

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**COMPORTAMIENTO GEOHIDROLÓGICO DE LAS
LITOMORFOESTRUCTURAS EN LA SUBCUENCA EL RONQUILLO,
CAJAMARCA - PERÚ**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Geólogo

AUTOR:

Bach. Crisólogo Huamán Talía Julissa

ASESOR:

Dr. Rodríguez Cruzado Segundo Reinaldo

Cajamarca, Perú

2026

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. **Investigador:** Talía Julissa Crisólogo Huamán

DNI: 72886797

Escuela Profesional: Ingeniería Geológica

2. **Asesor:** Dr. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado

Facultad: Ingeniería

3. **Grado académico o título profesional**

☐ Bachiller

☒ Título profesional

☐ Segunda especialidad

☐ Maestro

☐ Doctor

4. **Tipo de Investigación:**

☒ Tesis

☐ Trabajo de investigación

☐ Trabajo de suficiencia profesional

☐ Trabajo académico

5. **Título de Trabajo de Investigación:**

**COMPORTAMIENTO GEOHIDROLÓGICO DE LAS LITOMORFOESTRUCTURAS EN LA SUBCUENCA EL
RONQUILLO, CAJAMARCA – PERÚ**

6. **Fecha de evaluación:** Febrero 05, 2026

7. **Software antiplagio:**

☒ TURNITIN

☐ URKUND (OURIGINAL) (*)

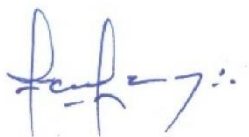
8. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 3%

9. **Código Documento:** trn:oid:::3117:553538441

1. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**

☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: Febrero 06 de 2026



FIRMA DEL ASESOR

Nombres y Apellidos: Dr. Segundo Reinaldo
Rodríguez Cruzado

DNI: 26722961



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258801 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 06/02/2026 11:46:07-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

ACTA N° 0091-2026

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Art. 035 del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, da a conocer que, a los **trece días del mes de marzo de 2026**, siendo las diez horas (10:00 a.m.) en Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Secretario : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **COMPORTAMIENTO GEOHIDROLÓGICO DE LAS LITOMORFOESTRUCTURAS EN LA SUBCUENCA EL RONQUILLO, CAJAMARCA - PERÚ**, presentado por la Bachiller en Ingeniería Geológica **TALÍA JULISSA CRISÓLOGO HUAMÁN**, asesorado por el Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron a la sustentante, debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 05.00 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11.00 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 16.00 PTS. *Dieciséis* (En letras)

En consecuencia, se la declara *APROBADA* con el calificativo de *Dieciséis* acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las *11.00 a.m.* horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Presidente

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Vocal

M. Cs. Roberto Severino Gonzales Yana.
Secretario

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Asesor

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Nacional de Cajamarca, a mi preciada Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica, a mis docentes por su enseñanza durante estos años.

También agradezco a Dios por la fortaleza y perseverancia que me permitió culminar esta investigación; a mi asesor el Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado, por su orientación y apoyo académico durante el desarrollo de la investigación.

Agradezco a mi familia, por su respaldo constante y comprensión; y a todas las personas e instituciones que, directa o indirectamente, contribuyeron con información, apoyo técnico y motivación para hacer esto posible.

T.J. Crisólogo H.

DEDICATORIA

A las personas más importantes de mi vida, y a mí misma, por la constancia, fortaleza para seguir adelante, por creer que el esfuerzo y la disciplina siempre abren caminos.

A mi familia y asesor, por su apoyo incondicional, su paciencia, que fueron un pilar fundamental para alcanzar este objetivo. Este logro también les pertenece.

T.J. Crisólogo H.

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xii
ÍNDICE DE FOTOS.....	xiii
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1.	ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	4
2.1.1.	Antecedentes Internacionales	4
2.1.2.	Antecedentes Nacionales	5
2.1.3.	Antecedentes Locales.....	6
2.2.	BASES TEÓRICAS.....	6
2.2.1.	Sensoramiento Remoto	6
2.2.2.	Litomorfoestructuras	8
2.2.3.	Unidades Morfogenéticas	13
2.2.4.	Unidades Hidrográficas	15
2.2.5.	Ciclo Hidrológico.....	17
2.2.6.	Balance Hidrológico.....	19

	Pág.
2.2.7. Geohidrología	21
2.2.8. Parámetros Hidráulicos del Acuífero	24
2.2.9. Interacción Acuífero – Manantial	30
2.2.10. Estimación de la Recarga	37
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	39

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. GENERALIDADES	41
3.1.1. Ubicación Geográfica.....	41
3.1.2. Ubicación Política.....	41
3.1.3. Accesibilidad	42
3.1.4. Clima y Vegetación	42
3.4. PROCEDIMIENTOS	44
3.4.1. Metodología	44
3.4.2. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	45
3.4.3. Equipos y Materiales	46
3.4.4. Softwares	47
3.5. LITOMORFOESTRUCTURAS	48
3.5.1. Estratigrafía	48
3.5.2. Geoestructuras	68
3.6. UNIDADES MORFOGENÉTICAS	76
3.6.1. Planicies.....	76
3.6.2. Lomadas.....	76
3.6.3. Laderas	77
3.6.4. Escarpas	77

	Pág.
3.7. UNIDADES HIDROGRÁFICAS	78
3.7.1. Subcuenca El Ronquillo.....	78
3.7.2. Parámetros Geomorfológicos	78
3.7.3. Red de Drenaje	81
3.7.4. Microcuencas	83
3.8. HIDROLOGÍA	84
3.8.1. Meteorología y Precipitación	84
3.8.2. Transposición y Estadística de Datos de Precipitaciones	92
3.8.2. Escurrimiento e Infiltración	102
3.8.3. Balance Hidrológico	105
3.9. GEOHIDROLOGÍA.....	109
3.9.1. Unidades Geohidrológicas	109
3.9.2. Contexto Estructural	115
3.9.3. Sistema Kárstico	117
3.9.4. Parámetros Fisicoquímicos en Fuentes de Agua	119
3.9.5. Estimación de la Recarga Método de APLIS	129

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. INTERACCIÓN ACUÍFERO-MANANTIAL	135
4.1.1. Unidades Geohidrológicas y Control Estructural	135
4.1.2. Fisicoquímica de Aguas Subterráneas	139
4.1.3. Sistemas Subterráneos.....	141
4.2. RECARGA Y DESCARGA DEL SISTEMA SUBTERRÁNEO	145
4.3. COMPORTAMIENTO GEOHIDROLÓGICO	148
4.4. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	155

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES.....	156
5.2. RECOMENDACIONES	157
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158

ANEXO 01	162
-----------------------	------------

Registro Fotográfico de Fuentes de Agua Subterránea

ANEXO 02	163
-----------------------	------------

Estaciones de Caracterización de Discontinuidades

ANEXO 03	164
-----------------------	------------

PLANOS

PLANO 01:	Mapa de Ubicación
PLANO 02:	Imagen Satelital
PLANO 03:	Modelo Digital de Elevaciones
PLANO 04:	Unidades Morfogenéticas
PLANO 05:	Unidades Hidrográficas
PLANO 06:	Geomorfológico Altitudinal
PLANO 07:	Geológico Estructural
PLANO 08:	Geológico Estereográfico
PLANO 09:	Inventario de Fuentes de Agua Superficial
PLANO 10:	Inventario de Fuentes de Agua Subterránea
PLANO 11:	Estimación de la Recarga por el Método de APLIS
PLANO 12:	Conductividad Eléctrica (CE) en Manantiales
PLANO 13:	Potencial Hidrógeno (pH) en Manantiales
PLANO 14:	Comparación de Caudales en Épocas Seca y Húmeda
PLANO 15:	Flujo de Agua Subterránea Inferido

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

APLIS	:	Altitud, Pendiente, Litología, Infiltración y Suelo.
ANA	:	Autoridad Nacional del Agua.
BFI	:	Base Flow Index (Índice de flujo base).
CE	:	Conductividad Eléctrica.
pH	:	Potencial Hidrógeno.
TDS	:	Total de Sólidos Disueltos.
ORP	:	Potencial de Oxidación-Reducción.
K	:	Conductividad Hidráulica.
PP	:	Precipitación
MMC	:	Millones de Metros Cúbicos.
Dd	:	Densidad de Drenaje.
Ff	:	Factor de Forma.
Kc	:	Coeficiente de Compacidad.
L/s	:	Litros por segundo.
mm/año	:	Milímetros por año.

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de Unidades Morfogenéticas.	14
Tabla 2. Parámetros Geomorfológicos Básicos y Fundamentales	16
Tabla 3. Clasificación de Cuencas, Subcuencas y	17
Tabla 4. Rangos de valores Porosidad para diferentes tipos de suelo y roca.....	26
Tabla 5. Clasificación de formaciones geológicas según su función hidráulica y permeabilidad.....	28
Tabla 6. Rangos de permeabilidad o conductividad hidráulica en rocas fracturadas / intemperizadas.	29
Tabla 7. Límites de entorno de la zona de investigación.	41
Tabla 8. Clasificación metodológica según el tipo de investigación.....	44
Tabla 9. Principales equipos y materiales utilizados en la investigación.	46
Tabla 10. Unidades Geocronológicas de la Subcuenca el Ronquillo.....	49
Tabla 11. Parámetros Geomorfológicos Básicos y Fundamentales de la Subcuenca El Ronquillo.	79
Tabla 12. Áreas de Microcuencas en la Subcuenca el Ronquillo.	83
Tabla 13. Estaciones Meteorológicas Regionales y Locales.	84
Tabla 14. Cálculo del factor de transposición de precipitaciones en la Subcuenca el Ronquillo.....	93
Tabla 15. Transposición y análisis estadístico de datos de precipitación a la Subcuenca el Ronquillo.	94
Tabla 16. Balance Hidrológico en el periodo (1934-2025) de la Subcuenca el Ronquillo.....	106
Tabla 17. Definición de Unidades Geohidrológicas en la Subcuenca El Ronquillo.	111
Tabla 18. Resumen de estaciones de medición de propiedades de las	116
Tabla 19. Inventario de fuentes de agua superficial en época seca.	120
Tabla 20. Inventario de fuentes de agua superficial en época húmeda.	122
Tabla 21. Inventario de fuentes de agua subterránea en época seca.	123
Tabla 22. Inventario de fuentes de agua subterránea en época húmeda.	127
Tabla 23. Valores APLIS asociados al parámetro altitud.	130
Tabla 24. Valores APLIS asociados al parámetro pendiente.	130
Tabla 25. Valores APLIS asociados al parámetro litología.	131
Tabla 26. Valores APLIS asociados al parámetro infiltración.....	132
Tabla 27. Valores APLIS asociados al parámetro suelos.	132
Tabla 28. Valores APLIS asociados al parámetro condición de acuífero.	133
Tabla 29. Distribución de recarga por formación geológica.....	134
Tabla 30. Tipo de acuífero / acuitardo según su función hidráulica.	137
Tabla 31. Caracterización del agua de acuerdo con el pH.	140
Tabla 32. Clasificación de manantiales según su génesis y el sistema subterráneo asociado.....	143
Tabla 33. Resumen de entradas y salidas del sistema subterráneo.....	147

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.	Los componentes del sistema de Teledetección.....7
Figura 2.	Diferencias entre los MDS y MDT.....8
Figura 3.	Morfología de los pliegues.....10
Figura 4.	Diferentes elementos de una falla.11
Figura 5.	Tipos de fallas en función de la orientación y la12
Figura 6.	Representación de un sistema de discontinuidades13
Figura 7.	Representación del ciclo hidrológico.18
Figura 8.	Sistemas de flujo subterráneo: local, intermedio y regional.23
Figura 9.	Porosidad en medios no consolidados – Relación25
Figura 10.	Rangos de conductividad hidráulica27
Figura 11.	Ocurrencia de manantiales.....31
Figura 12.	A) Manantial de gravedad por desborde.....32
Figura 13.	B) Manantial de gravedad por depresión.....33
Figura 14.	C) Manantial artesiano por fractura, C) Manantial artesiano por depresión,34
Figura 15.	Relación del flujo con el transporte de solutos37
Figura 16.	Accesibilidad desde la Ciudad de Cajamarca (Av. Perú) a la zona de investigación.....43
Figura 17.	Compilación de magnetometría terrestre, señal analítica y objetivos.....67
Figura 18.	Ubicación de Estaciones Meteorológicas Locales y Regionales.....85
Figura 19.	Esquema geohidrológico general.149
Figura 20.	Esquema de evaluación geohidrológica de dirección NNW-SSE...150
Figura 21.	Esquema geohidrológico 1-1' de dirección SW-NE.151
Figura 22.	Esquema geohidrológico 2-2' de dirección SW-NE.152
Figura 23.	Esquema geohidrológico 3-3' de dirección SW-NE.153
Figura 24.	Esquema geohidrológico 4-4' de dirección SSW-NN.....154

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.	Polígono de Frecuencia de Altitudes.80
Gráfico 2.	Curva Hipsométrica.....80
Gráfico 3.	Perfil Longitudinal del Río Principal en la Subcuenca el Ronquillo. .81
Gráfico 4.	Diagrama Fluvial de la Subcuenca El Ronquillo.82
Gráfico 5:	Registro de precipitaciones anuales, desde 1960 hasta 2018.88
Gráfico 6.	Relación de precipitaciones (1985-2019) vs Altitud para diferentes estaciones meteorológicas.89
Gráfico 7.	Relación lineal y exponencial precipitación-altitud.....91
Gráfico 8.	Variabilidad mensual de la precipitación en la subcuenca El Ronquillo.99
Gráfico 9.	Líneas de tendencia promedio total anual de precipitaciones en la Subcuenca el Ronquillo, para el periodo 1934-2024.....100
Gráfico 10.	Relación temporal entre precipitación mensual y caudal medio en la Subcuenca El Ronquillo (2008–2017).....103
Gráfico 11.	Separación promedio del caudal total en sus104

	Pág.
Gráfico 12. Estimación del volumen de infiltración por ciclos de precipitación (1934–2025).....	107
Gráfico 13. Variación de la conductividad hidráulica en función de la profundidad en una formación kárstica y un cuerpo intrusivo.	110

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1.	Coordenadas: 9211079 N, 762648 E. Vista panorámica de un Depósito Cuaternario Coluvial, en una ladera compuesto por acumulaciones de gravas, cantos y bloques.	50
Foto 2.	Coordenadas: 9211239 N, 763284 E. Vista panorámica de afloramiento de afloramiento de bloques de granodiorita con evidencia de alteración hidrotermal.	51
Foto 3.	Coordenadas: 9211240 N, 763290 E. Vista panorámica de pequeños bloques de composición granodiorítica, fuertemente oxidados y con relictos de mineralización (pirita diseminada), emplazados dentro de una roca volcánica que muestra evidencias de fuerte alteración hidrotermal.	52
Foto 4.	Coordenadas: 9210385 N, 766267 E. Vista panorámica de afloramiento de tobas volcánicas riolíticas de coloración blanquecina, correspondiente a depósitos piroclásticos, asociado a eventos volcánicos explosivos del Mioceno.	53
Foto 5.	Coordenadas: 9211006 N, 762526 E. Vista panorámica de afloramiento de tobas andesíticas depositas sobre la Formación Cajamarca, asociado a eventos volcánicos explosivos en el Mioceno	54
Foto 6.	Coordenadas: 9211235 N, 763285 E. Vista panorámica de afloramiento de calizas silicificadas pertenecientes a la Formación Cajamarca.	55
Foto 7.	Coordenadas: 9206838 N, 765710 E. Vista panorámica de afloramiento de tobas volcánicas blanquecinas de composición riolítica.....	56
Foto 8.	Coordenadas: 9211377 N, 763252 E. Vista panorámica de afloramiento de calizas masivas gris claras de la Formación Cajamarca, en la que se observa desarrollo de rasgos kársticos tipo lenares, producto de procesos de meteorización química57	57
Foto 9.	Coordenadas: 9208762 N, 764313 E. Vista panorámica de afloramiento de calizas gris oscuras del Grupo Quilquiñan, las cuales presentan textura de tipo wackestone.	58
Foto 10.	Coordenadas: 9210373 N, 767844 E. Vista panorámica de afloramiento de bancos gruesos de calizas gris claras intercaladas con horizontes de calizas nodulares de la Formación Yumagual, además; se observa una falla normal que desplaza los estratos	59

	Pág.
Foto 11.	Coordenadas: 9210174 N, 767609 E. Vista panorámica de afloramiento de bancos gruesos de calizas arenosas intercalados con delgadas secuencias de arenitas finas.59
Foto 12.	Coordenadas: 9210604 N, 768077 E. Vista panorámica de afloramiento de horizontes de chert intercalados con arcillolitas de la Formación Pariatambo60
Foto 13.	Coordenadas: 9209229 N, 770567 E. Vista panorámica; afloramiento de estratificación delgada de calizas gris-oscuras de la Formación Pariatambo61
Foto 14.	Coordenadas: 9210749 N, 769285 E. Vista panorámica de afloramiento altamente fracturado de calizas gris claras de la Formación Chúlec62
Foto 15.	Coordenadas: 9209858 N, 770259 E. Vista panorámica de afloramiento de bancos gruesos de calizas , intercalados con delgadas secuencias de arcillolitas calcáreas.62
Foto 16.	Coordenadas: 9206455N, 768356 E. Vista panorámica de afloramiento de areniscas ferruginosas altamente fracturadas de la Formación Inca.....63
Foto 17.	Coordenadas: 9207245 N, 766553 E. Vista panorámica de afloramiento de calizas dolomitizadas, ubicadas en el contacto entre las Formaciones Inca y Chúlec64
Foto 18.	Coordenadas: 9210357 N, 770956 E. Vista panorámica de afloramiento de areniscas blanquecinas de la Formación Farrat65
Foto 19.	Coordenadas: 9207225 N, 766545 E. Vista panorámica de afloramiento de areniscas cuarzosas blanquecinas con intercalación de limolitas altamente fracturadas de la Formación Farrat.....65
Foto 20.	Coordenadas: 763771 E, 9211573 N. Vista panorámica de la proyección del eje de charnela del Sinclinal Colpayoc en el Sector Majadapampa69
Foto 21.	Coordenadas: 762735 E, 9210667 N. Vista panorámica de afloramiento de calizas de la Formación Cajamarca, ubicadas en el Flanco SW del Sinclinal Colpayoc69
Foto 22.	Coordenadas: 762359 E, 9212332 N. Vista panorámica de una falla normal que desplaza verticalmente bancos gruesos de calizas de la Formación Cajamarca.....71
Foto 23.	Coordenadas: 764231 E, 9210470 N. Configuración estructural de las Fallas Pampa I y II en el Sector Majadapampa.72
Foto 24.	Coordenadas: 764949 E, 9208308 N. Configuración estructural de la Falla La Escondida en el Sector Sexemayo Lote II.....73
Foto 25.	Coordenadas: 769204 E, 9207633N. Vista panorámica de escarpa de la Falla Sexemayo en el Sector Sexemayo Lote I74
Foto 26.	Coordenadas: 771408 E, 9208202N. Vista panorámica de familias de discontinuidades en calizas de la Formación Chúlec, Sector Ronquillo.....75
Foto 27.	Coordenadas: 762831 E, 9211055 N. Vista panorámica de sumidero en rocas carbonatadas de la Formación Cajamarca 118
Foto 28.	Coordenadas: 763079 E, 9211026 N. Vista panorámica de dolina rocas carbonatadas de la Formación Cajamarca 118

RESUMEN

La investigación se desarrolló en la Subcuenca El Ronquillo, ubicada al oeste de la ciudad de Cajamarca y reconocida por aportar aproximadamente el 30 % del agua destinada al consumo poblacional. El estudio surgió ante la necesidad de comprender de qué manera las litomorfoestructuras condicionan el funcionamiento geohidrológico del sistema. El objetivo principal fue caracterizar este comportamiento mediante un análisis integrado que combinó trabajos de campo, interpretación cartográfica y la evaluación de parámetros fisicoquímicos del agua subterránea. El área de estudio presenta Secuencias Volcánicas y Depósitos Cuaternarios depositados en discordancia angular a Formaciones Cretácicas plegadas y fracturadas, afectadas por estructuras regionales como el Sinclinal Colpayoc y fallas locales. Estas características dan lugar a sistemas acuíferos tanto someros como profundos. La precipitación media anual es de 904 mm/año, con una recarga potencial cercana al 28 %, concentrada principalmente en los Depósitos Cuaternarios, Secuencias Volcánicas y en las Formaciones Cajamarca y Farrat. El flujo subterráneo se desplaza desde las zonas más elevadas hacia las partes bajas, debido al gradiente hidráulico, donde descarga a través de manantiales gravitacionales, artesianos y como flujo base en el río Ronquillo. Los parámetros fisicoquímicos medidos en el agua subterránea (CE: 10–729 μ S/cm; pH: 3.96–10.34) reflejan la influencia de las litomorfoestructuras en el tiempo de residencia y trayectoria del flujo, permitiendo distinguir entre los distintos sistemas acuíferos. En conjunto, los resultados evidencian que la interacción entre las litomorfoestructuras es determinante para la dinámica geohidrológica de la Subcuenca.

PALABRAS CLAVE: Geohidrología, Subcuenca, Acuíferos, Recarga, Manantiales, Estructuras Geológicas.

ABSTRACT

The research was conducted in the El Ronquillo Sub-basin, located west of the city of Cajamarca and recognized for supplying approximately 30% of the water used for domestic consumption. The study arose from the need to understand how litho-morphostructural features influence the geohydrological functioning of the system. The main objective was to characterize this behavior through an integrated analysis that combined fieldwork, cartographic interpretation, and the evaluation of physicochemical parameters of groundwater. The study area comprises Volcanic Sequences and Quaternary Deposits overlying folded and fractured Cretaceous Formations in angular unconformity, all affected by regional structures such as the Colpayoc Syncline and local faults. These characteristics give rise to both shallow and deep aquifer systems. The mean annual precipitation is 904 mm/year, with a potential recharge of approximately 28%, concentrated mainly in the Quaternary Deposits, Volcanic Sequences, and the Cajamarca and Farrat Formations. Groundwater flows from higher elevations toward lower areas due to the hydraulic gradient, discharging through gravitational and artesian springs, as well as baseflow into the Ronquillo River. The physicochemical parameters measured in groundwater (EC: 10–729 $\mu\text{S}/\text{cm}$; pH: 3.96–10.34) reflect the influence of litho-morphostructures on groundwater residence time and flow paths, allowing differentiation between aquifer systems. Overall, the results show that the interaction among these litho-morphostructural features is a key factor controlling the geohydrological dynamics of the sub-basin.

KEYWORDS: Geohydrology, Sub-basin, Aquifers, Recharge, Springs, Geological Structures.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La subcuenca El Ronquillo, situada al oeste de la ciudad de Cajamarca y políticamente perteneciente al Distrito, Provincia y Departamento de Cajamarca, abarca aproximadamente 42.5 km² y una altitud media en torno a 3,523 msnm, e incluye los centros poblados de Sexemayo, Capillanía, Ronquillo, Corisorgona, Chamis, Carhuaconga, Cushunga, Carhuaquero y Majadapampa; desde el punto de vista geológico afloran las Formaciones Farrat, Inca, Chúlec, Pariatambo, Yumagual, Quilquiñan y Cajamarca, compuestas por secuencias de areniscas, calizas, arcillolitas y limolitas del Cretácico Inferior y Superior que se encuentran plegadas, falladas y de moderada a fuertemente fracturadas, sobre las cuales sobreyacen secuencias volcánicas del Paleógeno y Neógeno (tobas, aglomerados y piroclastos) con porosidad primaria pero predominantemente porosidad secundaria por efecto de la fracturación; sobre este conjunto de litomorfoestructuras descansan depósitos cuaternarios aluviales y coluvio-aluviales de porosidad primaria que constituyen acuíferos someros importantes; el relieve presenta planicies, lomadas, laderas y escarpas como resultado de procesos de erosión, y el régimen de precipitaciones se caracteriza por lluvias entre octubre y abril (con fuerte infiltración) y estiaje entre junio y agosto (con baja infiltración), lo que origina acuíferos y acuitardos por procesos de recarga y almacenamiento que descargan en manantiales y finalmente en el río Ronquillo, nivel de base del sistema; en última instancia, la litología, la estructura y la morfología de estos acuíferos influyen de manera directa en la variación de los parámetros fisicoquímicos (pH, CE, T°, TDS, ORP) del agua superficial y subterránea en toda la unidad hidrográfica.

En este contexto, la investigación se formula mediante la pregunta central: ¿Cuál es el comportamiento geohidrológico de las litomorfoestructuras en la Subcuenca El Ronquillo, en el Distrito, Provincia y Departamento de Cajamarca?

En este sentido se plantea la hipótesis; de que las litomorfoestructuras determinan el comportamiento geohidrológico, condicionando; la formación de acuíferos,

procesos de recarga y descarga del agua subterránea en forma de manantiales y aguas superficiales, ríos y quebradas, y variación de sus principales parámetros fisicoquímicos.

La investigación se justifica porque la cabecera de la subcuenca es considerada reserva hídrica que abastece a las poblaciones aledañas y cuyo río Ronquillo alimenta la planta de Santa Apolonia, aportando 30% del agua potable de la ciudad de Cajamarca, por lo que resulta imprescindible establecer el rol de la geohidrología para la gestión, control y planificación sostenible del recurso hídrico; la investigación tiene como propósito evaluar y caracterizar las variables que condicionan dicho comportamiento y aporta evidencia útil para autoridades e instituciones locales y nacionales.

En cuanto a sus alcances, el estudio es exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo, destinado a definir la relación entre precipitación, infiltración, almacenamiento y descarga del agua subterránea, así como el papel de la litología, las estructuras y las unidades morfogénicas en el comportamiento geohidrológico.

Con ello, se establece como objetivo general determinar el comportamiento geohidrológico de las litomorfoestructuras en la subcuenca El Ronquillo, analizando la influencia de la litología, las estructuras tectónicas y las unidades morfogénicas en la formación de acuíferos, los procesos de recarga y descarga, y la variación de los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea.

Asimismo, como objetivos específicos se plantea: realizar el cartografiado geológico-estructural; identificar las unidades morfogénicas y propiedades hidráulicas de las formaciones geológicas; evaluar la variabilidad estacional de los parámetros fisicoquímicos en fuentes de agua superficiales y subterráneas; elaborar el balance hidrológico y definir la relación entre precipitación, infiltración, almacenamiento y descarga de agua subterránea.

El contenido de los capítulos se detalla a continuación:

En el Capítulo II se revisan los antecedentes relevantes y se desarrolla el marco teórico que permite sustentar conceptualmente la investigación; asimismo, el Capítulo III expone los materiales y la metodología aplicada, detallando el área de estudio y los procedimientos empleados para la obtención y análisis de la información; posteriormente, en el Capítulo IV se presentan y analizan los resultados obtenidos, los cuales son discutidos en función de los objetivos planteados; finalmente, el Capítulo V reúne las conclusiones y las recomendaciones derivadas del estudio.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Otamendi (2021), en su investigación: “Estudio Hidrogeológico del Acuífero Localizado al Este del Lago de Valencia, Municipio Libertador, Estado Aragua”. Con el objetivo de realizar un análisis detallado del comportamiento hidrogeológico del acuífero confinado al este del Lago Valencia con fines de extracción de aguas subterráneas de manera eficiente; como resultado se obtuvo el modelo hidrogeológico conceptual donde se detalla la evolución y el comportamiento del acuífero confinado, caracterizado por material arcilloso y lentes arenosos interconectados, con alta transmisividad y permeabilidad. La dirección de flujo principal va hacia el oeste, la recarga proviene del este y de precipitaciones locales.

Chuchón (2017), en su investigación: “Modelo Hidrogeológico Conceptual del Acuífero de Alta Montaña de las Microcuencas del Patarí y Quellopata, Cuenca del Río Ocoña”. Con el objetivo de caracterizar el comportamiento de las aguas subterráneas de los acuíferos de alta montaña ubicados en ambientes altamente fracturados con fines de evaluar su aprovechamiento hídrico; como resultado se obtuvo un modelo hidrogeológico conceptual que estableció una tasa sostenible de aprovechamiento de 8 l/s sin generar impactos negativos en la cuenca. Asimismo, se identificaron tres tipos de unidades hidrogeológicas, y se determinó que la calidad del agua cumpla con estándares ambientales para su uso.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Goicochea (2018), en su investigación: “Caracterización Hidrogeológica de Rocas Carbonatadas en Fraylecocha, Celendín-Cajamarca”. Con el objetivo de caracterizar la hidrogeología de rocas calizas, determinar zonas de recarga y descarga de manantiales; concluyó que estas rocas presentan procesos de karstificación y tectonismo (plegamiento y fallamiento) permitiendo la surgencia de agua subterránea en los sumideros de Uñigan, Fraylecocha y Alpacochoa.

Quispe y López (2014), en su investigación: “Estudio Hidrogeológico de la Microcuenca San Cirilo, Cajamarca-Perú”. Con el objetivo de caracterizar la hidrogeológica a escala 1:15,000, determinando parámetros fisicoquímicos en fuentes de agua como pH, conductividad eléctrica, temperatura y caudal; concluyeron que existen dos tipos de acuíferos: los Cuaternarios Aluviales de tipo poroso no consolidado y las rocas fracturadas de la Formación Farrat.

Peña y Severyn (2014), en su investigación: “Modelo Hidrogeológico del Funcionamiento de las Fuentes Termales de Baños del Inca, Cajamarca-Perú”. Con el objetivo de determinar las características hidrogeológicas y ambientes de formación de las fuentes termales de Baños del Inca, llegaron a concluir que existen dos tipos de acuíferos confinados en las Formaciones Chimú y Farrat, y un acuífero poroso no consolidados; además, la falla de dirección N-S y su intersección con el eje del anticlinal condicionan la surgencia de estas fuentes termales.

Carlotto y Peña (2012), en su investigación: “Geología e Hidrogeología Regional del Proyecto Conga y Zonas de Influencia”. Con el objetivo de determinar las características hidrogeológicas en la zona de influencia donde se implantará el proyecto Minero Conga, concluyeron que el Grupo Pulluicana conformado por calizas son el basamento donde se emplazaron los pórfidos mineralizados; estos son acuitardos en profundidad, pero en superficie se comportan como acuífero subsuperficial, y están asociados a los acuíferos porosos no consolidados.

2.1.3. Antecedentes Locales

Orrillo y Morera (2018), en su investigación: “Caracterización del Rol del Páramo Andino en la Regulación del Recurso Hídrico en la Cuenca Ronquillo”. Con el objetivo de caracterizar el almacenamiento de agua en los ecosistemas de páramo utilizando el Índice de Flujo Base (BFI); concluyeron que el ecosistema páramo presenta un BFI alto, almacenando más del 60% del volumen de agua; además, la falla geológica en la microcuenca Sexemayo genera una pérdida directa de agua almacenada para la recarga del acuífero.

Herrera (2015), en su investigación: “Caracterización Hidrogeológica de la Microcuenca Tres Ríos para la construcción de Reservorios Artesanales”. Con el objetivo de analizar la litología y las características hidrogeológicas de la Microcuenca Tres Ríos para optimizar la captación y almacenamiento del recurso hídrico, concluyó que las unidades geológicas más favorables para este propósito son las Formaciones Chúlec, Inca y Pariatambo, debido a la presencia de paquetes de lutitas y limolitas.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Sensoramiento Remoto

Según Bravo (2020), el Sensoramiento remoto, es una disciplina científica y tecnológica, nos permite recopilar información sobre zonas sin necesidad de contacto directo. En general, se basa en registrar la energía reflejada desde la superficie terrestre. Si la fuente de energía es natural se habla de Sensoramiento remoto pasivo; en cambio, si la fuente de energía es artificial como las de los sensores, sistemas de radar, se habla de Sensoramiento remoto activo. Los satélites permiten que el sensoramiento remoto sea posible a gran escala, estos capturan información continua a nivel global.

➤ Elementos clave de un Sistema de Sensoramiento Remoto

Fuente de energía: Puede ser natural (el sol) o artificial (sensores activos que emiten señales para captar su reflejo).

Superficie terrestre: Son elementos naturales o antrópicos (vegetación, edificaciones, suelos), estos reflejan la energía hacia el sensor.

Sistema sensor: Incluye los dispositivos de captura (cámaras y radares) y su soporte (satélites o aeronaves), estos registran la energía reflejada y la transmiten.

Centro de recepción y distribución: Se encarga de recibir datos del sensor, procesar y distribuir en formatos de uso adecuado.

Especialista en interpretación: Es aquel que analiza los datos recibidos, transformándolos en información útil para diversos sectores como medio ambiente, minería, agricultura, geografía, etc.

Usuario final: Es quien recibe y usa la información para la toma de decisiones y diversos fines.

En la Figura 1 se pueden apreciar los principales componentes de un sistema de teledetección.



Figura 1. Los componentes del sistema de Teledetección.
Fuente: Chuvieco, (1996).

➤ **Modelo Digital de Terreno (MDT)**

Bravo (2020) menciona que son un conjunto de capas (tipo ráster), y son uno de los componentes esenciales en cualquier representación digital de la superficie terrestre, estos tienen aplicaciones en diferentes industrias como Ingeniería, Minería, Medio ambiente y muchas más.

Las diversas capas de los MDT se generan a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), que ofrecen una representación de las elevaciones o altitudes del terreno, nos permiten obtener mapas de pendientes, relieve, orientación, sombras, entre otros. El MDE representa el terreno natural y sin vegetación, mientras que, el MDS (Modelo Digital de Superficie) representa el terreno y los elementos sobre, tales como edificios, puentes, cubierta forestal, entre otros. En la Figura 2 se puede apreciar gráficamente las diferencias entre los MDS y MDT.

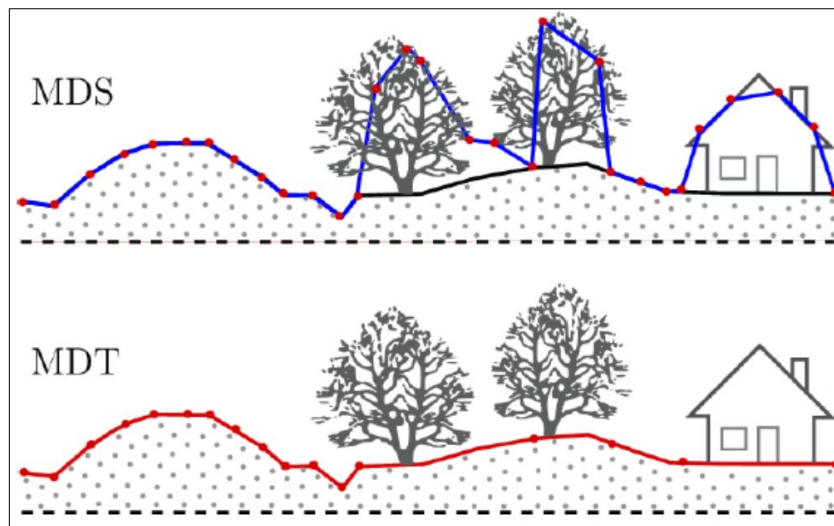


Figura 2. Diferencias entre los MDS y MDT.
Fuente: Bravo, (2020).

2.2.2. Litomorfoestructuras

El término litomorfoestructuras hace referencia a las diversas formas de relieve que se originan por la interacción de tres elementos: naturaleza de las rocas (litología), características geométricas del terreno (morfometría) y las estructuras geológicas presentes (fallas, pliegues y discontinuidades).

El término utilizado ha sido definido por diversos autores como Guerasimov (1986); quien menciona que son el resultado de la interacción entre la litología y fuerzas tectónicas a distintas escalas, integradas en un proceso dinámico. Hernández (1995), coincide en que estas estructuras dependen tanto de las características tectónicas como litológicas, siendo la litología clave en la geodinámica externa. Modenesi (2002), destaca la importancia de la resistencia de los materiales litológicos como un factor determinante para la formación del relieve terrestre. Finalmente, Magaz (2006), afirma todos estos conceptos anteriores y concluye que las litomorfoestructuras son el producto de la combinación de factores tectónicos y litológicos, con la influencia de los procesos exógenos en su evolución.

Los componentes principales de las Litomorfoestructuras son:

➤ ***Litología***

La litología define las propiedades físicas y químicas de las rocas. Se refiere al tipo de roca (ígneas, metamórficas y sedimentarias), composición mineralógica, densidad, porosidad, permeabilidad, almacenamiento, transmisividad, resistencia, entre otras; estas propiedades determinan su respuesta a la geodinámica interna y externa.

➤ ***Morfometría del terreno***

La morfometría hace referencia a las formas y dimensiones del relieve terrestre y nos permite analizar parámetros como pendiente, altitud, relieve, ayudan a identificar la influencia tectónica en la configuración actual del paisaje.

➤ ***Estructuras geológicas***

Las estructuras geológicas hacen referencia a las deformaciones y discontinuidades de las rocas debido a movimientos tectónicos, tales como fallas, pliegues y diaclasas, estas determinan las formas de relieve. Las estructuras geológicas son importantes en geohidrología, pues pueden controlar la circulación de flujo de agua subterránea, actuando como zonas de barrera o zonas conductivas, dependiendo de la distribución de capas de estratificación y permeabilidad.

❖ *Pliegues*

Según Duque (2020), los pliegues son deformaciones plásticas en las rocas causadas por procesos de compresión a gran profundidad, las rocas al estar sometidas a alta presión y temperatura, se deforman en lugar de romperse. Éstos pueden ser de diferentes tipos, tales como: Anticlinal y Sinclinal (Ver Figura 3). Éstos terminen se usan solamente cuando se conocen la edad geocronológica de las rocas involucradas en el proceso de deformación. El anticlinal se caracteriza por ser cóncavo hacia abajo, con las rocas más antiguas hacia el centro de la curvatura; mientras que el Sinclinal se caracteriza por su forma cóncava hacia arriba, con rocas más recientes ubicadas en el centro de la curvatura.

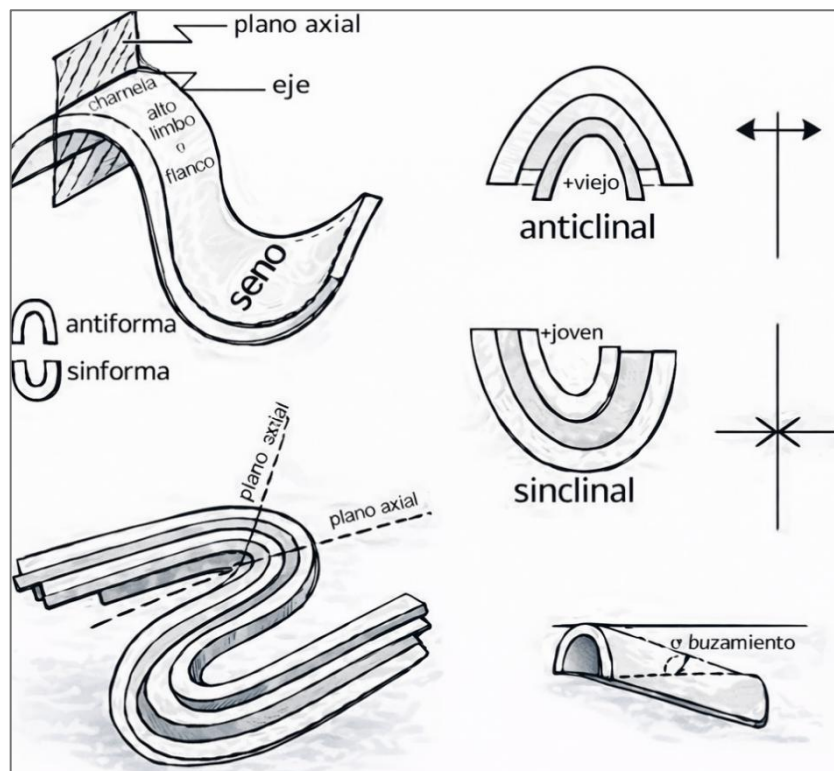


Figura 3. Morfología de los pliegues.
Fuente: Spikermann, (2010).

❖ *Fracturas:*

Según Spikermann (2010), las fracturas son deformaciones en las rocas con un comportamiento frágil; y se dividen en dos tipos: fallas, cuando los bloques de roca se desplazan a lo largo de la fractura, y diaclasas, cuando no hay

desplazamiento relativo entre los bloques. En una falla, los elementos que la componen se presentan en la Figura 4 y son: El bloque elevado y hundido, el techo (bloque superior) y el piso (bloque inferior), además el plano de falla, el cual separa ambos bloques con un determinado ángulo de inclinación, la escarpa de falla es la parte del plano expuesta y suele estar erosionada. En mapas geológicos, la línea de falla se representa mediante una línea larga y pequeñas barras que representan el bloque hundido.

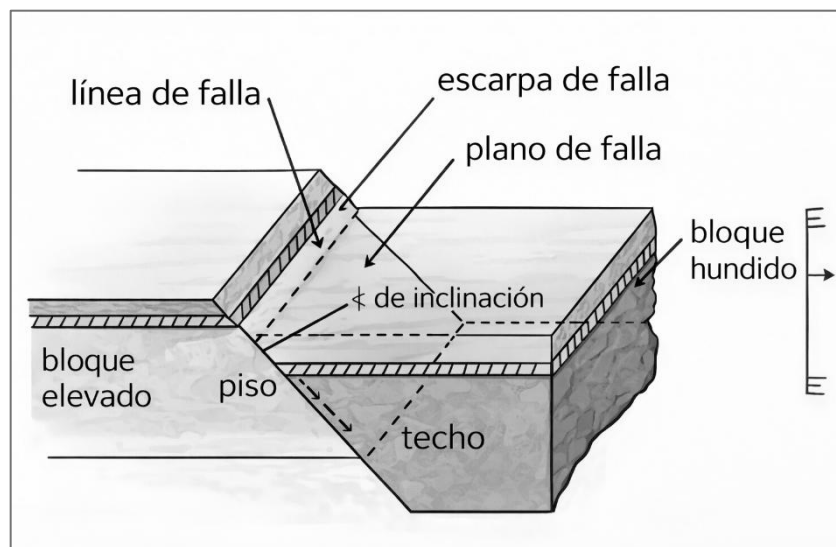


Figura 4. Diferentes elementos de una falla.
Fuente: Spikermann, (2010).

Los tipos de falla más comunes (Ver Figura 5) clasificadas según el movimiento de sus bloques son:

- Falla directa o normal: Se caracteriza por el movimiento vertical del bloque superior que se desplaza hacia abajo en referencia al bloque inferior; este tipo de fallamiento se produce en respuesta a esfuerzos extensivos.

- Falla inversa: También llamada falla de cabalgamiento y se caracteriza por el movimiento vertical del bloque superior que se desplaza hacia arriba en referencia al bloque inferior; este tipo de fallamiento se produce en respuesta a esfuerzos compresivos.

-Falla transcurrente o de rumbo: Se caracteriza por el movimiento horizontal de los bloques se deslizan uno sobre el otro a lo largo de la fractura, se subdividen en falla de rumbo (dextral) y falla de rumbo izquierda (sinistral).

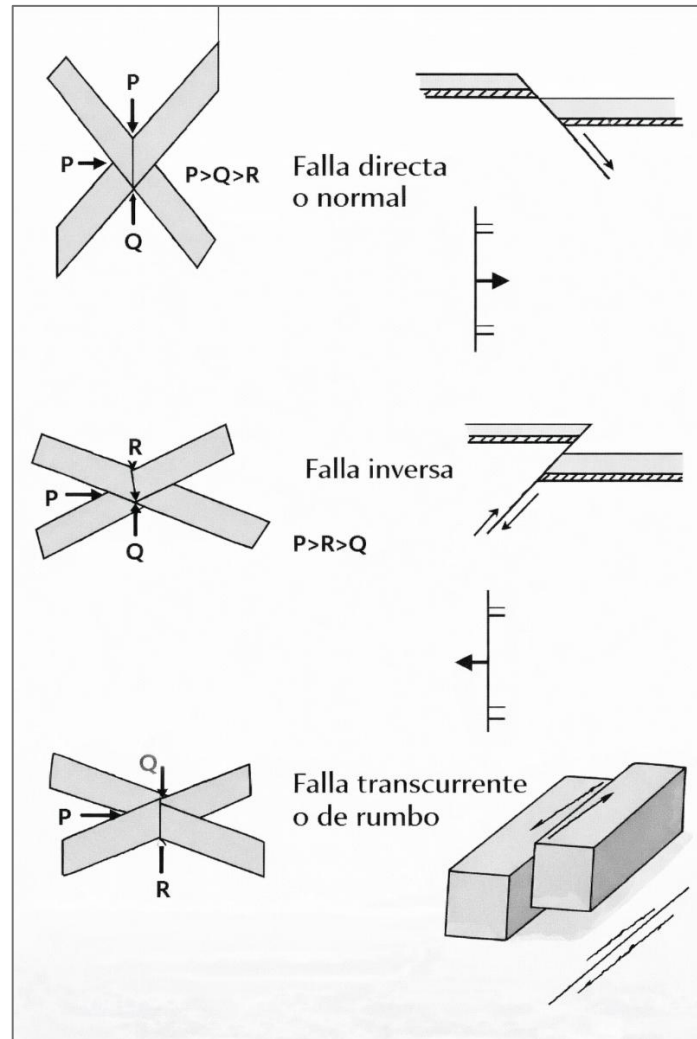


Figura 5. Tipos de fallas en función de la orientación y la distribución de los esfuerzos tectónicos, así como los símbolos empleados en los mapas geológicos.
Fuente: Spikermann, (2010).

Las discontinuidades (diaclasas) son estructuras que surgen del comportamiento frágil de las rocas, lo que provoca una pérdida de cohesión, en este tipo de fractura a diferencia de las fallas no hay desplazamiento entre los bloques, sino solo un movimiento perpendicular al plano de la diaclasa. Se clasifica según su orientación en relación con el plano de estratificación. Generalmente se presentan en sistemas de fracturas, como se puede apreciar en la Figura 6.

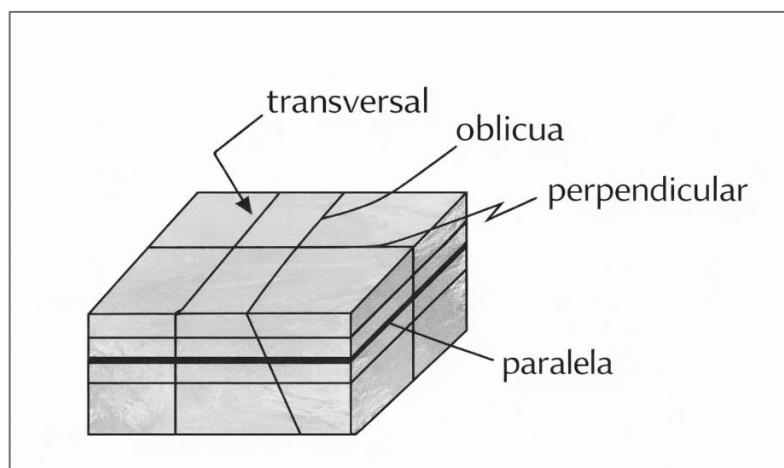


Figura 6. Representación de un sistema de discontinuidades en referencia a los planos de estratificación.
Fuente: Spikermann, (2010).

2.2.3. Unidades Morfogenéticas

Las geoformas se generan debido a los distintos procesos morfogenéticos que afectan las geoestructuras; como resultado de estos procesos surgen las unidades morfogenéticas, las cuales nos representan las diferentes transformaciones que ha experimentado la corteza terrestre a lo largo de su evolución. Se pueden clasificar según su forma, pendiente u origen, reflejando las variaciones en procesos tectónicos, sedimentarios y erosivos que ocurren en una región en particular.

Según lo planteado por Rodríguez (2018), en su Tesis Doctoral titulada: “*Impactos Geotécnico-Ambientales en Cabeceras de Subcuenca por Implantación de Minas Conga*”; las unidades morfogenéticas fueron categorizadas utilizando un enfoque litomorfoestructural, relacionando su geometría y pendiente. En la Tabla 1 se presenta dicha clasificación; además, su descripción correspondiente:

➤ **Planicies**

Las planicies son áreas con pendientes suaves (0° y 8°), en general la superficie es bastante homogénea y presentan poca erosión, su morfología está asociada a depósitos cuaternarios aluviales y fluvio-aluviales, producto de erosión de las rocas existentes. Aunque la mayor parte se encuentra asociada a depósitos no consolidados del cuaternario, pueden encontrarse en diferentes tipos de litologías de diversos orígenes y edades (Rodríguez, 2018).

➤ **Lomadas**

Las lomadas son pequeñas elevaciones de formas redondeadas u homogéneas, con alturas aproximadamente de 150 y 200 metros; con pendientes suaves (8° y 20°). Litológicamente se encuentran en áreas de formaciones sedimentarias, volcánicas o intrusivas (Rodríguez, 2018).

➤ **Laderas**

Las laderas son geoformas inclinadas que suelen ser parte de una cadena montañosa, con alturas promedio entre 200 y 300 metros; con pendientes entre 20° y 50°, pueden encontrarse en diversos tipos de litologías. Estas geoformas son susceptibles a procesos de erosión debido a su inclinación, y a factores climáticos que afectan su estabilidad (Rodríguez, 2018).

➤ **Escarpas**

Las escarpas son geoformas con relieves bastante pronunciados, son resultado de procesos geotectónicos y morfogenéticos; las pendientes son mayores a 50°, estas geoformas tienden a ser inestables debido a su inclinación, y esta susceptible a deslizamientos, vuelcos y derrumbes cuando las rocas son alteradas de su entorno natural (Rodríguez, 2018).

Tabla 1. Clasificación de Unidades Morfogenéticas.

TIPO DE RELIEVE	GEOMETRÍA
Unidad Morfogenética	Pendiente
Planicies	0° - 8°
Lomadas	8° - 20°
Laderas	20° - 50°
Escarpas	> 50°

Fuente: Rodríguez, (2018).

2.2.4. Unidades Hidrográficas

Según Cotler (2013), las unidades hidrográficas son espacios territoriales delimitadas por las partes más altas donde existe un sistema de drenaje natural, el agua proveniente de una red de ríos, arroyos y afluentes confluyen y desembocan hacia un único punto de salida, en general un río, lago o el mar.

Las unidades hidrográficas nos permiten comprender espacialmente el ciclo hidrológico, facilitando la gestión de recursos hídricos y planificación, debido a que cada unidad presenta características propias, determinadas por sus recursos naturales y condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales (Tapia, 2003).

➤ *Parámetros geomorfológicos*

Son medidas y características de las unidades hidrográficas; estos son importantes para comprender la dinámica de la superficie terrestre y permiten analizar la distribución de flujo de agua, procesos de erosión, infiltración, y otros más.

Según Rodríguez & Huamán (2016), los parámetros básicos, son parámetros cuantitativos, obtenidos mediante procesamiento de imágenes satelitales, son considerados datos primarios y nos proporcionan la base suficiente para el cálculo de los parámetros fundamentales. Estos parámetros son cruciales para clasificar unidades hidrográficas, prever el comportamiento de la cuenca ante eventos hidrológicos y evaluar procesos relacionados con la dinámica terrestre.

En el 2022, actualizaron y validaron esta clasificación, permitiendo mejorar su implementación en diversos estudios. La clasificación actualizada de parámetros básicos y fundamentales se presenta en la Tabla 2; mientras que la clasificación geomorfológica de unidades hidrográficas en microcuencas, subcuencas y cuencas, según su área y orden de drenaje, se muestra en la Tabla 3.

Tabla 2. Parámetros Geomorfológicos Básicos y Fundamentales para clasificación de Unidades Hidrográficas.

PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS	
Parámetros Básicos	Parámetros Fundamentales
	6. Densidad de Drenaje
	7. Extensión Media de Escurrimiento Superficial
	8. Frecuencia de Ríos
1. Área	9. Ancho Promedio de la Subcuenca
2. Perímetro	10. Factor de Forma
3. Longitud del Cauce Principal	11. Coeficiente de Compacidad o Índice de Gravelius
4. Desnivel Altitudinal	12. Altitud Media de la Subcuenca
5. Grado de Ramificaciones	13. Pendiente Media de la Subcuenca
- Número Total de Cursos o Ríos	14. Polígono de Frecuencia de Altitudes
- Longitud Total de Ríos	15. Curva Hipsométrica
	16. Parámetro de Rectángulo Equivalente
	17. Pendiente Media del Río Principal
	18. Declive Equivalente Constante
	19. Perfil Longitudinal de la Subcuenca
	20. Coeficiente de Torrencialidad
	21. Coeficiente de Masividad

Fuente: Rodríguez y Huamán, (2016).

Tabla 3. Clasificación de Cuencas, Subcuencas y Microcuencas según sus Parámetros Geomorfológicos.

Unidad Hidrográfica	Área (Km ²)	Orden de Drenaje
Microcuenca	< 37.5	1,2,3
Subcuenca	37.5 - 350	4,5
Cuenca	Mayor de 350	> 6

Fuente: Rodríguez y Huamán, (2022).

2.2.5. Ciclo Hidrológico

Según Aparicio (1992), el ciclo del hidrológico es un proceso continuo que no tiene un principio ni un fin definido, ya que puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra en la superficie de la Tierra, ya sea en ríos, lagos u océanos, se eleva hacia la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae a la superficie en forma de lluvia, nieve o granizo.

Una vez que el agua llega a la tierra, parte de ella se absorbe en el suelo, mientras que otra fluye a través de la superficie hacia ríos y otros cuerpos de agua. El agua que se infiltra hacia el suelo puede almacenarse bajo tierra o moverse por capas subterráneas, alimentando acuíferos y ríos que finalmente desembocan en el mar. En ocasiones, el agua subterránea regresa a la superficie y aflora en manantiales, ríos o el mar. Este proceso ocurre de manera continua como se observa en la Figura 7, manteniendo el equilibrio del sistema hidrológico.

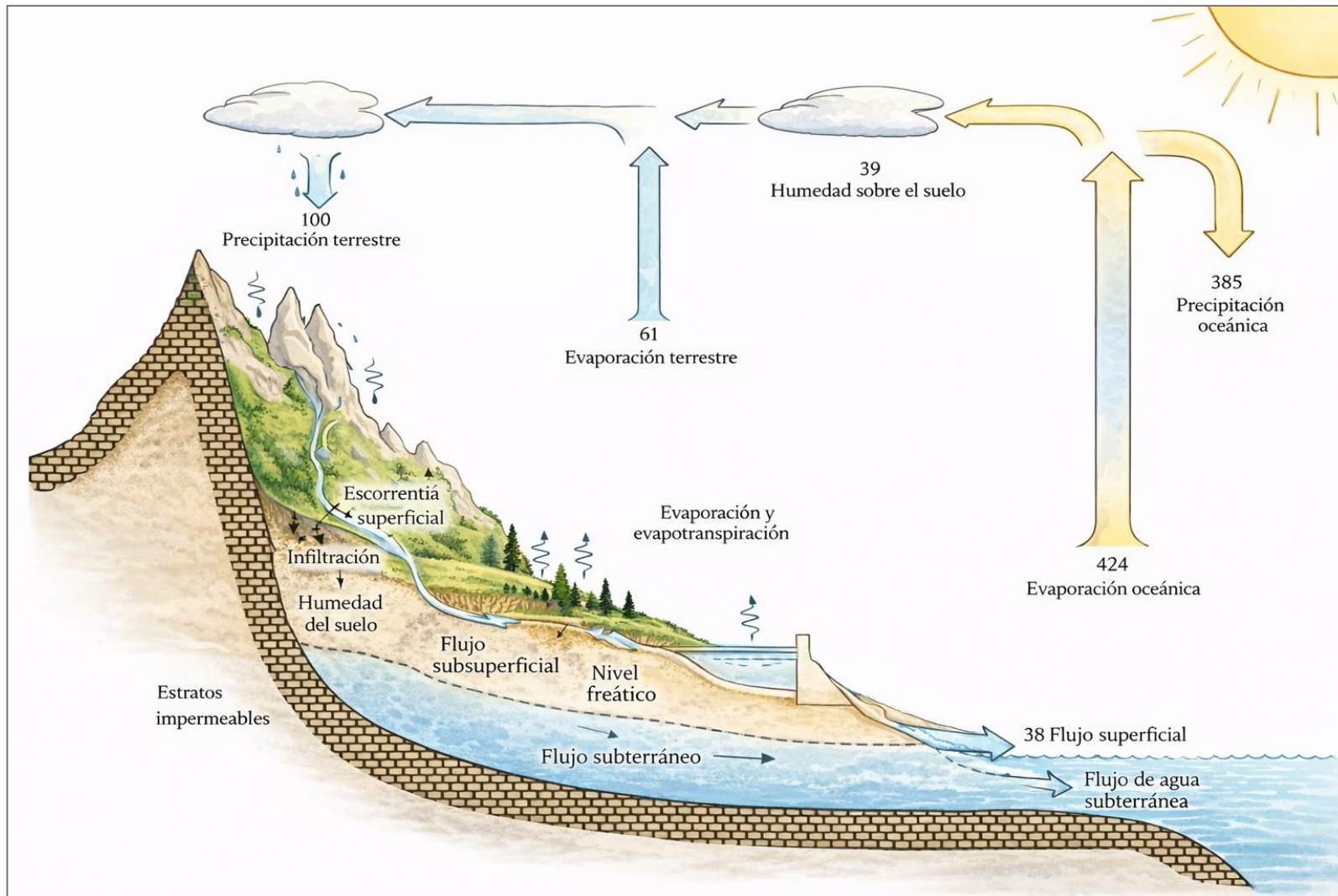


Figura 7. Representación del ciclo hidrológico.
Fuente: Modificado de Chow, (1994).

Según Chow (1994), los fenómenos hidrológicos son bastante complejos, pero se pueden simplificar mediante el concepto de sistema, que agrupa componentes como la precipitación, infiltración y escorrentía. El ciclo hidrológico se representa como un sistema dividido en subsistemas: el sistema de agua atmosférica, el sistema de agua superficial y el sistema de agua subterránea.

2.2.6. Balance Hidrológico

Según Maderey (2005), es un planteamiento matemático se utiliza para estimar la cantidad de agua que entra y sale de una unidad hidrográfica en un periodo de tiempo. El balance puede dividirse en dos partes: una activa y una pasiva. La parte activa comprende al escurrimiento, que es cuando las corrientes salen en un periodo determinado, así como la evaporación de la misma cuenca en ese mismo periodo. En cuanto a la parte pasiva, se encuentran las precipitaciones en forma de lluvias o nieve y precipitaciones ocultas como rocío y escarcha. Es importante señalar que no toda el agua que escurre por la superficie proviene de la lluvia, sino que puede provenir de manantiales producto del afloramiento de las reservas de agua subterránea, reservas de hielo y nieve. Por otro lado, no toda el agua producto de las precipitaciones escurre por la superficie, una parte se infiltra en el suelo, contribuyendo a las reservas de agua subterránea.

➤ Precipitación

La precipitación es un fenómeno por el cual las partículas sólidas y líquidas producto de la condensación atmosférica caen hacia la superficie terrestre. Es el fenómeno más importante del ciclo hidrológico, es la principal fuente de las corrientes de agua superficiales y subterráneas (FCIHS, 2009). También existen tres principales tipos de precipitación: ciclónica, convectiva y orográfica, en zonas montañosas tenemos a la precipitación orográfica, es aquella que se origina por el ascenso de una masa de aire, forzado por una barrera montañosa (Maderey, 2005).

➤ ***Infiltración o Recarga***

El agua ingresa a través de la superficie hacia las capas más profundas por un proceso llamado infiltración. Una vez que entra en el terreno, una parte es almacenada hasta su máxima capacidad, mientras que el resto contribuye al nivel freático (FCIHS, 2009). En un contexto geohidrológico la infiltración, juega un papel primordial en la formación y recarga de los acuíferos, proceso que está condicionado por diversos factores como: permeabilidad, porosidad, control estructural de las rocas, condiciones climáticas, entre otros.

➤ ***Escorrentía***

El escurrimiento superficial es la parte del agua de lluvia que no logra infiltrarse en el suelo y circula por la superficie, fluyendo hacia ríos y quebradas, este flujo superficial forma parte de la red de drenaje de una unidad hidrográfica, que está compuesta por todas las cuencas, subcuencas y microcuencas que, dependiendo de las características del terreno, como la pendiente, litología y vegetación; drenan el agua hacia un mismo punto de descarga (Maderey, 2005). Las unidades más utilizadas para medir el caudal son litros por segundo (l/s), que indican la cantidad de agua que fluye a través de un determinado punto en un segundo.

➤ ***Ecuaciones del Balance Hidrológico***

Según Huamán Vidaurre (2014), las siguientes ecuaciones representan una simplificación del balance hidrológico y se basan en el principio de conservación de la masa, el cual establece que la cantidad de agua que ingresa a un sistema debe ser igual a la que sale. Posteriormente, Rodríguez (2016) retoma estas formulaciones y las presenta como referencia para el análisis hidrológico.

$$PP = P_e + F \quad (1)$$

$$C = P_e / PP \quad (2)$$

$$f = 1 - C \quad (3)$$

$$VF = F * A_{sc} \quad (4)$$

PP = Precipitación total (mm)
Pe = Precipitación Efectiva o Escurrimiento (mm)
C = Coeficiente de Escurrimiento
F = Infiltración (mm)
f = Coeficiente de Infiltración
VF = Volumen de Infiltración (m^3 o MMC)
A_{SC} = Área de la Subcuenca (Km^2)

2.2.7. Geohidrología

Según Custodio y Llamas (2001), se denomina acuífero a la formación geológica que, por la presencia de poros, fracturas o grietas interconectadas, permite la circulación y almacenamiento de agua subterránea en cantidades suficientes para su aprovechamiento en diversos fines.

En geohidrología todavía se utilizan términos como acuicludo, para describir formaciones geológicas, generalmente arcillosas, que a pesar de estar completamente saturadas no transmiten agua de manera apreciable; y acuífugo, que se refiere a formaciones carentes de agua, como los macizos graníticos no alterados. Sin embargo, ambos conceptos resultan discutibles, ya que hoy se reconoce que no existen formaciones completamente impermeables.

En este contexto, estos términos han quedado en desuso y ha cobrado relevancia el concepto de acuitardos; este se aplica a formaciones que, aunque contienen agua en cantidades variables, la transmiten muy lentamente. Sin embargo, a pesar de su baja transmisividad, los acuitardos desempeñan un papel clave en el comportamiento geohidrológico de los acuíferos, ya que influyen en el almacenamiento, la recarga y el flujo del sistema. El conocimiento de un acuífero requiere comprender su zona de recarga, su estructura interna, los procesos fisicoquímicos que ocurren en su interior y los mecanismos de descarga, ya sea a través de manantiales, ríos u otras formas de descarga artificial.

➤ ***Acuíferos en formaciones rocosas fracturadas:***

Según Custodio y Llamas (2001), dentro de las formaciones geológicas capaces de albergar acuíferos fisurados o fracturados se encuentran las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias consolidadas. Todas estas formaciones comparten una característica fundamental: su rigidez mecánica, que las hace propensas a fracturarse cuando se ven sometidas a esfuerzos tectónicos. Esta fragilidad estructural favorece el desarrollo de redes de fracturas que, en algunos casos, otorgan a la roca una permeabilidad suficiente para que sea considerada una formación acuífera.

Las fallas, en el contexto de aguas subterráneas, pueden producir una serie de efectos estructurales como el desplazamiento, truncamiento, repetición u omisión de capas geológicas. Esto tiene un impacto directo sobre la distribución y continuidad de los acuíferos. Una característica importante de estos acuíferos en medios fracturados es la presencia de la zona superficial altamente fracturada y meteorizada que suele conformar el acuífero somero. Las propiedades dependen de la litología, el clima y la topografía.

➤ ***Características de las fracturas y niveles acuíferos:***

Las fracturas y niveles acuíferos presentes en formaciones rocosas suelen funcionar como acuíferos confinados. La mayoría de estas fracturas tienen una orientación subvertical y se caracterizan por una alta transmisividad, aunque con valores bajos de coeficiente de almacenamiento.

En estos sistemas, el flujo de agua no sigue un patrón radial y, no se ajusta al comportamiento descrito por la ley de Darcy, sino presenta un comportamiento anisotrópico. La recarga puede producirse en los puntos donde las fracturas alcanzan la superficie, mediante fracturas secundarias. Estas estructuras tienen la capacidad de captar, almacenar y conducir el agua subterránea a través del macizo rocoso, facilitando su movimiento en profundidad (FCIHS, 2009).

➤ **Flujo de aguas subterráneas:**

En los sistemas geohidrológicos típicos se identifican tres tipos de flujo de agua subterránea: local (somero), intermedio y regional. Cuando el relieve es accidentado, suelen formarse múltiples sistemas locales, donde el agua de lluvia se infiltra y descarga dentro del mismo valle. Sin embargo, en ciertos casos, parte del agua que se infiltra puede descargar en otro valle cercano, situado a un nivel más bajo, lo que da lugar a un sistema de flujo intermedio. Por otro lado, los sistemas regionales implican trayectorias mucho más profundas y extensas, con flujos que generalmente se inician en las zonas más elevadas de la cuenca y terminan descargando en sectores más bajos, como ríos o manantiales (Tóth, 2000). En la Figura 8 se observa una representación de la magnitud de flujos subterráneos de los sistemas local (somero), intermedio y regional.

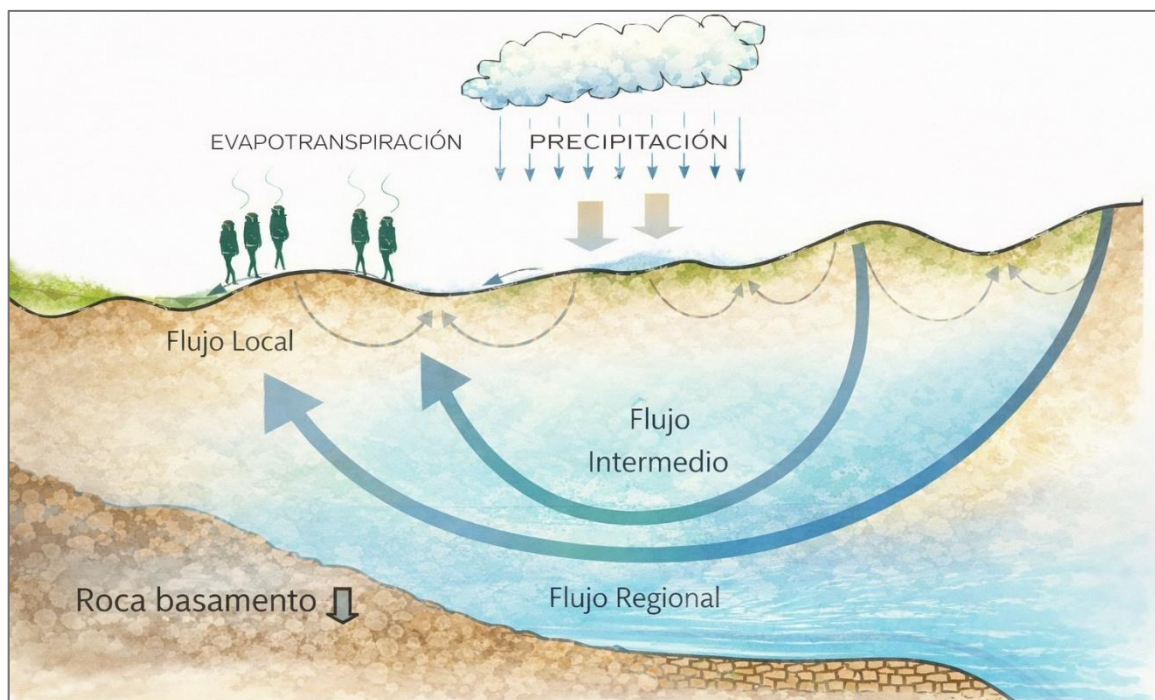


Figura 8. Sistemas de flujo subterráneo: local, intermedio y regional.
Fuente: Modificado de Tóth, (2000).

2.2.8. Parámetros Hidráulicos del Acuífero

Son propiedades que describen el comportamiento del flujo a través del acuífero. Según INGEMMET (2002), los principales son:

➤ **Gradiente Hidráulico (I):**

El gradiente hidráulico es un concepto esencial en hidrogeología, ya que permite comprender tanto la dirección como el comportamiento del flujo subterráneo. Se refiere a la diferencia entre los potenciales hidráulicos que existen entre dos puntos en el subsuelo, lo que en términos prácticos se traduce en una pendiente que el agua sigue al moverse por los poros de los materiales geológicos. Aunque el recorrido real del flujo puede ser curvo o inclinado, en la mayoría de los análisis se considera suficiente representarlo como una proyección horizontal sobre la superficie del terreno. Este gradiente no solo ayuda a determinar hacia dónde fluye el agua, generalmente desde zonas con mayor energía hacia otras con menor energía, sino que también es un factor clave para estimar su velocidad cuando se analiza junto a la conductividad hidráulica del medio.

➤ **Porosidad (p):**

La porosidad es la proporción de espacios vacíos dentro de un material geológico, en relación con su volumen total. En un acuífero, estos poros pueden almacenar agua, pero solo la porosidad efectiva permite su movimiento, por lo que es clave para entender las características del flujo subterráneo. A continuación, se describen las diferencias en porosidad según el tipo de formación geológica:

❖ *En Medios No Consolidados*

Son ejemplos las arenas, gravas y limos sueltos, la porosidad suele ser alta, porque los granos no están cementados ni compactados fuertemente. La relación entre el tamaño de grano y los valores de porosidad total y eficaz en este tipo de materiales se representa en la Figura 9.

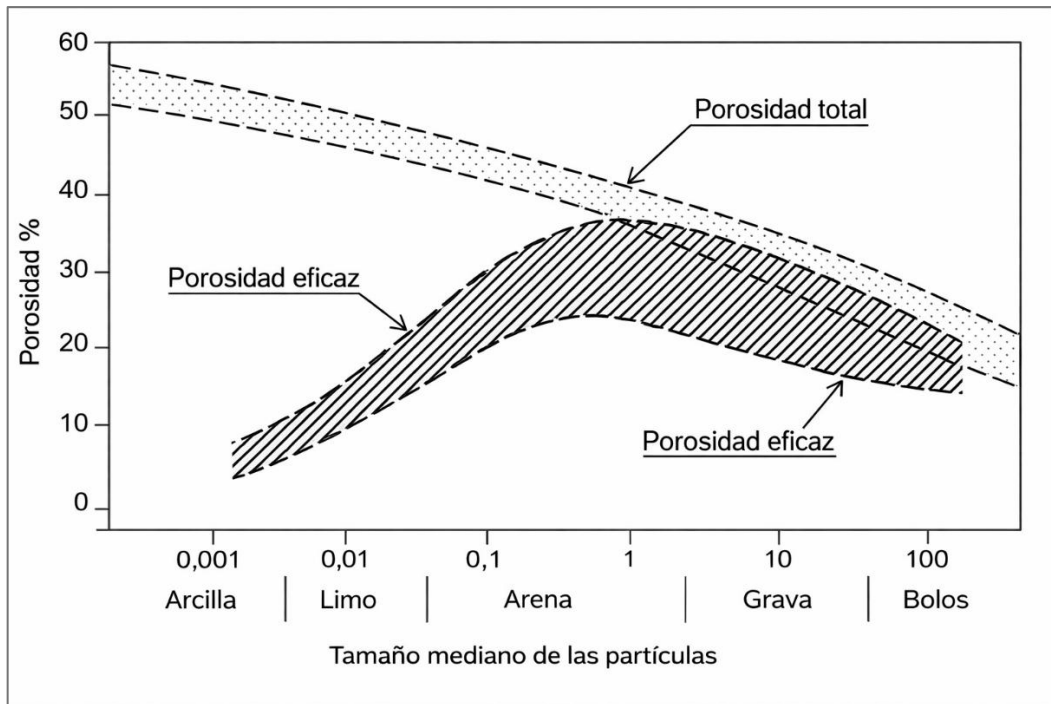


Figura 9. Porosidad en medios no consolidados – Relación entre granulometría y las porosidades total y eficaz.
Fuente: Custodio y Llamas, (1983).

❖ *En Cuencas Sedimentarias*

Es posible la coexistencia de porosidad primaria y secundaria por fisuración o disolución.

❖ *En Rocas Ígneas y Metamórficas*

Generalmente decrece en profundidad en función de su grado de alteración, con escenarios de doble porosidad, una matriz muy poco porosa, atravesada por zonas o lineamientos mucho más conductivos.

❖ *En Rocas Volcánicas*

Es muy variable y depende del tipo de roca, la solidificación del magma y la desgasificación. Los rangos de porosidad asociados a este tipo de materiales pueden consultarse en la Tabla 4.

Tabla 4. Rangos de valores Porosidad para diferentes tipos de suelo y roca.

Formación Geológica		n (%)	
		mín.	máx.
Depósitos No Consolidados	Grava	28	34
	Arena	35	50
	Limo	40	50
	Arcilla	40	60
	Arena de duna	40	45
	Loess	45	50
	Arenisca	15	30
Rocas	Caliza, dolomita	10	25
	Esquisto	0	10
	Lutita	5	20
	Till	30	35
	Roca cristalina densa	0	5
	Roca cristalina fracturada	5	10
	Roca cristalina meteorizada	20	40
	Basalto	5	30

Fuente: Modificado de Hamill & Bell, (1986).

➤ **Coeficiente de Almacenamiento:**

Un acuífero cumple una doble función: almacena agua subterránea y permite su movimiento a través del subsuelo. Para describir estas capacidades se utilizan diferentes parámetros. La capacidad de conducir el agua se evalúa mediante la conductividad hidráulica y la transmisividad, mientras que el almacenamiento se expresa a través del coeficiente de almacenamiento.

El coeficiente de almacenamiento indica cuánto volumen de agua puede liberar o absorber un acuífero por unidad de superficie cuando hay un cambio en la carga hidráulica, como un descenso en el nivel piezométrico. En acuíferos no confinados, suele coincidir con la porosidad efectiva, ya que el agua proviene del drenaje de los poros conectados.

➤ **Conductividad Hidráulica, Coeficiente de Permeabilidad (K):**

La conductividad hidráulica (K) depende tanto de las propiedades del medio poroso como del fluido. Para separar la influencia del fluido, se utiliza el coeficiente de permeabilidad intrínseca (k), que expresa solo la capacidad del material para transmitir agua, sin considerar la viscosidad ni la densidad del fluido.

Por otro lado, la permeabilidad es una magnitud direccional y su grado de disminución es menor en la dimensión horizontal que en la vertical. En Medios No Consolidados (como arenas, gravas, limos sueltos), es el parámetro hidrogeológico más variable en este medio, esta gran variabilidad se debe a factores como: la granulometría del material, la presencia de intercalaciones de capas finas dentro de formaciones. Esta diversidad de valores se puede observar en la Figura 10, donde se presentan los rangos típicos de conductividad hidráulica para distintos tipos de rocas no consolidadas (Custodio y Llamas, 1983).

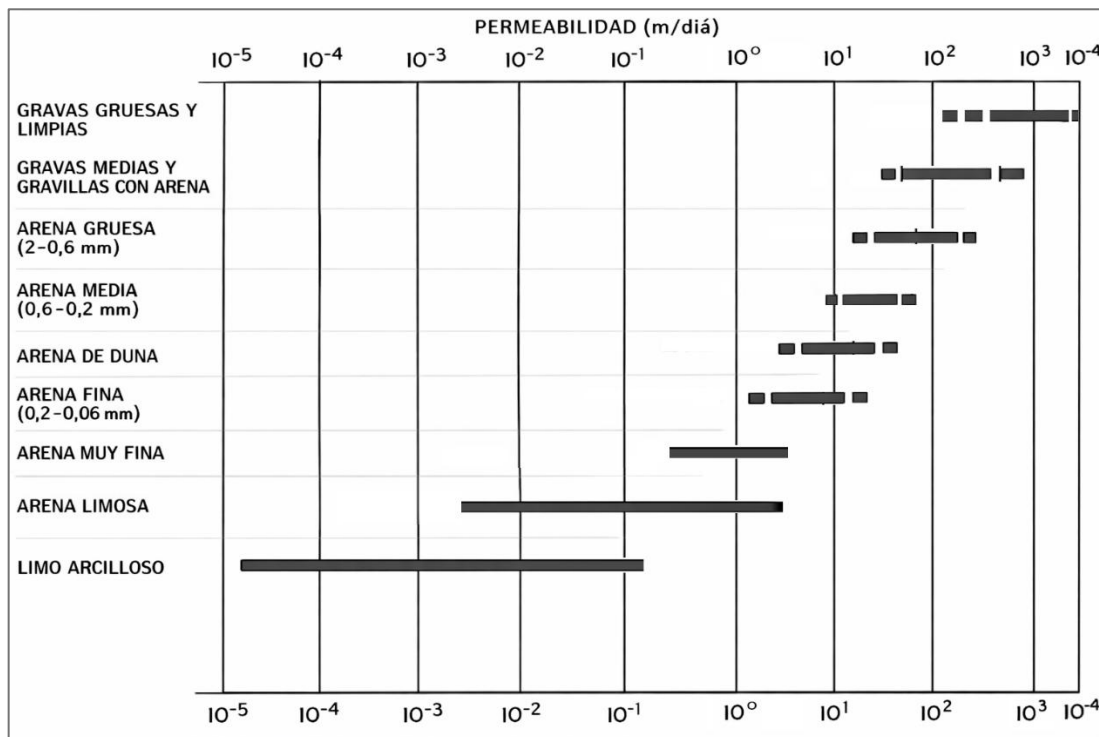


Figura 10. Rangos de conductividad hidráulica de distintos tipos de rocas no consolidadas.
Fuente: Custodio y Llamas, (1983).

A continuación, se describen las diferencias en conductividad hidráulica según el tipo de formación geológica:

❖ *En Cuencas Sedimentarias*

Los rangos son extremadamente amplios, sin embargo, hay una tendencia general de disminución en función de la magnitud con la profundidad.

❖ *En Rocas Ígneas y Metamórficas*

Generalmente puede crecer en función de la posición, rumbo y densidad de fracturas o diaclasas, provocando un escenario de alta heterogeneidad espacial.

❖ *En Rocas Volcánicas*

También varía ampliamente, influida por la estructura interna, la fracturación y la alteración mineralógica, siendo generalmente anisótropa.

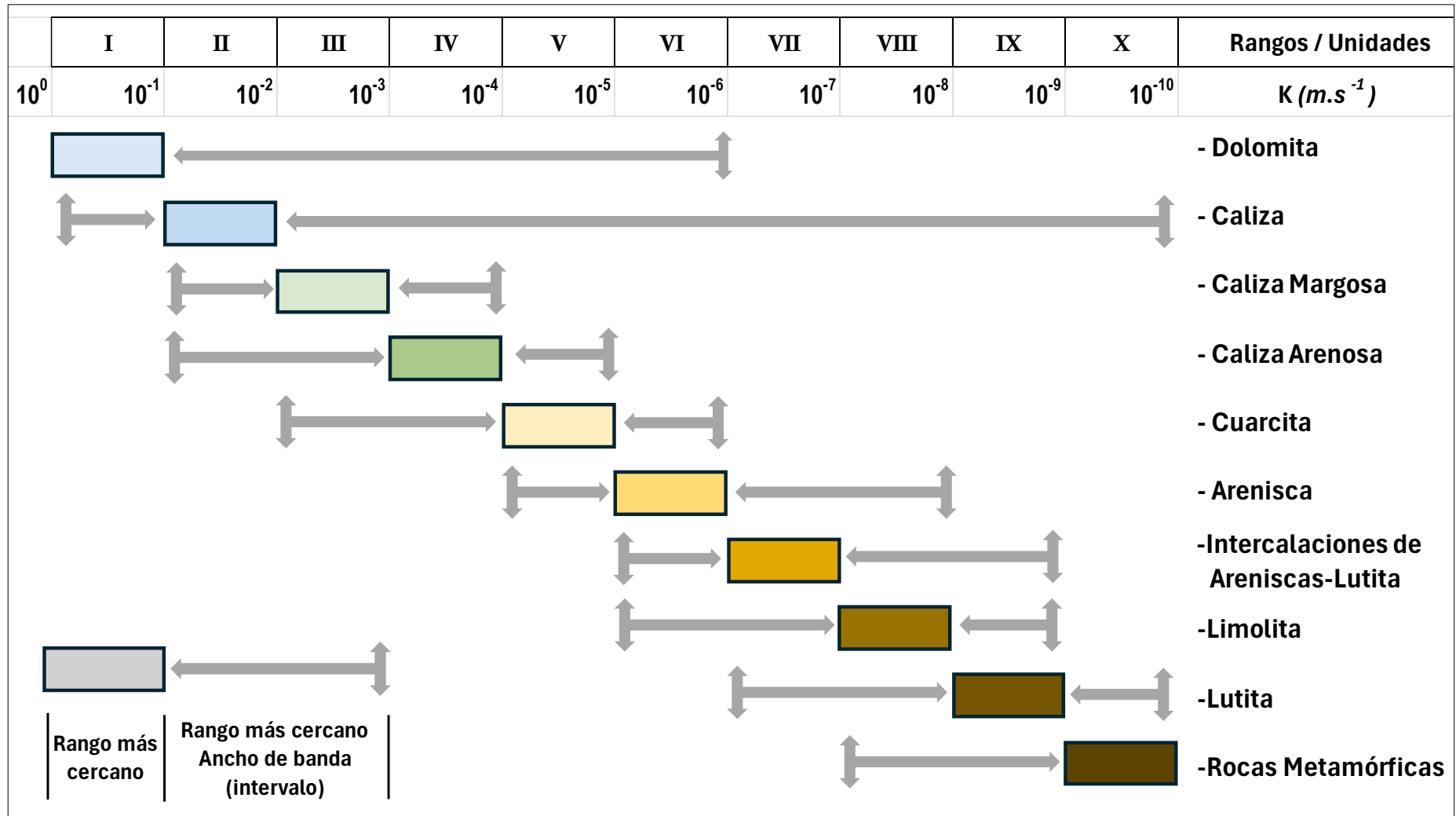
Masuch (2012), clasificó las formaciones rocosas y depósitos no consolidados según su función hidráulica, dividiéndolos en acuíferos y acuitardos. Cada categoría se subdivide según los valores límite de permeabilidad. Esta clasificación se detalla en la Tabla 5, mientras que los rangos característicos de permeabilidad o conductividad hidráulica en rocas fracturadas e intemperizadas se presentan en la Tabla 6.

Tabla 5. Clasificación de formaciones geológicas según su función hidráulica y permeabilidad.

Función Hidráulica	Acuitardos				Acuíferos		
Clases de Permeabilidad	7 Extra Bajo	6 Muy Bajo	5 Bajo	4 Moderado	3 Medio	2 Alto	1 Muy Alto
Valores Límites (m/s)	<	$1 \times 10E-8$	$1 \times 10E-7$	$1 \times 10E-5$	$1 \times 10E-4$	$1 \times 10E-3$	$1 \times 10E-2$

Fuente: Modificado de Masuch, (2012).

Tabla 6. Rangos de permeabilidad o conductividad hidráulica en rocas fracturadas / intemperizadas.



Fuente: Modificado de Masuch, (2012).

➤ **Transmisividad (T):**

La transmisividad es un parámetro hidrogeológico que expresa la capacidad de un acuífero para transmitir agua a lo largo de su sección saturada. Se define como el producto de la conductividad hidráulica del material por el espesor saturado del acuífero, y se expresa en unidades de metros cuadrados por segundo (m^2/s). Este valor representa el caudal de agua que puede fluir horizontalmente a través de una franja vertical de un metro de ancho del acuífero, bajo un gradiente hidráulico unitario. Cuanto mayor sea la transmisividad, mayor será el volumen de agua disponible para ser extraído o movilizado.

2.2.9. Interacción Acuífero – Manantial

Según Tóth (2000), los manantiales surgen de manera natural como puntos de descarga del agua subterránea, resultado de una interacción compleja entre diversos factores. Entre ellos destacan los procesos hidrodinámicos, el ambiente geológico, el sistema de flujo, así como el tiempo y la intensidad de la interacción agua-roca. A lo largo de su trayectoria, el agua experimenta una evolución química significativa, y su descarga a la superficie está controlada principalmente por la topografía y la geometría del sistema de agua subterránea. El proceso de circulación del agua puede activar diversos procesos como precipitación de minerales por cambios en presión o temperatura, la concentración de sales por evaporación y la transformación química del agua por contacto. Estas condiciones particulares también favorecen el desarrollo de una vegetación con alto contenido de humedad, convirtiendo a los manantiales en expresiones visibles no solo de la dinámica interna de los acuíferos, sino también de la íntima conexión entre el agua subterránea y el paisaje.

➤ **Sistemas de Agua Subterránea**

Según Trcek y Zojer (2010), en distintos ambientes geológicos, especialmente en formaciones rocosas carbonatadas y volcánicas, pueden coexistir sistemas de flujo subterráneo somero y profundo. El sistema somero está compuesto por flujos de infiltración reciente, que circulan principalmente a través de fisuras y fracturas. Se

caracteriza por tiempos de residencia cortos, lo que lo hace especialmente vulnerable a la contaminación y sensible a variaciones climáticas, como los eventos de lluvia. En contraste, el sistema profundo abarca flujos que circulan por zonas saturadas a mayor profundidad. En este caso, la interacción agua-roca ocurre a lo largo de periodos más prolongados, que pueden ir desde varios años hasta décadas, lo que da lugar a procesos hidrogeoquímicos más complejos.

➤ ***Tipos de Manantiales***

Los manantiales son fuentes naturales de agua subterránea que emergen a la superficie, comúnmente en zonas montañosas o de alta precipitación. El agua, proveniente de acuíferos, es valorada por su pureza y ha sido utilizada desde tiempos antiguos como fuente principal para el consumo humano, sin embargo, su uso requiere una captación adecuada que garantice su protección y sostenibilidad; Las personas que viven en la zona, suelen conocer bien dónde surgen los manantiales. Suelen identificar estos puntos por señales como vegetación verde en época seca o pequeños estanques formados por el agua. Sin embargo, el primer flujo visible no siempre es la fuente real, ya que el agua puede circular de forma subterránea antes de emerger. La Figura 11 ilustra los distintos tipos de ocurrencia de manantiales, lo que ayuda a comprender mejor estos procesos naturales (Smet y Van Wijk, 2002).

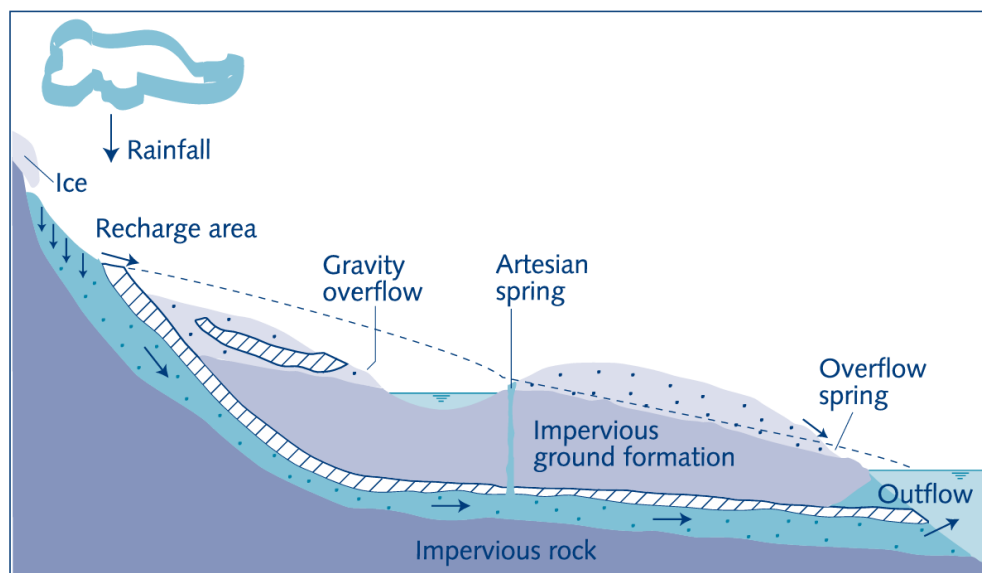


Figura 11. Ocurrencia de manantiales
Fuente: Smet y Van Wijk, (2002).

La clasificación de los manantiales depende de las condiciones en que el agua fluye, a continuación, algunos aspectos clave según Smet y Van Wijk (2002):

Algunos manantiales surgen en superficies por presión, en otros casos el agua emerge por fracturas o juntas en macizos rocosos.

La descarga de agua subterránea puede ser a través de filtraciones y fracturas en las rocas, con diferentes formas de salida, como orificios redondeados o fisuras profundas.

La clasificación según su origen más importante es: Los manantiales gravitacionales, en donde el agua fluye por gravedad. Los manantiales artesianos, donde el agua sale con presión por la energía acumulada en el acuífero. También, un subtipo son los manantiales que emergen en depresiones o en zonas de inundación:

❖ *Manantial de gravedad por desborde*

Se generan cuando el nivel del agua en un acuífero con presión (artésiano) supera la superficie del terreno (Ver Figura 12).

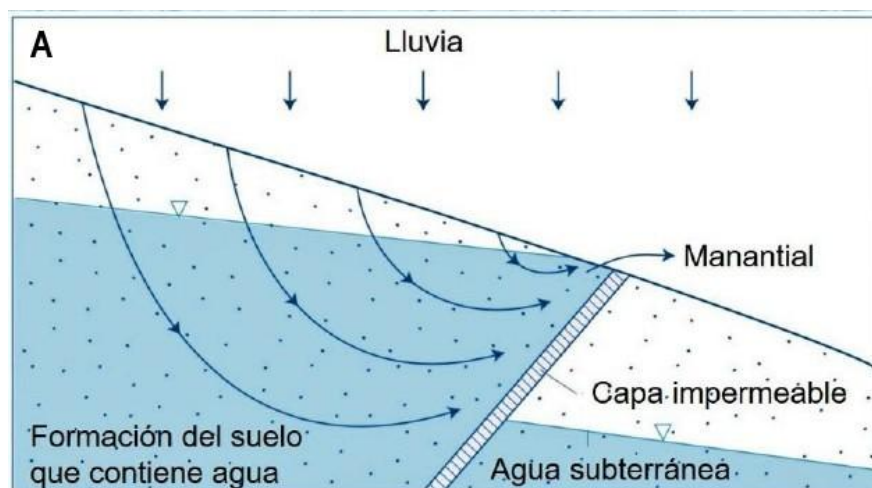


Figura 12. A) Manantial de gravedad por desborde.
Fuente: Smet y Van Wijk, (2002).

❖ *Manantial de gravedad por depresión*

Ocurren en acuíferos sin presión, donde el nivel freático está por debajo del nivel de la superficie, formando depresiones en el terreno (Ver Figura 13).

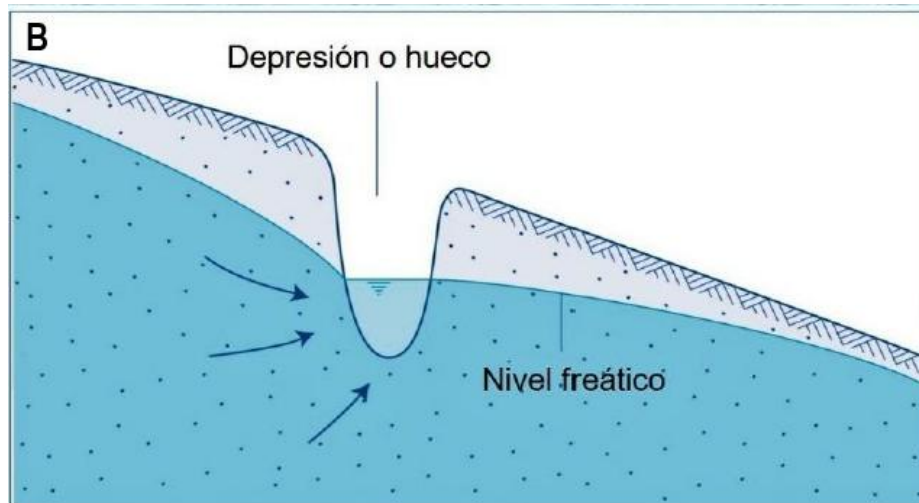


Figura 13. B) Manantial de gravedad por depresión.
Fuente: Smet y Van Wijk, (2002).

❖ *Manantial artesiano por fractura*

Se forman por fisuras en formaciones rocosas de baja permeabilidad, el agua emerge a la superficie por fracturas o fallas (Ver Figura 14).

❖ *Manantial artesiano por depresión*

Surgen a través de fisuras o erosión de una capa impermeable, formando puntos de descarga, se dan típicamente en formaciones altamente fracturadas (Ver Figura 14).

❖ *Manantial artesiano por desborde*

Ocurren en zonas donde la recarga del acuífero es considerable y la presión empuja el agua hacia la superficie, descargando en lugares alejados de la fuente de recarga (Ver Figura 14).

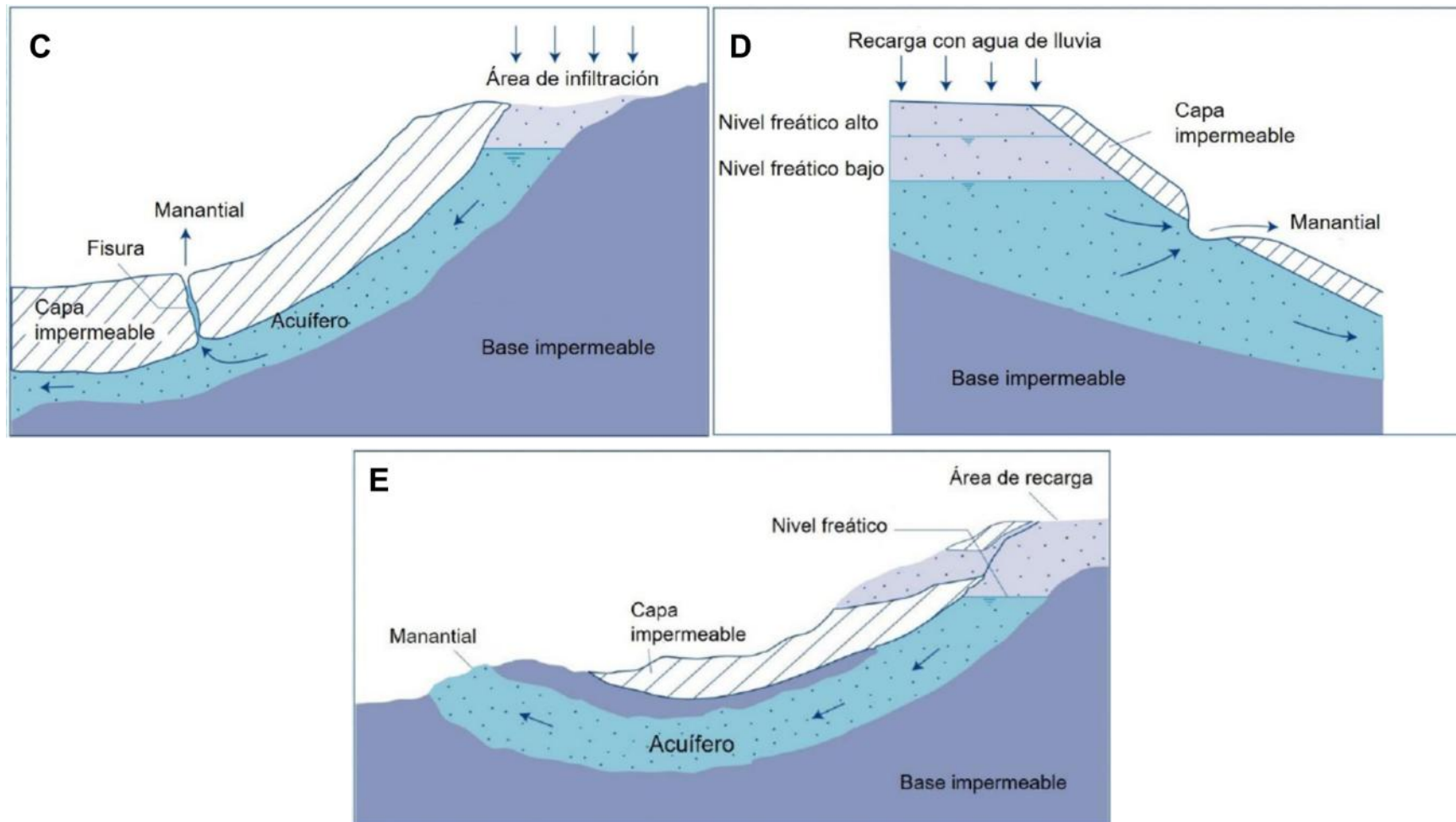


Figura 14. C) Manantial artesiano por fractura, C) Manantial artesiano por depresión, D) Manantial artesiano por desborde.
Fuente: Smet y Van Wijk, (2002).

➤ **Factores Fisicoquímicos**

La fisicoquímica de un manantial según White (2010), está condicionada por el equilibrio químico con los minerales de la roca donde circula, los procesos de disolución, precipitación e intercambio iónico.

Los parámetros fisicoquímicos como el pH, conductividad eléctrica (CE), temperatura (T°), sólidos disueltos totales (TDS), y el potencial redox (ORP) son indicadores clave para la interpretación conceptual de la interacción acuífero-manantial. A continuación, se destacan algunos aspectos clave según Hem (1985):

- ❖ El pH varía entre condiciones ácidas en ambientes volcánicos activos (<5) hasta valores alcalinos (>8) en ambientes carbonatados, influenciado por la presencia de CO_2 disuelto y procesos de desgasificación.
- ❖ La conductividad eléctrica (CE) y los sólidos totales disueltos (TDS) tienden a ser bajos en manantiales de acuíferos silicatados poco alterados, y altos en sistemas profundos o salinos, donde se ha acumulado una carga iónica significativa.
- ❖ La temperatura del agua subterránea está relacionada con la profundidad del flujo y el gradiente geotérmico. Manantiales fríos provienen de sistemas someros, mientras que temperaturas superiores al promedio del medio sugieren circulación profunda.
- ❖ El ORP puede inferirse a partir de la presencia de ciertos compuestos redox-sensibles como Fe^{2+} o H_2S en ambientes reductores, y Fe^{3+} o NO_3^- en condiciones oxidantes. En este contexto, los manantiales con bajo ORP posiblemente suelen estar asociados a sistemas profundos, pobres en oxígeno y con tiempos de residencia prolongados, mientras que los de alto ORP corresponden a flujos someros, bien oxigenados y de corta residencia.

➤ ***Influencia del Ambiente Geológico***

La composición fisicoquímica del agua de manantial según Tóth (2000), también está determinada por el tipo de ambiente geológico del acuífero:

- ❖ En acuíferos carbonatados, las aguas suelen ser ricas en bicarbonato de calcio y magnesio, con pH alcalino y una química dominada por procesos de disolución de carbonatos.
- ❖ En acuíferos silicatados, el contenido de sólidos disueltos es menor, dominan las especies de sílice y los iones alcalinos (Na^+ , K^+), y el pH es ligeramente ácido o neutro.
- ❖ En ambientes volcánicos activos, las aguas pueden presentar características extremas: alta temperatura, bajo pH, elevados TDS, gases disueltos como CO_2 y H_2S , y una química dominada por aniones como SO_4^{2-} o Cl^- .
- ❖ En medios kársticos, las geoestructuras permiten una conexión directa entre la superficie del terreno y acuífero, existe alta variabilidad espacial y temporal de los parámetros fisicoquímicos, especialmente durante eventos de lluvia. Es común que exista interacción entre el agua subterránea del sistema somero y profundo, lo que da lugar a una composición química particularmente compleja.

Esta dinámica de intercambio vertical y transporte de solutos puede visualizarse en la Figura 15, que representa el flujo subterráneo en sistemas acuífero–acuitardo dentro de una cuenca.

En este tipo de ambientes, esta metodología para estimar la recarga anual es el método APLIS, desarrollado inicialmente en España y posteriormente aplicado con éxito en distintas regiones de América Latina, como México y Perú (Palma, et al., 2022).

El nombre APLIS proviene de las cinco variables que considera en su formulación original: Altitud (A), Pendiente (P), Litología (L), Infiltración preferencial (I) y Suelo (S). Cada una se clasifica en intervalos con valores que van del 1 al 10, reflejando el grado de influencia que ejercen sobre la infiltración del agua. Por ejemplo, una litología muy permeable, como la caliza kárstica, tiende a recibir puntuaciones altas, mientras que los materiales arcillosos obtienen valores bajos. En versiones modificadas del método, como las aplicadas en algunos contextos locales, se ha incorporado una sexta variable: la Condición de Acuífero (CA), evaluada en una escala de 0 a 1 (Marina, et al., 2022). La fórmula utilizada para la estimación es:

$$R = \frac{(A + P + 3L + 2I + S)}{0.9} CA$$

El resultado es un porcentaje de la precipitación anual que se la recarga el acuífero. Además, el método se apoya en sistemas de información geográfica (SIG) para representar espacialmente la recarga.

Lo interesante del método APLIS es su capacidad de adaptarse al contexto local. Por ejemplo, en México fue necesario modificar los intervalos altitudinales originalmente propuestos, ya que la zona de estudio presenta elevaciones que superan los 5,000 msnm (Marina, et al., 2022).

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Esta sección reúne los conceptos técnicos fundamentales:

Geohidrología. Es la rama de las geociencias que se encarga del estudio del agua subterránea, su distribución, movimiento y relación con las formaciones geológicas (Dávila, 2011).

Litomorfoestructuras. Se refiere a la combinación de características litológicas, morfológicas y estructurales de un área (Dávila, 2011).

Cuenca Hidrográfica. Área delimitada por divisorias topográficas, en la que todas las aguas escurren hacia un mismo cauce principal (Dávila, 2011).

Ciclo Hidrológico. Conjunto de procesos naturales mediante los cuales el agua circula entre la atmósfera, la superficie y el subsuelo. El balance hidrológico es la evaluación cuantitativa de las entradas y salidas dentro de un sistema hidrológico (Dávila, 2011).

Infiltración. Proceso mediante el cual el agua procedente de la precipitación o escorrentía ingresa en el suelo y recarga los acuíferos (Dávila, 2011).

Acuífero. Formación geológica capaz de almacenar y transmitir agua subterránea en cantidades suficientes para su aprovechamiento humano (Dávila, 2011).

Manantial. Punto natural de descarga donde el agua subterránea aflora a la superficie, como resultado de condiciones geológicas o topográficas (Dávila, 2011).

Zonas de Recarga. Áreas donde el agua de lluvia o escorrentía superficial se infiltra en el subsuelo, alimentando directamente al acuífero (Dávila, 2011).

Sistema Somero. Componente del flujo subterráneo caracterizado por aguas recientes que circulan a poca profundidad, con tiempos de residencia cortos (Dávila, 2011).

Sistema Profundo. Flujo subterráneo que se desarrolla a mayor profundidad, con tiempos de residencia largos y procesos geoquímicos más complejos debido a una interacción agua-roca (Dávila, 2011).

Sistema Kárstico. Terreno formado principalmente por la disolución de rocas carbonatadas como las calizas, que da lugar a la formación de cavernas, dolinas, sumideros y una alta permeabilidad secundaria (Dávila, 2011).

Conductividad Hidráulica. Propiedad de un material geológico que expresa su capacidad para permitir el paso del agua a través de sus poros o fracturas (Dávila, 2011).

Parámetros Fisicoquímicos. Variables medibles del agua como el pH, la temperatura, la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales (TDS) y el potencial redox (ORP), que permiten conocer su calidad, origen y evolución (Dávila, 2011).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. GENERALIDADES

3.1.1. Ubicación Geográfica

La Subcuenca El Ronquillo se encuentra en la parte occidental del distrito de Cajamarca, en la Región del mismo nombre, en el norte del Perú. La unidad hidrográfica forma parte de la vertiente del Pacífico y está ubicada en un entorno geográfico típicamente andino, caracterizado por un relieve montañoso. La altitud varía entre los 2,800 y 3,950 msnm, con una altitud media de 3,380 msnm. La ubicación se presenta en el Plano 01 y los límites del entorno en la Tabla 7.

Tabla 7. Límites de entorno de la zona de investigación.

Puntos	Coordenadas UTM WGS84 - Zona 17S	
	Este	Norte
1	761,000.00	9,213,000.00
2	772,000.00	9,213,000.00
3	772,000.00	9,204,000.00
4	761,000.00	9,204,000.00

3.1.2. Ubicación Política

La Subcuenca el Ronquillo se ubica en la Región de Cajamarca, Provincia y Distrito de Cajamarca y abarca distintos Centros Poblados como Sexemayo, Capillanía, Ronquillo, Corisorgona, Chamis, Carhuaconga, Cushunga, Carhuaquero y Majadapampa. Su superficie aproximada es de 42.5 km² (Ver Plano 01).

Se presentan La Imagen Satelital en el Plano 02 y el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en el Plano 03. Estas representaciones permiten visualizar con mayor detalle las características físicas del territorio.

3.1.3. Accesibilidad

El acceso a la subcuenca es posible desde varios puntos de la ciudad de Cajamarca. Una de las rutas más utilizadas es la que parte desde la avenida Perú hacia el poblado de Urubamba, Corisorgona y Chamis, desde donde se extienden caminos afirmados y trochas hacia los distintos sectores como Ronquillo, Capillanía, Cushunga y Majadapampa. Se pueden observar la gran variedad de rutas de acceso en la Figura 16.

3.1.4. Clima y Vegetación

La subcuenca El Ronquillo presenta un clima templado de montaña, con temporadas de lluvias entre octubre y abril, y una estación seca de mayo a septiembre. La temperatura media anual oscila entre 12 °C y 14 °C, con máximas de hasta 24 °C y mínimas cercanas a 2 °C.

La vegetación combina cultivos temporales como maíz, papa y alfalfa en zonas agrícolas, con presencia de eucaliptos y pastizales andinos en áreas más elevadas.

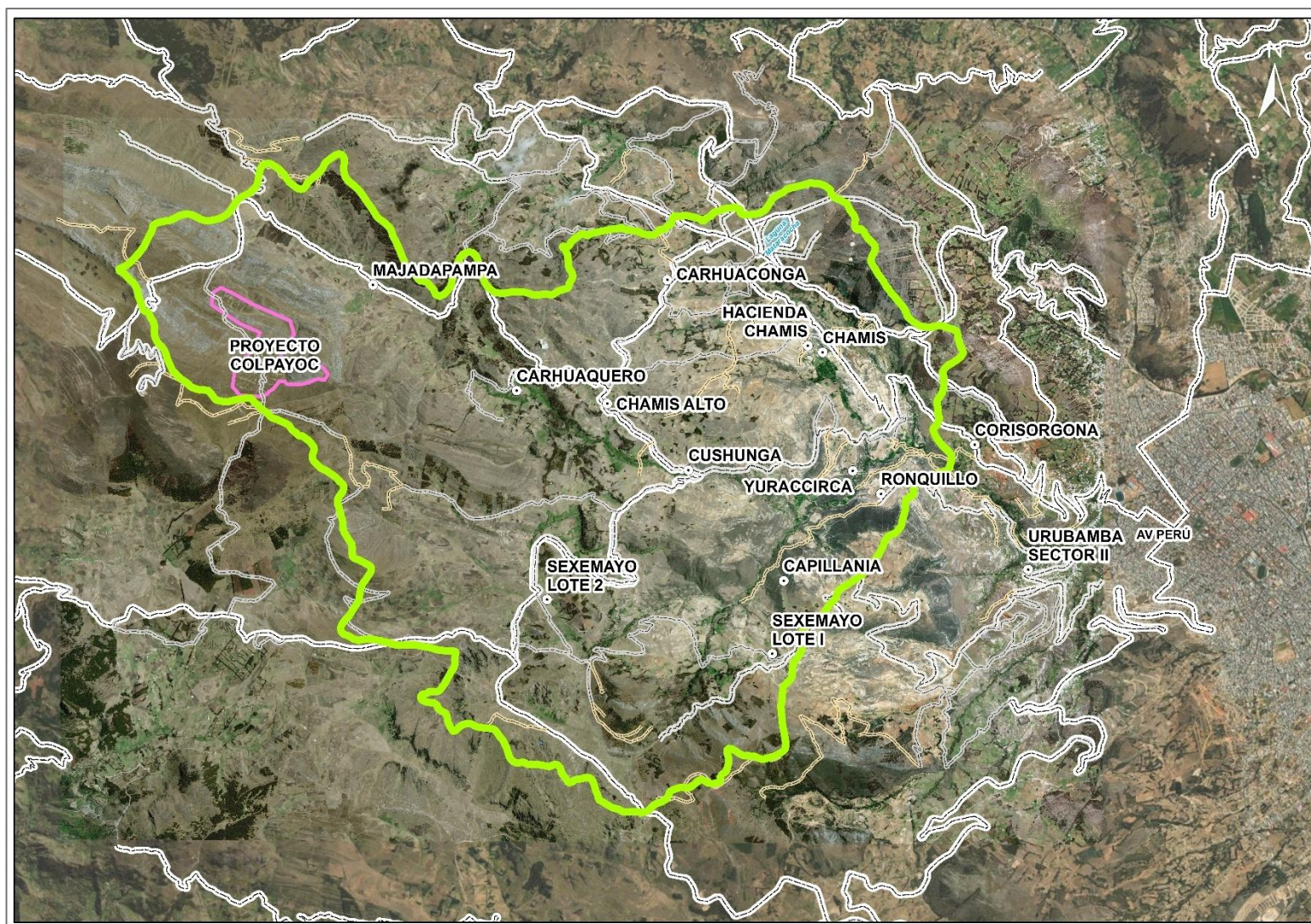


Figura 16. Accesibilidad desde la Ciudad de Cajamarca (Av. Perú) a la zona de investigación.
Fuente: Google Earth, (2025).

3.4. PROCEDIMIENTOS

3.4.1. Metodología

➤ *Tipo, Nivel, Diseño y Método de la Investigación*

La investigación se clasifica como aplicada porque analiza un sistema geohidrológico real y estratégico para Cajamarca, con el fin de comprender su funcionamiento y aportar información útil para la gestión del recurso hídrico; adopta un enfoque cuantitativo al medir parámetros fisicoquímicos del agua subterránea, estimar recarga, caracterizar litologías, estructuras y morfologías; presenta alcances exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo, ya que primero reconoce y caracteriza el sistema, luego describe sus unidades y procesos, posteriormente identifica relaciones entre litología, estructura, morfología, flujo subterráneo, y finalmente explica cómo la interacción de dichos factores controla la dinámica geohidrológica; además, se enmarca en un diseño no experimental porque no manipula las condiciones naturales de la subcuenca, sino que observa los procesos tal como ocurren; y emplea un método deductivo–inductivo, pues parte de conceptos teóricos y, a partir de los datos obtenidos, genera conclusiones que permiten comprender el comportamiento del sistema (inducción). En la Tabla 8 se muestra el resumen de la clasificación metodológica.

Tabla 8. Clasificación metodológica según el tipo de investigación.

Clasificación	Tipo de Investigación
Tipo	Aplicada
Enfoque	Cuantitativo
Alcances	Exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo
Diseño	No experimental
Método	Deductivo-Inductivo

Fuente: Hernández, (2014).

➤ *Población de Estudio*

Subcuenca el Ronquillo con un área aproximada de 42.5 km².

➤ ***Muestra***

Los puntos de control del cartografiado geológico-estructural, unidades morfogénicas, inventario de fuentes de agua superficial y subterránea; toma de parámetros fisicoquímicos y registro de caudales de afluentes en la subcuenca.

➤ ***Unidad de Análisis***

Litología; estructuras; unidades morfogénicas; acuíferos; manantiales; y parámetros fisicoquímicos del agua como; caudal, pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y potencial redox.

3.4.2. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para el desarrollo de la investigación se empleó un conjunto de técnicas para la obtención sistemática y confiable de la información. Se utilizaron la técnica de la observación, mediante el análisis documental, registro fotográfico, cartografiado geológico-estructural, y toma de parámetros fisicoquímicos in situ en las diferentes fuentes de agua superficial y subterránea.

Para registrar y sistematizar la información se utilizaron diversos instrumentos de recolección de datos, entre ellos:

- Tablas de registro geológico–geotécnico, utilizadas para caracterizar las propiedades de las discontinuidades en el macizo rocoso.
- Fichas de inventario de fuentes de agua, destinadas a documentar puntos de control en manantiales, puntos de descarga en aguas superficiales y otras características.
- Formatos para el cálculo de caudales mediante correntómetro, empleados en la medición directa del flujo superficial.
- Modelo Digital de Elevaciones (MDE), que facilitó la interpretación del geológica-estructural.
- Mapa geológico, necesario para corroborar y ajustar la información recogida durante el levantamiento de campo.

La información obtenida fue posteriormente procesada y organizada utilizando herramientas especializadas como Leapfrog, ArcGIS 10.5, Dips v7.0, Excel y Word, con el fin de integrar los datos obtenidos.

La metodología se desarrolló en tres etapas articuladas entre sí:

- Fase Preliminar de Gabinete, en la que se planificaron las actividades, se revisó y analizó información bibliográfica y cartográfica existente, y se elaboraron los planos base a partir de imágenes satelitales, cartas geológicas y modelos digitales de elevación.
- Fase de Campo, dedicada al levantamiento directo de datos mediante el reconocimiento en campo, cartografía geológica y estructural, identificación de unidades morfogénicas, caracterización de manantiales, toma de parámetros fisicoquímicos y el aforo de caudales.
- Fase Final de Gabinete, en la que se integró, procesó e interpretó toda la información obtenida usando software especializado, analizar el comportamiento geohidrológico y sustentar las conclusiones del estudio.

3.4.3. Equipos y Materiales

Para el desarrollo del trabajo de campo fue necesario contar con diversos equipos y materiales (Ver Tabla 9), que permitieron realizar un adecuado levantamiento geohidrológico, toma de datos y registro de información. A continuación, se detallan los principales equipos y materiales utilizados:

Tabla 9. Principales equipos y materiales utilizados en la investigación.

Nº	Equipos y Materiales	Función
1	Elementos de seguridad personal	Protección personal durante las actividades de campo.
2	Imágenes satelitales y mapas temáticos (geología y topografía)	Planificación, interpretación geológica y análisis del relieve.
3	Cinta métrica retráctil de 5 metros	Medición de espesores y distancias cortas.

Nº	Equipos y Materiales	Función
4	GPS marca GARMIN	Registro preciso de coordenadas en campo.
5	Punzón con punta de diamante	Evaluar dureza y resistencia de rocas.
6	Lupa de geólogo	Observar minerales y texturas de rocas.
7	Picota de geólogo	Obtener muestras frescas de afloramientos rocosos.
8	Brújula tipo Brunton	Medir rumbos, buzamientos y orientaciones estructurales.
9	Solución de ácido clorhídrico	Identificar presencia de carbonatos mediante efervescencia.
10	Libreta de campo	Registrar anotaciones, esquemas y observaciones.
11	Formatos para toma de datos	Organizar datos geológicos y estructurales.
12	Cámara digital portátil	Documentar afloramientos y manantiales.
13	Guías para identificación de rocas	Clasificar rocas y reconocer minerales.
14	Multisensor portátil para parámetros físicoquímicos (temperatura, pH, conductividad, TDS, ORP)	Medición de pH, temperatura, conductividad, TDS y ORP del agua.
15	Jarras y cubetas plásticas	Recolectar muestras de agua.
16	Correntómetro medición de caudal	Medir caudales en ríos y quebradas.

3.4.4. Softwares

Para el desarrollo de la presente investigación se hizo uso de software especializado, con el objetivo de procesar, analizar y representar la información recopilada durante el trabajo de campo y gabinete. En primer lugar, ArcGIS fue empleado para la elaboración de mapas temáticos, permitiendo integrar información espacial y geológica de manera precisa. Asimismo, se utilizó Microsoft Excel para realizar cálculos, organizar datos y generar gráficos. Finalmente, se empleó Leapfrog Works visualización de datos en 3D.

3.5. LITOMORFOESTRUCTURAS

3.5.1. Estratigrafía

En la Subcuenca El Ronquillo se han identificado afloramientos de rocas volcánicas correspondientes al periodo Paleógeno, así como secuencias sedimentarias del periodo Cretácico. El reconocimiento geológico de estas unidades se llevó a cabo mediante trabajos de campo y revisión de fuentes bibliográficas, entre las que destacan: el boletín A31 “Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba. Hojas: 15-f, 15-g, 16-g” (Reyes, 1980), a escalas 1:100 000 y 1:50 000; así como estudios de detalle en diversos sectores, tales como “Caracterización Estructural del Sinclinal de Llullapuquio y su Relación con la Intrusión del Pórfido Colpayoc” (Requelme, 2021) y “Método de Investigación Geológico-Geotécnico para el Análisis de Estabilidad de Laderas por Deslizamiento, Zona Ronquillo-Corisorgona” (Rodríguez, 2016). A continuación, se describen de manera detallada las unidades estratigráficas reconocidas y se plasman con detalle en la Tabla 10.

La distribución de unidades estratigráficas se puede apreciar en el Plano Geológico-Estructural (Plano 07).

Tabla 10. Unidades Geocronológicas de la Subcuenca el Ronquillo.

UNIDADES GEOCRONOLÓGICAS									
ERA	PERIODO	ÉPOCA	EDAD	FORMACIÓN			INTRUSIVOS		
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Versiliano	Depósitos Cuaternarios	Depósito Coluvial	Qh-co			
					Depósito Aluvial	Qh-al			
					Depósito Fluvial	Qh-fl			
					Depósito Coluvio-Aluvial	Qh-co-al			
		Mioceno	Tortoniano	Discordancia angular			Pórfido Diorítico/ Granodiorítico	Po-di/g	
			Serravalliano	Volcánico Huambos	Complejo Volcánico Yanacocha	Nm-at			
			Langhiniano						
			Burdigaliano	Discordancia angular					
			Aquitano	Grupo Calipuy	Formación Porculla	Secuencias Andesíticas			Nm-and
			Chattiano			Roca del Centro Volcánico Rumiorcco			Po-ru
	NEÓGENO	Oligoceno	Rupeliano						
			Priaboniano						
	PALEÓGENO	Eoceno	Bartoniano						
			Luteciano						
	MESOZOICO	CRETÁCICO	Superior	Turoniano	Discordancia angular				
					Formación Cajamarca		Ks-ca		
				Cenomaniano	Grupo Quilquiñan		Ks-qm		
Grupo Pullucana					Formación Yumagual	Ks-yu			
Albiano			Grupo Crisnejas	Formación Pariatambo	Ki-pt				
				Formación Chúlec	Ki-ch				
			Formación Inca		Ki-in				
			Aptiano	Grupo Goyllarisquizga	Formación Farrat		Ki-f		

Fuente: Modificado de Herrera, (2012)

➤ **Depósitos Cuaternarios (No Consolidados)**

Los Depósitos Cuaternarios o Depósitos No Consolidados (Ver Foto 1) en la zona incluyen distintos tipos según su origen y dinámica. Los coluviales (Q-co) se forman al pie de laderas por acumulación local de gravas, cantos y bloques, sin transporte significativo y con escasa o nula matriz. Los aluviales (Q-al) se ubican en cauces y zonas elevadas, compuestos por gravas arenosas, bloques y pequeñas cantidades de limos y arcillas. Los fluviales (Q-fl) presentan gravas y arenas bien seleccionadas, con clastos subredondeados a angulosos y matriz arenosa-limosa, y se asocian a terrazas fluviales, especialmente en los ríos Ronquillo y Manzana. Finalmente, los coluvio-aluviales (Q-co-al) combinan características de ambos, con evidencia de inestabilidad como deslizamientos rotacionales, ligados a precipitaciones intensas y persistentes (Rodríguez, 2016).



Foto 1. Coordenadas: 9211079 N, 762648 E. Vista panorámica de un Depósito Cuaternario Coluvial, en una ladera compuesto por acumulaciones de gravas, cantos y bloques. Contacto discordante con calizas de la Formación Cajamarca.

➤ **Unidades Intrusivas**

❖ **Pórfido Diorítico-Granodiorítico (Po-di/gr)**

Esta unidad está conformada por cuerpos intrusivos de tipo Pórfido Diorítico y Granodiorítico, emplazados sobre rocas calcáreas pertenecientes a las Formaciones Cajamarca y Grupo Quilquiñán. Presentan textura porfirítica

hasta fanerítica, con tonalidades que varían de gris claro a gris verdoso. Presentan plagioclasa, cuarzo y minerales ferromagnesianos inmersos en una matriz de grano fino a medio.

Se observa un grado moderado de fracturamiento, y en algunos sectores se evidencian procesos de alteración hidrotermal, que han debilitado la roca hasta volverla deleznable, acompañados por una notable presencia de óxidos. Asimismo, se han identificado clastos de dacita con mineralización diseminada de pirita, lo que sugiere una posible actividad hidrotermal asociada posterior al emplazamiento (Ver Foto 2 y 3).



Foto 2. Coordenadas: 9211239 N, 763284 E. Vista panorámica de afloramiento de bloques de granodiorita con evidencia de alteración hidrotermal.

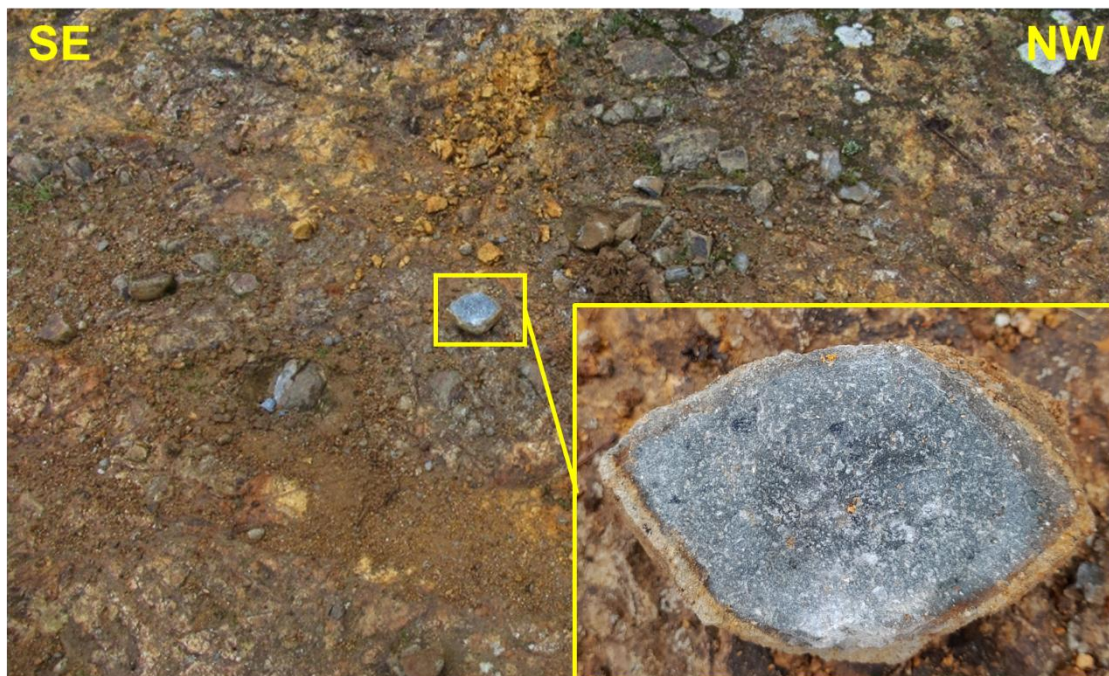


Foto 3. Coordenadas: 9211240 N, 763290 E. Vista panorámica de pequeños bloques de composición granodiorítica, fuertemente oxidados y con relictos de mineralización (pirita diseminada), emplazados dentro de una roca volcánica que muestra evidencias de fuerte alteración hidrotermal.

➤ **Volcánico Huambos**

❖ Complejo Volcánico Yanacocha – Secuencia Volcánica Atazaico (Nm-at)

Según Navarro (2012), la Secuencia Volcánica Atazaico está compuesta por depósitos de flujos piroclásticos, conformados por bloques y cenizas de tonalidades gris claro a blanquecinas, con fragmentos líticos de textura porfírica, en la Foto 4 se observa una toba volcánica de coloración blanquecina de composición riolítica. Su disposición estratigráfica muestra que sobreyace a las rocas carbonatadas de las Formaciones Yumagual, Grupo Quilquiñán y Formación Cajamarca.



Foto 4. Coordenadas: 9210385 N, 766267 E. Vista panorámica de afloramiento de tobas volcánicas riolíticas de coloración blanquecina, correspondiente a depósitos piroclásticos, asociado a eventos volcánicos explosivos del Mioceno.

➤ ***Grupo Calipuy: Secuencias Volcánicas de la Formación Porculla***

❖ **Secuencias Andesíticas (Nm-and)**

Esta unidad se localiza en la cabecera de la subcuenca, donde se encuentra depositada sobre las rocas carbonatadas de la Formación Cajamarca. De acuerdo con el contexto geológico regional, estas rocas serían parte del periodo Neógeno, en la época del Mioceno, probablemente relacionadas con el centro volcánico Atazaico.

Litológicamente, las rocas presentan una textura porfírica, caracterizada por fenocristales de plagioclasa y minerales máficos, principalmente hornblenda, en una matriz de composición andesítica. Además, se han identificado depósitos bloques y cenizas, lo que sugiere eventos volcánicos explosivos durante su formación como se observan en las tobas volcánicas presentadas en la Foto 5.

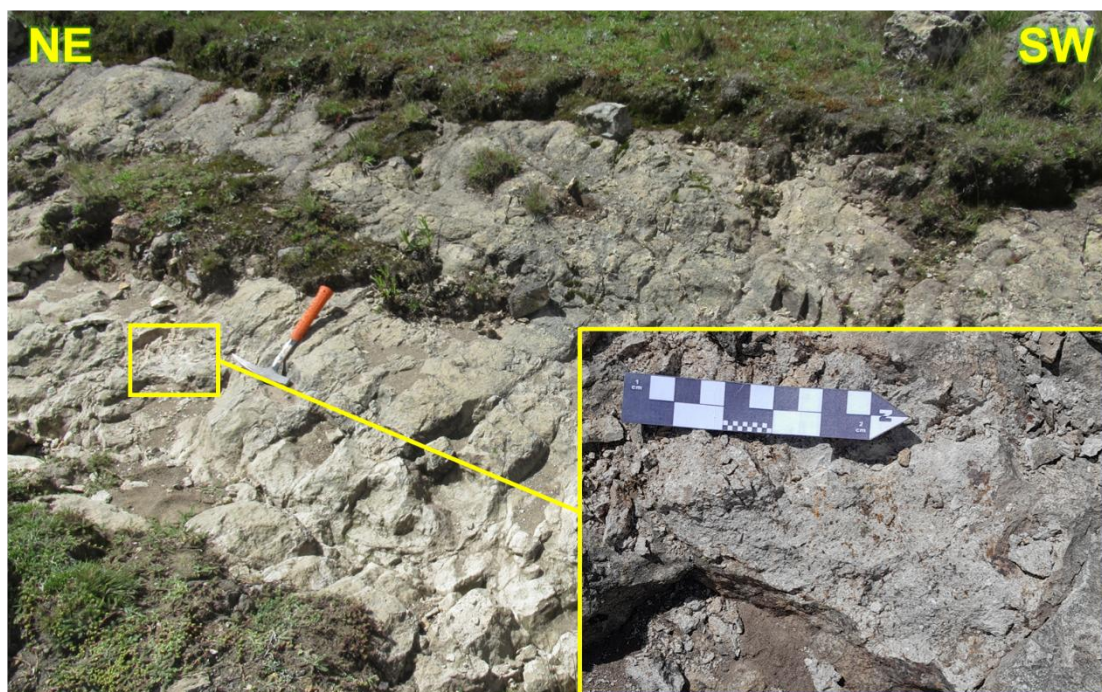


Foto 5. Coordenadas: 9211006 N, 762526 E. Vista panorámica de afloramiento de tobas andesíticas depositas sobre la Formación Cajamarca, asociado a eventos volcánicos explosivos en el Mioceno.

La presencia de un domo volcánico indica evidencia de actividad magmática local. Esta actividad pudo haber generado sistemas hidrotermales cuyos fluidos calientes circularon a través de las rocas circundantes, principalmente calizas, provocando su alteración. Durante este proceso, la sílice transportada por los fluidos generalmente precipita rellenoando grietas y cavidades con acumulaciones de sílice masiva como se observa en la Foto 6.



Foto 6. Coordenadas: 9211235 N, 763285 E. Vista panorámica de afloramiento de calizas silicificadas pertenecientes a la Formación Cajamarca.

❖ Roca del Centro Volcánico Rumiorcco (Po-ru)

Está conformada por depósitos piroclásticos compuestos principalmente por cenizas de tonalidades que varían del gris blanquecino al amarillento, de composición riolítica (Ver Foto 7). Según Navarro (2012), su secuencia registra episodios eruptivos más energéticos representados por flujos de lava andesítica y depósitos de bloques y cenizas asociados al colapso de domos volcánicos, los cuales aportan fragmentos líticos monomícticos de mayor tamaño.



Foto 7. Coordenadas: 9206838 N, 765710 E. Vista panorámica de afloramiento de tobas volcánicas blanquecinas de composición riolítica.

➤ **Formación Cajamarca (Ks-ca)**

Litológicamente, está compuesta principalmente por bancos gruesos plegados de calizas masivas gris oscuras de tipo mudstone hasta packstone, escasos fósiles y contenido de venillas de calcita; lo que sugiere un ambiente de deposición marino profundo y de baja energía, alejado del ambiente continental; su coloración azulada a gris oscura muy homogénea, se atribuye a su elevado contenido de carbonato de calcio. Estratigráficamente, presenta una secuencia de estratos delgados en la base que gradualmente evolucionan hacia estratos más gruesos en la parte superior. Sus afloramientos muestran marcadas morfologías kársticas, con pendientes pronunciadas. Las calizas grises se intercalan con delgados bancos de arcillolitas y margas, formando bancos gruesos (Ver Foto 8).

Esta unidad aflora en el eje de charnela del Sinclinal Colpayoc de orientación NW-SE. Especialmente en las zonas de Majadapampa y Carhuaquero. Sobreyace al Grupo Quilquiñán e infrayace en igual relación a la Formación Celendín. El espesor de esta unidad es aproximadamente entre 600 y 700 metros y su edad corresponde al Turoniano. Según datos propios de campo, es posible establecer una correlación con las Formaciones Jumasha y Ferrobamba.

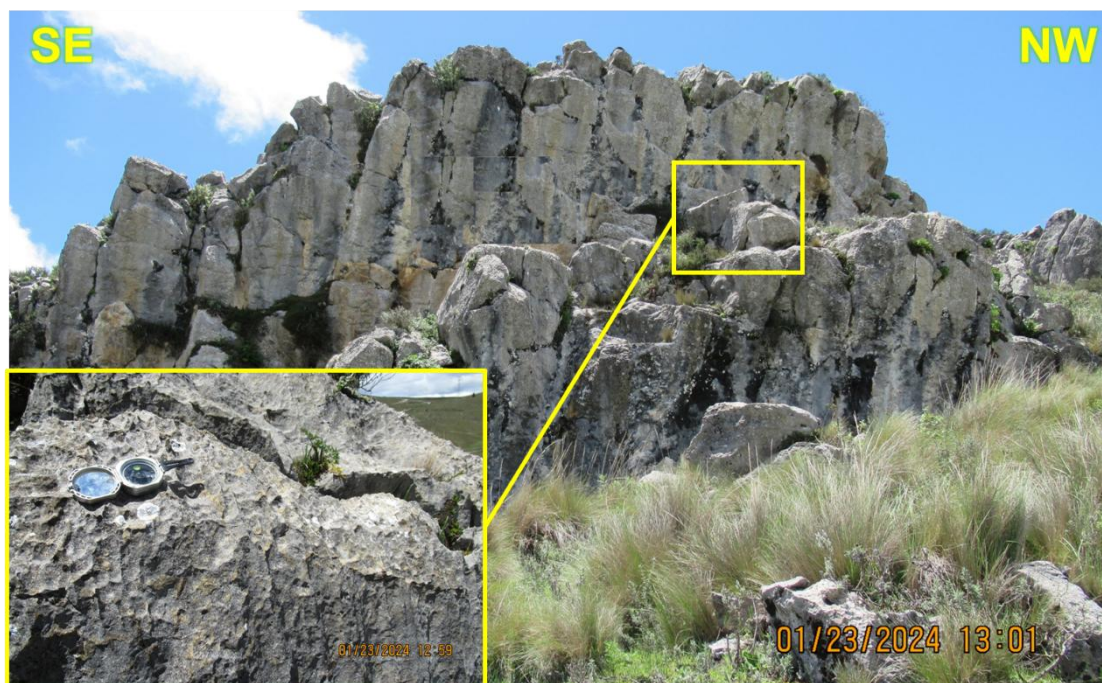


Foto 8. Coordenadas: 9211377 N, 763252 E. Vista panorámica de afloramiento de calizas masivas gris claras de la Formación Cajamarca, en la que se observa desarrollo de rasgos kársticos tipo lenares, producto de procesos de meteorización química.

➤ **Grupo Quilquiñan (Ks-qm)**

Litológicamente está constituida por una secuencia de calizas nodulares masivas de tonalidad gris oscuro, en las que se identifican diversos tipos de textura, como mudstone hasta packstone (Ver Foto 9), e intercalaciones de margas y limoarcillitas calcáreas con abundantes fósiles de *Exogyra*. En la base de la unidad, se presentan intercalaciones de estratos gruesos y capas más delgadas. Hacia la parte superior, los estratos tienden a incrementarse gradualmente en espesor. Esta disposición refleja un contacto gradacional con la Formación Cajamarca.

Esta unidad aflora principalmente cerca al eje de charnela del Sinclinal Colpayoc de orientación NW-SE. Especialmente en las zonas de Majadapampa, Carhuaquero, Cushunga y Chamis Alto, la franja de afloramiento es paralela al Río Cushunga. Sobreyace a la Formación Yumagual e infrayace en igual relación a la Formación Cajamarca. El espesor de esta unidad es aproximadamente 400 metros y su edad corresponde al Cenomaniano-Turoniano.

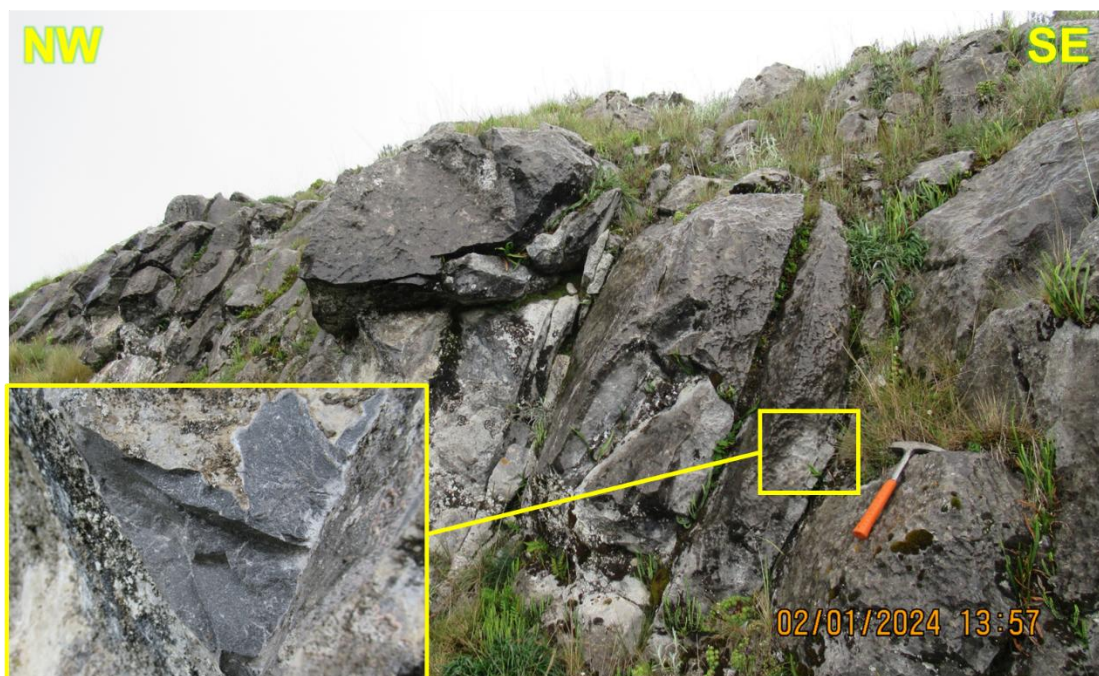


Foto 9. Coordenadas: 9208762 N, 764313 E. Vista panorámica de afloramiento de calizas gris oscuras del Grupo Quilquiñán, las cuales presentan textura de tipo wackestone.

➤ **Grupo Pulluicana: Formación Yumagual (Ks-yu)**

Litológicamente está conformada por una gran secuencia plegada de arcillolitas, margas y calizas masivas de grano fino de tonalidades gris amarillentas, dispuestas en estratos gruesos. Una de sus características más representativas es la presencia de capas calcáreas gruesas, con restos fósiles como bivalvos y exóginas y macrofósiles de ostreas, lo que sugiere un ambiente de deposición marino, sometido a condiciones de alta energía y aguas turbulentas. Las calizas presentan una clasificación según su textura que va desde mudstone hasta packstone; se observan intercalaciones de calizas grises, calizas arenosas, margas (calizas arcillosas), pizarras y limolitas de color amarillento, que en su mayoría presentan alto grado de fracturamiento y meteorización. Se identificaron horizontes con desarrollo de nódulos calcáreos (Ver Foto 10 y 11).

Esta unidad aflora principalmente en la zona intermedia de los flancos del Sinclinal Colpayoc cuya charnela sigue una orientación NW-SE, cerca al eje. Especialmente en las zonas de Majadapampa, Yuraccirca, Ronquillo, Sexemayo Lote 2 y Capillanía; la franja de afloramiento al SW atraviesa tramos del Río Balconcillo y es

paralela a la Quebrada Conga; hacia el NE comprende tramos del Río Ronquillo y Río Balconcillo. Sobreyace a la Formación Pariatambo e infrayace en igual relación al Grupo Quilquiñan. El espesor de esta unidad es aproximadamente 700 metros y su edad corresponde al Albiano-Cenomaniano.



Foto 10. Coordenadas: 9210373 N, 767844 E. Vista panorámica de afloramiento de bancos gruesos de calizas gris claras intercaladas con horizontes de calizas nodulares de la Formación Yumagual, además; se observa una falla normal que desplaza los estratos.



Foto 11. Coordenadas: 9210174 N, 767609 E. Vista panorámica de afloramiento de bancos gruesos de calizas arenosas intercalados con delgadas secuencias de arenitas finas.

➤ **Grupo Crisnejas: Formación Pariatambo (Ki-pt)**

Litológicamente esta unidad muestra una secuencia compuesta por arcillolitas y margas de tonalidades gris oscuro, alternando con capas delgadas y plegadas de calizas grises a negruzcas, las cuales emanan un característico olor fétido. Además, se observan niveles calcáreos que contienen nódulos de sílice o chert (Ver Foto 12 y 13). Las calizas presentan texturas que van desde wackestone hasta mudstone, con espesores variables, tamaño de grano puede ser grueso o medio, las calizas muestran una matriz finamente calcárea y fracturamiento intenso.

Su naturaleza bituminosa indica un ambiente euxínico (reductor), típico de aguas moderadamente profundas en la parte central de la cuenca. Esta unidad aflora principalmente a lo largo de los flancos del Sinclinal Colpayoc cuya charnela sigue una orientación NW-SE, especialmente en las zonas de Chamis, Ronquillo, Sexemayo Lote 1 y Sexemayo Lote 2; la franja de afloramiento al SW atraviesa tramos del Río Balconcillo y Quebrada Conga; hacia el NE comprende tramos del Río Ronquillo y Quebrada Rosapata. Sobreyace concordantemente a la Formación Chúlec e infrayace con la misma relación a la Formación Yumagual. El espesor de esta unidad es aproximadamente 150m a 200m; y su edad corresponde al Albiano.

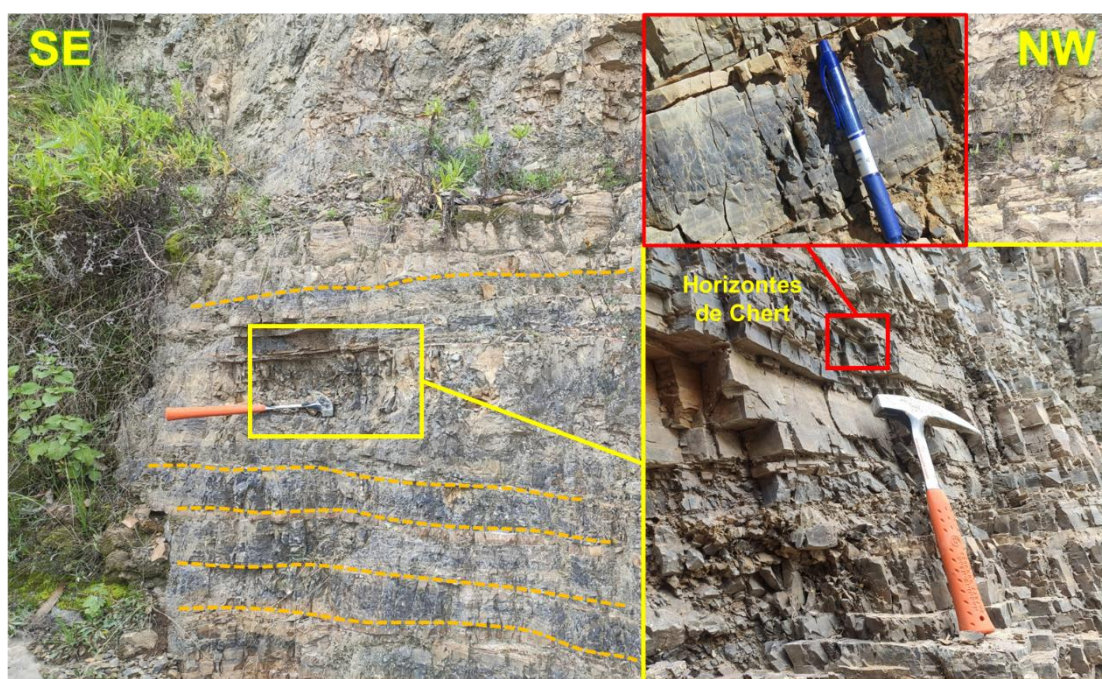


Foto 12. Coordenadas: 9210604 N, 768077 E. Vista panorámica de afloramiento de horizontes de chert intercalados con arcillolitas de la Formación Pariatambo.

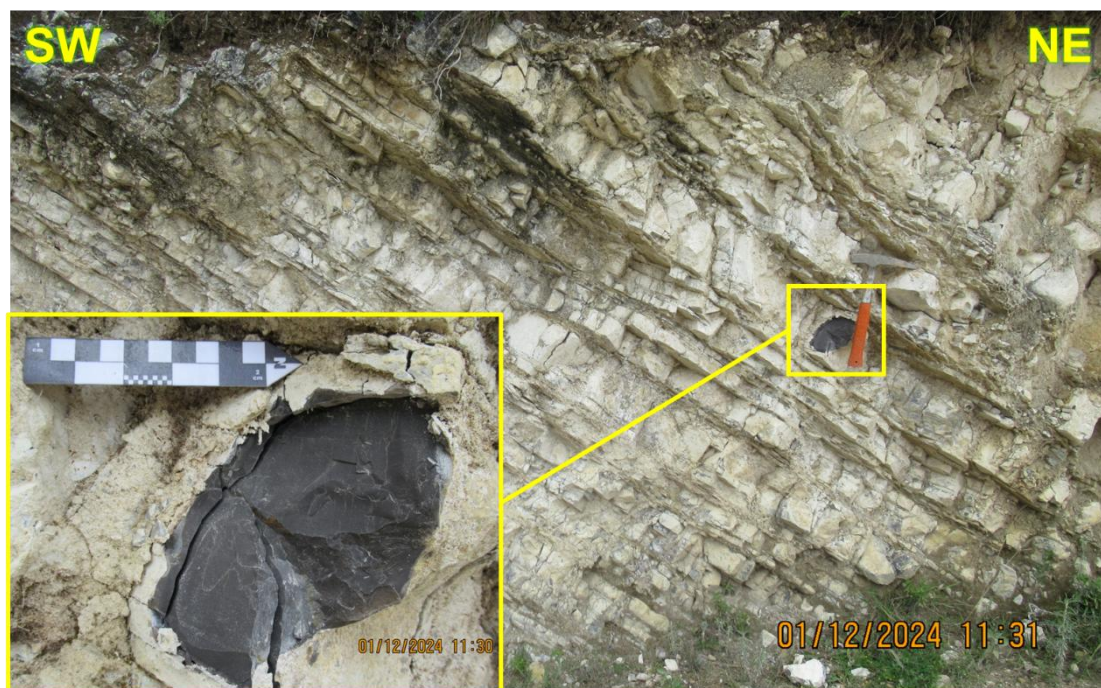


Foto 13. Coordenadas: 9209229 N, 770567 E. Vista panorámica; afloramiento de estratificación delgada de calizas gris-oscurs de la Formación Pariatambo.

➤ **Grupo Crisnejas: Formación Chúlec (Ki-ch)**

La Formación Chúlec está constituida principalmente por una secuencia fosilífera de calizas arenosas, arcillolitas calcáreas y margas; las cuales presentan una coloración crema amarillenta debido al intemperismo. Esta coloración terrosa distintiva facilita su reconocimiento en campo; asimismo, presenta bancos de estratos de aspecto nodular intercaladas con arcillolitas margosas con finas venillas de calcita (Ver Foto 14 y 15). En la base de la formación, las calizas son más delgadas, dispuestas en estratos menores a 50 cm y están intercaladas con arcillolitas grises verdosas; mientras que, hacia la parte superior, los estratos de calizas son más gruesos y pueden alcanzar hasta 2 m.

Esta unidad aflora principalmente a lo largo de los flancos del Sinclinal Colpayoc cuya charnela sigue una orientación NW-SE, especialmente en las zonas de Chamis, Corisorgona, Sexemayo Lote 1 y Sexemayo Lote 2; la franja de afloramiento al SW atraviesa grandes tramos de las quebradas Sexemayo I y II; hacia el NE comprende casi la totalidad del tramo del Río Manzana. Sobreyace concordantemente a la Formación Inca e infrayace con la misma relación a la

Formación Pariatambo. El espesor de esta unidad es aproximadamente 200 m; y su edad corresponde al Albiano.

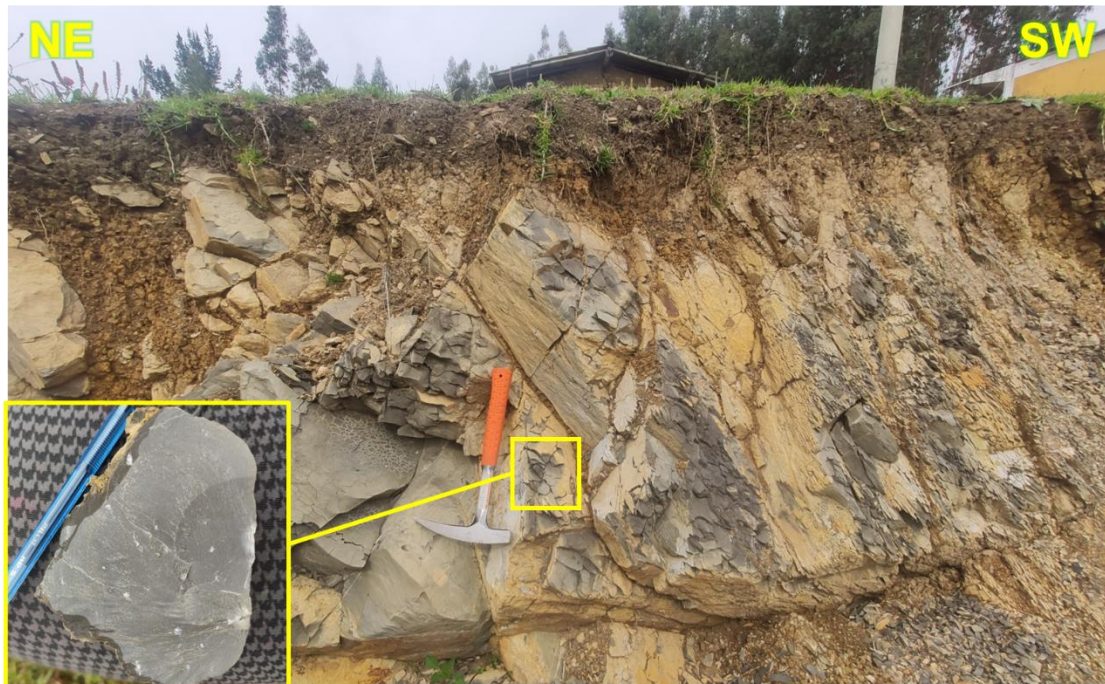


Foto 14. Coordenadas: 9210749 N, 769285 E. Vista panorámica de afloramiento altamente fracturado de calizas gris claras de la Formación Chúlec.

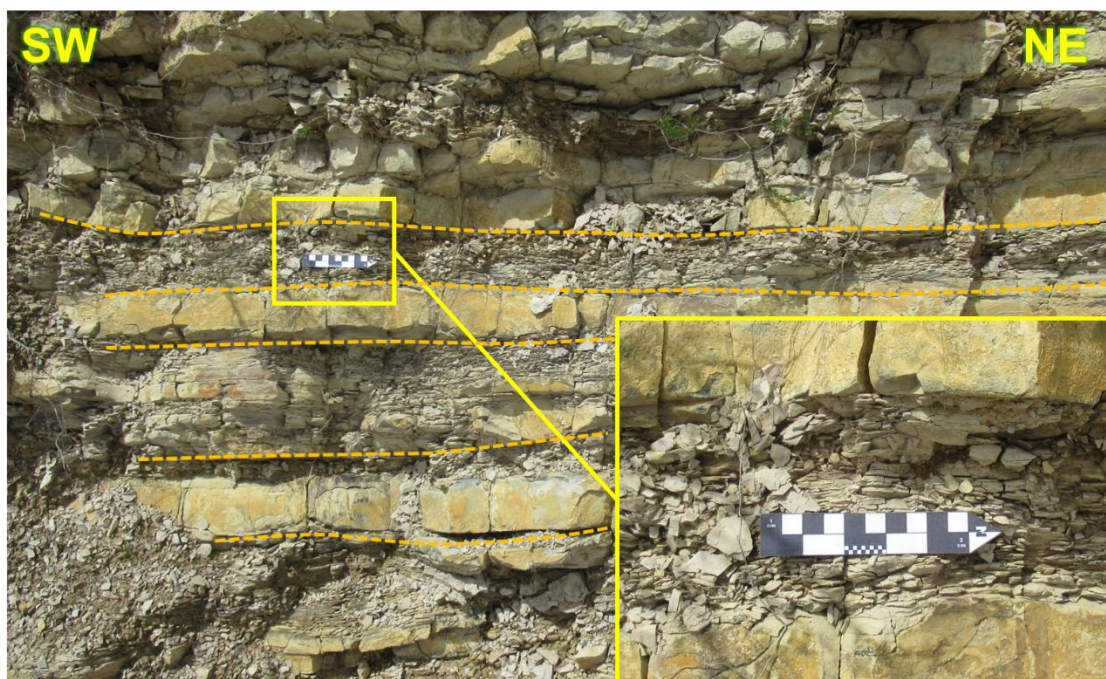


Foto 15. Coordenadas: 9209858 N, 770259 E. Vista panorámica de afloramiento de bancos gruesos de calizas, intercalados con delgadas secuencias de arcillolitas calcáreas.

➤ **Formación Inca (Ki-in)**

La Formación Inca está compuesta principalmente por intercalaciones de areniscas calcáreas y arcillolitas ferruginosas, con una coloración amarillenta en la superficie, que se torna rojiza en los alrededores de Cajamarca debido a procesos de oxidación y limonitización. También se observan areniscas rojizas de grano medio, además de calizas con óxidos de hierro, las cuales son indicativas de un ambiente de sedimentación continental, bien oxigenado (Ver Foto 16 y 17).

Esta unidad aflora principalmente a lo largo de los flancos del Sinclinal Colpayoc cuya charnela sigue una orientación NW-SE, especialmente en las zonas de Chamis y Sexemayo Lote 2; la franja de afloramiento al SW atraviesa las quebradas Sexemayo I y II; hacia el NE aflora en sentido paralelo al Río Manzana. Tiene un grosor aproximado de 100m a 150m. Sobreyace a la Formación Farrat e infrayace con igual relación a la Formación Chúlec, su edad corresponde al Aptiano-Albiano.



Foto 16. Coordenadas: 9206455N, 768356 E. Vista panorámica de afloramiento de areniscas ferruginosas altamente fracturadas de la Formación Inca.



Foto 17. Coordenadas: 9207245 N, 766553 E. Vista panorámica de afloramiento de calizas dolomitizadas (porcelanita), ubicadas en el contacto entre las Formaciones Inca y Chúlec.

➤ **Grupo Goyllarisquiza: Formación Farrat (Ki-f)**

Conformada por secuencias sedimentarias silicoclásticas, según Reyes (1980), litológicamente compuestas por estratos delgados de areniscas cuarzosas de tonalidad blanquecina, con tamaños de grano de medio a grueso en una matriz silícea; también es posible identificar intercalaciones delgadas de limolitas grises, cuyas dimensiones varían entre 5 y 10 centímetros (Ver Foto 18 y 19). El contacto entre las capas es gradacional, lo que sugiere una transición deposicional continua. Los estratos presentan espesores variables, desde algunos centímetros hasta cerca de los 2 metros, y muestran un nivel altamente fracturado, en algunos lugares se observa estratificación cruzada y marcas de oleaje.

La Formación Farrat presenta areniscas de origen regresivo, que evidencian la expansión de las facies propias de la plataforma hacia sectores más profundos de la cuenca, como resultado de un proceso de emersión vinculado al levantamiento del orógeno andino. Esta unidad aflora principalmente a lo largo de los flancos del Sinclinal Colpayoc, especialmente en las zonas de Chamis y Sexemayo Lote 2, la franja de afloramiento al SW atraviesa las quebradas Sexemayo I y II.

Suprayace con aparente concordancia a la Formación Carhuaz y subyace, con la misma relación, a la Formación Inca, gradualmente. El espesor de esta unidad es aproximadamente 500m; y su edad corresponde al Aptiano.

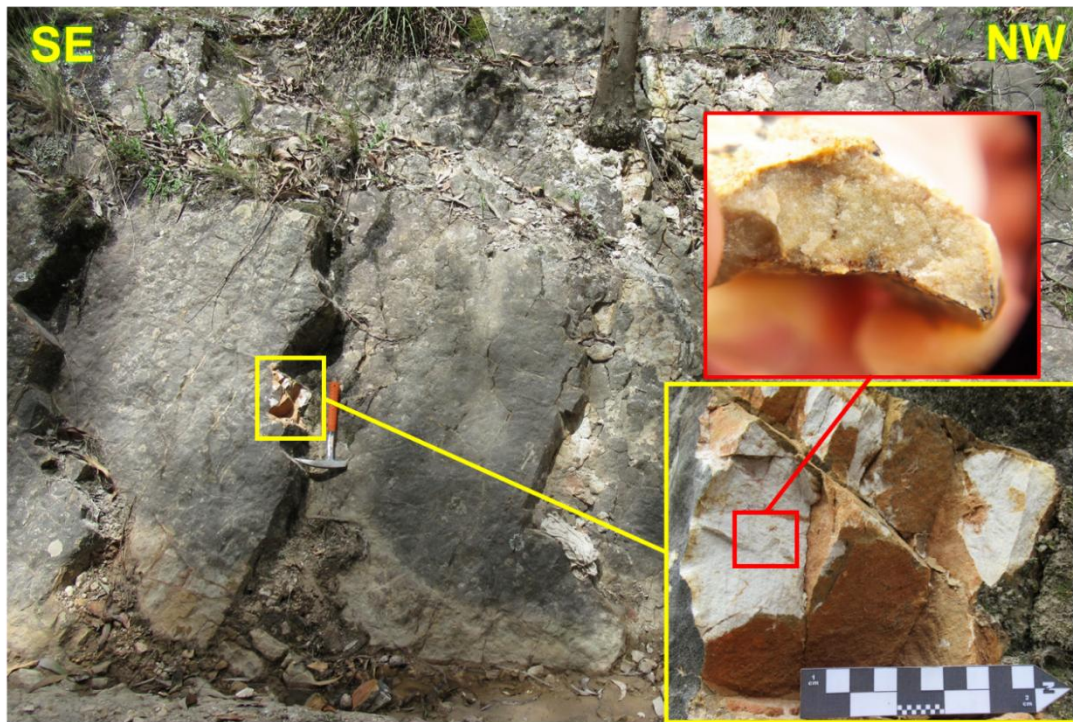


Foto 18. Coordenadas: 9210357 N, 770956 E. Vista panorámica de afloramiento de areniscas blancas de la Formación Farrat.



Foto 19. Coordenadas: 9207225 N, 766545 E. Vista panorámica de afloramiento de areniscas cuarzosas blancas con intercalación de limolitas altamente fracturadas de la Formación Farrat.

➤ **Yacimiento Colpayoc (*Pórfido Diorítico-Granodiorítico*)**

Es un pórfido de Au y Cu, emplazado en rocas sedimentarias intruidas por cuerpos félsicos y domos riodacíticos (De la Cruz, 2017). Según Park (2021), en el documento técnico del proyecto Colpayoc Gold Property (NI 43-101 Technical Report, 2021), la mineralización está relacionada a procesos hidrotermales que generaron alteraciones potásicas, fílicas y argílicas, principalmente en la denominada Zona Daylight, donde se ha definido un recurso mineral inferido de aproximadamente 305 mil onzas de oro, con leyes promedio de 0.48 g/t Au. Además de Daylight, existen otras dos zonas de interés: Montura (posible continuidad en profundidad) y Rayo Grande (potencial tipo Skarn). El proyecto presenta buenas condiciones para futura explotación a tajo abierto y forma parte del cinturón metalogénico Yanacocha-Chicama, una de las franjas más prolíficas en depósitos auríferos de América del Sur.

La identificación de estas zonas mineralizadas se ha apoyado en estudios geofísicos (Ver Figura 17), como la compilación de magnetometría terrestre mediante señal analítica, que permitió delimitar objetivos de exploración clave en el área (Turner, 2011).

3.5.2. Geoestructuras

Según lo expuesto por Siveroni (2012), las estructuras geológicas presentes en el área están asociadas al segundo evento tectónico del Ciclo Andino, el cual generó plegamientos y fallas, muchos de ellos considerados como estructuras menores. En la subcuenca destacan dos fallas principales de rumbo de carácter regional: Falla Pampa I y II y Falla La Escondida; ambas han influido directamente en la configuración estructural de la subcuenca, condicionando la continuidad de las secuencias sedimentarias y controlando la geometría de pliegues como el sinclinal Colpayoc, en el Plano 07 se muestra la configuración estructural de la zona de investigación.

En este contexto tectónico, según Bazán (2016), el sistema estructural se enmarca a la evolución de la deflexión de Cajamarca, que alcanzó su mayor deformación durante la fase Inca 2. La intensa compresión generó sobreescurrecimientos, rotación de bloques y reactivación de fallas regionales, influyendo tanto en el desarrollo estructural local como en el control de la metalogénesis.

➤ **Pliegues**

La estructura más representativa del área es el sinclinal volcado de Colpayoc (Ver Foto 20 y 21), cuyo eje de charnela se orienta en dirección noroeste-sureste (NW–SE), atravesando de manera sinuosa toda la subcuenca, que sigue de cerca el curso del río Cushunga.

En el flanco noreste (NE) del sinclinal se encuentra el río Manzana, donde afloran principalmente secuencias sedimentarias correspondientes a las Formaciones Cajamarca, Grupo Quilquiñán, Yumagual, Pariatambo, Chúlec, Inca y Farrat, dispuestas en discordancia angular con los depósitos volcánicos del complejo Yanacocha. Por el flanco suroeste (SW), en las quebradas Conga, Sexemayo I y II, se exponen las mismas unidades, manteniendo una disposición similar. En el extremo noroeste (NW) del eje, en la zona de Colpayoc, el sinclinal se encuentra afectado por dos fallas de rumbo dextral de carácter regional, lo que ha generado variaciones locales en la geometría del pliegue.

Además, a lo largo de su eje, especialmente en la Formación Cajamarca, se reconocen fallas transversales locales que cortan perpendicularmente al eje de charnela. Hacia el extremo sureste (SE), en las zonas de Capellanía y Ronquillo, los ríos Balconcillo y Tres Ríos cruzan transversalmente el eje del sinclinal, hasta su confluencia con el Río Ronquillo.

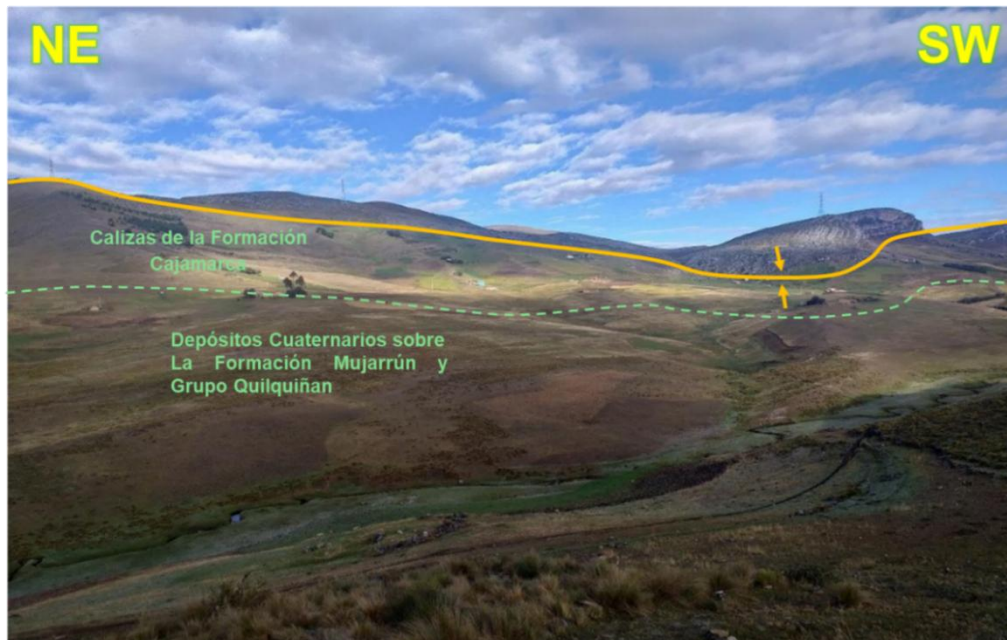


Foto 20. Coordenadas: 763771 E, 9211573 N. Vista panorámica de la proyección del eje de charnela del Sinclinal Colpayoc en el Sector Majadapampa.



Foto 21. Coordenadas: 762735 E, 9210667 N. Vista panorámica de afloramiento de calizas de la Formación Cajamarca, ubicadas en el Flanco SW del Sinclinal Colpayoc.

➤ **Fallas**

En el área se han identificado dos sistemas de fallamiento de carácter regional, documentados por primera vez por Siveroni (2012), para el presente estudio se denominaron Fallas Pampa I y II y Falla La Escondida. Aparte de estas estructuras principales, también se han identificado numerosos fallamientos locales distribuidos a lo largo de la subcuenca, lo que evidencia que el área ha estado sometida a distintos regímenes de esfuerzo tectónico.

Las Fallas Pampa I y II muestran una orientación norte-sur (N-S) y son fallas de rumbo dextral. La Falla Pampa I produce un desplazamiento significativo de las Formaciones Cajamarca y Grupo Quilquiñán, mientras que la Falla Pampa II tiene un efecto similar, pero de menor intensidad. Se ha observado que, al oeste de la Falla Pampa I, la Formación Cajamarca presenta un espesor mayor, lo que sugiere un levantamiento diferencial entre bloques (Ver Foto 22 y 23).

Estas fallas han inducido una dinámica de rumbo activa, lo que ha causado deformaciones notables en el eje del sinclinal Colpayoc, el cual muestra variaciones estructurales a lo largo de su eje de charnela, con deformaciones asimétricas que, en algunos tramos, adoptan una configuración anticlinal hacia el este de la falla. Requelme (2021), interpreta esta configuración como parte de un sistema de fallas tipo tijera, en el cual los bloques se desplazan con rotación, modificando tanto la orientación como el buzamiento de los estratos.

Finalmente, conforme indica Siveroni (2012), las brechas de falla que se observan en la zona habrían sido resultado de la fragmentación de las rocas durante los movimientos tectónicos por cizalla. Estas brechas se encuentran altamente compactadas y no presentan fracturamiento secundario, lo que les permite funcionar como barreras estructurales frente al movimiento de flujos subterráneos.



Foto 22. Coordenadas: 762359 E, 9212332 N. Vista panorámica de una falla normal que desplaza verticalmente bancos gruesos de calizas de la Formación Cajamarca.

La Falla La Escondida se caracteriza por una orientación noroeste-sureste (NW-SE) y corresponde a una estructura de rumbo con desplazamiento sinistral. A lo largo de esta falla, las secuencias sedimentarias correspondientes a las Formaciones Farrat, Inca, Chúlec, Pariatambo, Yumagual y Grupo Quilquiñán han experimentado un desplazamiento lateral estimado entre 500 y 1000 metros. En el bloque ubicado al suroeste, la Formación Yumagual alcanza un mayor espesor en comparación con el bloque noreste, este desplazamiento ha provocado cambios en la orientación de los estratos, producto del movimiento de cizalla entre los bloques (Ver Foto 24).

Siveroni (2012) describe la presencia de brechas compuestas por fragmentos de caliza en una matriz calcárea fuertemente consolidada y la ausencia de fracturamiento secundario, hace que la falla se comporte como barrera estructural, limitando el flujo de agua subterránea a través de ella.

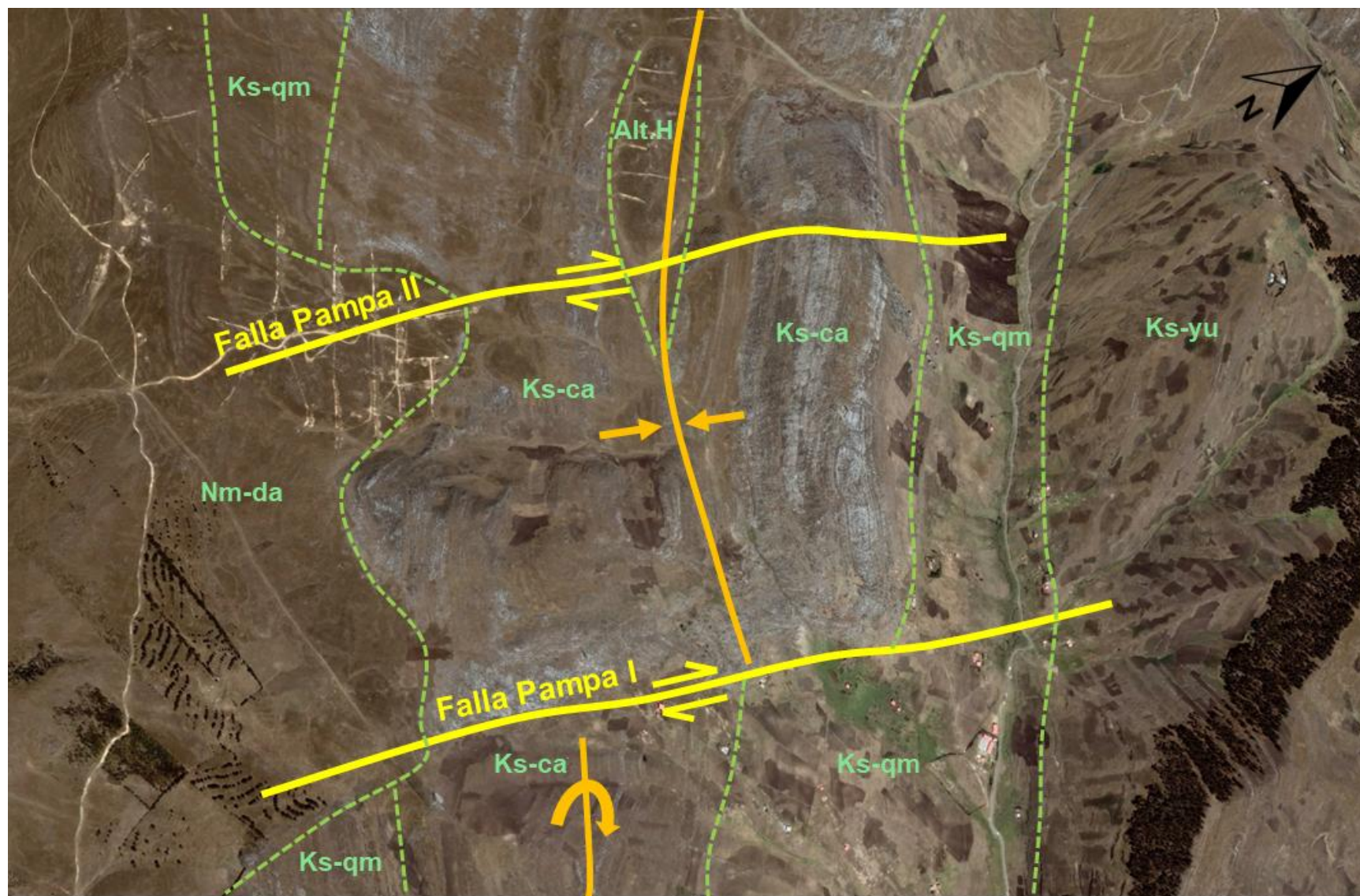


Foto 23. Coordenadas: 764231 E, 9210470 N. Configuración estructural de las Fallas Pampa I y II en el Sector Majadapampa.

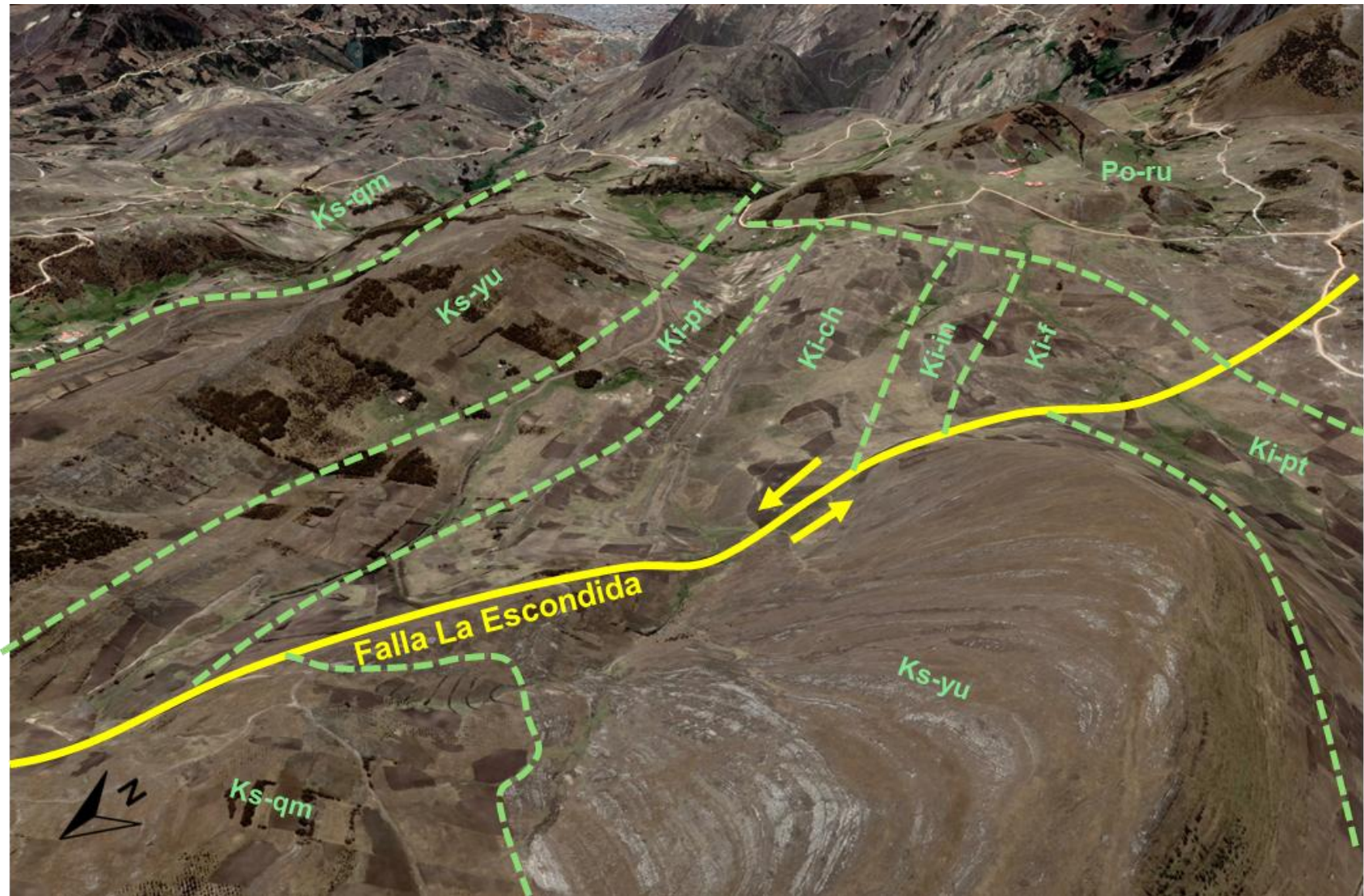


Foto 24. Coordenadas: 764949 E, 9208308 N. Configuración estructural de la Falla La Escondida en el Sector Sexemayo Lote II.

La *Falla Sexemayo* presenta una orientación suroeste-noreste (SW–NE) y corresponde a una estructura de rumbo con desplazamiento sinistral. A lo largo de su trazo cercanamente paralelo al Río Balconcillo, se observa un desplazamiento lateral moderado que afecta a las secuencias sedimentarias de las Formaciones Farrat, Inca, Chúlec, Pariatambo y Yumagual; este desplazamiento ha producido ligeros desfases en la continuidad de los estratos. La falla muestra características que indican un comportamiento conductivo, ya que a lo largo de su recorrido se observan fracturas conectadas sin relleno mineral (Ver Foto 25). Según lo señalado por Orrillo y Morera (2018), este tipo de estructuras favorece la pérdida directa del agua almacenada, afectando la recarga del acuífero.



Foto 25. Coordenadas: 769204 E, 9207633N. Vista panorámica de escarpa de la Falla Sexemayo en el Sector Sexemayo Lote I.

➤ **Discontinuidades**

Para el análisis de discontinuidades, se llevaron a cabo mediciones sistemáticas en diversos puntos de control dentro de la zona de estudio (Ver Anexo 2), abarcando afloramientos representativos de varias formaciones sedimentarias. Las observaciones incluyeron registros de planos de estratificación y familias de fracturas. Los datos obtenidos evidencian que las discontinuidades no presentan un patrón homogéneo, lo cual refleja procesos tectónicos complejos de fallamiento y plegamiento de distinta escala, que han afectado la orientación y distribución de las fracturas en las distintas unidades geológicas (Ver Foto 26).



Foto 26. Coordenadas: 771408 E, 9208202N. Vista panorámica de familias de discontinuidades en calizas de la Formación Chúlec, Sector Ronquillo.

3.6. UNIDADES MORFOGENÉTICAS

En esta investigación se empleará la clasificación propuesta por Rodríguez (2016) para definir las unidades morfogénicas, la cual se basa en la geometría del relieve, específicamente en el rango de pendientes. Según esta clasificación, las unidades se dividen en: planicies (pendientes entre 0° y 8°), lomadas (de 8° a 20°), laderas (de 20° a 50°) y escarpas (mayores a 50°); en Plano 04, se observa la distribución de estas Unidades Morfogénicas, mientras que en el Plano 06 se muestra la variación Geomorfológica-Altitudinal dentro de la subcuenca.

3.6.1. Planicies

Estas unidades conforman el 20.94 % (8.44 km²) del área total de la subcuenca y se distribuyen de manera moderadamente homogénea a lo largo de diferentes altitudes, que van desde los 3000 y 3968 msnm, y se caracterizan por presentar superficies suavemente onduladas. Desde el punto de vista litológico, predominan las unidades volcánicas, especialmente en la zona de Sexemayo, donde se encuentra la mayor extensión de planicies. En los alrededores de la laguna de Chamis, se desarrollan sobre Depósitos Cuaternarios y sobre rocas intensamente meteorizadas de la Formación Farrat. Finalmente, en la zona de Majadampampa, estas unidades se encuentran sobre secuencias volcánicas y sobre rocas meteorizadas pertenecientes a la Formación Cajamarca. En cuanto a la cobertura vegetal, predominan los herbazales; y las actividades agropecuarias incluyen el cultivo de granos secos, trigo, así como el desarrollo de agricultura y ganadería.

3.6.2. Lomadas

Las lomadas corresponden a formas del relieve suavemente elevadas, de contornos redondeados y pendientes moderadas, que representan la unidad morfogénica más extensa de la subcuenca, abarcando el 54.12 % (54.12 km²) del área total. Estas se distribuyen de manera relativamente homogénea en altitudes comprendidas entre los 3000 y 3968 m s. n. m., con excepción de las zonas de Ronquillo y Capellanía, donde su presencia es menos evidente o ausente. Desde el punto de vista litológico, las lomadas se desarrollan sobre la mayoría de unidades geológicas presentes en la subcuenca, tanto sedimentarias como volcánicas,

incluyendo las Formaciones Farrat, Inca, Chúlec, Cajamarca y las secuencias volcánicas asociadas al complejo de Yanacocha. Esta diversidad de sustratos refleja una evolución geomorfológica influenciada por procesos de erosión diferencial y antiguos eventos tectónicos que han modelado el relieve actual.

3.6.3. Laderas

Las laderas corresponden a geoformas inclinadas que, por lo general, forman parte de sistemas montañosos y presentan una alta susceptibilidad a procesos de erosión, producto de su pendiente y de condiciones climáticas que comprometen su estabilidad. Estas unidades ocupan aproximadamente el 26.57 % (26.57 km²) del área total de la subcuenca. Su distribución no es homogénea: las mayores extensiones se localizan en las zonas de menor altitud, principalmente entre los 2800 y 3600 msnm, donde se evidencia una intensa erosión vertical y actividad tectónica. Esto es particularmente notorio a lo largo de los ríos Balconcillo, Tres Ríos, Manzana y Ronquillo, donde las laderas bordean los cauces y dan lugar a relieves abruptos. En contraste, una menor proporción de laderas se encuentra en el sector de Majadampampa, donde forman escarpas pronunciadas sobre las rocas carbonatadas de la Formación Cajamarca. Desde el punto de vista litológico, estas unidades morfogénicas se desarrollan sobre gran parte de las unidades litológicas presentes en la subcuenca.

3.6.4. Escarpas

Las escarpas son geoformas de relieve abrupto y pendiente pronunciada, formadas como resultado de procesos geotectónicos y morfogénicos. Debido a su inclinación, estas unidades suelen presentar inestabilidad, siendo susceptibles a fenómenos como deslizamientos, vuelcos y derrumbes. En la subcuenca, ocupan una superficie reducida, representando aproximadamente el 0.15 % del área total (0.06 km²). Su distribución es puntual y se concentra en zonas de menor altitud, entre los 2800 y 3600 msnm, principalmente en los sectores de Capellanía y Sexemayo. Estas escarpas se desarrollan en las laderas que bordean los cauces de la quebrada Sexemayo I y de los ríos Balconcillo, Tres Ríos y Manzana.

3.7. UNIDADES HIDROGRÁFICAS

3.7.1. Subcuenca El Ronquillo

La delimitación de la subcuenca El Ronquillo se llevó a cabo utilizando un modelo digital de elevación (MDE) obtenido a partir de datos ASTER GDEM proporcionados por la NASA. Con base en input, se definió un área aproximada de 40.29 km². A partir del análisis hidrológico, se identificó una red de drenaje de cuatro órdenes, que comprende desde cursos de agua menores hasta el cauce principal de la subcuenca. Todo el procesamiento y análisis espacial fue realizado mediante el software ArcGIS versión 10.8.

3.7.2. Parámetros Geomorfológicos

El análisis morfométrico de la subcuenca El Ronquillo se desarrolló siguiendo la metodología propuesta por Rodríguez y Huamán (2016). El proceso se inició con la obtención de imágenes satelitales y archivos ráster a través de la plataforma SAS Planet, los cuales fueron trabajados en los softwares Global Mapper 22.0 y ArcGIS 10.5 para extraer la información base. A partir de estos datos se determinaron los parámetros básicos, que luego sirvieron como insumo para calcular los parámetros fundamentales mediante hojas de cálculo en Excel. Los resultados obtenidos se integran en un cuadro resumen (Tabla 11), que sintetiza las principales características geomorfológicas de esta unidad hidrográfica, además los gráficos correspondientes al Polígono de Frecuencia de Altitudes, Curva Hipsométrica y Perfil Longitudinal de la Subcuenca se presentan en el Gráfico 1, Gráfico 2 y Gráfico 3 respectivamente.

Tabla 11. Parámetros Geomorfológicos Básicos y Fundamentales de la Subcuenca El Ronquillo.

Parámetros Geomorfológicos					
Parámetro		Descripción		Subcuenca El Ronquillo	
		Cod.	Unidad	Valor	
Parámetros Básicos					
1	Área	A	Km²	41.15	
2	Perímetro	P	Km	33.20	
3	Longitud del Cauze Principal	L	Km	12.10	
4	Desnivel Altitudinal	DA	msnm	1093	
Parámetros de Drenaje					
5	Grado de Ramificaciones	Oi			
		1	95	Cantid	46.56
		2	14	Cantid	22.30
		3	3	Cantid	14.68
		4	1	Cantid	2.53
	Número Total de cursos o ríos: NTc		113	Cantid	
Longitud Total de Ríos: Li			Km	86.07	
Parámetros Fundamentales					
6	Densidad de Drenaje	Dd	Km/Km²	2.09	
7	Extensión Media de Escurrimiento Superficial	Es	Km	0.12	
8	Frecuencia de Ríos	Fr	Ríos/Km²	2.75	
Parámetros de Forma					
9	Ancho Promedio de la Subcuenca	Ap	Km	3.40	
10	Factor de Forma	Ff		0.28	
11	Coeficiente de Compacidad o Índice de Gravelius	Kc		1.45	
Parámetros de Elevación del Terreno o Relieve					
12	Altitud Media de la Subcuenca	Hm	msnm	3522.92	
13	Método del Índice de Pendiente de la Subcuenca o Pendiente Media de la Subcuenca	Ip		0.27	
14	Polígono de Frecuencia de Altitudes		Grafico	-	
15	Curva Hipsométrica		Grafico	-	
Parámetros del Rectángulo Equivalente					
16	Parámetro del Rectángulo Equivalente				
		L	Km	13.57	
		I	Km	3.03	
Parámetro de Declividad de los Cursos de Agua					
17	Pendiente Media del Río	Ic	m/Km	0.09	
18	Declive Equivalente Constante	S		0.07	
19	Perfil Longitudinal de la Subcuenca		Grafico	-	
Parámetro del Coeficiente de Torrencialidad					
20	Coeficiente de Torrencialidad	Ct	Drenaje 1er Or/Km²	2.31	
Parámetro del Coeficiente de Masividad					
21	Coeficiente de Masividad	Cm	m/Km²	85.60	

❖ **Polígono de Frecuencia de Altitudes**

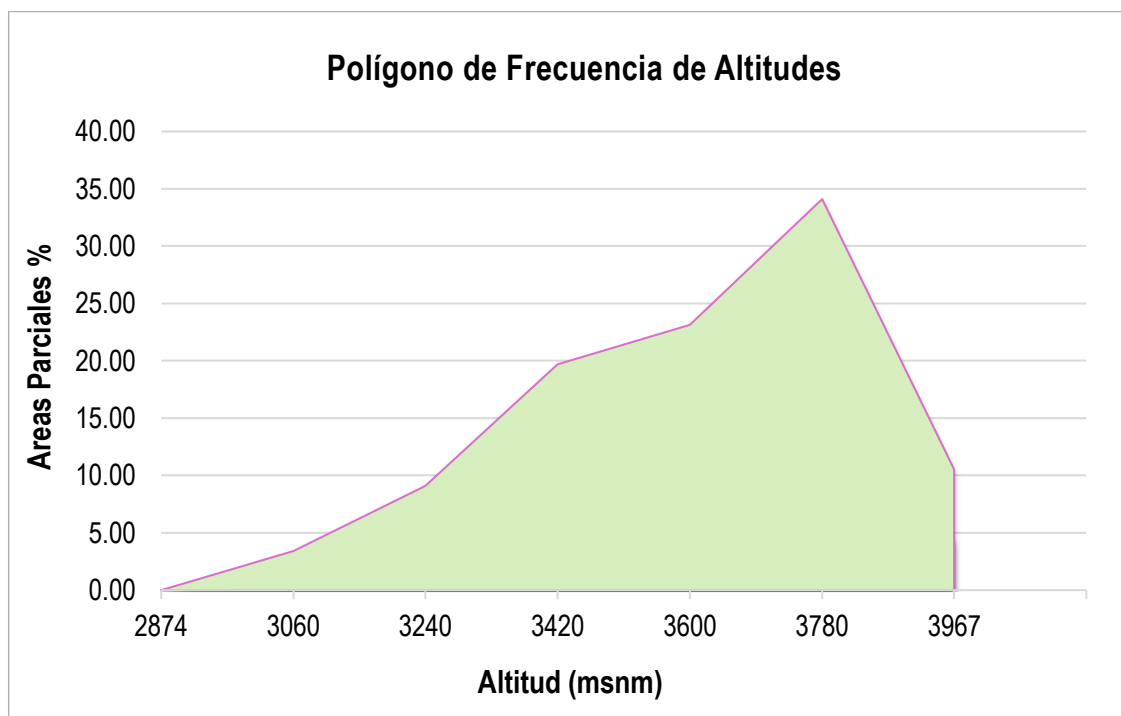


Gráfico 1. Polígono de Frecuencia de Altitudes.

❖ **Curva Hipsométrica**

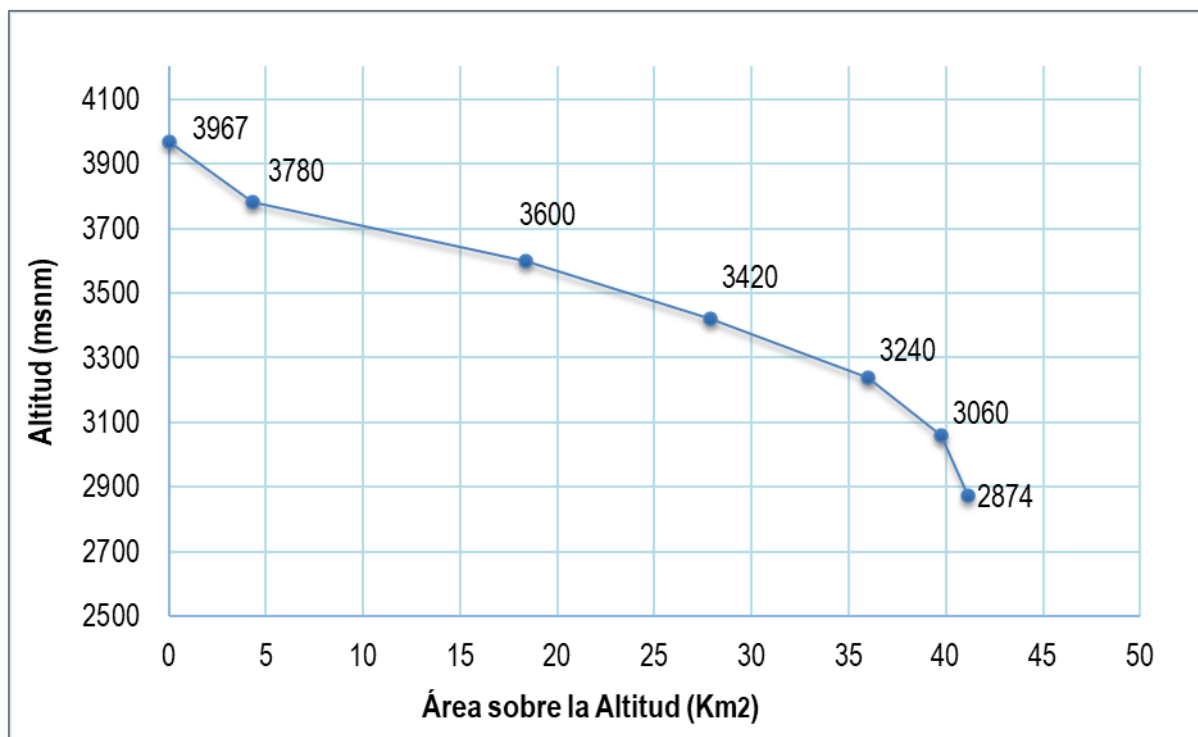


Gráfico 2. Curva Hipsométrica.

❖ Perfil Longitudinal de la Subcuenca

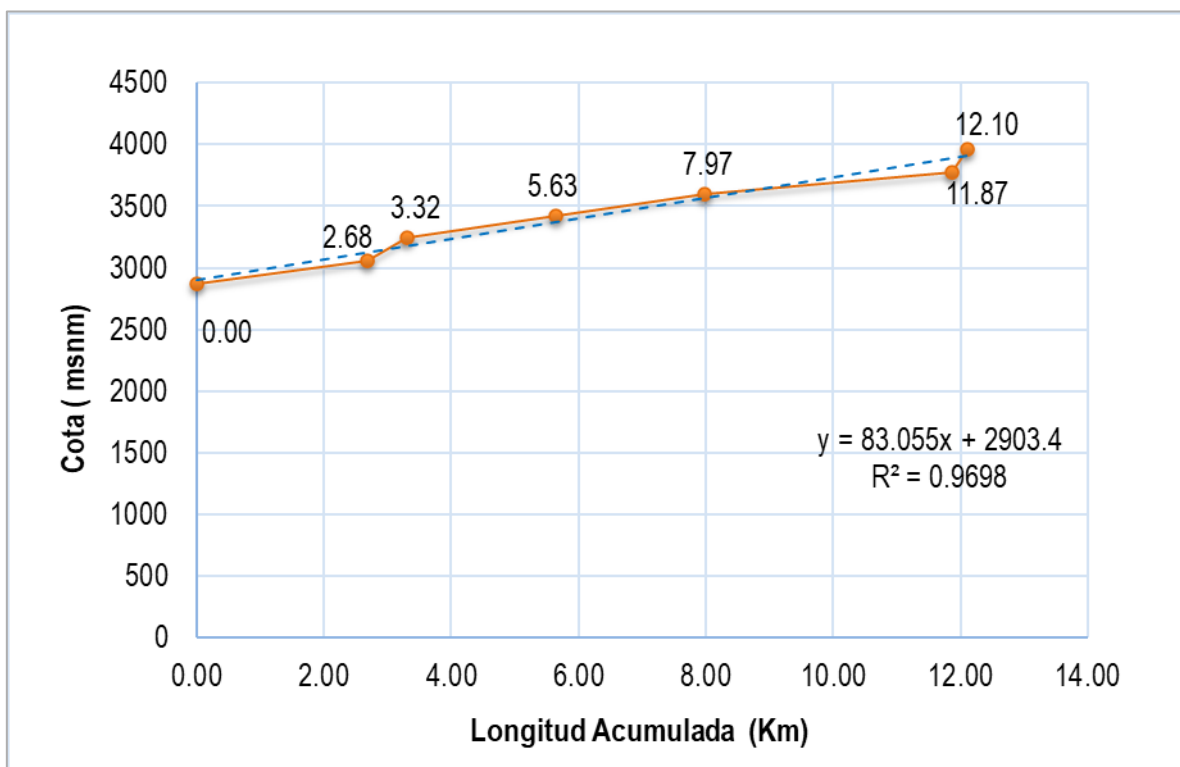


Gráfico 3. Perfil Longitudinal del Río Principal en la Subcuenca el Ronquillo.

3.7.3. Red de Drenaje

En base al reconocimiento de campo y análisis morfométrico realizado en la subcuenca El Ronquillo, se determinó que su red de drenaje corresponde a un patrón de tipo dendrítico, de cuarto orden. El Río Ronquillo actúa como nivel de base principal, integrando aguas provenientes de diversas quebradas, como Sexemayo, Tres Ríos, Manzana y Balconcillo, que recorren gran parte del área de estudio.

El drenaje se establece principalmente sobre unidades geológicas del Cretácico, tales como las Formaciones Yumagual, Pariatambo y Chúlec, así como sobre Secuencias Volcánicas y Depósitos Cuaternarios. Las rocas que conforman el área son en su mayoría sedimentarias, carbonatadas y fuertemente fracturadas, lo que ha favorecido tanto la infiltración como el escurrimiento subterráneo.

Asimismo, se presenta un diagrama fluvial o esquema del sistema de drenaje en el Gráfico 4, este representa la red de drenaje de la subcuenca El Ronquillo, permitiendo identificar su distribución y patrón de ramificación.

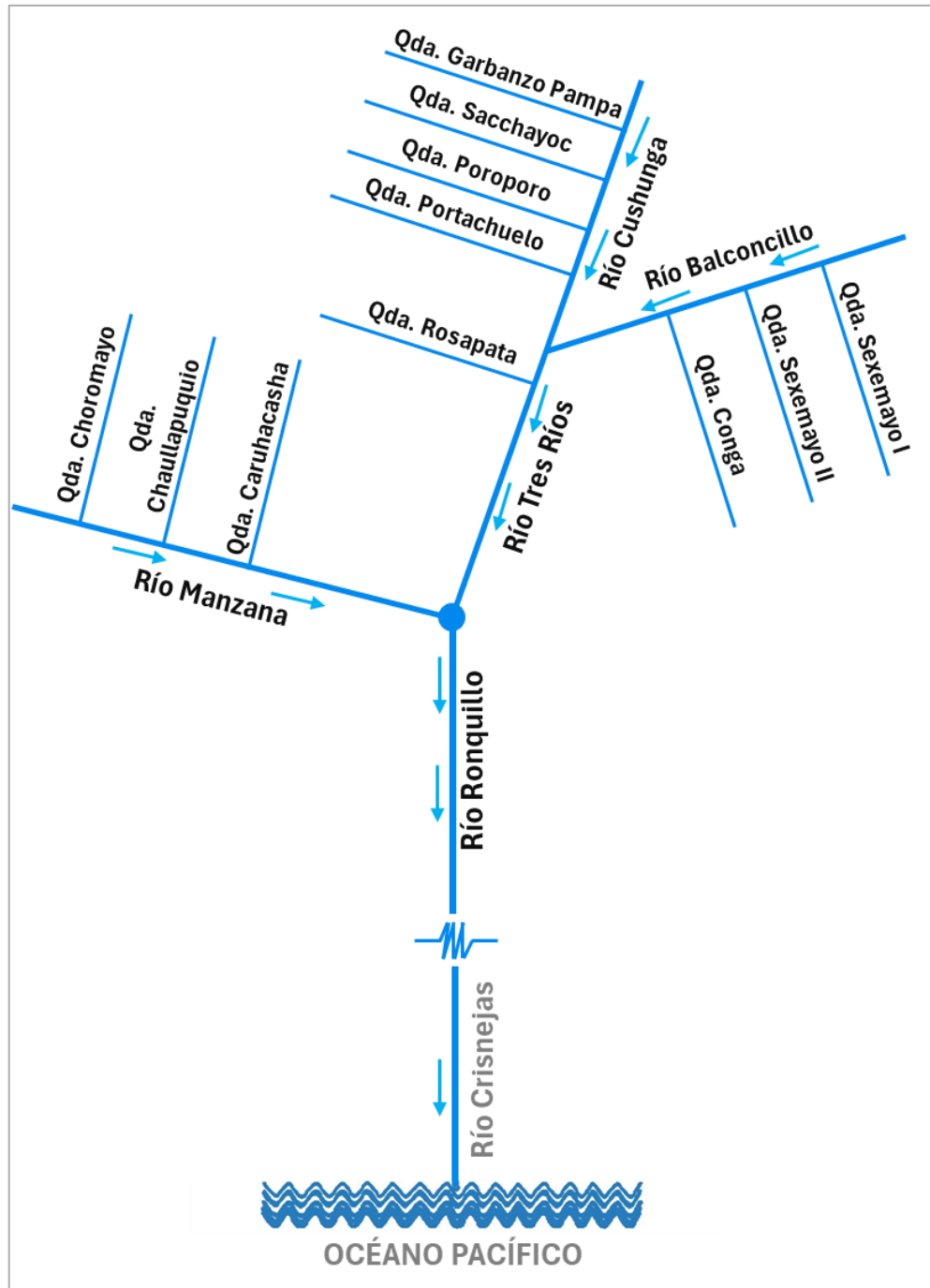


Gráfico 4. Diagrama Fluvial de la Subcuenca El Ronquillo.

3.7.4. Microcuencas

En total se identificaron cuatro microcuencas en la subcuenca El Ronquillo (Ver Plano 05). Dos de ellas, correspondientes al río Balconcillo y al río Cushunga, confluyen para dar origen al río Tres Ríos, al cual se suma también el aporte de la microcuenca Chamis. Finalmente, las aguas del río Manzana confluyen con las del Tres Ríos, conformando así el cauce principal del río Ronquillo; en la Tabla 12 se presentan las áreas correspondientes a cada una de estas microcuencas.

Tabla 12. Áreas de Microcuencas en la Subcuenca el Ronquillo.

Nombre	Área (Km ²)
Microcuenca del Río Cushunga	15.01
Microcuenca del Río Balconcillo	14.78
Microcuenca del Río Manzana	7.02
Microcuenca Chamis	1.40

3.8. HIDROLOGÍA

3.8.1. Meteorología y Precipitación

Para el análisis de las condiciones climáticas y meteorológicas en la subcuenca el Ronquillo, se utilizó como fuente principal, el registro de los datos de precipitación (1985-2018) de estaciones meteorológicas presentadas en el Estudio Climatológico de la Segunda Modificación del EIA Yanacocha (WSP, 2020). Adicionalmente, se complementaron con datos de precipitación descargados y procesados directamente desde el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), para el periodo del 2018 al 2024. En total, se consideraron 11 estaciones pertenecientes a una misma región climática; de las cuales, 7 son estaciones regionales (SENAMHI) y 4 estaciones locales (pertenecientes a Minera Yanacocha). Estas estaciones presentan diferentes periodos de registro de datos; sin embargo, para el análisis regional, se ha seleccionado como muestra el periodo de años comprendido desde 1985 hasta 2018; dado que, todas las estaciones presentan información disponible para este periodo, de esta manera el análisis se realizó en un periodo homogenizado, permitiendo un análisis más confiable y consistente. En la Tabla 13 y Figura 18 se muestra los datos de ubicación y su distribución espacial de cada una de las estaciones seleccionadas.

Tabla 13. Estaciones Meteorológicas Regionales y Locales.

Estación Meteorológica	Ubicación (m)		Elevación (msnm)	Origen	Región Hidrográfica
	Este	Norte			
Magdalena	759490	9197942	1,257	Regional (SENAMHI)	Pacífico
Augusto Weberbauer	776876	9206979	2,673		Amazonas
Bambamarca	774561	9262409	2,577		Amazonas
Encañada	796408	9212494	2,950		Amazonas
Llapa	741217	9227535	2,900		Pacífico
Quebrada Honda	759686	9236666	3,550		Pacífico
Granja Porcón	776314	9221363	3,261		Pacífico
Maqui Maqui	780507	9228923	4,112	Local (Minera Yanacocha)	Amazonas
La Quinua	768899	9227128	3,455		Pacífico
Yanacocha	772624	9229184	3,816		Pacífico
Carachugo	775412	9227811	4,196		Pacífico

Fuente: Modificado de WSP, (2020).

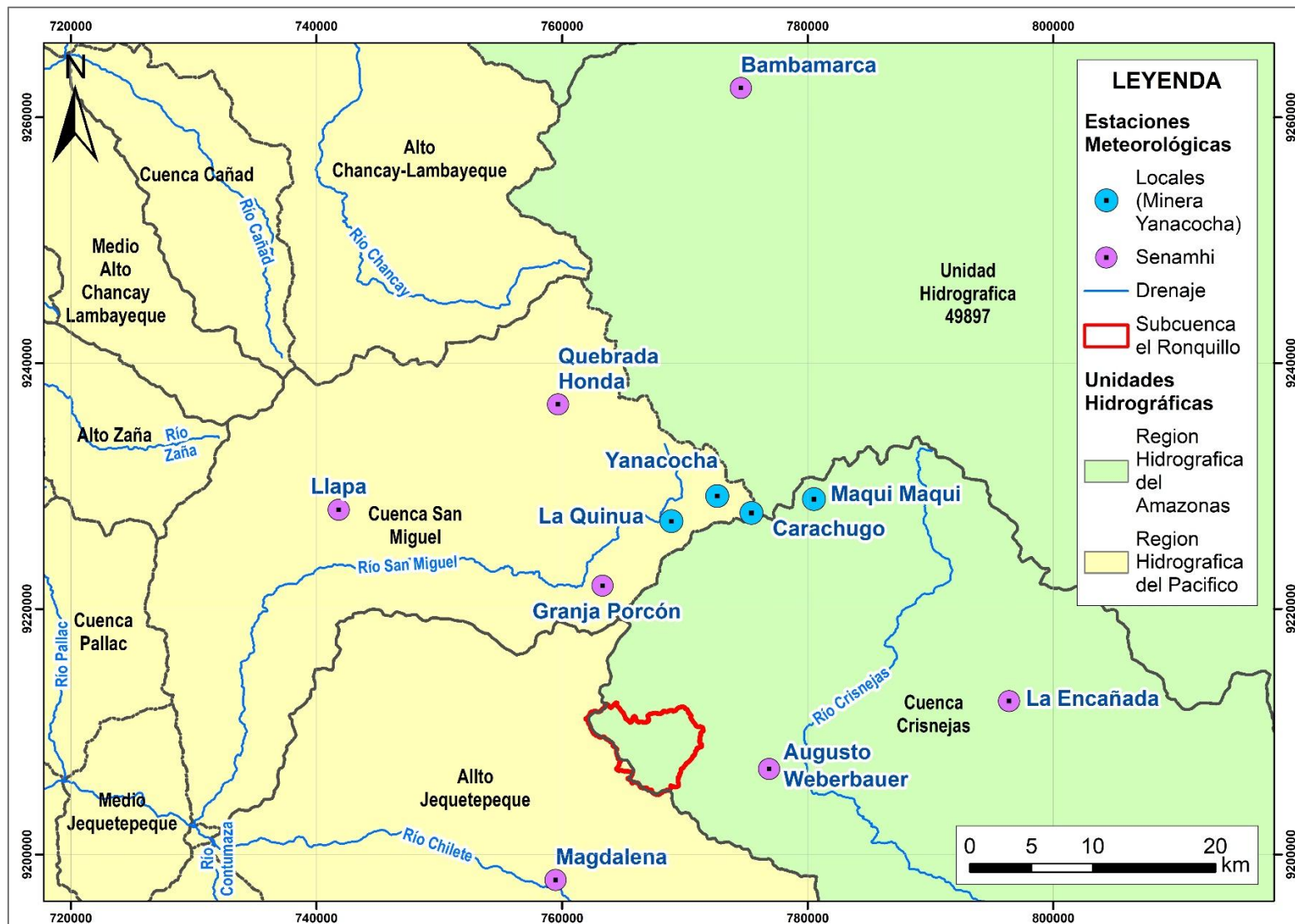


Figura 18. Ubicación de Estaciones Meteorológicas Locales y Regionales.

➤ ***Análisis Regional de Precipitaciones Anuales en la Región Cajamarca (1960-2018)***

El análisis de precipitaciones anuales en una determinada región nos permite comprender posibles patrones climáticos e impactos en los recursos hídricos, en el gráfico 1 se muestra el registro de precipitaciones anuales de las 11 estaciones meteorológicas para el periodo de años desde 1960 hasta el 2018. Se observa notables variaciones de precipitación en todas estaciones, con periodos de altas tasas de precipitación, como en los años 1969-1971, 1980-1984, 1986-1991, 1993-1994, 1997-1999 y 2000-2001 seguidas de notables sequías como en los años 1977-1978, 1984-1985, 1991-1992 y 2002-2003. Estos periodos de sequía están relacionados con los fenómenos climáticos globales como El Niño.

Se observan algunos valores atípicos inusuales, principalmente de la estación Granja Porcón, estos pueden ser resultado de eventos extremos como intensas tormentas o grandes periodos de sequía que afectan las mediciones con normalidad; en general debido a variaciones climáticas o cambios en las condiciones atmosféricas de una misma región.

Para un análisis local, se han agrupado las estaciones meteorológicas más cercanas a la Subcuenca El Ronquillo; presentadas en el Gráfico 5, mediante una clasificación de colores:

- ❖ En tonos grises como: las estaciones Bambamarca, Encañada, Llapa y Quebrada la Honda presentan similar variabilidad y tendencias de precipitación.
- ❖ En tonos azulados como: las estaciones Magdalena y Augusto Weberbauer, que por su ubicación cercana a los valles presentan menor variabilidad; esta estabilidad en la precipitación permite que las precipitaciones presenten un comportamiento más constante, con menor influencia de fenómenos climáticos extremos.

- ❖ En tono azul oscuro, la estación Granja Porcón, es la que mayor variabilidad presenta, debido a su ubicación presenta fluctuaciones significativas de un año a otro, con valores atípicos marcados, picos y caídas extremas de precipitación; el comportamiento de precipitaciones en esta estación sugiere que está expuesta a factores climáticos más complejos y variables en comparación con las demás estaciones.
- ❖ En tonos verdes, las estaciones locales como: Yanacocha, Maqui Maqui, La Quinoa y Carachugo, estas tienen características comunes que las diferencian de las estaciones regionales; presentan menor variabilidad y un comportamiento en las tendencias relativamente estable. Es probable que, debido a la ubicación geográfica específica en una región y la cercanía al entorno de las actividades mineras contribuya a que las estaciones sean menos susceptibles a variaciones extremas de precipitación y estén expuestas a variaciones climáticas de menor escala.

En general, desde la década de 1990 hay un aumento creciente y gradual en las precipitaciones, que sugiere posibles cambios climáticos regionales.

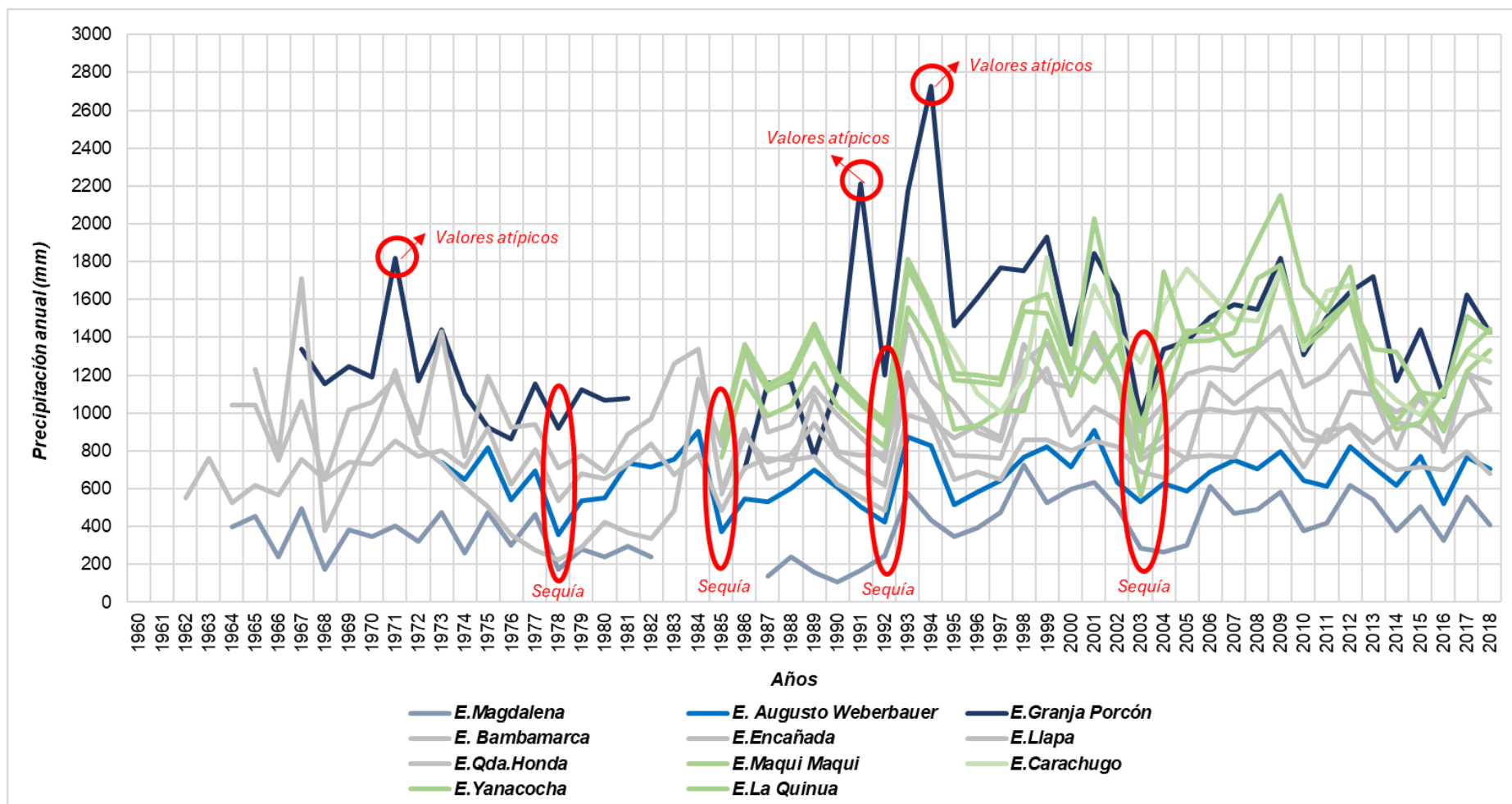


Gráfico 5: Registro de precipitaciones anuales, desde 1960 hasta 2018.
Fuente: Modificado de WSP, (2020).

➤ **Relación Precipitación – Altitud (Escala Regional)**

Debido a la influencia de la Cordillera de los Andes en el Perú, en Cajamarca las precipitaciones son principalmente de origen orográfico; es decir, dependen del relieve y la altitud. La diversidad de características en el terreno hace complicada la comprensión de las distribuciones típicas de precipitación en diferentes escalas temporales. Un método para cuantificar las distribuciones de precipitación a través de gradientes altitudinales, es el uso del gradiente de precipitación orográfica (OPG), este valor nos da una clara descripción del aumento o disminución de las precipitaciones en relación con la altitud, principalmente en zonas montañosas (Bohne.et.al, 2020). Debido a la acumulación de precipitaciones a lo largo de gradientes altitudinales influyen considerablemente en el momento y cantidad del recurso hídrico disponible (Bohne.et.al, 2020). El análisis de regresión se ha empleado en diversos proyectos de investigación y es una excelente herramienta para evaluar el gradiente de precipitación en una misma región climática (Ghani.et.al, 2018). En la presente investigación se analizaron 11 estaciones meteorológicas ubicadas en el entorno de la Subcuenca el Ronquillo, estas fueron evaluadas mediante gráficos estadísticos y de regresión lineal, que revelan una clara relación entre precipitación y altitud, tal como se observa en el Gráfico 6.

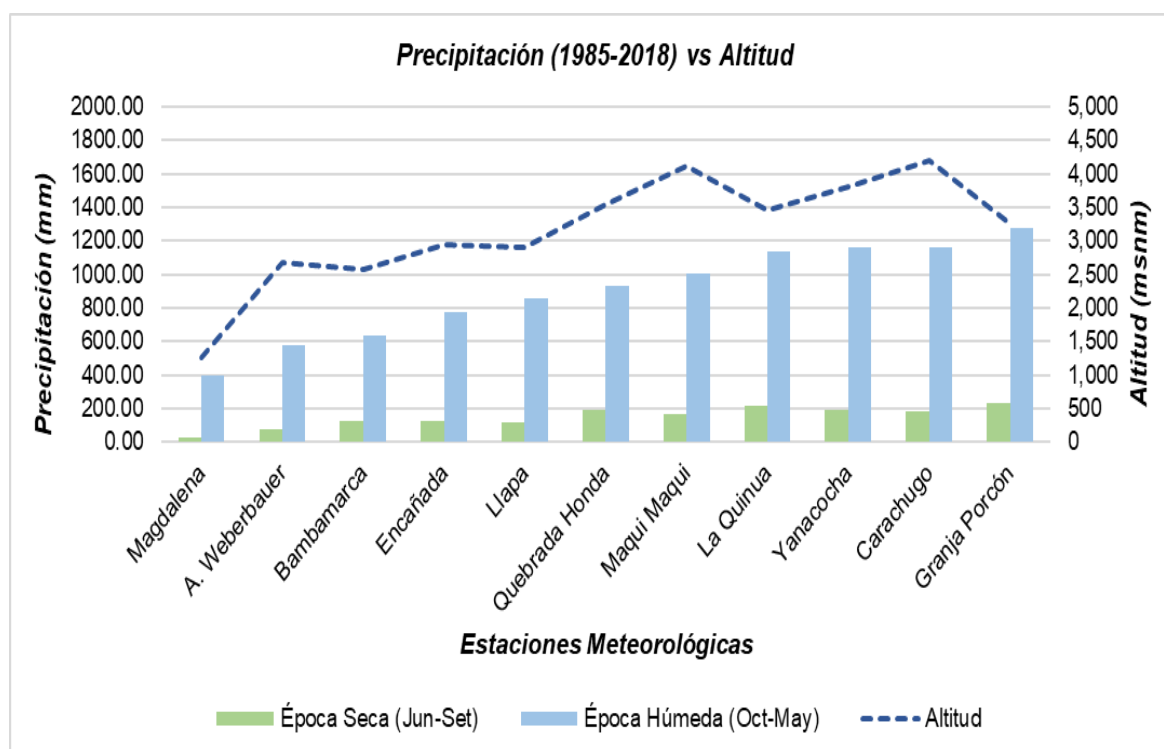


Gráfico 6. Relación de precipitaciones vs altitud para diferentes estaciones meteorológicas.

Asimismo, en el Gráfico 7, se muestra una fuerte relación lineal positiva entre la precipitación media anual (mm) y la altitud de la estación en (msnm), dando como resultado un coeficiente de determinación (R^2) de 0.7091 y un coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0.842. Sin embargo, aproximadamente a partir de los 3500 msnm las estaciones ya no presentan el mismo comportamiento; mostrando una baja correlación, lo que sugiere que a partir de esta altitud los patrones de precipitación ya no siguen el mismo patrón observado y comienzan a disminuir o son menos predecibles que las estaciones ubicadas a altitudes más bajas; este fenómeno es muy conocido como Gradiente de Precipitación Invertida (Luo, 2024).

Por otro lado, la estación Granja Porcón muestra una desviación significativa de la tendencia respecto a las demás estaciones, mostrando valores atípicos, que pueden estar relacionado con diversos factores climáticos más complejos. Diversos estudios de casos similares sobre precipitaciones orográficas han identificado: el transporte de humedad, velocidad y dirección del viento, Fenómenos El Niño y la Niña, estabilidad atmosférica y la microfísica de las nubes como algunos factores que afectan la distribución de precipitaciones (Bohne.et.al, 2020).

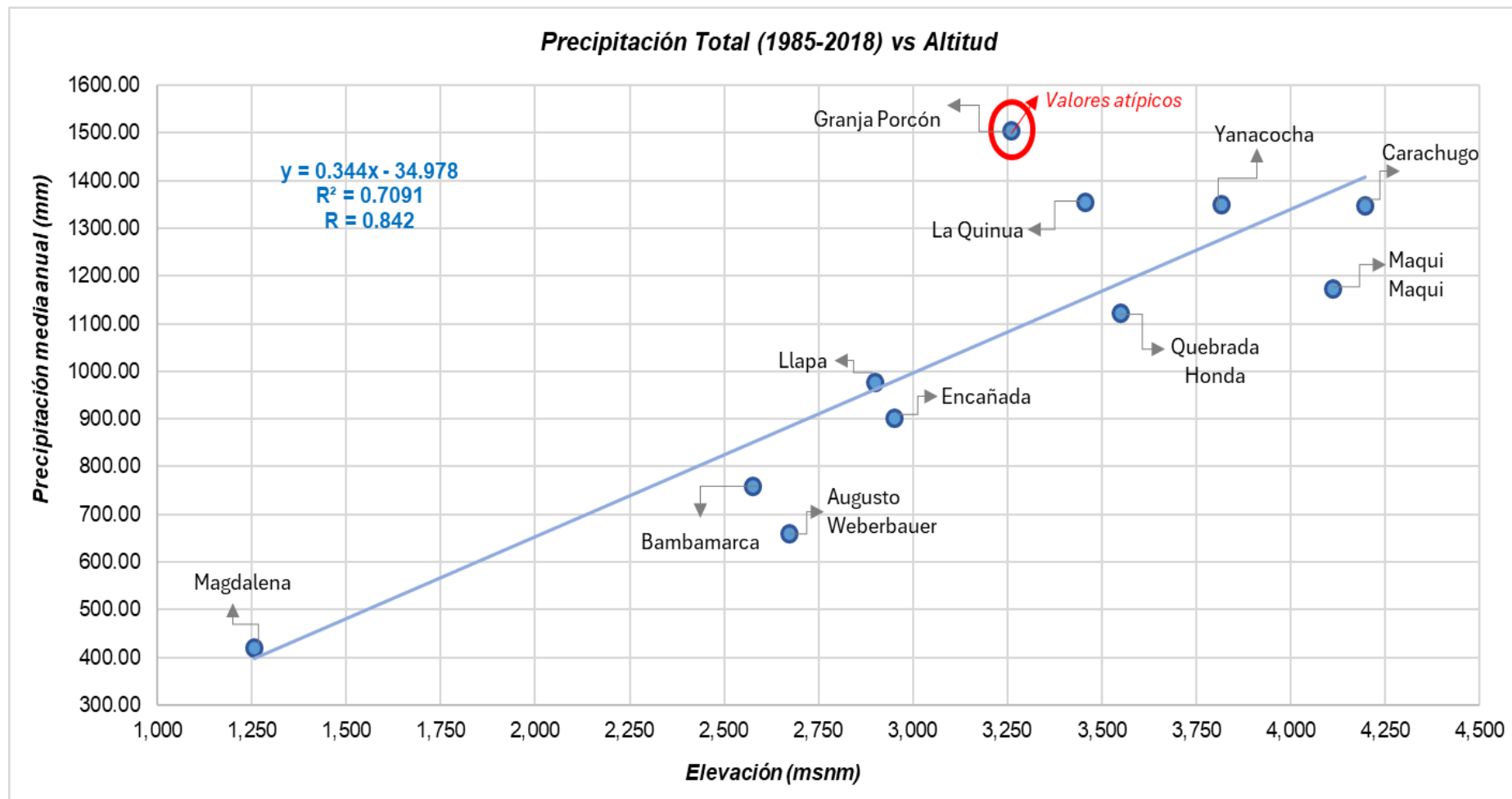


Gráfico 7. Relación lineal y exponencial precipitación-altitud.

En general, aunque la estación Granja Porcón se encuentra a una altitud (3261) similar a la altitud media de la Subcuenca El Ronquillo (3523 msnm), su régimen de precipitaciones presenta una marcada variabilidad interanual y valores atípicos que no representan de manera adecuada las condiciones de la subcuenca. En cambio, la estación Augusto Weberbauer, ubicada a una altitud de 2673 msnm, constituye la estación más cercana al área de estudio y cuenta con registro histórico más extenso (1934–2024). Estas características le otorgan una mayor representatividad climática y consistencia estadística para el análisis. Por ello, se selecciona la estación Augusto Weberbauer como base para la transposición de precipitaciones hacia la Subcuenca El Ronquillo.

3.8.2. Transposición y Estadística de Datos de Precipitaciones

Para estimar la precipitación representativa en la subcuenca El Ronquillo, se seleccionó la Estación Meteorológica Augusto Weberbauer, ubicada a 2673 msnm. Dado que la altitud media de la subcuenca es significativamente mayor (3523 msnm), fue necesario realizar una transposición de datos que permita ajustar los registros de precipitaciones a las condiciones altitudinales del área de investigación.

Para este fin, se empleó la ecuación propuesta por Oswald Ortiz (2004), aplicada originalmente en el estudio de Rodríguez (2016) sobre el Análisis Geológico-Geotécnico de Deslizamientos en la zona Ronquillo–Corisorgona. Esta fórmula permite estimar la precipitación en función de la diferencia de altura entre la estación de referencia y la zona de interés:

$$PP = \frac{H}{H_1} * PP_1$$

PP = Precipitación a la altitud H (Subcuenca)

PP₁ = Precipitación a la altitud H₁ (Estación Meteorológica)

H = Altitud media de la Subcuenca El Ronquillo

H₁ = Altitud de la Estación Meteorológica Augusto Weberbauer

En las siguiente Tabla 14 se muestra el cálculo del factor de transposición, mientras que en la Tabla 15 se presentan los valores de precipitación transpuestos a la Subcuenca El Ronquillo.

Tabla 14. Cálculo del factor de transposición de precipitaciones en la Subcuenca el Ronquillo.

CÁLCULO DEL FACTOR DE TRANSPOSICIÓN DE PRECIPITACIONES				
Estación Weberbauer - a Subcuenca el Ronquillo				
Ecuación de Oswald Ortiz				
Subcuenca El Ronquillo	Altitud Media	H	3522.92	msnm
Estación Meteorológica Augusto Weberbauer	Altitud Media	H ₁	2673.00	msnm
Factor de Transposición	Ft:	H/H ₁	1.32	

Fuente: Ortiz, (2015).

Tabla 15. Transposición y análisis estadístico de datos de precipitación a la Subcuenca el Ronquillo.

Ciclos de Precipitación	AÑO ANTERIOR							AÑO POSTERIOR					Total, PP Anual	Épocas Seca y Húmeda	
	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May		Total, PP (Jun-Sep)	Total, PP (Oct-May)
1934-1935	67.6	2.0	15.7	27.2	101.0	51.8	137.9	35.2	57.7	209.6	158.7	30.6	894.8	112.4	782.3
1935-1936	17.4	0.5	26.4	28.2	128.9	80.3	178.7	145.1	97.5	138.3	102.9	97.1	1041.3	72.5	968.8
1936-1937	13.3	0.9	0.5	37.0	37.0	21.7	54.6	83.6	89.5	119.1	48.0	14.2	519.5	51.8	467.7
1937-1938	9.9	1.7	7.0	83.6	143.9	83.3	65.6	161.3	202.6	148.4	166.1	27.3	1100.6	102.1	998.5
1938-1939	27.2	4.1	6.5	44.9	61.4	22.0	161.7	84.6	115.2	191.2	99.0	74.6	892.4	82.6	809.8
1939-1940	18.3	36.6	2.1	69.3	33.1	42.7	131.4	78.6	108.9	156.8	87.5	60.6	826.0	126.4	699.6
1940-1941	19.1	6.9	0.5	112.9	118.1	43.1	73.4	191.0	177.7	187.2	105.3	38.6	1073.7	139.4	934.3
1941-1942	3.6	0.0	0.0	45.7	20.3	98.3	153.7	122.3	177.1	134.7	158.9	108.6	1023.3	49.3	974.0
1942-1943	7.2	0.8	19.4	41.4	40.3	83.8	55.2	126.0	236.6	118.9	110.1	62.7	902.4	68.8	833.6
1943-1944	45.7	0.3	5.7	14.9	110.8	107.7	92.1	100.6	134.7	224.1	83.3	74.3	994.1	66.6	927.6
1944-1945	19.5	1.7	0.0	11.5	58.5	24.6	137.2	213.6	107.7	184.0	152.5	7.8	918.6	32.7	885.9
1945-1946	0.9	2.6	1.2	86.7	39.5	103.7	160.4	145.2	78.4	89.5	142.5	103.5	954.2	91.5	862.8
1946-1947	0.0	0.0	1.7	11.7	174.7	30.4	113.8	53.2	91.1	140.5	101.7	67.3	786.2	13.4	772.8
1947-1948	27.4	18.4	24.1	59.5	120.8	99.2	117.5	187.8	138.6	90.0	194.5	59.9	1137.8	129.4	1008.3
1948-1949	48.6	1.7	0.7	91.0	307.0	81.3	44.1	77.5	179.3	264.5	142.6	21.6	1259.9	141.9	1117.9
1949-1950	40.8	23.0	10.1	19.2	93.1	99.8	18.4	64.4	198.5	187.1	210.6	69.6	1034.6	93.0	941.6
1950-1951	12.7	0.0	7.4	18.1	74.5	118.2	168.6	68.9	195.7	95.1	82.9	62.6	904.6	38.2	866.5
1951-1952	24.1	0.0	1.0	27.8	130.2	84.7	199.3	128.2	181.7	305.0	297.7	41.6	1421.4	52.9	1368.5
1952-1953	6.7	6.7	13.4	28.2	86.8	107.3	108.7	190.8	302.7	195.5	144.6	58.0	1249.4	55.0	1194.4
1953-1954	15.7	7.7	8.0	58.3	101.5	147.0	54.2	147.9	65.6	131.9	51.2	58.9	847.9	89.7	758.2
1954-1955	12.7	4.7	3.7	47.9	141.3	81.7	103.1	160.0	186.1	254.7	177.1	195.5	1368.5	68.9	1299.5
1955-1956	0.0	39.2	0.0	69.6	126.2	98.4	135.6	271.4	158.6	228.0	195.5	29.1	1351.6	108.8	1242.8

Ciclos de Precipitación	AÑO ANTERIOR							AÑO POSTERIOR					Total, PP Anual	Épocas Seca y Húmeda	
	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May		Total, PP (Jun-Sep)	Total, PP (Oct-May)
1956-1957	15.1	4.3	5.4	56.9	103.4	58.6	27.4	75.7	74.3	166.3	149.3	50.6	787.3	81.7	705.6
1957-1958	24.1	0.0	8.0	33.1	79.7	70.0	85.4	195.5	32.3	247.4	150.3	57.9	983.7	65.3	918.4
1958-1959	2.7	0.0	15.4	14.4	85.7	15.1	61.9	47.9	130.6	218.5	205.4	1.0	798.6	32.5	766.1
1959-1960	18.1	13.1	10.0	12.4	128.6	53.2	211.6	69.3	159.4	75.3	92.4	61.3	904.6	53.6	851.0
1960-1961	4.7	1.0	14.4	38.5	30.5	135.6	36.8	143.9	57.6	89.7	93.7	18.8	665.1	58.6	606.6
1961-1962															
1962-1963															
1963-1964															
1964-1965															
1965-1966	0.0	8.2	0.0	64.9	110.2	87.0	89.5	82.7	60.5	71.8	63.1	52.7	690.7	73.0	617.6
1966-1967	0.0	0.0	0.9	17.3	101.2	82.6	24.7	159.3	183.9	143.8	42.6	58.1	814.5	18.2	796.3
1967-1968	13.6	37.4	7.6	32.8	133.1	23.5	48.4	76.5	106.8	89.3	34.5	19.6	623.1	91.5	531.7
1968-1969	2.1	2.1	21.4	65.9	87.5	72.0	93.3	55.4	97.1	110.1	112.9	2.0	721.8	91.5	630.3
1969-1970	25.9	0.4	17.4	24.3	73.0	140.2	213.5	93.6	55.1	105.3	71.9	44.6	865.1	67.9	797.2
1970-1971	26.2	4.2	3.3	24.0	135.8	67.8	71.3	77.0	128.9	363.4	72.1	10.5	984.5	57.8	926.8
1971-1972	16.1	23.2	22.7	37.0	118.4	60.4	87.7	73.1	89.1	150.0	100.4	23.9	801.9	99.0	702.9
1972-1973	5.8	4.5	27.2	38.2	41.4	87.7	66.2	125.7	93.3	121.9	133.9	31.4	777.2	75.7	701.5
1973-1974	37.9	11.1	25.5	120.0	88.3	86.3	98.8	81.2	184.5	117.4	77.8	6.1	935.1	194.5	740.6
1974-1975	22.8	8.6	36.0	51.0	93.2	72.6	101.2	126.0	206.3	266.3	90.7	88.1	1162.8	118.5	1044.3
1975-1976	13.2	9.5	25.4	59.5	105.7	85.8	1.2	171.9	82.9	107.2	45.5	56.7	764.4	107.6	656.8
1976-1977	30.3	0.2	5.8	16.2	42.4	94.4	58.5	171.2	193.0	187.1	56.1	33.6	888.9	52.5	836.4
1977-1978	10.5	9.9	0.2	21.2	70.4	72.2	89.9	16.8	45.4	64.3	48.8	86.5	536.0	41.8	494.2
1978-1979	5.1	5.8	5.0	33.0	32.2	71.2	59.1	110.9	107.6	210.5	48.9	21.5	710.6	48.9	661.7
1979-1980	2.4	9.9	20.7	44.3	32.2	34.7	61.4	46.0	55.9	85.7	38.6	9.1	440.8	77.3	363.5

Ciclos de Precipitación	AÑO ANTERIOR							AÑO POSTERIOR					Total, PP Anual	Épocas Seca y Húmeda	
	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May		Total, PP (Jun-Sep)	Total, PP (Oct-May)
1980-1981	19.9	4.2	8.8	3.0	171.9	146.3	140.6	103.1	245.8	139.3	44.4	19.4	1046.8	36.0	1010.8
1981-1982	8.7	9.5	16.7	29.0	147.5	60.1	146.7	94.5	135.6	99.8	116.9	50.3	915.3	63.9	851.4
1982-1983	10.3	2.8	8.7	57.9	164.5	88.7	115.2	153.7	99.8	201.4	139.3	41.0	1083.1	79.6	1003.5
1983-1984	13.3	12.7	3.6	25.3	114.5	37.0	156.0	32.6	307.9	163.2	105.4	91.6	1063.1	54.8	1008.2
1984-1985	33.1	30.8	24.6	48.4	90.4	128.6	137.2	32.4	55.9	49.0	55.2	69.9	755.6	136.9	618.7
1985-1986	0.5	6.3	24.1	49.2	65.9	31.5	53.1	111.2	62.9	127.6	158.4	21.4	712.1	80.1	632.0
1986-1987	0.8	1.6	19.2	1.7	57.5	87.2	68.3	129.4	125.5	51.7	68.8	12.0	623.7	23.3	600.3
1987-1988	5.3	14.2	16.2	52.1	49.0	97.9	81.1	144.6	139.0	59.0	126.0	14.0	798.4	87.8	710.7
1988-1989	7.1	0.0	0.5	43.4	91.5	85.9	83.6	114.7	209.3	149.6	112.6	24.8	922.8	51.0	871.8
1989-1990	22.0	4.2	7.8	70.5	140.5	62.1	3.6	134.2	90.3	76.8	36.1	52.1	700.1	104.5	595.6
1990-1991	32.4	1.1	9.4	26.5	115.5	130.6	95.3	57.7	118.6	176.2	72.8	23.6	859.6	69.3	790.3
1991-1992	0.9	0.5	0.4	13.4	37.2	72.6	94.8	69.3	41.9	87.8	61.3	24.9	505.0	15.3	489.8
1992-1993	27.9	6.1	13.2	53.8	84.3	42.2	44.9	80.4	147.9	322.9	135.6	39.8	999.0	101.0	898.1
1993-1994	2.5	4.3	3.8	67.7	140.1	94.1	110.8	154.1	135.9	224.3	191.0	46.5	1175.2	78.4	1096.8
1994-1995	4.3	0.0	0.3	15.7	35.8	118.4	161.6	58.9	142.7	99.8	65.5	27.2	730.2	20.3	709.9
1995-1996	2.2	17.4	14.2	15.2	68.3	66.6	100.7	85.9	163.4	158.3	66.4	18.1	776.7	49.0	727.6
1996-1997	1.1	0.7	20.8	18.3	100.4	90.7	44.9	84.1	201.5	34.9	53.2	22.4	673.1	40.9	632.2
1997-1998	20.3	0.3	0.0	36.1	67.0	158.0	170.5	135.8	153.5	338.7	110.6	25.8	1216.6	56.7	1159.9
1998-1999	6.3	1.7	6.2	23.5	104.9	38.4	63.1	124.9	319.9	91.6	85.7	70.8	936.9	37.7	899.2
1999-2000	30.0	29.1	1.6	107.3	28.6	101.5	90.7	60.6	213.9	166.5	101.9	53.4	985.1	168.0	817.0
2000-2001	20.6	2.8	17.7	74.6	13.1	58.6	161.2	252.0	132.9	303.4	75.4	63.4	1175.6	115.6	1060.0
2001-2002	3.1	18.3	0.0	45.4	60.9	123.1	119.8	35.6	79.1	175.4	101.8	30.4	793.0	66.8	726.1
2002-2003	11.6	14.1	4.5	19.3	119.0	131.7	113.5	67.4	81.0	136.6	55.5	40.5	794.5	49.5	745.0
2003-2004	29.4	2.4	14.0	19.6	60.7	84.1	106.4	47.6	134.4	75.0	58.7	55.9	688.0	65.3	622.7
2004-2005	2.8	18.2	38.7	25.1	83.6	122.0	163.0	111.9	70.8	180.0	71.2	9.5	896.8	84.8	812.1
2005-2006	5.9	0.8	4.6	41.1	121.6	39.5	115.7	109.7	133.9	262.7	102.3	10.1	948.0	52.5	895.6

Ciclos de Precipitación	AÑO ANTERIOR							AÑO POSTERIOR					Total, PP Anual	Épocas Seca y Húmeda	
	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May		Total, PP (Jun-Sep)	Total, PP (Oct-May)
2006-2007	31.5	2.4	8.1	44.3	16.8	79.6	107.7	125.7	23.1	240.4	147.0	38.2	864.7	86.3	778.4
2007-2008	1.9	14.2	8.4	15.3	156.7	128.6	90.7	105.8	175.7	156.0	130.6	29.9	1013.9	39.8	974.1
2008-2009	20.4	3.0	15.4	45.8	127.2	94.9	45.3	238.2	98.3	145.7	103.9	55.6	993.7	84.6	909.1
2009-2010	23.6	16.2	5.2	15.6	103.5	144.2	97.8	65.3	148.8	203.0	116.5	41.7	981.4	60.6	920.8
2010-2011	11.4	3.4	1.8	38.2	57.2	69.2	93.4	101.0	96.6	165.0	134.5	22.0	793.6	54.7	738.9
2011-2012	0.5	11.0	0.0	62.1	41.5	32.2	144.6	203.3	177.5	166.6	96.0	67.9	1003.2	73.6	929.5
2012-2013	0.3	0.0	3.3	25.2	109.7	158.6	76.8	81.1	129.2	281.5	97.3	82.5	1045.5	28.8	1016.7
2013-2014	9.9	7.5	11.8	4.9	145.9	22.4	68.4	98.5	82.3	188.7	103.9	35.5	779.6	34.0	745.5
2014-2015	6.6	2.6	5.2	36.5	34.7	60.2	151.4	243.4	73.0	266.5	83.0	99.9	1063.2	50.9	1012.3
2015-2016	4.0	5.8	0.1	36.6	22.2	131.3	52.1	109.3	112.4	159.9	74.1	9.2	716.9	46.5	670.3
2016-2017	2.1	2.8	1.4	33.1	79.1	22.5	83.2	102.2	95.3	183.1	103.6	62.2	770.5	39.4	731.1
2017-2018	15.8	3.0	27.5	27.9	86.1	83.3	221.5	130.5	166.6	154.6	96.6	66.0	1079.5	74.3	1005.2
2018-2019	14.2	0.7	0.0	32.2	81.5	128.4	91.5	61.8	141.4	227.6	102.9	49.3	931.4	47.1	884.4
2019-2020	12.0	15.6	0.0	10.0	160.5	79.6	214.4	50.3	41.1	64.4	91.9	20.7	760.6	37.6	723.0
2020-2021	3.4	36.4	0.9	14.0	43.8	76.8	185.0	132.9	71.6	182.7	170.7	50.1	968.2	54.7	913.5
2021-2022	13.8	5.9	16.2	31.2	143.4	76.8	60.2	85.0	234.5	206.5	123.9	69.5	1067.0	67.2	999.8
2022-2023	26.6	12.4	28.5	54.0	41.1	8.3	82.8	116.1	157.9	161.6	90.4	62.9	842.6	121.5	721.1
2023-2024	0.0	4.6	4.3	4.1	140.4	101.0	228.5	74.6	110.2	91.1	104.3	55.4	918.4	13.0	905.3
2024-2025	10.8	3.7	1.3	32.3	80.0	55.1	170.8	110.0	130.0	160.0	104.0	45.0	903.0		
	AÑO ANTERIOR							AÑO POSTERIOR					Total, PP Anual		
	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May			
Promedio (1934-2025)	14.3	7.7	9.7	38.9	91.3	80.8	104.2	111.0	131.4	162.5	105.6	46.2	903.8		
Mediana	12.0	4.2	7.0	33.1	88.3	82.6	94.8	103.1	129.2	158.3	101.8	44.6	903.0		
Rango	67.6	39.2	38.7	118.3	293.9	150.3	227.3	254.6	296.8	328.4	263.2	194.5	980.6		
Varianza	167.8	89.3	90.4	608.1	2256.7	1305.6	2698.0	2858.0	3862.3	5013.1	2210.2	912.2	36760.3		
Desviación Estándar	13.0	9.4	9.5	24.7	47.5	36.1	51.9	53.5	62.1	70.8	47.0	30.2	191.7		

➤ ***Análisis de Serie de Precipitación Histórica Transpuesta a la Subcuenca el Ronquillo***

El análisis estadístico de las precipitaciones registradas entre los años hidrológicos de 1934–1935 hasta 2023–2024 evidencia una marcada estacionalidad en el régimen de precipitaciones. Los valores promedio muestran que las lluvias se concentran principalmente entre octubre y abril, alcanzando su máximo en marzo, periodo que representa la estación húmeda. Por el contrario, entre junio y agosto las precipitaciones son mínimas, correspondientes a la estación seca, mientras que mayo y septiembre se consideran meses de transición entre ambas épocas. Cabe señalar que entre los años hidrológicos 1961 y 1965 no se dispone de información pluviométrica, presentándose un vacío en la serie de datos.

La estacionalidad también se aprecia en el gráfico de cajas (Ver Gráfico 8), donde se distingue claramente la diferencia entre los meses húmedos y secos. Durante la estación seca, las cajas presentan una forma compacta, lo que evidencia baja variabilidad en las precipitaciones; en cambio, durante la época húmeda se observa una mayor dispersión de datos, alta variabilidad e incluso la presencia de valores anómalos. Asimismo, la varianza y la desviación estándar elevadas confirman que el régimen de precipitaciones de la zona es irregular e interanual, una característica típica de los ambientes andinos influenciados por condiciones atmosféricas estacionales y anomalías climáticas.

Para complementar el análisis, se elaboró el Gráfico 9, el cual representa una serie temporal que abarca el periodo comprendido entre 1934 hasta 2024. La información ha sido organizada en años hidrológicos, los cuales inician en el mes de junio del año anterior y concluyen en mayo del año siguiente. Esta estructuración permite observar de manera más precisa la secuencia anual de las precipitaciones, desde sus valores mínimos hasta los máximos, así como su descenso hacia el nuevo ciclo; esto nos permitió visualizar la variabilidad climática interanual en la subcuenca.

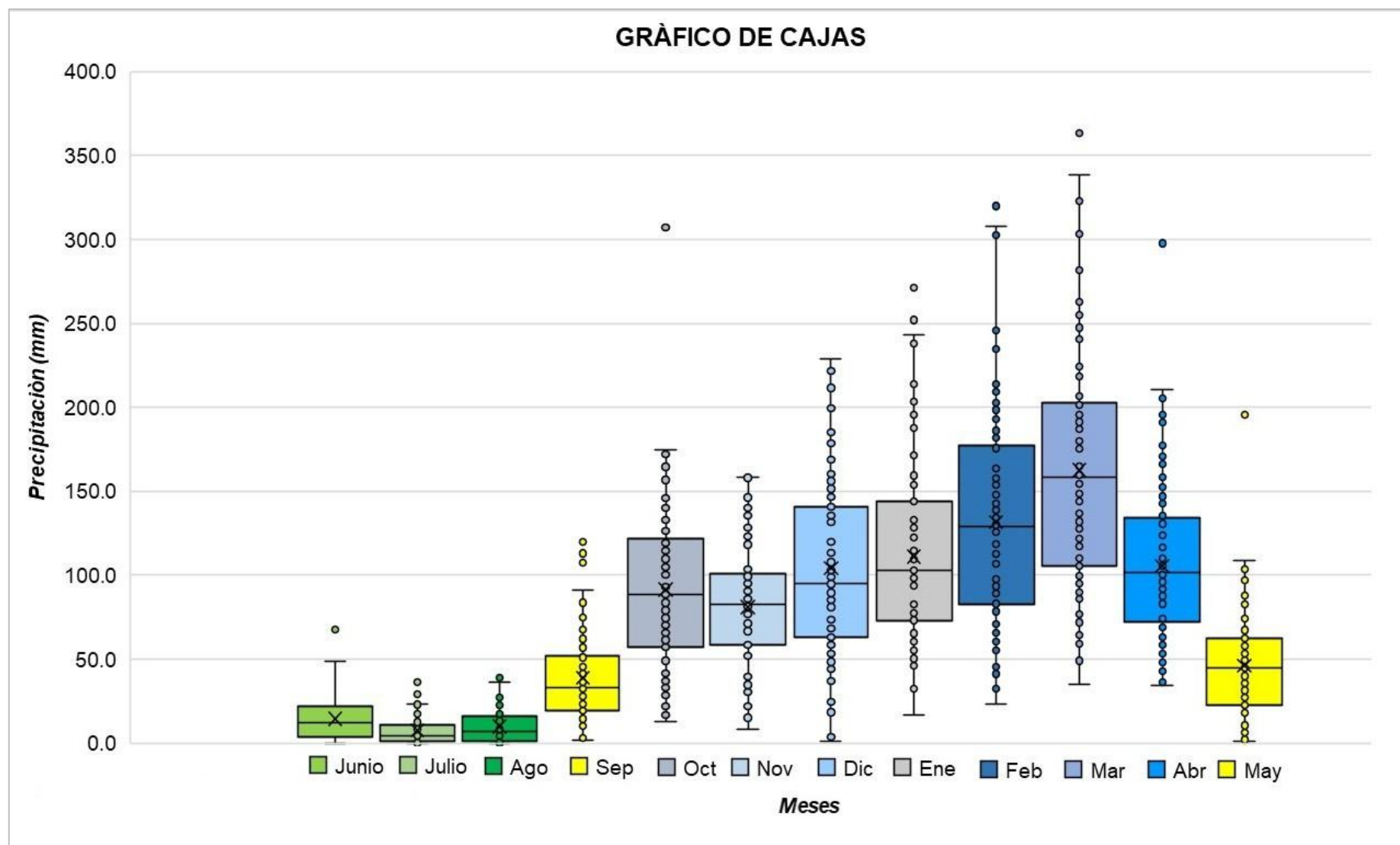


Gráfico 8. Variabilidad mensual de la precipitación en la subcuenca El Ronquillo.

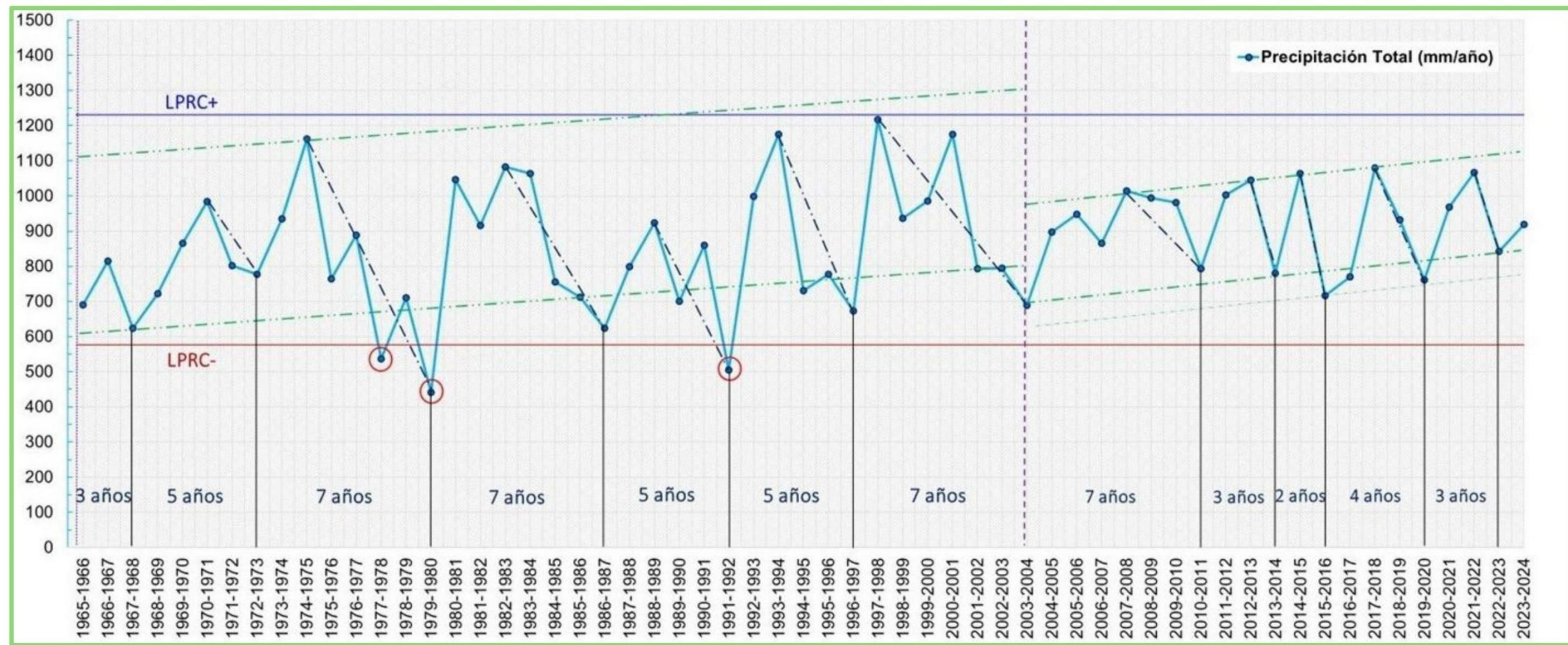
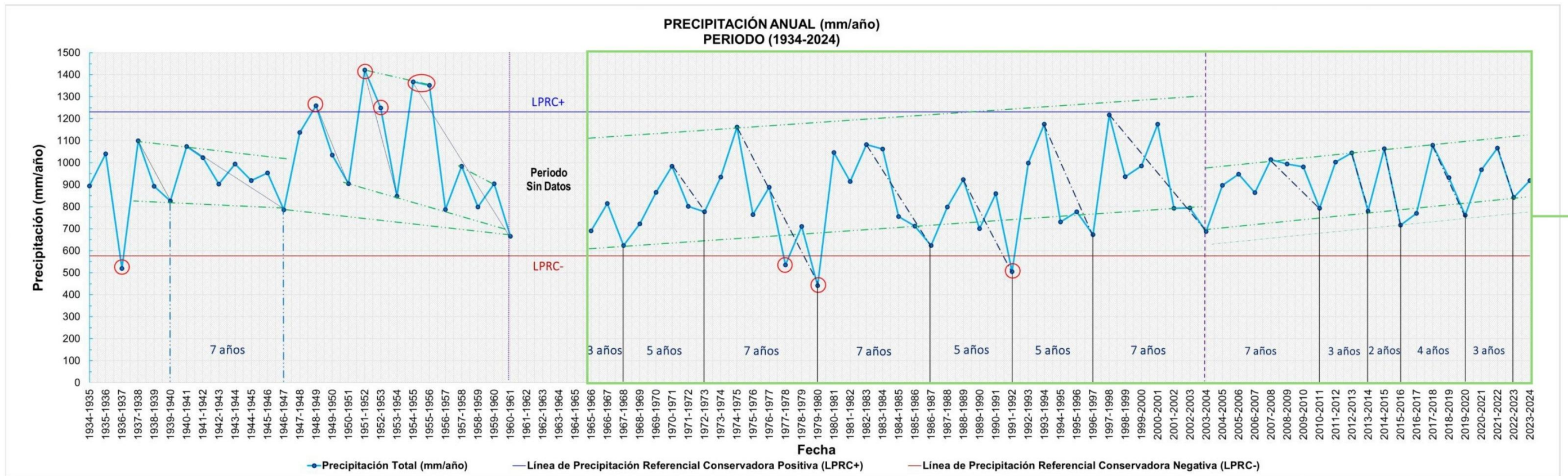


Gráfico 9. Líneas de tendencia promedio total anual de precipitaciones en la Subcuenca el Ronquillo, para el periodo 1934-2024.

Las principales características observadas se describen a continuación:

- ❖ Se definió la Línea de Precipitación Referencial Conservadora (LPRC) Mínima y Máxima como un parámetro estadístico que representa la precipitación media anual típica de la subcuenca. Esta línea resulta útil tanto para identificar tendencias como para establecer un umbral máximo y mínimo que permita distinguir entre años anómalos húmedos y secos a lo largo de la serie histórica. Su valor se obtuvo al sumar el promedio general de las precipitaciones anuales con la desviación estándar correspondiente, incorporando además un pequeño margen de error (15%). El resultado final fue de 1231.10 mm/año como máxima y 576.50 mm/año como mínima. La mayor parte de los registros anuales se encuentran próximos a estas líneas, lo que indica un comportamiento coherente con las condiciones esperadas para la Subcuenca.
- ❖ La tendencia general evidencia los periodos más secos y los más húmedos dentro del registro histórico, con valores de precipitación anual que varían entre aproximadamente 440 y 1420 mm/año. Se identificaron picos notoriamente superiores a la LPRC máxima, los cuales corresponden a años húmedos extremos, tales como: 1948-1949, 1951-1952, 1954-1956, 1974-1975, 1993-1994, 1997-1998 y 2000-2001; por otro lado, los periodos más secos se registran en los años 1936–1937, 1979–1980 y 1991–1992, los cuales coinciden con los episodios de sequía más intensos documentados en la zona.
- ❖ La distribución temporal de los picos extremos, tanto mínimos como máximos, revela un patrón que sugiere la existencia de ciclos de precipitación asociados a variaciones climáticas de mayor escala. En general, la mayoría de estos ciclos, registrados desde los años hidrológicos 1961–1962 hasta 2010–2011, presentan una duración promedio entre 5 y 7 años. Sin embargo, en el periodo inicial de la serie entre 1934 y 1961, no se identifica ninguna tendencia clara ni consistencia estadística en los valores de precipitación, debido a la alta variabilidad interanual.

Por otro lado, después del año hidrológico 2010–2011 se observa un cambio significativo en la dinámica de precipitaciones, con la aparición de ciclos mucho más cortos, de entre 2, 3 y 4, que se extienden hasta el año hidrológico 2022–2023.

Este cambio podría estar relacionado con la ocurrencia de los fenómenos La Niña (2010–2011) y El Niño, los cuales, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), modifican de forma significativa los patrones climáticos e hidrológicos en Perú y Ecuador, actúan como fenómenos de alcance regional. Además, el aumento de la variabilidad climática asociado al calentamiento global habría contribuido a un régimen de precipitaciones más irregular y con ciclos más cortos.

3.8.2. Escurrimiento e Infiltración

Los datos de precipitación constituyeron la base fundamental para la estimación de parámetros hidrológicos como la precipitación efectiva (P_e) y la infiltración (F), expresados en milímetros. Diversas investigaciones realizadas en el área aportan información relevante sobre el coeficiente de escurrimiento o escorrentía; en particular, la investigación más reciente desarrollada en la parte baja de la Subcuenca por Rodríguez y Huamán (2005), titulada *“Balance Hidrológico de la Subcuenca Tres Ríos”*, combinó una exhaustiva revisión bibliográfica con ensayos de campo empleando el método de cilindros concéntricos para evaluar la infiltración. Los resultados obtenidos reportaron un coeficiente de infiltración de 0.35 y un coeficiente de escorrentía de 0.65, valores que muestran coherencia tanto con la literatura como con las observaciones en campo registradas en su investigación.

De forma complementaria, el estudio realizado por Orrillo y Morera (2018); en la Subcuenca El Ronquillo analizó la dinámica entre los procesos de escurrimiento e infiltración a partir del análisis de series de caudal registradas entre 2008 y 2017 en la Estación Hidrométrica El Ronquillo, ubicada en la salida de la Subcuenca. En el Gráfico 10 se presenta la relación temporal entre la precipitación promedio mensual y los caudales medios, lo que evidencia la marcada estacionalidad del sistema.

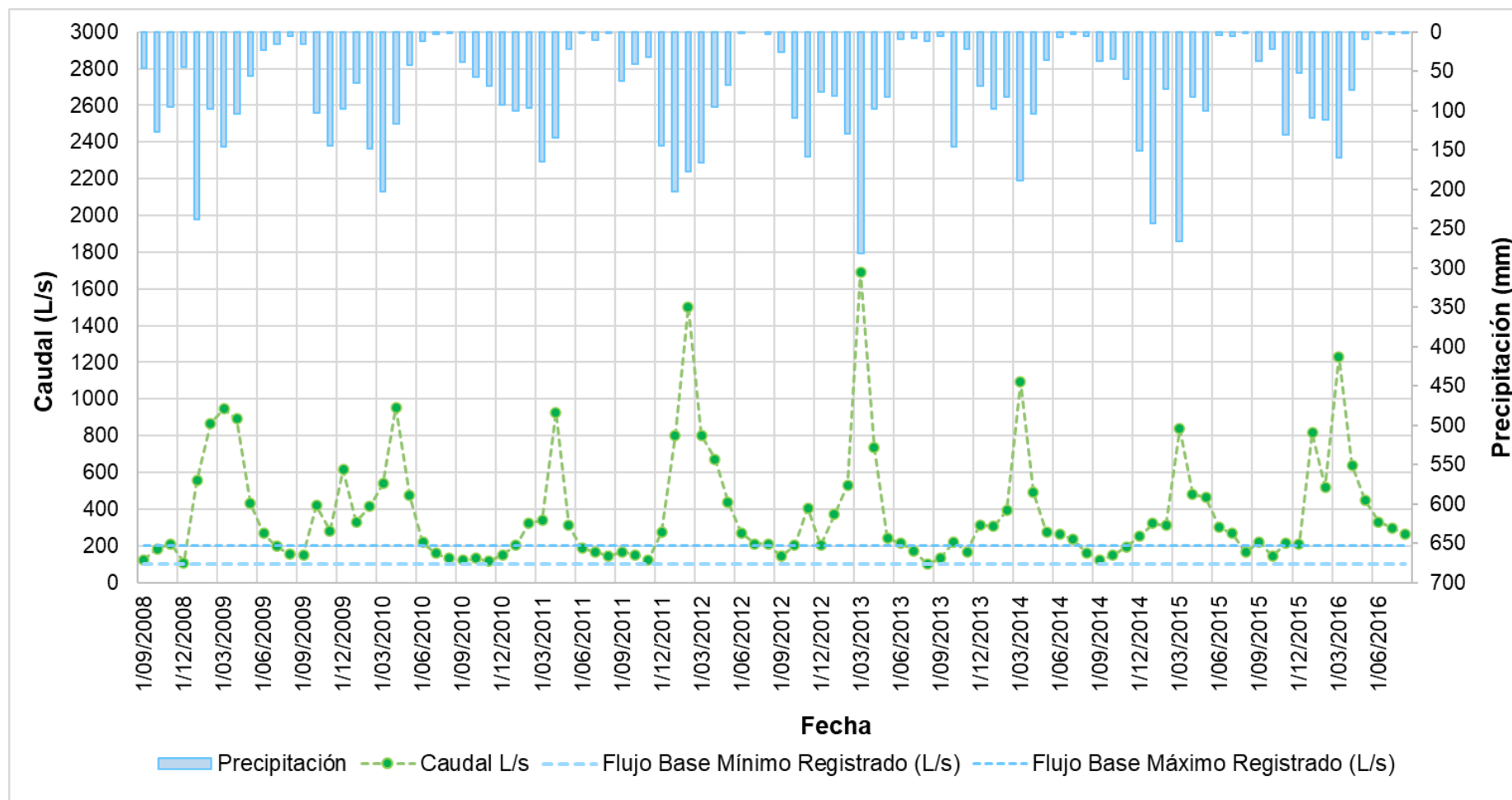


Gráfico 10. Relación temporal entre precipitación mensual y caudal medio en la Subcuenca El Ronquillo (2008–2017).

Asimismo, en la investigación, se aplicaron distintos métodos de separación de caudales, entre ellos el filtro digital de Eckhardt, ampliamente utilizado para discriminar el aporte del flujo base en ríos de respuesta mixta. Los resultados indicaron un índice de flujo base (BFI) cercano a 0.50, lo que significa que aproximadamente la mitad del caudal observado proviene del agua que se infiltra, se almacena en el subsuelo y posteriormente descarga de forma gradual. Este comportamiento se asocia con las características geológicas de la subcuenca, compuesta principalmente por rocas fracturadas y materiales volcánicos permeables, mientras que, el caudal restante responde al escurrimiento superficial generado directamente por las precipitaciones.

Para representar esta dinámica, en el Gráfico 11 se muestra la separación del caudal total en sus dos componentes principales: flujo base y escorrentía superficial; y muestra picos de caudal cercanos a 920 L/s en marzo durante la época húmeda y mínimos de alrededor de 150 L/s en la época seca. El flujo base se mantiene estable entre 150 y 250 L/s, aportando cerca del 50 % del caudal total y sosteniendo las descargas constantes incluso en periodos de baja precipitación.

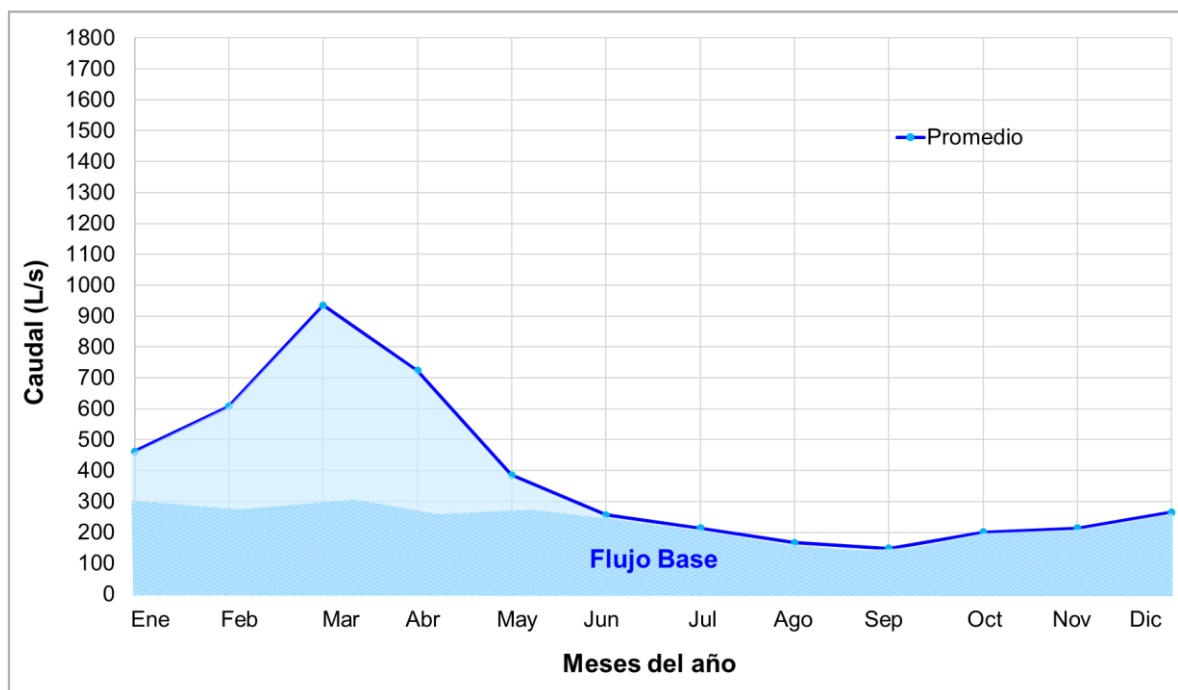


Gráfico 11. Separación promedio del caudal total en sus componentes de flujo base y escorrentía superficial.

3.8.3. Balance Hidrológico

El balance hídrico de la subcuenca se elaboró a partir de las ecuaciones descritas en el apartado 2.2.6, correspondiente al Balance Hidrológico. En este análisis se consideraron como variables principales la precipitación total (PP), la precipitación efectiva o escurrimiento (Pe), la infiltración (F) y el volumen de infiltración (VF). Con el fin de optimizar la interpretación de los resultados, los cálculos se organizaron en función de los ciclos característicos de precipitación identificados en la subcuenca.

En la Tabla 16 se resume el balance hidrológico correspondiente al periodo 1934–2025, organizado según ciclos de precipitación que varían entre dos y siete años. Este resumen permite identificar la proporción de la precipitación total que se convierte en escorrentía superficial e infiltración. Además, los volúmenes de infiltración estimados en función del área de la Subcuenca El Ronquillo se ilustran en el Gráfico 12.

Tabla 16. Balance Hidrológico en el periodo (1934-2025) de la Subcuenca el Ronquillo.

BALANCE HIDROLOGICO									
SUBCUENCA EL RONQUILLO									
		1	2	3 = 1 * 2	4 = 1 - 3 en mm	5 = 4 / 1000 en m	6=5*A _{sc} en m ³	7=6/1'000,000 en MMC	
		PP	C	Pe	F	F	VF	VF	
			C = Pe / PP	Pe = C * PP	F = PP - Pe	F = PP - Pe	VF = F * A _{sc}	VF = F * A _{sc}	
		mm	-	mm	mm	m	m ³	MMC	
CICLOS DE PRECIPITACIÓN	NÚMERO DE AÑOS POR CICLO	PRECIPITACIÓN TOTAL (PP)	COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA (C)	PRECIPITACIÓN EFECTIVA O ESCURRIMIENTO (Pe)	INFILTRACIÓN (F)	INFILTRACIÓN (F)	VOLUMEN DE INFILTRACIÓN (VF)	VOLUMEN DE INFILTRACIÓN (VF)	% PARCIAL DE LA PRECIPITACIÓN TOTAL
1965-1968	3	2128.3	0.65	1383.4	744.9	0.74	31658105.1	31.7	4.1
1968-1973	5	4150.6	0.65	2697.9	1452.7	1.45	61739598.0	61.7	8.0
1973-1980	7	5438.6	0.65	3535.1	1903.5	1.90	80899297.6	80.9	10.5
1980-1987	7	6199.7	0.65	4029.8	2169.9	2.17	92219851.1	92.2	11.9
1987-1992	5	3786.0	0.65	2460.9	1325.1	1.33	56316930.6	56.3	7.3
1992-1997	5	4354.2	0.65	2830.2	1524.0	1.52	64768136.3	64.8	8.4
1997-2004	7	6589.8	0.65	4283.4	2306.4	2.31	98022850.3	98.0	12.7
2004-2011	7	6492.2	0.65	4219.9	2272.3	2.27	96570924.2	96.6	12.5
2011-2014	3	2828.2	0.65	1838.4	989.9	0.99	42069979.5	42.1	5.4
2014-2016	2	1780.0	0.65	1157.0	623.0	0.62	26477752.1	26.5	3.4
2016-2020	4	3542.0	0.65	2302.3	1239.7	1.24	52687507.5	52.7	6.8
2020-2023	3	2877.8	0.65	1870.6	1007.2	1.01	42806921.2	42.8	5.5
2023-2025	1	1829.3	0.65	1189.0	640.2	0.64	27210383.0	27.2	3.5
	59	51996.5	0.7	33797.7	18198.8	18.2	773 448 236.5	773.4	100.0
A _{sc}	AREA DE LA SUBCUENCA EL RONQUILLO en Km ²				42.50	Km ²			
A _{sc}	AREA DE LA SUBCUENCA EL RONQUILLO en m ²				42 500 000.00	m ²			

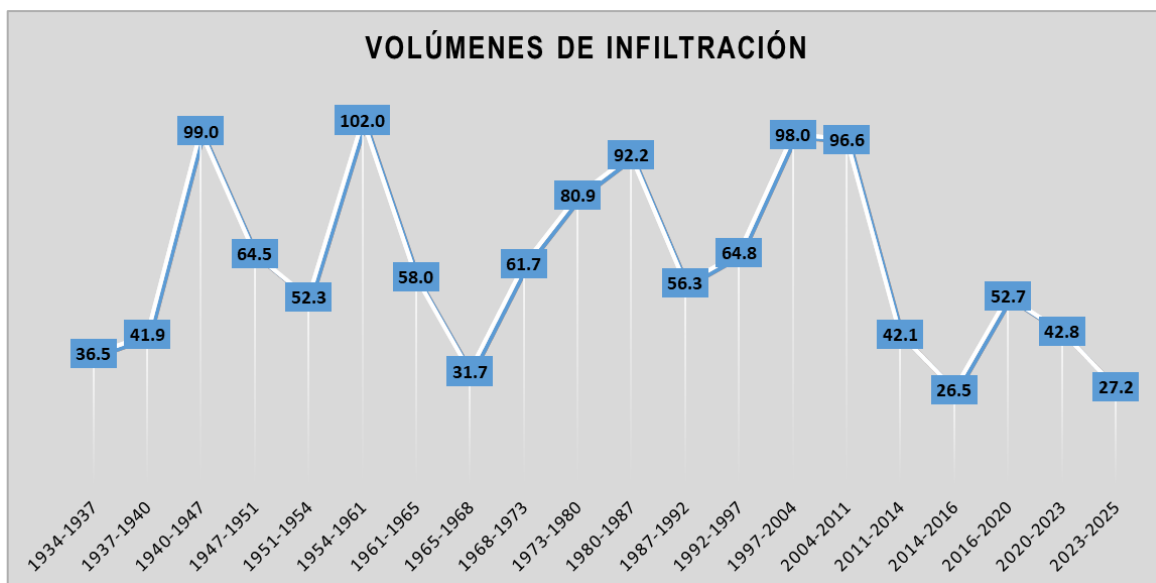


Gráfico 12. Estimación del volumen de infiltración por ciclos de precipitación (1934–2025).

Los resultados indican:

- ❖ La precipitación total registrada en el periodo de análisis alcanza los 82,538 mm, de los cuales aproximadamente entre el 30% - 35% contribuyen a los procesos de infiltración, representando así una fracción que alimenta la recarga subterránea en los acuíferos.
- ❖ Los volúmenes de infiltración, entendidos como la cantidad de agua que logra ingresar al subsuelo desde la superficie, si bien los volúmenes dependen de la precipitación, el ingreso efectivo al subsuelo está influenciado por las condiciones geológicas-estructurales de la subcuenca.
- ❖ El volumen total infiltrado durante todo el periodo de estudio se estima en 1,227.8 MMC. Los valores más elevados de infiltración se observan en los ciclos 1940–1947, 1954–1961, 1980–1987, 1997–2004 y 2004–2011, coincidiendo con épocas húmedas que aportaron significativamente a la recarga de los acuíferos. En cambio, los volúmenes más bajos se registran en los periodos 1965–1968, 2014–2016 y 2023–2025, asociados a épocas secas y mayor vulnerabilidad hídrica.

- ❖ A partir del ciclo 2011–2014 se observa una disminución sostenida en los volúmenes de infiltración, lo que refleja una menor cantidad de agua potencialmente infiltrada. Esta tendencia se relaciona principalmente con la reducción de las precipitaciones registradas en los últimos ciclos, lo cual evidencia una disminución de la disponibilidad hídrica en ambas épocas.

3.9. GEOHIDROLOGÍA

3.9.1. Unidades Geohidrológicas

La delimitación de las unidades geohidrológicas se realizó a partir de la subdivisión de las formaciones geológicas según su comportamiento hidráulico, considerando principalmente los parámetros de permeabilidad y porosidad, así como su variación con la profundidad. Para ello se integró la información proveniente del mapeo geológico y de las observaciones estructurales obtenidas en campo, complementada con diversas fuentes bibliográficas. Como referencia inicial se empleó la clasificación propuesta por Dirk Masuch (2012), quien asigna tipos de permeabilidad a distintos tipos de rocas. Asimismo, se utilizó la compilación de rangos de porosidad publicada por Hamill y Bell (1986), junto con la literatura desarrollada en el Capítulo II. Para incorporar la variación hidráulica con la profundidad se consideró el efecto del aumento de la presión litostática, que tiene la tendencia de reducir la permeabilidad en función de la profundidad (Ver Gráfico 13). Por ello, se establecieron rangos generales: de 0 a 50 m, corresponde a la zona fracturada y altamente meteorizada en todas las formaciones, y los rangos de profundidades mayores a 50 m, donde las estructuras tienden a estar más cerradas y la conductividad hidráulica disminuye. Con el fin de asignar valores representativos, se revisaron estudios hidrogeológicos desarrollados en proyectos mineros ubicados en ambientes geológicos similares, donde se reportan resultados de pruebas hidráulicas en perforaciones, ensayos de bombeo, estudios geofísicos y análisis piezométricos. Estas investigaciones permiten contar con valores de referencia coherentes con las características del medio geológico. Entre las fuentes principales se consideran: El EIA del Proyecto Conga elaborado por Knight Piésold (2010); la Línea Base Hidrogeológica de la Cuarta MEIA de la UM Las Bambas, desarrollada por Piteau (2024); la Línea Base Hidrogeológica de la UM Magistral preparada por Golder (2021); y la Línea Base Hidrogeológica de la UM Antamina presentada por Stantec (2023).

A partir del análisis conjunto de estas referencias y de la correlación estratigráfica con las formaciones presentes en la subcuenca, se definieron finalmente los valores representativos de permeabilidad y porosidad para cada unidad geohidrológica según la profundidad. La síntesis de estos parámetros se presenta en la Tabla 17.

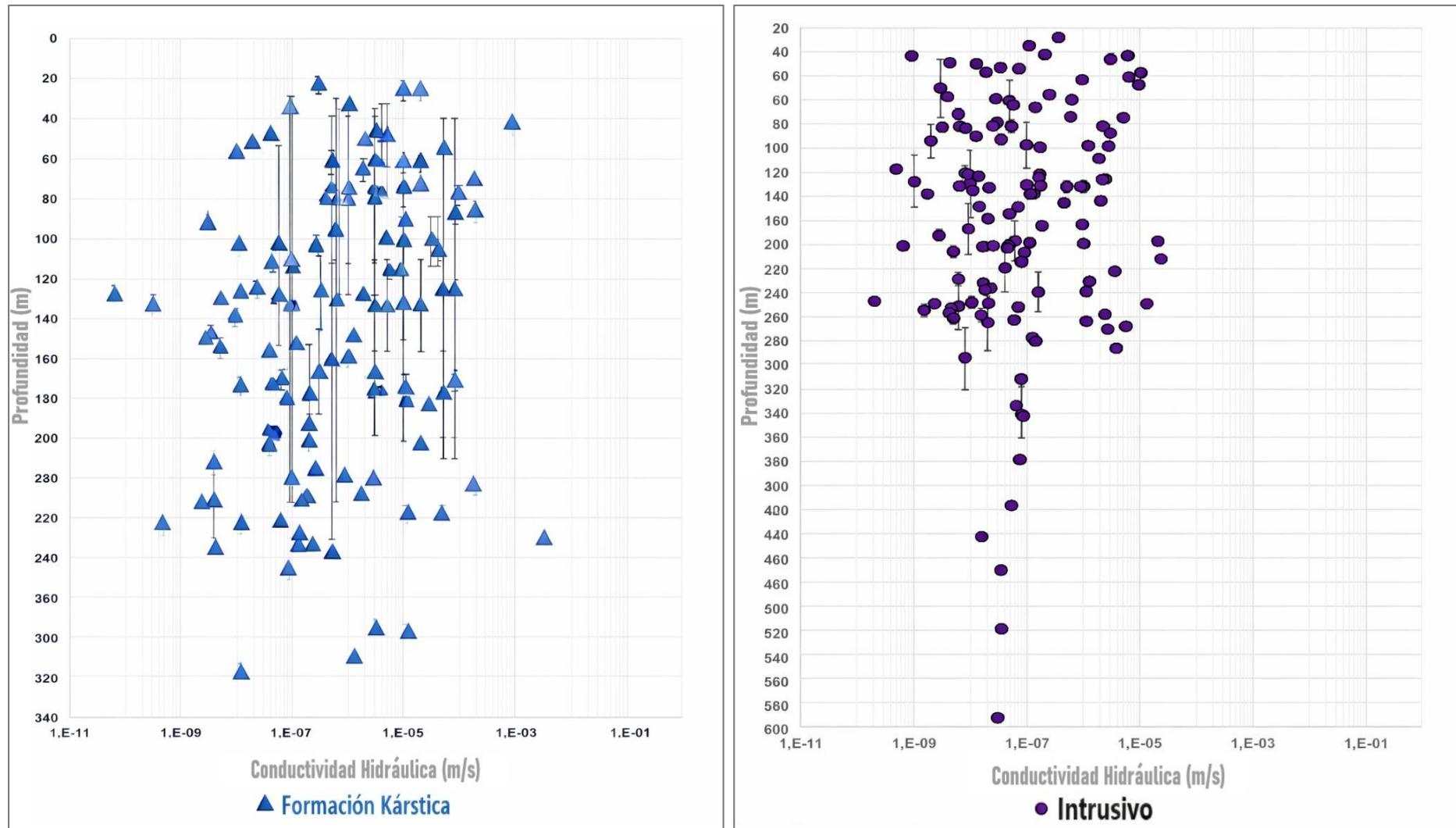


Gráfico 13. Variación de la conductividad hidráulica en función de la profundidad en una formación kárstica y un cuerpo intrusivo.
Fuente: Reservado, (2025).

Tabla 17. Definición de Unidades Geohidrológicas en la Subcuenca El Ronquillo.

Unidad Geológica			Litología	Intervalos de Profundidad (m)	Tipo de Acuífero/Acuitardo Según su Función Hidráulica en Profundidad (Dirk Masuch, 2012)	Conductividad Hidráulica Conceptual (m/s)		Porosidad (%)	Tipo de Acuífero
						mín	máx		
Depósitos Cuaternarios	Depósitos No Consolidados		Depósitos coluviales, aluviales, fluviales y coluvio-aluviales, compuestos por gravas, bloques, arenas y matriz variable.	0 - 50	Acuífero Muy Alto a Medio	1.00E-04	1.00E-02	25-40%	Acuífero poroso no consolidado
Secuencias Volcánicas	Formación Porculla	Secuencias Andesíticas	Andesita porfírica con depósitos de bloques y cenizas (tobas volcánicas); flujo por porosidad intergranular.	0 - 50	Acuífero Alto a Acuitardo Bajo	1.00E-06	1.00E-03	10-35%	Acuífero en roca volcánica
			Rocas andesíticas compactas, con menor fracturamiento y alteración	> 50	Acuitardo Moderado a Muy Bajo	1.00E-08	5.00E-05	10-25%	
	Formación Porculla	Centro Volcánico Rumiorcco	Depósitos piroclásticos riolíticos (cenizas, bloques >1 cm); materiales poco consolidados con flujo intergranular predominante.	0 - 50	Acuífero Alto a Acuitardo Bajo	1.00E-06	1.00E-03	10-35%	Acuífero en roca volcánica
			Secuencias piroclásticas riolíticas más compactas; menor porosidad, flujo principalmente en zonas con fracturas	> 50	Acuitardo Moderado a Muy Bajo	1.00E-08	5.00E-05	10-25%	
	Volcánico Huambos	Secuencia Volcánica Atazaico	Flujos piroclásticos con bloques y cenizas, fragmentos porfíricos; flujo intergranular en materiales poco consolidados.	0 - 50	Acuífero Alto a Acuitardo Bajo	1.00E-06	1.00E-03	10-35%	Acuífero en roca volcánica
			Secuencias piroclásticas compactas; flujo principalmente en zonas con fracturas.	> 50	Acuitardo Moderado a Muy Bajo	1.00E-08	5.00E-05	10-25%	

Unidad Geológica		Litología	Intervalos de Profundidad (m)	Tipo de Acuífero/Acuitardo Según su Función Hidráulica en Profundidad (Dirk Masuch, 2012)	Conductividad Hidráulica Conceptual (m/s)		Porosidad (%)	Tipo de Acuífero
					mín	máx		
Intrusivos	Pórfido Diorítico-Granodiorítico	Pórfido fracturado y alterado hidrotermalmente, textura porfirítica a fanerítica, presencia de óxidos y pirita diseminada.	0-50	Acuífero Alto a Acuitardo Moderado	1.00E-05	1.00E-03	5 - 20%	Acuífero discontinuo en roca intrusiva fracturada
			50-100	Acuífero Medio a Acuitardo Bajo	1.00E-07	1.00E-04		
		Pórfido compacto, menor fracturamiento y alteración; roca competente.	100 - 200	Acuitardo Bajo a Muy Bajo	1.00E-08	1.00E-06	5-15%	Acuitardo en roca intrusiva
			> 200	Acuitardo Muy Bajo a Extra Bajo	> 1.00E-08	1.00E-07		
Formación Cajamarca		Calizas masivas gris oscuro a azuladas con intercalaciones margosas; en superficie presentan alto fracturamiento y geoformas kársticas, en profundidad se infiere posible desarrollo de sistemas kársticos.	0-50	Acuífero Alto a Acuitardo Bajo	1.00E-07	1.00E-03	5-40%	Acuífero en rocas fracturadas y kársticas
			50-500	Acuitardo Moderado a Muy Bajo	1.00E-08	1.00E-05	5-40%	
			> 500	Acuitardo Extra Bajo	> 1.00E-08		5-40%	
Grupo Quilquiñan		Calizas nodulares con intercalaciones de margas y limoarcillitas calcáreas; muy fracturadas.	0 - 50	Acuífero Alto a Acuitardo Bajo	1.00E-06	1.00E-03	2-40%	Acuífero discontinuo en rocas sedimentarias fracturadas
			50 - 100	Acuitardo Muy Bajo a Extra Bajo	1.00E-08	1.00E-07	2-40%	Acuitardo en roca sedimentaria
		100 - 200	Acuitardo Extra Bajo	1.00E-09	1.00E-08	2-40%		
		> 200		> 1.00E-09		2-40%		

Unidad Geológica		Litología	Intervalos de Profundidad (m)	Tipo de Acuífero/Acuitardo Según su Función Hidráulica en Profundidad (Dirk Masuch, 2012)	Conductividad Hidráulica Conceptual (m/s)		Porosidad (%)	Tipo de Acuífero
					mín	máx		
Grupo Pulluicana	Formación Yumagual	Arcillolitas, margas y calizas finas estratificadas, con intercalaciones de pizarras y limolitas; muy fracturadas y meteorizadas.	0 - 50	Acuífero Alto a Acuitardo Bajo	1.00E-06	3.00E-03	2-40%	Acuífero discontinuo en rocas sedimentarias fracturadas
		Calizas masivas y capas calcáreas gruesas con fósiles; roca más compacta y competente.	50 - 100	Acuitardo Bajo a Muy Bajo	1.00E-08	1.00E-07	2-40%	Acuitardo en roca sedimentaria
			100 - 200	Acuitardo Extra Bajo	1.00E-09	1.00E-08	2-40%	
			> 200		> 1.00E-09		2-40%	
Grupo Crisnejas	Formación Pariatambo	Arcillolitas, margas y calizas grises a negruzcas con nódulos de sílice; muy fracturadas, bituminosas y meteorizadas.	0 - 50	Acuífero Medio a Acuitardo Bajo	1.00E-06	3.00E-03	2-40%	Acuífero discontinuo en rocas sedimentarias fracturadas
		Calizas con texturas wackestone a mudstone, matriz fina y menor fracturamiento; roca más compacta, ambiente euxínico.	50 - 100	Acuitardo Bajo a Muy Bajo	1.00E-07	1.00E-06	2-40%	Acuitardo en roca sedimentaria
			> 100	Acuitardo Bajo a Muy Bajo	1.00E-08	1.00E-06	2-40%	
	Formación Chúlec	Calizas arenosas, arcillolitas calcáreas y margas con estratificación nodular y venillas de calcita; muy fracturadas y meteorizadas.	0 - 50	Acuífero Alto a Acuitardo Bajo	1.00E-06	1.00E-03	2-40%	Acuífero discontinuo en rocas sedimentarias fracturadas
		Bancos de calizas más gruesas y compactas con intercalaciones de arcillolitas; roca competente.	50 - 100	Acuitardo Bajo a Muy Bajo	1.00E-07	1.00E-06	2-40%	Acuitardo en roca sedimentaria
			100 - 200	Acuitardo Muy Bajo a Extra Bajo	1.00E-08	1.00E-07	2-40%	
			> 200	Acuitardo Extra Bajo	> 1.00E-08		2-40%	

Unidad Geológica	Litología	Intervalos de Profundidad (m)	Tipo de Acuífero/Acuitardo Según su Función Hidráulica en Profundidad (Dirk Masuch, 2012)	Conductividad Hidráulica Conceptual (m/s)		Porosidad (%)	Tipo de Acuífero	
				mín	máx			
Formación Inca	Intercalaciones de areniscas calcáreas, arcillolitas ferruginosas y calizas con óxidos de hierro; muy fracturadas y meteorizadas.	0 - 50	Acuífero Medio a Acuitardo Bajo	1.00E-07	4.00E-04	2-40%	Acuitardo en roca sedimentaria	
		Areniscas rojizas y calizas más compactas; roca competente.	50 - 100	Acuitardo Extra Bajo	1.00E-09	1.00E-08		2-40%
	> 100		> 1.00E-09		2-40%			
Grupo Goyllarisquizga	Formación Farrat	Areniscas cuarzosas y limolitas en matriz sílicea, con estratificación cruzada y marcas de oleaje; muy fracturadas.	0-50	Acuífero Alto a Acuitardo Bajo	1.00E-06	3.00E-03	2-40%	Acuífero/Acuitardo en roca sedimentaria altamente fracturada
		Areniscas más compactas con intercalaciones delgadas de limolitas; roca competente.	50-150	Acuífero Medio a Acuitardo Muy Bajo	1.00E-07	4.00E-04	2-40%	
			150 - 200		1.00E-07	1.00E-04	2-40%	Acuitardo en roca sedimentaria fracturada
			> 300	Acuitardo Muy Bajo	> 1.00E-07		2-40%	

3.9.2. Contexto Estructural

El marco estructural ejerce un control fundamental sobre el comportamiento geohidrológico de la subcuenca, pues la actividad tectónica modifica la geometría de los estratos, la continuidad de las unidades geohidrológicas y la conexión hidráulica entre ellas. Los pliegues y fallas en la subcuenca no solo condicionan la distribución espacial de zonas de baja o alta conductividad hidráulica, sino que también definen trayectorias preferenciales del flujo subterráneo.

En zona donde existe plegamientos, la orientación de los estratos y el grado de fracturamiento asociado influyen directamente en la capacidad de almacenamiento y transmisión de flujo subterráneo. En la subcuenca el ronquillo, la mayor concentración de fuentes de agua subterránea se encuentran cerca de la zona de charnela del sinclinal, por lo que sugiere que este sector funciona como una franja de buena conectividad hidráulica, donde se interceptan múltiples discontinuidades como diaclasas, fallas locales y planos de estratificación que son zonas favorables de flujo subterráneo. Las fallas regionales son estructuras clave en el comportamiento geohidrológico; a lo largo de los planos de falla suele concentrarse material triturado de baja permeabilidad y pequeñas franjas fracturadas que pueden facilitar el flujo, por lo cual dependiendo del predominio entre ambos, una falla puede actuar como barrera o como conducto, generando anisotropías con mayor permeabilidad paralela al plano; en la subcuenca el Ronquillo, las propiedades de las discontinuidades sugieren un comportamiento mayormente conductivo en las capas más superficiales.

Por otro lado, el levantamiento de estaciones estructurales (Ver Tabla 18) permitió caracterizar las propiedades de las principales discontinuidades, registrando su orientación espacial y propiedades de las discontinuidades (presentadas en el Anexo 2); tales como: espaciamiento, persistencia, apertura, relleno y rugosidad. Esta información brinda una comprensión del comportamiento estructural de las fracturas en los niveles más superficiales de las formaciones geológicas. La integración de esta información en diagramas estereográficos (Ver Plano 08) permitió identificar familias de discontinuidades, y definir orientaciones para el movimiento del agua subterránea.

Tabla 18. Resumen de estaciones de medición de propiedades de las discontinuidades de tipo estratificación en la Subcuenca el Ronquillo.

Estación	Coordenadas UTM Datum: WGS84			Macizo Rcoso Litología / Formación	Orientación		
	Este	Norte	Cota		Dirección		
					Z	DIP	DD
E1	769287.49	9210700.04	3224.90	Formación Yumagual	320	57	50
E2	767840.29	9210373.84	3441.98	Formación Yumagual	125	24	215
E3	767272.53	9209783.42	3526.98	Formación Yumagual	120	35	210
E4	762286.00	9210747.88	3810.98	Formación Cajamarca	20	30	110
E5	769287.49	9210700.04	3224.90	Formación Farrat	320	57	50
E6	770604.59	9206773.53	3235.98	Formación Pariatambo	97	62	187
E7	766382.52	9208318.28	3646.98	Formación Pariatambo	285	47	15
E8	764995.03	9208533.13	3759.98	Formación Yumagual	294	73	24
E9	771961.52	9209138.75	3005.98	Formación Inca	100	55	190
E10	769287.49	9210700.04	3224.90	Formación Pariatambo	300	55	30
E11	768254.00	9211065.00	3381.00	Formación Chúlec	64	15	154
E12	768087.00	9210628.00	3422.00	Formación Pariatambo	125	21	215
E13	767811.00	9210339.00	3451.00	Formación Yumagual	137	21	227
E14	767574.00	9210207.00	3459.00	Formación Yumagual	52	80	142
E15	767233.00	9209804.00	3525.00	Formación Yumagual	21	40	111
E16	768650.00	9208782.00	3350.00	Formación Yumagual	201	78	291
E17	769430.00	9208855.00	3279.00	Formación Yumagual	59	77	149
E18	769189.00	9208534.00	3180.00	Formación Yumagual	116	26	206
E19	769941.00	9209578.00	3181.00	Formación Yumagual	205	71	295
E20	770126.00	9209704.00	3130.00	Formación Pariatambo	64	15	154
E21	771863.00	9208815.00	2938.00	Formación Chúlec	359	26	89
E22	766547.00	9207224.00	3638.00	Formación Farrat	275	53	5
E23	766604.00	9207001.00	3626.00	Formación Farrat	253	42	343
E24	766708.00	9206783.00	3638.00	Formación Farrat	167	56	257
E25	767472.00	9205589.00	3590.00	Formación Farrat	200	50	290
E26	768482.00	9206070.00	3537.00	Formación Farrat	169	83	259
E27	768521.00	9206093.00	3519.00	Formación Farrat	300	54	30
E28	768643.00	9206129.00	3502.00	Formación Santa	299	61	29
E29	768583.00	9206243.00	3449.00	Formación Santa	276	64	6
E30	769201.00	9206552.00	3443.00	Formación Pariatambo	115	25	205
E31	769515.00	9206648.00	3433.00	Formación Chúlec	287	54	17
E32	768526.00	9206515.00	3342.00	Formación Chúlec	72	71	162
E33	768465.00	9206748.00	3337.00	Formación Chúlec	246	65	336
E34	768586.00	9206585.00	3332.00	Formación Santa	114	73	204
E35	769588.00	9206701.00	3435.00	Formación Pariatambo	292	49	22
E36	769621.00	9206731.00	3438.00	Formación Pariatambo	288	47	18
E37	769621.00	9206731.00	3438.00	Formación Pariatambo	288	47	18
E38	765600.00	9207254.00	3651.00	Formación Pariatambo	275	22	5
E39	765225.00	9208177.00	3671.00	Formación Chúlec	288	55	18
E40	765521.00	9208235.00	3675.00	Formación Chúlec	280	53	10
E41	765678.00	9208438.00	3686.00	Formación Pariatambo	286	34	16
E42	765730.00	9208407.00	3683.00	Formación Pariatambo	287	42	17
E43	766288.00	9208291.00	3647.00	Formación Pariatambo	269	49	359
E44	766374.00	9208310.00	3641.00	Formación Pariatambo	275	72	5

3.9.3. Sistema Kárstico

En la parte alta de la Subcuenca el Ronquillo, existe la presencia de la Formación Cajamarca, esta unidad está constituida por calizas masivas azuladas a gris oscuro, plegadas y homogéneas, con intercalaciones menores de margas y arcillolitas; su elevada pureza en carbonato de calcio y la disposición estructural dentro del Sinclinal Colpayoc favorecen la disolución y la evolución de rasgos kársticos superficiales, como lapiaz, dolinas y pendientes abruptas. La ubicación en la zona alta de la subcuenca convierte a esta formación en una zona favorable para la recarga y circulación de aguas subterráneas.

En la misma parte alta se encuentra además el pórfido mineralizado, asociado al proyecto de exploración Colpayoc. La coexistencia de rocas carbonatadas y cuerpos intrusivos introduce un contexto geohidrológico particular: la interacción entre carbonatos y procesos magmáticos puede potenciar fenómenos de alteración y, en ciertos casos, favorecer la karstificación hipogénica (disolución de carbonatos por aguas profundas ascendentes y fluidos hidrotermales). También la karstificación epigénica, controlada por aguas meteóricas que circulan a través de fracturas y planos de estratificación, la presencia del intrusivo obliga a considerar escenarios de disolución más profunda y compleja, con implicancias en la conectividad de los acuíferos, se observa en la Foto 27 y 28, un sumidero y una dolina, rasgos kársticos existentes en la Formación Cajamarca.



Foto 27. Coordenadas: 762831 E, 9211055 N. Vista panorámica de sumidero en rocas carbonatadas de la Formación Cajamarca.



Foto 28. Coordenadas: 763079 E, 9211026 N. Vista panorámica de dolina rocas carbonatadas de la Formación Cajamarca.

3.9.4. Parámetros Fisicoquímicos en Fuentes de Agua

El inventario de parámetros fisicoquímicos en fuentes de agua superficial y subterránea en la Subcuenca El Ronquillo, es esencial para comprender la dinámica del sistema geohidrológico; además de establecer una línea base confiable. En cuencas altoandinas como esta, la calidad y disponibilidad del agua están influenciadas por la estacionalidad, la geología local y la interacción entre los flujos superficiales y subterráneos; por ello, la caracterización fisicoquímica constituye una herramienta fundamental con fines de interpretación de recarga, infiltración y descarga de agua subterránea.

Durante el trabajo de campo se recorrieron distintos sectores de la zona, registrando cuerpos de agua superficial como lagunas, quebradas y pequeños cursos temporales, así como puntos donde aflora agua subterránea, principalmente en manantiales y algunos pozos artesanales. La composición fisicoquímica del agua refleja la heterogeneidad del entorno geológico, conformado por rocas volcánicas e intrusivas, depósitos cuaternarios y secuencias sedimentarias, lo cual influye en parámetros como el pH, la conductividad eléctrica y otros parámetros fundamentales (T°, TDS, ORP). En los cuerpos superficiales, se observó una mayor variación de valores medidos, sobre todo porque responden a la lluvia, la escorrentía y los aportes de sedimentos finos. En cambio, en puntos de descarga de aguas subterráneas, los valores suelen ser más estables, lo que sugiere un tiempo de residencia mayor y una interacción agua-roca más prolongada.

En conjunto, esta caracterización fisicoquímica nos brinda una visión más clara del estado actual del recurso hídrico en la Subcuenca El Ronquillo. Además, sirve como base para interpretar las diferencias entre aguas superficiales y subterráneas, y para comprender mejor la dinámica geohidrológica. En las páginas siguientes se presentan los inventarios de fuentes de agua para ambas épocas del año: la Tabla 19 y Tabla 20 corresponden a las fuentes superficiales en época seca y húmeda, respectivamente; mientras que la Tabla 21 y Tabla 22 muestran las fuentes subterráneas para esos mismos periodos. En el Anexo 01 se incluye el registro fotográfico de cada fuente subterránea. Finalmente, Los Planos 09 y 10, ilustran la distribución espacial de todos los puntos inventariados en la subcuenca.

Tabla 19. Inventario de fuentes de agua superficial en época seca.

Código	Coordenadas UTM Datum WGS84 – Zona 17S		Tipo de Fuente	Época Seca							
	Este (m)	Norte (m)		Fecha	Hora	Caudal (L/s)	Conductividad Eléctrica (μS/cm)	pH	Temperatura (°C)	Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	Potencial de Óxido Reducción
QDA-01	768860.00	9207226.00	Quebrada	11/7/2024	14:33:00	1.0	460.00	8.00	15.80	278.00	252.00
QDA-02	768862.00	9207237.00	Quebrada	11/7/2024	14:39:00	5.0	468.00	8.24	13.40	280.00	212.00
QDA-03	769665.00	9208195.00	Quebrada	12/7/2024	11:07:00	4.7	414.00	8.14	15.00	247.00	202.00
RIO-01	768893.00	9207263.00	Río	11/7/2024	14:55:00	6.2	449.00	8.24	14.60	269.00	207.00
RIO-02	769665.00	9208195.00	Río	12/7/2024	11:11:00	7.0	397.00	8.42	15.20	238.00	176.00
RIO-03	769672.00	9208198.00	Río	12/7/2024	11:20:00	11.0	396.00	8.34	15.00	236.00	188.00
RIO-04	769737.00	9208283.00	Río	12/7/2024	11:35:00	15.0	406.00	11.20	14.00	241.00	195.00
RIO-05	769986.00	9208370.00	Río	12/7/2024	11:55:00	19.0	380.00	8.20	15.00	230.00	202.00
RIO-06	770291.00	9208687.00	Río	12/7/2024	12:23:00	103.0	372.00	8.23	15.20	223.00	204.00
RIO-07	770466.00	9208880.00	Río	12/7/2024	12:46:00	53.0	354.00	8.33	16.30	213.00	205.00
RÍO-08	770914.00	9209038.00	Río	12/7/2024	13:26:00	53.0	329.00	8.39	19.50	239.00	205.00
RIO-09	771644.00	9208575.00	Río	12/7/2024	15:44:00	63.0	337.00	8.08	16.10	202.00	170.00
RIO-10	771728.00	9208534.00	Río	12/7/2024	15:52:00	62.0	333.00	8.00	16.00	200.00	170.00
RIO-11	771983.00	9208331.00	Río	12/7/2024	16:09:00	62.0	330.00	8.04	16.50	198.00	171.00
QDA-S-01	763613.07	9211600.22	Quebrada (flujo mínimo)	8/7/2024	00:00:00	Flujo mínimo <0.1	-	-	-	-	-
QDA-S-02	764640.00	9211086.00	Quebrada (flujo mínimo)	9/7/2024	09:58:00	Seco	-	-	-	-	-
QDA-S-03	764636.00	9211038.00	Quebrada (flujo mínimo)	9/7/2024	10:06:00	Empozado	460.00	8.56	10.90	274.00	144.00
QDA-S-04	765034.01	9210466.60	Quebrada (flujo mínimo)	8/7/2024	00:00:00	Flujo mínimo <0.1	-	-	-	-	-
QDA-S-05	765939.72	9210492.91	Quebrada (flujo mínimo)	8/7/2024	00:00:00	Flujo mínimo <0.1	-	-	-	-	-

Código	Coordenadas UTM Datum WGS84 – Zona 17S		Tipo de Fuente	Época Seca							
	Este (m)	Norte (m)		Fecha	Hora	Caudal (L/s)	Conductividad Eléctrica (µS/cm)	pH	Temperatura (°C)	Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	Potencial de Óxido Reducción
QDA-S-06	765590.13	9210035.63	Quebrada (flujo mínimo)	8/7/2024	00:00:00	Flujo mínimo <0.1	-	-	-	-	-
QDA-S-07	766540.00	9209591.00	Quebrada (flujo mínimo)	10/7/2024	09:48:00	0.1	358.00	8.32	10.40	214.00	156.00
QDA-S-08	767052.00	9209223.00	Quebrada (flujo mínimo)	10/7/2024	11:08:00	Seco	-	-	-	-	-
QDA-S-09	767099.00	9209246.00	Quebrada (flujo mínimo)	10/7/2024	11:17:00	Seco	-	-	-	-	-
QDA-S-10	768659.00	9208775.00	Quebrada (flujo mínimo)	10/7/2024	17:10:00	Seco	394.00	8.07	13.40	237.00	206.00
QDA-S-11	766533.00	9206061.00	Quebrada (flujo mínimo)	11/7/2024	10:38:00	Flujo mínimo <0.1	80.00	6.60	15.30	48.00	219.00
QDA-S-12	766507.00	9207227.00	Quebrada (flujo mínimo)	11/7/2024	12:30:00	Flujo mínimo <0.1	442.00	7.83	20.00	266.00	209.00
QDA-S-13	768825.44	9206656.18	Quebrada (flujo mínimo)	8/7/2024	00:00:00	Flujo mínimo <0.1	-	-	-	-	-
QDA-S-14	768360.00	9210371.00	Quebrada (flujo mínimo)	13/7/2024	11:24:00	Seco	-	-	-	-	-
QDA-S-15	769269.00	9211608.00	Quebrada (flujo mínimo)	13/7/2024	10:02:00	Seco	-	-	-	-	-
QDA-S-16	770462.00	9208892.00	Quebrada (flujo mínimo)	12/7/2024	12:43:00	Seco	-	-	-	-	-
QDA-S-17	770937.00	9209037.00	Quebrada (flujo mínimo)	12/7/2024	13:31:00	Seco	-	-	-	-	-

Tabla 20. Inventario de fuentes de agua superficial en época húmeda.

Código	Coordenadas UTM Datum WGS84 – Zona 17S		Tipo de Fuente	Época Húmeda							
	Este (m)	Norte (m)		Fecha	Hora	Caudal (L/s)	Conductividad Eléctrica (µS/cm)	pH	Temperatura (°C)	Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	Potencial de Óxido Reducción
QDA-01	764638.00	9211035.00	Quebrada	8/3/2024	14:29:00	29.0	404.00	7.82	17.00	218.00	142.00
QDA-02	765522.00	9210098.00	Quebrada	8/3/2024	10:19:00	24.0	404.00	7.76	12.80	216.00	221.00
QDA-03	766676.00	9209646.00	Quebrada	8/3/2024	12:39:00	36.0	350.00	7.72	14.90	190.00	130.00
QDA-04	768625.00	9208761.00	Quebrada	6/3/2024	02:49:00	88.0	326.00	8.39	15.00	176.00	201.00
QDA-05	769662.00	9208198.00	Quebrada	9/3/2024	09:31:00	125.0	294.00	8.17	14.00	158.00	234.00
QDA-06	768526.00	9206527.00	Quebrada	5/3/2024	09:52:00	40.0	64.00	6.95	12.20	36.00	227.00
QDA-07	768877.00	9207209.00	Quebrada	5/3/2024	12:03:00	87.0	170.00	8.30	14.00	92.00	214.00
QDA-08	768319.00	9207302.00	Quebrada	5/3/2024	10:47:00	4.0	349.00	8.90	14.00	188.00	210.00
QDA-09	767549.00	9207923.00	Quebrada	6/3/2024	11:37:00	35.0	410.00	8.12	15.00	220.00	173.00
QDA-10	768570.00	9207360.00	Quebrada	5/3/2024	11:23:00	4.2	403.00	8.73	14.00	219.00	214.00
QDA-11	768592.00	9207342.00	Quebrada	5/3/2024	11:34:00	19.0	376.00	8.69	16.00	202.00	202.00
QDA-12	770449.00	9208911.00	Quebrada	9/3/2024	12:07:00	1.2	446.00	8.26	18.00	240.00	217.00
QDA-13	768357.00	9210375.00	Quebrada	12/3/2024	11:47:00	0.8	420.00	7.50	14.00	227.00	224.00
QDA-14	769578.00	9210718.00	Quebrada	12/3/2024	13:49:00	6.0	316.00	8.05	15.50	171.00	207.00
QDA-15	769128.00	9210920.00	Quebrada	12/3/2024	11:50:00	0.5	57.00	6.40	16.00	31.00	64.00
QDA-16	769578.00	9210718.00	Quebrada	12/3/2024	13:03:00	2.5	415.00	8.20	15.50	227.00	170.00
QDA-17	770935.00	9209032.00	Quebrada	9/3/2024	12:57:00	8.0	343.00	8.03	16.00	186.00	223.00
RIO-01	768904.00	9207229.00	Río	5/3/2024	12:18:00	195.0	273.00	8.78	15.00	148.00	222.00
RIO-02	769665.00	9208191.00	Río	9/3/2024	09:37:00	276.0	288.00	8.17	13.00	156.00	231.00
RIO-03	769669.00	9208190.00	Río	9/3/2024	09:09:00	402.0	292.00	8.07	13.00	157.00	250.00
RIO-04	770477.00	9208867.00	Río	9/3/2024	12:26:00	528.0	312.00	8.17	15.50	169.00	221.00
RIO-05	770960.00	9209025.00	Río	9/3/2024	13:15:00	417.0	319.00	8.01	16.50	170.00	228.00
RIO-06	771582.00	9208619.00	Río	14/3/2024	08:33:00	429.0	358.00	8.16	13.00	193.00	197.00

Tabla 21. Inventario de fuentes de agua subterránea en época seca.

Código de Fuente	Nombre Referencial	Coordenadas UTM Datum WGS84 – Zona 17S		Tipo de Fuente	Infraestructura Asociada	Época Seca							
		Este (m)	Norte (m)			Fecha	Hora	Caudal (L/s)	CE (μS/cm)	pH	T (°C)	TDS (mg/L)	ORP
MA-BAL1	San Juan de Cushunga	769579.00	9208186.00	Manantial	Captación	12/7/2024	10:07:00	1.2	373.00	7.17	17.30	223.00	208.00
MA-BAL10	-	766715.00	9206090.00	Manantial	Captación	11/7/2024	09:50:00	-	58.00	6.21	12.80	34.00	231.00
MA-BAL11	Manantial Mishquiyaco	766537.00	9206162.00	Manantial	Sin Estructura	11/7/2024	10:31:00	0.13	50.00	5.99	14.80	30.00	242.00
MA-BAL12	-	766304.00	9206094.00	Manantial	Cocha	11/7/2024	11:25:00	-	202.00	6.39	13.70	116.00	150.00
MA-BAL13	-	766162.00	9206151.00	Manantial	Captación	11/7/2024	11:35:00	-	77.00	6.30	15.90	46.00	196.00
MA-BAL14	-	766033.00	9206900.00	Manantial	Sin Estructura	11/7/2024	12:10:00	0.12	229.00	6.41	16.30	136.00	220.00
MA-BAL15	-	766265.00	9206978.00	Manantial	Sin Estructura	11/7/2024	11:59:00	0.11	59.00	5.78	14.20	35.00	226.00
MA-BAL16	-	766178.00	9207050.00	Bofedal	Sin Estructura	11/7/2024	12:03:00	Seco	-	-	-	-	-
MA-BAL17	Manantial el Aliso	767342.00	9207504.00	Manantial	Captación	10/7/2024	16:28:00	1.12	119.00	7.09	13.40	71.00	238.00
MA-BAL18	Manantial Rosapozo	767069.00	9207745.00	Manantial	Captación	10/7/2024	16:09:00	0.9	87.00	6.96	13.10	52.00	231.00
MA-BAL19	Manantial Conga	767464.00	9207912.00	Manantial	Captación	10/7/2024	16:48:00	-	539.00	7.41	10.90	324.00	193.00
MA-BAL2	-	769502.00	9208069.00	Manantial	Captación	12/7/2024	10:14:00	1.5	389.00	7.60	19.00	239.00	209.00
MA-BAL20	Manantial Yerba Buena	766599.00	9207838.00	Manantial	Captación	10/7/2024	15:40:00	0.8	522.00	7.84	13.60	313.00	204.00
MA-BAL21	-	766672.00	9208129.00	Manantial	Captación	10/7/2024	14:58:00	0.58	455.00	7.84	13.00	273.00	219.00
MA-BAL22	Manantial Lluscacha	766818.00	9208279.00	Manantial	Sin Estructura	10/7/2024	14:30:00	0.49	164.00	6.36	12.40	97.00	255.00
MA-BAL23	Manantial Yacupacha	766557.00	9208290.00	Manantial	Captación	10/7/2024	14:42:00	0.56	364.00	7.93	13.00	217.00	229.00
MA-BAL24	-	764749.00	9208841.00	Manantial	Sin Estructura	7/7/2024	10:14:00	0.12	465.00	7.75	8.90	283.00	300.00
MA-BAL3	-	769485.00	9207987.00	Manantial	Captación	12/7/2024	10:37:00	1	271.00	7.94	15.90	223.00	212.00
MA-BAL4	-	769551.00	9206796.00	Manantial	Cocha	11/7/2024	16:59:00	0.01	490.00	7.35	16.10	293.00	293.00
MA-BAL5	-	768979.37	9207043.50	Manantial	Sin Estructura	8/7/2024	12:00:00	0.25	-	-	-	-	-

Código de Fuente	Nombre Referencial	Coordenadas UTM Datum WGS84 – Zona 17S		Tipo de Fuente	Infraestructura Asociada	Época Seca							
		Este (m)	Norte (m)			Fecha	Hora	Caudal (L/s)	CE (µS/cm)	pH	T (°C)	TDS (mg/L)	ORP
MA-BAL6	-	768580.71	9207260.29	Manantial	Captación	8/7/2024	12:30:00	0.8	-	-	-	-	-
MA-BAL7	Manantial Viscachayok	767261.00	9206693.00	Manantial	Captación	11/7/2024	12:58:00	0.4	36.00	5.92	20.00	22.00	190.00
MA-BAL8	-	767126.00	9205430.00	Manantial	Sin Estructura	11/7/2024	11:05:00	0.1	57.00	6.04	15.70	34.00	223.00
MA-BAL9	-	766671.00	9205974.00	Manantial	Sin Estructura	11/7/2024	09:37:00	0.2	97.00	6.14	14.10	58.00	228.00
MA-CARH1	-	767489.00	9211762.00	Manantial	Sin Estructura	13/7/2024	09:29:00	-	-	-	-	-	-
MA-CHA1	-	769887.00	9210069.00	Manantial	Captación	13/7/2024	12:14:00	4.37	296.00	7.41	17.80	178.00	223.00
MA-CUSH1	Manantial el Cinze	769092.00	9208416.00	Manantial	Captación	13/7/2024	14:32:00	1.9	464.00	7.34	14.30	279.00	184.00
MA-CUSH10	-	766404.00	9209935.00	Manantial	Sin Estructura	9/7/2024	15:03:00	0.01	71.00	7.67	15.10	45.00	176.00
MA-CUSH11	-	766348.00	9209972.00	Manantial	Captación	9/7/2024	15:21:00	0.015	443.00	7.10	14.40	264.00	173.00
MA-CUSH12	Manantial Porporito	766268.00	9210021.00	Manantial	Sin Estructura	9/7/2024	15:32:00	0.01	328.00	7.73	13.10	197.00	179.00
MA-CUSH13	Manantial Totorá I	766272.00	9210052.00	Manantial	Sin Estructura	9/7/2024	15:49:00	0.01	211.00	7.47	13.70	117.00	202.00
MA-CUSH14	Manantial Totorá II	766160.00	9210153.00	Manantial	Sin Estructura	9/7/2024	16:08:00	0.01	282.00	7.38	12.30	172.00	195.00
MA-CUSH15	-	766163.55	9210221.74	Manantial	Captación	8/7/2024	16:20:00	0.85	-	-	-	-	-
MA-CUSH16	-	766103.43	9210243.66	Manantial	Captación	8/7/2024	16:30:00	0.5	-	-	-	-	-
MA-CUSH17	-	766109.83	9210249.56	Manantial	Captación	8/7/2024	16:44:00	0.2	-	-	-	-	-
MA-CUSH18	-	766064.00	9210269.00	Manantial	Sin Estructura	9/7/2024	16:25:00	0.01	73.00	6.48	11.30	44.00	198.00
MA-CUSH19	-	765940.00	9210468.00	Manantial	Sin Estructura	9/7/2024	12:39:00	0.3	80.00	7.47	16.70	48.00	199.00
MA-CUSH2	-	768961.00	9208735.00	Manantial	Captación	10/7/2024	17:21:00	-	391.00	8.17	12.50	235.00	221.00
MA-CUSH20	-	765948.86	9210521.17	Manantial	Cocha	8/7/2024	13:05:00	0.01	-	-	-	-	-
MA-CUSH21	-	765917.00	9210611.00	Manantial	Cocha	9/7/2024	12:15:00	0.04	75.00	7.05	15.50	46.00	209.00
MA-CUSH22	-	765943.00	9210628.00	Manantial	Cocha	9/7/2024	12:57:00	0.04	69.00	7.20	12.00	43.00	208.00
MA-CUSH23	-	765832.00	9210680.00	Manantial	Captación	9/7/2024	12:08:00	0.02	97.00	7.50	13.30	58.00	189.00
MA-CUSH24	-	765921.00	9210832.00	Manantial	Sin Estructura	9/7/2024	13:09:00	0.02	104.00	6.80	15.60	62.00	213.00

Código de Fuente	Nombre Referencial	Coordenadas UTM Datum WGS84 – Zona 17S		Tipo de Fuente	Infraestructura Asociada	Época Seca							
		Este (m)	Norte (m)			Fecha	Hora	Caudal (L/s)	CE (μS/cm)	pH	T (°C)	TDS (mg/L)	ORP
MA-CUSH25	-	765923.00	9210885.00	Manantial	Sin Estructura	9/7/2024	13:18:00	0.02	88.00	7.02	14.00	53.00	211.00
MA-CUSH26	-	765906.00	9210891.00	Pozo	Pozo Tubular	9/7/2024	13:17:00	-	224.00	7.38	12.00	136.00	206.00
MA-CUSH27	-	765761.00	9210942.00	Manantial	Sin Estructura	9/7/2024	14:07:00	0.01	67.00	7.04	17.20	40.00	285.00
MA-CUSH28	-	765853.00	9210076.00	Manantial	Captación	7/7/2024	16:51:00	0.2	-	-	-	-	-
MA-CUSH29	-	765653.00	9209950.00	Manantial	Sin Estructura	7/7/2024	16:24:00	0.01	77.00	9.77	13.00	47.00	181.00
MA-CUSH3	-	768593.00	9208748.00	Manantial	Captación	10/7/2024	17:18:00	2.1	390.00	7.91	12.50	234.00	221.00
MA-CUSH30	-	765551.00	9210050.00	Manantial	Captación	7/7/2024	16:17:00	0.2	193.00	7.39	12.60	116.00	242.00
MA-CUSH31	-	765377.00	9210251.00	Manantial	Captación	7/7/2024	15:55:00	0.1	175.00	7.47	13.10	105.00	234.00
MA-CUSH32	-	765021.00	9210483.00	Manantial	Sin Estructura	7/7/2024	15:28:00	0.02	344.00	7.85	14.90	207.00	217.00
MA-CUSH33	-	764741.00	9210642.00	Manantial	Sin Estructura	7/7/2024	15:13:00	0.02	476.00	7.79	12.20	284.00	224.00
MA-CUSH34	-	764592.00	9210707.00	Manantial	Sin Estructura	7/7/2024	14:57:00	0.01	729.00	7.73	12.00	437.00	226.00
MA-CUSH35	-	764327.00	9210941.00	Manantial	Sin Estructura	7/7/2024	14:34:00	0.01	483.00	7.99	13.90	290.00	216.00
MA-CUSH36	-	764112.00	9210940.00	Manantial	Sin Estructura	7/7/2024	14:18:00	0.01	401.00	8.03	22.70	241.00	199.00
MA-CUSH37	-	763893.00	9211161.00	Manantial	Sin Estructura	7/7/2024	13:51:00	0.01	374.00	8.45	18.30	222.00	252.00
MA-CUSH38	-	764539.00	9211575.00	Manantial	Sin Estructura	9/7/2024	09:33:00	0.05	527.00	7.28	10.30	320.00	213.00
MA-CUSH39	-	763791.46	9211496.65	Bofedal	Sin Estructura	8/7/2024	13:25:00	0.01	-	-	-	-	-
MA-CUSH4	-	768098.56	9209017.95	Manantial	Captación	10/7/2024	17:32:00	-	-	-	-	-	-
MA-CUSH40	-	763520.00	9211682.00	Manantial	Sin Estructura	7/7/2024	12:55:00	0.01	434.00	8.04	13.90	260.00	217.00
MA-CUSH41	-	763408.00	9211797.00	Manantial	Sin Estructura	7/7/2024	12:42:00	0.01	437.00	7.63	15.70	263.00	256.00
MA-CUSH42	-	763429.00	9210671.00	Manantial	Captación	7/7/2024	11:18:00	Seco	-	-	-	-	-
MA-CUSH43	-	763349.00	9211340.00	Manantial	Sin Estructura	7/7/2024	11:47:00	0.01	517.00	7.46	15.70	311.00	277.00
MA-CUSH44	-	762622.00	9211087.00	Manantial	Sin Estructura	7/7/2024	10:47:00	0.01	-	-	-	-	-
MA-CUSH45	-	765417.00	9211019.00	Manantial	Cocha	11/7/2024	11:59:00	0.05	572.00	7.81	11.90	348.00	145.00
MA-CUSH5	Manantial Peña Colorada	767553.00	9208798.00	Manantial	Captación	10/7/2024	12:27:00	0.01	162.00	7.75	14.00	97.00	266.00

Código de Fuente	Nombre Referencial	Coordenadas UTM Datum WGS84 – Zona 17S		Tipo de Fuente	Infraestructura Asociada	Época Seca							
		Este (m)	Norte (m)			Fecha	Hora	Caudal (L/s)	CE (μS/cm)	pH	T (°C)	TDS (mg/L)	ORP
MA-CUSH6	Manantial Yacupacha	767155.00	9209172.00	Manantial	Sin Estructura	10/7/2024	11:34:00	0.01	315.00	7.41	12.30	192.00	45.00
MA-CUSH7	Manantial Condor I y II	766719.00	9209722.00	Manantial	Captación	10/7/2024	09:20:00	0.14	89.00	7.60	10.00	53.00	223.00
MA-CUSH8	Manantial las Totoritas	766432.00	9209824.00	Manantial	Sin Estructura	10/7/2024	08:55:00	0.01	358.00	7.76	10.80	216.00	186.00
MA-CUSH9	Manantial el Chorro	766427.00	9209858.00	Manantial	Sin Estructura	10/7/2024	08:46:00	0.01	402.00	7.31	12.80	240.00	235.00
MA-MANZ1	-	770048.92	9210699.73	Manantial	Captación	13/7/2024	08:29:00	-	-	-	-	-	-
MA-MANZ2	-	769607.00	9210637.00	Manantial	Captación	13/7/2024	10:19:00	-	235.00	7.55	15.80	141.00	201.00
MA-MANZ3	-	769304.00	9211154.00	Manantial	Captación	13/7/2024	08:48:00	-	164.00	6.19	15.00	98.00	279.00
MA-MANZ4	-	769148.00	9211206.00	Manantial	Sin Estructura	13/7/2024	08:55:00	0.01	10.00	6.53	12.50	6.00	234.00
MA-MANZ5	-	769108.00	9211193.00	Pozo	Pozo Tubular	13/7/2024	09:29:00	-	129.00	10.34	15.00	78.00	156.00
MA-MANZ6	-	768959.00	9211271.00	Pozo	Pozo Tubular	13/7/2024	09:20:00	-	-	-	-	-	-
MA-MANZ7	-	768665.00	9210504.00	Manantial	Sin Estructura	13/7/2024	11:43:00	0.01	79.00	6.40	11.20	48.00	234.00
MA-MANZ8	-	768360.00	9210371.00	Manantial	Cocha	13/7/2024	11:24:00	0.15	423.00	7.42	16.00	253.00	219.00
MA-MANZ9	-	767372.00	9210244.00	Manantial	Sin Estructura	13/7/2024	11:05:00	Seco	-	-	-	-	-
MA-RONQ1	-	770676.00	9208956.00	Manantial	Sin Estructura	12/7/2024	13:08:00	0.01	329.00	8.39	19.50	239.00	205.00
MA-RONQ2	-	770283.00	9208500.00	Manantial	Captación	12/7/2024	09:21:00	-	400.00	7.47	15.90	241.00	217.00
MA-RONQ3	-	770059.13	9208398.12	Manantial	Captación	12/7/2024	09:31:00	-	-	-	-	-	-

Tabla 22. Inventario de fuentes de agua subterránea en época húmeda.

Código de Fuente	Nombre Referencial	Coordenadas UTM Datum WGS84 – Zona 17S		Tipo de Fuente	Infraestructura Asociada	Época Húmeda							
		Este (m)	Norte (m)			Fecha	Hora	Caudal (L/s)	CE (µS/cm)	pH	T (°C)	TDS (mg/L)	ORP
MA-BAL1	San Juan de Cushunga	769579.00	9208186.00	Manantial	Captación	9/3/2024	13:58:00	0.17	385.00	7.10	16.00	207.00	222.00
MA-BAL16	-	766178.00	9207050.00	Bofedal	Sin Estructura	6/3/2024	10:14:00	-	57.00	6.28	16.00	31.00	190.00
MA-BAL2	-	769502.00	9208069.00	Manantial	Captación	9/3/2024	13:34:00	2.80	390.00	6.94	16.00	212.00	245.00
MA-BAL20	Manantial Yerba Buena	766599.00	9207838.00	Manantial	Captación	6/3/2024	11:17:00	0.11	515.00	7.85	16.00	280.00	85.00
MA-BAL21	-	766672.00	9208129.00	Manantial	Captación	6/3/2024	01:00:00	0.91	409.00	7.50	14.00	222.00	171.00
MA-BAL22	Manantial Lluscacha	766818.00	9208279.00	Manantial	Sin Estructura	6/3/2024	12:37:00	0.70	148.00	6.30	14.00	81.00	211.00
MA-BAL23	Manantial Yacupacha	766557.00	9208290.00	Manantial	Captación	6/3/2024	01:35:00	1.00	310.00	7.13	13.00	167.00	224.00
MA-BAL24	-	764749.00	9208841.00	Manantial	Sin Estructura	7/3/2024	11:46:00	0.22	533.00	7.74	17.70	288.00	240.00
MA-CARH1	-	767489.00	9211762.00	Manantial	Sin Estructura	12/3/2024	10:02:00	0.09	85.00	6.18	15.00	46.00	190.00
MA-CUSH23	-	765832.00	9210680.00	Manantial	Captación	8/3/2024	15:12:00	0.10	96.00	7.00	15.00	52.00	200.00
MA-CUSH26	-	765906.00	9210891.00	Pozo	Pozo Tubular	8/3/2024	04:09:00	-	73.00	6.20	15.00	40.00	198.00
MA-CUSH3	-	768593.00	9208748.00	Manantial	Captación	6/3/2024	03:08:00	3.02	362.00	7.47	13.00	195.00	195.00
MA-CUSH31	-	765377.00	9210251.00	Manantial	Captación	8/3/2024	10:03:00	0.19	159.00	6.47	14.00	86.00	233.00
MA-CUSH32	-	765021.00	9210483.00	Manantial	Sin Estructura	8/3/2024	09:28:00	0.50	281.00	6.42	14.80	152.00	164.00
MA-CUSH35	-	764327.00	9210941.00	Manantial	Sin Estructura	7/3/2024	04:33:00	0.02	454.00	7.18	12.00	245.00	211.00
MA-CUSH37	-	763893.00	9211161.00	Manantial	Sin Estructura	7/3/2024	12:30:00	0.05	382.00	7.29	13.00	206.00	197.00
MA-CUSH39	-	763791.46	9211496.65	Bofedal	Sin Estructura	7/3/2024	15:47:00	0.40	380.00	7.15	11.00	205.00	210.00

Código de Fuente	Nombre Referencial	Coordenadas UTM Datum WGS84 – Zona 17S		Tipo de Fuente	Infraestructura Asociada	Época Húmeda							
		Este (m)	Norte (m)			Fecha	Hora	Caudal (L/s)	CE (µS/cm)	pH	T (°C)	TDS (mg/L)	ORP
MA-CUSH40	-	763520.00	9211682.00	Manantial	Sin Estructura	7/3/2024	11:52:00	0.19	395.00	7.01	13.70	215.00	211.00
MA-CUSH41	-	763408.00	9211797.00	Manantial	Sin Estructura	7/3/2024	01:32:00	0.09	352.00	7.11	11.70	191.00	193.00
MA-CUSH42	-	763429.00	9210671.00	Manantial	Captación	7/3/2024	02:05:00	0.19	29.00	3.96	12.00	16.00	335.00
MA-CUSH43	-	763349.00	9211340.00	Manantial	Sin Estructura	7/3/2024	15:47:00	0.23	398.00	7.24	17.90	213.00	241.00
MA-MANZ3	-	769304.00	9211154.00	Manantial	Captación	12/3/2024	14:45:00	-	174.00	6.38	16.00	90.00	211.00
MA-MANZ4	-	769148.00	9211206.00	Manantial	Sin Estructura	12/3/2024	15:32:00	0.04	10.00	6.43	16.30	5.00	198.00
MA-MANZ6	-	768959.00	9211271.00	Pozo	Pozo Tubular	12/3/2024	14:27:00	-	188.00	10.28	15.50	101.00	104.00
MA-MANZ7	-	768665.00	9210504.00	Manantial	Sin Estructura	12/3/2024	12:17:00	0.05	72.00	6.19	14.00	39.00	209.00
MA-MANZ8	-	768360.00	9210371.00	Manantial	Cocha	12/3/2024	11:42:00	0.20	513.00	7.09	15.50	278.00	247.00
MA-MANZ9	-	767372.00	9210244.00	Manantial	Sin Estructura	8/3/2024	04:57:00	0.01	290.00	6.14	16.00	157.00	150.00

3.9.5. Estimación de la Recarga Método de APLIS

La recarga en la subcuenca El Ronquillo se estimó utilizando el método APLIS, el cual permite aproximar la fracción de la precipitación que, por el proceso de infiltración, pasa a formar parte del sistema subterráneo. Este método ha sido ampliamente aplicado en cuencas altoandinas, donde las variaciones en las condiciones topográficas, geológicas y geomorfológicas modifican de forma directa la infiltración y, por tanto, la recarga. Aunque APLIS fue desarrollado inicialmente para acuíferos carbonatados de la Cordillera Bética, en el sur de España, su uso se ha extendido a diversos contextos geológicos gracias a su flexibilidad y a la solidez conceptual con la que integra las características físicas del terreno.

La aplicación del método requiere elaborar una serie de mapas temáticos que representan variables intrínsecas del medio: Altitud (A), Pendiente (P), Litología (L), Infiltración (I) y Suelos (S). A estas capas se suma un coeficiente de corrección (Ca), que ajusta el valor obtenido según la capacidad acuífera de cada unidad geológica. La recarga se calcula aplicando el siguiente algoritmo:

$$R = [(A + P + 3 \cdot L + 2 \cdot I + S) / 0.9] \cdot Ca$$

A continuación, se explica cómo se caracterizó cada parámetro en función de las condiciones propias de la subcuenca:

➤ **Parámetro Altitud (A)**

En la subcuenca la lluvia no se distribuye de manera uniforme. Las partes altas reciben mayor aporte, por lo que tienden a ofrecer un potencial mayor de recarga. Con esa idea, se organizó la topografía en intervalos de elevación y se asignaron rangos de valores crecientes para reflejar este comportamiento. En la Tabla 23, los valores asignados sugieren que a mayor altura existe mayor relevancia a los eventos de precipitación.

Tabla 23. Valores APLIS asociados al parámetro altitud.

Altitud (msnm)		
Mín	Máx	Valoración
2874	3000	1
3000	3100	2
3100	3200	3
3200	3300	4
3300	3400	5
3400	3500	6
3500	3600	7
3600	3700	8
3700	3800	9
3800	3967	10

➤ **Parámetro Pendiente (P)**

La inclinación del terreno condiciona el tiempo de permanencia del agua en la superficie. Las áreas planas suelen permitir una mayor infiltración, mientras que las laderas pronunciadas favorecen la escorrentía. Por ello, se clasificaron las pendientes desde las más suaves hasta las más abruptas, otorgando mayor ponderación a las primeras. Esta capa permitió diferenciar claramente las zonas donde la geometría del terreno contribuye a la recarga, en la Tabla 24, se muestran los valores asignados.

Tabla 24. Valores APLIS asociados al parámetro pendiente.

Pendiente	
Rangos	Valoración
Mayor a 50	1
34-50	2
30-35	3
25-30	4
20-25	5
15-20	6
10-15	7
5-10	8
3-5	9
Menor a 3	10

➤ **Parámetro Litología (L)**

La geología de El Ronquillo es variada, va desde depósitos cuaternarios, rocas volcánicas e intrusivas y rocas sedimentarias. Para el análisis se analizó cada unidad litológica según su comportamiento geohidrológico, descrito en el apartado 3.9.1. Los depósitos aluviales y coluviales, formados por gravas y arenas, recibieron valores altos porque permiten que el agua infiltre con facilidad. Las rocas volcánicas o sedimentarias fracturadas ocuparon rangos intermedios, ya que su capacidad depende del grado de meteorización o del desarrollo de fracturas. Las rocas intrusivas más compactas fueron calificadas con valores bajos, pues la recarga es limitada. Este parámetro ayudó a diferenciar áreas que, aun estando próximas, responden de forma muy diferente frente a la infiltración, tal como se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25. Valores APLIS asociados al parámetro litología.

Unidad Geológica	Valoración
Centro Volcánico Rumiorcco	6
Depósitos Cuaternarios	7
Formación Cajamarca	8
Formación Chúlec	6
Formación Farrat	7
Formación Inca	4
Formación Pariatambo	5
Grupo Quilquiñan	5
Formación Yumagual	5
Pórfido Diorítico-Granodiorítico	3
Secuencias Andesíticas	5
Volcánico Huambos	6

➤ **Parámetro Infiltración (I)**

Aquí se evaluó la permeabilidad, se tomó como base las unidades geohidrológicas. Algunas zonas presentan depósitos cuaternarios o formaciones geológicas altamente fracturadas que favorecen la infiltración, mientras que otros sectores son menos permeables, en la Tabla 26 se muestra la valoración de este parámetro:

Tabla 26. Valores APLIS asociados al parámetro infiltración.

Infiltración	Valoración
Sin Infiltración	1
Escasas formas de infiltración	2
Medios poco permeables	3
Medios medianamente permeables	4
Medios permeables con menor presencia de precipitación	8
Medios permeables con mayor presencia de precipitación	9
Medios muy permeables	10

➤ **Parámetro Suelo (S)**

Los tipos de suelo también influyen en la recarga. Se asignaron valores bajos a suelos arcillosos o a áreas donde prácticamente no existe suelo desarrollado. En cambio, los suelos formados por gravas, arenas, bien drenadas recibieron ponderaciones altas. En la Tabla 27 se muestra los valores asignados.

Tabla 27. Valores APLIS asociados al parámetro suelos.

Suelos	Valoración
Basamento Rocosos, suelos saturados	0
Limos y arcillas	1
Arenas con finos	7
Gravas con arena y finos	8
Gravas con arena	9

➤ **Parámetro Condición del Acuífero (CA)**

Este coeficiente ajusta la recarga calculada según la capacidad del subsuelo para recibir y almacenar el agua infiltrada; se distinguieron principalmente zonas con comportamiento de acuífero, donde la circulación de flujo es favorable, y sectores con características de acuitado, donde la circulación de flujo es limitada. Los valores asignados se presentan en la Tabla 28.

Tabla 28. Valores APLIS asociados al parámetro condición de acuífero.

Condición de Acuífero	Valoración
Cuerpos de Agua	0
Medios con Escasa Capacidad de Acuífero	0.1
Depósitos No Consolidados y Roca poco Permeables	0.5
Depósitos No Consolidados Permeables y Roca Fracturada	0.6
Depósitos No Consolidados y Roca Fracturada Medianamente Permeables	0.7
Depósitos No Consolidados y Roca Fracturada Altamente Permeable o con Capacidad de Almacenamiento de Flujo	0.8

➤ **Distribución de la recarga**

Luego de integrar todas las capas y aplicar el algoritmo correspondiente, se obtuvo el plano final de recarga para la subcuenca El Ronquillo, siendo de aproximadamente un promedio de 28%, que equivale a 254 mm/año.

Los valores más elevados se distribuyen principalmente en los depósitos cuaternarios, en algunas secuencias volcánicas y en las formaciones Cajamarca y Farrat, sectores situados en zonas altas con pendientes moderadas a suaves. Los valores de recarga intermedia se asocian a unidades rocosas con fracturamiento variable, mientras que los valores más bajos se concentran en el pórfido Diorítico-Granodiorítico y en tramos de la Formación Inca, donde predominan materiales de baja permeabilidad. En conjunto, el patrón obtenido refleja una recarga heterogénea. En la Tabla 29 se muestra los resultados de recarga promedio por formación geológica mostrada en porcentaje y cantidad de precipitación en mm/año. Mientras que, en el Plano 11 se muestra la distribución de la recarga y sus parámetros de estimación.

Tabla 29. Distribución de recarga por formación geológica.

Formación Geológica	Recarga					
	Mínimo %	PP Mínima (mm/año)	Promedio %	PP Promedio (mm/año)	Máxima %	PP Máxima (mm/año)
Pórfido Diorítico-Granodiorítico	12	104	14	123	45	408
Formación Inca	11	96	14	130	49	442
Secuencias Andesíticas	17	157	20	177	44	401
Formación Pariatambo	13	121	20	184	39	351
Formación Chúlec	11	100	22	198	52	466
Formación Yumagual	13	116	25	224	38	344
Grupo Quilquiñan	12	108	26	232	44	401
Volcánico Huambos	19	176	30	274	52	474
Centro Volcánico Rumiorcco	16	145	32	286	40	359
Formación Farrat	11	100	35	320	53	482
Formación Cajamarca	12	108	42	375	45	408
Depósitos Cuaternarios	22	196	51	461	53	482

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. INTERACCIÓN ACUÍFERO-MANANTIAL

Analizar la génesis de los manantiales en la subcuenca es fundamental para comprender la dinámica de interacción entre el acuífero y las surgencias (manantiales). Para ello, resulta indispensable precisar los conceptos desarrollados en el ítem 2.2.9. La composición fisicoquímica de un manantial constituye uno de los indicadores más relevantes para identificar el sistema subterráneo al que pertenecen. Se entiende por descarga subterránea toda surgencia de agua que proviene del basamento rocoso o de depósitos cuaternarios y que aflora en superficie cuando el nivel freático presenta la misma cota topografía del terreno. Estas descargas pueden manifestarse en distintas formas, tales como bofedales, manantiales o el flujo base en ríos y quebradas. En el caso particular de los manantiales, se requiere ciertos criterios específicos que permitan clasificarlos y establecer su relación con los sistemas subterráneos, dando una idea clara sobre el comportamiento geohidrológico de la subcuenca El Ronquillo.

4.1.1. Unidades Geohidrológicas y Control Estructural

La delimitación de las unidades geohidrológicas, se realizó a partir del análisis de cada formación geológica según su comportamiento hidráulico, considerando parámetros como permeabilidad, porosidad y su variación con la profundidad. Para ello se integró información del mapeo geológico, observaciones estructurales en campo y referencias bibliográficas especializadas (Masuch, 2012; Hamill y Bell, 1986), complementadas con estudios hidrogeológicos en proyectos mineros de ambientes similares (Knight Piésold, 2010; Piteau, 2024; Golder, 2021; Stantec, 2023). Este análisis permitió asignar valores representativos y definir el tipo de acuífero asociado a cada unidad geológica. El detalle de valores de conductividad hidráulica por cada unidad geológica asociada en función de su profundidad se presenta en la Tabla 17.

En las capas más superficiales (0–50 m), todas las formaciones presentan mayor fracturamiento y meteorización, lo que incrementa la permeabilidad secundaria, en este intervalo varían desde $1.00\text{E-}2$ m/s hasta $1.00\text{E-}6$ m/s. A profundidades mayores (>50m), el aumento de la presión litostática reduce la apertura de fracturas y, por tanto, la conductividad hidráulica. Este comportamiento condiciona la capacidad de almacenamiento y circulación del agua subterránea en cada formación, la conductividad hidráulica varía desde $5.00\text{E-}5$ m/s hasta $>1.00\text{E-}9$ m/s a grandes profundidades.

Los Depósitos Cuaternarios No Consolidados, con conductividades entre $1.00\text{E-}2$ m/s hasta $1.00\text{E-}4$ m/s, conforman acuíferos porosos libres, asociados a zonas de recarga directa y surgencias superficiales (manantiales del sistema somero).

Las Unidades Volcánicas a profundidades mayores a 50m (Formación Porculla, Rumiorcco y Huambos), con conductividades entre $5.00\text{E-}5$ m/s hasta $1.00\text{E-}8$ m/s, presentan acuíferos en roca volcánica, cuya permeabilidad depende del grado de fracturamiento y alteración.

El Pórfido Diorítico-Granodiorítico a profundidades mayores a 50m, con conductividades entre $1.00\text{E-}4$ m/s hasta $>1.00\text{E-}8$ m/s se comporta como un acuífero de baja permeabilidad, salvo en zonas con fracturas abiertas.

Las Formaciones Carbonatadas del Cretácico muestran un comportamiento variable; la Formación Cajamarca (con conductividades entre $1.00\text{E-}5$ m/s hasta $>1.00\text{E-}8$ m/s) desarrolla acuíferos kársticos con alta permeabilidad secundaria, mientras que el Grupo Quilquiñán y Formaciones Yumagual, Pariatambo, Chúlec e Inca (con conductividades entre $1.00\text{E-}6$ m/s hasta $>1.00\text{E-}9$ m/s) conforman acuitardos, su permeabilidad es variable por la presencia de margas y arcillolitas. Finalmente, la Formación Farrat (con conductividades entre $4.00\text{E-}4$ m/s hasta $>1.00\text{E-}7$ m/s), compuesta por areniscas cuarzosas, constituye un acuífero en roca fracturada.

El resumen del tipo de acuífero / acuitardo según su función hidráulica en cada formación geológica se muestra en la Tabla 30.

Tabla 30. Tipo de acuífero / acuitardo según su función hidráulica.

Unidad Geológica		Tipo de Acuífero / Acuitardo	
Depósitos No Consolidados		Acuífero poroso no consolidado	
Secuencias Volcánicas de la Formación Porculla	Secuencias Andesíticas	Acuífero en roca volcánica	
	Centro Volcánico Rumiorcco		
Volcánico Huambos	Secuencia Volcánica Atazaico		
Intrusivo	Pórfido Diorítico-Granodiorítico	Acuitardo	
Formación Cajamarca		Acuífero kárstico	
Grupo Quilquiñan		Acuitardo	
Grupo Pulluicana	Formación Yumagual	Acuitardo	
Grupo Crisnejas	Formación Pariatambo	Acuitardo	
	Formación Chúlec	Acuitardo	
Formación Inca		Acuitardo	
Grupo Goyllarisquizga	Formación Farrat	Acuífero en roca fracturada	

El contexto estructural condiciona la dinámica geohidrológica en la subcuenca. El Sinclinal Colpayoc, de orientación NW-SE, condiciona la disposición de las unidades geológicas y la configuración estructural del pliegue; en la zona de charnela se concentran fracturas locales perpendiculares a este, mientras que, en los flancos, con estratos inclinados, favorecen la recarga y la circulación de agua subterránea hacia el eje del pliegue. Las fallas regionales (Pampa I-II y la Escondida) actúan como barreras hidráulicas debido a la presencia de brechas compactadas, mientras que la falla Sexemayo presenta fracturas abiertas que indican un comportamiento conductivo (Ver Foto 29).

Este comportamiento indica heterogeneidad en la distribución de surgencias observada en los manantiales, reflejando la interacción entre las litomorfoestructuras.

La caracterización de las discontinuidades de la familia estratificación mediante diagramas estereográficos permitió identificar patrones preferenciales de orientación que coinciden con tendencias regionales y locales. Este análisis es fundamental para comprender el comportamiento del sistema superficial altamente fracturado, donde la estratificación constituye la familia más relevante en la génesis de surgencias subterráneas:

En el sector Chamis, correspondiente a las Formaciones Pariatambo y Yumagual, predominan orientaciones hacia S25°E y, en menor proporción, hacia S40°W. En Carhuaconga, representado por las Formaciones Chúlec y Pariatambo, las tendencias principales son N30°E, S20°E, S15°W y N30°W. En Chamis Alto y Carhuaquero, donde aflora la Formación Yumagual, se observa mayor frecuencia hacia S30°E y menor hacia S35°W y N20°E. En Cushunga-Capillanfa, próximo al eje de charnela del sinclinal Colpayoc y dominado por el Grupo Quilquiñán, las orientaciones son variadas: S15°W, S30°E y N20°E. En Sexemayo Lote I, con presencia de las Formaciones Farrat, Inca, Chúlec y Pariatambo, predominan las orientaciones N20°E, N30°W, S25°W y N20°W. En Sexemayo Lote II, principalmente en las Formaciones Chúlec y Pariatambo, se registran orientaciones N, S20°E, S20°W y N20°W.

Finalmente, en Majadapampa, donde aflora el Grupo Quilquiñán y Cajamarca (kárstica), se reconoce la mayor densidad de fracturas, asociadas a fallamiento compresional y extensional, con fallas locales y regionales de gran envergadura; en este sector, la estratificación muestra orientaciones principalmente en sentido N15°E y S10°E.

En el Plano 08, se aprecia la distribución de los diagramas estereográficos correspondientes a la familia estratificación y litomorfoestructuras.



Foto 29. Coordenadas 769832E, 9208340N. Falla inferida Sexemayo con comportamiento conductivo, evidenciada por descarga aproximada de 70 L/s hacia el río Tres Ríos.

4.1.2. Fisicoquímica de Aguas Subterráneas

En la presente investigación se evaluaron parámetros fisicoquímicos en fuentes de agua superficiales y subterráneas durante épocas seca y húmeda, incluyendo caudal, conductividad eléctrica (CE), potencial hidrógeno (pH), temperatura, sólidos disueltos totales (TDS) y potencial redox (ORP), cuyos valores se presentan en la Tabla 21 y Tabla 22. Entre estos parámetros, el caudal, la conductividad eléctrica (CE) y el potencial hidrógeno (pH) destacan uno de los principales condicionantes en el comportamiento geohidrológico e hidroquímico del sistema, permitiendo interpretar la interacción acuífero–manantial; los detalles se describen a continuación:

➤ **Caudal (L/s)**

El caudal refleja la capacidad de descarga y la dinámica del flujo subterráneo; este parámetro se evaluó para las épocas húmeda y seca:

Durante la época húmeda, los valores registrados en aguas subterráneas oscilaron entre 3.02 L/s en el manantial MA-CUSH3 y 0.01 L/s en MA-MANZ9. En la época seca, los caudales variaron entre 4.37 L/s en MA-CHA1, 0.01 L/s en MA-CUSH35 y fuentes de agua con flujo mínimo en comparación con la época húmeda.

➤ **Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)**

La Conductividad Eléctrica (CE) indica la concentración iónica asociada y tiempo de residencia de agua subterránea; este parámetro de conductividad eléctrica se evaluó para las épocas húmeda y seca:

Los valores registrados en la época húmeda en aguas subterráneas fueron los siguientes: los valores oscilaron entre 533 $\mu\text{S/cm}$ en manantial MA-BAL24 y 10 $\mu\text{S/cm}$ en el manantial MA-MANZ4. Durante la época seca, los valores oscilaron entre 729 $\mu\text{S/cm}$ en manantial MA-CUSH34 y 36 $\mu\text{S/cm}$ en el manantial Viscachayok (MA-BAL7). Se puede apreciar en el Plano 12, donde se muestra la variación espacial de CE en la Subcuenca para ambas épocas.

➤ **Potencial Hidrógeno (pH)**

El pH evidencia el equilibrio químico con los minerales del medio geológico, variando en general desde condiciones ácidas en ambientes volcánicos hasta condiciones alcalinas en ambientes carbonatados; para la caracterización se utilizaron los rangos de valores de pH presentados en la Tabla 31.

Los valores registrados de pH no presentan variaciones significativas entre las épocas húmeda y seca (Ver Plano 13). En general, los resultados se mantienen dentro de un rango relativamente estable. En la época seca, los valores oscilaron entre 5.78 en el manantial MA-BAL15 correspondiente a aguas ligeramente ácida y 10.34 en el pozo artesanal MA-MANZ5 correspondiente a aguas alcalinas. En la época húmeda, los valores oscilaron entre 3.96 en el manantial MA-CUSH42 correspondiente a aguas ácidas y 10.28 en el pozo artesanal MA-MANZ6 correspondiente a aguas alcalinas.

Tabla 31. Caracterización del agua de acuerdo con el pH.

Rango de pH	Características del agua
$\text{pH} \leq 5.5$	Ácida
$5.5 \leq \text{pH} \leq 6.5$	Ligeramente ácida
$6.5 \leq \text{pH} \leq 7.5$	Neutra
$7.6 \leq \text{pH} \leq 8.5$	Ligeramente alcalina
$\text{pH} \geq 8.5$	Alcalina

4.1.3. Sistemas Subterráneos

Para la caracterización de los sistemas subterráneos es fundamental analizar la fisicoquímica del agua en fuentes superficiales y subterráneas. En términos generales, el flujo subterráneo se organiza en dos sistemas: el sistema somero y el sistema profundo. El sistema somero está delimitado generalmente por depósitos cuaternarios (aluviales, fluviales y coluviales), secuencias volcánicas y por las capas más superficiales de las formaciones rocosas, que suelen presentar un alto grado de fracturamiento. El sistema profundo, en cambio, está conformado por capas más profundas de formaciones rocosas y estructuras geológicas mayores.

Una misma zona de recarga puede alimentar ambos sistemas, generando múltiples puntos de descarga en forma de manantiales, bofedales y flujo base en cuerpos de agua superficial como ríos y quebradas. En términos generales, es esencial la evaluación de niveles de agua mediante piezómetros instalados en cada sistema; sin embargo, en etapas iniciales esta información no siempre está disponible debido a los altos costos que implica. Aun así, con datos suficientes provenientes de otras fuentes de descarga de agua subterránea en la Subcuenca el Ronquillo, es posible definir las características del sistema al que pertenecen. A continuación, se describen las principales características de ambos sistemas en la Subcuenca:

➤ Sistema Subterráneo Somero Subsuperficial

Son producto de flujos locales y superficiales, cuya dinámica depende en gran medida de la topografía del sector. En la subcuenca El Ronquillo, los parámetros fisicoquímicos de estas fuentes son similares a los del agua de precipitación, con conductividades eléctricas generalmente entre 0 y 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Presentan caudales bajos ($<0,01 \text{ L/s}$) y suelen ser estacionales, aunque algunos mantienen un régimen permanente debido a la descarga lenta del flujo retenido en las capas subsuperficiales.

De acuerdo con Huamaní (2016), en muchos casos en las partes altas de las montañas se observa la presencia de una capa muy delgada y superficial de depósitos cuaternarios, compuesta principalmente por limo y arcilla, de baja permeabilidad y con espesores que varían entre 0,5 m y 2 a 3 m.

Debido a esta composición granulométrica, durante la temporada de lluvias el agua de precipitación presenta dificultades para infiltrarse, generando principalmente escorrentía. Sin embargo, en zonas con pendiente, el agua retenida en estos depósitos es drenada lentamente por gravedad.

➤ ***Sistema Subterráneo Somero***

Los parámetros fisicoquímicos de estas fuentes presentan conductividades eléctricas generalmente entre 100 y 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El flujo circula en las formaciones geológicas, que se encuentran altamente meteorizadas y fracturadas (0–50 m de profundidad); muchas de estas fracturas son discontinuas y se encuentran en zonas de baja permeabilidad, la presencia de acuitardos intercalados con formaciones acuíferas actúan como barreras parciales; esto permite que el sistema somero funcione como un reservorio temporal, favoreciendo el flujo lateral hacia quebradas, sistemas colgados y depresiones antes de alcanzar mayores profundidades, emergiendo en superficie a través de depresiones topográficas y dando lugar a manantiales de gravedad por desborde y manantiales de gravedad por depresión.

❖ Manantiales del sistema somero

En general, el flujo constituye caudales menores a 0,01 L/s durante la temporada seca, aunque existen excepciones. Se distinguen por trayectorias cortas. Como resultado, son más sensibles a las variaciones en la precipitación.

➤ ***Sistema Subterráneo Profundo***

Los parámetros fisicoquímicos de estas fuentes presentan conductividades eléctricas generalmente mayores a 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En los acuíferos asociados a prominentes formaciones rocosas que conforman montañas altoandinas, así como en acuitardos que presentan permeabilidad secundaria en ciertas zonas, la descarga de agua subterránea ocurre con frecuencia a través de fracturas localizadas en las partes más bajas del relieve, especialmente en los márgenes de quebradas y ríos, así como en contactos litológicos entre formaciones geológicas.

Estas estructuras pueden actuar como barreras que limitan el flujo subterráneo o, por el contrario, como conductos que lo facilitan.

❖ **Manantiales del sistema profundo:**

En la Subcuenca el Ronquillo, los manantiales presentan un régimen permanente tanto en época seca como húmeda, con una composición fisicoquímica estable que refleja la interacción prolongada con el basamento rocoso. El flujo profundo se asocia a caudales iguales o superiores a 0,01 L/s durante la temporada seca. Este comportamiento es debido a que el agua subterránea permanece más tiempo en el subsuelo y recorre trayectorias más extensas, lo que incrementa la interacción agua-roca y, en consecuencia, el contenido de sales disueltas, por lo tanto, la conductividad eléctrica. En la Tabla 32 se presenta la clasificación de manantiales según su génesis.

Tabla 32. Clasificación de manantiales según su génesis y el sistema subterráneo asociado.

Código de Fuente	Nombre Referencial	Tipo de Fuente	Régimen	Sistema Subterráneo
MA-BAL10	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-BAL11	Manantial Mishquiyaco	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-BAL13	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-BAL15	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-BAL17	Manantial el Aliso	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-BAL18	Manantial Rosapozo	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-BAL7	Manantial Viscachayok	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-BAL8	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-BAL9	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-CUSH10	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-CUSH18	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-CUSH19	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-CUSH21	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-CUSH22	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-CUSH23	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-CUSH24	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-CUSH25	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-CUSH27	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-CUSH29	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-CUSH7	Manantial Condor I y II	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-MANZ4	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial
MA-MANZ7	-	Manantial	Permanente	Somero-Subsuperficial

Código de Fuente	Nombre Referencial	Tipo de Fuente	Régimen	Sistema Subterráneo
MA-BAL19	Manantial Conga	Manantial	Permanente	Profundo
MA-BAL20	Manantial Yerba Buena	Manantial	Permanente	Profundo
MA-BAL21	-	Manantial	Permanente	Profundo
MA-BAL24	-	Manantial	Permanente	Profundo
MA-BAL4	-	Manantial	Permanente	Profundo
MA-CUSH1	Manantial el Cinze	Manantial	Permanente	Profundo
MA-CUSH33	-	Manantial	Permanente	Profundo
MA-CUSH34	-	Manantial	Permanente	Profundo
MA-CUSH35	-	Manantial	Permanente	Profundo
MA-CUSH38	-	Manantial	Permanente	Profundo
MA-CUSH43	-	Manantial	Permanente	Profundo
MA-CUSH45	-	Manantial	Permanente	Profundo
MA-BAL1	San Juan de Cushunga	Manantial	Permanente	Somero
MA-BAL12	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-BAL14	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-BAL2	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-BAL22	Manantial Lluscachá	Manantial	Permanente	Somero
MA-BAL23	Manantial Yacupacha	Manantial	Permanente	Somero
MA-BAL3	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-CHA1	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH11	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH12	Manantial Porporito	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH13	Manantial Totorá I	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH14	Manantial Totorá II	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH2	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH3	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH30	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH31	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH32	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH36	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH37	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH40	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH41	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH5	Manantial Peña Colorada	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH6	Manantial Yacupacha	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH8	Manantial las Totoritas	Manantial	Permanente	Somero
MA-CUSH9	Manantial el Chorro	Manantial	Permanente	Somero
MA-MANZ2	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-MANZ3	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-MANZ8	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-ROÑQ1	-	Manantial	Permanente	Somero
MA-ROÑQ2	-	Manantial	Permanente	Somero

4.2. RECARGA Y DESCARGA DEL SISTEMA SUBTERRÁNEO

La recarga o infiltración del sistema subterráneo en la subcuenca El Ronquillo fue estimada mediante el balance hidrológico con la transposición de precipitaciones en la subcuenca; además de la metodología de Aplis (integra variables como altitud, pendiente, litología, suelos, infiltración y condición de acuífero), para estimar la recarga o infiltración potencial de la precipitación hacia el acuífero y representarla espacialmente.

La precipitación media anual transpuesta para la subcuenca se ubica en el rango de 904–918 mm/año, con marcada estacionalidad: la época húmeda entre octubre y abril y época seca entre junio y agosto, influenciada por gradientes altitudinales y condiciones orográficas. El análisis histórico (1934–2025) evidencia ciclos húmedos y secos asociados a fenómenos como El Niño y La Niña, con una tendencia reciente (actualidad) hacia mayor variabilidad climática y ciclos más cortos.

Desde un punto de vista geohidrológico, este resultado indica que una fracción importante de precipitación logra infiltrarse y alcanzar el sistema acuífero, condicionada por la presencia de litologías volcánicas (Formaciones Porculla y Volcánico Huambos) y sedimentarias (Grupo Quilquiñan, Formaciones Cajamarca Yumagual, Pariatambo, Chúlec, Inca y Farrat) con permeabilidad secundaria, pendientes moderadas y suelos poco desarrollados. Esta relación se representa en los resultados del método APLIS, que muestran que las formaciones con mayor capacidad de recarga corresponden a Depósitos Cuaternarios (recarga promedio 51 % equivalente a 461 mm/año) y Unidades Volcánicas como Huambos y el Centro Volcánico Rumiorcco (30–32 % equivalente a 274 a 286 mm/año), seguidas de la Formación Cajamarca (42 % equivalente a 375 mm/año). En un rango intermedio se ubican las Secuencias Andesíticas y las Formaciones Sedimentarias como Pariatambo y Yumagual (20-25 % equivalente a 184 a 224 mm/año), luego las Formación Chúlec y Grupo Quilquiñan (22–26 % equivalente a 198 a 232 mm/año). Finalmente, las rocas intrusivas como el Pórfido Diorítico-Granodiorítico y la Formación Inca con valores menores (14 % equivalente a <123 mm/año). El detalle se presenta en la Tabla 29.

La evaluación de la recarga potencial (metodología Aplis) fue equivalente en promedio para toda la extensión de la subcuenca el 28 % de la precipitación, esto es una recarga específica cercana a 253 mm/año. En función de un área de subcuenca de 42 km² aproximadamente, el volumen anual aproximado de 10.4 Mm³/año, con un caudal medio anual equivalente de 328 L/s de manera referencial. En comparación, el balance hidrológico histórico, evaluado a partir de ciclos de precipitación (apartado 3.8), indica que la infiltración promedio en la subcuenca alcanza entre el 30 y 35 % de la precipitación total. Esta diferencia se explica porque no toda la infiltración se convierte en recarga efectiva, ya que parte del agua se pierde por procesos como evapotranspiración, retención en el suelo y flujos subsuperficiales desconectados del acuífero, variables que no fueron evaluadas en este estudio pero que vale la pena mencionar. Por ello, la recarga estimada (28 %) resulta menor que la infiltración total (30–35 %).

En cuanto a la descarga, los caudales observados en campo (año 2024) a la salida de la subcuenca muestran una marcada estacionalidad. Durante la estación seca, los flujos medidos en la salida de la microcuenca en el Río Ronquillo se sitúan típicamente entre 53 y 63 L/s (promedio 58 L/s), representando el flujo base mínimo sostenido por la descarga subterránea. En la estación húmeda, los caudales pueden alcanzar hasta 429 L/s, reflejando la combinación de escorrentía superficial, flujos subsuperficiales y el incremento del aporte subterráneo asociado al ascenso del nivel freático. Es importante mencionar que las descargas en manantiales distribuidos en toda la extensión de la subcuenca aportan entre 25 y 45 L/s en las épocas seca y húmeda, contribuyendo también como parte de las descargas totales del sistema.

Esta dinámica se puede contrastar con los registros históricos de la estación hidrométrica El Ronquillo, mediciones entre los años 2008 y 2017 reportó caudales mínimos en época seca del orden de 150 a 250 L/s y máximos cercanos a 920 L/s en la época húmeda. Estudios recientes en el 2018, en la subcuenca El Ronquillo, aplicando el método de separación de caudales base con el método de filtros digitales de Eckhardt determinaron finalmente un índice de flujo base (BFI $\approx$ 0.50), lo que indica que aproximadamente la mitad del caudal proviene del sistema

subterráneo; sin embargo, este aporte es dinámico y depende del estado de recarga del acuífero. La disminución actual de los caudales base respecto a los valores históricos se justifica por la reducción progresiva de las precipitaciones observada en los últimos ciclos, evidenciada en el análisis climático del apartado 3.8, donde se aprecia una tendencia hacia menores volúmenes infiltrados y mayor variabilidad interanual.

El mapa de estimación de la recarga calculada mediante la metodología APLIS se presenta en el Plano 11, mientras que los caudales medidos en la subcuenca para ambas épocas, obtenidos mediante el método volumétrico y correntómetro, se muestran en el Plano 14. En la Tabla 33 se muestra el resumen de entradas y salidas del sistema subterráneo.

Tabla 33. Resumen de entradas y salidas del sistema subterráneo.

Componente	Valor / Rango
Entradas	
Precipitación media anual	904 mm/año
Infiltración total (balance hidrológico)	30 – 35 % de la precipitación
Recarga potencial (APLIS)	28 % (253 mm/año)
Volumen anual de recarga	10.4 Mm ³ /año
Caudal medio referencial	328 L/s
Salidas	
Descarga actual (2024)	Época seca: 53 – 63 L/s; Época Húmeda: hasta 429 L/s
Descarga histórica (2008–2017)	Época seca: 150 – 250 L/s; Época Húmeda: hasta 920 L/s
Descarga en manantiales	25 – 45 L/s

4.3. COMPORTAMIENTO GEOHIDROLÓGICO

El comportamiento geohidrológico de la subcuenca El Ronquillo se caracteriza por una interacción compleja entre la recarga, el almacenamiento y la descarga, condicionada por la estructura geológica y la variabilidad climática. El flujo subterráneo se inicia en las zonas altas, donde la precipitación infiltrada alimenta principalmente el sistema somero a través de depósitos cuaternarios y secuencias volcánicas altamente fracturadas. Parte de este flujo migra hacia el sistema profundo mediante contactos litológicos y fracturas abiertas, mientras que otra fracción se desvía lateralmente hacia quebradas y manantiales colgados, generando descargas temporales. El sistema profundo, constituido por formaciones carbonatadas, rocas volcánicas y unidades intrusivas con permeabilidad secundaria, actúa como acuíferos de mayor tiempo de residencia, descargando agua gradualmente hacia el flujo base en ríos y manantiales permanentes. Esta dinámica evidencia que la compleja interacción de las litomorfoestructuras (dinámica estructural y la heterogeneidad litológica) controlan la dirección y velocidad del flujo, favoreciendo trayectorias verticales en zonas de recarga y descendentes que convergen hacia la parte más baja de la subcuenca. En conjunto, el sistema responde de manera rápida a los eventos de precipitación en el sistema somero, mientras que el sistema profundo es estable a las variaciones estacionales, aunque su aporte se ha reducido en los últimos años por la disminución de las precipitaciones; para una mejor interpretación de este comportamiento, en el Plano 15 se muestran los niveles de flujo subterráneo profundo inferidos.

Los esquemas conceptuales presentados en la Figura 19 y Figura 21, ilustran esta interacción, mostrando cómo las zonas de recarga, los sistemas subterráneos y los puntos de descarga se integran en un ciclo geohidrológico controlado por la geología y las estructuras regionales y locales. Se definieron además, 4 secciones geohidrológicas (Figura 22, Figura 23, Figura 24 y Figura 25) a lo largo de la subcuenca, con orientación aproximada SW–NE, que permiten visualizar con detalle la ubicación de los manantiales, así como el movimiento y la dirección del flujo subterráneo, evidenciando la conexión entre las zonas de recarga en las partes altas y las áreas de descarga hacia el cauce principal de los ríos.

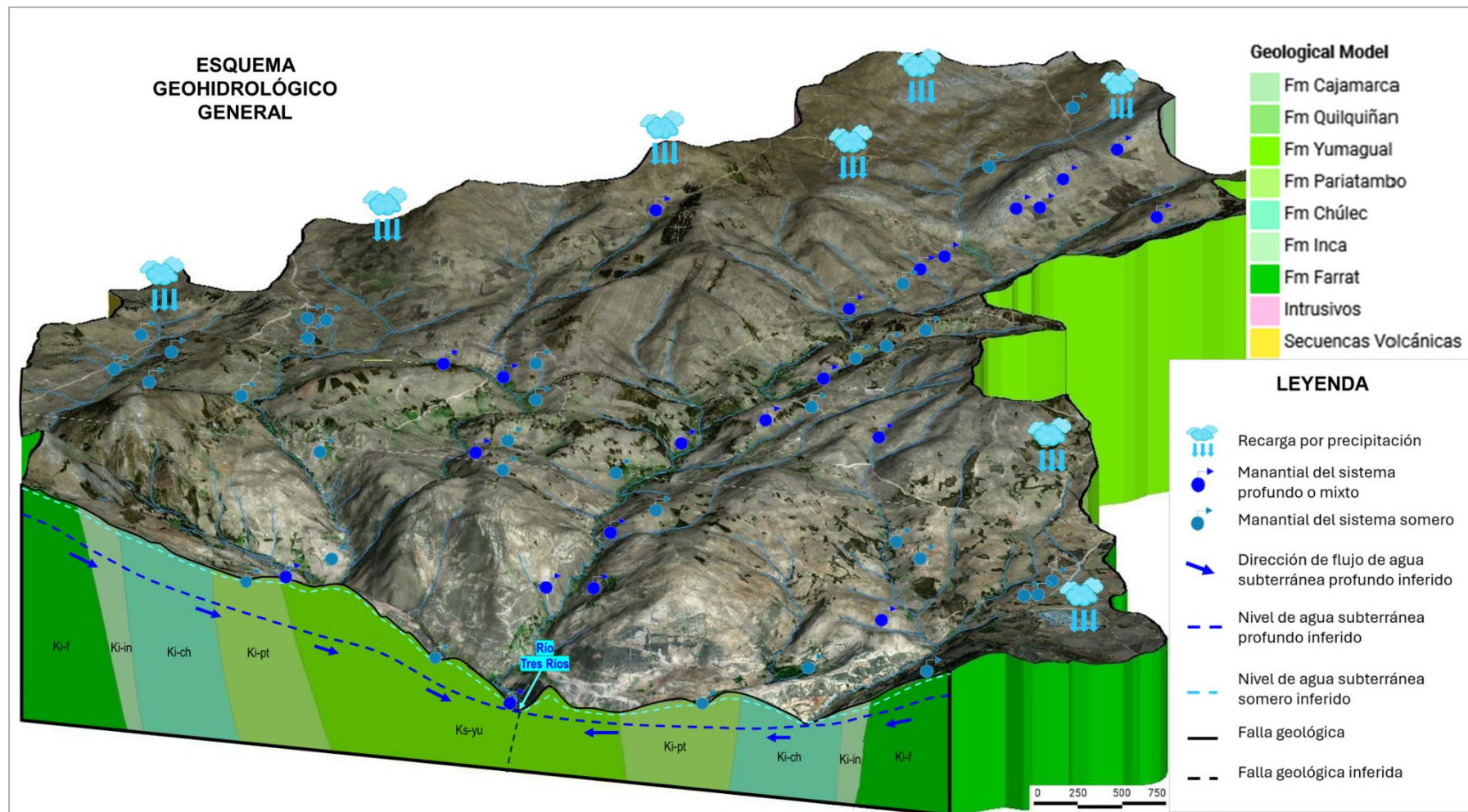


Figura 19. Esquema geohidrológico general.

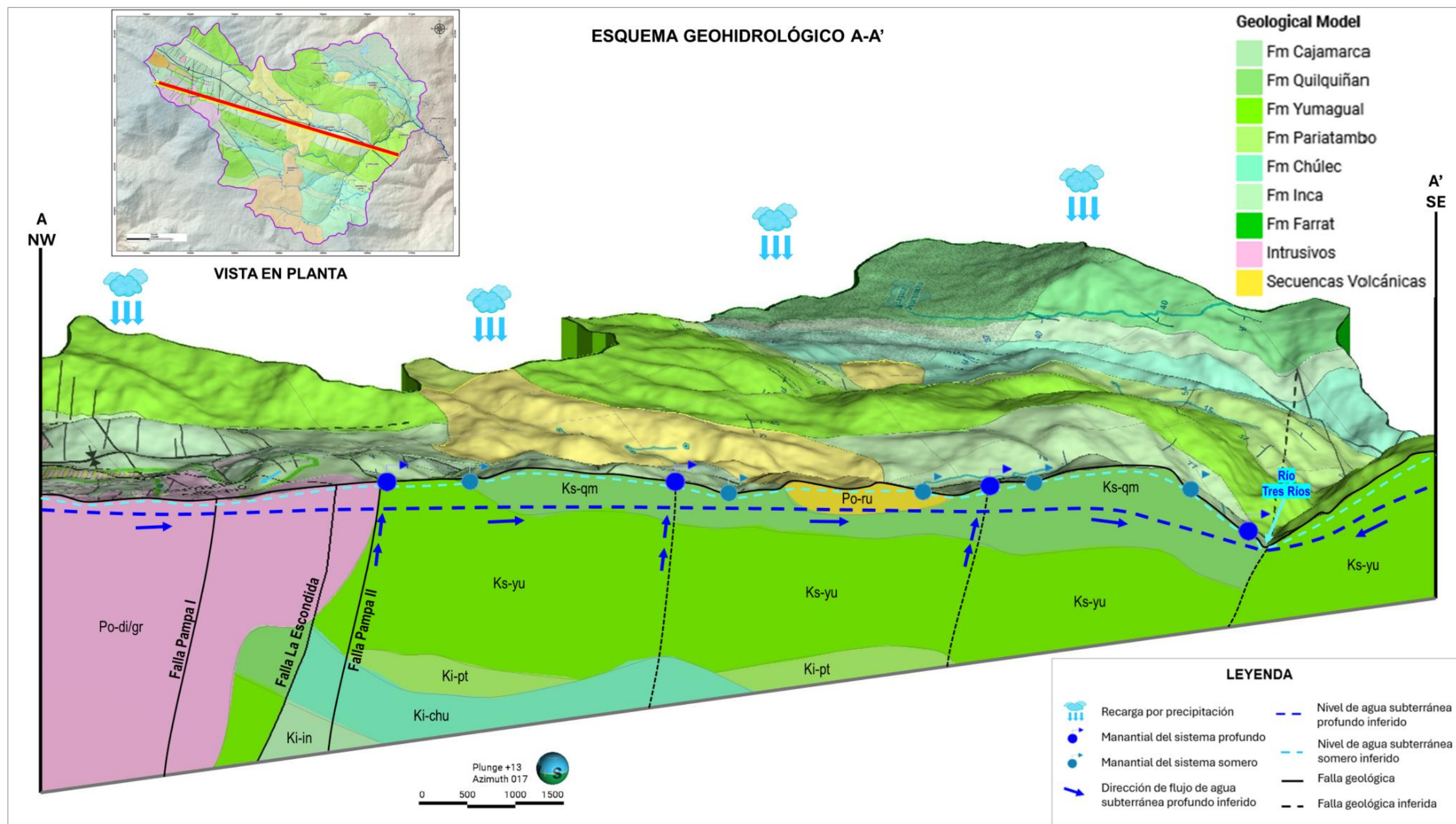


Figura 20. Esquema de evaluación geohidrológica de dirección NNW-SSE.

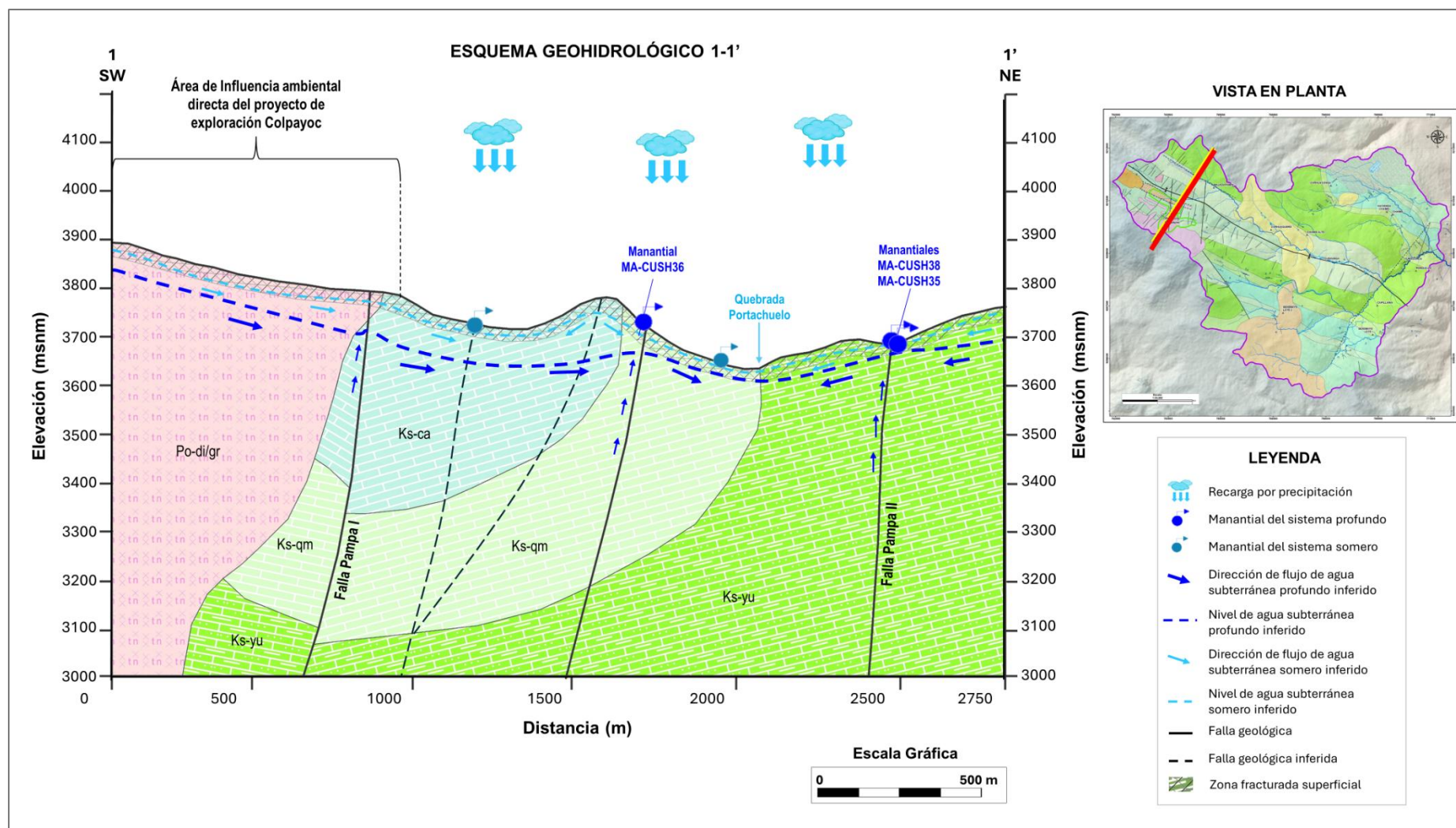


Figura 22. Esquema geohidrológico 1-1' de dirección SW-NE.

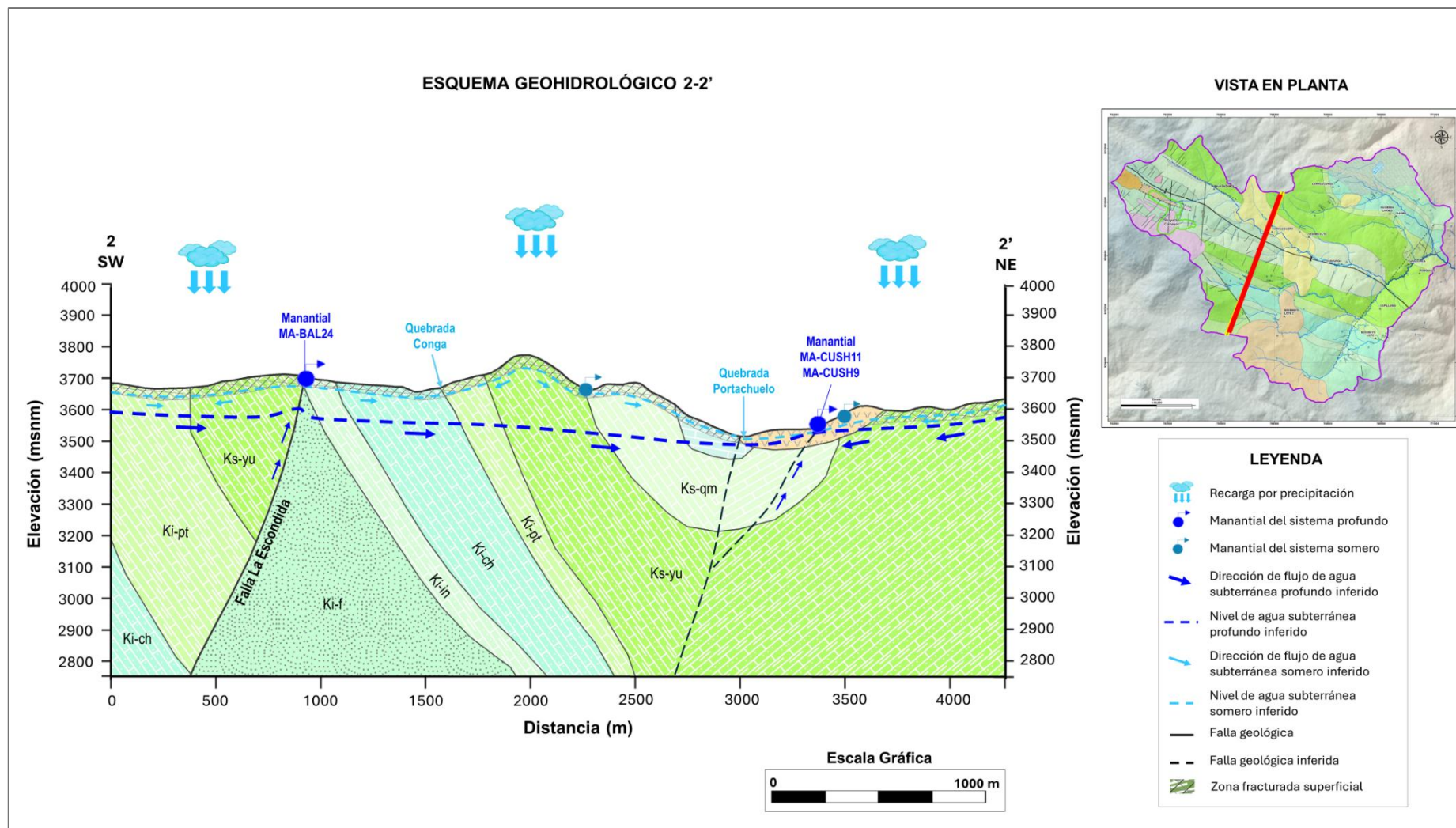


Figura 23. Esquema geohidrológico 2-2' de dirección SW-NE.

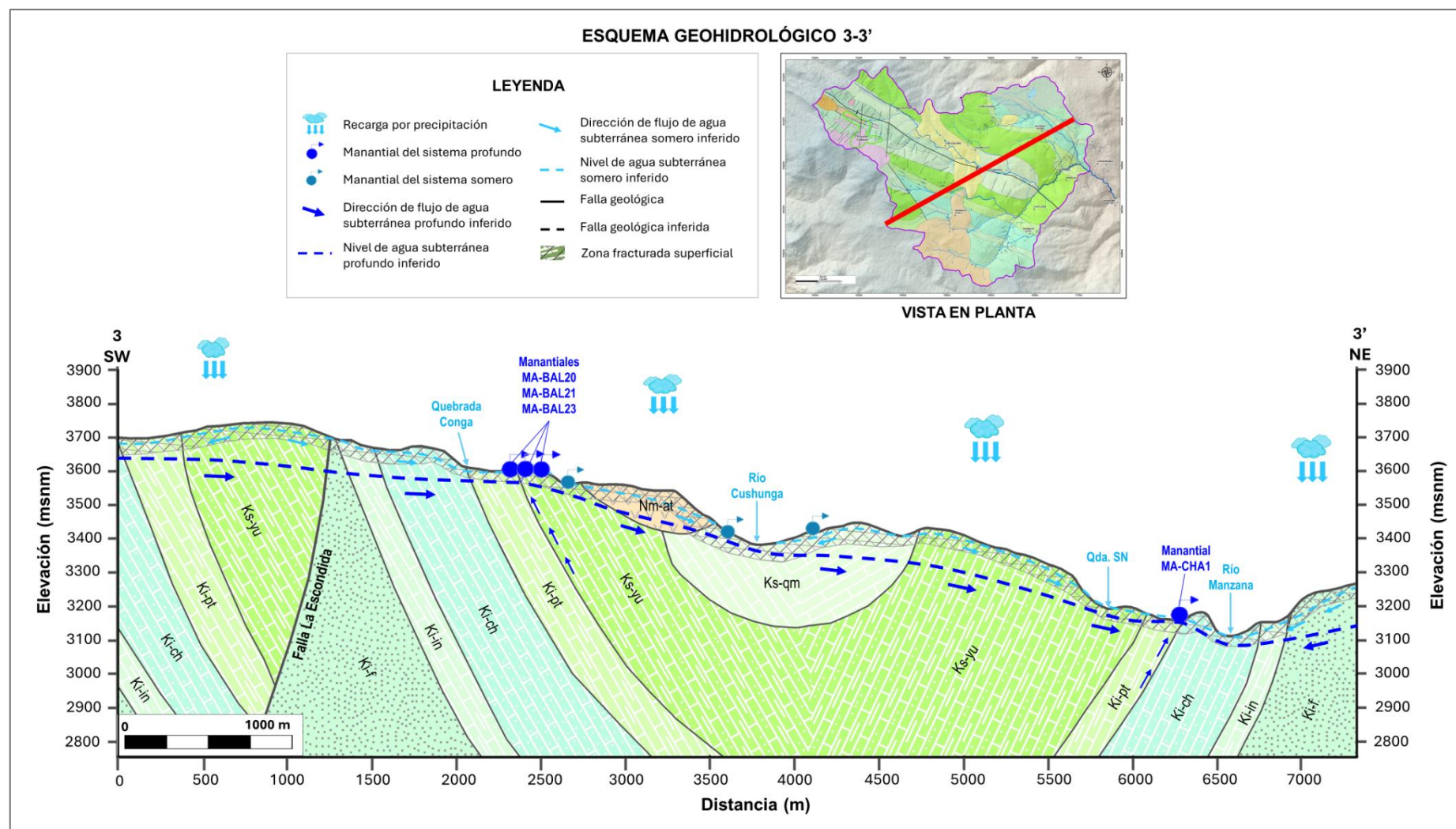
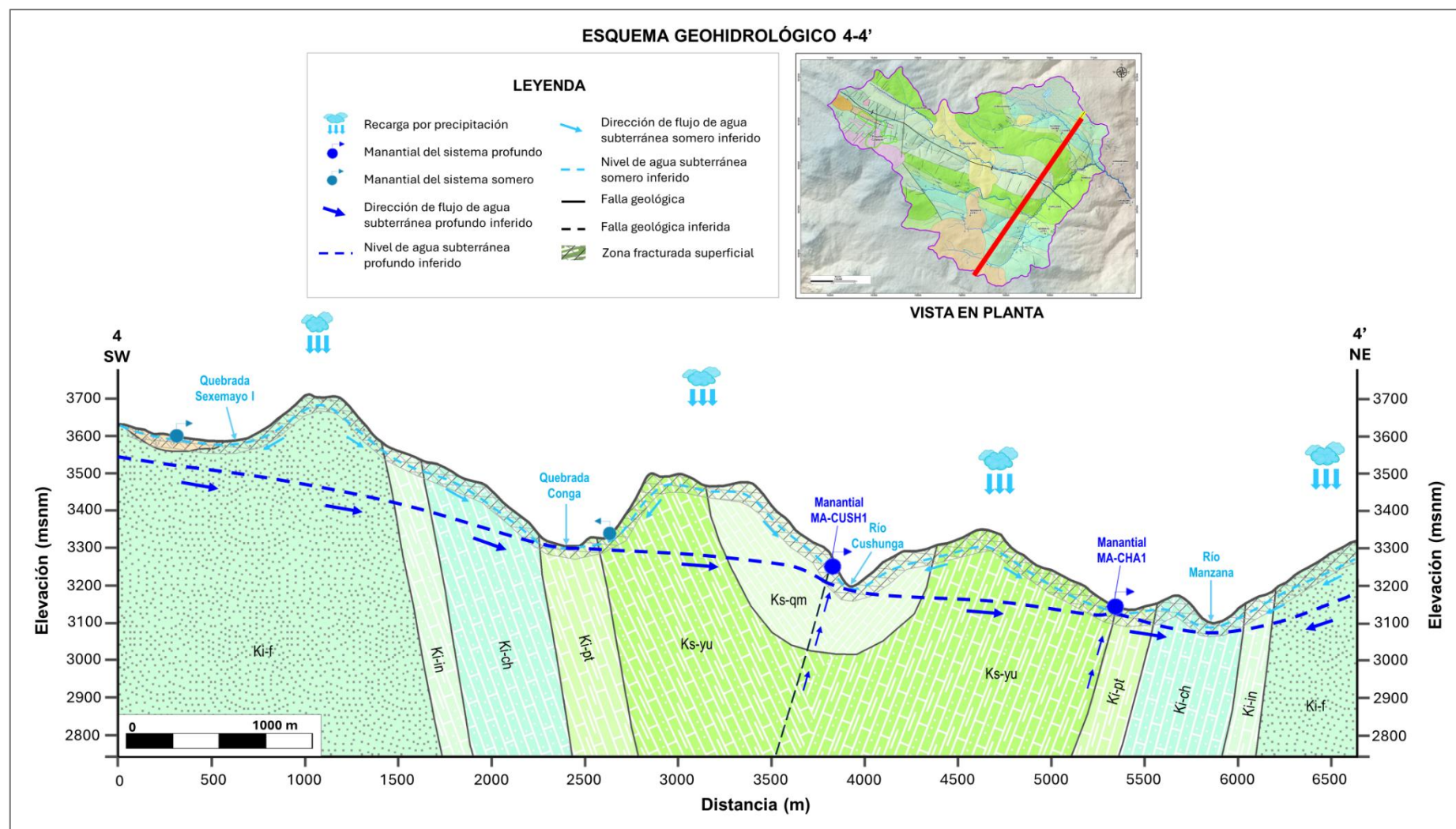


Figura 24. Esquema geohidrológico 3-3' de dirección SW-NE.



4.4. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Las litomorfoestructuras de la subcuenca El Ronquillo, con un área aproximada de 42 km² y altitud media de 3,523 msnm, determinan el comportamiento geohidrológico, condicionando la formación y distribución de los diferentes tipos de acuíferos presentes, incluyendo acuíferos porosos no consolidados, acuíferos en rocas volcánicas, acuíferos en rocas fracturadas y kársticas, así como acuitardos en rocas sedimentarias. Estas características condicionan directamente los procesos de recarga y descarga del agua subterránea en forma de manantiales, así como la variación espacial y temporal de sus parámetros fisicoquímicos, evidenciada en caudales que oscilan entre 4.37 L/s y 0.01 L/s, conductividades eléctricas entre 729 µS/cm y 10 µS/cm, y valores de pH que varían desde condiciones ácidas (3.96) hasta alcalinas (10.34) entre las épocas húmeda y seca.

Este comportamiento se explica por la heterogeneidad litológica de las Formaciones Sedimentarias Cretácicas (Farrat, Inca, Chúlec, Pariatambo, Yumagual, Grupo Quilquiñán y Cajamarca), los Intrusivos Diorítico-Granodioríticos y las Secuencias Volcánicas del Neógeno, sobre las que reposan Depósitos Cuaternarios de alta porosidad primaria; además, por el control estructural ejercido por el Sinclinal Colpayoc y fallas regionales como Pampa I y II, La Escondida y Sexemayo, que generan zonas conductivas y barreras hidráulicas. Estas condiciones, junto con las unidades morfogenéticas y la dinámica climática, regulan la recarga preferencial en cabeceras y la descarga hacia el nivel de base del río Ronquillo, validando que la interacción entre litología, estructura y morfología controla la conectividad hidráulica y la evolución hidroquímica del sistema subterráneo.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El cartografiado geológico y estructural permitió identificar unidades litoestratigráficas y estructuras tectónicas que controlan la dinámica geohidrológica. Las fallas Pampa I y II, La Escondida y Sexemayo, junto con el sinclinal Colpayoc, condicionan la circulación del flujo subterráneo.
- El análisis de unidades morfogenéticas evidenció que las lomadas y planicies concentran la recarga preferencial debido a sus pendientes suaves y moderadas, mientras que las laderas y escarpas controlan la escorrentía y hacia los cauces de ríos y quebradas.
- La caracterización geohidrológica en base a sus propiedades hidráulicas, demostró la existencia de acuíferos someros y profundos. La Formación Cajamarca presenta rasgos kársticos que favorecen la recarga y circulación subterránea, mientras que otras formaciones actúan como acuitardos.
- El balance hidrológico y la estimación de recarga mediante APLIS indican que la precipitación media anual transpuesta es de 904 mm/año, con una recarga potencial del 28% (254 mm/año).
- Los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea, con CE entre 10 y 729 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y pH entre 3.96 y 10.34, determinan el tiempo de residencia, e interacción agua-roca.
- El análisis geohidrológico de la subcuenca El Ronquillo muestra que la litomorfoestructuras controlan la formación de acuíferos y procesos de recarga y descarga. El flujo subterráneo desciende desde las partes altas hacia las bajas, descargando en manantiales y en el río Ronquillo, nivel de base del sistema.

5.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda a la Región Cajamarca:

- Realizar “perforaciones hidrogeológicas” para caracterizar las propiedades hidráulicas del acuífero.
- Ejecutar estudios de hidroquímica, isotopía y calidad de agua, que permitan identificar facies hidroquímicas y tiempos de residencia del agua subterránea.
- Aplicar métodos geofísicos en la Formación Cajamarca para la caracterización de acuíferos.
- Implementar un sistema de monitoreo geohidrológico permanente.
- Desarrollar modelos numéricos y simulaciones de tendencia regional de flujo subterráneo.
- Promover la gestión integrada del recurso hídrico, priorizando la protección de zonas de recarga y las áreas con potencial kárstico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andreo, B. & Vías, J. 2004.** Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (GHUMA) y Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
- Aparicio, F. 1992.** Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Limusa.
- Bazán, O. 2016.** Evolución Geotectónica de la Deflexión de Cajamarca y su Implicancia en la Metalogenia del Norte del Perú. Lima, Perú: XVIII Congreso Peruano de Geología.
- Bravo, N. 2020.** Teledetección y Procesamiento de Imágenes Satelitales. Huánuco-Perú: Geomatica Ambiental.
- Carlotto, V. & Peña, F. 2012.** Geología e Hidrogeología Regional del Proyecto Conga y Zonas de Influencia. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
- Chow, V. 1994.** Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL.
- Chuchón, J. 2017.** Modelo Hidrogeológico Conceptual del Acuífero de Alta Montaña de las Microcuencas del Patarí y Quellopata, Cuenca del Río Ocoña. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Chuvieco, E. 1996.** Teledetección Ambiental, la observación de la tierra desde el espacio. Barcelona: Ariel Ciencia.
- Cotler, H. 2013.** Cuencas Hidrográficas. Fundamentos y Perspectivas para su Manejo y Gestión. México D.F: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Custodio, E., & Llamas, M. 1983.** Hidrología Subterránea. Barcelona: Ediciones Omega.
- Custodio, E., & LLamas, M. 2001.** Hidrología Subterránea. Barcelona: Ediciones Omega.
- Dávila, J. 2011.** Diccionario Geológico. Lima, Perú: ARTHALTUNA.
- De la Cruz, R. 2017.** Análisis del Sistema Mineralógico del Pórfido del Proyecto Minero Colpayoc para determinar su Tipo de Yacimiento, Distrito Chetilla-Cajamarca. Cajamarca, Perú: Universidad Alas Peruanas (UAP).
- Duque, G. 2020.** Manual de Geología para Ingenieros. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

- FCIHS. 2009.** Hidrogeología. Barcelona: Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea.
- Goicochea, O. 2018.** Caracterización Hidrogeológica de Rocas Carbonatadas en Fraylecocha, Celendín. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Guerasimov, I. 1986.** Problemas de geomorfología global: geomorfología actual y teoría del movilismo en la historia geológica de la Tierra. Nauka.
- Hamill, L. & Bell, F. 1986.** Groundwater Resource Development. London: Butterworths.
- Hem, J. 1985.** Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. Third Edition. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
- Hernández, R. & Fernández, C. 2014.** Metodología de la Investigación. 6° edición. México D.F: McGraw-Hill.
- Hernández, J. 1995.** Análisis morfoestructural del relieve de Oaxaca. UNAM.
- Herrera, A. 2015.** Caracterización Hidrogeológica de la Microcuenca Tres Ríos para la Construcción de Reservorios Artesanales. Cajamarca: Instituto de Ingenieros de Minas del Perú.
- Huamaní, A. 2016.** Importancia de Diferenciar Manantial de Filtración en Estudios de Impacto Ambiental en Proyectos Mineros. Lima: XVIII Congreso Peruano de Geología.
- INGEMMET. 2002.** Curso de Geohidrología. Lima, Perú: INGEMMET / Montevideo.
- Maderey, L. 2005.** Principios de Hidrogeografía Estudio del Ciclo Hidrológico. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Magaz, J. 2006.** La influencia de la litología en la formación del relieve en regiones tectónicamente activas. Geomorfología y Tectónica.
- Marina, M. & Altamirano, F. 2022.** Estimación de la Recarga en Acuíferos Kársticos Fracturados usando el Método Aplis. Grupo de recursos hídricos de Klohn Crippen Berger (KCB).
- Masuch, D. 2012.** Hidrogeología: Manual de definiciones y fórmulas. México: Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Modenesi, J. 2002.** Estudio de las morfoestructuras en ambientes tropicales. Geotexturas.
- Navarro, P. 2012.** Centros Volcánicos Oligo-Miocénicos (Grupo Calipuy) en la Zona Sur de Cajamarca. Lima, Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

- Orrillo, J. & Morera, S. 2018.** Caracterización del Rol del Páramo Andino en la Regulación del Recurso Hídrico en la Cuenca Ronquillo. Lima, Perú: Instituto Geofísico del Perú (IGP).
- Ortiz, O. 2015.** Evaluación Hidrológica. Lima, Perú: Publicación en Hidrored.
- Otamendi, F. 2021.** Estudio Hidrogeológico del Acuífero Localizado al Este del Lago de Valencia, Municipio Libertador, Estado Aragua. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Palma, A. & Carmona, R. 2022.** Estimación de la recarga natural en la Cuenca de México mediante la aplicación del método APLIS. Ingeniería Investigación y Tecnología.
- Park, S. 2021.** Technical Report on the Colpayoc Gold Property. Vancouver, British Columbia, Canadá: Level 14 Ventures Ltd.
- Peña, F. & Severyn, O. 2014.** Modelo Hidrogeológico del Funcionamiento de las Fuentes Termales de Baños del Inca, Cajamarca-Perú. Sociedad Geológica del Perú - SGP.
- Quispe, Z. & López, M. 2014.** Estudio Hidrogeológico de la Microcuenca San Cirilo, Cajamarca-Perú. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Requelme, J. 2021.** Caracterización Estructural del Sinclinal de Llullapuquio y su Relación en la Intrusión del Pórfido Colpayoc. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Reyes, L. 1980.** Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba (Hojas 15f, 15g y 15h). Lima, Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Reyes, L. 1980.** Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba. Hojas: 15-f, 15-g, 16-g - [Boletín A 31]. Lima, Perú: INInstituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET.
- Rodriguez, R. 2016.** Método de Investigación Geológico-Geotécnico para el Análisis de Inestabilidad de Laderas por Deslizamientos Zona Ronquillo-Corisorgona. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Rodríguez, R. 2018.** Tesis Doctoral: Impactos Geotécnico Ambientales en Cabeceras de Subcuencas por Implantación de Minas Conga. Cajamarca-Perú: Universidad Nacional de Cajamarca.

- Rodríguez, R. & Huamán, F. 2016.** Clasificación de Cuencas, Subcuencas y Microcuencas según sus Parámetros Geomorfológicos. Cajamarca-Perú: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Rodriguez, R. & Huamán, F. 2022.** Actualización y Validación de la Clasificación de Unidades Hidrográficas UH-RR/FH-2016 en la Región Cajamarca. Cajamarca-Perú: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Siveroni, J. 2012.** Caracterización del Potencial Hidrogeológico de las Unidades Hidrográficas Ronquillo Alto y Alto Chetilla de la Provincia de Cajamarca. Cajamarca-Perú: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Smet, J., & Van Wijk, C. 2002.** Small community water supplies: Technology, people and partnership. Delft, Países Bajos: IRC International Water and Sanitation Centre.
- Spikermann, J. 2010.** Elementos de Geología General. Buenos Aires: Fundación de Historia Natural (FHN).
- Tapia, M. 2003.** Conceptos Sobre Cuencas Hidrográficas. En M. Tapia, Hidrología.
- Tóth, J. 2000.** Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, Canadá.
- Trcek, B. & Zojer, H. 2010.** Groundwater Hydrology of Springs: Recharge of springs. Burlington, Massachusetts, Estados Unidos: Butterworth-Heinemann.
- White, W. 2010.** Groundwater Hydrology of Springs: Springwater geochemistry. Burlington, Massachusetts, Estados Unidos: Butterworth-Heinemann.
- WSP. 2020.** Estudio Climatológico para la Segunda Modificación del EIA de Yanacocha. Lima, Perú.

ANEXO 01

Registro Fotográfico de Fuentes de Agua Subterránea

ANEXO 02

Estaciones de Caracterización de Discontinuidades

ANEXO 03

PLANOS

PLANO 01:	Mapa de Ubicación
PLANO 02:	Imagen Satelital
PLANO 03:	Modelo Digital de Elevaciones
PLANO 04:	Unidades Morfogenéticas
PLANO 05:	Unidades Hidrográficas
PLANO 06:	Geomorfológico Altitudinal
PLANO 07:	Geológico Estructural
PLANO 08:	Geológico Estereográfico
PLANO 09:	Inventario de Fuentes de Agua Superficial
PLANO 10:	Inventario de Fuentes de Agua Subterránea
PLANO 11:	Estimación de la Recarga por el Método de APLIS
PLANO 12:	Conductividad Eléctrica (CE) en Manantiales
PLANO 13:	Potencial Hidrógeno (pH) en Manantiales
PLANO 14:	Comparación de Caudales en Épocas Seca y Húmeda
PLANO 15:	Flujo de Agua Subterránea Inferido