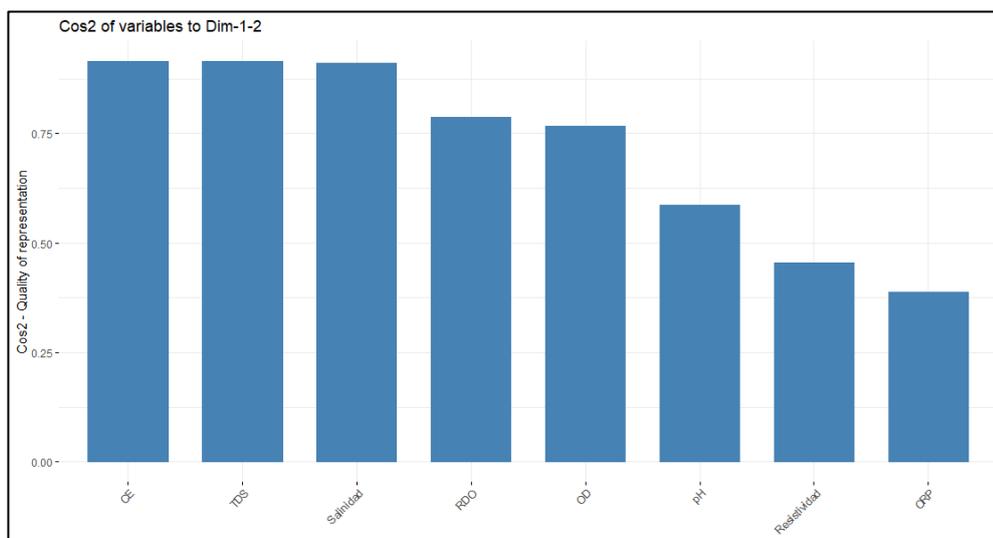
y el segundo 17.47%. Estos valores fueron tomados para el análisis de los componentes principales, lo que representa el 71.59% de la varianza total de la información físico-química (ver Figura 5.28). Según (Yeomans y Golder, 1982), un *eigenvalue* >1 indica un punto de corte para contener la dimensión.



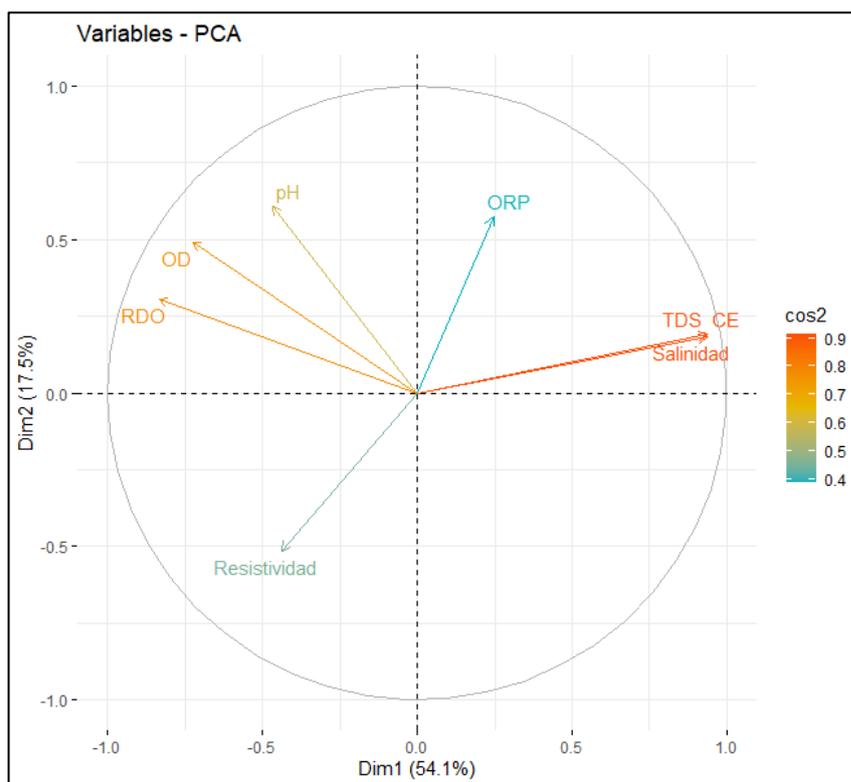
**Figura 5.28** Porcentaje de varianza explicada según los componentes principales  
Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de varianza explicada de las variables se mide con la calidad de representación del  $\text{Cos}^2$  (coseno cuadrado, coordenadas cuadradas), obsérvese que en la Figura 5.29 las variables salinidad, TDS, CE, RDO, OD, pH están bien representadas; sin embargo, ORP y resistividad disminuyen su representación.

La información se complementa con el *plot* de correlación, indica que las variables salinidad, TDS, CE están correlacionadas positivamente (agrupadas), ORP y resistividad están correlacionadas negativamente, y pH, OD, RDO tienen una correlación no fuerte positiva.

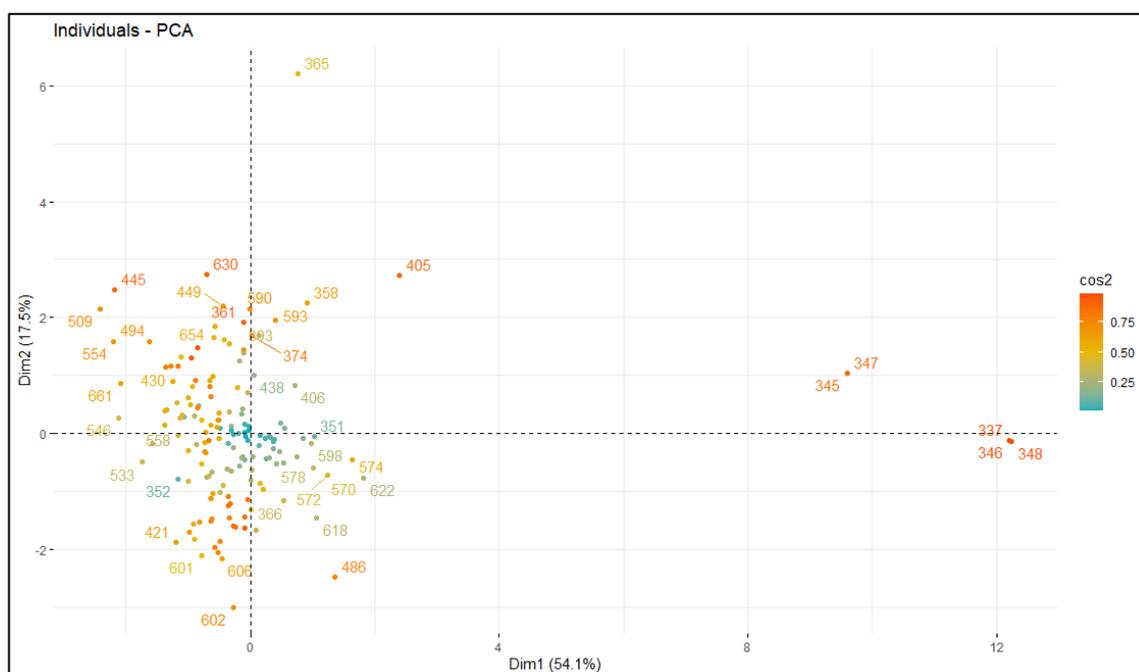


**Figura 5.29** Porcentaje de varianza explicada según los componentes principales  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.30** Círculo de correlaciones entre variables y principales componentes  
Fuente: Elaboración propia

De lo discutido en este ítem, se puede obtener que la representatividad de la proyección para el ORP no es significativa para las dimensiones 1 y 2, porque el ángulo de proyección es muy alto, por lo que no se analizará en el PCA *biplot*. Los valores de CE, TDS y salinidad se correlacionan altamente, por lo que solo se dejará la variable CE, que es considerada más representativa para el análisis. La variable RDO y OD también se correlacionan en alta medida, por lo que solo se tomará la variable OD. Adicionalmente, se realizó el *plot* de individuales del PCA para ver qué puntos se asocian al centro de las dimensiones en el estudio realizado. Aunque no es decisivo para la elección de las variables de análisis, da una idea de puntos anómalos proyectados.

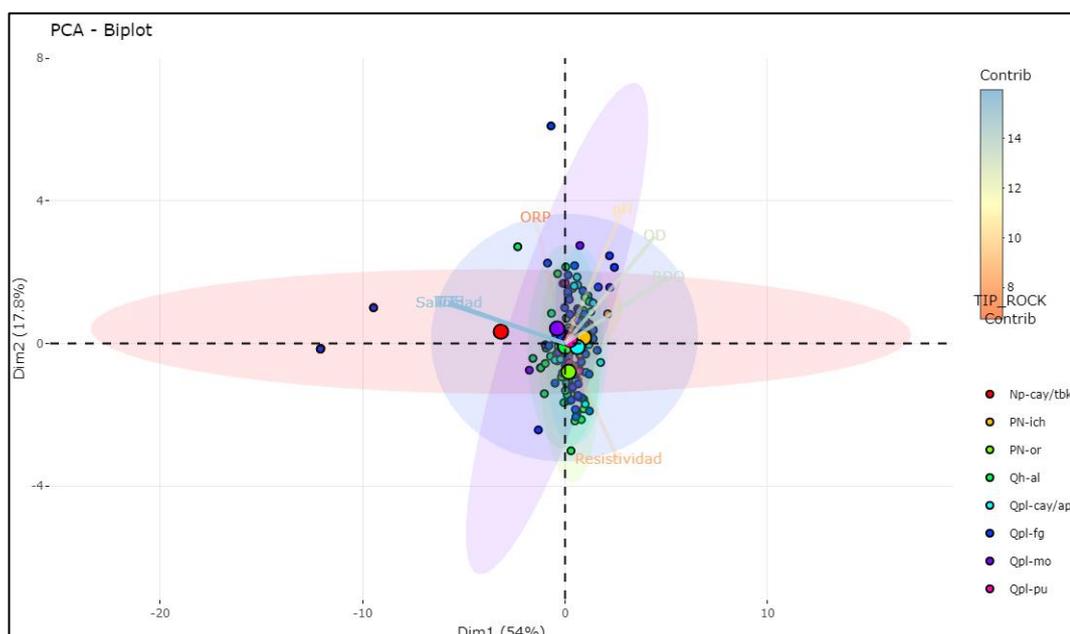


**Figura 5.31** Gráfico de calidad de individuales en los componentes principales  
Fuente: Elaboración propia

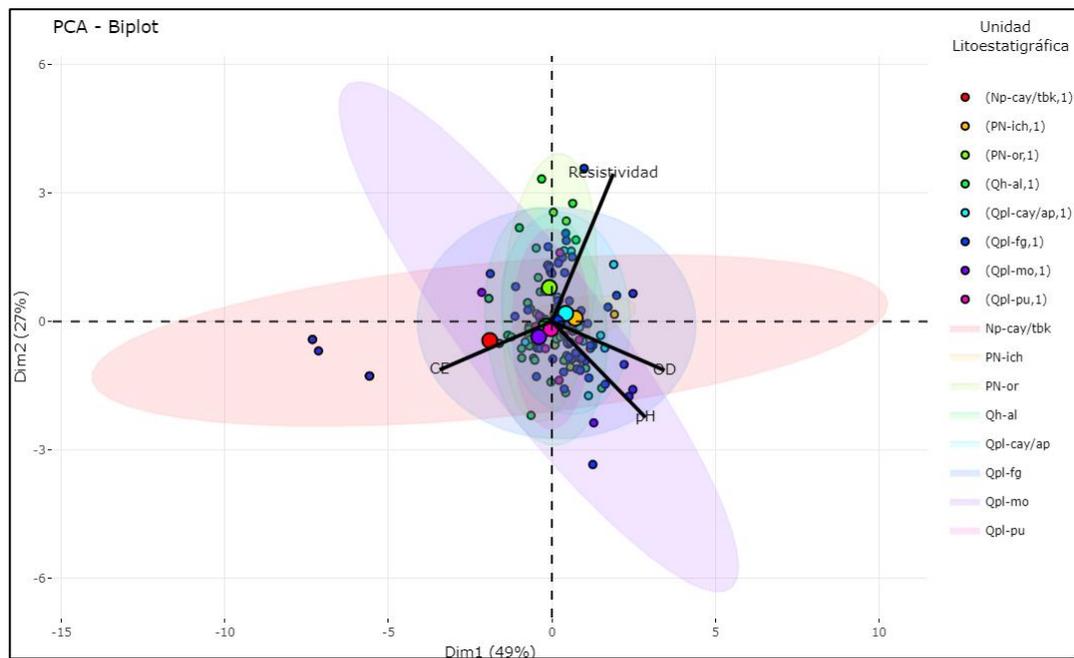
Para terminar con la interpretación, se usó el *biplot*, como parte principal para la dirección de la variable, pero no su posición absoluta. Además, sirvió para considerar que los individuales que están al mismo lado de una variable dada tienen

un valor alto para esta variable, mientras que los individuales en el lado opuesto tienen un bajo valor para esta variable.

El *biplot* del PCA para este caso representa las asociaciones que tienen las unidades litoestratigráficas con respecto a los parámetros físico-químicos en los cuales se consideró todas las variables (ver Figura 5.32). Sin embargo, en el análisis deben tomarse solo las que se consideraron representativas para los eigenvalores 1 y 2 (ver Figura 5.33). Adicionalmente, se determinó que al eliminar estas variables que no aportan al análisis PCA las dimensiones aumentan de 71.8% a 76.0% de variabilidad retenida por los eigenvalores. La Figura 5.34 y 5.35 muestran el PCA-biplot separado por unidad litoestratigráfica.

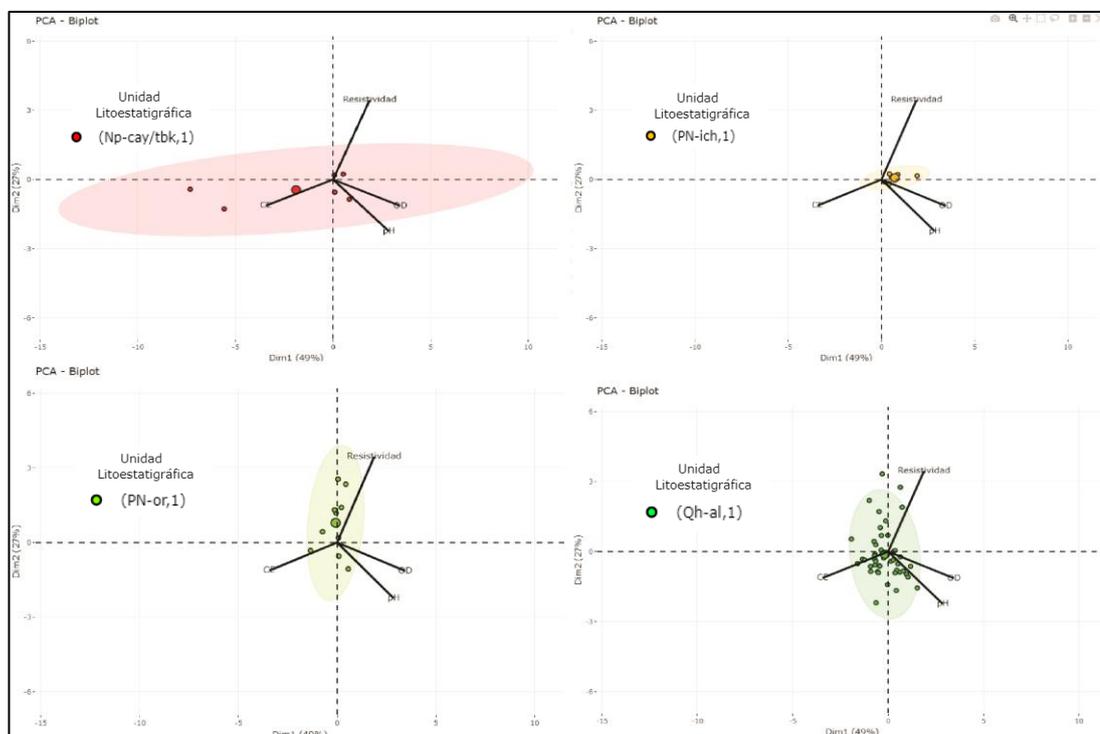


**Figura 5.32 PCA-biplot de totalidad de parámetros físico-químicos según unidad litoestratigráfico**  
Fuente: Elaboración propia



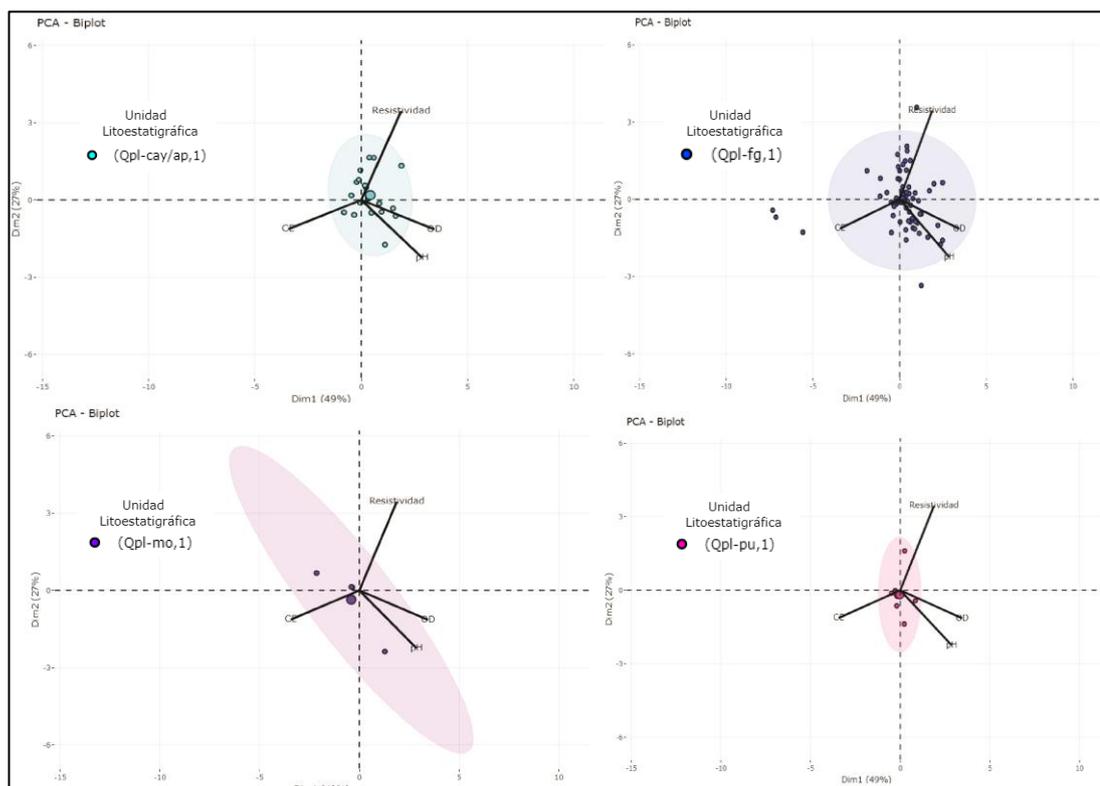
**Figura 5.33** PCA-biplot de parámetros físico-químicos representativos según unidad litoestratigráfica

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.34** PCA-biplot de parámetros físico-químicos representativos por unidad litoestratigráfica

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.35 PCA-biplot de parámetros físico-químicos representativos por unidad litoestratigráfica**  
**Fuente: Elaboración propia**

Como resultado del análisis de componentes principales, en la subcuenca Hornillos Alto las agrupaciones correspondientes a los clústeres detectados por el PCA, permitieron hallar que los parámetros físico-químicos se clusterizan en zonas de comportamiento químico correlacionado, es decir asociaciones químicas internas como las de los complejos volcánicos del Grupo Barroso. Además, de la detección intrínseca respecto a que los puntos han detectado asociaciones hidrogeológicas, los puntos de colores determinan un tipo de *cluster* importante en zonas de alta contaminación con valores alto de conductividad eléctrica y bajo pH (ver Figura 5.36).



## **CAPÍTULO VI**

### **INTEGRACIÓN DE RESULTADOS Y GENERACIÓN DE MAPA CLUSTERIZADO**

#### **6.1 Fuentes de origen contaminantes**

A la escala de trabajo se determinó que las fuentes contaminantes provienen principalmente de la Zona C y Zona B (ver Figura 6.1).

El arsénico tiende a aumentar de la Zona C a la B, y continúan los valores altos hacia la zona F. Valores altos de manganeso, zinc y aluminio priman en la Zona C.

Las fuentes contaminantes tienen dos tipos de origen: antropogénico y natural (principalmente zona D). Los factores principales son las zonas de alteración geológica (geológico) y zonas de minas (antropogénico). Estos factores se encuentran asociados geoespacialmente. Además, el tipo de facie característico es sulfatada cálcica (que son indicadores de actividad minera o zonas de alteración) ligado a una cantidad importante de estructuras falladas que cruzan cursos de escorrentía, que pueden condicionar estructuras de conexión entre los cursos de agua. Se debe tener en cuenta que las fuentes contaminantes se encuentran en el curso del río Apurímac, que en su parte principal presenta un caudal medio para avenida de 1956.52 l/s y para estiaje de 660.18 l/s. En contraste, el río Hornillos (“zona limpia”) presenta 5544.12 l/s en

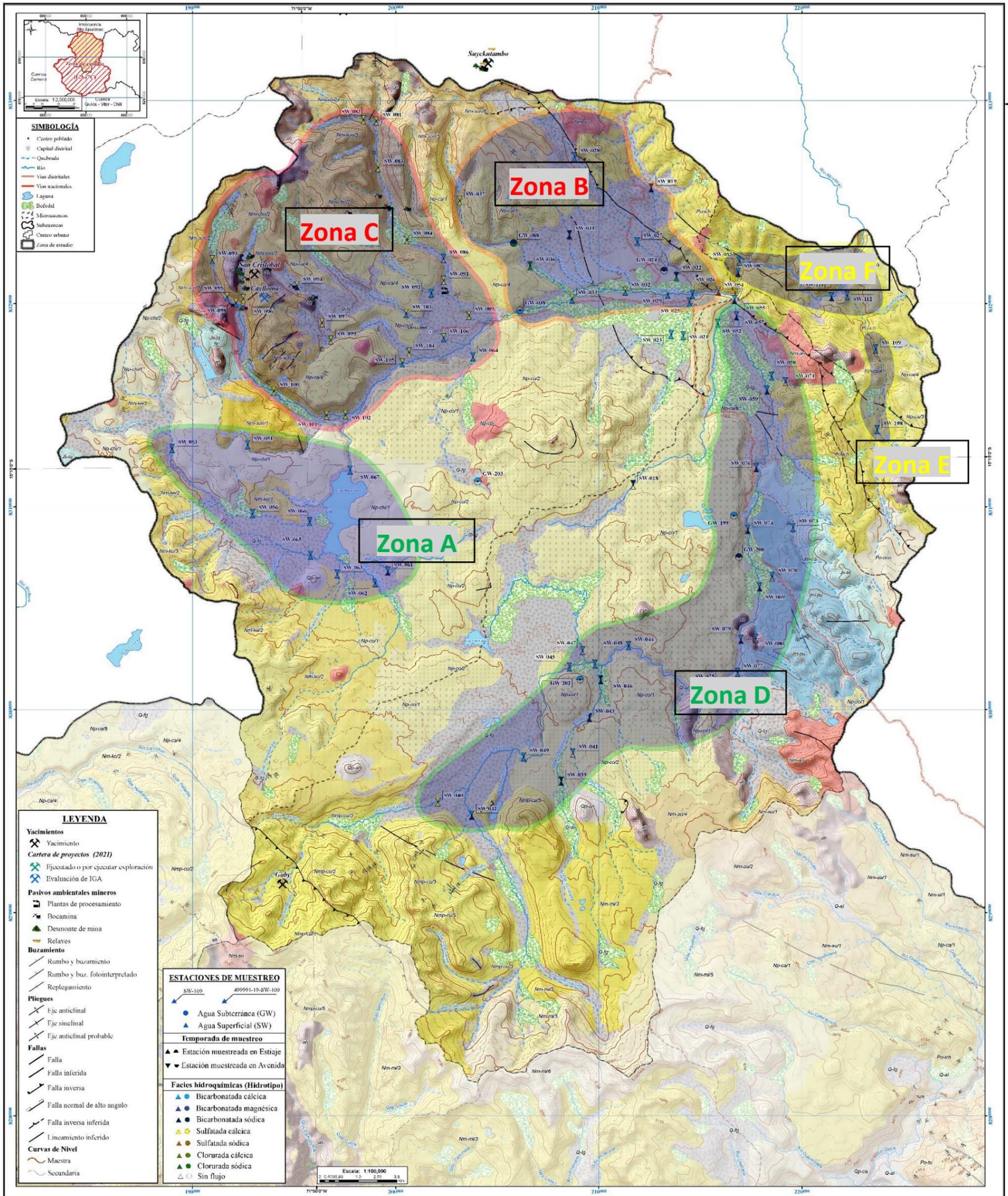
avenida y 948.24 l/s en estiaje. Se interpreta, además, que existen mayores procesos de sedimentación debido a menor velocidad de flujo en la microcuenca Apurímac 1 (Zona D y B), que generan acumulación o precipitación de algunos compuestos u elementos potencialmente contaminantes.

## **6.2 Generación de mapa geoambiental basado en comportamiento multivariable clusterizado**

Al integrar toda la información obtenida por el estudio, se desarrolló un mapa (ver Figura 6.1) de comportamiento multivariable clusterizado por zona (hidroquímica, parámetros físico-químicos, ECA, HQ, geología, pasivos mineros y estructural). Se determinaron tres tipos de zonas (aptas: zonas A y D, intermedias: zonas E y F e no aptas: C y B).

La microcuenca Hornillos, con aguas predominantemente bicarbonatadas y ubicada en la zona D, es una zona propicia para el uso de agua para agricultura y bebida de animales. Aunque se deben tomar pequeñas consideraciones respecto a algunos valores altos de pH, Al, As, Cu, Fe y Pb, ninguno de estos supera el ECA ni está cerca de superarlo. En la microcuenca Apurímac 1, de aguas predominantemente sulfatadas, se debe considerar que la Zona A es propicia para el uso de agua para la agricultura y bebida de animales. Aunque también deben tomarse pequeñas consideraciones respecto a algunos valores alto de pH, Al, Fe y Pb, aunque ninguno de estos supera el ECA ni está cerca de superarlo. La Zona C, que es parte de la microcuenca Apurímac 1, donde se encuentra la actividad minera, alto fallamiento, pasivos ambientales y zonas de alteración geológica, no es considera apta para uso de agua de agricultura ni bebida de animales debido a que supera HQ, ECA o se encuentran valores muy altos de concentración en multielementos y medidas de parámetros físico-químicos. La

Zona D, que es parte de la microcuenca Apurímac 1, que se encuentra asociada a fallamientos inversos por flancos y mayor cantidad de fuentes termales que son principales modificadores de los valores de concentraciones y parámetros físico-químicos, debe ser considerada para uso de agua de riego y bebida de animales en zonas puntuales lejanas de los puntos detectados que superan HQ, ECA o tienen valores de concentración o parámetros cercanos a superarlos y se encuentran asociados a fuentes termales.



## **CAPÍTULO VII**

### **PROPUESTA INGENIERIL**

Se ha identificado las zonas de procedencia predominante de material contaminante que afecta la calidad de agua en la Subcuenca Hornillas Alto, de modo que las soluciones planteadas se basan en acciones ingenieriles a tomar de acuerdo con el problema identificado en la zona. En la Figura 6.1 se observa que existen dos zonas (C y B) donde se deben generar herramientas para el tratamiento y gestión de la calidad del recurso hídrico, priorizando la Zona C, como factor de nivel de baja calidad de agua y altas concentraciones de contaminantes, y la Zona B como factor de baja calidad de agua y de medianos a altos valores de concentración de contaminantes.

#### **7.1 Soluciones ingenieriles**

Para mejorar la calidad del recurso hídrico se debe pasar a una etapa de análisis y ejecución de procesos para la identificación a una escala detallada (1:1000) la procedencia de los contaminantes con sus respectivas acciones de remediación, que permitirá solucionar el problema de la mala calidad de agua y altas concentraciones de contaminantes en las Zonas B y C, generando grandes beneficios a las personas y empresas que se ubican en la zona de estudio. Las soluciones ingenieriles siguiendo el orden de ejecución son las siguientes:

### **Determinación de la carga contaminante**

La determinación de la carga contaminante está orientada a la mitigación, reducción y control de la contaminación a nivel de cuenca, subcuenca y zonas de carga del contaminante. Se debe realizar un proceso de mediciones de caudales en las Zonas C y D en todas las quebradas y ríos principales, para calcular la carga contaminante por medio de una operación matemática multiplicativa entre concentración de metales totales en mg/l y caudal determinado en m<sup>3</sup>/s. El cálculo de carga contaminante es el primer paso para determinar las zonas exactas de acumulación, con el fin de seguir el proceso de remediación, el análisis de trazadores isotópicos.

### **Análisis de Trazadores Isotópicos**

Los isótopos estables en conjunto con los datos químicos del agua permiten determinar orígenes y génesis de aguas y sus solutos, adicionalmente analizar los flujos, transporte y mezcla de aguas y solutos, además de analizar reacciones redox bajo diferentes condiciones ambientales y otros procesos que fraccionan los isótopos.

Los análisis de trazadores isotópicos en la aplicación ingenieril permiten deducir las unidades geológicas e hidrogeológicas que influyen en el agua, además del tiempo medio de residencia en los acuíferos sumado a la procedencia de solutos/contaminantes (naturales o antropogénicos), reacciones redox y los procesos complejos que influyen en la calidad del agua.

En la zona este análisis posterior a la determinación de carga contaminante (que determinó zonas de estudio mediante trazadores) permitirá identificar las zonas de exactas de procedencia de la carga contaminante que modifica la calidad del agua hallada para las zonas C y D, además de realizar el reajuste de los valores de carga contaminante con un nivel de precisión a escala de detalle ingenieril.

### **Sistemas de remediación mediante Nanoabsorbentes**

Finalmente con las estaciones ubicadas de procedencia del contaminante en las Zonas C y D, se plantan los sistemas de remediación mediante Nanoabsorbentes, tecnologías que permiten remover los contaminantes desde el agua o residuos de aguas, esta técnica se basa en un proceso de bajo costo de captura de los contaminantes tanto orgánicos como de los inorgánicos (los metales pesados que superan los estándares de calidad y la concentración de elementos tóxicos determinados en las Zonas C y D) mediante un proceso de nanoabsorbentes que separan y decantan estos materiales manteniendo el agua en la parte superior del contenedor limpia. Para este proceso la propuesta se basa en instalar contenedores con sistema de funcionamiento completo que capten el agua de las estaciones detectadas con procedencia de contaminantes, realicen el proceso de captura con Nanoabsorbentes y luego, regresen el agua descontaminada a las zonas de corriente natural (quebradas o ríos), con lo cual se logra el proceso de remediación de manera eficaz y eficiente en la zona de estudio.

Finalmente, para mitigar los impactos agrícolas en la calidad del agua (que escapan de un control del sistema hídrico en la cuenca) debido a intensificación agrícola, los programas de conservación y manejo de nutrientes abordan las fuentes de fósforo (tasa, método y aplicación de fosfatos) y los controles de transporte (labranza de conservación, arado en contorno y zonas de amortiguamiento ribereñas), los programas deben ser implementados en las Zonas C y D. Los controles de transporte han acelerado el almacenamiento de fosfatos heredado en los lugares agrícolas, por ende, reducen la concentración de contaminante en las Zona C y D. De manera perenne, los controles de transporte, al acumular el fosfato heredado, pueden contrarrestar las mejoras de calidad del agua de los controles de las fuentes

provenientes de lugares agrícola, es necesario un mayor énfasis para explotar las reservas existentes de fosfatos del suelo y reducir el fosfato heredado mediante el uso más eficiente de fosfato ya almacenado en los sistemas agrícolas.

**Tabla 7.1**  
*Costos de contenedores de nanoabsorbentes*

Productos Necesarios	Costos
Contenedor de nanoabsorbentes	\$10000
Instalación	\$2000
Insumos diarios (10m <sup>3</sup> /s)	\$10
Mantenimiento anual	\$4000

*Fuente: Elaboración propia*

## CONCLUSIONES

- Debido a la ubicación de la zona, la accesibilidad a diferentes puntos de muestreo fue complicada, sumado al tipo de clima clasificado como zona fría de clima semifrío lluvioso húmedo condicionantes de la hidrografía. Adicionalmente, el análisis de información se debe desarrollar de manera univariante y multivariable, tanto numérica como gráficamente, usando técnicas referenciadas y desarrolladas en esta tesis (estadísticas descriptivas, hidroquímicas, correlaciones, análisis de componentes principales de variables geológicas) asociando factores de espacio y tiempo para generar interpretaciones con mayor confiabilidad y precisión.
- La geología muestra una predominancia netamente volcánica siendo modificador directo del recurso hídrico superficial, caracterizado en el Grupo Barroso con la marca hidrogeoquímica más importante que genera variaciones geoquímicas en la Subcuenca Hornillos Alto.
- Se identificó que las distribuciones de las variables de parámetros físico-químicos y concentraciones de elementos químicos en las aguas son lognormal (en su mayoría). Esta distribución se debe a que los fenómenos geohidrológicos no están en la naturaleza en equilibrio perpetuo debido a la acción de factores geológicos o antrópicos determinados. La lognormalidad permitió un análisis más preciso de las estadísticas de centralización, forma y dispersión; además de aportar al desarrollo de inferencias geomatemáticas. Los *outliers* y *faroutliers*

son valores existentes que no deben ser eliminados de la información para su análisis y modelamiento.

- Los valores pH superan ECA en toda la subcuenca y en todas las microcuencas analizadas. Esto se debe a que en la zona predominan las rocas andesíticas que tienen característica básica de los complejos volcánicos. Estos son mayoría en toda la subcuenca, y por la erosión hídrica de roca, en general, tienden a aumentar los valores de pH. Además, podrían influir los procesos de neutralización de pasivos ambientales por influencia humana que, al adicionar cal, basifican el agua (en algunas zonas se determinó este evento).
- El proyecto minero Gaby no supera los ECA ni posee valores anómalos en elementos metálicos según los puntos determinados en el estudio.
- Los puntos SW-019, SW-022, SW-036, SW-096, SW-097, SW-100, SW-101, SW-102 y SW-106, además de superar los ECA en alguna temporada, presentan los niveles más altos de consideraciones multivariadas y se encuentran todos en la microcuenca Apurímac 1, exceptuando las aguas subterráneas (GW-024, GW-088). Por ello, esta zona es considerada como origen de fuentes contaminantes debido a la existencia de alteraciones geológicas, zonas de alto fallamiento, pasivos ambientales y minas abandonadas y activas.
- El análisis de componentes principales (PCA) determina las asociaciones intrínsecas que posee los parámetros físico-químicos con los factores geológicos (Formaciones geológicas) con lo cual es factible hallar asociaciones

geoespaciales de interrelación o clusterización de variables analizadas.

- Las zonas identificadas para desarrollo de agricultura en cuanto a la calidad de agua para su uso están de forma predominante en la microcuenca Hornillos (Zona D) y la parte alta de la microcuenca Apurímac (Zona A). Estas no superan los ECA, HQ. Geoespacial y estadísticamente, los valores en el análisis multivariable son de moderados a bajos y los factores de balance geológico no están asociados a zonas de alteración detectadas ni estructuras con alto fallamiento, minas cercanas o pasivos ambientales.
- La propuesta ingenieril desarrollada es eficiente y eficaz, en función a las zonas identificadas, la propuesta ingenieril consiste en un conjunto de estudios por etapas sobre la determinación de la carga contaminante, análisis de trazadores isotópicos y el sistema de remediación mediante nanoabsorbentes. El costo anual de un contenedor puesto en una zona contaminante para un caudal de  $10\text{m}^3/\text{s}$  es aproximadamente 19 600 dólares americanos.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer estudios específicos en las zonas C y B, donde se ha determinado contaminación antrópica y/o geológica. Se deben tomar puntos para monitoreo constante, muestra de isótopos para determinar la procedencia de aguas (con mayor precisión), muestras de roca y suelo para hacer comparaciones geoquímicas para definir claramente la procedencia del contaminante.
- Se recomienda aplicar técnicas de correlación para realizar comparaciones múltiples como correlación de Spearman o Kendal y realizar un PCA robusto, FAMD (*Factor Analysis Mixed Data*) o técnicas para determinar patrones con aprendizaje no supervisado usando *Machine Learning* y redes neuronales artificiales para comparar con lo realizado (se requiere más puntos de muestreo).
- Se debe tomar en cuenta, que los análisis de agua pueden llevar a identificar los *threshold* y encontrar anomalías que, asociadas a análisis de sedimentos, son guías para la exploración de yacimientos minerales
- Se recomienda una mayor toma de muestras en zonas C y D donde existe alteración geológica, fallamiento, minas, pasivos, entre otros, para determinar la procedencia a menor escala que caracteriza las fuentes del recurso hídrico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Becerra, I., Cueva, E., Iquipaza, E., Sánchez, E., Soaña, J. y Trinidad, I. (2021). Litogeoquímica de la subcuenca Vilcabamba. *INGEMMET, Boletín, Serie N: Línea de base Geoambiental*, 5, 100 p.
- Benavides, V. (1962). Estratigrafía pre-terciaria de la región de Arequipa. *Sociedad Geológica del Perú. Boletín N°38*, pp 5 – 63.
- Caldas, J. (1993). Geología de los cuadrángulos de Huambo y Orcopampa. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima: *INGEMMET. Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional N°46*, 62 p.
- Carbonero, M., Ramírez, J., Hervás, C., y Ortiz, D. (2005). Estimadores robustos de estadísticos de posición. Presentado en el *III Taller Nacional de Minería de Datos y Aprendizaje, TAMIDA2005*. 14 al 16 de septiembre de 2005. Granada, España. 7 p.
- Ccancapa, A., Paredes, B., Vera, C., Chavez, F., Olson, E., Welp, L., Zyaykina, N., Filley, T., Warsinger, D. & Jafvert, C. (2021). Occurrence and probabilistic health risk assessment (PRA) of dissolved metals in surface water sources in Southern Peru. En *Environmental Advances*, 5, 100102.
- Custodio, E. y Llamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea*. Omega, 2350 pp.
- Dávila, D. (1988). Geología del cuadrángulo de Cailloma, hoja 31s. Lima: *INGEMMET. Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional N°40*, 93 p.
- Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM [Ministerio de Ambiente]. (7 de junio de 2017). Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y Disposiciones Complementarias.

- Ramalle-Gómara, E. y De Llano, J. (2003). Utilización de métodos robustos en la estadística. *Atención Primaria*, 177-182.
- EPA QA/G-9S. (2006). Data Quality Assessment: Statical Methods for Practitioners USA, Washington: EPA.
- Gibbs, R. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, N°170(3962), 1088-1090.
- Güler, C., McCray, J., Thyne D. & Turner, A. (2002). Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 455-474.
- Härdle, W., & Simar, L. (2015). Canonical correlation analysis. En *Applied multivariate statistical analysis* (pp. 443-454).
- Hesel, D. & Hirsch, R. (2012). Statistical Methods in Water Resources. *United States: USGS*. <https://doi.org/10.3133/tm4a3>.
- INGEMMET (2019). *Memoria Anual 2019*. Recuperado de <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2737>
- Iqbal, J., Saleem, M. & Shah, M. (2014). Dissolved concentrations, sources, and risk evaluation of selected metals in surface water from mangla lake, Pakistan. *The Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/948396>.
- Jenks, W. (1948). Geología de la hoja de Arequipa al 200 000. *Instituto Geológico del Perú. Bol. N°9*.
- Kacmaz, H. (2020). Assessment of heavy metal contamination in natural waters of Derehi, Giresun: an area containing mineral deposits in northeastern Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, N°192(2), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-8057-0>.

- Kassambara, A. (2017). *Practical guide to cluster analysis in R: Unsupervised machine learning* (Vol. 1). STHDA.
- Martínez, P., Martínez, P. y Castaño, S. (2006). *Fundamentos de hidrogeología*. Madrid: Ediciones Mundi Prensa, 284 p.
- Ministerio de Energía y Minas. (19 de abril de 2020). Comunicado 004-2020 Lima, Perú.
- Newell, N. (1949). *Geology of the Lake Titicaca region, Peru and Bolivia*. Boulder, Colorado: Geological Society of America. Memoir N°36, pp 111.
- Ng, W., Peña, F. y Sulca, P. (2012). Hidrogeoquímica de aguas subterráneas en la cuenca del río Ilo-Moquegua. En: Congreso Peruano de Geología, 16, Lima, 2012. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú, 6 p.
- Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina. (21 de agosto de 2018). Proyecto: Proyecto Minero Mayra, Compañía minera Buenaventura. [https://mapa.conflictosmineros.net/ocmal\\_db-v2/documento/view/2824](https://mapa.conflictosmineros.net/ocmal_db-v2/documento/view/2824)
- Pari, W., Peña, F., Rosado, M., Vílchez, M. y Zavala, B. (2014). Estudio geoambiental en la cuenca del río Colca. Lima: *INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 57, 222 p.
- Penn, D. (1976). *Quantitative chemical analysis by ESCA. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 9(1), 29-40.
- Poehls, D. & Smith, G. (Eds.). (2011). *Encyclopedic dictionary of hydrogeology*. Academic press.
- Pulido, A. (2007). *Nociones de hidrogeología para ambientólogos*. Universidad de Almería.

Quispesivana, L. y Navarro, P. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Caravelí (32p), Chuquibamba (32q), Chivay (32s), Cailloma (31s), Vellille (30s), Livitaca (29s) y Pacapausa (30p) a escala 1: 100 000*. Lima: INGEMMET, 48 p.

Resolución Jefatural N° R.J. 270-2017-ANA [Autoridad Nacional del Agua]. (7 de noviembre de 2017) Proyecto de "Clasificación de los Cuerpos de Agua Continentales Superficiales".

Rumbo Minero. (11 de septiembre de 2018). Buenaventura iniciaría primera campaña de exploración en Gaby.

<https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/buenaventura-iniciaria-primera-campana-de-exploracion-en-gaby/>

SENAMHI. (2020). Datos/Datos Hidrometeorológicos.

<https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>

Şen, Z. (2015). *Practical and Applied Hydrogeology*. Turkey, Istanbul: Elsevier.

Tukey, J. (1962). *The Future of Data Analysis*. The annals of mathematical statistics, 67p.

Wilson, J. y García, W. (1962). Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca (Hojas 36-v y 36-x). Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima: *INGEMMET. Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional N°4*, 82 p.

Yeomans, K. & Golder, P. (1982). *The Guttman-Kaiser criterion as a predictor of the number of common factors*. The Statistician, 221-229 p.