

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia**

**Escuela Profesional de Ingeniería Geológica – Geotecnia**

**LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES  
CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA: BOCATOMA  
CHUSCHUCO-PACHÍA-TACNA**

**TESIS**

**Presentada por:**

**Bach. Reisell Martín Rojas Pilco**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO GEÓLOGO – GEOTÉCNICO**

**TACNA – PERÚ**

**2025**

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia  
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica – Geotecnia

**HOJA DE JURADO**

TESIS

“LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE  
DRON EN TALUDES DE ROCA: BOCATOMA CHUSCHUCO-PACHÍA-TACNA”

Presentado por el bachiller Reisell Martín Rojas Pilco  
Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo – Geotécnico

Tesis Sustentada y Aprobada el 21 de noviembre del 2025 (RF N° 607-2025-FIAG/UNJBG) con  
el siguiente jurado:

**Presidente**

  
Mstro. Ing. MICHAEL ALEX MIRANDA CHOQUE

**Miembro – Secretario**

  
Mgr. Ing. GLORIA MARINA CHOQUE MACHACA

**Miembro – Vocal**

  
Ing. MIGUEL ANGEL BANDA FLORES

**Asesor de Tesis**

  
Ing. JONATHAN FARAZ DAWIS ZAVALA CURASI

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN  
VICERRECTORADO ACADÉMICO  
**BIBLIOTECA**

Ciudad Universitaria Av. Miraflores/Av. Cusco S/N Teléfono: 052-543000 Anexo:2342

**CERTIFICADO DE SIMILITUD**

Yo, **ING. JONATHAN FARAZ DAWIS ZAVALAETA CURASI**, en mi condición de asesor acreditado con Resolución de Escuela de Ingeniería Geológica-Geotecnia/FIAG N°267-2023-ESGE-FIAG/UNJBG del 13 de octubre del 2023 del trabajo de tesis titulado: **"LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA: BOCATOMA CHUSCHUCO-PACHÍA-TACNA"**, presentado por el Sr. **REISELL MARTÍN ROJAS PILCO**, para optar el Grado Académico de **INGENIERO GEOLOGO – GEOTECNICO**.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 4%. Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis y está de acuerdo con el nivel **PERMITIDO**, la cual se expedita para continuar con los trámites para optar el título profesional de **INGENIERO GEOLOGO-GEOTÉCNICO**, según corresponda para su publicación en el repositorio institucional.

Tacna, 11 de diciembre del 2025

FIRMA DEL ASESOR  
Nombres y Apellidos

  
.....  
ING. **JONATHAN FARAZ DAWIS ZAVALAETA CURASI**  
DNI N°: 45410877



FIRMA TESISTA  
Nombres y Apellidos

  
.....  
Sr. **REISELL MARTIN ROJAS PILCO**  
DNI N°: 70843079



## **Dedicatoria**

A Dios, por guiar mi camino, darme la fuerza y la esperanza necesarias para seguir adelante en cada etapa de mi vida profesional.

A mi esposa, Priscila, quien desde el 2014 ha sido mi mayor impulso, mi compañera fiel y mi motivación constante. En los momentos más difíciles, cuando pensé abandonar la universidad, ella fue quien me alentó con amor, paciencia y sacrificio. Gracias por estudiar conmigo noches enteras, por acompañarme en mis frustraciones y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Esta tesis también es tuya, porque sin ti no habría llegado hasta aquí. Te amo, y te agradeceré por siempre por ser mi apoyo incondicional y mi amor idóneo hasta el fin de mis días.

A mi madre, que con sus lágrimas, esfuerzo y consejos me enseñó a no rendirme y a culminar lo que empecé.

A mi padre, quien, con su alegría, promesas y fe en mí, incluso en medio de su propia lucha contra la enfermedad, me motivó a terminar esta etapa. Los amo profundamente.

A mi hermana Nataly, ejemplo de perseverancia y fuente de inspiración constante, gracias por tu apoyo incondicional y por impulsarme siempre a seguir mis sueños.

A mi hermana Nany, por sus sabios consejos y su cariño sincero.

## **Agradecimientos**

Expreso mi más sincero agradecimiento al Ing. Germán Huayna, asesor tras bambalinas, por su orientación y apoyo constante durante el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos y colegas Carolyn, Jhonathan, Gloria, Michael, Pío y Conrado, por su ayuda, compañía y motivación en los momentos más exigentes.

Y de manera especial, al Ing. Cabrera, maestro, mentor y amigo de muchas generaciones, un verdadero cristiano y ejemplo de humildad y vocación, siempre dispuesto a brindar su apoyo y sabiduría.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este logro y por dejar una huella en mi vida profesional y personal.

## Índice general

Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos .....	v
Resumen.....	xvi
Abstract .....	xvii
Introducción .....	1
Capítulo I.....	2
Generalidades.....	2
1.1.  Ubicación y accesibilidad .....	2
1.1.1 Ubicación .....	2
1.1.2 Accesibilidad.....	3
1.2.  Clima, vegetación y fauna.....	3
1.2.1 Clima.....	3
1.2.2 Vegetación.....	4
1.2.3 Fauna .....	4
Capítulo II .....	5
Descripción del proyecto.....	5
2.1.  Planteamiento del Problema.....	5
2.2.  Formulación del problema .....	6
2.2.1.  Problema General .....	6
2.2.2.  Problemas Específicos.....	6
2.3.  Objetivos .....	7
2.3.1.  Objetivo General .....	7
2.3.2.  Objetivos Específicos .....	7
2.4.  Hipótesis.....	8
2.4.1.  Hipótesis General .....	8
2.4.2.  Hipótesis Específicas.....	8
2.5.  Variables e Indicadores .....	8

2.5.1. Independiente .....	8
2.5.2. Dependiente .....	9
2.6. Justificación de la Investigación .....	9
2.7. Alcances .....	10
2.8. Matriz de Consistencia .....	10
2.9. Matriz de Operacionalización .....	11
Capítulo III .....	12
Marco teórico .....	12
3.1. Antecedentes .....	12
3.2. Bases teóricas .....	14
3.2.1. Mecánica de Rocas .....	14
3.2.2. Macizos Rocosos .....	15
3.2.3. Discontinuidades .....	24
3.2.4. Aceptabilidad en mediciones de discontinuidades .....	30
3.2.5. Programa Dips .....	33
3.2.6. Proyección Estereográfica .....	33
3.2.7. Fotogrametría .....	35
3.2.8. Procesamiento de Imágenes .....	46
3.2.9. Análisis estadístico .....	46
3.3. Marco conceptual .....	52
Capítulo IV .....	53
Marco geológico .....	53
4.1. Geomorfología Regional .....	53
4.1.1. Ladera oeste de la Cordillera Occidental .....	53
4.1.2. Planicie costanera .....	54
4.1.3. Superficie Huaylillas .....	54
4.1.4. Valles y terrazas .....	55
4.2. Geología Regional .....	57

4.3.	Estratigrafía Regional.....	59
4.4.	Estructuras tectónicas regionales .....	62
4.5.	Geomorfología Local .....	66
4.5.1.	Drenaje .....	66
4.5.2.	Unidades morfológicas.....	66
4.6.	Geología local .....	70
4.7.	Estratigrafía Local.....	72
4.7.1.	Formación Socosani .....	72
4.7.2.	Formación Moquegua.....	72
4.7.3.	Depósitos de ceniza .....	73
4.7.4.	Depósitos aluviales.....	73
4.7.5.	Super Unidad Yarabamba.....	74
4.8.	Estructuras tectónicas locales.....	76
	Capítulo V.....	77
	Marco metodológico .....	77
5.1.	Trabajos previos .....	77
5.2.	Trabajo de Campo .....	77
5.2.1.	Mapeo Geológico .....	77
5.2.2.	Levantamiento de discontinuidades .....	77
5.2.3.	Levantamiento con Dron .....	78
5.3.	Trabajo de Gabinete .....	81
5.3.1.	Generación de mapas geológicos .....	81
5.3.2.	Revisión y digitalización de data manual de discontinuidades .....	81
5.3.3.	Adquisición de imagen con Dron.....	82
5.3.4.	Análisis estereográfico con Dips.....	85
5.3.5.	Criterios de confiabilidad de mediciones de discontinuidades.....	86
5.3.6.	Criterios estadísticos para evaluar correlación .....	87
	Capítulo VI.....	91

Procesamiento y cálculos .....	91
6.1. Mapeo Geológico .....	91
6.2. Levantamiento manual de discontinuidades .....	91
6.2.1. Procesamiento de discontinuidades manuales en DIPS .....	101
6.3. Levantamiento con Dron.....	105
6.3.1. Vuelo del Dron para toma de imágenes .....	105
6.3.2. Generación de superficie y procesamiento de imagen .....	110
6.3.3. Procesamiento de discontinuidades en Point Studio .....	114
6.3.4. Procesamiento de discontinuidades en Dips .....	133
Capítulo VII .....	136
Análisis e interpretación de resultados.....	136
7.1. Mapeo Geológico .....	136
7.1.1 Mapeo Local.....	136
7.1.2. Mapeo de Talud a detalle .....	154
7.2. Levantamiento de discontinuidades .....	159
7.3. Medición con dron.....	162
7.4. Comparativa de método Manual vs método Digital .....	163
7.4.1. Validación estructural con puntos de control .....	163
7.4.2. Validación espacial - Superposición de familias equivalentes.....	166
7.4.3. Diagrama Roseta .....	169
7.4.4. Análisis Gráfico.....	174
7.5. Análisis estadístico.....	177
7.5.1. Validación por regresión lineal y coeficiente de determinación ( $R^2$ )....	177
7.5.2. Validación con el método Monte Carlo.....	180
Conclusiones .....	184
Recomendaciones.....	186
Referencias bibliográficas .....	187
Anexos .....	193

Anexo 1 .....	194
Matriz de consistencia y operacionalización.....	194
Anexo 2 .....	204
Planos .....	204
Anexo 3 .....	214
Galería fotográfica .....	214
Anexo 4.....	225
Codificación MatLab .....	225

## Índice de tablas

Tabla 1 <i>Tipos de discontinuidades</i> .....	25
Tabla 2 <i>Especificaciones de equipos para fotogrametría</i> .....	41
Tabla 3 <i>Parámetros de interpretación</i> .....	47
Tabla 4 <i>Parámetros para el vuelo con dron</i> .....	79
Tabla 5 <i>Umbrales de interpretación práctica</i> .....	90
Tabla 6 <i>Orientaciones de las discontinuidades obtenidos de campo familia 1</i> ...	92
Tabla 7 <i>Orientaciones de las discontinuidades obtenidos de campo familia2</i> ....	94
Tabla 8 <i>Orientaciones de las discontinuidades obtenidos de campo familia3</i> ....	95
Tabla 9 <i>Orientaciones de las discontinuidades obtenidos de campo familia4</i> ....	97
Tabla 10 <i>Orientaciones de las discontinuidades obtenidos de campo familia5</i> ...	99
Tabla 11 <i>Orientaciones de las discontinuidades obtenidas de campo sin correlación</i> .....	99
Tabla 12 <i>Datos agrupados por familias</i> .....	105
Tabla 13 <i>Orientaciones de la primera familia de discontinuidades obtenidas por el dron</i> .....	121
Tabla 14 <i>Orientaciones de la segunda familia de discontinuidades obtenidas por el dron</i> .....	123
Tabla 15 <i>Orientaciones de la tercera familia de discontinuidades obtenidas por el dron</i> .....	126
Tabla 16 <i>Orientaciones de la cuarta familia de discontinuidades obtenidas por el dron</i> .....	129
Tabla 17 <i>Orientaciones de la quinta familia de discontinuidades obtenidas por el dron</i> .....	131
Tabla 18 <i>Familias de discontinuidades con datos tomadas con el Drone</i> .....	135
Tabla 19 <i>Estaciones y Contactos geológicos</i> .....	136
Tabla 20 <i>Comparación de Dip en puntos de control</i> .....	164
Tabla 21 <i>Comparación de Dip Direction en puntos de control</i> .....	165

Tabla 22 <i>Comparación de valores promedios Dip/DipDirection</i> .....	167
Tabla 23 <i>Diferencias en Dip/DipDirection por familia</i> .....	168
Tabla 24 <i>Conversión de DipDirection a Azimut por familia</i> .....	170
Tabla 25 <i>Diferencias en Azimut por familia</i> .....	171
Tabla 26 <i>Valores Dip/DipDirection, manual y digital</i> .....	177
Tabla 27 <i>Resultados DIP</i> .....	180
Tabla 28 <i>Resultados DIP DIRECTION</i> .....	182

## Índices de Figuras

Figura 1 <i>Área de estudio</i> .....	2
Figura 2 <i>Subdivisión en un macizo rocoso</i> .....	17
Figura 3 <i>Factores hidrogeológicos intervinientes en un macizo rocoso</i> .....	20
Figura 4 <i>Factores tectónicos que afectan a un macizo rocoso</i> .....	21
Figura 5 <i>Rotura planar en un talud</i> .....	22
Figura 6 <i>Rotura en cuña en un talud</i> .....	23
Figura 7 <i>Tipos de rotura por vuelco en un talud</i> .....	23
Figura 8 <i>Elementos que definen la orientación de una discontinuidad</i> .....	26
Figura 9 <i>Esquema de los parámetros de las discontinuidades en un macizo rocoso</i> .....	29
Figura 10 <i>Representación de un plano y su polo en una proyección estereográfica</i> .....	34
Figura 11 <i>Diagrama de fotografías consecutivas con sobreposición</i> .....	43
Figura 12 <i>Esquema del plan de vuelo de un levantamiento fotogramétrico</i> .....	44
Figura 13 <i>Mapa de unidades geomorfológicas</i> .....	56
Figura 14 <i>Mapa geológico regional de Pachía</i> .....	58
Figura 15 <i>Columna Estratigráfica regional</i> .....	61
Figura 16 <i>Mapa de sistemas de fallas y lineamientos de Pachía y Palca</i> .....	65
Figura 17 <i>Mapa geomorfológico local</i> .....	69
Figura 18 <i>Mapa geológico local</i> .....	71
Figura 19 <i>Columna estratigráfica local</i> .....	75
Figura 20 <i>Esquema del plan de vuelo de un levantamiento fotogramétrico</i> .....	80
Figura 21 <i>Metodología de trabajo con Dron</i> .....	82
Figura 22 <i>Metodología del procesamiento de la imagen obtenida por el dron</i> .....	84
Figura 23 <i>Metodología de trabajo en Point Studio</i> .....	85
Figura 24 <i>Metodología de trabajo en DIPS</i> .....	86
Figura 25 <i>Levantamiento de discontinuidades manualmente</i> .....	100

Figura 26 <i>Importación de datos de discontinuidades en DIPS</i> .....	102
Figura 27 <i>Procesamiento de datos con proyecciones estereográficas</i> .....	103
Figura 28 <i>Desarrollo de proyecciones estereográficas</i> .....	104
Figura 29 <i>Calibración de drone</i> .....	106
Figura 30 <i>Punto topográfico</i> .....	106
Figura 31 <i>Equipo D-RTK2-DJI</i> .....	107
Figura 32 <i>Ajuste de equipo D-RTK2-DJI</i> .....	107
Figura 33 <i>Pre vuelo</i> .....	108
Figura 34 <i>Diseño de vuelo</i> .....	109
Figura 35 <i>Imagen de pre vuelo</i> .....	109
Figura 36 <i>Imagen de vuelo</i> .....	110
Figura 37 <i>Nube de puntos tridimensional</i> .....	111
Figura 38 <i>Curvas de nivel</i> .....	112
Figura 39 <i>Imagen tridimensional</i> .....	113
Figura 40 <i>Trazado manual de discontinuidad</i> .....	114
Figura 41 <i>Generación de 1 set de discontinuidad</i> .....	115
Figura 42 <i>Distribución de discontinuidades por familias</i> .....	116
Figura 43 <i>Planos aparentes generados en laderas Nota. Elaboración propia</i> ....	117
Figura 44 <i>Planos aparentes generados en material deslizado</i> .....	117
Figura 45 <i>Planos aparentes generados en zonas de baja resolución</i> .....	118
Figura 46 <i>Planos aparentes generados en zonas de baja resolución</i> .....	118
Figura 47 <i>Archivo csv exportado del Point Studio</i> .....	119
Figura 48 <i>Estereograma con las discontinuidades generadas en Point Studio</i> ...	120
Figura 49 <i>Estereograma generados con datos totales de familias</i> .....	134
Figura 50 <i>Plano de estaciones de mapeo</i> .....	137
Figura 51 <i>Identificación en campo de Estrato de Arenisca(E1)</i> .....	138
Figura 52 <i>Identificación en campo de Estrato de Arenisca(E2)</i> .....	140
Figura 53 <i>Contacto entre Toba(izquierda) y Arenisca(derecha), C1</i> .....	141

Figura 54	<i>Contacto entre Arenisca(izquierda) y Toba(derecha), C2</i>	143
Figura 55	<i>Identificación en campo de Estrato de Arenisca(E3)</i>	145
Figura 56	<i>Contacto entre conglomerado (izquierda) y Arenisca (derecha), C3</i>	146
Figura 57	<i>Afloramiento de toba volcánica consolidada</i>	147
Figura 58	<i>Contacto entre Toba (izquierda) y conglomerado (derecha), C4</i>	148
Figura 59	<i>Geomorfología local</i>	149
Figura 60	<i>Interpretación de Estructuras regionales</i>	150
Figura 61	<i>Falla principal en zona de estudio</i>	151
Figura 62	<i>Interpretación de Estructuras locales de la zona de estudio</i>	153
Figura 63	<i>Geología a detalle del talud</i>	154
Figura 64	<i>Fallas principales en talud de zona de estudio</i>	156
Figura 65	<i>Fallas principales F1 y F2 en talud de zona de estudio</i>	157
Figura 66	<i>Falla F3 en talud de zona de estudio</i>	158
Figura 67	<i>Falla principal F4 y secundarias</i>	159
Figura 68	<i>Familias resultantes en proyección estereográfica en DIPS</i>	160
Figura 69	<i>Toma de puntos de control manual y digital</i>	166
Figura 70	<i>Diferencias en Dip/DipDirection por familia</i>	168
Figura 71	<i>Datos de azimuth manuales (izquierda) y digitales (derecha), por familia</i>	171
Figura 72	<i>Interpretación de azimuth de estructuras principales versus diagrama roseta</i>	173
Figura 73	<i>Comparación Visual de Familia data manual(superior) – data digital (inferior)</i>	175
Figura 74	<i>Gráfica de regresión lineal Dip</i>	178
Figura 75	<i>De regresión lineal DipDirection</i>	178
Figura 76	<i>Histograma de resultados DIP</i>	181
Figura 77	<i>Histograma resultados DIPDIRECTION</i>	183

## Resumen

En el presente trabajo se desarrolló una metodología para el levantamiento de orientación de discontinuidades en taludes rocosos mediante el uso de fotogrametría aérea con drones, aplicándolo en la bocatoma Chuschuco, ubicada en la región de Tacna, Perú. El estudio comprendió el reconocimiento geológico, geomorfológico y estructural del área, así como el mapeo geomecánico de campo y la identificación de familias estructurales. Se realizaron vuelos fotogramétricos con drones para la captura de imágenes de alta resolución (2cm), las cuales fueron procesadas con software especializado para generar nubes de puntos y modelos digitales del terreno. A partir de estos modelos se extrajo información estructural (dip y dip direction), la cual fue comparada con mediciones manuales realizadas en los primeros tres metros del talud. Los resultados mostraron una alta concordancia en la orientación y sentido de las principales estructuras identificadas en ambos métodos, validando el uso de tecnologías fotogramétricas como herramienta confiable y precisa para el análisis estructural de taludes de roca. Este enfoque representa una alternativa eficiente para zonas de difícil acceso y aporta significativamente a los estudios geotécnicos aplicados a obras hidráulicas y mineras.

*Palabras claves:* fotogrametría aérea, dron, talud rocoso, discontinuidades, orientación, modelo digital.

## **Abstract**

In this work, a methodology was developed for surveying the orientation of discontinuities in rock slopes using aerial photogrammetry with drones, applying it to the Chuschuco intake, located in the Tacna region of Peru. The study included geological, geomorphological, and structural reconnaissance of the area, as well as field geomechanical mapping and the identification of structural families. Photogrammetric flights with drones were carried out to capture high-resolution (2 cm) images, which were processed with specialized software to generate point clouds and digital terrain models. From these models, structural information (dip and dip direction) was extracted and compared with manual measurements taken in the first three meters of the slope. The results showed high agreement in the orientation and direction of the main structures identified in both methods, validating the use of photogrammetric technologies as a reliable and accurate tool for the structural analysis of rock slopes. This approach represents an efficient alternative for areas of difficult access and contributes significantly to geotechnical studies applied to hydraulic and mining works.

*Keywords:* aerial photogrammetry, drone, rock slope, discontinuities, orientation, digital model.

## **Introducción**

El análisis estructural de taludes rocosos es fundamental en proyectos de ingeniería geotécnica, minera, civil e hidráulica, ya que las discontinuidades del macizo rocoso controlan la estabilidad del terreno y, por ende, la seguridad de las infraestructuras asociadas. Tradicionalmente, la recopilación de datos estructurales se ha realizado mediante métodos manuales in situ, los cuales pueden presentar limitaciones de acceso, tiempo, cobertura y seguridad en zonas de difícil ingreso o con altos ángulos de inclinación.

En este contexto, el desarrollo de tecnologías como la fotogrametría aérea mediante drones ha revolucionado la forma en que se recolecta y analiza información geoespacial. Esta técnica permite capturar imágenes de alta resolución y generar modelos tridimensionales del terreno que, procesados adecuadamente, pueden ofrecer datos precisos sobre la orientación de discontinuidades y la geometría del macizo rocoso.

La presente tesis tiene como objetivo aplicar esta tecnología para el levantamiento estructural de los taludes rocosos en la bocatoma Chuschuco, contribuyendo con una metodología validada para el análisis estructural remoto. El trabajo incluye el reconocimiento geológico y geomecánico del área, la generación de modelos digitales, la extracción de datos estructurales y la validación de estos mediante su comparación con mediciones de campo. Finalmente, se evalúa la confiabilidad de la técnica y su aplicabilidad en proyectos geotécnicos reales.

# Capítulo I

## Generalidades

### 1.1. Ubicación y accesibilidad

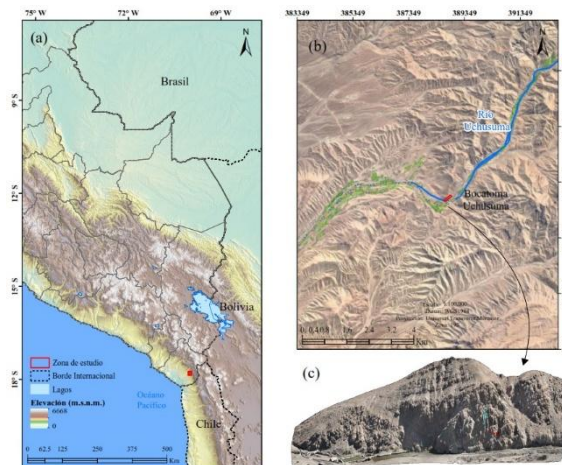
#### 1.1.1 Ubicación

La zona en estudio se encuentra ubicada en el distrito de Pachía, región de Tacna y provincia de Tacna, a una altitud de 1569 msnm. Como se puede apreciar en la Figura 1, geográficamente la zona se encuentra delimitada por las siguientes coordenadas UTM WGS 84 – Zona 19S.

Coordenadas: E: 388744,00 ; N:8018953,00 Elevación: 1569 m.s.n.m

**Figura 1**

*Área de estudio*



 <b>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN</b> <b>TACNA</b> FACULTAD DE ING. CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica - Geotecnia			
Tesis: <b>LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA: BOCATOMA CHUSCHUCO-PACHIA-TACNA</b>			
Plano: <b>MAPA DE UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>			
Escala de trabajo: 1:100,000	Fecha: Junio 2025	Aprobado : ING. JONATHAN ZAVALETA CURASI	N°
Sistema de Coordenadas: UTM - WGS84 - 19S	Elaborado por: R. Rojas Pilco	Revisor: ING. JONATHAN ZAVALETA CURASI	<b>UB- 01</b>

*Nota. Mapas de ubicación de zona de estudio, mostrando la vista regional, local y del talud de estudio. Elaboración propia.*

### **1.1.2 Accesibilidad**

El recorrido hacia la bocatoma Chuschuco se realiza desde Tacna, teniendo dos vías de acceso aledañas a esta. El primer acceso es subiendo por la Av. Tarapacá tomando el desvío por la vía TA-614, llegando a los reservorios de Cerro Blanco por la vía asfaltada en un trayecto de aproximadamente de 8km, para luego pasar a una vía de camino afirmado con un pequeño mantenimiento, conectando con la garita de vigilancia del canal Uchusuma hasta llegar a la bocatoma Chuschuco realizando un recorrido final aproximadamente de 16km (45 minutos) en camioneta.

El segundo acceso es siguiendo la vía Tacna-Pachía hasta llegar al desvío carretera Pachía-Palca, haciendo el recorrido de la carretera hacia Palca hasta el punto del complejo Miculla donde hay un desvío de trocha carrozable. Desde allí se continúa aproximadamente 15km hasta la bocatoma Chuschuco (45 min).

## **1.2. Clima, vegetación y fauna**

### **1.2.1 Clima**

La zona de estudio presenta un clima semiárido de altura, característico de la región andina del sur peruano. Las temperaturas oscilan entre los 20 °C y 25 °C durante el día en verano, y entre 15 °C y 20 °C en invierno, con descensos nocturnos que pueden llegar a 5 °C o menos. Las precipitaciones son escasas, concentradas principalmente entre enero y marzo, y la humedad relativa es baja durante gran parte del año. Estas condiciones favorecen actividades agrícolas bajo riego, pero limitan el desarrollo de vegetación natural densa (Senamhi, 2023).

### **1.2.2 Vegetación**

La vegetación en la bocatoma Chuschuco, corresponde a un ecosistema semiárido altoandino, caracterizado por especies adaptadas a condiciones de baja humedad, suelos pobres y radiación solar intensa. Predominan las especies xerófilas y arbustivas dispersas, como la tola (*Parastrephia* spp.), el ichu (*Stipa ichu*) y la chillihua (*Festuca dolichophylla*), que son comunes en zonas de puna seca. Estas plantas presentan adaptaciones morfológicas como hojas pequeñas, raíces profundas y estructuras que minimizan la pérdida de agua.

En las zonas cercanas al río Uchusuma, donde se encuentra la bocatoma, se observa vegetación ribereña más densa, con especies hidrófilas como el sauce (*Salix* spp.) y el carrizo, que prosperan en ambientes húmedos y son favorecidas por las actividades de riego agrícola. (MINAM, 2021).

### **1.2.3 Fauna**

La fauna del distrito de Pachía y sus alrededores, incluyendo la bocatoma Chuschuco, está compuesta por especies propias de ecosistemas altoandinos y semiáridos. Entre los mamíferos más representativos se encuentran el gato andino (*Leopardus jacobita*), el zorro costeño (*Lycalopex sechurae*) y las chinchillas (*Chinchilla lanigera*), todos adaptados a terrenos rocosos y climas extremos. También se reporta la presencia de guanacos (*Lama guanicoe*) en zonas más elevadas y abiertas.

En cuanto a aves, destacan el suri (*Rhea pennata*), el águila mora (*Geranoaetus melanoleucus*) y diversas especies de colibríes y passeriformes que habitan los matorrales y quebradas. Estas especies cumplen funciones ecológicas importantes como control de plagas, dispersión de semillas y equilibrio de cadenas tróficas (LIFEDER, 2025).

## Capítulo II

### Descripción del proyecto

#### 2.1. Planteamiento del Problema

El presente proyecto corresponde a un talud natural de 10 m a 50 m de macizo rocoso expuesto que se encuentra ubicado en el lateral derecho, aguas arriba de la bocatoma Chuschuco, la cual constituye una importante infraestructura ya que tiene un caudal de captación de  $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$  con una avenida máxima de  $9.8 \text{ m}^3/\text{s}$ , esta bocatoma capta el agua trasvasada de las cuencas del río Maure, Caño y Uchusuma que son conducidas por el cauce natural de la quebrada Vilavilani para ser captadas en Chuschuco, desde donde son conducidas a través del canal de derivación Uchusuma bajo hasta el repartidor Cerro Blanco donde se distribuye a los subsectores hidráulicos de las comisiones Uchusuma, Magollo y a la Entidad Prestadora de Servicio (EPS) Tacna. En el caso de riego, beneficia a 472 usuarios y en el agua poblacional a 91,677 conexiones totales de agua potable.

El problema radica en la cercanía de la bocatoma al talud expuesto en su lateral el cual podría presentar posibles riesgos geotécnicos como deslizamiento, desprendimiento de rocas de menor hasta grandes volúmenes de rocas en masa pudiendo llegar a obstruir el ingreso del caudal del río y/o inhabilitar la bocatoma, provocando así el desabastecimiento de agua de las zonas mencionadas ocasionando posibles problemas de colmatación, arenamiento y daños severos a la infraestructura.

Los métodos tradicionales de medición de la orientación de estructuras en taludes de roca requieren una gran cantidad de tiempo y recursos, además del riesgo para la seguridad de los trabajadores en campo y de la limitación del análisis a, aproximadamente, 3 m de altura en los taludes.

En la presente tesis se propone hacer uso de la tecnología de drones y de la fotogrametría aérea para obtener la información necesaria y detallada, y así poder realizar el levantamiento de las orientaciones de las discontinuidades del talud en toda su extensión, de 0 a 15 m de altura. Por lo tanto, surge la pregunta: ¿Es posible utilizar la tecnología de drones y la fotogrametría para realizar el levantamiento de orientaciones de discontinuidades en taludes de roca de manera eficiente y segura?

## **2.2. Formulación del problema**

### **2.2.1. Problema General**

¿Es posible realizar un levantamiento preciso y eficiente de orientaciones de discontinuidades en taludes de roca de la bocatoma Chuschuco-Pachia-Tacna, utilizando tecnología de drones y fotogrametría?

### **2.2.2. Problemas Específicos**

- a) ¿Cómo realizar la medición de los datos de orientación buzamiento y dirección de buzamiento de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso con imágenes tomadas de un drone?
- b) ¿Cuál es el procedimiento para obtener imágenes aéreas de calidad y procesarlas correctamente para generar modelos digitales de talud usando drones y fotogrametría?
- c) ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones del uso de drones frente a los métodos tradicionales de levantamiento de discontinuidades?
- d) ¿Qué grado de confiabilidad presentan los datos orientaciones de discontinuidades obtenidos mediante modelos digitales en comparación con datos manuales?
- e) ¿Qué estudios previos son necesarios para determinar el contexto geológico y estructural de la zona de estudio?

## **2.3. Objetivos**

### **2.3.1. *Objetivo General***

Realizar el levantamiento de orientaciones de discontinuidades con uso de dron en taludes de roca de la bocatoma Chuschuco-Pachía-Tacna.

### **2.3.2. *Objetivos Específicos***

- a) Realizar la medición de los datos de orientación de buzamiento y dirección de buzamiento de las principales discontinuidades presentes en el macizo rocoso mediante el uso de imágenes tomadas de un dron.
- b) Capturar imágenes aéreas de alta resolución mediante vuelos controlados con drones y procesarlas con software especializados para generar nube de puntos y modelos digitales del terreno.
- c) Evaluar las ventajas y limitaciones del uso de drones y la fotogrametría en comparación con métodos tradicionales para el levantamiento de discontinuidades.
- d) Validar la confiabilidad de los datos digitales de orientaciones de discontinuidades en comparación con las mediciones manuales en los primeros 3 metros de altura del talud.
- e) Realizar el reconocimiento geológico, geomorfológico y estructural del área de estudio mediante la elaboración de mapas temáticos que establezcan el contexto geológico y estructural.

## **2.4. Hipótesis**

### **2.4.1. *Hipótesis General***

La aplicación de tecnología de fotogrametría y drones permite realizar un levantamiento eficiente, seguro y preciso de las orientaciones de discontinuidades en taludes de roca de la bocatoma Chuscuco-Pachía-Tacna.

### **2.4.2. *Hipótesis Específicas***

- a) Las imágenes tomadas de un dron permiten realizar la medición de los datos de orientación de buzamiento y dirección de buzamiento de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso.
- b) Las imágenes aéreas capturadas con drones, procesadas mediante software especializado, permiten generar modelos digitales precisos para el levantamiento estructural.
- c) El uso de drones y fotogrametría constituye una alternativa más eficiente, segura y con mayor alcance vertical que los métodos tradicionales.
- d) Los datos de orientación de discontinuidades obtenidos digitalmente presentan alta concordancia y confiabilidad con mediciones manuales.
- e) El contexto geológico y estructural puede determinarse adecuadamente mediante mapeo geomorfológico, geológico y estructural del área de estudio.

## **2.5. Variables e Indicadores**

### **2.5.1. *Independiente***

Imágenes obtenidas con el uso de drones y fotogrametría.

### **Indicadores**

- Calidad de la cámara y resolución de la imagen
- Altitud y ángulo de la toma de las fotografías aéreas
- Softwares utilizados para procesar imágenes.
- Condiciones climáticas durante el vuelo del dron (viento, lluvia, niebla, etc.)

#### **2.5.2. Dependiente**

Levantamiento de las orientaciones de las discontinuidades en taludes de roca.

### **Indicadores**

- Medición Buzamiento y dirección de buzamiento de las estructuras principales y secundarias en el talud.
- Identificación de la presencia y tipo de discontinuidades- estructuras en el talud.
- Uso de softwares o filtros adecuados para identificar de esfuerzos principales y secundarios con estereogramas y determinar los tipos de roturas presentes en el talud.

#### **2.6. Justificación de la Investigación**

La investigación busca demostrar que la tecnología de drones y la fotogrametría es una herramienta eficaz y segura para realizar el levantamiento de la orientación de estructuras en taludes de roca, lo que permitirá obtener resultados precisos y fiables en menor tiempo que los métodos tradicionales y con un mayor alcance, ya que posibilita una mayor cobertura y precisión en taludes superiores a 3 m, que es el límite máximo en el que se puede realizar un levantamiento de discontinuidades de manera convencional y detallada.

Además, esta tecnología puede reducir el riesgo de accidentes laborales y disminuir el costo de los estudios geotécnicos en los sectores minero y de construcción.

Adicionalmente, actualmente no existe una metodología específica para optimizar el uso de drones en el levantamiento de orientaciones de discontinuidades, incluida la selección de sensores, la interpretación de los datos obtenidos y la aplicación de los programas informáticos adecuados para la investigación.

## **2.7. Alcances**

La presente investigación se enfocará en el uso de drones y de la fotogrametría para el levantamiento de las orientaciones de las discontinuidades de los taludes de roca de la bocatoma Chuschuco.

El estudio se centrará en el levantamiento de las orientaciones de las discontinuidades en taludes de roca. Cabe destacar que esta investigación no incluirá la determinación de la estabilidad del talud de roca ni el análisis cinemático.

La investigación se llevará a cabo en un área de estudio específica, y los resultados pueden no ser generalizables a otras áreas.

Se utilizarán sensores específicos con una resolución determinada en los drones para la captura de datos, y los resultados pueden no ser aplicables a otros tipos de sensores o resoluciones.

## **2.8. Matriz de Consistencia**

La presente investigación se sustenta en una matriz de consistencia que articula de manera lógica y coherente el problema, los objetivos, las hipótesis, las variables e indicadores del estudio.

La matriz ha sido elaborada considerando el enfoque cuantitativo del estudio, orientado a validar la precisión del levantamiento digital de orientaciones de discontinuidades en taludes de roca mediante el uso de drones y fotogrametría. En ella se identifican las variables independientes y dependientes, así como sus respectivos indicadores técnicos, que serán evaluados a través de mediciones estructurales y análisis comparativos. La tabla completa de la matriz de consistencia se presenta en el Anexo 1.

## **2.9. Matriz de Operacionalización**

La matriz de operacionalización desarrollada permite descomponer las variables planteadas en componentes observables y medibles, facilitando su aplicación práctica durante el trabajo de campo y el procesamiento digital. Esta herramienta metodológica traduce las variables independientes y dependientes en indicadores específicos, definiendo además las técnicas e instrumentos que serán utilizados para su medición.

En el caso de la variable independiente —imágenes obtenidas mediante drones y fotogrametría— se han considerado indicadores como la resolución de imagen, altitud de vuelo, ángulo de toma y condiciones climáticas, los cuales inciden directamente en la calidad del modelo digital generado. Para la variable dependiente —levantamiento de orientaciones de discontinuidades— se han definido indicadores como el buzamiento, dirección de buzamiento, tipo de discontinuidad y análisis estructural mediante estereogramas. La tabla completa de la matriz de consistencia se presenta en el Anexo 1.

## Capítulo III

### Marco teórico

#### 3.1. Antecedentes

La fotogrametría ha demostrado ser una herramienta eficaz en la medición y el análisis de datos topográficos en distintas áreas, incluida la geotecnia. Con el desarrollo de la tecnología de drones equipados con cámaras de alta resolución y GPS, ha surgido una nueva forma de recopilar datos topográficos con mayor precisión y eficiencia.

En el campo de la geotecnia se ha utilizado la fotogrametría y el levantamiento de las orientaciones de las discontinuidades de roca para evaluar la estabilidad de los taludes y prevenir deslizamientos. Varios estudios han demostrado la viabilidad de utilizar drones para la recopilación de datos topográficos y la creación de modelos en 3D como herramienta complementaria al análisis cinemático en taludes de roca.

En la literatura existen diversos estudios que muestran el uso de drones en la evaluación de taludes. Manfreda et al. (2018) utilizaron un dron para la adquisición de imágenes en un talud de arcilla. El estudio demostró que el uso de drones permitió la obtención de información más detallada y precisa del talud, lo que mejoró la comprensión de su comportamiento.

Muriel et al. (2019) utilizaron un dron para el monitoreo de un talud de roca. El estudio demostró que el uso de drones permitió una evaluación más segura y eficaz del talud y que la información obtenida mediante la técnica de análisis cinemático permitió predecir el comportamiento del talud a corto y largo plazo.

Chong et al. (2017) utilizaron un dron equipado con una cámara de alta resolución para analizar la estabilidad de un talud en Malasia. Los resultados obtenidos permitieron identificar los principales factores que afectan la estabilidad del talud y proponer medidas preventivas para evitar su colapso.

Acosta et al. (2019) utilizaron un dron equipado con un sensor LIDAR para analizar la deformación de un talud en una mina de oro en Colombia. Los resultados obtenidos permitieron identificar las zonas críticas del talud y proponer medidas correctivas para evitar la propagación de la deformación.

Existen algunas investigaciones realizadas en el Perú sobre el uso de drones y fotogrametría en geotecnia:

Palomino (2018). Uso de drones para el monitoreo y análisis de la estabilidad de taludes. El estudio se centró en la utilización de drones y cámaras de alta resolución para el monitoreo y análisis de la estabilidad de taludes en la Carretera Central del Perú. El estudio incluyó la instalación de sensores en el talud para medir la deformación y la presión de agua, lo que permitió monitorear la estabilidad del talud en tiempo real. Se compararon los resultados obtenidos mediante la metodología tradicional de monitoreo con los obtenidos con la tecnología de drones y se demostró que el uso de drones es una herramienta eficaz para el monitoreo y análisis de la estabilidad de taludes.

Villanueva et al. (2019). Aplicación de la fotogrametría con drones en la evaluación de taludes de carreteras. Se utilizaron drones equipados con cámaras fotográficas de alta resolución para la evaluación de la estabilidad de taludes de carreteras en la región de Arequipa, Perú. La técnica de fotogrametría, que consiste en la toma de fotografías aéreas para generar modelos en 3D de las áreas de interés, fue empleada para la obtención de datos precisos y detallados de los taludes.

Ipanaqué (2019). Uso de drones para el monitoreo y análisis de la estabilidad de taludes en zonas urbanas.

El estudio se enfocó en el uso de drones para el monitoreo y análisis de la estabilidad de taludes en zonas urbanas de Lima, Perú. El objetivo principal de la investigación fue evaluar la eficacia del uso de drones en la detección de cambios en la geometría y estabilidad de los taludes urbanos. Se lograron detectar cambios en la geometría de los taludes y se identificaron zonas de riesgo de deslizamiento. Además, se destacó la ventaja de la rapidez y la eficiencia en la recolección de datos en comparación con los métodos tradicionales.

Salazar (2019). Evaluación de la estabilidad de taludes utilizando fotogrametría con drones.

El estudio se centró en la evaluación de la estabilidad de taludes utilizando fotogrametría con drones en la mina Cerro Verde, en Arequipa. Los resultados del estudio demostraron que la fotogrametría con drones es una herramienta efectiva para la evaluación de la estabilidad de taludes en una mina y puede ayudar a prevenir accidentes y mejorar la seguridad en la industria minera.

## **3.2. Bases teóricas**

### **3.2.1. *Mecánica de Rocas***

La mecánica de rocas es una rama de la geomecánica que estudia el comportamiento mecánico de las rocas y su interacción con las estructuras geotécnicas y el medio ambiente. Se basa en los principios de la mecánica clásica y utiliza herramientas matemáticas y experimentales para estudiar la deformación, la falla y la resistencia de las rocas.

La mecánica de rocas engloba el estudio de las propiedades físico-mecánicas de los materiales rocosos y de su respuesta a la acción de fuerzas aplicadas en su entorno físico (González et al. 2002).

### **3.2.2. Macizos Rocosos**

De acuerdo con González et al. (2002), “Macizo rocoso” es el conjunto de los bloques de matriz rocosa y de discontinuidades o planos de debilidad de diverso tipo que afectan al medio rocoso.

#### **3.2.2.1. Caracterización de un Macizo**

El Área de Geotecnia del Laboratorio de la Universidad de Córdoba (2010) establece que existen tres factores que deben ser tomados en cuenta para llevar a cabo la caracterización de un macizo. Estos aspectos se describen a continuación:

- El tipo de roca del macizo rocoso
- La estructura de la masa de las rocas.
- Estado de conservación de la roca.

Además, existen tres etapas claves en la descripción del macizo roco:

#### **Descripción general del afloramiento y división en zonas**

Entre sus elementos se incluyen el tipo de trabajo, la fase de estudio, el elemento, el observador, la fecha y otros (Rodríguez, 2007).

Se tienen en cuenta los siguientes puntos:

- **Identificación del macizo rocoso**

Comprende la identificación de la litología, ubicación geográfica, nombre topográfico, localidad, ubicación geológica, edad y formación, estratificación, fallas, fracturas, etc. (Rodríguez, 2007).

- **Clasificación según varios criterios en áreas homogéneas**

Meteorización, fallas, brechas, litológicos, estructurales, hidrológicos, etc. (Rodríguez, 2007).

- **Registro visual de los afloramientos**

La descripción geológica general (geomorfología, litología, etc.), así como las estructuras fundamentales de diferenciación y las características fundamentales de cada zona (Rodríguez, 2007).

- **Una síntesis de cada zona**

La litología, la edad, meteorización, las fracturas, la presencia de agua, etc. Una visión general del macizo y una razón para su división en áreas (sin entrar en detalles sobre las discontinuidades o la matriz rocosa) (Rodríguez, 2007).

- **Identificación de áreas o estructuras lineales**

Su problema particular y su influencia en el comportamiento del macizo requieren un tratamiento específico que se tenga en cuenta: su impacto en el comportamiento geomecánico (Rodríguez, 2007).

### Descripción de cada una de las zonas

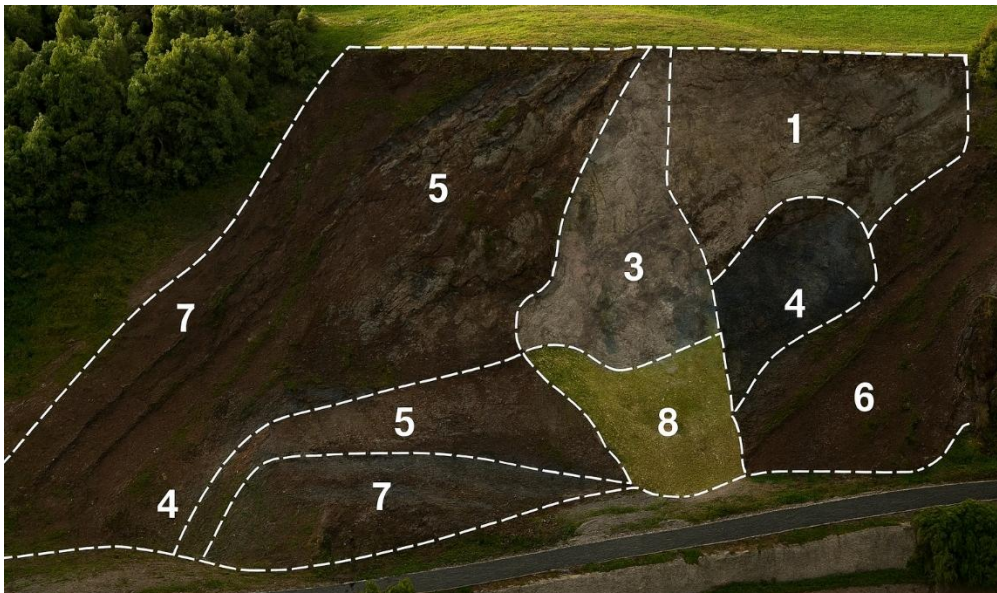
Un enfoque metódico es necesario para la recopilación de datos y debe presentarse en forma de ficha que incluya los siguientes elementos: proyecto, autor, fecha, ubicación, estación, planos, fotos, entre otros (Rodríguez, 2007).

Para que los resultados sean representativos del macizo, es crucial recopilar datos en varios puntos o estaciones de medición en áreas extensas (Rodríguez, 2007).

Parámetros relacionados con las discontinuidades y la matriz rocosa, como el número de familias de discontinuidades, su orientación y sus características, deben extraerse de estos datos (Rodríguez, 2007).

### Figura 2

*Subdivisión en un macizo rocoso*



*Nota.* Tomado de González y Martínez (2022a)

- **Matriz rocosa**

Es necesario orientar los esfuerzos para identificar la litología, sus atributos, potencia y ubicación geológica (formación, antigüedad); las formaciones superficiales, su morfología, espesor, textura y características; estructuras como fallas, pliegues, etc.; fracturas como juntas y el parámetro  $J_v$ ; la meteorización, dividida en seis categorías de niveles de meteorización; la resistencia, expresada en índices de campo de siete categorías junto con los valores R del esclerómetro; y la hidrogeología, medida en grados de humedad en cinco categorías, con el valor del caudal (Rodríguez, 2007)

- **Discontinuidades**

Se procede con la identificación, teniendo en cuenta la categoría del plano (estratificación: S0, esquistosidad: S1, juntas: J1, J2, fallas: F1, F2); cualidades como la orientación: buzamiento y dirección (valores); el espaciado en mm; la continuidad en metros según buzamiento y dirección; la rugosidad, donde es necesario definir categorías y tipos en cada categoría (existen tres clasificaciones por cada categoría); la apertura en mm; el relleno, indicando su naturaleza y composición, su espesor, grado de meteorización e incluyendo discontinuidades con o sin relleno en cuatro categorías; la resistencia de las paredes a la compresión mediante el valor del penetrómetro de bolsillo; y la resistencia al corte (medida cuantitativa) (Rodríguez, 2007).

### **Descripción y caracterización del macizo rocoso en su conjunto**

Se recopilan datos cualitativos y, cuando es factible, cuantitativos para describir un macizo rocoso. Por esta razón, los métodos de caracterización buscan, generalmente, obtener valores numéricos (Rodríguez, 2007).

Para medir esas características y obtener parámetros, se emplean tablas que establecen categorías (escalas con criterios y valores de referencia). La clasificación geomecánica de los macizos rocosos depende de estos parámetros (Rodríguez, 2007).

Para definir y caracterizar el macizo rocoso en su totalidad o en sus distintas partes, se proporcionan los siguientes parámetros:

- El número de familias que tienen discontinuidades
- Capacidad de resistencia
- Dimensiones del bloque
- Grado de fracturación
- Procesos de meteorización.

Es necesario examinar otros elementos que influyen en su comportamiento mecánico para realizar una caracterización completa del macizo:

- **Capacidad de deformación y resistencia**

Debido a su anisotropía y heterogeneidad, el proceso de determinar la resistencia de los macizos rocosos es complejo. Las características de la matriz rocosa y las discontinuidades presentes son fundamentales para esta resistencia. Es necesario realizar pruebas en el campo y ensayos en el laboratorio para obtener resultados representativos. En el control de la resistencia, las discontinuidades predominan en macizos con una matriz rocosa dura y resistente; en cambio, en macizos más blandos, la matriz juega un papel más importante. La resistencia del macizo, generalmente, es menor que la de la roca matriz (Rodríguez, 2007).

Para evaluar su impacto, es esencial reconocer los elementos que afectan la resistencia del macizo, como una familia particular de discontinuidades, la matriz o

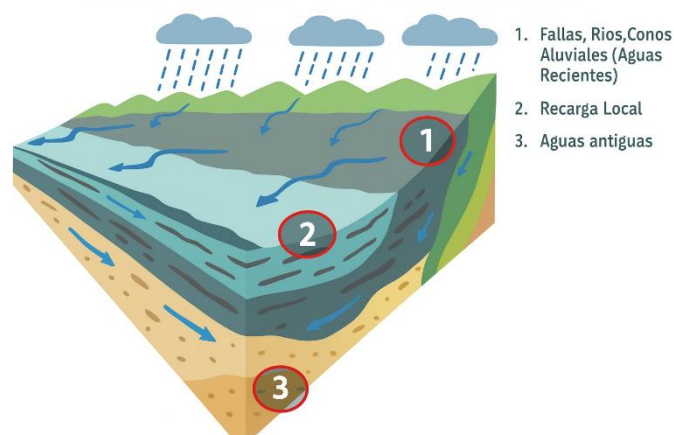
alguna singularidad, y proceder a su caracterización en el campo. Esto implica la determinación y el análisis de parámetros de acuerdo con criterios empíricos. Las clasificaciones geomecánicas brindan una perspectiva sobre la calidad del macizo y la resistencia general, aunque con frecuencia se basan en valores de resistencia a la compresión simple, que no siempre son los más representativos (Rodríguez, 2007).

- **El comportamiento hidrogeológico**

El comportamiento de los macizos rocosos se ve significativamente afectado por el contenido y el flujo de agua. Los niveles freáticos, las direcciones de flujo, las filtraciones y las surgencias son factores hidrogeológicos que deben ser considerados. También es crucial distinguir áreas específicas, como barreras o rutas preferidas para el agua, las cuales pueden incluir cavidades, diques, fracturas y capas de relleno arcilloso. Se requieren pruebas particulares para obtener información cuantitativa sobre factores como la porosidad, la permeabilidad, la transmisividad y los coeficientes de almacenamiento (Rodríguez, 2007).

### Figura 3

*Factores hidrogeológicos intervinientes en un macizo rocoso*



*Nota.* Tomado de González y Martínez (2022b).

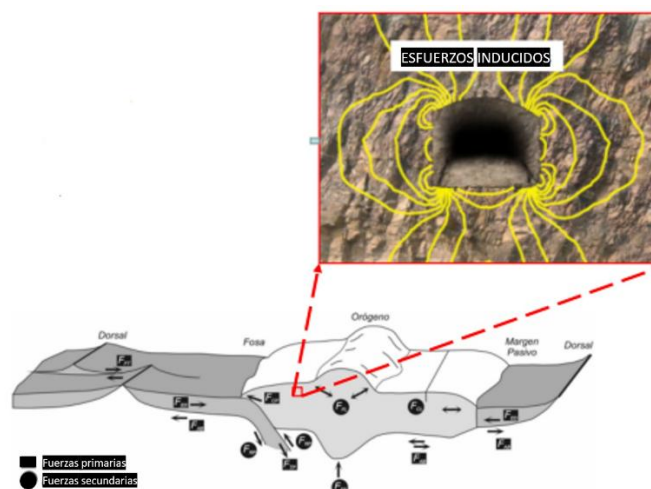
- **Situación de tensión**

Las tensiones en el macizo son causadas por el peso del material o por fuerzas externas. Las tensiones acumuladas en las rocas se deben principalmente a los esfuerzos tectónicos. No se puede realizar una evaluación cuantitativa de los esfuerzos a partir de los datos de campo, aunque es posible inferir su dirección probable. La comprensión de la historia geológica y tectónica de la región es fundamental para evaluar estos esfuerzos (Rodríguez, 2007).

Los principales factores considerados en las clasificaciones geomecánicas incluyen: el factor de competencia, que se determina al dividir la resistencia uniaxial de la roca matriz entre la tensión vertical máxima producida por el peso del recubrimiento; las irregularidades y la actividad tectónica, que abarcan fallas, cabalgamientos y procesos de compresión o distensión; el factor de relajación de tensiones, calculado al dividir la edad geológica de la última deformación entre la carga litostática máxima, que corresponde al espesor máximo del recubrimiento (Rodríguez, 2007).

#### Figura 4

*Factores tectónicos que afectan a un macizo rocoso*



*Nota.* Tomado de González y Martínez (2022b).

### 3.2.2.2. Mecanismos principales de rotura de un talud

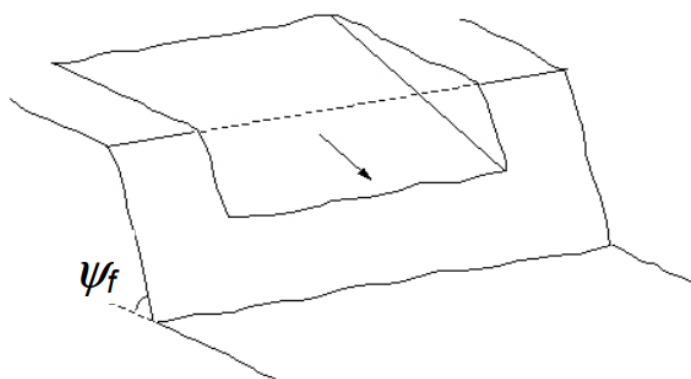
La forma en que se producen las roturas en un talud de roca depende de la cantidad de fracturas en el macizo rocoso, así como de la distribución y orientación de las discontinuidades en relación con el talud. La estabilidad del talud se determina por la resistencia de las discontinuidades y de la matriz rocosa. Los modelos de rotura más comunes son la rotura plana, la rotura en cuña y la rotura por vuelco.

- **Rotura plana**

Esta condición de rotura ocurre en presencia de una única familia de planos de rotura que tienen un buzamiento en el mismo sentido que el talud y están orientados de manera paralela al frente del talud. Esta situación se debe principalmente a que el ángulo de buzamiento de los planos es menor que el del talud, lo que puede generar una diferencia de hasta veinte grados. Como resultado, el rozamiento entre los bloques de roca no es suficiente para garantizar la estabilidad del talud.

#### **Figura 5**

*Rotura planar en un talud*



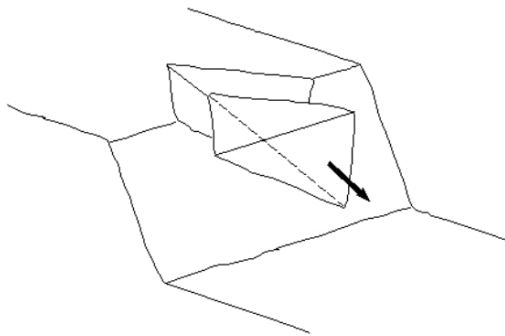
*Nota.* Tomado de Ramírez y Alejano (2004).

- **Rotura en cuña**

Esta clase de rotura ocurre en la intersección de dos conjuntos de planos de discontinuidad con orientaciones distintas, generando una línea de inmersión en dirección al talud, aunque con una pendiente menor a la del buzamiento del talud.

**Figura 6**

*Rotura en cuña en un talud*



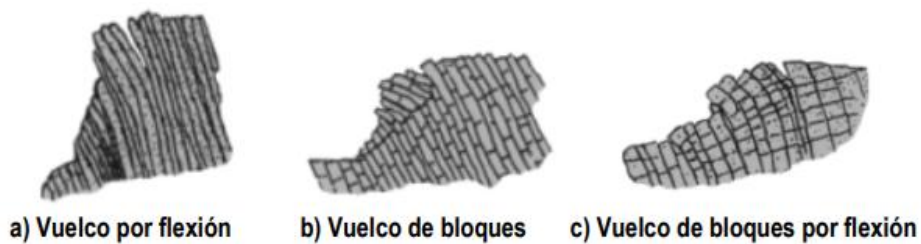
*Nota.* Tomado de Ramírez y Alejano (2004).

- **Rotura en Vuelco**

La fracturación de los planos del macizo rocoso en esta situación tiene una dirección opuesta al buzamiento del talud, lo que resulta en la separación de los bloques de roca que se deslizan hacia abajo debido a la acción de la gravedad.

**Figura 7**

*Tipos de rotura por vuelco en un talud*



*Nota.* Tomado de Ramírez y Alejano (2004).

### **3.2.3. Discontinuidades**

Para una extracción efectiva de muchos recursos naturales de la Tierra, así como para asegurar la estabilidad de los proyectos de ingeniería que están directamente relacionados con el entorno geológico, es esencial comprender las discontinuidades en los macizos rocosos. En la mecánica de rocas, el término "discontinuidad" tiene un significado particular, porque se refiere a fallas, contactos litológicos, laminaciones, juntas y planos de estratificación. El análisis de las paredes de roca como un sistema que no se comporta como un medio continuo se centra en esta disciplina. Por lo tanto, cualquier característica que interrumpa esta continuidad en el material que compone el macizo rocoso se considera una discontinuidad y presenta una resistencia a la tensión muy baja o inexistente (Villareal, 2019).

Se denomina discontinuidad a un plano, ya sea de origen mecánico o sedimentario, que divide o separa los bloques de roca en un conjunto rocoso. El comportamiento mecánico de la discontinuidad se determina por la capacidad de resistencia que posee frente a la fuerza de corte o, en su defecto, por la resistencia del material de relleno que pueda contener (González et al., 2002).

Las discontinuidades y los bloques de matriz constituyen, en conjunto, la estructura rocosa y representan el comportamiento global del macizo rocoso, predominando uno u otro componente en función de sus propiedades relativas y de la escala o ámbito de estudio en el macizo (González et al., 2002).

#### **3.2.3.1. Tipos de Discontinuidades**

Según González et al. (2002), se han agrupado las discontinuidades en dos grupos, teniendo en cuenta el número de familias o planos de discontinuidad que atraviesan el macizo.

- **Discontinuidades Sistemáticas**

Cuando aparecen en familias y son definidas por la orientación estadística referida a una orientación media y por sus características generales.

- **Discontinuidades Singulares**

Cuando aparece un único plano que cruza el macizo rocoso, suele ser continuo y persistente, pudiendo llegar a dimensiones de varios kilómetros en el caso de las fallas. Requiere una descripción individualizada, puesto que puede llegar a controlar el comportamiento mecánico del macizo por encima de la influencia de las discontinuidades sistemáticas.

**Tabla 1**

*Tipos de discontinuidades*

Discontinuidades	Sistemáticas	Singulares
Planares	-Planos de estratificación.	-Fallas.
	-Planos de Laminación.	-Diques.
	-Diaclasas o juntas.	-Discordancias.
Lineales	-Planos de esquistosidad.	
	-Intersección de discontinuidades planares.	-Ejes de pliegues.
	-Lineaciones.	

*Nota.* Tomado de González et al. (2002).

### 3.2.3.2. Parámetros de las discontinuidades

En el contexto de un macizo rocoso, se pueden identificar diversas familias de discontinuidades, cada una con características y parámetros geométricos específicos. Estos incluyen aspectos como la orientación, el espaciado, la continuidad o persistencia, la rugosidad, la abertura, el relleno, las filtraciones y la

resistencia de las paredes. Entre estos parámetros, la rugosidad, la abertura, el relleno y la resistencia de las paredes son especialmente importantes, ya que influyen en el comportamiento mecánico y en la resistencia de los planos de discontinuidad.

### **Orientación**

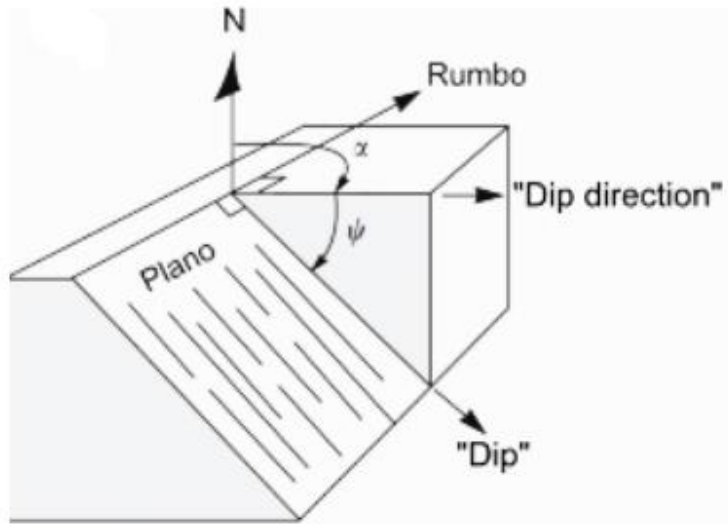
Definida por su dirección de buzamiento (Dip Direction) ( $0^\circ$  a  $360^\circ$ ) y buzamiento (Dip) ( $0^\circ$  a  $90^\circ$ ). Su medida se realiza mediante la brújula con clinómetro o con el diaclasímetro.

Una de las características que más afecta a la estabilidad de un talud es esta. La orientación es esencial para la creación de condiciones de inestabilidad o para la aparición de deformaciones excesivas en una obra de ingeniería. Cuando aparecen otras condiciones adversas, como una baja resistencia al corte y una gran cantidad de discontinuidades, la importancia de la orientación se hace aún más evidente (Villareal, 2019).

La dirección de una discontinuidad se describe con los términos “dip” y “dip direction”. El rumbo, un término muy utilizado en geología estructural, tiene una conexión directa con esta última. Una línea horizontal que forma parte del plano en cuestión es el rumbo. Al igual que el “dip direction”, se mide en azimuth desde el norte. La distancia entre ambas medidas siempre será de  $90^\circ$  en el sentido de las agujas del reloj, porque están en el mismo plano (Villareal, 2019).

### **Figura 8**

*Elementos que definen la orientación de una discontinuidad*



*Nota.* Tomado de Villareal (2019).

### **Número de familias**

En el análisis estructural de un macizo rocoso, las familias o conjuntos de discontinuidades representan grupos de fracturas que tienen características similares, como orientación, tipo de fractura, y origen (Villareal, 2019). Las discontinuidades dentro de una misma familia suelen compartir de un mismo patrón geométrico, lo que implica que han sido generadas bajo condiciones geológicas similares, como esfuerzos tectónicos o procesos de enfriamiento. Estas fracturas pueden dividir el macizo rocoso en bloques y afectar de manera significativa su comportamiento geomecánico. Las familias de discontinuidades se definen a partir de la orientación de las fracturas (medidas en términos de dip y dip direction) y su persistencia, es decir, la extensión de las fracturas a lo largo del macizo. Se identifican mediante técnicas como el análisis de estereogramas, que permite visualizar las orientaciones de las fracturas proyectadas en un espacio tridimensional, facilitando la agrupación en conjuntos o familias (Hoek & Bray, 1981).

Para definir las familias, se deben considerar los siguientes criterios:

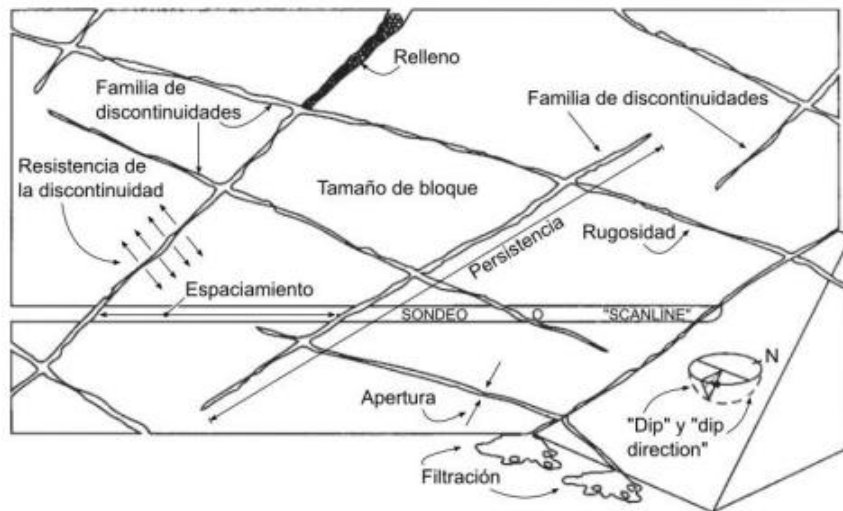
- **Orientación:** Las fracturas con orientaciones similares (en términos de dip y dip direction) suelen pertenecer a la misma familia.
- **Persistencia y espaciado:** Las fracturas que presentan un patrón regular en términos de espaciado o longitud tienden a agruparse en una misma familia.
- **Tipo de estructura:** El tipo de fractura (junta, falla, diaclasa) también se utiliza para agrupar las discontinuidades en familias, ya que diferentes tipos de fracturas pueden indicar distintos procesos de deformación.
- **Las familias de discontinuidades son cruciales para el análisis geotécnico,** ya que determinan el comportamiento del macizo frente a esfuerzos externos, afectando tanto su estabilidad como su capacidad para alojar fluidos o minerales (Goodman, 1989). Además, en estudios de estabilidad de taludes, la correcta identificación de estas familias permite anticipar los modos de falla potenciales, como deslizamiento o caídas de bloques (Wyllie & Mah, 2004).

### **Tamaño de bloque**

El espaciamiento entre los conjuntos individuales determina las dimensiones de los bloques que resultan de la orientación conjunta de varias familias de fractura que se cruzan. Las discontinuidades particulares también pueden afectar el tamaño y la forma del bloque (Villareal, 2019).

**Figura 9**

*Esquema de los parámetros de las discontinuidades en un macizo rocoso*



*Nota.* Tomado de Villareal (2019).

### 3.2.3.3. Levantamiento de discontinuidades

Según Hudson y Harrison (1997), el levantamiento de discontinuidades en macizos rocosos es fundamental para el análisis geotécnico de taludes, ya que estas estructuras influyen directamente en la estabilidad del terreno (Hudson & Harrison, 1997). Para una mejor metodología de trabajo en campo, se deben seleccionar áreas representativas del macizo rocoso y excluir zonas disturbadas, como deslizamientos y bloques caídos, para garantizar la precisión de los datos obtenidos (Hoek & Bray, 1981).

- **Medición de Dip y Dip Direction:** El uso de las brújulas geológicas para la medición del ángulo de inclinación (dip) y la dirección de buzamiento (dip direction) en cada plano identificado es de vital importancia, ya que medir estos parámetros radica en la capacidad de definir la orientación de las discontinuidades de los planos de las estructuras, que son determinantes en el análisis cinemático de la estabilidad de taludes (Goodman, 1989).

- Registro de Coordenadas: Se deben utilizar dispositivos GPS para registrar las coordenadas exactas de cada medición, lo que facilita la georreferenciación de las discontinuidades y su posterior integración en software de modelado geotécnico (Peña, 2016).
- Identificación de Tipos de Discontinuidades: Las discontinuidades se clasifican según su tipo (juntas, diaclasas, fallas), lo cual es fundamental para identificar los modos de fallo potenciales del talud (Wyllie & Mah, 2004). Las características de las discontinuidades permiten prever deslizamientos planos o de cuña, entre otros tipos de fallos.
- Exclusión de Zonas Disturbadas: Se excluye las zonas con alta fragmentación y evidencia de colapso reciente para evitar datos inexactos. Esta técnica de exclusión es esencial para garantizar que los resultados del análisis de estabilidad sean representativos (Priets & Hudson, 1976).
- Registro fotográfico y documentación: El registro fotográfico complementa las mediciones directas, lo que permite una mejor caracterización visual de las discontinuidades (Peña, 2016). El uso de fotografías permite corroborar las mediciones y facilita la revisión en la fase de análisis.

#### ***3.2.4. Aceptabilidad en mediciones de discontinuidades***

Diversos estudios han demostrado que la aceptabilidad de los datos de orientación (buzamiento y dirección de buzamiento) de las discontinuidades depende directamente del nivel de precisión de su medición. Esta precisión puede evaluarse mediante el análisis del error angular (generalmente la desviación estándar), y se ha propuesto que, para asegurar resultados confiables, debe mantenerse dentro de ciertos rangos. A continuación, se presentan los principales estudios que fundamentan este criterio.

Poropat et al. (2008) desarrollaron un modelo estadístico para evaluar la variabilidad en mediciones de orientación estructural. Estos autores proponen el uso de distribuciones angulares, como la de Fisher et al. (1993), para representar los errores en dip y dip direction. Su análisis demuestra que únicamente cuando el error angular es menor o igual a  $5^\circ$ , las mediciones pueden considerarse de alta precisión, permitiendo una definición confiable de familias estructurales. Si el error se encuentra entre  $5^\circ$  y  $15^\circ$ , se recomienda cautela y validación adicional. Por encima de los  $15^\circ$ , los datos pierden confiabilidad estructural. Este enfoque constituye el soporte teórico más robusto para la clasificación de la aceptabilidad de datos de orientaciones.

Por otro lado, Riquelme et al. (2014) realizaron una comparación entre mediciones manuales de campo y aquellas obtenidas mediante técnicas digitales, utilizando nubes de puntos 3D y procesamiento de imagen. Los autores concluyen que, siempre que la diferencia angular entre ambos métodos sea menor a  $5^\circ$ , los datos digitales pueden considerarse equivalentes a los tradicionales en términos de calidad estructural. Este hallazgo valida empíricamente el umbral de  $5^\circ$  como criterio confiable de aceptabilidad.

Fisher et al. (1993) ofrecieron el marco teórico para aplicar estadísticas esféricas en el tratamiento de datos de orientación. Su obra demuestra que las distribuciones estadísticas normales no son adecuadas para datos circulares, como los ángulos de dip y dip direction. En su lugar, recomiendan el uso de distribuciones como la de Fisher, que permite trabajar con medidas de error angular adaptadas a geometrías esféricas. Este fundamento matemático respalda el uso de la desviación estándar angular como medida técnica de calidad.

Finalmente, Gaich (2006), aunque sin acceso directo a su publicación original, es frecuentemente citado en literatura posterior por establecer criterios de

tolerancia angular en métodos digitales de mapeo estructural, tales como evaluaciones estereográficas digitales. Su trabajo refuerza la aplicabilidad de estos rangos de aceptabilidad en contextos reales de levantamiento estructural, tanto manual como asistido digitalmente.

En estudios estructurales aplicados a macizos rocosos, la aceptabilidad de los datos de orientación (buzamiento y dirección de buzamiento) recolectados —ya sea mediante métodos manuales o digitales— depende directamente del nivel de precisión asociado a su medición. Diversos autores han propuesto que la confiabilidad de estas mediciones puede evaluarse en función del error angular (desviación estándar) tanto del dip como del dip direction, y esta base ha permitido establecer rangos de aceptabilidad ampliamente reconocidos en trabajos de caracterización geomecánica.

Poropat et al. (2008), en sus estudios sobre caracterización de discontinuidades, plantean que los errores en mediciones de orientación deben analizarse mediante distribuciones angulares como la de Fisher o la de Kent, y proponen que el error puede clasificarse en tres niveles:

- Alta precisión ( $\sigma \leq 5^\circ$ ): los datos son confiables y pueden usarse directamente en la definición de familias estructurales.
- Precisión regular o moderada ( $\sigma$  entre  $5^\circ$ – $15^\circ$ ): los datos son utilizables con reservas, recomendándose validación adicional.
- Baja precisión ( $\sigma > 15^\circ$ ): los datos no deben emplearse en análisis estructural sin corrección.

Esta clasificación es coherente con lo sugerido por Gaich (2006) y Riquelme et al. (2014), quienes compararon métodos tradicionales con fotogrametría digital y hallaron que, siempre que el desvío angular esté por debajo de  $5^\circ$ , los datos pueden considerarse de alta calidad y aptos para análisis estadístico y cinemático.

Bajo este marco teórico, en el presente estudio se adoptará el siguiente criterio para evaluar la aceptabilidad de los datos de orientaciones recolectados:

- 0°–5° de diferencia (dip o dip direction): buena aceptabilidad.
- 5°–15° de diferencia: aceptabilidad regular.
- >15° de diferencia: no aceptable.

Este umbral se aplicará tanto en la comparación entre datos de campo (brújula) y datos digitales (dron/fotogrametría), como en la evaluación interna de agrupamientos estadísticos dentro de una familia estructural.

### ***3.2.5. Programa Dips***

DIPS es un software diseñado para visualizar y analizar información estructural de manera similar como si usáramos una red estereográfica. El programa es un conjunto de herramientas capaces de diferenciar aplicaciones especialmente entre aquellas necesarias para el análisis de datos geológicos de orientación.

### ***3.2.6. Proyección Estereográfica***

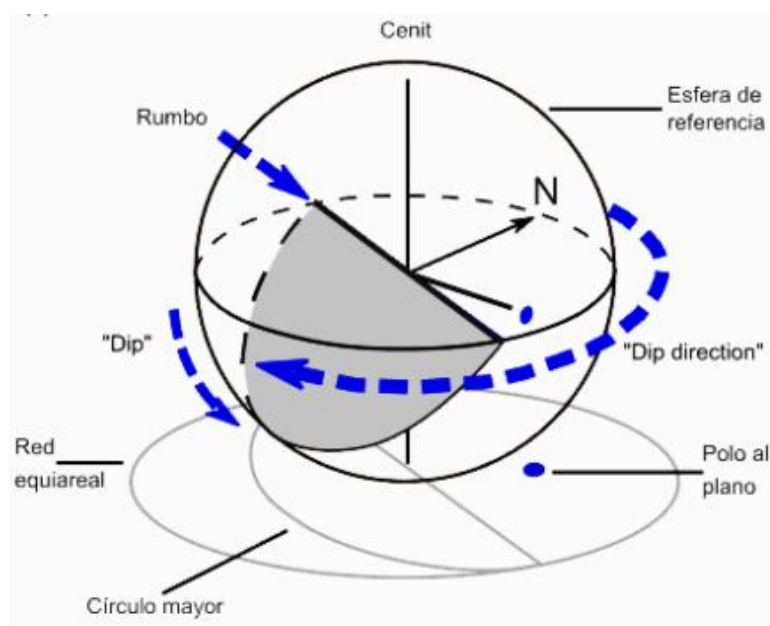
Es necesario disponer de un sistema de proyección que facilite la representación y el análisis de los datos para describir la orientación de un plano. Para este propósito, la proyección estereográfica es una herramienta ideal, ya que permite la representación de datos tridimensionales en un formato bidimensional; es decir, una línea puede representar un plano y un punto, una línea. Su limitación principal, sin embargo, es que no puede representar posiciones ni tamaños; solo puede expresar las relaciones angulares entre los elementos representados (Villareal, 2019).

La proyección estereográfica se basa en una esfera de referencia cuya superficie ecuatorial está orientada hacia el norte y se encuentra en posición

horizontal. El centro de esta esfera de referencia está rodeado de planos y líneas. Una línea única se forma en el hemisferio de referencia cuando un elemento cruza la mitad inferior de la esfera. Esta intersección con la esfera se presenta como un círculo mayor en un plano, mientras que, en una línea, la intersección da como resultado un punto. El vector normal de un plano es el polo; en la proyección estereográfica, este vector se representa como un punto. En comparación con el método de círculos mayores, el uso de polos simplifica el análisis de muchos planos (Villareal, 2019).

### Figura 10

*Representación de un plano y su polo en una proyección estereográfica*



*Nota.* Tomado de Villareal (2019)

#### 3.2.6.1. Análisis Estereográfico

El análisis estereográfico se realiza mediante la representación de disposiciones estructurales en el interior de una esfera de diámetro cualquiera y

debidamente orientada, con el fin de resumir toda la información geológica en un plano diametral horizontal (Balbín & Gomez, 2010).

Según sus campos de aplicación son:

- Definición de las estructuras geológicas predominantes
- Determinación de la dirección de los esfuerzos principales.
- Identificación de mecanismos de falla probables y análisis cinemático de bloques inestables.
- Cálculo de parámetros de corrección del método RMR de clasificación de macizos rocosos para su aplicación a taludes.

### **3.2.7. Fotogrametría**

#### **3.2.7.1. Fotogrametría en estudios geológicos**

Para obtener mediciones geométricas precisas, exactas y confiables, útiles para la creación de mapas o la reconstrucción de entidades espaciales, la fotogrametría se enfoca en los conceptos, métodos, procesos y tecnologías para capturar imágenes o fotografías digitales, ya sean terrestres, aéreas o satelitales. La posición horizontal y vertical, la distancia lineal y angular, el tamaño (incluyendo longitud, perímetro, área y volumen), la altura y la forma de las entidades espaciales son medidas tridimensionales calculadas (Villareal, 2019).

Las fotografías aéreas verticales en blanco y negro, tomadas a altitudes entre 500 y 3,000 metros y con escalas de 1:10,000 a 1:30,000, son las imágenes más frecuentes en ingeniería geotécnica. Para detectar movimientos del terreno, como deslizamientos, es necesario disponer de fotografías a gran escala en ciertos proyectos. Por otro lado, las imágenes más cercanas permiten un análisis más minucioso de la estructura geológica, incluyendo la posición, longitud y continuidad de estas características (Villareal, 2019).

La técnica ha avanzado y ciertas actividades en el proceso fotogramétrico se han simplificado, especialmente con la introducción del algoritmo "Structure-from-Motion", que permite generar nubes de puntos integradas en software diseñado para procesar imágenes con objetivos similares a los de la fotogrametría tradicional. La incorporación reciente de drones como plataformas aéreas para la captura de imágenes también refleja este avance (Villareal, 2019).

- **Dron**

También conocido como vehículo aéreo no tripulado, o UAV por sus siglas en inglés, es un dispositivo volador que puede ser controlado a distancia y que se utiliza para diversas aplicaciones, como la captura de fotografías y videos, el mapeo de terrenos, la vigilancia y la entrega de paquetes, entre otras.

- **Limitaciones técnicas del dron**

Para obtener imágenes de alta calidad se debe asegurar cumplir las siguientes especificaciones:

**Resolución espacial:** Las imágenes capturadas deben alcanzar una resolución de 2 cm/píxel, adecuada para la identificación de discontinuidades estructurales visibles.

**Calibración previa:** Antes del vuelo, se debe calibrar el sistema de navegación y de la cámara, asegurando la precisión de los datos capturados.

**Corrección geométrica:** Las imágenes se procesan mediante los softwares Agisoft Metashape y Skycatch, que aplican algoritmos de fotogrametría para la ortorrectificación y generación de modelos 3D precisos.

Redundancia de vuelos: En zonas críticas, se deben realizar vuelos adicionales para asegurar cobertura completa y permitir la validación cruzada de imágenes.

Autonomía limitada: Tiempo de vuelo reducido (aprox. 25-30 min por batería), lo que requiere planificación y baterías adicionales.

Sensibilidad a interferencias: Señales electromagnéticas o pérdida de conexión con la estación base afectan la precisión.

Resolución condicionada por altura: Aunque se logra 2 cm/píxel a 60-80 m, mayor altura reduce la calidad de detalle.

Capacidad de carga: Limitada para sensores adicionales (ej. LiDAR), restringiendo el tipo de datos que se pueden capturar.

- **Limitaciones operativas del dron**

Condiciones climáticas: Viento fuerte ( $>10$  m/s), lluvia o polvo afectan estabilidad y seguridad del vuelo.

Dependencia de visibilidad: Vuelo seguro requiere línea de vista clara; no apto para zonas subterráneas.

Cobertura limitada: Áreas extensas requieren múltiples vuelos y planificación para evitar huecos en la cobertura.

Horario de toma de imágenes: Las fotografías deben ser en un horario e seleccionado para minimizar la presencia de sombras en las imágenes, garantizando así una iluminación uniforme y una mejor calidad en la captura de detalles estructurales del talud.

- **Tecnología RTK**

RTK II (Real-Time Kinematic) es una tecnología de posicionamiento GNSS que permite obtener coordenadas con precisión centimétrica en tiempo real mediante correcciones diferenciales enviadas desde una estación base al receptor móvil. A diferencia del GPS convencional, RTK II reduce errores atmosféricos y de señal, soporta múltiples constelaciones (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) y ofrece alta estabilidad, siendo ideal para aplicaciones en minería, topografía y control de maquinaria.

- **Equipo D-RTK II DJI**

Es una estación móvil GNSS de alta precisión que utiliza la tecnología RTK (Real-Time Kinematic) para proporcionar correcciones diferenciales en tiempo real, logrando una precisión centimétrica en posicionamiento. Este equipo es compatible con múltiples constelaciones satelitales (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) y se emplea principalmente en aplicaciones como levantamientos topográficos, fotogrametría con drones y control de maquinaria en minería y construcción. Su función principal es servir como estación base para transmitir datos de corrección al receptor del dron, garantizando exactitud en la georreferenciación de imágenes y modelos digitales del terreno. (DJI., 2023)

- **Punto Topográfico**

Es una ubicación específica en el terreno que se utiliza como referencia para levantamientos, mediciones y representaciones cartográficas. Generalmente, se caracteriza por:

Coordenadas precisas: Latitud, longitud y, en muchos casos, altitud.

Función de control: Sirve como base para establecer redes geodésicas, nivelaciones o para orientar trabajos de ingeniería y minería.

Marcación física: Puede estar señalizado con hitos, mojones, clavos o marcas permanentes en el terreno.

- **Captura de imágenes**

El proceso de tomar fotografías con un drone para generar un modelo 3D.

- **Modelos 3D**

Una representación digital tridimensional de una superficie u objeto.

- **Imágenes satelitales y Orthofoto**

Son imágenes capturadas desde satélites que orbitan alrededor de la Tierra y que se utilizan para diversos fines, como el estudio de los cambios en la superficie. Una ortofoto (u ortofoto) es una imagen aérea o satelital que ha sido corregida geoméricamente para que represente la superficie terrestre de manera precisa. Esto significa que la imagen ha sido procesada para eliminar distorsiones causadas por la inclinación de la cámara, la topografía del terreno y otros factores.

### **3.2.7.2. Fotogrametría para la generación de nubes de puntos**

El procesamiento informático de imágenes y la fotografía digital han simplificado la fotogrametría, que antes se basaba en la fotogrametría analógica, también conocida como fotogrametría clásica. Para entender el funcionamiento de software especializado en el campo, como la ortorrectificación y el algoritmo Structure-from-Motion, se abordan temas como la importancia de la fotogrametría aérea y terrestre en la obtención de datos geológicos, así como términos modernos

que surgen de la fotogrametría como método para generar nubes de puntos (Villareal, 2019).

Una "nube de puntos" es un conjunto de datos de ubicación que está establecido en un sistema de coordenadas particular. Esta agrupación de puntos sirve como guía para la reconstrucción tridimensional de una superficie; en ocasiones, su densidad es tan alta que puede ser utilizada como modelo digital sin ningún problema (Villareal, 2019).

La generación de nubes de puntos tridimensionales mediante drones es una técnica ampliamente utilizada en geología estructural para el levantamiento de discontinuidades en taludes. Este proceso se basa en la fotogrametría digital, complementada con georreferenciación de alta precisión mediante el sistema D-RTK 2 (Real-Time Kinematic).

El dron DJI, equipado con cámara de alta resolución y sistema D-RTK 2, realiza vuelos planificados sobre el talud, siguiendo rutas con superposición frontal y lateral (80 % y 70 %, respectivamente). Las imágenes capturadas se georreferencian en tiempo real mediante correcciones diferenciales transmitidas desde una estación base, lo que permite alcanzar precisiones centimétricas en la ubicación de cada imagen (DJI., 2023).

Posteriormente, las imágenes se procesan en software especializado como Agisoft Metashape o Skycatch. El flujo de trabajo incluye la alineación de imágenes mediante detección de puntos homólogos, la triangulación para generar una nube de puntos escasa y, finalmente, la construcción de una nube de puntos densa que representa con alta fidelidad la geometría del talud (LLC, 2023). Esta nube de puntos permite la reconstrucción de modelos 3D, la identificación de discontinuidades estructurales y la extracción de orientaciones mediante análisis vectorial en software como CloudCompare o Dips.

La calidad del modelo depende de factores como la resolución de imagen, las condiciones de iluminación, la estabilidad del dron y la precisión de la georreferenciación. En contextos geológicos, se recomienda complementar el modelo con puntos de control terrestre (GCPs) para validación adicional, especialmente en zonas con cobertura limitada de señal GNSS (Inc., 2023).

En cuanto a los equipos y consideraciones necesarias para óptima fotogrametría, se resumen los puntos principales:

**Tabla 2**

*Especificaciones de equipos para fotogrametría*

<b>Ítem</b>	<b>Especificación</b>
Dron	Multirrotores DJI
Modelo	Phantom 4 RTK
Sistema de posicionamiento	RTK (Real-Time Kinematic)
Precisión horizontal	±1 cm
Precisión vertical	±1,5 cm
Superposición frontal	80%
Superposición lateral	70%
Cámara	Alta resolución. Integrada en el dron
Tipo de sensor	Sensor CMOS de 1 pulgada
Resolución	5472 × 3648 píxeles

---

Resolución espacial	2cm/pixel
Estación base	Estación móvil GNSS
Modelo estación	D-RTK 2
Compatibilidad GNSS	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
Software de procesamiento	Agisoft Metashape
Formatos de salida	.tif, .las, .obj, .shp .ecw .dxf
Software de procesamiento	Agisoft/Skycatch
Punto topográfico	Marcado con D-RTK2
Espectro visible – Longitud de onda	Rango $\approx$ 400 – 700 nanómetros (nm)

---

*Nota.* Elaboración propia

### **3.2.7.3. Consideraciones para diseñar el plan de vuelo**

Es esencial comprender y calcular los parámetros que establecen la base de las rutas de vuelo y la distancia entre la cámara y la superficie a fotografiar, para aplicar un plan de vuelo que el dron debe seguir para capturar la cantidad adecuada de imágenes. También debe determinarse la velocidad que el dron debe mantener para alcanzar el porcentaje de traslape requerido, que en este caso es del 80 % para la superposición lateral y del 70 % para la superposición transversal (Villareal, 2019).

**Distancia focal**

Se refiere a la distancia entre el plano donde se produce la imagen o el plano focal y el centro de proyección en un sistema óptico. El área de la imagen y la escala de la fotografía se determinan al cambiar esta distancia (Villareal, 2019).

**Distancia al objeto**

El espacio entre los objetos fotografiados y la cámara (Villareal, 2019).

**Formato del sensor**

El sensor de la cámara tiene dimensiones físicas en la dirección horizontal  $dx$  y en la vertical  $dy$  (Villareal, 2019).

**Distancia de cobertura**

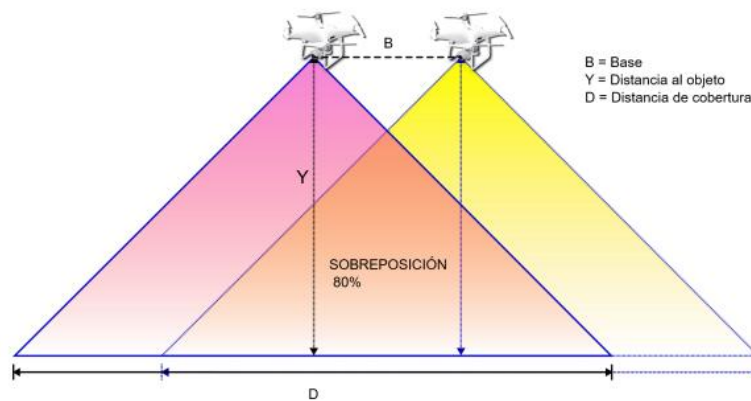
Área de terreno abarcada por cada imagen (Villareal, 2019).

**Sobreposición o traslape**

Al repetir las imágenes, la sección de la fotografía se coloca sobre la superficie de otra. Se presenta normalmente como una porción del área total de la fotografía. Las imágenes se combinan en dirección transversal ( $S_y$ ) y en dirección lateral ( $S_x$ ) (Villareal, 2019).

**Figura 11**

### Diagrama de fotografías consecutivas con sobreposición



Nota. Tomado de Villareal (2019).

#### Base

El porcentaje de superposición deseado se obtiene calculando la distancia en el suelo entre dos capturas fotográficas consecutivas (Villareal, 2019).

#### Resolución

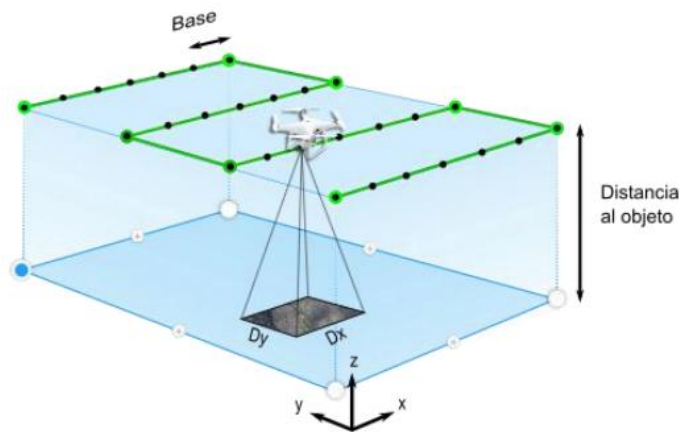
Se refiere a la cantidad de píxeles que componen la imagen y a su nivel de detalle. La resolución se calcula utilizando las dimensiones de los píxeles, es decir, la cantidad de píxeles presentes en la anchura y la altura de la imagen (Villareal, 2019).

#### Tamaño de píxel

Se obtiene dividiendo las dimensiones del sensor por la cantidad de píxeles correspondientes (siempre y cuando la proporción se mantenga igual) (Villareal, 2019).

#### Figura 12

*Esquema del plan de vuelo de un levantamiento fotogramétrico*



*Nota.* Tomado de Villareal (2019).

#### 3.2.7.4. Validación estructural con puntos de control

La validación de modelos digitales en geología estructural se enfoca en la precisión angular de las estructuras geológicas representadas. En este contexto, una metodología efectiva consiste en comparar valores de orientación estructural (buzamiento y dirección de buzamiento) obtenidos directamente en campo mediante brújula geológica, con aquellos extraídos digitalmente desde modelos tridimensionales generados por fotogrametría o escaneo láser. Esta comparación permite evaluar la fidelidad geométrica del modelo en la representación de discontinuidades, pliegues o planos estructurales, lo cual es crucial para estudios geomecánicos y de estabilidad de taludes. Según (Zúñiga González, 2016), el uso de modelos tridimensionales derivados de fotogrametría ha demostrado ser una herramienta eficaz para obtener datos estructurales de forma remota, segura y con alta precisión, permitiendo incluso el análisis de estructuras complejas en menor tiempo que los métodos tradicionales de campo

Para determinar la aceptabilidad de las diferencias entre los datos manuales y digitales, se aplican los criterios de tolerancia o aceptabilidad previamente establecidos, (Poropat, Lyman, & Elmoultie, 2008) los cuales permiten clasificar

los resultados como aceptables o no aceptables según el grado de desviación observado. Este enfoque, además de ser práctico, permite una evaluación directa de la utilidad del modelo digital para fines estructurales específicos.

### **3.2.8. *Procesamiento de Imágenes***

El procesamiento de imágenes con drones es una técnica que implica la adquisición de imágenes de alta resolución mediante vehículos aéreos no tripulados (drones) y, posteriormente, el procesamiento de estas imágenes utilizando algoritmos y software especializados para obtener información útil. El procesamiento de imágenes de drones puede incluir diversas técnicas, como la fotogrametría, la ortorrectificación, la fusión de imágenes, la generación de modelos digitales de elevación y de terreno, la clasificación de imágenes, entre otras. El objetivo es extraer información precisa y detallada de la superficie terrestre, como la topografía, la vegetación, la estructura de la roca, el movimiento del terreno, entre otros, para su uso en aplicaciones de geología, geotecnia, agricultura, cartografía y otros campos (González et al., 2003).

### **3.2.9. *Análisis estadístico***

#### **3.2.9.1. Regresión lineal $R^2$**

La regresión lineal es una técnica estadística fundamental que permite modelar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes. En el contexto de datos geológicos, como la comparación de mediciones estructurales obtenidas mediante diferentes métodos (por ejemplo, brújula geológica y dron), esta herramienta permite evaluar de forma cuantitativa el grado de similitud entre ambos conjuntos.

El modelo de regresión lineal simple puede representarse mediante la siguiente ecuación:

$$Y = a \cdot X + b$$

- Y: variable dependiente
- X: variable independiente
- a: pendiente del modelo
- b: ordenada al origen

El ajuste del modelo se evalúa comúnmente mediante el coeficiente de determinación, representado como  $R^2$ , el cual indica la proporción de la varianza en la variable dependiente que puede explicarse por la variable independiente. En términos sencillos,  $R^2$  cuantifica qué tan bien el modelo predice los valores observados.

$R^2$  se define como:

$$R^2 = 1 - (\sum(y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum(y_i - \bar{y})^2)$$

donde:

- $y_i$  son los valores observados,
- $\hat{y}_i$  son los valores predichos por el modelo,
- $\bar{y}$  es la media de los valores observados.
- Los valores de  $R^2$  oscilan entre 0 y 1:
- Un  $R^2 = 1$  representa una relación perfecta entre las variables
- Un  $R^2$  cercano a 0 indica que el modelo no explica variabilidad

**Tabla 3**

*Parámetros de interpretación*

Valor de $R^2$	Interpretación técnica
$R^2 \geq 0,90$	Correlación excelente
$0,75 \leq R^2 < 0,90$	Correlación buena

$0,60 \leq R^2 < 0,75$	Correlación moderada
$R^2 < 0,60$	Correlación débil o no confiable

*Nota.* Elaboración propia

En esta investigación, la regresión lineal fue aplicada para validar la correspondencia entre las mediciones de orientación estructural obtenidas por métodos manuales y aquellas generadas digitalmente a partir de fotogrametría aérea mediante dron. El uso del coeficiente  $R^2$  permite evaluar cuantitativamente el grado de coincidencia entre ambos conjuntos, tanto para los valores de inclinación (Dip) como para la dirección de buzamiento (Dip Direction).

La aplicación de esta herramienta estadística no solo respalda el uso de modelos digitales como alternativa válida, sino que también constituye una estrategia metodológica sólida para establecer criterios de aceptabilidad estructural en estudios geomecánicos. Su integración con otros métodos de validación espacial y de agrupamiento estructural fortalece el análisis y proporciona una base objetiva para la toma de decisiones en caracterización de taludes.

### **3.2.9.2. Método Montecarlo**

El método de Monte Carlo consiste en realizar múltiples simulaciones aleatorias para estimar el comportamiento probable de un sistema complejo bajo condiciones de incertidumbre. En geología estructural, este enfoque permite evaluar la variabilidad en mediciones de discontinuidades, como el buzamiento y la dirección de buzamiento, especialmente cuando se utilizan tecnologías digitales como drones y fotogrametría.

Este método es útil cuando los datos presentan dispersión o cuando se desea validar la confiabilidad de mediciones indirectas frente a métodos tradicionales. A través de miles de iteraciones, se puede construir una distribución estadística de

errores, correlaciones o probabilidades de falla, lo que permite tomar decisiones más robustas en ingeniería geotécnica y geomecánica.

Como antecedente, este método ha sido utilizado en trabajos de investigación geotécnica, tales como:

- Medinaceli et al. (2021) aplicaron la simulación de Monte Carlo para evaluar la estabilidad de taludes en roca, considerando fallas en cuña y variabilidad en las orientaciones de discontinuidades. Su estudio demostró que este método permite incorporar incertidumbre en los parámetros estructurales y obtener resultados probabilísticos más realistas para el diseño geotécnico.

- Lozano Pinedo (2014) utilizó Monte Carlo en ingeniería geotécnica para analizar riesgos asociados a fallas estructurales, mostrando que la técnica es eficaz para representar la dispersión en datos de campo y modelos digitales.

- Galaz et al. (2023) emplearon Monte Carlo para determinar zonas de vertimiento de sedimentos dragados, validando modelos espaciales con alta incertidumbre, lo que demuestra su versatilidad en estudios de terreno y modelado digital.

### **Métricas estadísticas para la validación**

#### a) $R^2$ lineal (Coeficiente de determinación)

El coeficiente de determinación, usualmente denotado como  $R^2$ , mide la proporción de la variabilidad de la variable dependiente que es explicada por la(s) variable(s) independiente(s) en un modelo de regresión lineal (eCampusOntario, 2020)

$$R^2 = SSR / SST = 1 - (SSE / SST)$$

donde: SSR = suma de cuadrados de la regresión,

SSE = suma de cuadrados del error

SST = suma total de cuadrados.

El valor de  $R^2$  varía entre 0 y 1; cuanto más cercano a 1, mayor la proporción de variabilidad explicada.

b) RMSE lineal (Raíz del error cuadrático medio, °)

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) mide la magnitud promedio del error entre valores observados y estimados, penalizando más los errores grandes (Stadistics, 2021)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\left( \frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \right)}$$

donde  $y_i$  es el valor observado,

$\hat{y}_i$  el valor estimado

n el número de observaciones

El RMSE se expresa en las mismas unidades de la variable. Un RMSE = 0 implica ajuste perfecto; valores más altos reflejan mayor dispersión

c) CCC lineal (Coeficiente de concordancia de Lin)

El Coeficiente de Concordancia de Lin (CCC) fue propuesto por Lin L (L, 1989) como una medida de acuerdo entre dos métodos de medición en datos continuos.

$$\rho_c = (2\sigma_{xy}) / (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + (\mu_x - \mu_y)^2)$$

donde  $\sigma_{xy}$  es la covarianza entre los métodos,

$\sigma_x^2$  y  $\sigma_y^2$  las varianzas

$\mu_x$  y  $\mu_y$  las medias.

Un valor de CCC  $\geq 0.8$  indica alta concordancia (NCSS, 2017).

d)  $\rho$  circular (Rho circular, coherencia angular)

El coeficiente de correlación circular ( $\rho$ ) fue propuesto por Fisher (1983) para analizar relaciones entre datos angulares, respetando la naturaleza cíclica de  $0^\circ \equiv 360^\circ$

$$\rho = [\sum \sin(x_i - \bar{x}) \sin(y_i - \bar{y})] / \sqrt{([\sum \sin^2(x_i - \bar{x})] [\sum \sin^2(y_i - \bar{y})])}$$

donde  $x_i, y_i$  son los ángulos comparados

$\bar{x}, \bar{y}$  las medias angulares respectivas.

e) MAAE (Mean Absolute Angular Error, °)

El Error Angular Absoluto Medio (MAAE) corresponde al promedio de las diferencias angulares absolutas entre dos series de datos, considerando la mínima distancia angular

$$\text{MAAE} = (1/n) \sum \Delta\theta_i$$

$$\text{con } \Delta\theta_i = \min(|y_i - x_i|, 360^\circ - |y_i - x_i|)$$

### **3.3. Marco conceptual**

- **Falla**

Las fisuras en la corteza terrestre donde ha ocurrido un movimiento se pueden observar. Las fallas pueden presentarse a nivel local, en medidas de milímetros o metros, y a nivel regional, en distancias de kilómetros. Es común que se acumule material de relleno en estas fracturas, el cual consiste en sustancias débiles y de baja resistencia que facilitan el desplazamiento (Vega, 2023).

- **Juntas**

Las fracturas en las rocas que no han sufrido desplazamiento son de origen geológico. Las juntas aparecen en grupos dentro de un macizo rocoso. Los conjuntos que presentan juntas paralelas o casi paralelas forman sistemas cuando se cruzan. Las juntas pueden estar rellenas o abiertas. (Vega, 2023).

- **Modelo del macizo rocoso**

Para su uso en el análisis de estabilidad y como base para el diseño de taludes, es el que brinda las características ingenieriles del macizo rocoso (Yalan & Valenzuela, 2020).

- **Modelo Digital de Afloramiento (MDA)**

Las relaciones espaciales originales son preservadas por representaciones digitales de los afloramientos en tres dimensiones y de forma realista (Baquero & Tabares, 2016).

## Capítulo IV

### Marco geológico

#### 4.1. Geomorfología Regional

La zona de estudio se encuentra ubicada, a nivel regional, en el cuadrángulo 36-V de Pachía, en la ladera occidental de la Cordillera Occidental de los Andes Centrales, con una superficie de aproximadamente 5000 km<sup>2</sup>. La región política de interés se sitúa al noreste y al norte de la ciudad de Tacna.

Según Acosta et al. (2011), las planicies costaneras y la Cordillera Occidental fueron identificadas como unidades geomorfológicas regionales o morfoestructurales. Solo la vertiente oeste de la Cordillera Occidental se encuentra en el área mencionada, sin incluir la cordillera en su totalidad. El límite de la cuenca Moquegua se ubica en la ladera oeste de dicha cordillera. La superficie plana que resulta de los depósitos de ignimbritas se denomina Superficie Huaylillas y se considera una unidad geomorfológica importante. La erosión de los ríos principales, que da forma a los valles y terrazas, representa un fenómeno geomorfológico significativo.

##### *4.1.1. Ladera oeste de la Cordillera Occidental*

Una serie de montañas empinadas, que se extienden entre los 1200 y 4200 metros sobre el nivel del mar, constituye una parte de la Cordillera Occidental. Las pendientes de estas montañas varían de moderadas a pronunciadas y están rodeadas por valles profundos en forma de "V", como resultado de la erosión causada tanto por las escasas precipitaciones en esta región como por las lluvias intensas en la Cordillera Occidental

En promedio, los ríos Sama, Caplina y Palca son los más importantes que fluyen en dirección suroeste. A pesar de que el valle se abre en algunos pequeños territorios, como Palca y Caplina, su curso se extiende principalmente por valles angostos y con pendientes pronunciadas. En la zona de Palquilla y sus alrededores, las montañas más altas, formadas por rocas volcánicas y sedimentarias, alcanzan altitudes máximas de hasta 4200 metros sobre el nivel del mar. La falla Calientes limita la ladera al suroeste, mientras que el trazo principal del sistema de fallas Incapuquio la limita al noreste. La orientación preferida de esta unidad es de noroeste a sureste.

#### ***4.1.2. Planicie costanera***

Con una pendiente regional del 0,5 % al 1 % y un ancho promedio de 55 km, se presenta como una franja alargada en dirección NO-SE. Las altitudes varían entre los 40 y 1100 msnm. Las montañas que conforman la ladera oeste de la Cordillera Occidental también limitan el recorrido de la falla Calientes al norte. El relieve es ondulado debido a la erosión provocada por pequeñas e importantes quebradas en tierras de edad miocena, así como por depósitos detríticos de edad plioceno-cuaternaria.

La ubicación y el desarrollo de asentamientos significativos, como la ciudad de Tacna y las localidades de Pachía y Calientes, ubicadas en la quebrada del río Caplina, son posibles gracias a esta unidad geomorfológica.

#### ***4.1.3. Superficie Huaylillas***

Se considera una unidad geomorfológica importante porque representa la acumulación continua de estratos significativos de tobas y flujos piroclásticos a lo largo de las cadenas montañosas y valles. Se orienta hacia el suroeste y presenta un relieve irregular y ondulado, con inclinaciones que oscilan entre el 7 y el 10 %.

Se manifiestan como mesetas sobre montañas y valles que existieron durante el Mioceno y evidencian una actividad volcánica notable que tuvo lugar en el pasado. Gracias al clima seco de la zona, estas planicies o superficies se han conservado muy bien a lo largo del tiempo. Los valles más recientes, creados por la erosión hídrica, desgastan estas tobas, revelando los paleorelieves que existían antes de este importante fenómeno volcánico.

#### ***4.1.4. Valles y terrazas***

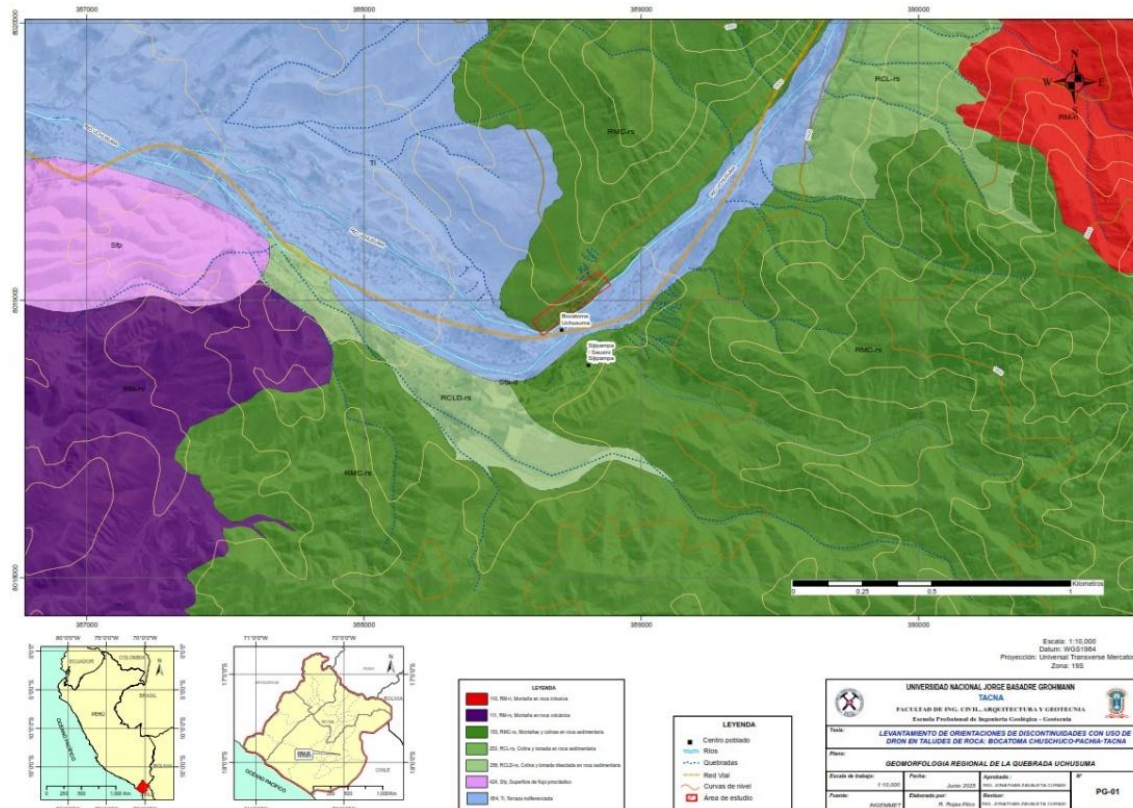
Las quebradas más importantes del área son las quebradas Sama, Chero, Caplina, Palca, Palcota, Cobani y Tembladera, que se dirigen hacia el suroeste. Sus fuentes atraviesan el flanco occidental de la Cordillera Occidental, creando profundas incisiones en forma de "V" a lo largo de su recorrido. Se convierten en quebradas extensas con pendientes suaves cerca del límite con las pampas costaneras, a pesar de que sus laderas son muy inclinadas.

Uno de los valles más significativos es el del río Caplina, que presenta un lecho cada vez más amplio a medida que avanza a través de las pampas costaneras, hasta llegar a la ciudad de Tacna, donde forma una llanura de inundación de 4,5 km de ancho, limitada a ambos lados por laderas con pendientes moderadas y alturas diversas, con un desnivel máximo de 220 m, observado en la zona de Chuschuco y Calientes. El valle ofrece condiciones favorables para el establecimiento de poblaciones significativas, como la ciudad de Tacna y las localidades de Pachía y Calientes, que se encuentran a lo largo de su trayecto.

El lecho actual del río Caplina, entre Calientes y Challalita, atraviesa una serie de terrazas formadas por gravas. En esta zona se pueden identificar tres terrazas principales: una a 30 m, otra a 60 m y otra a 100 m por encima del nivel del río.

**Figura 13**

*Mapa de unidades geomorfológicas*



*Nota.* Mapa de unidades geomorfológicas Regionales. Fuente: Geología de los Cuadrángulos de Pachía y Palca Hoja 36-v y 36-x INGEMMET (2011). Elaboración propia.

## 4.2. Geología Regional

Según (INGEMMET, 2011), la región de estudio se encuentra inserta en el flanco occidental de la Cordillera Occidental de los Andes del sur del Perú, en el extremo sur de la cuenca Moquegua, área caracterizada por una compleja evolución geológica, dominada por eventos tectónicos, magmáticos y sedimentarios desde el Proterozoico hasta el Cuaternario.

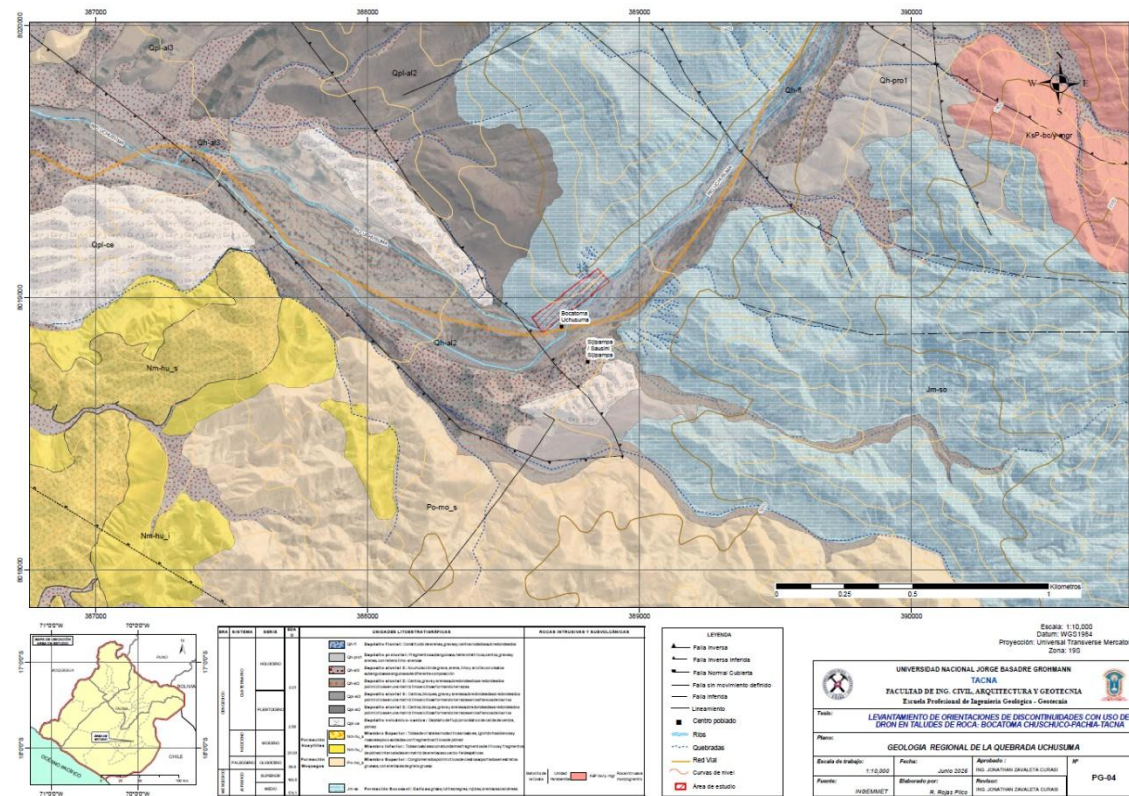
El basamento geológico regional está conformado por rocas metamórficas del Complejo Basal de Arequipa, sobre las cuales se encuentran unidades sedimentarias del Paleozoico, tales como el Grupo Ambo (Carbonífero) y las calizas del Devónico, además de importantes afloramientos de rocas volcánicas mesozoicas, como las de la Formación Chocolate.

Sobre estas unidades se desarrolla un extenso registro volcánico y sedimentario del Cenozoico, representado por las formaciones volcánico-sedimentarias del Grupo Toquepala (Cretácico superior–Paleógeno) y las secuencias continentales de la Formación Moquegua, que registran el relleno de la cuenca sinorogénica del mismo nombre. La actividad volcánica continúa con las Formaciones Huaylillas y Barroso, evidenciando una intensa evolución eruptiva durante el Mioceno y el Pleistoceno.

Intrusivos graníticos y dioríticos, asociados al magmatismo Paleógeno y Eoceno, como los de la Superunidad Yarabamba y Challaviento, también están presentes, generando contactos intrusivos y estructuras de deformación importantes a lo largo del sistema de fallas Incapuquio.

**Figura 14**

*Mapa geológico regional de Pachía*



Nota. Mapa Geológico Regional. Fuente: Geología de los Cuadrángulos de Pachía y Palca Hoja 36-v y 36-x INGEMMET (2011). Elaboración propia.

### 4.3. Estratigrafía Regional

La zona donde se han acumulado los sedimentos de la cuenca Arequipa. Las formaciones más antiguas de esta cuenca son ortogneises bandeados que solo aparecen en las cercanías de Huacano Chico y datan del Proterozoico inferior. Esta cuenca se encuentra sobre las rocas del basamento metamórfico Mal Paso.

Encima de ellas, en una discordancia erosional, se encuentran conglomerados, lutitas, calizas y areniscas del Grupo Ambo, que corresponden al Misisipiano. El arco volcánico Chocolate, formado por rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Chocolate, fue el primer fenómeno volcánico que ocurrió en la zona entre el final del Triásico y el Pliensbachiano superior. La formación de la cuenca Arequipa comienza con estas rocas, posiblemente mediante un proceso de extensión de tipo trasarco.

Intercalaciones de calizas, areniscas y conglomerados de la Formación Socosani, que corresponden a plataformas carbonatadas someras, se depositaron en la cuenca durante el Toarciano y el Bathoniano, bajo diferentes regímenes tectónicos de distensión. Sedimentos continentales y deltaicos, conocidos como Grupo Yura, se acumulan en la cuenca Arequipa desde el Calloviano hasta el comienzo del Cretácico inferior; estos sedimentos superan los 1 700 m.

El arco volcánico Toquepala es un frente magmático subaéreo que se desarrolló al final del Cretácico superior y durante el Paleoceno. La producción de tobas y los flujos de andesitas porfiríticas y basaltos, que se intercalan con conglomerados y areniscas, conforman este arco. Estas formaciones pertenecen al Grupo Toquepala desde el punto de vista estratigráfico.

El levantamiento de los Andes centrales, a partir del Eoceno medio, permitió la creación de cuencas de antearco, como la cuenca Moquegua. Esta cuenca recibió

sedimentos principalmente de la erosión de la Cordillera Occidental. Conglomerados, canales de areniscas, arcillas, lutitas rojizas, areniscas tufáceas y tufos volcánicos forman parte de su litología.

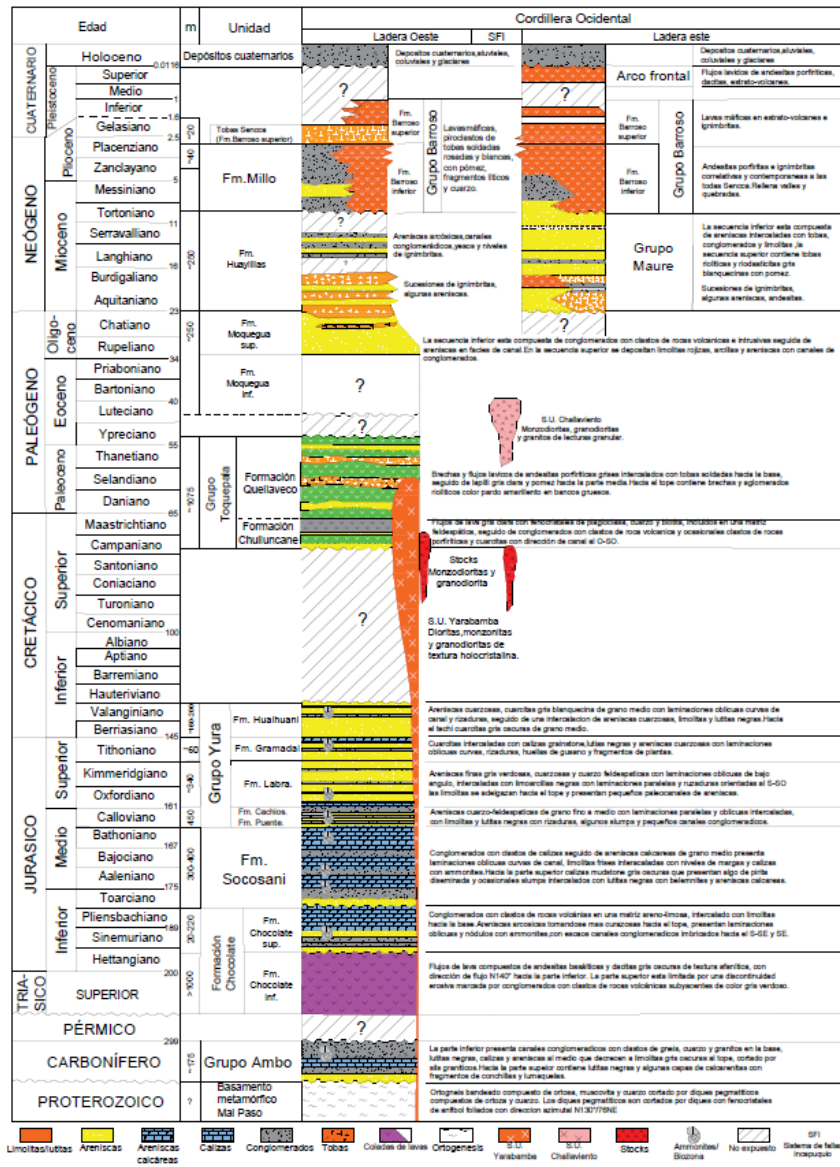
La Formación Huaylillas llenó la cuenca Moquegua después de depositarse un nuevo episodio sedimentario. La formación es una serie de conglomerados intercalados con diferentes niveles volcánicos como resultado de la actividad del arco Huaylillas.

La creación de la cuenca intramontañosa Maure con contenido de sedimentos lacustres, es consecuencia de una elevación estructural en la Cordillera Occidental durante el Oligoceno, provocada por la actividad del sistema de fallas Incapuquio. En el Oligoceno superior, las cuencas de Maure y Moquegua reciben ignimbritas del arco volcánico Huaylillas. En los arcos volcánicos del Barroso, desde el Mioceno superior hasta el Pleistoceno medio. Por último, aparecen rocas volcánicas del arco volcánico en actividad.

Las formaciones del Grupo Barroso se localizan en la ladera este de la Cordillera Occidental y en la propia cordillera, abarcando varios edificios volcánicos que, en conjunto, constituyen el Complejo Fisural Barroso. Este complejo está compuesto por una serie de montañas o conos volcánicos dispuestos de norte a sur.

Se observan intrusiones de rocas graníticas que atraviesan las secuencias de rocas sedimentarias y volcánicas. El arco volcánico Toquepala, es el lugar donde se encuentran los pequeños stocks más antiguos, cuyas edades datan del Campaniano. Al oeste de la traza principal de la falla Incapuquio se encuentra la Superunidad Yarabamba del Paleoceno inferior, mientras que la Superunidad Challaviento del Eoceno medio se encuentra al este de esta misma traza de falla. (INGEMMET, 2011).

**Figura 15**  
*Columna Estratigráfica regional*



Organización estratigráfica generalizada de los cuadrángulos de Pachía(36-v) y Palca(36-x). Tomado de Marocco (1984), Vicente (1989), Womer et al. (2000), Monge & Cervantes (2000), Pino et al. (2002), Flores et al.(2004), Jacay et al. (2004), Sempere et al. (2004a), Quang et al. (2005), Roperch et al. (2006), Thouret et al. (2007), Acosta et al.(2008), Mamani et al. (2010), y del presente estudio

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN  
TACNA  
FACULTAD DE ING. CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA  
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA, BOCATOMA CHALCHURO PACHIA-TACNA

Columna Estratigráfica Regional del Cuadrángulo de Pachía y Palca, Hoja 36-v y 36-x

CE-01

*Nota.* Columna Estratigráfica Regional. Fuente: Geología de los Cuadrángulos de Pachía y Palca Hoja 36-v y 36-x INGEMMET (2011). Elaboración propia.

#### 4.4. Estructuras tectónicas regionales

Las etapas finales de la deformación andina, que ocurrieron desde el periodo Turoniano-Coniaciano (Cretácico superior) hasta el presente, son la causa principal de los rasgos estructurales.

Se han identificado dos direcciones principales de fallas. El sistema de fallas Incapuquio NO-SE coincide con las características estructurales más importantes del sur de Perú. En contraste, el segundo sistema de fallas con dirección promedio de NE-SO y presenta en quebradas.

El sistema de fallas Incapuquio es extenso y complejo, ya que abarca fallas activas e inactivas a lo largo de su trayectoria. La distinción y la organización de rasgos notables en la morfotectónica y la litoestratigrafía de áreas particulares son algunas de las implicaciones de la complejidad tectónica de este sistema. En consecuencia, se divide en dos sectores.

En el sector de la ladera oeste de la Cordillera Occidental, una dirección NO-SE permanece presente. La falla Calientes, que muestra indicios de actividad tectónica reciente, marca su límite al suroeste; la falla Incapuquio, por otro lado, marca su límite al noreste. Debido a la presencia de varias fallas que han tenido actividad en diferentes épocas geológicas, la tectónica en esta zona es más compleja y evidente. Las principales fallas presentes son:

- Falla Incapuquio, agrupación de fallas con características notables que están alineadas entre sí o que muestran una dirección específica constante. El límite entre los afloramientos de rocas de la Formación Moquegua Superior, limitados hacia el suroeste, y los afloramientos de rocas del Grupo Maure en el noreste se define como la falla principal del extenso Sistema de Fallas Incapuquio.

- Falla Cerro Negro, se observan características de tipo inverso con inclinaciones casi verticales hacia el noreste, así como un paralelismo con las fallas de Incapuquio. Las rocas paleozoicas son afectadas por esta falla, lo que provoca su desplazamiento sobre las rocas de las formaciones Socosani, Puente y Grupo Toquepala.
- Falla Huacano, con un buzamiento de  $70^\circ$  hacia el este, presenta una orientación promedio en dirección norte-sur de tipo inversa. Ha desplazado grandes cuerpos intrusivos de granito de la Super Unidad Challaviento, así como afloramientos de rocas antiguas del basamento de Arequipa, lo cual se considera una de las pruebas del mayor desplazamiento y esfuerzo vertical.
- Falla Caplarcuna, en contraste con las fallas Hornune y Huacano, que están relativamente cerca y hacia el oeste, presenta un ángulo de buzamiento de  $30^\circ$  con dirección suroeste. Se entrelaza con las fallas Incapuquio y Cerro Negro y constituye el segmento sureste de la estructura romboédrica, con una dirección noroeste-sureste.
- Falla Chañal, la dirección de ONO-ESE es muy importante. Se encuentra con la falla Palca después de recorrer más de 20 km. Las rocas del Grupo Toquepala se superponen a la Formación Moquegua superior en la quebrada Chero.
- Falla Palca, su dirección es NO-SE y tiene un buzamiento promedio de  $40^\circ$  hacia el noreste. Se presenta en forma de escamas, donde tres estructuras importantes y paralelas se entrelazan, lo que provoca múltiples cabalgamientos.
- Falla Rosarine, en el área conocida como Chañal, la dirección NO-SE atraviesa la quebrada Caplina de manera lateral; en este lugar se puede observar la conexión con las grandes fallas de Chañal y Las Peñas.
- Falla Las Peñas, la falla Calientes, en el área de la quebrada Viñani, es el

lugar de origen de esta falla de movimiento inverso. La quebrada del río Caplina cruza las fallas Rosarine y Chañal al oeste de Chañal y se extiende en dirección noroeste-sureste. Esta falla tiene curvaturas hacia el suroeste y el noreste.

- Falla Calientes, su alcance es considerable y cubre una amplia zona. De NO a SE es la dirección promedio de su trayecto. Un componente hacia el oeste y un buzamiento entre  $65^\circ$  y  $68^\circ$  hacia el este lo clasifican como una falla inversa. Debido a su influencia en los sedimentos aluviales del Holoceno y a su relación con los movimientos sísmicos, se cree que esta falla está activa. Las imágenes satelitales muestran un marcado lineamiento geomorfológico entre las Planicies costeras y la vertiente occidental de la Cordillera Occidental, que se extiende desde la quebrada Locumba hasta el norte de Chile.

En el sector de la planicie costanera no hay pruebas significativas de actividad tectónica en términos estructurales, a excepción del lineamiento Caplina. Este lineamiento abarca desde la Cordillera Occidental hasta la costa del Perú y está situado en la ruta principal del río Caplina. Este valle tiene una anchura estrecha, con laderas empinadas e inclinaciones pronunciadas que, en muchas ocasiones, forman paredes verticales bastante elevadas. Los bloques de material volcánico del Grupo Toquepala se han desplazado al fondo de la quebrada a ambos lados del río Caplina, generando una amplia zona, y se pueden encontrar fallas normales lístricas en la zona de la Cruz de Pallagua. Los habitantes de la localidad de Caplina han utilizado características morfológicas similares, pero en una escala más amplia, para establecer la localidad. La actividad tectónica relacionada con el lineamiento Caplina provoca derrumbes concentrados en ambos lados de la quebrada. (INGEMMET, 2011)



## **4.5. Geomorfología Local**

### **4.5.1. Drenaje**

El río Uchusuma, también llamado Yungane, tiene un cauce principal que fluye de noreste a suroeste hasta desembocar en el océano Pacífico.

El transvase de las aguas del río Uchusuma, que forma parte de la cuenca del Titicaca, es el motivo de su primer nombre. Por otro lado, una de las quebradas más importantes de esta región hidrográfica lleva el nombre de Yungane.

Las quebradas Yungane y Vilavilani forman el río Uchusuma, también conocido como Yungane. Sus fuentes se encuentran en los puntos conocidos como Paso Huaylillas Norte y Paso Huaylillas Sur, en la frontera con Chile. El río Yungane recibe afluentes de las quebradas Cobani, Viñani y Cauñani antes de desembocar en el océano Pacífico; al pasar cerca de la ciudad de Tacna, forma la quebrada Arunta, que se conoce como Hospicio en su desembocadura.

Es posible identificar quebradas que alimentan las aguas del río Uchusuma. Se distinguen dos grupos: el primero, de quebradas por las que regularmente discurren aguas, y el segundo, de quebradas intermitentes y, por lo general, secas.

### **4.5.2. Unidades morfológicas**

Las principales unidades geomorfológicas identificadas en la zona de estudio son las siguientes:

#### **4.5.2.1. Unidad de montaña y colina**

##### **Subunidad de montañas y colinas en roca intrusiva**

Las montañas se presentan como elevaciones alargadas, con pendientes que van de moderadas a altas y que alcanzan hasta los 70°.

Las colinas se presentan en formas irregulares y alargadas, con laderas con inclinaciones de bajas a medianas y con cimas ocasionalmente ligeramente redondeadas.

#### **4.5.2.2. Unidad de colina y lomada**

##### **Subunidad de colina en roca sedimentaria**

Se presentan en rocas sedimentarias de la Formación Socosani, que han sido disminuidas por procesos de erosión, y se presentan en forma de elevaciones alargadas con laderas de pendiente baja a moderada.

##### **Subunidad de colina o lomada piroclástica**

Laderas con una pendiente moderada (entre 5° y 25°) y erosión diferencial son características de las geoformas convexas hechas de material volcánico piroclástico. En general, estos materiales tienen una alta probabilidad de causar deslizamientos de tierra y son poco cohesivos. Los depósitos de cenizas que surgieron durante el Holoceno constituyen la litología de estas geoformas.

##### **Subunidad de colina y lomada en roca sedimentaria**

Corresponde a los afloramientos de roca sedimentaria de la Formación Socosani han sido modificados por procesos de denudación. Las elevaciones alargadas con laderas disectadas y pendientes entre moderadas y bajas constituyen

estos afloramientos. Las inclinaciones de los terrenos varían entre fuertes ( $15^\circ$  -  $25^\circ$ ) y muy fuertes ( $25^\circ$  -  $45^\circ$ ). La forma de las laderas es uniforme.

#### **Subunidad de colina y lomada disectadas en roca sedimentaria**

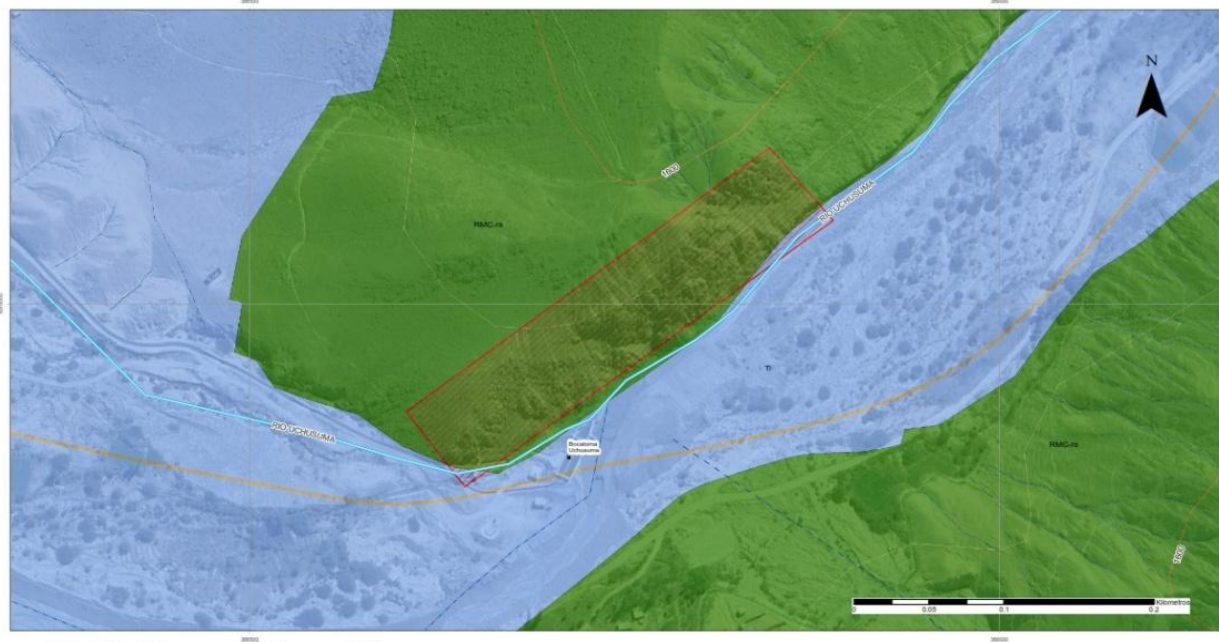
Agrupaciones de colinas y lomas, creadas en rocas sedimentarias que han sufrido una intensa erosión, muestran una gran cantidad de desglose causado por quebradas.

#### **4.5.2.3. Unidad de planicie**

##### **Subunidad de vertiente o piedemonte aluvio-torrencial**

Es una llanura que se encuentra en sistemas montañosos o al pie de las montañas andinas. La acumulación de aguas correntosas estacionales, que son inusuales, es la causa. Se presenta en el área de estudio por medio de corrientes de lodos y detritos, así como por el curso del río Uchusuma.

**Figura 17**  
*Mapa geomorfológico local*



*Nota. Mapa de unidades geomorfológicas locales mapeados en la zona de estudio. Elaboración propia.*

#### **4.6. Geología local**

La geología local de la zona de la bocatoma Chuschuco está dominada por secuencias sedimentarias y volcánicas del Mesozoico y del Cenozoico, fuertemente deformadas por la actividad tectónica asociada a los sistemas de fallas Incapuquio y Calientes. Las unidades aflorantes más representativas corresponden a la Formación Socosani, la Formación Moquegua y a depósitos cuaternarios recientes.

La Formación Socosani aflora como colinas alargadas y erosionadas, conformadas por calizas, margas, lutitas y niveles de areniscas cuarzosas, con marcada influencia tectónica y diques andesíticos intrusivos. Esta unidad se interpreta como depósitos marinos de plataforma carbonatada.

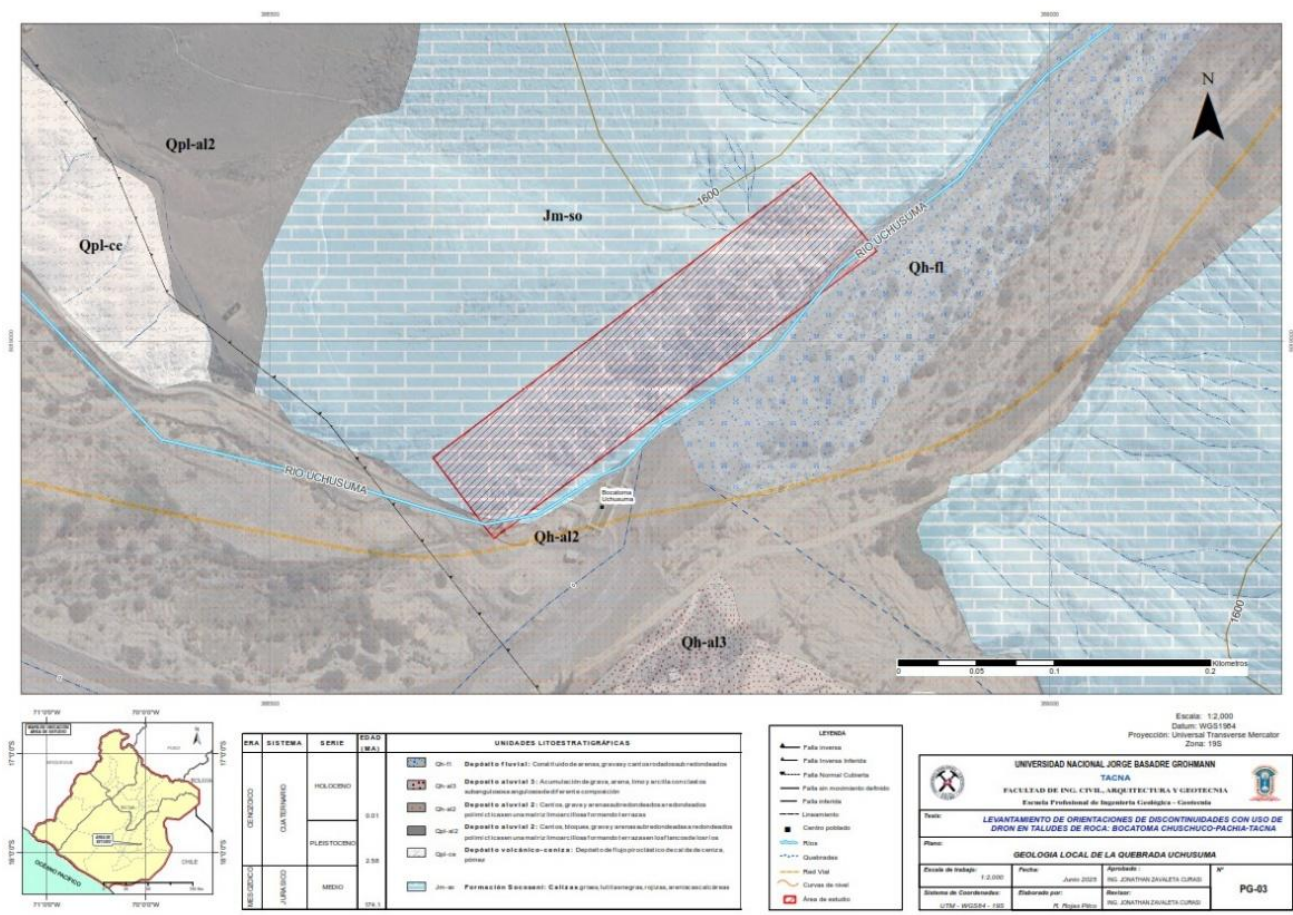
La Formación Moquegua, principalmente en su miembro superior, aflora en forma de colinas y lomadas disectadas. Está compuesta por conglomerados polimícticos con clastos volcánicos y sedimentarios, areniscas y tobas volcánicas, reflejando un ambiente de abanico aluvial a fluvial con influencia volcánica.

Sobre estas unidades se identifican depósitos piroclásticos, cenizas holocenas y tufos, producto de eventos volcánicos recientes. Asimismo, se encuentran depósitos aluviales actuales asociados al cauce del río Uchusuma, conformados por arenas, gravas y conglomerados no consolidados, que constituyen parte importante de la dinámica fluvial local.

Finalmente, en la parte más elevada del área, afloran cuerpos intrusivos granodioríticos de la Superunidad Yarabamba, caracterizados por su textura inequigranular y su composición mineralógica de plagioclasa, hornblenda, biotita y cuarzo.

**Figura 18**

*Mapa geológico local*



Nota. Mapa de unidades geológicas locales mapeados en la zona de estudio. Elaboración propia.

## **4.7. Estratigrafía Local**

### **4.7.1. Formación Socosani**

La sección basal de la Formación Socosani presenta características erosivas; comienza con conglomerados compuestos por clastos de caliza. Su matriz es calcárea y contiene granos finos bien compactados por cemento calcáreo; además, presentan formas subredondeadas y diámetros que pueden alcanzar los 10 cm. Aparte de clastos particulares de caliza gris oscura, los estratos de calcoarenita gris exhiben un grano medio y una laminación oblicuamente curva de tipo canal. La sección fundamental de la Formación Socosani también contiene grupos de calizas estratocrecientes y niveles delgados de margas. Algunos diques de andesita gris oscura se pueden observar a lo largo de estos afloramientos.

La sección media está constituida por un potente nivel carbonatado formado por calizas tipo grainstone y mudstone dispuestas en estratos paralelos y completamente influenciadas por fallas. En la parte superior se encuentran intercaladas limolitas, lutitas y delgados niveles de areniscas cuarzosas de grano fino, donde pequeñas rizaduras indican una dirección de flujo promedio hacia el noroeste.

### **4.7.2. Formación Moquegua**

#### **4.7.2.1. Miembro superior**

La base se compone principalmente de conglomerados formados por fragmentos de roca volcánica. Estos fragmentos son angulosos y presentan una gran variabilidad en su tamaño, alcanzando diámetros de hasta 30 cm, lo que indica un transporte breve. La matriz es fina, de naturaleza arcillosa y poco consolidada. También se pueden observar niveles conglomerádicos compuestos por fragmentos

de diversos tamaños, orientados hacia el suroeste. Con una matriz limitada, estos fragmentos están conectados entre sí, dejando espacios vacíos entre ellos.

Areniscas cuarzofeldespáticas de grano medio están intercaladas con delgados canales de conglomerado y finas capas de tobas blancas que contienen cristales de biotita ligeramente alterados y fragmentados en la parte superior.

#### **4.7.3. Depósitos de ceniza**

Las terrazas y los depósitos de piedemonte están cubiertos por una capa delgada y discontinua de ceniza y tufo volcánico. La ceniza volcánica es un polvo suelto con fragmentos de pómez blanca y cristales de cuarzo en forma bipiramidal, que se distingue desde el punto de vista litológico. Estos depósitos se presentan como una masa homogénea, sin estructura definida y carente de estratificación; sin embargo, a cierta profundidad por debajo de la superficie, el material se vuelve más denso y presenta la textura de un tufo.

#### **4.7.4. Depósitos aluviales**

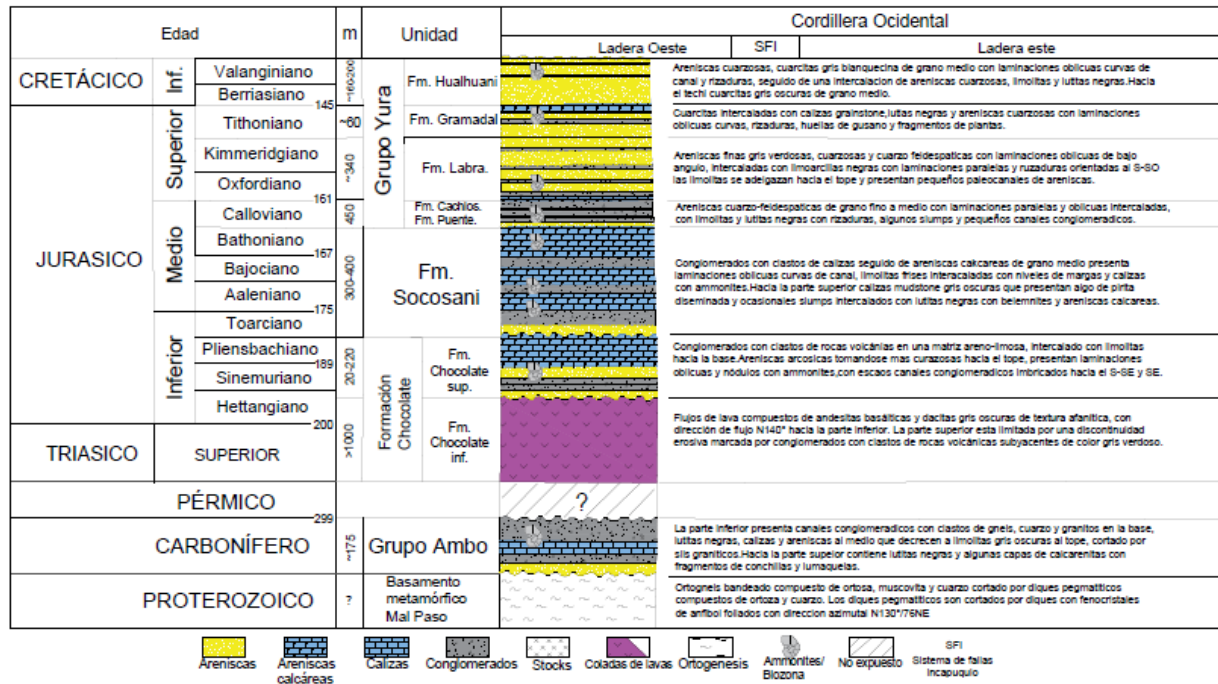
Se trata de depósitos de arenas y gravas que los ríos están transportando y depositando en la actualidad. Debido al transporte de materiales a través de las quebradas, estos depósitos generalmente se originan y se acumulan temporalmente en las orillas de los ríos, hasta que un evento fluvial importante los lleve a lugares más lejanos. Conglomerados, arenas y arcillas no consolidadas que se entrelazan de manera irregular forman estos depósitos. Los clastos volcánicos, junto con algunos clastos de areniscas y lutitas, componen los conglomerados; sus formas van de subangulosas a redondeadas y sus diámetros varían a medida que se acercan a la costa.

#### ***4.7.5. Super Unidad Yarabamba***

Las granodioritas, que contienen cristales de plagioclasas, hornblenda, cuarzo, biotita y ortosa, constituyen la mayor parte de las rocas de la Super Unidad Yarabamba. Con una textura holocristalina, inequigranular y hipidiomórfica, su aspecto típico es de color gris claro a blanquecino. Las mineralogías mencionadas se pueden identificar macroscópicamente en las categorías de granodioritas, monzodioritas y dioritas.

**Figura 19**

*Columna estratigráfica local*



		UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN TACNA FACULTAD DE ING. CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia			
LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA, BOCATOMA CHUSCHUGO-PACHA-TACNA					
Tema: COLUMNA ESTRATIGRÁFICA LOCAL DE LA ZONA DE ESTUDIO		Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: R. Rojas Pilo	Aprobado: ING. JORGE BASADRE GROHMANN	Revisado: ING. ALBERTO VILLALBA
PLAN:					INGENIERIA
COLUMNA ESTRATIGRÁFICA LOCAL DE LA ZONA DE ESTUDIO					CE-02

*Nota. Columna estratigráfica local de la zona de estudio. Elaboración propia.*

#### **4.8. Estructuras tectónicas locales**

La zona de la bocatoma Chuscuco se encuentra en una región estructuralmente activa, influenciada por el Sistema de Fallas Incapuquio y fallas subsidiarias como la falla Calientes. Estas estructuras han controlado el emplazamiento de unidades litológicas, la orientación de drenajes y la disposición del relieve, y han generado zonas de debilidad que inciden directamente en la estabilidad geotécnica de los taludes y laderas del área.

En el sector de Chuscuco se observa una marcada orientación estructural predominante NO-SE, con fallas de tipo inverso y componentes de rumbo, cuyas evidencias se manifiestan en fracturas subparalelas, planos de cizalla, cabalgamientos y desplazamientos de unidades litológicas, especialmente entre las formaciones Socosani y Moquegua.

Los buzamientos estructurales registrados muestran inclinaciones que varían entre  $40^\circ$  y  $70^\circ$ , principalmente hacia el NE, y controlan la geometría de las discontinuidades estructurales presentes en los taludes de roca de la zona de estudio. Esta configuración tectónica ha favorecido la generación de terrazas escalonadas, la acumulación de materiales coluvio-aluviales en zonas bajas y la creación de escarpes estructurales asociados a procesos de inestabilidad y deslizamientos, especialmente durante eventos hidrometeorológicos extremos.

Además, lineamientos estructurales activos como el del río Caplina y sus ramales permiten inferir actividad tectónica cuaternaria, lo que debe considerarse en la evaluación geotécnica y de peligros naturales de la zona.

## Capítulo V

### Marco metodológico

La metodología empleada consistió en las siguientes fases:

#### 5.1. Trabajos previos

En esta fase se recopiló y validó la información existente y se planificaron los trabajos de campo. Esta etapa incluyó actividades de investigación realizadas en el área de estudio, centros de investigación, bibliotecas generales y especializadas, así como en centros de documentación. Se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva y actualizada sobre conceptos relacionados con la geología, la geotecnia y el uso de drones en el levantamiento de la orientación de estructuras en taludes de roca. Se revisaron fuentes secundarias, como libros, artículos científicos, tesis y publicaciones especializadas en revistas académicas.

#### 5.2. Trabajo de Campo

En esta etapa se realizaron las siguientes actividades:

##### 5.2.1. *Mapeo Geológico*

Se efectuó el reconocimiento y mapeo en campo de las formaciones geológicas (litología), la geomorfología y la estructura geológica a nivel regional y local en la zona de estudio. Se generaron estaciones de mapeo debidamente georeferenciadas.

##### 5.2.2. *Levantamiento de discontinuidades*

Se realizó el reconocimiento y toma de datos de las estructuras principales, secundarias y discontinuidades con métodos tradicionales haciendo uso de la

brújula Brunton azimutal para la toma de datos de dip/dipdirection con su punto GPS respectivo.

### 5.2.3. Levantamiento con Dron

#### 5.2.3.1. Control y mitigación de errores

Durante el levantamiento digital de discontinuidades mediante imágenes capturadas por dron, se reconocen posibles fuentes de error asociadas a factores ambientales y técnicos. Para garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos, se implementaron las siguientes medidas de control:

- **Condiciones climáticas**

**Selección de ventanas climáticas óptimas:** El vuelo se programó en un día con cielo despejado o parcialmente nublado, evitando condiciones adversas como lluvia, niebla o vientos superiores a 20 km/h que pudieran afectar la estabilidad del dron y la calidad de las imágenes.

**Registro meteorológico:** Se documentaron las condiciones climáticas durante el vuelo (temperatura, velocidad del viento, humedad relativa) para evaluar su posible influencia en la calidad de los datos.

**Control de iluminación:** Se priorizaron horarios con buena iluminación natural (entre las 9:00 a.m. y las 3:00 p.m.) para minimizar sombras profundas que dificulten la identificación de discontinuidades.

- **Validación cruzada**

Los datos obtenidos digitalmente fueron comparados con los levantamientos manuales realizados en campo, permitiendo identificar y

corregir posibles inconsistencias atribuibles a errores de captura o interpretación.

Así mismo el trabajo en campo para el vuelo con dron tuvo las siguientes consideraciones:

**Tabla 4**

*Parámetros para el vuelo con dron*

<b>Parámetro</b>	<b>Detalle</b>
Número de vuelos	2 (pre vuelo y vuelo)
Número de corridas	8
Ángulo de cámara	70°
Altura de vuelo	80 m
Traslape lateral	85%
Traslape frontal	85%
Longitud horizontal de vuelo	350 m

*Nota.* Parámetros considerados para el vuelo con dron. Elaboración Propia.

### **5.2.3.2. Procesamiento de imagen de Dron**

Se realizó el levantamiento de nube puntos y toma de fotografías utilizando el dron, con los siguientes pasos:

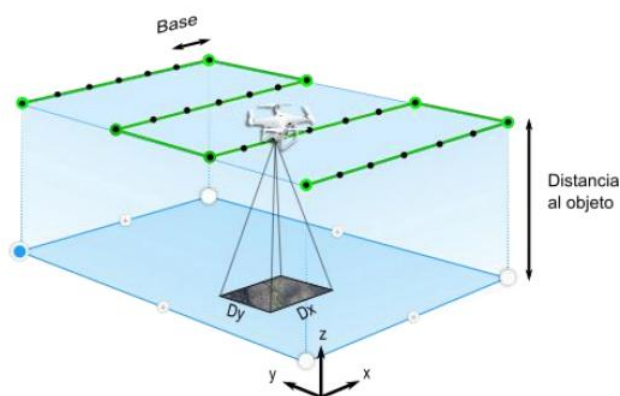
- Pre Vuelo: Primero se verificó la correcta condición climática, calibración del dron con los satélites tomando en cuenta el punto de georreferencia con

el Equipo RTK para poder obtener correcciones instantáneas de georreferenciación, considerando también estaciones geodésicas para lograr una mayor exactitud. Luego, se activan los sensores del dron y se verifica que esté alineado con el equipo D-RTK2 y con los satélites necesarios, y se procede a realizar el pre-vuelo. En pocas palabras el pre-vuelo se realiza para reconocer y crear una superficie, conocer la altura y definir el mejor ángulo de la cámara con el cual se tomarán las imágenes del talud con la finalidad de hacer el diseño de vuelo (plan de vuelo) y ejecutar el vuelo.

- Plan de vuelo: Teniendo en cuenta todas las variables del prevuelo y ya teniendo un ángulo perpendicular definido con respecto al talud, contando ya con el modelo digital del terreno (obtenido en el pre-vuelo), se predefinieron rutas que cubran el área del talud, teniendo en cuenta ya la distancia focal, la distancia del talud, la distancia de cobertura, la sobreposición o traslape lateral y frontal y con la resolución de imágenes.

### Figura 20

*Esquema del plan de vuelo de un levantamiento fotogramétrico*



*Nota.* Tomado de Villareal (2019).

- Vuelo: Se procede a realizar el vuelo siguiendo el plan de vuelo con las rutas predefinidas que cubran el área del talud.

### **5.3. Trabajo de Gabinete**

Se realizó el procesamiento de la información levantada en campo, correlación e interpretación de resultados. Para luego finalizar con el análisis estadístico y comparativo de los resultados obtenidos con el método tradicional o manual y el método digital drone.

#### ***5.3.1. Generación de mapas geológicos***

Con información del mapeo en campo, contactos litológicos y geomorfológicos definidos y georeferenciados; estructuras principales reconocidas y medidas se generan los planos según la escala de información.

- Mapa geomorfológico regional.
- Mapa geológico-litológico regional.
- Mapa estructural regional.
- Mapa geomorfológico local.
- Mapa geológico-litológico local.
- Mapa estructural local.
- Mapa de pendientes.

#### ***5.3.2. Revisión y digitalización de data manual de discontinuidades***

Del levantamiento de orientaciones en campo se procesaron y digitalizaron los valores de dip y dip direction obtenidos de las discontinuidades, así como de estructuras mayores, como fallas. Esta información se ingresó al software DIPS, donde se representa su distribución espacial en estereogramas, los cuales permitieron identificar las familias presentes en el macizo y/o fallas, entre otros.

### 5.3.3. Adquisición de imagen con Dron

Para obtener una imagen texturizada que sirva para el levantamiento de estructuras, luego de realizar el vuelo en campo se procesaron la nube de puntos (curvas de nivel) y las fotografías, con el fin de obtener una imagen texturizada y, sobre esta, poder identificar las discontinuidades en un software especializado para el levantamiento de estructuras. Como se muestra en la figura 21, se siguió el proceso metodológico iniciando con la planificación del vuelo, el pre-vuelo y el vuelo en campo, adquiriendo imágenes que luego, en gabinete, son procesadas para obtener una imagen texturizada, en la que se pueden extraer los datos de las discontinuidades.

**Figura 21**

*Metodología de trabajo con Dron*



*Nota.* Elaboración Propia

### 5.3.3.1. Procesamiento de imagen de Dron

- **Curvas de nivel:** Con las fotografías capturadas por el dron, se realizó su procesamiento en el software Agisoft, el cual genera un primer entregable con las curvas de nivel de la zona de estudio en formato dxf, luego se obtuvo un segundo entregable al generar un modelo digital del área de vuelo, imagen en 3D con formato ecw (Orthofoto).

Las imágenes se importan al software Agisoft Metashape, donde se realiza la alineación de imágenes mediante la detección automática de puntos homólogos. Esta etapa genera una nube de puntos escasa, que representa una reconstrucción preliminar de la escena tridimensional.

- **Generación de la nube de puntos:** A partir de la triangulación de los puntos homólogos, se calcula la posición tridimensional de millones de puntos. Esto da lugar a una nube de puntos densa que representa con alta fidelidad la superficie del talud. Esta nube puede incluir información adicional como color (RGB) y se georreferencia automáticamente gracias a los datos RTK.

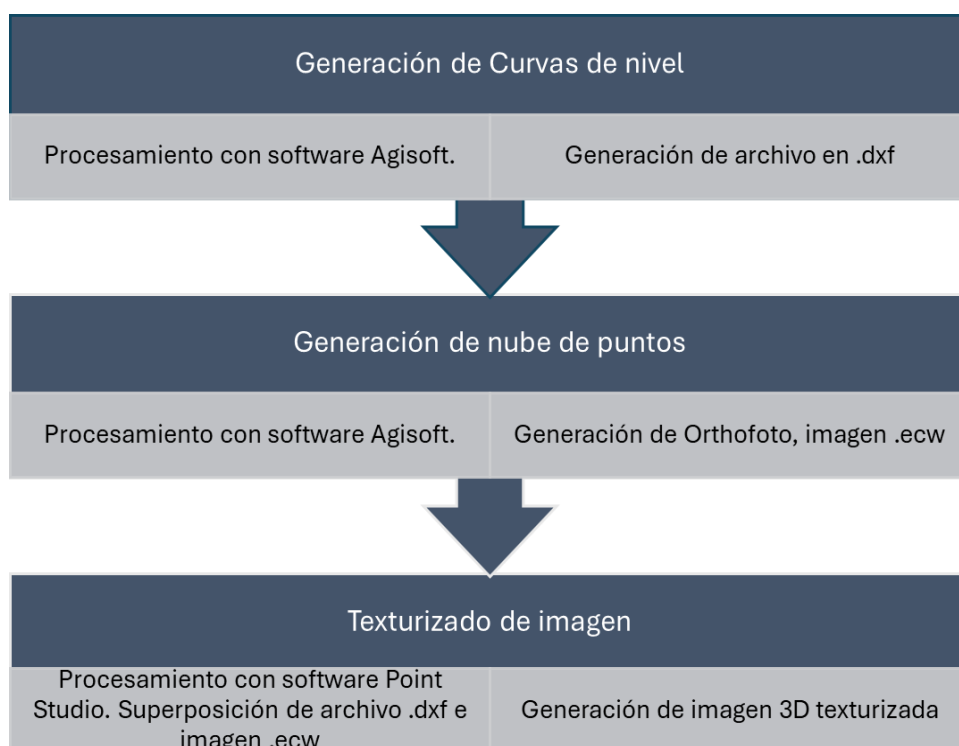
La nube de puntos se exporta en formatos compatibles (.Las.ply,xyz) para su análisis en software especializado como CloudCompare, Dips o Leapfrog. A partir de esta nube, se pueden identificar planos de discontinuidades, calcular orientaciones (rumbo y buzamiento) y realizar análisis estructurales.

- **Texturizado de imagen:** Con la imagen ecw procesada y las curvas de nivel dxf, se utiliza el software Point Studio para superponer la imagen con la topografía y así obtener una imagen 3D texturizada en la cual se definen las discontinuidades que serán analizadas mediante estereogramas obteniendo

las familias identificadas en el talud. Ver Figura 22.

### Figura 22

*Metodología del procesamiento de la imagen obtenida por el dron*



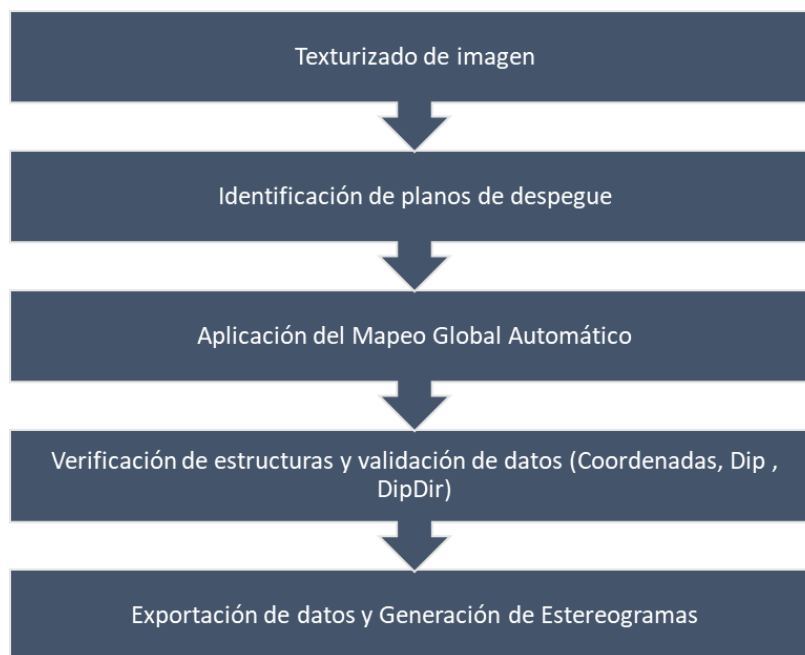
*Nota.* Elaboración Propia

#### 5.3.3.2. Adquisición de data de discontinuidades con Point Studio

Teniendo la imagen texturizada en el Point Studio se utilizarán las herramientas de geotecnia para identificar planos de discontinuidades y aplicar el mapeo global automático (MGA), el cual busca planos con la misma orientación para agrupar Sets o familias. Luego se validan datos de orientación de las discontinuidades (Dip/DipDirection) y finalmente se obtienen estereogramas con los datos obtenidos. Ver Figura 23.

**Figura 23**

*Metodología de trabajo en Point Studio*

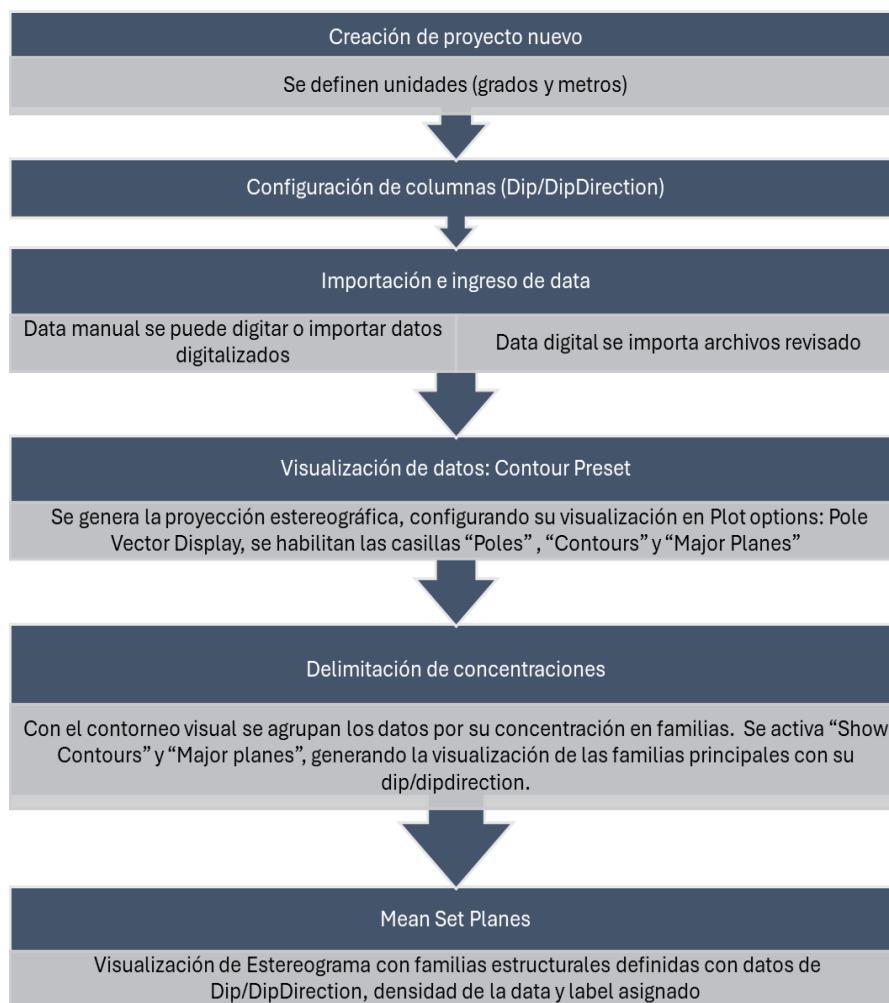


*Nota.* Elaboración Propia

#### **5.3.4. Análisis estereográfico con Dips**

Para el análisis de discontinuidades se utilizará el programa Dips de Rocscience, una herramienta especializada en la visualización y el análisis de orientaciones estructurales aplicadas en geotecnia y geología. Este software permite proyectar datos como el dip y el dip direction de las juntas sobre un estereograma, lo cual facilita la interpretación cinemática y la evaluación de posibles modos de fallamiento.

Además, la proyección de las estructuras permite identificar conjuntos de juntas o familias de discontinuidades, que son clave para comparar la fiabilidad tanto visual como numérica de los datos de dip/dip direction obtenidos manualmente frente a los capturados por el dron. Ver Figura 24.

**Figura 24***Metodología de trabajo en DIPS*

*Nota.* Elaboración Propia

### 5.3.5. *Criterios de confiabilidad de mediciones de discontinuidades*

Para evaluar la confiabilidad entre los datos de campo del levantamiento manual (brújula) y el levantamiento digital de discontinuidades, el presente estudio adoptó el criterio de Poropat (Poropat, Lyman, & Elmouttie, 2008), el cual se desarrolló en el marco teórico, para evaluar la aceptabilidad de los datos recolectados:

- 0°–5° de diferencia (dip o dip direction): alta o buena aceptabilidad.
- 5°–15° de diferencia: aceptabilidad regular.
- >15° de diferencia: no aceptable.

Este umbral se aplica tanto en la comparación entre datos de campo (brújula) y datos digitales (dron/fotogrametría), como en la evaluación interna de agrupamientos estadísticos dentro de una familia estructural.

### **5.3.6. Criterios estadísticos para evaluar correlación**

#### **5.3.6.1. Evaluación con regresión lineal R<sup>2</sup>**

Para evaluar la concordancia entre los datos obtenidos mediante el levantamiento manual y el levantamiento digital de discontinuidades, se aplicó un análisis de regresión lineal simple, considerando como variable independiente los datos obtenidos mediante el método manual (referencia) y como variable dependiente los datos obtenidos digitalmente a partir de imágenes captadas por dron.

El principal indicador utilizado es el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cual representa la proporción de la variabilidad en los datos digitales que puede ser explicada por los datos manuales. Su valor oscila entre 0 y 1, donde:

$R^2 > 0,90$  indica una correlación excelente

$0,75 \leq R^2 < 0,90$  se considera buena correlación,

$0,60 \leq R^2 < 0,75$  indica correlación moderada,

$R^2 < 0,60$  sugiere baja concordancia.

Este umbral se basa en criterios comúnmente utilizados en estudios de validación de métodos (Martínez Pérez, 2023). Además, se analizará la pendiente de la recta de regresión para identificar posibles sesgos sistemáticos entre los métodos.

### 5.3.6.2. Evaluación con el método Monte Carlo

Para evaluar la confiabilidad de los datos digitales obtenidos mediante fotogrametría con dron, se aplicó el método estadístico de Monte Carlo. Esta técnica permite simular múltiples escenarios de medición, incorporando la variabilidad observada en los datos de orientación de discontinuidades (buzamiento y dirección de buzamiento), con el fin de estimar la probabilidad de que dichos datos se encuentran dentro de un rango de error aceptable respecto a las mediciones manuales.

La simulación se realizó con un número elevado de iteraciones ( $n = 10,000$ ), generando distribuciones de errores y correlaciones entre los métodos digital y manual. A partir de estas simulaciones, se analizaron los siguientes parámetros estadísticos:

#### a) $R^2$ lineal (Coeficiente de determinación)

Mide qué tan bien una relación lineal explica la correspondencia entre los datos obtenidos por dron y los medidos manualmente. Su valor varía entre 0 y 1, donde  $R^2 = 1$  representa coincidencia perfecta y  $R^2 = 0$  ausencia total de relación.

En el contexto geomecánico, un valor de  $R^2 \geq 0,6$  se considera un buen ajuste para el buzamiento (DIP). Sin embargo, para la dirección de buzamiento (DIP DIRECTION), su interpretación puede verse afectada por el wrap entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ , por lo que se usa solo como referencia complementaria.

b) RMSE lineal (Raíz del error cuadrático medio, °)

Representa el error promedio entre los valores digitales y manuales, penalizando los errores grandes. Se expresa en grados: cuanto menor es su valor, mayor es la similitud entre ambos métodos. En general,  $RMSE \leq 10^\circ$  refleja buena precisión para DIP.

c) CCC lineal (Coeficiente de concordancia de Lin)

Evalúa simultáneamente la precisión (alineamiento de los puntos) y la exactitud (proximidad a la línea de igualdad  $y = x$ ).

Su rango es de -1 a 1, donde 1 indica concordancia perfecta y valores negativos discordancia. Este coeficiente es más robusto que el  $R^2$  cuando se busca determinar si ambos métodos miden efectivamente lo mismo. En geomecánica,  $CCC \geq 0.6$  se considera aceptable y  $CCC \geq 0.8$  excelente.

d)  $\rho$  circular (Rho circular, coherencia angular)

Métrica específica para datos angulares que respeta la equivalencia entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ . Convierte los ángulos en vectores unitarios para comparar direcciones (DIPDIRECTION).

Su rango es de -1 a 1, donde valores cercanos a 1 indican coherencia direccional alta. Un valor de  $\rho \geq 0,6$  se considera aceptable, y  $\rho \geq 0,8$  representa una alineación angular excelente.

e) MAAE (Mean Absolute Angular Error, °)

Corresponde al error angular absoluto promedio, considerando siempre la diferencia mínima (p. ej., entre  $350^\circ$  y  $10^\circ$ , el error es  $20^\circ$ , no  $340^\circ$ ). Es una métrica

intuitiva que expresa cuántos grados, en promedio, se desvía el método digital del manual.

Valores de  $MAAE \leq 15^\circ$  son aceptables, y  $\leq 10^\circ$  indican un nivel muy bueno de precisión.

**Tabla 5**

*Umbrales de interpretación práctica*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Intervalo aceptable</b>	<b>Nivel de confiabilidad</b>
<b>R<sup>2</sup>(DIP)</b>	Coefficiente de determinación	$\geq 0,6$	Buena correlación
<b>RMSE(°)</b>	Raíz del error cuadrático medio	$\leq 10^\circ$	Error bajo
<b>CCC</b>	Concordancia de Lin	$\geq 0,6$	Concordancia aceptable
<b><math>\rho</math> circular</b>	Coherencia angular	$\geq 0,6$	Buena alineación
<b>MAAE (°)</b>	Error angular absoluto medio	$\leq 15^\circ$	Desviación aceptable

Fuente: Elaboración propia

Este enfoque permite incorporar la incertidumbre inherente al levantamiento digital y establecer criterios objetivos para validar la calidad de los datos obtenidos.

## Capítulo VI

### Procesamiento y cálculos

#### 6.1. Mapeo Geológico

Para la realización del mapeo geológico se efectuaron dos niveles de detalle: el primero correspondió a un mapeo local a escala 1:2000, que abarcó tres días de reconocimiento de campo en un área de 1 hectárea. Asimismo, se realizó un mapeo detallado del talud de estudio con una longitud de 330 m lineales, identificando contactos litológicos, unidades geomorfológicas y principales estructuras, tomando las coordenadas y ángulos de cada contacto, con mediciones de azimut y buzamiento en el caso de estructuras. Con toda esta información georreferenciada se utilizó el software ArcGIS para representar las diferentes unidades geológicas reconocidas en el área de estudio y elaborar los mapas correspondientes.

#### 6.2. Levantamiento manual de discontinuidades

El objetivo principal fue obtener una base de datos confiable de buzamiento y dirección de buzamiento, que sirviera como referencia para comparaciones posteriores con la información digital extraída mediante fotogrametría aérea.

**Registro de Datos:** El levantamiento se realizó in situ, al pie del talud y de forma convencional o manual; se efectuó la toma de datos de orientaciones de las discontinuidades presentes a nivel de piso. Con el uso de una brújula Brunton Azimutal se levantaron en total 114 discontinuidades, tomando los datos de inclinación (Dip) y dirección de buzamiento (Dip Direction) por discontinuidad; cada medición fue acompañada de coordenadas GPS. Se registró la orientación de las principales estructuras, como fallas y juntas. En la libreta se anotó cualquier característica adicional, como fracturas secundarias, variaciones en el ángulo de inclinación o posibles señales de inestabilidad, zonas de derrumbe o deslizamiento.

Cabe resaltar que algunos datos son proyectados, ya que por la altura y el terreno físicamente solo se pudo llegar hasta discontinuidades a dos metros de altura; las identificadas a mayor altura se registraron visualmente tomando puntos de referencia para obtener sus datos. Cada dato representa una medición de una superficie de discontinuidad visible en el talud, priorizando aquellas que presentaban continuidad, apertura y persistencia relevantes para el análisis estructural.

La familia estructural 1, obtenida a partir de datos manuales recolectados en campo, se presenta como la más numerosa y coherente dentro del área de estudio. En total se identificaron 26 discontinuidades, cuyas direcciones de buzamiento (Dip Direction) oscilan entre  $181^\circ$  y  $211^\circ$ , con un promedio aproximado de  $194^\circ$ , lo que indica una orientación predominante hacia el sector suroeste (SSO). Los ángulos de buzamiento (Dip) varían entre  $71^\circ$  y  $88^\circ$ , evidenciando que se trata de discontinuidades de alto buzamiento o subverticales. Los datos obtenidos fueron fundamentales para su comparación con las orientaciones estructurales extraídas del modelo fotogramétrico, lo que permitió validar su confiabilidad y coherencia direccional. *Ver Tabla 6*

**Tabla 6**

*Orientaciones de las discontinuidades obtenidos de campo familia 1*

DIP	DIPDIRECTION	FAMILIA
78	189	1
88	211	1
77	197	1
78	208	1
74	195	1
80	185	1

84	190	1
87	205	1
72	181	1
85	184	1
76	197	1
87	198	1
71	192	1
83	206	1
81	192	1
78	183	1
76	189	1
88	205	1
75	188	1
87	198	1
83	190	1
80	189	1
85	200	1
78	194	1
81	198	1
83	190	1

*Nota.* Datos obtenidos manualmente, familia 1. Elaboración Propia.

La familia estructural 2, identificada mediante el levantamiento manual en campo, está compuesta por 24 discontinuidades, con direcciones de buzamiento (Dip Direction) que varían entre  $113^\circ$  y  $126^\circ$ , mostrando una orientación predominante hacia el este-sureste (ESE). El promedio aproximado de dirección se ubica en torno a los  $118^\circ$ .

Los ángulos de buzamiento (Dip) se encuentran entre 70° y 81°, lo que indica que esta familia también corresponde a discontinuidades subverticales o de alto buzamiento. *Ver Tabla 7*

**Tabla 7**

*Orientaciones de las discontinuidades obtenidos de campo familia2*

DIP	DIPDIRECTION	FAMILIA
75	113	2
81	123	2
70	122	2
70	115	2
79	115	2
71	126	2
79	114	2
73	117	2
76	125	2
75	117	2
72	116	2
76	118	2
74	121	2
70	115	2
77	117	2
73	120	2
71	115	2
80	119	2
75	113	2
74	118	2

72	120	2
70	115	2
78	117	2
71	121	2

*Nota.* Datos obtenidos manualmente, familia 2. Elaboración Propia.

La familia estructural 3 está conformada por 28 discontinuidades registradas manualmente en campo, con direcciones de buzamiento (Dip Direction) que oscilan entre  $195^\circ$  y  $223^\circ$ , lo que indica una orientación general hacia el sur-suroeste (SSO–SO). El valor promedio se sitúa aproximadamente en  $214^\circ$ , lo que demuestra una buena consistencia direccional dentro del conjunto.

En cuanto a los ángulos de buzamiento (Dip), estos varían entre  $17^\circ$  y  $38^\circ$ , lo que caracteriza a esta familia como un grupo de discontinuidades de bajo a moderado buzamiento. A diferencia de las familias anteriores, esta presenta planos que son subhorizontales o suavemente inclinados, por lo que podría representar planos de estratificación, superficies de debilidad reactivadas o estructuras de tipo pelítico dentro del macizo rocoso. *Ver Tabla 8*

### **Tabla 8**

*Orientaciones de las discontinuidades obtenidos de campo familia3*

DIP	DIPDIRECTION	FAMILIA
38	214	3
18	198	3
35	214	3
17	195	3
30	217	3
25	218	3

25	217	3
32	210	3
24	220	3
25	210	3
24	221	3
33	219	3
33	223	3
27	210	3
24	217	3
25	210	3
28	221	3
32	219	3
33	215	3
30	210	3
24	212	3
31	215	3
33	213	3
25	198	3
28	214	3
31	220	3
30	217	3
25	221	3

*Nota.* Datos obtenidos manualmente, familia 3. Elaboración Propia.

La familia estructural 4 comprende un total de 31 discontinuidades, cuyas mediciones fueron tomadas manualmente en campo. Los ángulos de buzamiento (Dip) varían entre 70° y 87°, lo que caracteriza a esta familia como un conjunto de discontinuidades de alto buzamiento, típicamente subverticales.

Las direcciones de buzamiento (Dip Direction) se sitúan entre  $93^\circ$  y  $105^\circ$ , con un valor medio aproximado de  $96^\circ$ , lo que indica una orientación general hacia el este (E). Esta familia presenta una distribución estrecha en cuanto a su dirección, lo que sugiere una familia bien definida y consistente, posiblemente asociada a esfuerzos tectónicos regionales que actuaron en dirección aproximadamente E-O. *Ver Tabla 9.*

**Tabla 9**

*Orientaciones de las discontinuidades obtenidos de campo familia4*

DIP	DIPDIRECTION	FAMILIA
75	93	4
71	97	4
81	100	4
83	105	4
87	98	4
74	103	4
83	103	4
75	93	4
70	94	4
72	94	4
80	95	4
71	94	4
75	98	4
74	97	4
77	100	4
75	91	4
73	94	4

72	92	4
79	95	4
74	90	4
75	96	4
80	98	4
74	96	4
83	103	4
75	93	4
77	94	4
72	94	4
78	95	4
73	94	4
75	98	4
74	97	4

*Nota.* Datos obtenidos manualmente, familia 4. Elaboración Propia.

La familia estructural 5 está compuesta por 5 discontinuidades, registradas mediante medición directa en campo. Los ángulos de buzamiento (Dip) se encuentran en un rango de 36° a 57°, lo que define a esta familia como un conjunto de discontinuidades de buzamiento intermedio, inclinadas moderadamente.

En cuanto a su dirección de buzamiento (Dip Direction), los valores van de 98° a 109°, con un promedio cercano a 102°, lo que indica una orientación general hacia el este (E), similar a la familia 4 pero con inclinaciones menos pronunciadas. *Ver Tabla 10.*

**Tabla 10***Orientaciones de las discontinuidades obtenidos de campo familia5*

DIP	DIPDIRECTION	FAMILIA
36	98	5
57	98	5
56	108	5
45	100	5
48	109	5

*Nota. Datos obtenidos manualmente, familia 5. Elaboración Propia.*

Además de las familias estructurales previamente clasificadas, se identificaron 7 discontinuidades adicionales que no pudieron agruparse dentro de un conjunto estructural definido. Estas presentan valores variables de dirección de buzamiento (Dip Direction) entre 149° y 358°, y ángulos de buzamiento (Dip) que oscilan entre 18° y 71°. *Ver Tabla 11.*

La dispersión tanto en la orientación como en la inclinación sugiere que estas discontinuidades podrían corresponder a estructuras locales, discontinuidades aisladas o planos generados por deformaciones menores que no siguen una tendencia dominante. A pesar de no formar parte de un conjunto estructural sistemático, su registro es importante, ya que podrían desempeñar un papel local en la propagación de mecanismos de inestabilidad, especialmente cuando interactúan con otras familias estructurales principales.

**Tabla 11***Orientaciones de las discontinuidades obtenidas de campo sin correlación*

DIP	DIPDIRECTION	FAMILIA
35	149	-
25	192	-

---

56	310	-
36	315	-
18	296	-
66	335	-
71	358	-

---

*Nota. Datos obtenidos manualmente, familia sin correlación. Elaboración Propia.*

### **Figura 25**

*Levantamiento de discontinuidades manualmente*





*Nota. Toma de datos en campo. Elaboración Propia.*

### **6.2.1. Procesamiento de discontinuidades manuales en DIPS**

Para el procesamiento de los datos recolectados en campo, éstos fueron ingresados en el programa Dips 7,0 de Rocscience, siguiendo la metodología explicada en el capítulo 5 para la realización del análisis estereográfico en DIPS, en las figuras 26, 27 y 28 se muestra el paso a paso.

**Figura 26**

*Importación de datos de discontinuidades en DIPS*

The screenshot shows the Dips software interface with a data entry table. The table has three columns: ID, Dip, and Dip Direction. The data is as follows:

ID	Dip	Dip Direction
24	74	03
25	83	03
26	35	14
27	72	81
28	75	53
29	36	98
30	85	84
31	70	54
32	76	97
33	17	95
34	30	17
35	79	14
36	25	18
37	73	17
38	87	98
39	71	92
40	76	25
41	56	10
42	36	15
43	25	17
44	83	06
45	57	98
46	81	92
47	32	10
48	78	83
49	56	08
50	18	96
51	72	54
52	66	95
53	45	00
54	76	89
55	24	20
56	71	58
57	80	95
58	25	10
59	48	09
60	88	05
61	75	17
62	24	21
63	71	54
64	75	88
65	75	98
66	87	98
67	33	19
68	83	90
69	72	16
70	95	99
71		

Annotations in the image:

- A yellow box labeled "Datos Buzamiento (DIP)" points to the "Dip" column.
- A red box labeled "Datos Buzamiento (DIP DIRECTION)" points to the "Dip Direction" column.
- A white box with a black border contains instructions for data entry.
- A white box with a black border labeled "Pestaña de interfaz de ingreso de datos" points to the "DATA MANUAL21" tab at the bottom.

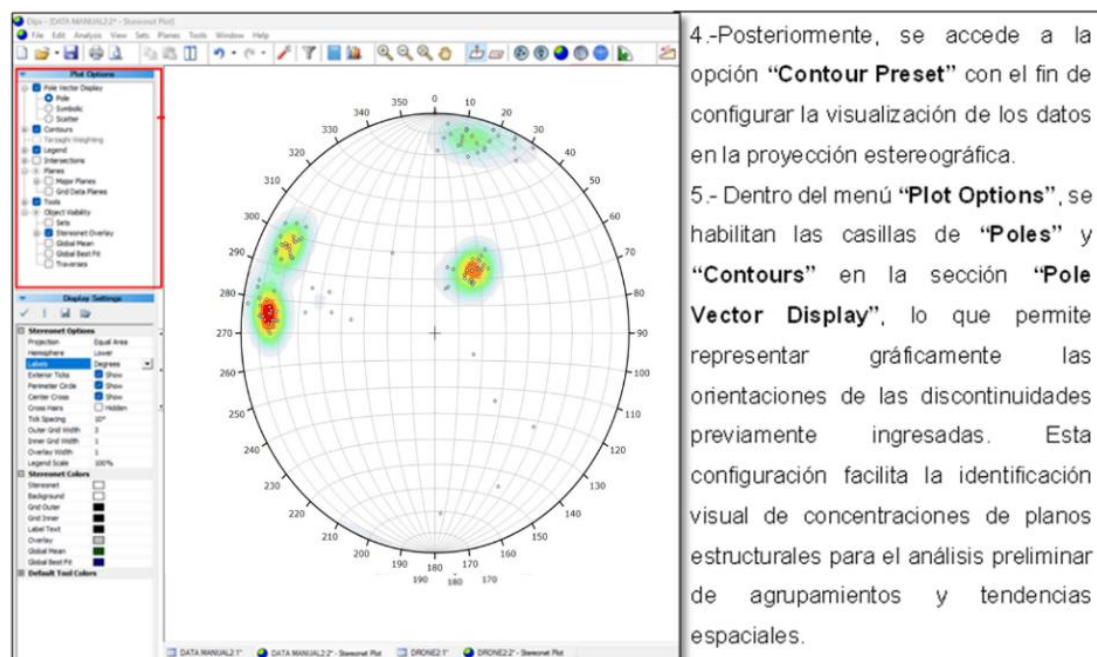
Se inicia en el programa Dips 7.0 y se coloca los datos en las casillas correspondientes, para su posterior análisis.

- 1.- Creación de proyecto nuevo:** Se abre un archivo nuevo y se definen las unidades de trabajo (grados y metros).
- 2.- Configuración de columnas:** Se selecciona el formato "Dip/Dip Direction" para el ingreso de datos.
- 3.- Ingreso de datos manual:** Los registros obtenidos en campo se digitan directamente en la hoja de datos de DIPS, en las columnas correspondientes (Dip, DipDir).

*Nota. Programa Dips, importación de datos manuales. Elaboración propia.*

Figura 27

*Procesamiento de datos con proyecciones estereográficas*



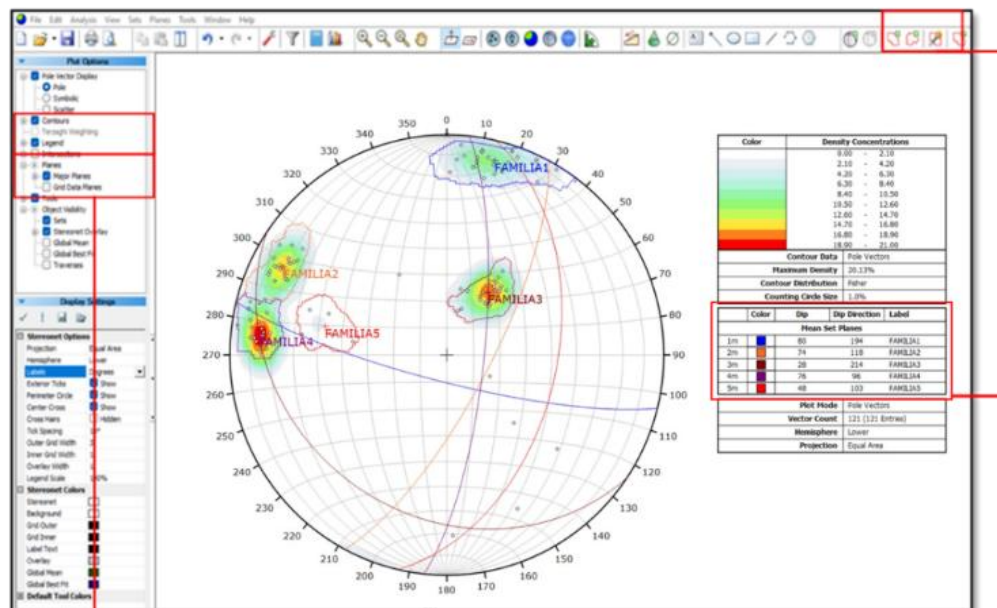
*Nota.* Procesamiento de datos en el programa Dips. Elaboración propia.

Como resultado del procesamiento de datos, se obtuvo un diagrama estereográfico (estereofalsilla), en el cual se visualizan las orientaciones de las discontinuidades mediante la distribución de polos y curvas de densidad. A partir de este diagrama se procedió al análisis de agrupamiento, delimitando concentraciones significativas de datos con el objetivo de identificar patrones estructurales repetitivos.

Este proceso permitió la definición preliminar de familias estructurales, basadas en la densidad angular y la proximidad direccional de los polos. Se identificaron cuatro familias principales de discontinuidades, caracterizadas por sus respectivas orientaciones dominantes, así como una concentración secundaria menor cuya densidad no fue tan significativa, pero que igualmente se consideró para el análisis integral de la geometría del macizo rocoso.

Figura 28

Desarrollo de proyecciones estereográficas



6.-Se accede al panel "Plot Options", donde se activan las opciones "Contours" y "Major Planes". Esta configuración permite realizar el trazado de los planos representativos a partir de las concentraciones de polos observadas en el diagrama estereográfico.

7.-Posteriormente, se procede a **delimitar manualmente cada una de las concentraciones principales** mediante el contorneo visual, agrupando los datos según similitud en sus orientaciones. Para cada agrupamiento definido, se activa la opción "Show Contours" y "Major Planes", lo cual permite generar automáticamente los planos medios representativos de cada conjunto estructural.

8.-Como resultado, se visualizan los "Mean Set Planes", con su respectiva orientación promedio (Dip/Dip Direction) y la designación asignada por el usuario (por ejemplo, Familia 1, Familia 2, etc.). En total, se definieron **cinco familias estructurales**, cuatro de ellas principales y una adicional con menor densidad, pero con suficiente recurrencia para ser considerada en el análisis estructural.

Nota. Análisis en el programa Dips(Rocscience) de Dip y DipDirection de datos manuales.

En la figura 28 se observa la identificación de cinco concentraciones principales de polos, de las cuales cuatro representan familias estructurales bien definidas y una adicional (Familia 5) presenta menor intensidad y consistencia.

Los valores promedio de orientación (Dip/Dip Direction) para cada una de estas familias, obtenidos mediante la opción “Mean Set Planes” en DIPS, se detallan a continuación:

**Tabla 12**

*Datos agrupados por familias*

DIP/DIPDIRECTION	FAMILIA
80/194	Familia 1
74/118	Familia 2
28/214	Familia 3
76/96	Familia 4
48/103	Familia 5

*Nota.* Familias principales (Dip y DipDirection) de datos manuales procesados por el programa DIPS.

### **6.3. Levantamiento con Dron**

#### **6.3.1. Vuelo del Dron para toma de imágenes**

- **Pre-Vuelo:** Se realizó la calibración del dron con los satélites tomando en cuenta el punto de topográfico de georreferencia con el Equipo RTK usado con el dron D-RTK2-DJI, para la prueba de campo se obtuvo un error menor al 1 % de margen de error topográfico terrestre. Se realizó un pre-vuelo para reconocer y crear una superficie obteniendo la altura que fue de 60 metros, se definió el mejor ángulo de la cámara que fue el ángulo de 70° con el cual se tomaron las imágenes del talud con la finalidad de hacer el diseño de vuelo (plan de vuelo) y ejecutar el vuelo. Ver Figura 29 al 32.

**Figura 29**

*Calibración de dron*



*Nota.* Imagen con el Dron calibrado en el punto de partida. Elaboración Propia

**Figura 30**

*Punto topográfico*



*Nota.* Marca del punto topográfico georeferenciado (BH-1).

**Figura 31**

*Equipo D-RTK2-DJI*



*Nota.* Equipo de georreferenciación espacial R-RTK”-DJI en el punto topográfico marcado.

**Figura 32**

*Ajuste de equipo D-RTK2-DJI*



*Nota.* Revisión de verticalidad-nivel en óptimas condiciones.

Luego del ajuste, se activaron los sensores del drone, verificando que estén alineados con el equipo D-RTK2 y con los satélites necesarios y/o estaciones geodésicas cercanas. Tomando en cuenta la carga del equipo, se procedió a realizar pruebas de conectividad y respuesta dinámica (reacción en tiempo real) y, posteriormente, se efectuó el prevuelo. *Ver Figura 33.*

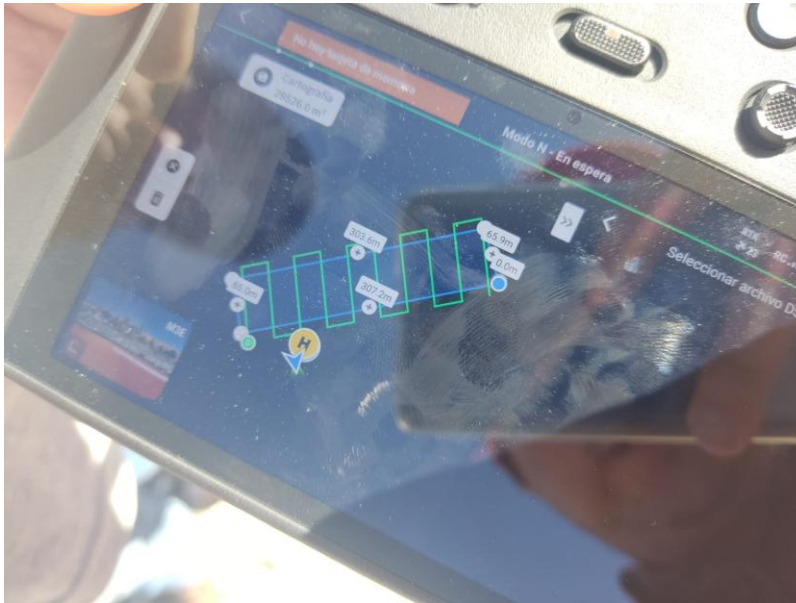
### **Figura 33**

#### *Pre vuelo*



*Nota.* Programación de Drone para el pre-vuelo. Elaboración propia.

- Planificación del vuelo: Con la información obtenida del prevuelo, se definieron las alturas y el ángulo de la cámara para tomar las fotografías perpendiculares al talud, optimizando así la captura de información de las estructuras en todas las direcciones. En este caso, el ángulo fue de  $70^\circ$  con respecto a una altura del talud de 60 metros y una altura de vuelo de 80 metros. Finalmente, en el software Agisoft Metashape se generó un mapa fotogramétrico o un modelo tridimensional de la zona, para que durante el vuelo el drone reconozca la superficie y evite chocar con el talud. *Ver Figuras 34 y 35.*

**Figura 34***Diseño de vuelo*

*Nota.* Visión del diseño del vuelo en el control del drone. Elaboración propia.

**Figura 35***Imagen de pre vuelo*

*Nota.* Imagen de pre-vuelo que muestra a la zona de estudio. Elaboración propia.

- Vuelo: Con todas las consideraciones del prevuelo y definido el plan de vuelo, se realizó el vuelo siguiendo las rutas predefinidas, teniendo en cuenta el ángulo perpendicular de  $70^\circ$  y la distancia focal, la distancia del talud, la distancia de cobertura, la sobreposición o traslape lateral y frontal d5 85 % con una resolución de imágenes de 2cm. *Ver Figura 36.*

### **Figura 36**

#### *Imagen de vuelo*



*Nota.* Vuelo de Drone. Elaboración propia.

#### **6.3.2. Generación de superficie y procesamiento de imagen**

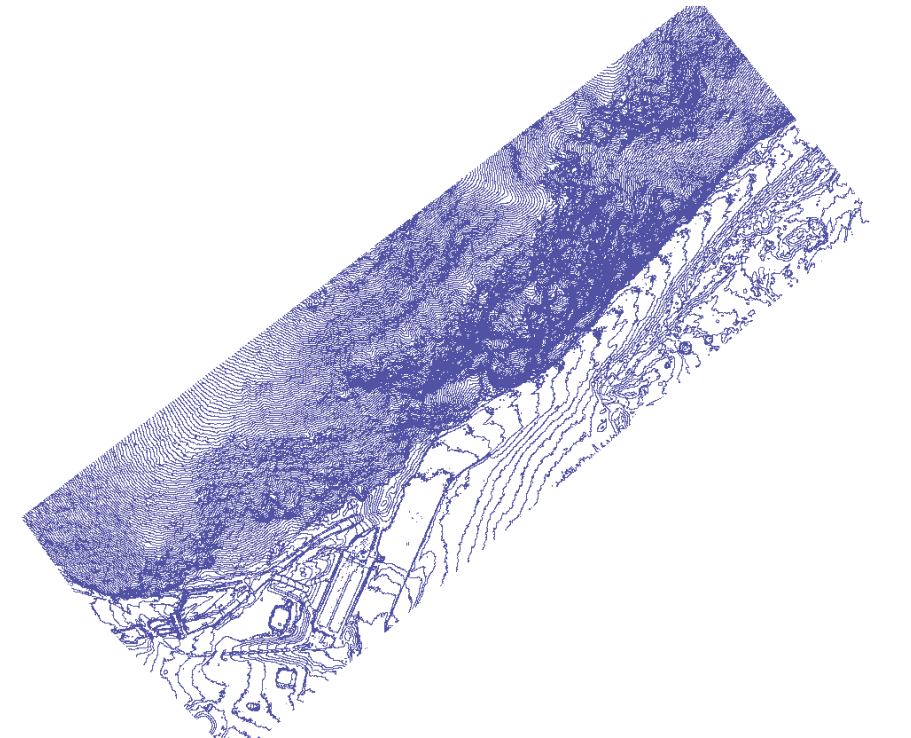
El procesamiento para la generación de la imagen se realizó, en primer lugar, con el software Agisoft Metashape, siguiendo los siguientes pasos:

- Importar imágenes: Se abrió el programa Metashape y se creó un nuevo proyecto, cargando las imágenes del vuelo.

- Importar los datos de geolocalización: Se importó un archivo .csv con las coordenadas, haciendo clic en “Import Reference”, asegurándonos que el sistema de coordenadas esté en WGS84.
- Alineación de fotos: Se ejecutó “Align Photos”, verificando que los puntos estuvieran bien distribuidos. En caso de errores, se revisaron imágenes borrosas o duplicadas.
- Construcción de nube de puntos densa: Se va a “Workflow” → “Build Dense Cloud” y se eligió la calidad (Alta); luego se esperó el procesamiento (puede tardar bastante según la cantidad de imágenes). *Ver Figura 37.*

### **Figura 37**

*Nube de puntos tridimensional*



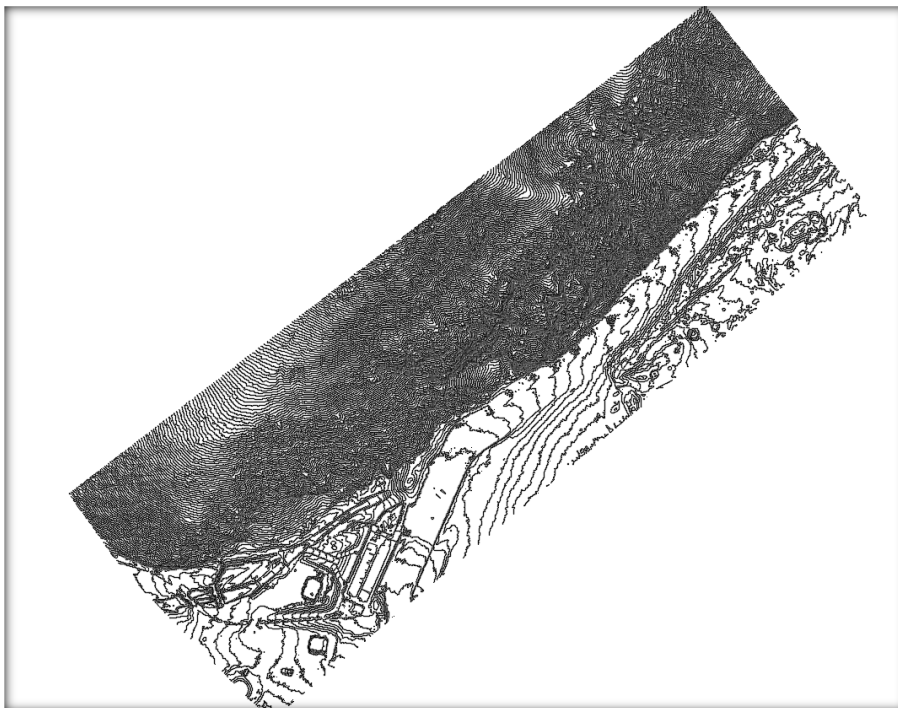
*Nota.* Creación de nube de puntos

- Exportar nube de puntos: Se va a “File” → “Export” → “Export Dense Cloud”, donde se elige el formato del archivo a exportar como dxf y se define sistema de coordenadas y resolución.

Generando así el primer entregable que consistió en las curvas de nivel (nube de puntos) de la zona de estudio en formato DXF. Ver Figura 38.

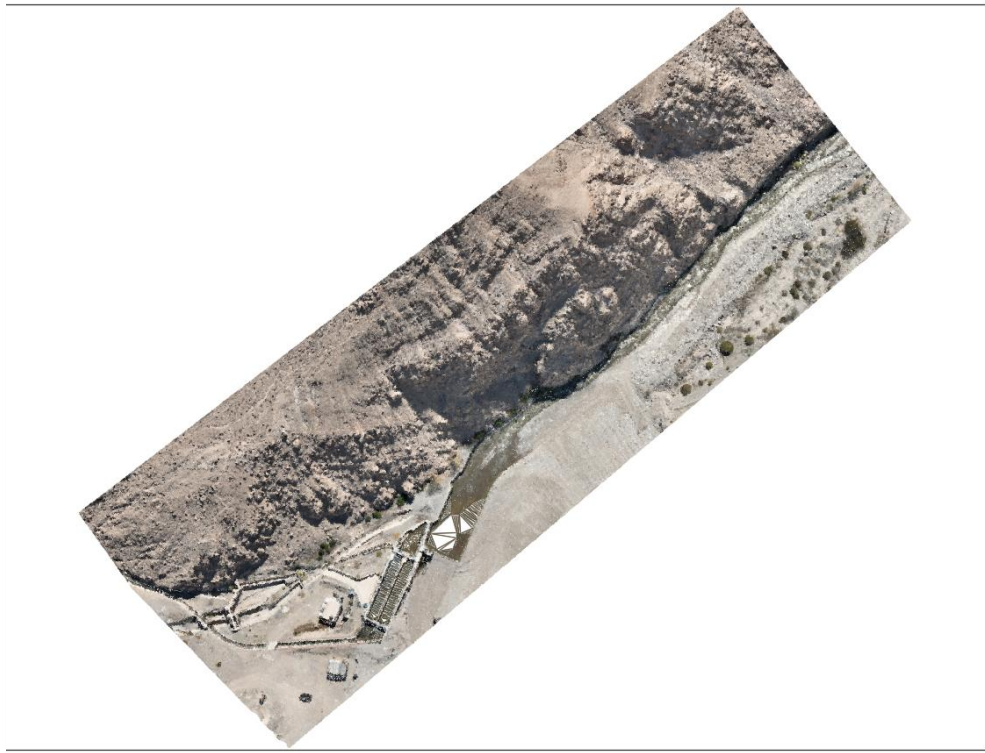
### **Figura 38**

#### *Curvas de nivel*



*Nota.* Creación de curvas de nivel georeferenciados y acotadas. Elaboración propia.

Posteriormente, en el mismo software se generó el segundo entregable, el modelo digital del terreno mediante una imagen 3D del área de vuelo en formato ECW, para se va a “Workflow” → “Build Orthomosaic” y luego se exporta: File” → “Export” → “Export Orthomosaic” eligiendo el formato.ecw.

**Figura 39***Imagen tridimensional*

*Nota.* Creación de imagen tridimensional georeferenciada. Elaboración propia.

A partir de la imagen tridimensional generada mediante fotogrametría aérea, se realizó la importación del modelo superficial al software Point Studio (Vulcan), en el cual se efectuó el proceso de extracción y parametrización de planos de discontinuidad visibles a lo largo del talud.

- Texturizado de Imagen: En el software el Point Studio se importan los archivos .dxf y .ecw obtenidos del Agisoft; luego se hace doble click en el archivos .dxf y se arrastra el archivo ecw, buscando superponer la imagen con la topografía y obteniendo así la imagen 3D texturizada en la cual se definirán las discontinuidades que serán analizadas mediante estereogramas, obteniendo las familias identificadas en el talud.

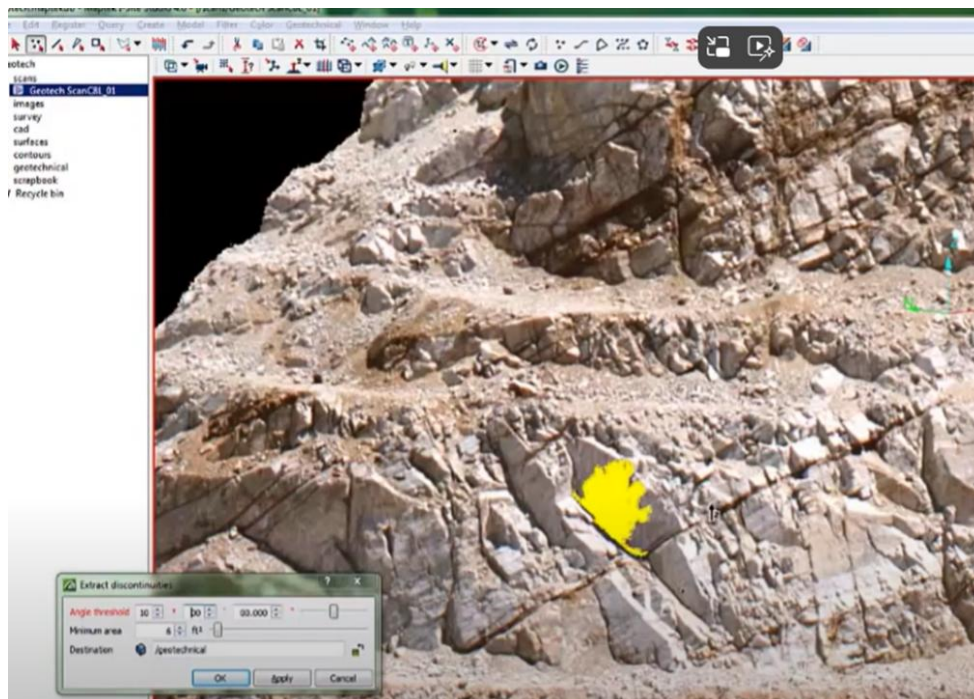
### 6.3.3. *Procesamiento de discontinuidades en Point Studio*

#### 6.3.3.1 Generación de datos de discontinuidades

Al tener la imagen texturizada en el Point Studio, se identificaron de forma asistida los planos principales de discontinuidad, los cuales fueron definidos inicialmente mediante un proceso manual de trazado sobre las caras principales del talud. Ver Figura 40. A partir de estos planos base, se emplearon las herramientas automáticas del software para realizar una búsqueda de superficies estructurales con orientaciones similares, considerando un rango de tolerancia de  $\pm 10^\circ$  en Dip y Dip Direction.

#### Figura 40

##### *Trazado manual de discontinuidad*

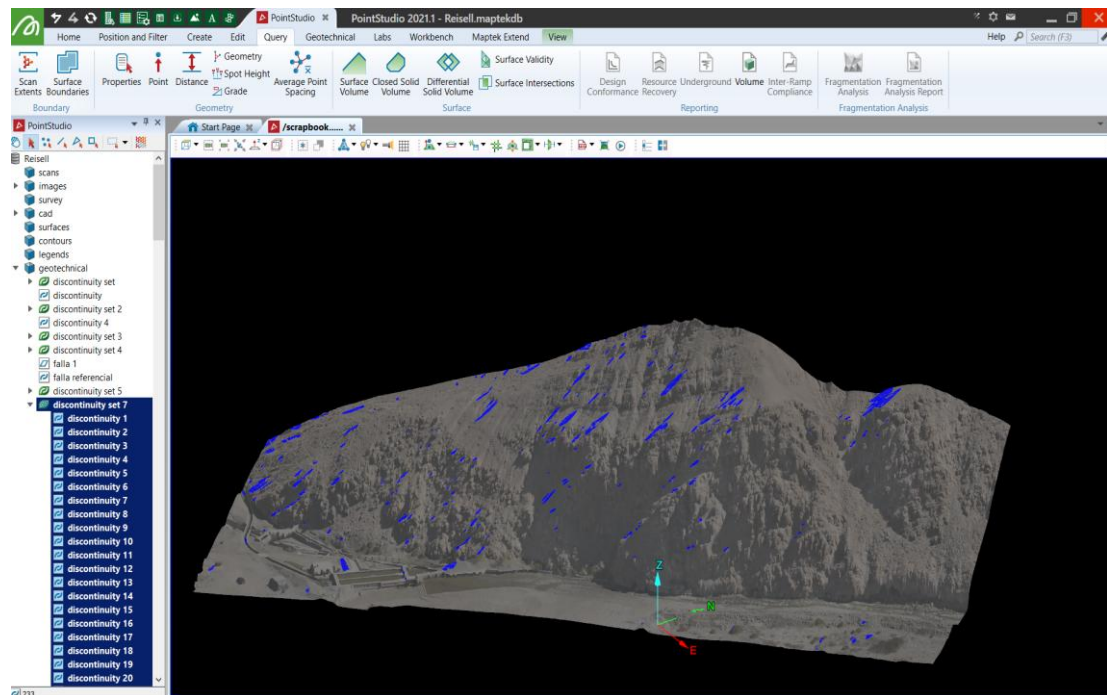


*Nota.* Trazado de cara de discontinuidad. Elaboración propia.

Este procedimiento permitió al software detectar y delinear automáticamente todas las discontinuidades distribuidas a lo largo del talud que compartían una geometría semejante con los planos de referencia. Ver Figura 41. De este modo, se generó una representación tridimensional detallada de las familias estructurales presentes en el macizo rocoso.

### Figura 41

#### *Generación de 1 set de discontinuidad*

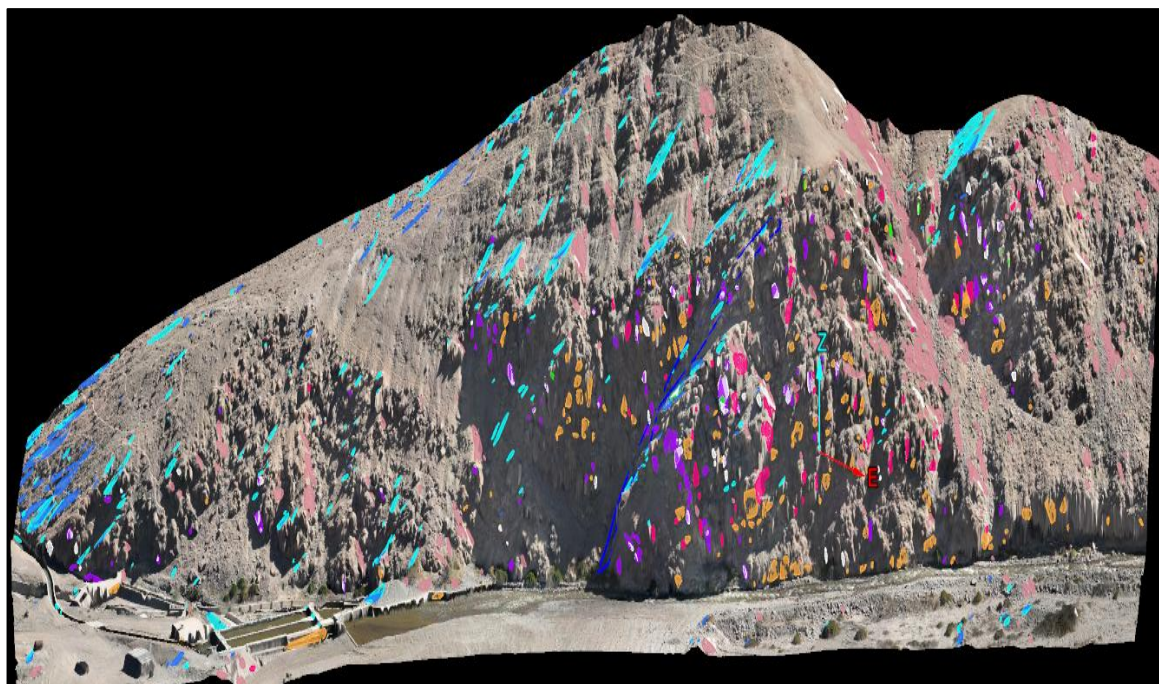


*Nota.* Elaboración propia.

La Figura 42 ilustra este resultado, donde es posible observar la clasificación de discontinuidades por familias, codificadas por colores (ocho colores) según su agrupación geométrica. Esta metodología facilitó una cobertura estructural exhaustiva y homogénea, superando la limitación del levantamiento puntual propio de los métodos manuales.

**Figura 42**

*Distribución de discontinuidades por familias*



*Nota.* Distribución de planos de discontinuidades alrededor del talud de estudio.

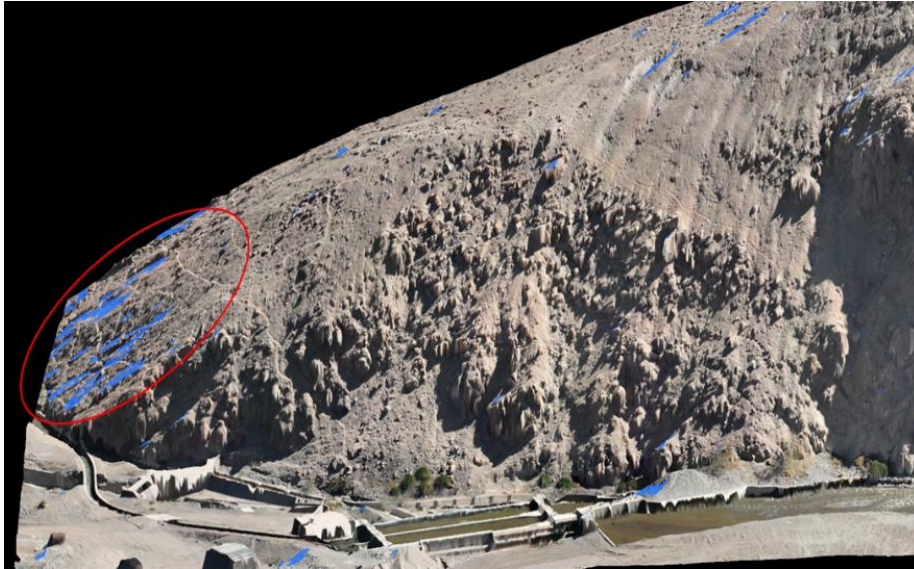
### **6.3.3.2 Validación y depuración de datos de discontinuidades**

Luego de la generación automática de planos, se debe realizar un proceso de validación y depuración del modelo, eliminando aquellos planos generados en zonas donde no se evidencian discontinuidades geológicas reales, con el fin de evitar interpretaciones erróneas en el análisis estructural. Estos planos erróneos se generan por los siguientes motivos:

- Ruido en la nube de puntos: Vegetación, laderas, estructuras ajenas al talud y zonas con material deslizado, pueden generar planos falsos. Ver Figura 43 y 44.

**Figura 43**

*Planos aparentes generados en laderas*



*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 44**

*Planos aparentes generados en material deslizado*



*Nota.* Elaboración propia.

- Resolución insuficiente: Si la nube tiene baja densidad o hubo algún problema de superposición, puede no capturar planos delgados o detalles finos. Ver Figura 45 y 46.

### **Figura 45**

*Planos aparentes generados en zonas de baja resolución*



*Nota.* Elaboración propia.

### **Figura 46**

*Planos aparentes generados en zonas de baja resolución*



*Nota.* Elaboración propia.

### 6.3.3.3 Resultados del levantamiento digital

Luego de validar y depurar planos aparentes se obtienen los datos resultantes compuestos por 426 datos de planos de discontinuidades, los cuales fueron procesados para extraer sus respectivas orientaciones en formato Coordenadas/Dip/Dip Direction, generando así una base de datos estructurales de alta densidad. Esta información fue exportada en formato csv compatible con el software DIPS (Ver Figura 47), para su posterior análisis estereográfico, de forma equivalente a los datos obtenidos manualmente en campo.

#### Figura 47

*Archivo csv exportado del Point Studio*

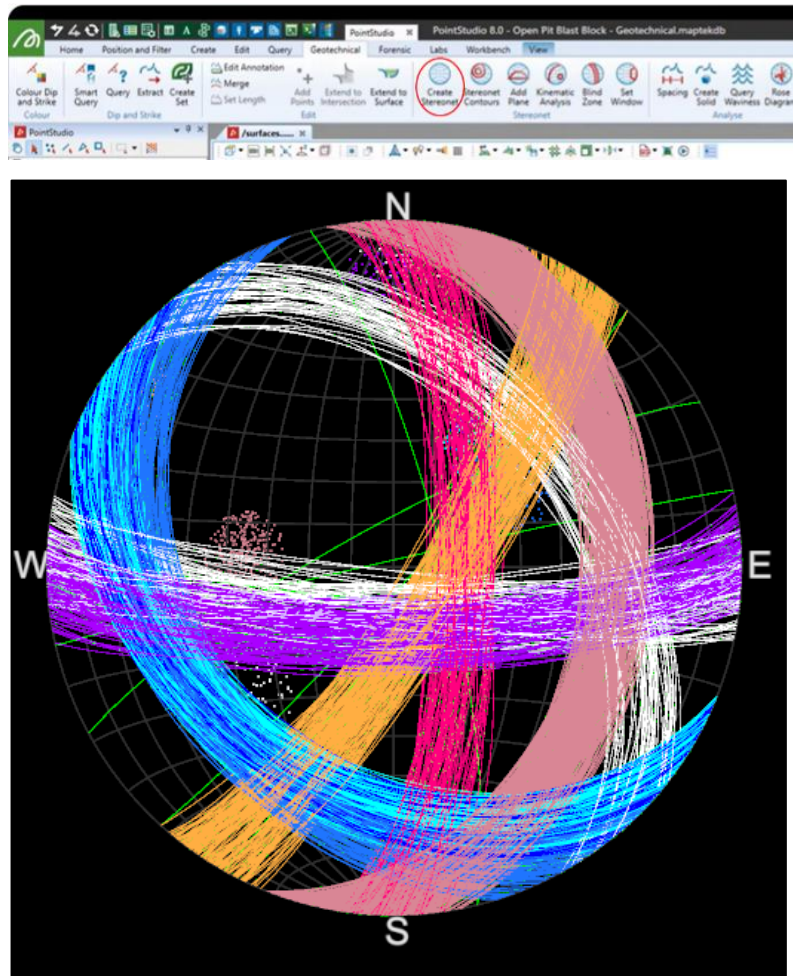
	A	B	C	D	E	G	H
1	X	Y	Z	DIP	DIP DIREC	LENGTH	AREA
2	388794.9	8019008	1600.956	70.515	181.75	6.564	17.77
3	388640.3	8018897	1558.162	69.133	176.441	2.491	1.296
4	388637.3	8018899	1563.072	81.93	181.976	2.438	3.024
5	388648.9	8018897	1558.11	68.595	182.654	8.303	6.266
6	388652.7	8018900	1561.426	79.111	177.894	0.827	0.276
7	388645	8018907	1569.523	76.196	174.857	2.409	1.487
8	388664.2	8018907	1562.976	81.387	181.242	1.614	0.962
9	388669.7	8018915	1567.618	79.056	181.898	0.934	0.422

*Nota.* Archivos csv exportado del Point Studio. Elbaoración propia

Adicionalmente, con los datos obtenidos de las discontinuidades, se utiliza la herramienta Create Steronet para crear un estereograma, mostrando los planos de las 426 discontinuidades. Ver Figura 48.

**Figura 48**

*Estereograma con las discontinuidades generadas en Point Studio*



*Nota.* Distribución de planos en el estereograma del programa Point Studio.

A continuación, se presentan tablas con los datos de las 6 familias resultantes identificadas con el Point Studio.

En la Tabla13, se muestra la primera familia, con 62 discontinuidades con valores de Dip Direction que van desde 170 a 190.

**Tabla 13***Orientaciones de la primera familia de discontinuidades obtenidas por el dron*

	<b>Coordenadas Este</b>	<b>Coordenadas Norte</b>	<b>Cota</b>	<b>DIP</b>	<b>DIP Direction</b>
<b>1</b>	388804,00	8019013,25	1600,25	80,74	184,03
<b>2</b>	388630,82	8018896,98	1559,29	80,70	173,96
<b>3</b>	388643,38	8018896,59	1558,92	85,00	174,75
<b>4</b>	388637,32	8018898,65	1563,02	82,26	182,49
<b>5</b>	388640,25	8018898,15	1561,21	85,68	180,79
<b>6</b>	388648,04	8018909,14	1571,30	82,92	184,00
<b>7</b>	388662,28	8018918,36	1576,18	84,40	181,91
<b>8</b>	388686,61	8018925,90	1571,66	75,25	184,73
<b>9</b>	388683,54	8018930,14	1576,58	80,89	186,20
<b>10</b>	388688,28	8018925,36	1569,90	78,88	189,94
<b>11</b>	388716,36	8018930,43	1565,18	79,70	184,19
<b>12</b>	388716,48	8018946,42	1578,93	85,83	185,86
<b>13</b>	388736,90	8018979,67	1596,96	79,48	179,69
<b>14</b>	388748,73	8018976,90	1593,96	76,00	183,35
<b>15</b>	388755,22	8018995,36	1609,35	77,47	183,17
<b>16</b>	388762,45	8018989,60	1595,10	84,57	184,41
<b>17</b>	388795,03	8018992,70	1581,18	74,39	177,80
<b>18</b>	388767,21	8019000,88	1606,50	81,61	181,55
<b>19</b>	388771,37	8018999,65	1599,66	81,20	187,45
<b>20</b>	388769,61	8019001,99	1608,05	85,20	182,02
<b>21</b>	388767,15	8019006,21	1615,06	75,84	182,05
<b>22</b>	388773,32	8019009,41	1613,81	77,20	182,41
<b>23</b>	388774,61	8018998,08	1593,55	79,13	181,61
<b>24</b>	388777,47	8019015,79	1613,91	84,63	181,43
<b>25</b>	388785,05	8019018,09	1613,83	76,32	180,09
<b>26</b>	388789,29	8018994,54	1591,07	72,97	179,46
<b>27</b>	388788,78	8018995,39	1593,28	81,36	182,36

---

<b>28</b>	388794,77	8019007,90	1601,04	70,92	182,22
<b>29</b>	388792,04	8019008,86	1605,54	85,92	189,47
<b>30</b>	388795,25	8019009,00	1605,67	77,07	181,94
<b>31</b>	388797,20	8019001,27	1591,57	81,92	189,50
<b>32</b>	388798,02	8019000,82	1590,16	83,63	185,47
<b>33</b>	388800,27	8018995,30	1578,86	74,27	176,80
<b>34</b>	388796,75	8019006,80	1598,07	86,11	179,86
<b>35</b>	388799,23	8019009,80	1598,43	78,81	180,49
<b>36</b>	388799,89	8019011,19	1600,32	74,36	182,86
<b>37</b>	388800,04	8019002,72	1590,55	79,52	187,43
<b>38</b>	388801,14	8019002,36	1588,22	84,96	190,15
<b>39</b>	388798,31	8019026,32	1615,71	75,17	176,74
<b>40</b>	388811,08	8018999,82	1572,98	74,44	182,02
<b>41</b>	388808,31	8019020,66	1600,39	76,37	183,13
<b>42</b>	388826,40	8019017,77	1575,14	73,77	189,02
<b>43</b>	388830,64	8019020,54	1574,77	76,04	180,83
<b>44</b>	388812,78	8019025,31	1602,40	76,76	186,35
<b>45</b>	388816,63	8019032,93	1604,00	72,80	182,84
<b>46</b>	388832,42	8019034,44	1586,80	76,42	180,70
<b>47</b>	388830,90	8019035,13	1587,81	78,17	182,13
<b>48</b>	388827,30	8019041,07	1594,46	79,99	177,11
<b>49</b>	388801,74	8019061,63	1627,70	77,01	191,45
<b>50</b>	388810,78	8019073,93	1621,29	82,15	182,69
<b>51</b>	388822,78	8019080,13	1620,58	76,93	178,59
<b>52</b>	388822,29	8019082,98	1625,69	82,14	191,84
<b>53</b>	388828,43	8019081,01	1619,85	74,00	188,59
<b>54</b>	388831,63	8019080,46	1616,79	76,55	189,49
<b>55</b>	388832,92	8019078,13	1612,59	77,51	181,68
<b>56</b>	388836,83	8019076,88	1608,71	78,91	182,70
<b>57</b>	388835,00	8019077,76	1610,82	85,66	179,49

---

<b>58</b>	388837,79	8019078,61	1611,25	82,17	186,00
<b>59</b>	388833,40	8019084,05	1621,10	75,78	185,47
<b>60</b>	388838,75	8019095,94	1626,43	73,06	181,72
<b>61</b>	388840,03	8019090,70	1621,54	71,63	186,65
<b>62</b>	388848,80	8019073,92	1599,30	78,93	191,19

*Nota.* Tabla que muestra la familia 1 clasificada por el software Point Studio. Elaboración propia.

La familia 2, identificada más numerosa se presenta en la Tabla 14, donde se reconocen hasta 90 discontinuidades distintas con valores de Dip Direction que van desde 115 a 130.

**Tabla 14**

*Orientaciones de la segunda familia de discontinuidades obtenidas por el dron*

	<b>Coordenadas Este</b>	<b>Coordenadas Norte</b>	<b>Cota</b>	<b>DIP</b>	<b>DIP Direction</b>
<b>1</b>	388732,66	8018980,87	1602,57	84,58	115,81
<b>2</b>	388732,64	8018982,20	1605,82	74,11	123,25
<b>3</b>	388755,11	8018979,79	1589,73	87,52	122,19
<b>4</b>	388755,36	8018980,75	1590,80	80,60	115,66
<b>5</b>	388755,53	8018982,37	1593,86	73,99	116,01
<b>6</b>	388756,03	8018983,86	1595,78	83,92	123,29
<b>7</b>	388756,60	8018983,27	1592,42	85,18	125,28
<b>8</b>	388758,77	8018983,85	1589,96	78,29	126,49
<b>9</b>	388757,32	8018986,27	1599,11	82,33	127,44
<b>10</b>	388758,04	8018986,08	1596,37	76,72	126,26
<b>11</b>	388760,33	8018986,06	1591,16	74,99	127,10
<b>12</b>	388762,55	8018987,28	1589,72	75,96	115,51
<b>13</b>	388759,92	8018988,39	1597,10	82,09	126,85
<b>14</b>	388796,20	8018991,17	1577,86	83,18	120,92
<b>15</b>	388768,11	8019001,58	1607,57	71,48	122,96
<b>16</b>	388772,33	8019002,50	1607,01	77,08	116,85
<b>17</b>	388772,68	8019003,77	1607,76	75,78	119,16

---

<b>18</b>	388772,94	8019005,97	1607,81	79,07	121,46
<b>19</b>	388774,79	8019006,27	1603,27	78,61	125,18
<b>20</b>	388775,77	8019007,81	1604,39	75,73	119,89
<b>21</b>	388777,11	8019009,46	1605,27	72,32	118,70
<b>22</b>	388776,71	8019010,05	1609,35	75,41	120,91
<b>23</b>	388770,90	8019013,70	1618,84	75,46	125,19
<b>24</b>	388777,99	8019019,38	1618,30	77,13	130,44
<b>25</b>	388791,70	8018996,07	1592,62	72,74	127,72
<b>26</b>	388796,64	8019003,13	1594,46	76,73	125,92
<b>27</b>	388802,03	8019018,98	1602,37	77,69	116,24
<b>28</b>	388806,08	8019000,97	1579,94	82,96	125,20
<b>29</b>	388807,53	8019002,72	1580,57	79,46	118,98
<b>30</b>	388808,72	8019004,89	1584,31	80,77	129,01
<b>31</b>	388809,16	8019004,64	1580,16	81,24	121,59
<b>32</b>	388809,70	8019003,39	1577,66	80,33	121,28
<b>33</b>	388810,52	8019006,24	1580,69	81,88	129,85
<b>34</b>	388811,15	8019007,67	1582,37	74,72	115,93
<b>35</b>	388814,09	8019000,53	1571,32	75,64	114,24
<b>36</b>	388816,01	8019002,67	1572,28	77,77	112,57
<b>37</b>	388817,41	8019005,31	1573,16	75,20	122,02
<b>38</b>	388811,90	8019008,93	1583,31	80,60	127,19
<b>39</b>	388819,33	8019007,81	1573,77	75,96	127,59
<b>40</b>	388821,31	8019010,40	1573,49	76,85	120,73
<b>41</b>	388808,97	8019014,27	1590,84	81,33	123,88
<b>42</b>	388814,21	8019012,04	1584,34	78,52	127,44
<b>43</b>	388813,34	8019020,14	1595,02	78,34	129,30
<b>44</b>	388816,49	8019023,69	1596,15	77,19	119,98
<b>45</b>	388821,27	8019020,77	1583,35	77,98	114,15
<b>46</b>	388821,29	8019023,33	1586,64	73,62	119,98
<b>47</b>	388805,82	8019025,27	1607,39	73,68	115,38

---

---

<b>48</b>	388806,48	8019026,87	1609,07	85,23	121,04
<b>49</b>	388819,12	8019026,20	1594,37	74,41	125,71
<b>50</b>	388818,52	8019027,26	1597,08	84,95	124,57
<b>51</b>	388815,31	8019032,65	1604,60	74,81	127,93
<b>52</b>	388821,50	8019024,79	1588,27	84,27	117,41
<b>53</b>	388833,28	8019027,25	1578,57	72,09	123,02
<b>54</b>	388825,92	8019029,41	1589,50	75,49	128,69
<b>55</b>	388820,18	8019032,63	1599,19	77,77	125,77
<b>56</b>	388821,24	8019032,96	1597,37	74,69	117,24
<b>57</b>	388825,35	8019032,65	1593,20	81,86	126,31
<b>58</b>	388826,19	8019033,06	1591,50	84,71	123,64
<b>59</b>	388828,58	8019033,54	1587,48	75,73	118,36
<b>60</b>	388807,50	8019037,02	1615,96	79,07	128,52
<b>61</b>	388796,08	8019041,38	1631,30	81,57	125,23
<b>62</b>	388800,75	8019045,21	1630,80	84,95	118,52
<b>63</b>	388817,94	8019036,18	1605,38	74,32	128,87
<b>64</b>	388823,31	8019036,36	1597,62	77,09	119,77
<b>65</b>	388822,20	8019040,95	1601,09	73,19	128,70
<b>66</b>	388810,12	8019043,86	1619,18	82,15	121,18
<b>67</b>	388816,47	8019044,13	1610,59	82,20	122,62
<b>68</b>	388815,73	8019044,92	1612,86	77,25	127,53
<b>69</b>	388816,20	8019046,76	1615,21	81,13	117,66
<b>70</b>	388824,88	8019043,46	1600,83	78,31	126,54
<b>71</b>	388838,10	8019042,22	1588,85	80,94	121,19
<b>72</b>	388818,06	8019047,92	1609,19	78,04	128,33
<b>73</b>	388817,78	8019048,53	1611,09	74,22	126,84
<b>74</b>	388819,56	8019049,87	1609,30	71,18	123,48
<b>75</b>	388802,82	8019062,05	1627,21	73,43	117,72
<b>76</b>	388810,11	8019061,01	1621,02	78,41	125,94
<b>77</b>	388827,72	8019070,76	1607,91	80,50	125,83

---

<b>78</b>	388827,66	8019070,96	1608,98	75,00	117,71
<b>79</b>	388828,24	8019071,09	1607,32	71,35	127,75
<b>80</b>	388830,20	8019073,69	1609,49	76,16	120,97
<b>81</b>	388823,48	8019076,05	1617,09	84,28	127,62
<b>82</b>	388824,07	8019076,42	1616,20	75,40	124,55
<b>83</b>	388841,45	8019074,36	1602,99	79,58	126,26
<b>84</b>	388840,68	8019075,11	1605,25	71,18	117,58
<b>85</b>	388841,86	8019076,70	1606,33	75,91	116,87
<b>86</b>	388846,82	8019040,14	1576,40	77,13	124,89
<b>87</b>	388843,17	8019042,90	1583,11	72,20	120,15
<b>88</b>	388849,72	8019047,94	1583,90	81,13	117,37
<b>89</b>	388849,73	8019086,75	1612,29	70,07	126,33
<b>90</b>	388855,25	8019073,90	1595,35	79,15	124,37

*Nota.* Tabla que muestra la familia 2 clasificada por el software Point Studio. Elaboración propia.

En la Tabla 15, se ordenan los datos obtenidos de la tercera familia de discontinuidades con valores de Dip Direction que poseen una alta variación (205 a 233).

**Tabla 15**

*Orientaciones de la tercera familia de discontinuidades obtenidas por el dron*

	<b>Coordenadas Este</b>	<b>Coordenadas Norte</b>	<b>Cota</b>	<b>DIP</b>	<b>DIP Direction</b>
<b>1</b>	388813,20	8019013,06	1586,96	35,86	217,49
<b>2</b>	388725,23	8018941,17	1572,90	39,53	223,60
<b>3</b>	388724,91	8018946,62	1577,64	39,51	231,02
<b>4</b>	388741,90	8018978,96	1595,75	35,89	209,85
<b>5</b>	388743,59	8018978,45	1595,73	41,27	207,12
<b>6</b>	388747,19	8018977,90	1595,60	39,15	219,28
<b>7</b>	388750,39	8018982,83	1601,75	34,75	203,76
<b>8</b>	388750,69	8018985,14	1603,99	37,29	211,63
<b>9</b>	388763,61	8018992,40	1599,34	34,26	217,33

<b>10</b>	388777,01	8018986,23	1583,92	31,43	216,43
<b>11</b>	388778,70	8018989,66	1586,48	42,43	219,10
<b>12</b>	388787,76	8018983,85	1580,84	35,16	213,22
<b>13</b>	388776,79	8019005,86	1600,69	43,12	208,51
<b>14</b>	388785,34	8019005,87	1603,11	38,00	218,93
<b>15</b>	388785,09	8019004,57	1602,04	43,35	212,34
<b>16</b>	388778,43	8019008,90	1603,98	39,75	211,93
<b>17</b>	388784,75	8019016,26	1611,51	40,17	207,52
<b>18</b>	388783,16	8019020,49	1616,87	34,24	230,78
<b>19</b>	388784,43	8019019,88	1616,77	37,90	212,60
<b>20</b>	388782,74	8019024,97	1622,42	37,86	220,31
<b>21</b>	388782,99	8019028,23	1625,34	40,88	207,02
<b>22</b>	388791,04	8019010,61	1607,65	39,80	208,91
<b>23</b>	388791,26	8019012,25	1609,05	27,59	223,64
<b>24</b>	388802,00	8019001,61	1586,06	36,74	204,22
<b>25</b>	388803,83	8019002,68	1587,15	31,71	214,59
<b>26</b>	388790,91	8019029,30	1624,71	38,73	210,07
<b>27</b>	388828,84	8019038,12	1591,84	36,33	234,00
<b>28</b>	388828,72	8019040,04	1593,31	42,04	215,32
<b>29</b>	388828,53	8019041,80	1596,30	38,14	229,66
<b>30</b>	388817,20	8019073,64	1616,55	37,09	220,58
<b>31</b>	388818,27	8019080,59	1621,63	37,69	212,23
<b>32</b>	388819,06	8019079,08	1620,75	39,94	218,67
<b>33</b>	388825,80	8019086,36	1628,19	32,35	233,07
<b>34</b>	388813,20	8019013,06	1586,96	35,86	217,49
<b>35</b>	388643,06	8018898,13	1560,49	39,99	218,09
<b>36</b>	388647,63	8018902,06	1564,67	38,42	230,16
<b>37</b>	388648,65	8018901,10	1565,02	41,66	212,72
<b>38</b>	388650,19	8018905,31	1567,91	32,19	224,77
<b>39</b>	388649,50	8018907,35	1569,70	37,70	212,25

---

<b>40</b>	388671,93	8018890,17	1557,81	26,71	221,97
<b>41</b>	388649,09	8018908,72	1570,72	38,61	214,56
<b>42</b>	388682,96	8018930,96	1577,77	35,58	230,63
<b>43</b>	388693,62	8018928,92	1571,84	35,09	216,53
<b>44</b>	388692,89	8018930,75	1572,87	33,59	210,86
<b>45</b>	388684,49	8018932,22	1579,14	41,01	217,46
<b>46</b>	388696,62	8018930,56	1573,36	44,39	216,02
<b>47</b>	388721,40	8018981,75	1605,35	35,30	222,04
<b>48</b>	388727,21	8018981,87	1606,07	36,87	220,50
<b>49</b>	388725,68	8018982,37	1606,03	37,54	212,70
<b>50</b>	388736,93	8018988,01	1609,49	39,01	215,79
<b>51</b>	388739,19	8018985,93	1606,60	30,09	228,53
<b>52</b>	388741,90	8018978,96	1595,75	35,89	209,85
<b>53</b>	388740,47	8018985,56	1607,20	34,50	219,42
<b>54</b>	388751,50	8018968,43	1581,81	42,76	218,95
<b>55</b>	388750,39	8018982,83	1601,75	34,75	203,76
<b>56</b>	388750,69	8018985,14	1603,99	37,29	211,63
<b>57</b>	388763,61	8018992,40	1599,34	34,26	217,33
<b>58</b>	388777,01	8018986,23	1583,92	31,43	216,43
<b>59</b>	388774,69	8018990,01	1583,34	41,68	217,99
<b>60</b>	388778,70	8018989,66	1586,48	42,43	219,10
<b>61</b>	388779,00	8018992,96	1589,71	44,88	217,92
<b>62</b>	388780,00	8018991,42	1588,76	38,15	207,39
<b>63</b>	388787,76	8018983,85	1580,84	35,16	213,22
<b>64</b>	388776,79	8019005,86	1600,69	43,12	208,51
<b>65</b>	388785,34	8019005,87	1603,11	38,00	218,93
<b>66</b>	388785,09	8019004,57	1602,04	43,35	212,34
<b>67</b>	388778,43	8019008,90	1603,98	39,75	211,93
<b>68</b>	388784,75	8019016,26	1611,51	40,17	207,52
<b>69</b>	388783,16	8019020,49	1616,87	34,24	230,78

---

<b>70</b>	388782,74	8019024,97	1622,42	37,86	220,31
<b>71</b>	388791,04	8019010,61	1607,65	39,80	208,91
<b>72</b>	388791,26	8019012,25	1609,05	27,59	223,64
<b>73</b>	388802,00	8019001,61	1586,06	36,74	204,22
<b>74</b>	388803,83	8019002,68	1587,15	31,71	214,59
<b>75</b>	388822,86	8018964,33	1572,75	33,54	232,37
<b>76</b>	388850,83	8018992,03	1575,75	29,72	213,27
<b>77</b>	388806,32	8019060,02	1622,56	39,84	220,95
<b>78</b>	388825,80	8019086,36	1628,19	32,35	233,07

*Nota.* Tabla que muestra la familia 3 clasificada por el software Point Studio.

A continuación, se presenta la Tabla 16, donde se muestran los datos obtenidos de la cuarta familia de discontinuidades, con valores de Dip Direction que van desde 85 hasta 95.

**Tabla 16**

*Orientaciones de la cuarta familia de discontinuidades obtenidas por el dron*

	<b>Coordenadas Este</b>	<b>Coordenadas Norte</b>	<b>Cota</b>	<b>DIP</b>	<b>DIP Direction</b>
<b>1</b>	388809,20	8019008,66	1586,78	72,64	90,87
<b>2</b>	388759,49	8018998,97	1610,64	73,08	93,83
<b>3</b>	388764,72	8018999,76	1606,98	76,76	86,35
<b>4</b>	388789,45	8018984,00	1579,29	74,38	98,73
<b>5</b>	388775,84	8019010,72	1612,72	72,56	99,48
<b>6</b>	388776,22	8019013,40	1613,44	72,48	82,44
<b>7</b>	388774,88	8019015,04	1615,15	70,75	81,76
<b>8</b>	388777,31	8019012,31	1610,41	73,00	92,85
<b>9</b>	388790,71	8019000,67	1598,51	67,40	88,97
<b>10</b>	388791,77	8018997,93	1594,56	66,95	86,49
<b>11</b>	388794,36	8018996,79	1587,77	71,52	85,64
<b>12</b>	388795,80	8018996,68	1584,36	73,05	93,29
<b>13</b>	388798,37	8018994,34	1579,92	72,21	88,79

---

<b>14</b>	388803,68	8018997,89	1577,80	73,90	85,39
<b>15</b>	388797,02	8019012,71	1605,39	64,35	94,46
<b>16</b>	388798,26	8019009,08	1599,48	74,91	90,67
<b>17</b>	388800,96	8019030,16	1618,47	74,99	95,09
<b>18</b>	388802,64	8019027,18	1612,49	70,58	96,07
<b>19</b>	388805,33	8019000,28	1581,17	79,51	92,00
<b>20</b>	388805,65	8019001,49	1583,44	78,52	91,66
<b>21</b>	388807,31	8019011,46	1595,95	73,44	86,68
<b>22</b>	388807,76	8019013,64	1594,45	76,21	87,34
<b>23</b>	388805,66	8019014,41	1599,83	66,59	98,79
<b>24</b>	388806,30	8019015,96	1598,09	79,60	92,83
<b>25</b>	388817,55	8019014,39	1582,20	73,81	95,66
<b>26</b>	388811,15	8019021,83	1600,23	79,10	90,56
<b>27</b>	388817,28	8019018,25	1587,71	73,92	95,39
<b>28</b>	388819,90	8019020,60	1586,49	70,51	91,52
<b>29</b>	388814,35	8019025,79	1601,21	81,67	91,96
<b>30</b>	388813,31	8019026,44	1603,53	77,46	88,47
<b>31</b>	388821,90	8019035,11	1598,18	69,38	99,54
<b>32</b>	388826,44	8019034,02	1591,82	75,30	92,17
<b>33</b>	388793,86	8019036,16	1629,23	77,34	83,53
<b>34</b>	388807,92	8019041,69	1619,78	73,40	89,91
<b>35</b>	388816,35	8019046,20	1612,45	69,26	94,59
<b>36</b>	388817,65	8019046,22	1609,47	68,65	85,41
<b>37</b>	388826,20	8019036,58	1592,53	77,20	89,71
<b>38</b>	388826,79	8019035,29	1591,00	68,75	81,17
<b>39</b>	388833,88	8019037,33	1589,72	70,17	98,08
<b>40</b>	388832,01	8019044,71	1598,79	72,73	88,84
<b>41</b>	388836,23	8019041,87	1591,68	73,88	94,13
<b>42</b>	388839,08	8019045,40	1591,98	77,76	93,72
<b>43</b>	388841,14	8019047,44	1587,70	76,22	92,79

---

44	388839,53	8019049,77	1592,56	74,36	92,34
45	388839,29	8019051,37	1592,58	76,41	96,87
46	388840,36	8019051,29	1590,09	80,86	92,70
47	388805,15	8019064,17	1625,14	74,83	97,37
48	388813,85	8019076,72	1621,54	78,16	84,59
49	388815,28	8019074,62	1618,65	74,69	99,26
50	388827,84	8019071,95	1608,97	66,90	87,63
51	388830,40	8019074,88	1610,21	70,50	95,13
52	388823,84	8019077,45	1617,54	66,74	88,76
53	388829,92	8019075,73	1611,26	68,32	86,92
54	388829,73	8019095,61	1632,40	67,27	96,72
55	388834,64	8019091,05	1625,56	68,00	93,86
56	388842,17	8019114,82	1631,70	74,94	96,73
57	388858,73	8019051,55	1579,01	73,01	94,22
58	388843,78	8019113,13	1629,96	71,38	85,88

*Nota.* Tabla que muestra la familia 4 clasificada por el software Point Studio. Elaboración propia.

A continuación, se presenta la Tabla 17, donde se muestran los datos obtenidos de la quinta familia de discontinuidades, con valores de Dip Direction que van desde 82° hasta 111°.

**Tabla 17**

*Orientaciones de la quinta familia de discontinuidades obtenidas por el dron*

	<b>Coordenadas Este</b>	<b>Coordenadas Norte</b>	<b>Cota</b>	<b>DIP</b>	<b>DIP Direction</b>
1	388689,66	8018931,36	1575,40	35,75	108,91
2	388688,19	8018932,97	1577,43	38,87	88,02
3	388698,09	8018935,60	1575,77	38,35	107,13
4	388700,08	8018932,74	1573,57	35,62	92,90
5	388694,35	8018939,50	1579,51	34,44	100,55
6	388717,11	8018936,64	1569,47	38,70	99,31
7	388690,41	8018941,96	1582,75	34,56	94,21

<b>8</b>	388688,17	8018945,01	1585,72	44,78	90,31
<b>9</b>	388739,84	8018950,14	1573,08	40,75	100,43
<b>10</b>	388740,65	8018954,11	1575,25	38,72	101,85
<b>11</b>	388738,31	8018955,30	1577,53	35,98	111,21
<b>12</b>	388736,24	8018966,43	1586,45	39,32	99,54
<b>13</b>	388742,49	8018956,42	1573,95	36,12	89,78
<b>14</b>	388741,90	8018954,92	1574,69	30,97	97,37
<b>15</b>	388746,25	8018998,50	1615,47	34,53	86,37
<b>16</b>	388745,37	8019001,01	1616,71	37,05	110,94
<b>17</b>	388739,93	8019008,16	1624,05	35,70	107,80
<b>18</b>	388743,32	8019000,00	1617,73	35,19	111,58
<b>19</b>	388743,76	8019003,76	1618,69	38,53	91,30
<b>20</b>	388743,27	8019004,83	1619,32	38,19	82,68
<b>21</b>	388745,04	8019012,36	1625,30	37,69	88,58
<b>22</b>	388747,19	8019011,46	1623,22	41,56	95,89
<b>23</b>	388734,60	8019015,55	1631,35	36,16	92,90
<b>24</b>	388738,56	8019019,37	1632,17	42,06	100,48
<b>25</b>	388747,09	8019022,96	1631,13	39,17	100,43
<b>26</b>	388743,24	8019031,48	1639,34	39,63	102,16
<b>27</b>	388747,97	8018996,66	1614,83	31,97	103,81
<b>28</b>	388750,39	8019009,33	1620,20	33,81	101,44
<b>29</b>	388754,88	8019014,51	1622,05	37,27	103,82
<b>30</b>	388759,76	8019005,76	1614,97	38,68	105,70
<b>31</b>	388760,01	8019012,61	1618,90	40,04	98,66
<b>32</b>	388761,76	8019031,75	1632,57	43,86	89,64
<b>33</b>	388759,31	8019038,84	1638,27	36,23	109,62
<b>34</b>	388761,62	8019037,12	1635,70	41,16	100,75
<b>35</b>	388762,31	8019036,03	1634,75	40,66	105,29
<b>36</b>	388771,44	8019005,20	1610,81	35,69	106,96
<b>37</b>	388804,15	8019007,85	1595,86	39,14	106,31

*Nota.* Tabla que muestra la familia 5 clasificada por el software Point Studio.

#### **6.3.4. *Procesamiento de discontinuidades en Dips***

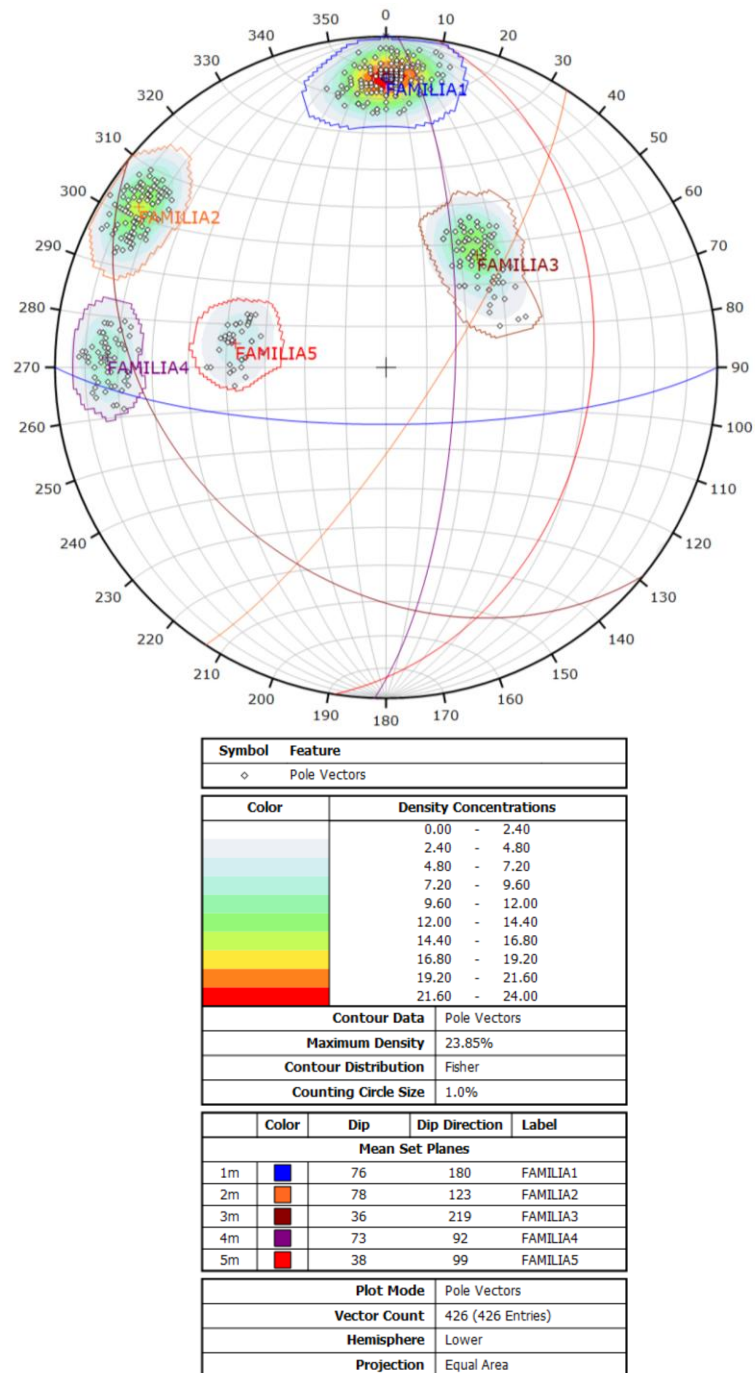
Los datos obtenidos en Point Studio fueron importados en Dips siguiendo la misma metodología aplicada para los datos manuales:

- Importación del archivo con los datos extraídos del modelo digital.
- Visualización estereográfica de los polos y análisis de densidad mediante la opción “Pole Vector Display”, con contornos generados bajo distribución de Fisher.
- Delimitación de concentraciones principales y agrupación por familias estructurales, de forma análoga al proceso aplicado para los datos de campo.

La Figura N° 49 presenta el resultado del análisis estereográfico realizado en el software DIPS, empleando los datos estructurales extraídos a partir del modelo tridimensional generado con el dron. Se analizaron un total de 426 discontinuidades (Pole Vectors), las cuales fueron agrupadas en cinco concentraciones principales, correspondientes a familias estructurales bien definidas.

**Figura 49**

*Estereograma generados con datos totales de familias*



*Nota.* Concentración y clasificación de familias principales en el programa DIPS de Rocscience. Elaboración propia.

Mediante el uso de contornos de densidad (Contour Distribution: Fisher) y la herramienta “Mean Set Planes”, se identificaron cinco agrupamientos principales, correspondientes a cinco familias estructurales con orientaciones dominantes bien definidas. Los valores promedio de cada familia se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 18**

*Familias de discontinuidades con datos tomadas con el Drone*

Familia	Dip (°)	Dip Direction (°)
FAMILIA1	78	180
FAMILIA2	78	123
FAMILIA3	36	219
FAMILIA4	73	92
FAMILIA5	38	99

*Nota.* Datos de Dip-DipDirection de las familias principales tomadas con el Drone.

## Capítulo VII

### Análisis e interpretación de resultados

#### 7.1. Mapeo Geológico

Luego del procesamiento de la información recopilada en campo, del mapeo geológico en escala local y a detalle, se obtuvieron los siguientes resultados:

##### 7.1.1 Mapeo Local

##### 7.1.1.1 Geología Local

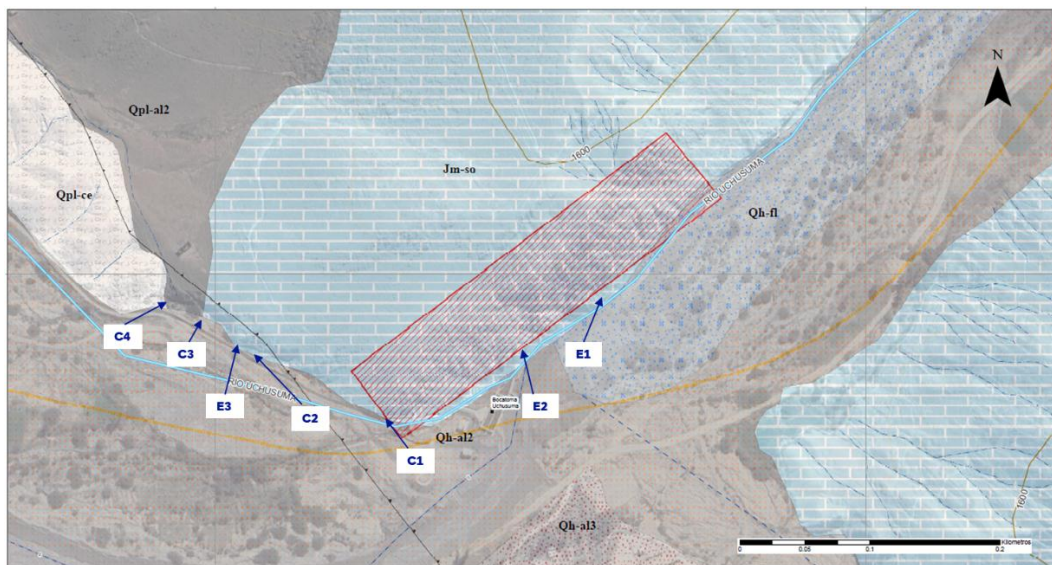
Durante el mapeo geológico de detalle se definieron 3 estaciones de mapeo y 4 zonas de contactos litológicos de relevancia para la interpretación geológica de la zona de estudio, los cuales se describen a continuación:

**Tabla 19**

*Estaciones y Contactos geológicos*

Estación	Este	Norte	Litología	Dip / DipDirection	Comentarios
E1	388625	8018890	Arenisca	-	Presenta relleno entre fracturas, venillas cal
E2	388572	8018919	Arenisca	-	Continua el relleno de cal en menor persistencia
C1	388552	8018929	Arenisca	-	Contacto toba con Arenisca
C2	388536	8018941	Arenisca	-	Contacto entre Arenisca y Toba
E3	388518	8018946	Arenisca	27°/305°	Arenisca con estratos de 305°/27°
C3	388499	8018955	Conglomerado	-	Contacto de Arenisca oxidada con conglomerado
C4	388458	8018974	Conglomerado	-	Contacto de conglomerado con toba

*Nota.* Estaciones donde se muestran Estratos(E), Contacto(C), sus respectivas coordenadas, orientaciones, Tipo de litología y comentarios. Elaboración propia.

**Figura 50***Plano de estaciones de mapeo*

*Nota.* Elaboración propia.

- **Estación 1**

El afloramiento mostrado en la Figura 51 (E1) corresponde a una unidad de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, de color beige claro, con una textura masiva, localmente laminada, aflorando de manera continua sobre la ladera suroeste del talud observado. Este conjunto arenoso muestra una inclinación de aproximadamente  $40^\circ$  hacia el NE, lo que indica una deformación tectónica previa, posiblemente asociada a la actividad compresiva andina reconocida en la zona.

En la parte central del talud se observa un estrato relleno por una vena de calcita blanquecina con óxidos de hierro, que resalta por su coloración anaranjada a rojiza, producto de procesos de oxidación superficial. Este relleno puede interpretarse como una fractura o zona de debilidad estructural que posteriormente fue mineralizada por circulación de fluidos hidrotermales de baja temperatura, posiblemente asociados a fases posttectónicas.

La geometría de este relleno (subvertical y discordante respecto al buzamiento de las areniscas) sugiere que actuó como una vía preferencial para el flujo de fluidos. La presencia de óxidos de hierro en los bordes de la vena indica procesos de oxidación recientes, probablemente influenciados por meteorización subaérea.

Este tipo de estructuras rellenas es común en las unidades del Grupo Moquegua, ampliamente representado en el cuadrángulo Pachía y documentado en el Boletín INGEMMET N.º 139. El conjunto observado puede formar parte de la Formación Moquegua Inferior, caracterizada por sus secuencias de areniscas con intercalaciones de conglomerados y limolitas, que han sido afectadas por eventos tectónicos que originaron estructuras frágiles rellenas por carbonatos secundarios.

### **Figura 51**

*Identificación en campo de Estrato de Arenisca(EI).*



*Nota.* Elaboración propia.

- **Estación 2**

El afloramiento observado en la Figura 52 (E2) corresponde a un conjunto de estratos de areniscas cuarzosas intercaladas con niveles más delgados de limolitas arcillosas, presentando una inclinación promedio de 38°–42° hacia el SE. El patrón de capas inclinadas es evidente en el relieve del talud, mostrando un buzamiento coherente con la tectónica compresiva de la región sur del Perú.

Estos estratos muestran un grado moderado a alto de fracturamiento subparalelo al plano de estratificación, lo que sugiere una deformación postsedimentaria intensa. La coloración rojiza en algunos niveles es indicativa de procesos de oxidación de óxidos de hierro, posiblemente relacionados con condiciones de exposición meteórica y circulación superficial de agua rica en hierro.

En varios puntos del afloramiento se identifican pequeñas fallas o diaclasas rellenas de calcita, lo que evidencia circulación de fluidos a lo largo de planos estructurales preexistentes. Estas estructuras son consistentes con las características del Grupo Moquegua, reconocido por su contenido de areniscas, limolitas y niveles de conglomerado, depositados en ambientes fluviales y posteriormente afectados por eventos tectónicos andinos.

La orientación y geometría de los estratos indican que este talud forma parte de un bloque estructural levantado, con posible influencia de estructuras mayores como fallas inversas o cabalgamientos regionales.

**Figura 52**

*Identificación en campo de Estrato de Arenisca(E2)*



*Nota.* Elaboración propia.

- **Contacto 1**

En la figura 53 (C1) se identifica un afloramiento en contacto litológico evidente entre una unidad de tobas volcánicas (izquierda) y una unidad de areniscas cuarzosas (derecha). Este contacto se presenta de forma inclinada con dirección noroeste-sureste y buzamiento aparente de aproximadamente 40° al noreste.

**Figura 53**

*Contacto entre Toba(izquierda) y Arenisca(derecha), C1*



*Nota.* Elaboración propia.

Toba volcánica (izquierda): La unidad de toba muestra una textura masiva con evidencias de fragmentos pumíceos y clastos líticos finamente dispersos, lo cual es típico de flujos piroclásticos consolidados. Presenta una coloración rosada pálida a blanquecina, con fracturamiento irregular. Esta unidad puede relacionarse con depósitos del volcanismo terciario, como los documentados en la parte superior del Grupo Moquegua o en unidades ignimbríticas locales descritas por el INGEMMET.

Arenisca (derecha): Se observa una secuencia de estratos delgados a medianos, con inclinación moderada, correspondientes a areniscas cuarzosas finas, de color beige claro a grisáceo. La unidad muestra bandeamiento planar paralelo, indicativo de estructuras sedimentarias bien preservadas. También se observa oxidación superficial (probablemente de óxidos de hierro) y presencia de fracturas rellenas con vetillas de calcita, lo que evidencia circulación de fluidos mineralizantes posterior a la deformación.

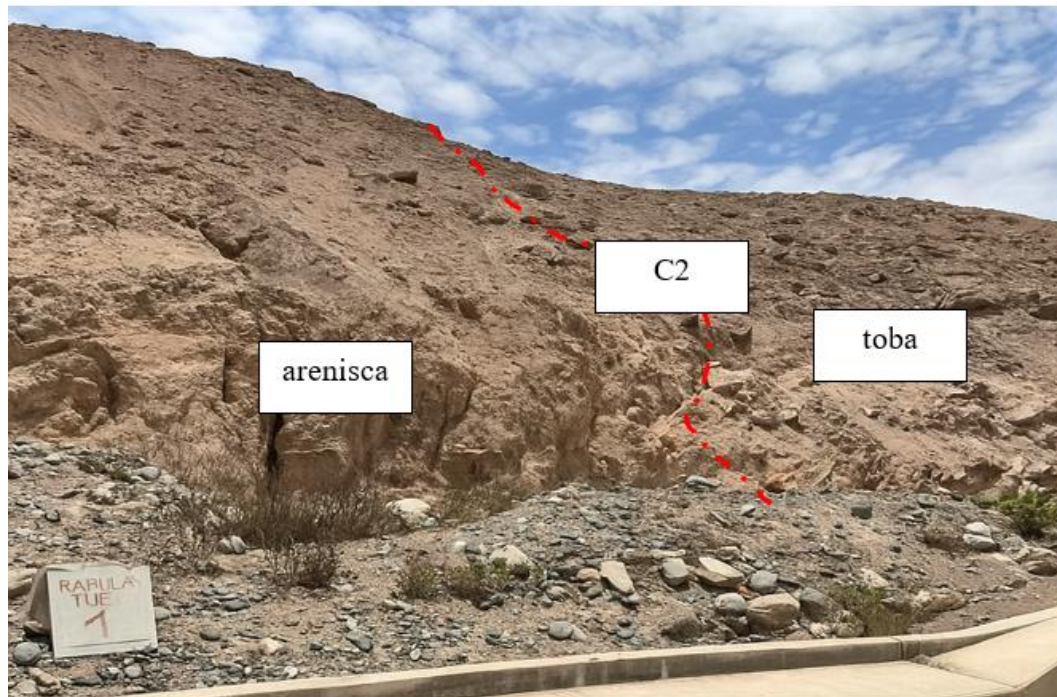
Contacto: El límite entre ambas unidades es neto y marcadamente discordante, lo cual sugiere que puede tratarse de un contacto tectónico (posible falla inversa o cabalgamiento) o de una discordancia angular si las tobas fueron depositadas sobre una superficie erosionada de las areniscas. Dada la disposición regional de las estructuras y la compresión andina, la hipótesis más probable es un contacto tectónico de tipo cabalgamiento, donde la toba habría sido empujada sobre la arenisca en sentido oeste-este.

- **Contacto 2**

En la Figura 54 (C2) se aprecia un contacto litológico destacado entre una unidad sedimentaria de arenisca (izquierda) y una unidad tobácea volcánica (derecha). El contacto está marcado por un cambio abrupto tanto en la textura como en la coloración del macizo rocoso, y ha sido resaltado por un trazo ondulado, interpretado como una zona de cizalla o falla inversa con deformación dúctil-discontinua.

**Figura 54**

*Contacto entre Arenisca(izquierda) y Toba(derecha), C2*



Arenisca (izquierda): Se identifica por su color beige claro, textura fina a media y estructura estratificada poco evidente, posiblemente por alteración. La roca presenta fracturación densa y oxidación superficial leve. Es probable que se trate de una arenisca cuarzosa cementada con carbonatos, correspondiente a la Formación Moquegua o equivalente.

Toba (derecha): De color más pálido y textura porosa, la unidad muestra evidencias de litificación de flujos piroclásticos. Presenta fracturas rellenas con óxidos y, posiblemente, calcita secundaria, con mayor grado de alteración. La geometría más caótica de los bloques sugiere un comportamiento más plástico ante esfuerzos compresivos.

Contacto tectónico (C2): El límite presenta una curvatura sigmoidea que indica deformación por cizallamiento. Este rasgo se interpreta como parte de una zona de cizalla tectónica, posiblemente asociada a esfuerzos compresivos andinos que han producido un cabalgamiento con desplazamiento del bloque tobáceo sobre el bloque arenoso, con una componente de arrastre.

- **Estación 3**

Durante el reconocimiento geológico en el sector Oeste se identificó un afloramiento correspondiente a un estrato de arenisca (E3), expuesto en el talud rocoso de la margen derecha. Este cuerpo sedimentario presenta una litología arenosa homogénea, de grano fino a medio, de color beige claro, compacta y cementada, con inclinación perceptible hacia el noroeste.

Presenta estratificación paralela a subparalela, con buzamiento de  $27^\circ$  y dirección de buzamiento de  $305^\circ$ . Muestra planos de separación visibles entre bancos, con espesores entre 25 y 60 cm. Presenta óxidos; algunos planos están resaltados por pátinas de óxidos de hierro (hematita), lo que facilita la lectura estructural.

El rumbo de  $305^\circ$  y el buzamiento de  $27^\circ$  indican una inclinación moderada hacia el noroeste, posiblemente asociada a inclinación tectónica posterior a la deposición. La buena preservación de los estratos y su continuidad lateral permiten utilizar esta unidad como referente estratigráfico regional dentro de la secuencia de areniscas y tobas presentes en el área. *Ver Figura 55.*

**Figura 55**

*Identificación en campo de Estrato de Arenisca(E3)*



*Nota.* Elaboración propia.

- **Contacto 3**

En el sector identificado como C3 se observa un contacto litológico bien definido entre dos unidades sedimentarias contrastantes: un conglomerado polimítico a la izquierda (oeste) y una secuencia de areniscas a la derecha (este).

El conglomerado (izquierda del contacto) presenta una composición de clastos subangulosos a subredondeados de rocas ígneas, volcánicas y sedimentarias, con matriz arcillo-arenosa. El tamaño de los clastos varía de 1 a 10 cm. Presenta estructura interna mal clasificada, con disposición masiva y sin evidencias claras de estratificación, de color marrón oscuro a grisáceo. Ambientes sugeridos: posiblemente asociado a abanicos aluviales o flujos de detritos de alta energía.

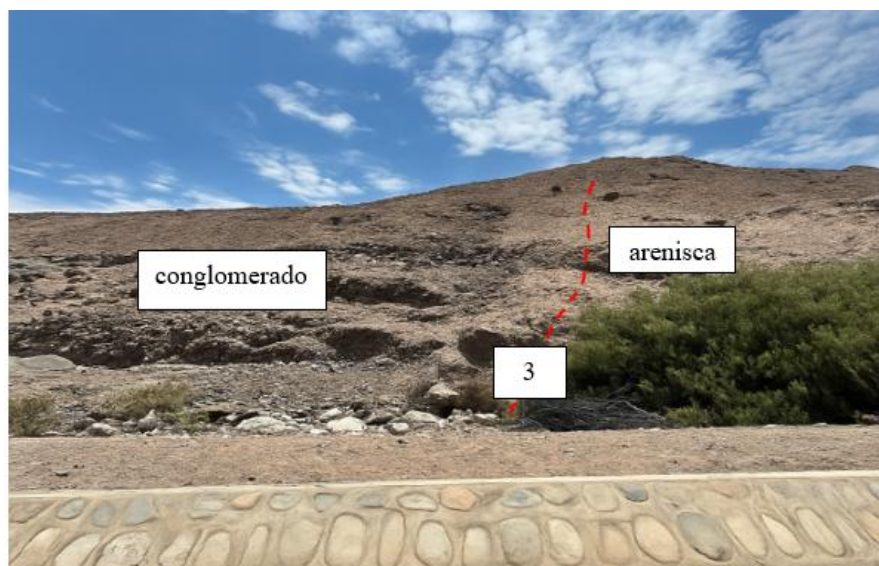
Por otro lado, la arenisca (derecha del contacto) tiene una composición de grano fino a medio, bien cementada, de color beige claro a marrón claro, con estratificación subhorizontal a ligeramente inclinada hacia el noreste. Presenta localmente óxidos y laminación cruzada muy incipiente.

El contacto 3 es transicional neto a discordante, con posible erosión basal leve y con orientación aparente del plano de contacto de aproximadamente  $55^{\circ}/125^{\circ}$ , según la morfología del trazo observado en campo (referencial).

El contacto indica un cambio en el régimen deposicional, pasando de un ambiente de alta energía (conglomerado) a uno de menor energía y mayor madurez sedimentaria (arenisca). Puede tratarse de una superficie de erosión suave o de un cambio de facies lateral sin disconformidad tectónica clara. *Ver Figura 56.*

### Figura 56

*Contacto entre conglomerado (izquierda) y Arenisca (derecha), C3*



*Nota.* Elaboración propia.

- **Contacto 4**

En la exposición denominada C4 se reconoce un contacto litológico claramente visible entre una unidad masiva de toba soldada de color claro a la izquierda y una unidad de conglomerado polimíctico mal estratificado a la derecha.

Toba (izquierda del contacto): Toba dacítica a riolítica, masiva, soldada, de color beige claro a marrón claro, típica de tobas soldadas o compactadas, piroclástica, con matriz fina y fragmentos angulosos a subredondeados visibles a simple vista. Presenta disposición caótica de fragmentos líticos volcánicos, lo que indica transporte por flujo piroclástico. Se identifican clastos de roca de diferentes tamaños embebidos en la matriz, algunos con bordes angulosos, lo cual es característico de las tobas. Presenta diaclasas rectas y rellenos delgados de óxidos, lo que puede indicar oxidación postdeposición o circulación de fluidos por meteorización. *Ver Figura 57.*

### **Figura 57**

*Afloramiento de toba volcánica consolidada*



*Nota.* Elaboración propia.

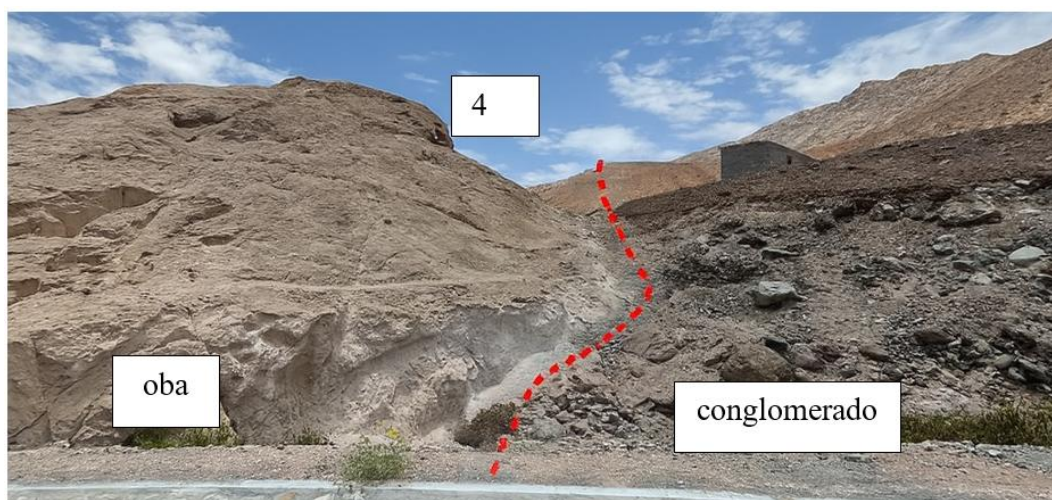
El contexto geológico del cuadrángulo de Pachía-Palca, según el Boletín N° 139 de INGEMMET, registra depósitos volcánicos miocénicos de este tipo, lo cual refuerza la interpretación.

Conglomerado (derecha del contacto): Conglomerado clasto-soportado, con clastos de andesita, dacita y sedimentos de tamaño variable (2–15 cm). Presenta matriz arenosa a fangosa, de color pardo oscuro, con estructura mal clasificada y sin evidencia clara de estratificación, ligeramente inclinada hacia el norte. Posible ambiente deposicional tipo abanico aluvial de alta energía.

Contacto 4: Es del tipo discordante erosivo. La base del conglomerado parece apoyarse directamente sobre la toba, lo cual sugiere una posible superficie de erosión o no conformidad. Esta relación sugiere una interrupción en la sedimentación, seguida por un episodio erosivo o un cambio ambiental abrupto, posiblemente vinculado a tectonismo local o al cese abrupto de la actividad volcánica y la posterior acumulación de sedimentos detríticos gruesos.

### Figura 58

*Contacto entre Toba (izquierda) y conglomerado (derecha), C4*



*Nota.* Elaboración propia.

### 7.1.1.2 Geomorfología Local

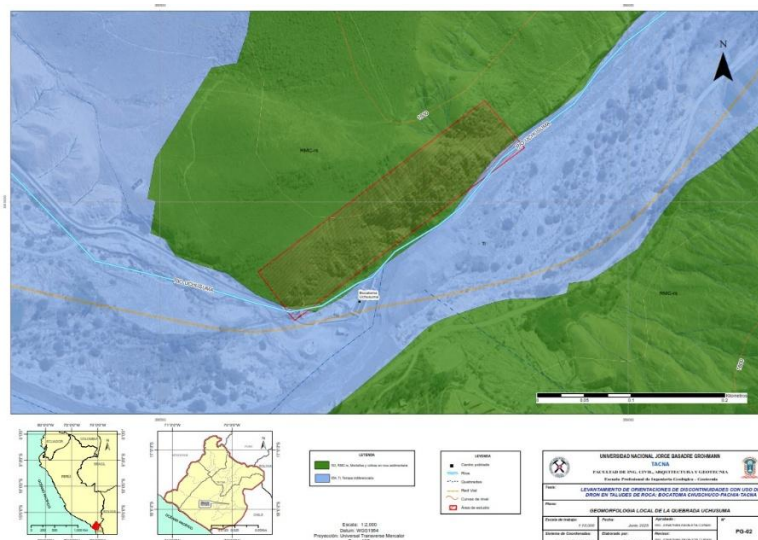
La zona está situada a lo largo de un río, lo que indica que forma parte de una llanura de inundación o de un cauce activo. Esta área está sujeta a procesos de erosión lateral, sedimentación y posibles eventos de desborde durante lluvias intensas.

En la figura 59 se observa que las áreas verdes representan terrenos más elevados, correspondientes a laderas de cerros o colinas. El talud que corresponde a la zona de estudio presenta un relieve con pendientes moderadas a fuertes.

Por la cercanía al cauce, se evidencian procesos de socavación en las bases de los taludes, ya que el río deposita sedimentos finos en épocas de crecida, formando terrazas o barras de arena. Las pendientes cercanas al cauce están sujetas a deslizamientos o colapsos, especialmente en zonas de debilidad como fallas, fracturas y materiales poco consolidados.

#### Figura 59

##### *Geomorfología local*



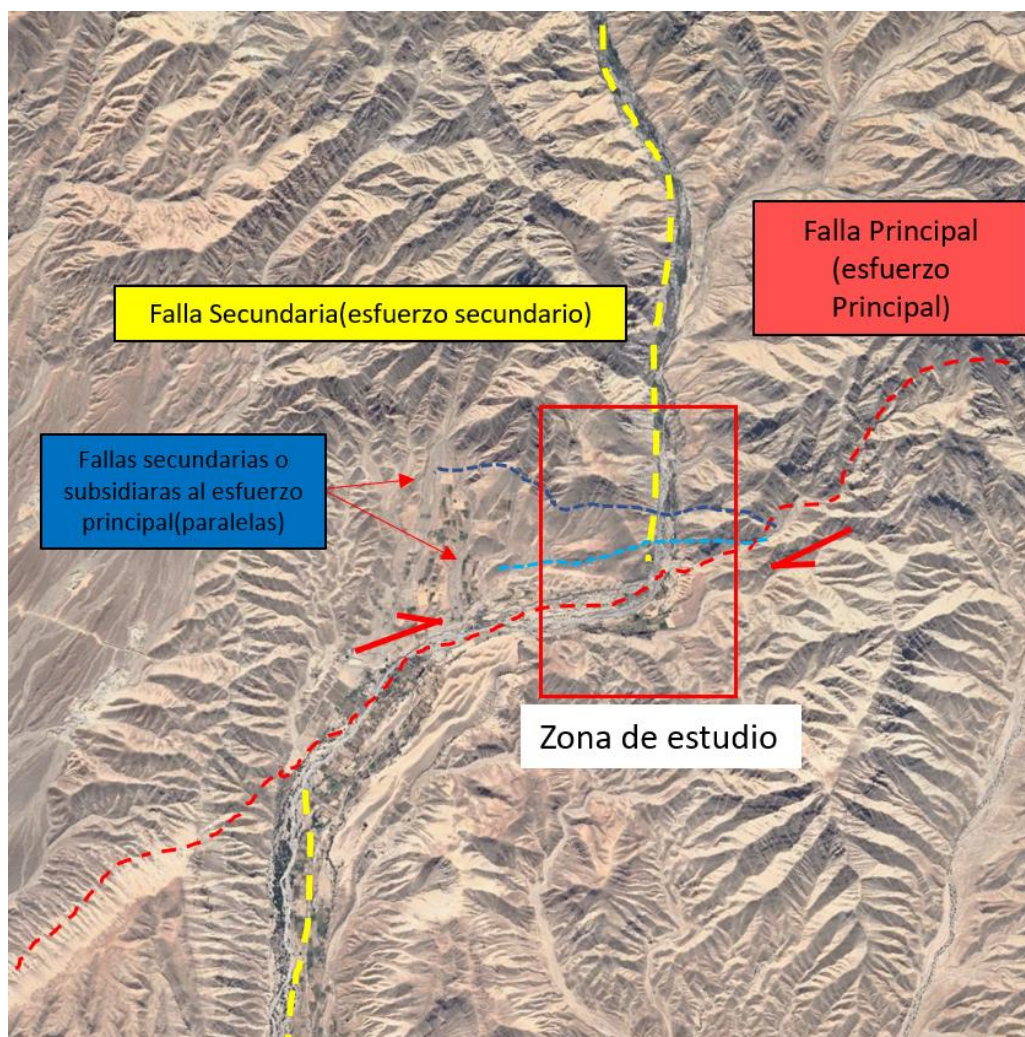
*Nota.* Elaboración propia.

### 7.1.1.3 Geología Estructural Local

La zona de estudio presente una dinámica estructural principalmente compuesta por el sistema de falla Calientes, durante el mapeo se reconocieron fallas regionales y locales que forman parte de esta dinámica.

**Figura 60**

*Interpretación de Estructuras regionales*



*Nota.* Trazado de interpretación estructuras principales, secundarias y subsidiarias. Elaboración propia

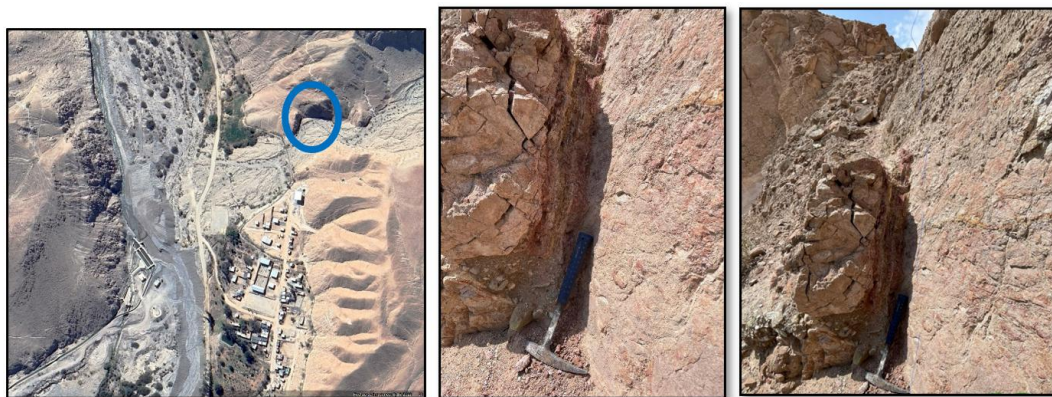
En la figura 60 se representa la interpretación de la dinámica estructural regional de la zona de la bocatoma Chuscuco, ubicada al norte de Pachía (Tacna, Perú). En ella se identifican y delimitan distintas estructuras tectónicas mayores y menores que configuran el marco geodinámico local. Estas estructuras han controlado tanto la geomorfología como la disposición de las unidades litológicas observadas en campo.

- **Falla Principal (Esfuerzo Principal) – Línea roja punteada**

Corresponde a una estructura tectónica regional de gran magnitud que probablemente responde al régimen de esfuerzos compresivos o transcurrentes dominantes en la región andina sur del Perú. Esta falla principal puede interpretarse como una estructura consecuente a la Falla Calientes, que ha controlado la orientación de los valles y de la red hidrográfica principal, y atraviesa transversalmente la zona de estudio. Su expresión morfológica sugiere desplazamiento lateral y vertical, lo que podría asociarse a una falla inversa o dextral con componente transcurrente. *Ver Figura 61.*

### **Figura 61**

*Falla principal en zona de estudio*



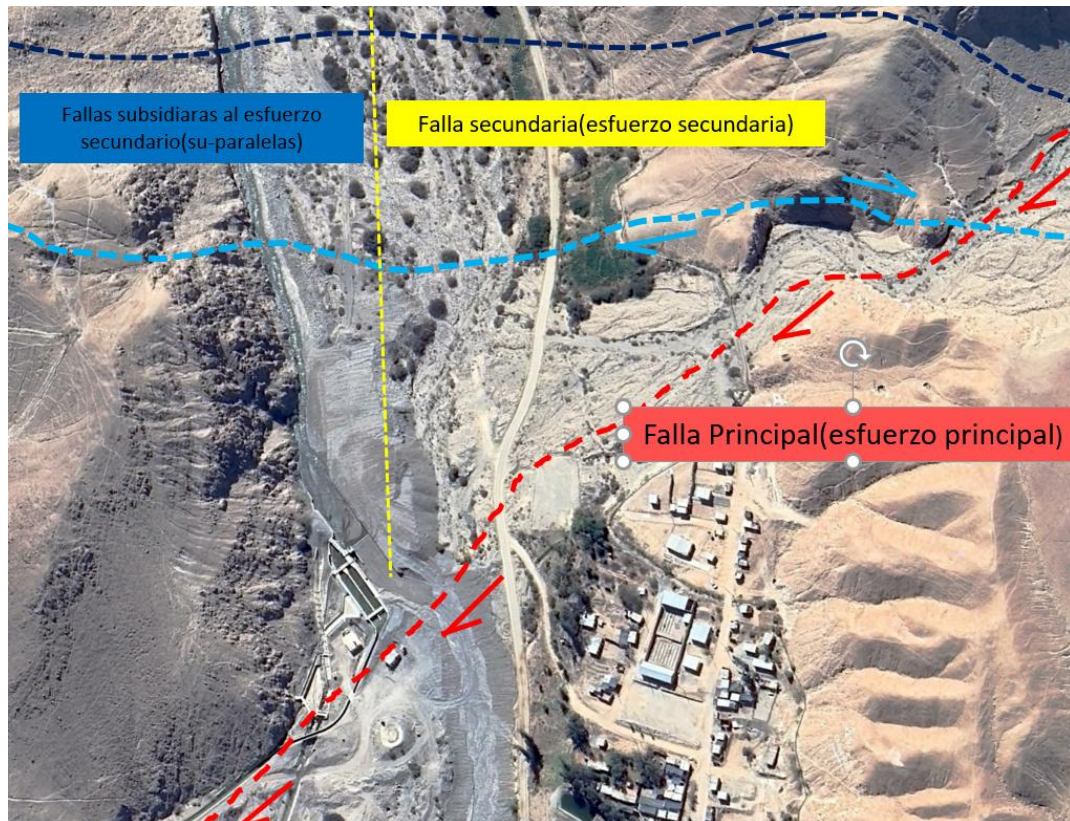
*Nota.* Reconocimiento en campo de la falla principal. Elaboración propia.

- **Falla Secundaria (Esfuerzo Secundario) – Línea amarilla punteada**

La traza amarilla corresponde a una estructura de orientación submeridiana, ortogonal a la Falla Calientes (principal), que podría interpretarse como una estructura secundaria relacionada al esfuerzo tectónico  $\sigma_2$ . Su disposición sugiere una posible función como falla de transferencia o de acomodación, facilitando el ajuste cinemático entre bloques delimitados por fallas mayores. Asimismo, su geometría puede corresponder a una estructura preexistente reactivada bajo el régimen compresivo andino.”

- **Fallas Subsidiarias al Esfuerzo Principal – Líneas azules punteadas**

Se trata de fallas secundarias menores que siguen el mismo rumbo que la falla principal. Son estructuras de menor jerarquía, posiblemente activadas en eventos tectónicos posteriores o durante fases de reajuste local. Su alineamiento paralelo indica que actúan como zonas de acomodación del esfuerzo principal, y pueden generar fracturamiento en bloques limitados.

**Figura 62***Interpretación de Estructuras locales de la zona de estudio*

*Nota.* Trazado de líneas de estructuras principales. Elaboración propia.

En la Figura 62 se puede resaltar que, en la dinámica local, tenemos una falla normal principal y luego una falla secundaria de tipo dextral, dando como consecuencia las fallas subsidiarias al esfuerzo secundario (subparalelas). Este tectonismo le da una forma de codo al río.

Interactuando directamente con nuestro talud, tenemos las fallas dextrales que mantienen el sentido de las fallas del sistema Calientes.

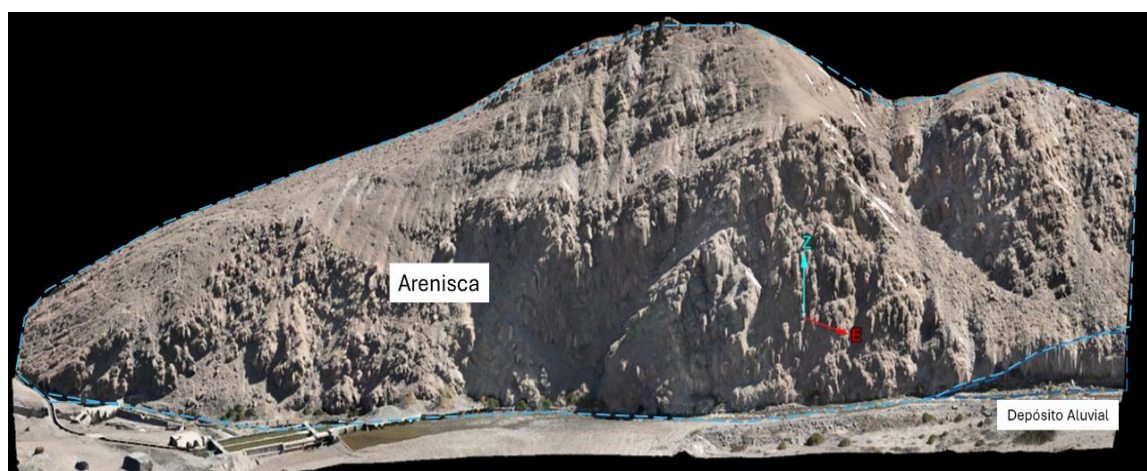
### 7.1.2. Mapeo de Talud a detalle

#### 7.1.2.1 Geología de Talud a detalle

En la zona del talud se identificaron 2 principales litologías: aproximadamente con una extensión de 300 m se identificó Areniscas calcáreas de la Formación Socosani, la cual al Nor-Oeste del talud se evidencia en contacto con cuaternario aluvial de cantos, arenas y gravas sub redondeadas polimicticas en una matriz limoarcillosa formando terrazas en los flancos del rio. Ver Figura 63.

#### Figura 63

*Geología a detalle del talud*



*Nota.* Elaboración propia.

#### 7.1.2.2 Geomorfología de Talud a detalle

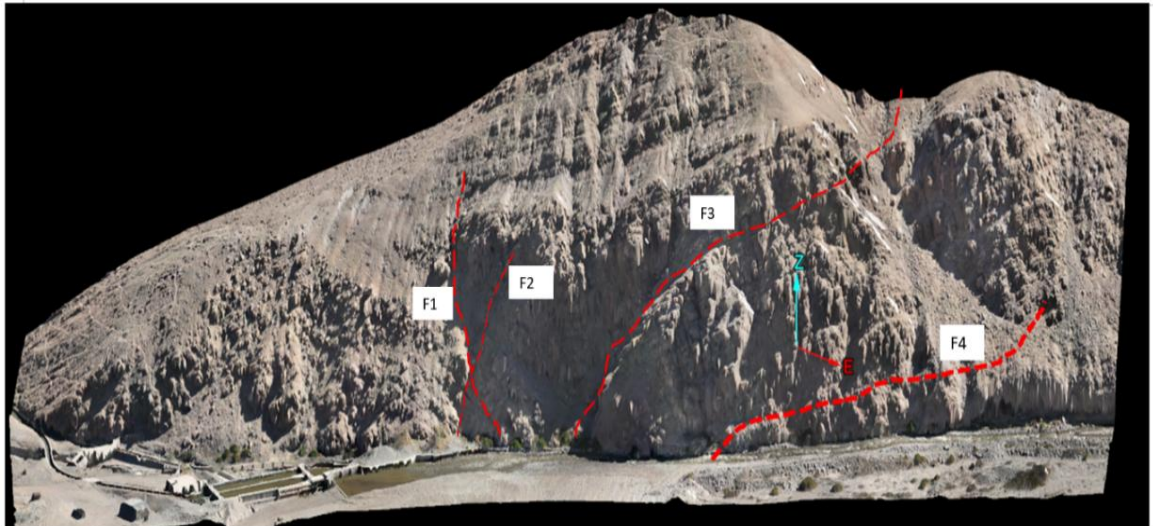
El talud en la zona de la bocatoma Chuschuco presenta una geomorfología de ladera inestable, con fuerte influencia tectónica (Falla Calientes), litología poco competente y procesos erosivos activos. Estas condiciones hacen que el área sea susceptible a colapsos y deslizamientos, especialmente durante eventos de lluvia intensa o sismos.

En el talud se evidencia roca in situ en contacto con zonas de colapso con pendiente pronunciada y ángulos superiores a 35°. Las capas inclinadas hacia el talud sugieren un potencial de deslizamiento planar si las discontinuidades coinciden con la pendiente. Presenta intenso agrietamiento y bloques sueltos, indicativos de procesos de meteorización física y esfuerzo tectónico activo.

Asimismo, se observan surcos y texturas rugosas en la superficie, producto de erosión hídrica superficial, con evidencia de caída de bloques y acumulación de detritos en la base del talud, lo que indica actividad geomorfológica reciente.

### **7.1.2.3 Geología Estructural de Talud a detalle**

A lo largo del levantamiento estructural realizado en el sector del talud aledaño a la bocatoma Chuschuco, se identificó y caracterizó un conjunto de fallas geológicas relevantes por su disposición, relleno y extensión. En total, se reconocieron cuatro estructuras principales distribuidas tanto en la ladera oeste del río como a lo largo del talud analizado. Estas fallas presentan diferentes orientaciones, ángulos de buzamiento y características litológicas, destacando la presencia de brechas de falla (Bx) y rellenos arcillosos, en algunos casos acompañados de óxidos. La identificación de estas estructuras permite comprender mejor el grado de fracturamiento del macizo rocoso y su posible influencia en la estabilidad del talud y en el control estructural. *Ver Figura 64.*

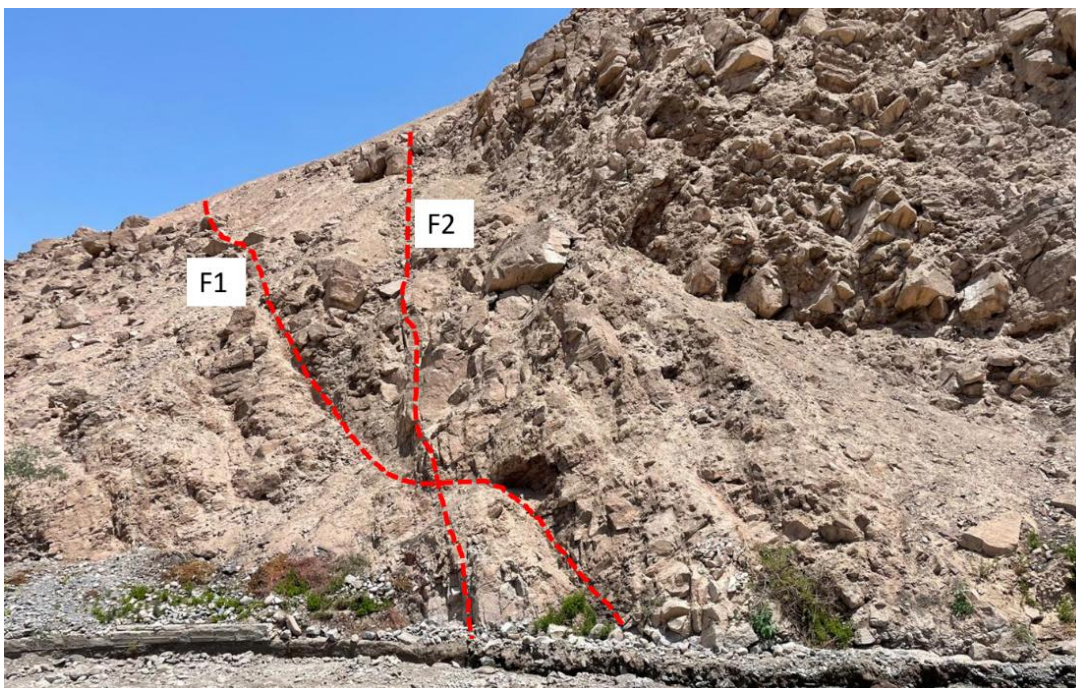
**Figura 64***Fallas principales en talud de zona de estudio*

*Nota.* Se muestran las fallas principales (F1 a F4) identificadas en el talud de estudio, trazadas a partir de análisis visual sobre modelo fotogramétrico. Elaboración propia.

- Las primeras fallas que se tomaron se evidencian en la ladera oeste del río teniendo una intersección de dos fallas. La Falla (F1) 60 y de dirección de buzamiento 235 con un espesor de 20cm de Bx de falla con óxidos y arcillas y la segunda(F2) con 70 de buzamiento y 205 dirección de buzamiento rellena de arcillas con espesor de 60cm. Ver Figura 65.

**Figura 65**

*Fallas principales F1 y F2 en talud de zona de estudio*



*Nota.* Fotografía del talud en la zona de estudio donde se observan las fallas principales F1 y F2. Las líneas rojas punteadas indican la traza visual interpretada de las fallas, basada en observaciones de campo. Elaboración propia.

- Luego la Falla F3, contigua llegando al talud de estudio con  $37^\circ$  de buzamiento y  $348^\circ$  de dirección de buzamiento con un 30 cm de espesor de Bx de falla rellena de arcillas con 15m de longitud. Ver figura 66.

**Figura 66**

*Falla F3 en talud de zona de estudio*



*Nota.* Falla F3 en líneas rojas punteadas sobre fotografía en campo. Elaboración propia.

- A 200 m al sur se identificaron 3 fallas: la principal F4(35/335), con dos secundarias, F4.1(28/285), F4.2(35/320) de longitudes de 20 metros, 12 metros y 15 metros respectivamente, todas rellenas de arcillas. Ver Figura 67.

**Figura 67**

*Falla principal F4 y secundarias*



*Nota.* Se observa la falla principal F4 y sus ramificaciones secundarias F4.1 y F4.2 delimitadas con líneas rojas punteadas. Imagen de elaboración propia.

## **7.2. Levantamiento de discontinuidades**

Del procesamiento de datos obtenidos del levantamiento de discontinuidades con el método manual, con el uso del programa Dips, se obtienen 5 familias identificadas en el macizo.



Las orientaciones promedio de las familias estructurales muestran una variabilidad significativa tanto en el ángulo de buzamiento como en su dirección de buzamiento, lo que sugiere que estas estructuras no están relacionadas entre sí en términos de un único régimen estructural o sistema de esfuerzos dominante.

- FAMILIA 1 y FAMILIA 4, presentan buzamientos elevados ( $>75^\circ$ ), pero con direcciones divergentes ( $194^\circ$  vs.  $98^\circ$ ), lo que indica que podrían representar planos subverticales de distinta génesis o generaciones tectónicas distintas.
- FAMILIA 2 y FAMILIA 4, tienen dip similares ( $75^\circ$  y  $77^\circ$ ), pero también direcciones diferentes ( $118^\circ$  y  $98^\circ$ ), lo que podría sugerir una rotación estructural o efecto local de reactivación de fallas.
- FAMILIA 3, con Dip de  $27^\circ$ , representa un plano más subhorizontal o inclinado suavemente hacia el suroeste ( $215^\circ$ ), lo que podría interpretarse como una familia relacionada con planos de deslizamiento, estratificación o estructuras de relevo.
- FAMILIA 5, con una orientación moderada ( $48^\circ/103^\circ$ ), presenta menor densidad en la concentración de polos, por lo que, si bien es estadísticamente identificable, se considera de menor consistencia estructural, posiblemente asociada a variaciones locales o a un conjunto subordinado.

En conjunto, este patrón estructural sugiere que el talud presenta una disposición heterogénea de discontinuidades, sin una orientación dominante única, lo que podría implicar un comportamiento mecánico complejo en términos de estabilidad. Este aspecto será abordado en el análisis cinemático y geomecánico en los siguientes apartados.

### 7.3. Medición con dron

Los resultados muestran un conjunto diverso de estructuras con distinta inclinación y orientación espacial, lo que sugiere una geometría compleja en el macizo rocoso. Algunas observaciones relevantes incluyen:

- FAMILIA 1 y FAMILIA 2 presentan buzamientos altos ( $78^\circ$ ), pero con una diferencia notable en dirección de buzamiento ( $180^\circ$  y  $123^\circ$ ), lo que podría indicar la presencia de planos subverticales con distinta génesis o rotación estructural.
- FAMILIA 3 y FAMILIA 5 comparten Dips intermedios ( $36^\circ$  y  $38^\circ$ ) con direcciones hacia el suroeste y este, respectivamente, posiblemente asociadas a planos de deslizamiento, foliación o estratificación.
- FAMILIA 4, con orientación  $73^\circ/92^\circ$ , podría representar estructuras favorables a la ocurrencia de mecanismos de caída si el talud se encuentra orientado en dirección opuesta.

Esta interpretación será contrastada con los datos obtenidos manualmente en campo en las secciones siguientes, con el propósito de evaluar la confiabilidad y consistencia de la información estructural generada mediante técnicas digitales. Si bien el uso del dron permitió la obtención de un volumen significativamente mayor de datos, lo que favoreció una delimitación más precisa de las concentraciones estructurales y una mejor definición estadística de las familias, es fundamental validar su precisión.

Para ello, en la sección 7.4 se desarrollará una comparación directa entre ambos conjuntos de datos —manuales y digitales— empleando criterios de aceptabilidad angular basados en el análisis de dispersión de los valores de Dip y Dip Direction. Esta evaluación permitirá determinar en qué medida la información

recolectada digitalmente puede considerarse confiable y representativa desde el punto de vista geomecánico.

#### **7.4. Comparativa de método Manual vs método Digital**

##### ***7.4.1. Validación estructural con puntos de control***

Con el objetivo de evaluar la precisión y aceptabilidad del levantamiento digital de discontinuidades realizado mediante el uso de dron, se realizó la validación puntual de la precisión geométrica del modelo digital generado a partir del vuelo fotogramétrico. Esta validación consistió en identificar discontinuidades visibles en tanto en campo como en el modelo tridimensional, y comparar los valores de buzamiento (dip) y dirección de buzamiento (dip direction) obtenidos manualmente con brújula geológica, frente a los valores extraídos digitalmente en el software PointStudio.

Este enfoque permite evaluar la fidelidad geométrica del modelo en la representación de estructuras geológicas, especialmente en contextos donde la orientación de las discontinuidades es crítica. Para esto se definieron diez estaciones o puntos de control georreferenciadas dentro del talud de estudio. Estas estaciones fueron seleccionadas estratégicamente en zonas donde se contaba con disponibilidad simultánea de datos manuales (levantamiento en campo con brújula) y datos digitales (extraídos del modelo 3D del dron).

Cada estación corresponde a un área representativa del talud, con presencia clara de superficies de discontinuidad visibles y accesibles, lo que permitió realizar un análisis comparativo directo entre ambos métodos de levantamiento. Para cada punto de control, se compararon las orientaciones estructurales Dip (ver Tabla 20) y Dip Direction (ver Tabla 21) de las mismas superficies medidas tanto manualmente como digitalmente, considerando el siguiente procedimiento:

- Recolección de datos manuales mediante brújula de geólogo con precisión óptica.
- Extracción digital de las mismas estructuras desde el modelo tridimensional en Point Studio, siguiendo la misma nomenclatura.

**Tabla 20***Comparación de Dip en puntos de control*

Punto de Control	Dip Manual (°)	Dip Digital (°)	Familia Manual	Observaciones
Control 1	79	80,73	FAM1	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia
Control 2	76	74,11	FAM2	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia
Control 3	32	32,89	FAM3	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia
Control 4	75	73,08	FAM4	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia
Control 5	81	75,29	FAM4	Aceptabilidad regular, 5°-15° de diferencia
Control 6	77	73,88	FAM4	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia
Control 7	70	73,99	FAM2	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia
Control 8	78	82,33	FAM 2	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia
Control 9	33	35,49	FAM3	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia

Control 10	78	79.51	FAM1	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia
------------	----	-------	------	---------------------------------------

*Nota.* Tabla comparativa de puntos de control de dip manual y digital clasificando la aceptabilidad. Elaboración propia.

**Tabla 21**

*Comparación de Dip Direction en puntos de control*

Punto de Control	Dip Direction Manual (°)	Dip Direction Digital (°)	Familia Manual	Aceptabilidad
Control 1	187	184,03	FAM1	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia
Control 2	121	123,25	FAM2	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia
Control 3	217	219,95	FAM3	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia
Control 4	95	93,83	FAM4	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia
Control 5	100	93,83	FAM4	Aceptabilidad regular, 5°-15° de diferencia
Control 6	94	94,13	FAM4	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia
Control 7	115	116,01	FAM2	Alta aceptabilidad, <5° de diferencia
Control 8	117	127,44	FAM 2	Aceptabilidad regular, 5°-15° de diferencia
Control 9	219	232,55	FAM3	Aceptabilidad regular, 5°-15° de diferencia

Control 10	189	187,43	FAM1	Alta aceptabilidad, <math><5^\circ</math> de diferencia
------------	-----	--------	------	--

*Nota.* Tabla comparativa de puntos de control de DipDirection manual y digital clasificando la aceptabilidad. Elaboración propia.

Este enfoque permitió establecer una validación cruzada objetiva, basada en la comparación directa de orientaciones equivalentes entre ambos métodos. Los resultados obtenidos en estas estaciones de control son fundamentales para sustentar las conclusiones del presente estudio, especialmente en relación con la aplicabilidad del mapeo digital en reemplazo (o complemento) de los métodos tradicionales en condiciones reales de talud.

### Figura 69

*Toma de puntos de control manual y digital*



*Nota.* Punto de control georreferenciado "Control 1" registrado manualmente en campo (izquierda) y ubicado digitalmente en el modelo fotogramétrico Drone (derecha). Figura de elaboración propia.

#### 7.4.2. Validación espacial - Superposición de familias equivalentes

Con el objetivo de verificar la correspondencia entre los datos recolectados manualmente y los obtenidos mediante fotogrametría aérea, se realizó una comparación angular directa entre las orientaciones promedio (Dip/Dip Direction)

de las familias estructurales definidas por ambos métodos. Esta comparación busca identificar familias equivalentes, es decir, aquellas cuyas orientaciones difieren en un margen igual o menor a  $\pm 15^\circ$ , ya que, si rebasan este rango, se considera el dato como no aceptable, tanto en buzamiento como en dirección de buzamiento.

A continuación, se presenta el resultado de esta comparación:

**Tabla 22**

*Comparación de valores promedios Dip/DipDirection*

Familia	Dip	Dip	$\Delta$	DipDir	DipDir	$\Delta$	Equivalencia
	Manual ( $^\circ$ )	Drone ( $^\circ$ )	Dip ( $^\circ$ )	Manual ( $^\circ$ )	Drone ( $^\circ$ )	DipDir ( $^\circ$ )	
FAM1	80	78	2	194	180	14	Sí
FAM2	74	78	4	118	123	5	Sí
FAM3	28	36	8	214	219	5	Sí
FAM4	76	73	3	96	92	4	Sí
FAM5	48	38	10	103	99	4	(*Solo en Drone)

*Nota.* Comparativo que muestran, por familia estructural, las diferencias registradas entre valores de Dip/DipDirection. Elaboración propia.

Se observa que las familias FAM1 a FAM4 cumplen con el criterio de equivalencia espacial, presentando diferencias menores a  $15^\circ$  tanto en dip como en dip direction. Estas pueden ser consideradas familias estructurales coincidentes en ambos métodos, lo que valida la precisión del modelo digital generado mediante dron.

En el caso de la FAM5, aunque las diferencias también están dentro del rango aceptable, se desestima en el conjunto manual debido a su baja persistencia y escaso número de datos, mientras que en el modelo digital presenta mayor

densidad y extensión estructural. Por ello, esta familia es aceptada solo dentro del análisis digital.

**Tabla 23**

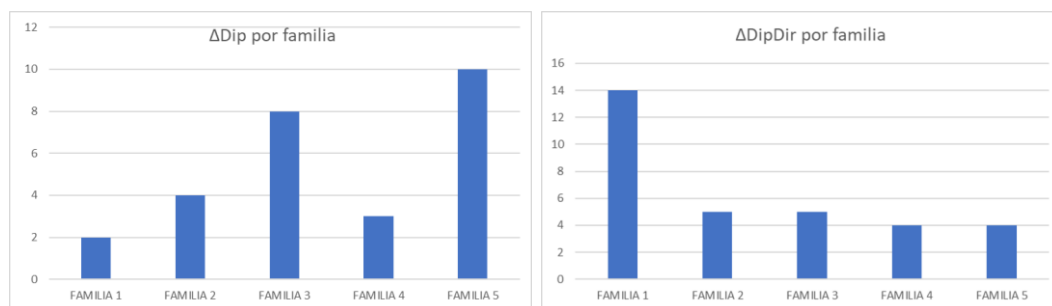
*Diferencias en Dip/DipDirection por familia*

$\Delta$ Dip por familia		$\Delta$ Dip DIRECTION por familia	
FAMILIA 1	2	FAMILIA 1	14
FAMILIA 2	4	FAMILIA 2	5
FAMILIA 3	8	FAMILIA 3	5
FAMILIA 4	3	FAMILIA 4	4
FAMILIA 5	10	FAMILIA 5	4

*Nota.*

**Figura 70**

*Diferencias en Dip/DipDirection por familia*



*Nota.* Gráfico comparativo que muestran, por familia estructural, las diferencias registradas entre valores de Dip/DipDirection. Elaboración Propia.

El gráfico de barras correspondiente a la comparación angular por familia estructural muestra las diferencias absolutas en buzamiento ( $\Delta$ Dip) y dirección de buzamiento ( $\Delta$ Dip Direction) entre los datos recolectados manualmente en campo y los obtenidos mediante fotogrametría aérea con dron.

En general, se observa que todas las familias estructurales presentan diferencias dentro del umbral de aceptabilidad definido ( $\leq 15^\circ$ ), lo que indica una alta concordancia geométrica entre ambas metodologías de levantamiento.

- Las familias FAM1, FAM2 y FAM4 muestran diferencias mínimas tanto en Dip como en Dip Direction (entre  $2^\circ$  y  $4^\circ$ ), lo que sugiere que estas orientaciones estructurales son reproducidas con gran precisión por ambos métodos.
- En el caso de FAM3, aunque la diferencia en el buzamiento es mayor ( $\Delta\text{Dip} \approx 8^\circ$ ), la dirección de buzamiento se mantiene dentro de los márgenes estrechos, lo cual no compromete la validez estructural de la correspondencia.
- FAM5, aunque numéricamente aceptable ( $\Delta\text{Dip} = 10^\circ$ ,  $\Delta\text{DipDir} = 4^\circ$ ), se excluye del conjunto validado por método manual debido a su baja densidad y persistencia, situación que se compensa por la robusta definición de esta familia en el modelo generado por dron.

En conjunto, el gráfico evidencia que los datos estructurales obtenidos con dron pueden considerarse equivalentes y representativos respecto a los obtenidos mediante métodos convencionales, al menos en cuanto a sus orientaciones espaciales promedio. Este resultado respalda la fiabilidad del mapeo digital como herramienta complementaria o alternativa para levantamientos estructurales en zonas de difícil acceso.

#### **7.4.3. Diagrama Roseta**

En el análisis estructural realizado, las direcciones de buzamiento (Dip Direction) obtenidas tanto del levantamiento manual como del modelo digital se utilizaron como base para representar las orientaciones predominantes en diagramas de rosa. Sin embargo, para visualizar correctamente la dirección real de las

estructuras —es decir, el rumbo o strike de los planos de discontinuidad—, fue necesario realizar una conversión angular.

El Dip Direction indica la dirección hacia donde “cae” el plano (es decir, la línea de máxima pendiente sobre su superficie), pero el rumbo corresponde a la línea de intersección del plano con la superficie horizontal, y es perpendicular al dip direction. Por lo tanto, para representar la orientación real de las estructuras en un sistema azimutal, se aplicó la siguiente transformación:

$$\text{Azimuth (strike)} = \text{Dip Direction} - 90$$

En aquellos casos donde la resta aritmética resultó en valores negativos, se normalizó el azimuth sumando  $360^\circ$ , para mantener los resultados en el rango estándar de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

Esta conversión fue aplicada a todas las familias estructurales antes de construir los diagramas de rosa, lo que permitió que la representación gráfica reflejara de manera más precisa la distribución direccional de los planos estructurales dentro del talud de roca. Gracias a esta corrección angular, los resultados graficados pueden ser utilizados con mayor rigor en la evaluación cinemática y en la interpretación estructural del macizo rocoso.

Se toman los datos y se realiza el análisis para el posterior trazado en las rosetas de familias principales FAMILIA 1- FAMILIA 5.

**Tabla 24**

*Conversión de DipDirection a Azimut por familia*

DATA MANUAL		
	DIPDIR	AZIMUT
FAMILIA 1	194	104

FAMILIA 2	118	28
FAMILIA 3	214	124
FAMILIA 4	96	6
FAMILIA 5	103	13
DATA DRONE		
	DIPDIR	AZIMUT
FAMILIA 1	180	90
FAMILIA 2	123	33
FAMILIA 3	219	129
FAMILIA 4	92	2
FAMILIA 5	99	9

*Nota.* Resultados de conversión de DipDirection Azimuth data manual.

### **Tabla 25**

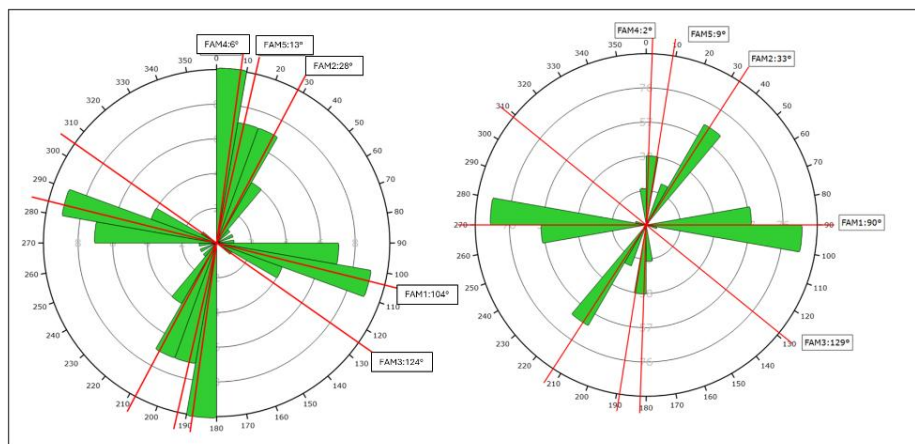
*Diferencias en Azimut por familia*

Familia	Azimuth Manual	Azimuth Digital	Diferencia (°)
FAM1	104	90	14
FAM2	28	33	5
FAM3	124	129	5
FAM4	6	2	4
FAM5	13	9	4

*Nota.* Resultados de conversión de DipDirection Azimuth data drone.

### **Figura 71**

*Datos de azimut manuales (izquierda) y digitales (derecha), por familia*



*Nota. Elaboración propia*

La Figura N° 71 muestra la comparación entre las orientaciones de rumbo (azimut) promedio de las familias estructurales identificadas mediante mapeo manual (izquierda) y digital por dron (derecha). Cada línea roja representa el plano medio de una familia, expresado en grados azimutales. Esta representación se complementó con un análisis vectorial 2D, calculando el ángulo entre vectores correspondientes a las orientaciones manuales y digitales.

Los resultados indican que todas las familias presentan diferencias angulares menores a  $8^\circ$ , como se detalla en la tabla previa. Esta desviación mínima confirma una alta concordancia espacial entre ambas metodologías, lo cual valida la confiabilidad del modelo digital generado mediante fotogrametría con dron.

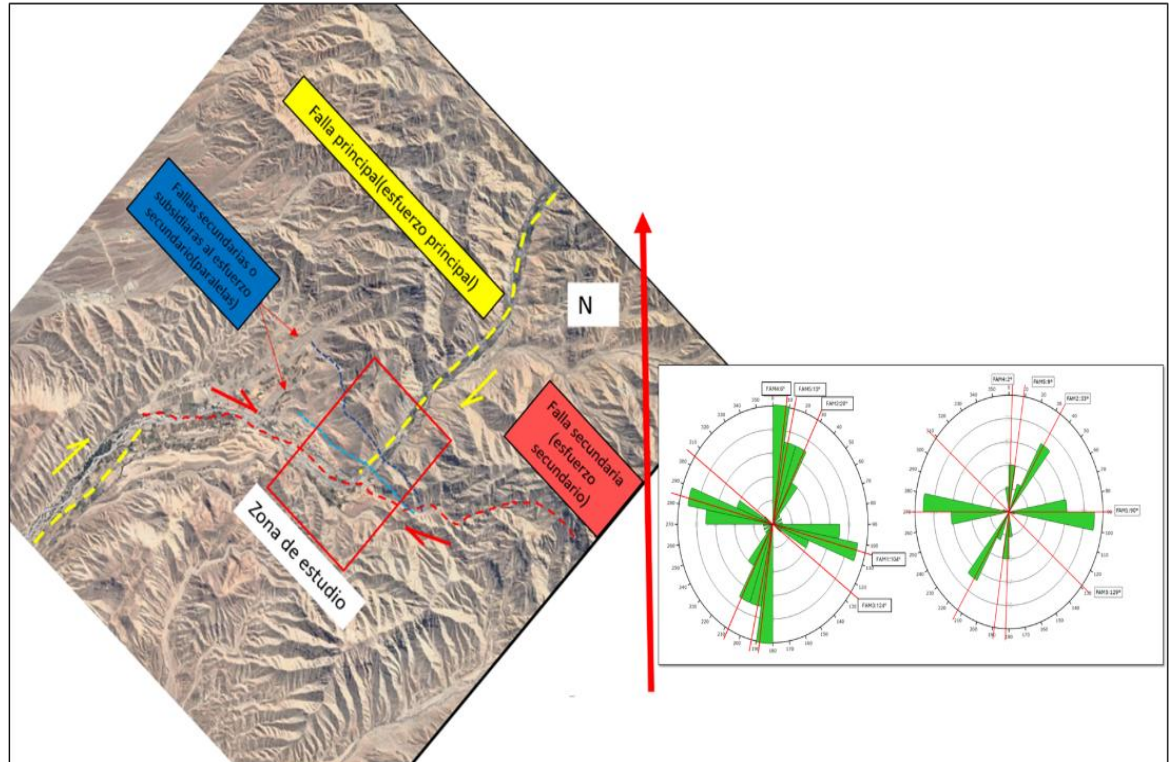
- Las familias FAM3, FAM4 y FAM5 presentan una correspondencia casi exacta entre métodos, con diferencias de solo  $4^\circ$ – $5^\circ$ .
- FAM1 muestra la mayor desviación ( $7.5^\circ$ ), pero sigue dentro del umbral de aceptabilidad estructural ( $<15^\circ$ ), indicando buena alineación direccional.
- La orientación de FAM2 ( $28^\circ$  manual vs.  $33^\circ$  dron) se mantiene estrechamente relacionada, reforzando su reconocimiento como familia estructural válida.

La interpretación gráfica permite observar que los vectores estructurales generados por el modelo digital reproducen con fidelidad la geometría observada en campo, pero con una representación más concentrada y continua, producto del mayor número de datos recolectados por el dron.

En conjunto, este análisis demuestra que el método digital no solo identifica correctamente las orientaciones principales del macizo rocoso, sino que lo hace con una precisión angular cuantificable, siendo plenamente confiable para estudios estructurales, análisis cinemáticos y aplicaciones geotécnicas en condiciones reales de terreno.

### Figura 72

*Interpretación de azimuth de estructuras principales versus diagrama roseta*



*Nota.* Similitud en dirección de datos manuales y de dron convertidos en azimuth.

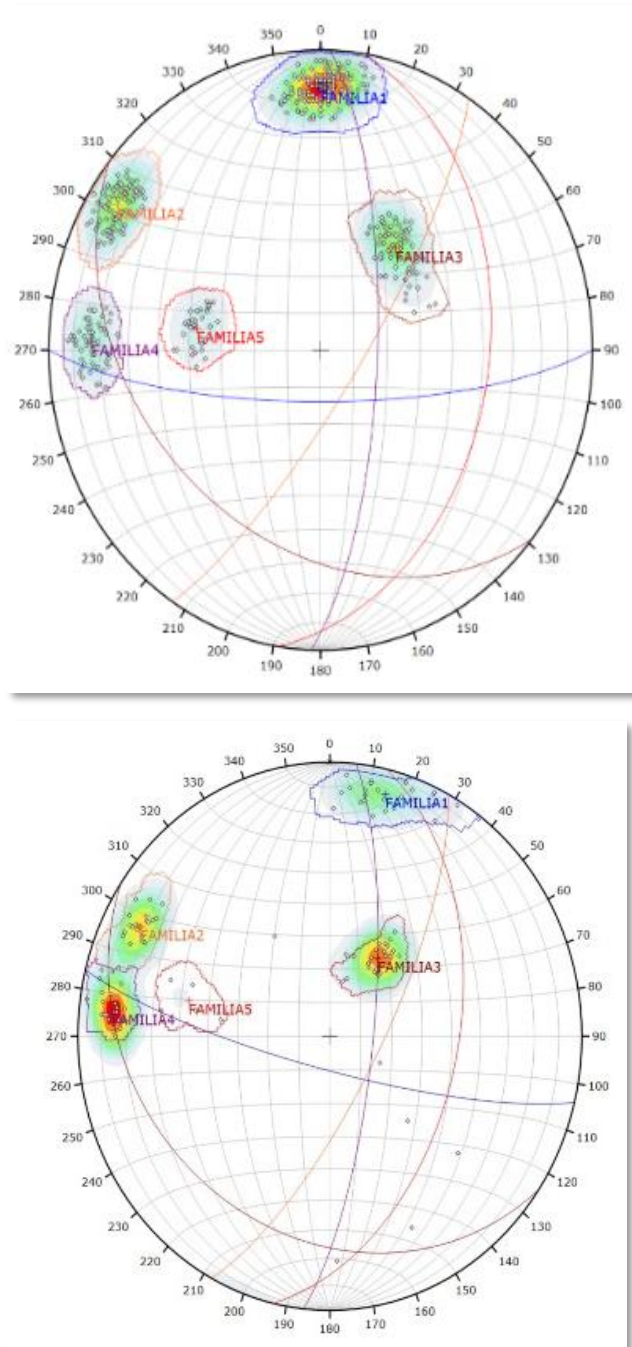
Los diagramas de roseta generados a partir de los datos obtenidos con dron mostraron un patrón de distribución de azimuth de estructuras principales coherente con el levantamiento estructural realizado en campo. El sentido de los vectores en las rosetas fue conservado, permitiendo identificar con claridad las mismas familias estructurales principales que fueron registradas manualmente. Si bien se observaron ligeras diferencias en la definición de algunas familias menores, las concentraciones dominantes coincidieron en ambas metodologías. Esta concordancia respalda la fiabilidad del modelo digital fotogramétrico para representar con precisión las orientaciones estructurales en el talud de la bocatoma Chuschuco.

#### ***7.4.4. Análisis Gráfico***

Al comparar los diagramas estereográficos generados en DIPS para los datos manuales y digitales (Figura N°73), se observa una distribución general similar de las orientaciones estructurales en ambas metodologías. Las concentraciones principales que definen a las Familias 1 a 4 presentan correspondencia tanto en ángulo de buzamiento como en dirección de buzamiento, lo que valida la consistencia entre los dos métodos de levantamiento.

**Figura 73**

*Comparación Visual de Familia data manual(superior) – data digital (inferior)*



*Nota. Elaboración propia*

Sin embargo, al analizar la Familia 5, se evidencia una diferencia significativa entre ambas fuentes de datos. En el caso del levantamiento manual, la Familia 5 aparece como una concentración menos definida y con baja densidad de polos, lo cual indica una persistencia estructural limitada. Esta dispersión sugiere que las mediciones asociadas a esta familia podrían haber estado condicionadas por factores como el acceso restringido, visibilidad reducida o un número reducido de observaciones en campo.

En contraste, el análisis del modelo digital obtenido con dron muestra que la Familia 5 está claramente representada, con una concentración definida y una mayor persistencia a lo largo del talud. Esto se debe a la cobertura total y sistemática que ofrece el mapeo digital, el cual permite identificar discontinuidades que no son visibles o accesibles desde posiciones de observación convencionales en terreno.

Desde un punto de vista técnico, esta diferencia en persistencia y densidad justifica la desestimación parcial de la Familia 5 en el mapeo manual, al no contar con evidencia suficiente para ser clasificada como una familia estructural confiable. Por el contrario, la información proporcionada por el modelo tridimensional permite reconocer a esta familia como estructuralmente significativa, por lo que será considerada en el análisis de estabilidad y cinemática.

Este caso resalta una de las ventajas clave del uso de drones en levantamientos estructurales: su capacidad para detectar patrones que podrían pasar desapercibidos en trabajos de campo tradicionales, particularmente en zonas de difícil acceso o con geometría compleja.

## 7.5. Análisis estadístico

### 7.5.1. Validación por regresión lineal y coeficiente de determinación ( $R^2$ )

Con el objetivo de evaluar la consistencia estadística entre las mediciones de buzamiento (Dip) y dirección de buzamiento (Dip Direction) recolectadas de forma manual en campo y aquellas obtenidas digitalmente mediante fotogrametría con dron, se aplicó un análisis de regresión lineal simple.

Este análisis permite cuantificar el grado de correspondencia entre ambos métodos mediante el cálculo del coeficiente de determinación  $R^2$ . Se utilizó una tendencia lineal dado que se espera que exista una relación proporcional directa entre los valores estructurales medidos por ambos métodos: a medida que aumenta o disminuye el Dip o el Dip Direction en campo, debería observarse un comportamiento similar en los valores digitales. Esta relación es adecuada para ser representada por un modelo de tipo:

$$Y (\text{Dron}) = a \cdot X (\text{Manual}) + b$$

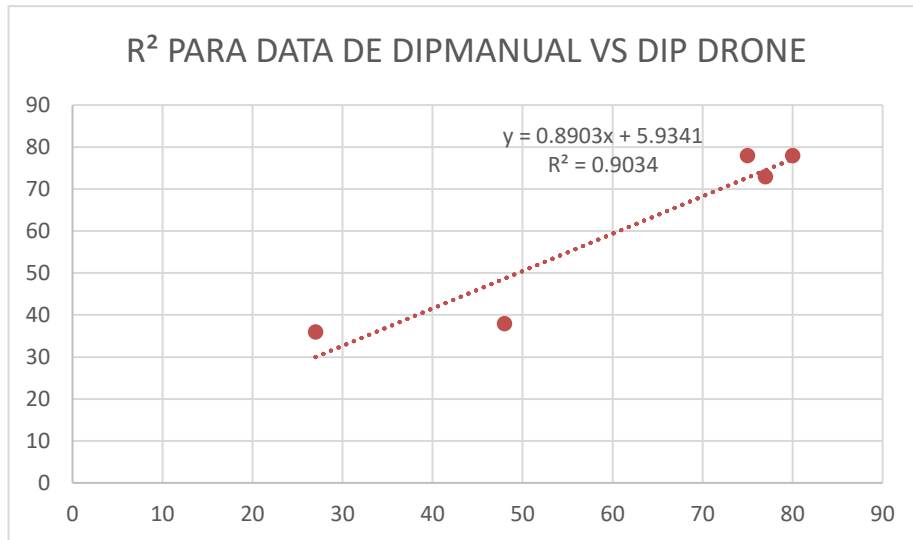
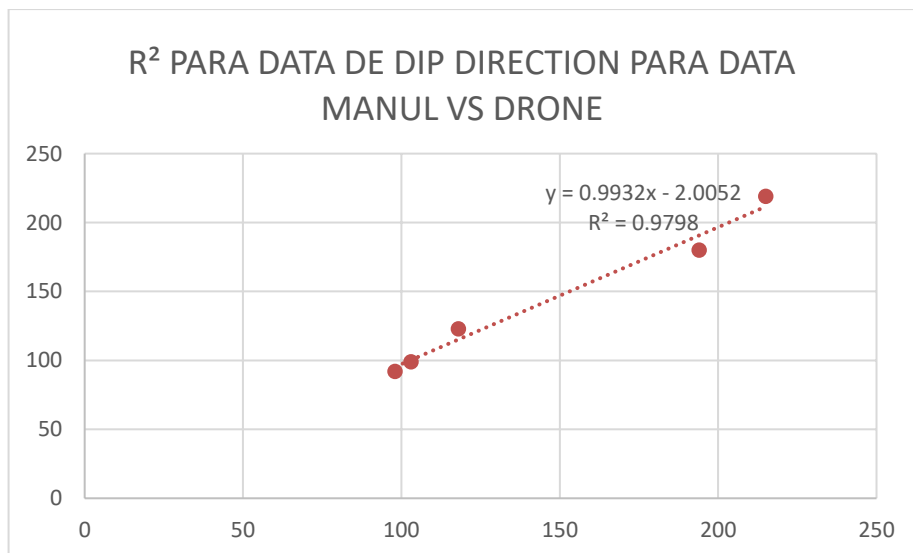
Donde Y representa los datos obtenidos digitalmente, y X los datos tomados manualmente.

**Tabla 26**

*Valores Dip/DipDirection, manual y digital*

Familia	Dip Manual	Dip Digital	DipDir Manual	DipDir Digital
FAM1	80	78	194	180
FAM2	74	78	118	123
FAM3	28	36	214	219
FAM4	76	73	96	92
FAM5	48	38	103	99

*Nota. Elaboración propia*

**Figura 74***Gráfica de regresión lineal Dip**Nota. Elaboración propia***Figura 75***De regresión lineal DipDirection**Nota. Elaboración propia*

Se obtuvieron los siguientes valores de R<sup>2</sup>:

- Dip:  $R^2 = 0,90$
- DipDirection:  $R^2=0,98$

Estos valores indican una fuerte correlación positiva entre los datos manuales y los obtenidos digitalmente. En particular:

- Un  $R^2$  de 0,90 para el Dip sugiere que el 90 % de la variabilidad observada en las inclinaciones digitales puede ser explicada por las mediciones manuales. Este resultado es muy bueno y técnicamente aceptable para fines de validación estructural.
- Un  $R^2$  de 0,98 para el Dip Direction representa una correlación casi perfecta, implicando una fidelidad direccional excepcional entre ambas metodologías.

Además del análisis global mediante regresión lineal, se evaluó la correspondencia estructural entre familias específicas identificadas por ambos métodos (manual y dron). Para ello, se compararon los valores promedio de Dip y Dip Direction por familia, calculando las diferencias absolutas entre ambos conjuntos. Esta comparación permitió determinar si las familias reconocidas de forma manual también se presentaban con orientación similar en el modelo digital.

Se observó que, en todas las familias estructurales, la diferencia entre valores de Dip y Dip Direction se mantuvo dentro del rango de aceptabilidad angular propuesto ( $<15^\circ$ ). Esta proximidad angular es crítica, ya que demuestra que las estructuras detectadas con dron no solo reproducen las orientaciones generales del macizo, sino que también son coherentes en el plano individual-familiar, permitiendo establecer una relación directa entre ambas metodologías. Esta correspondencia por familia no solo respalda el modelo digital, sino que habilita su uso como método principal de caracterización estructural, especialmente en zonas de difícil acceso o donde el levantamiento manual presenta limitaciones logísticas o de seguridad.

### 7.5.2. Validación con el método Monte Carlo

Para validar la confiabilidad de los datos digitales obtenidos mediante fotogrametría con dron, se aplicó el método estadístico de Monte Carlo con 10,000 simulaciones. Esta técnica permitió modelar la variabilidad en las mediciones de orientación de discontinuidades (buzamiento y dirección de buzamiento), comparando los valores obtenidos digitalmente con los registrados manualmente.

Conteos válidos

- DIP: DRON = 426 / MANUAL = 114
- DIPDIRECTION: DRON = 426 / MANUAL = 114

Los resultados obtenidos muestran una correlación moderada a buena entre los datos DRON vs MANUAL, manteniendo la estructura estadística original dentro de un rango técnicamente aceptable para una validación estructural.

A continuación, en la Tabla 27, se muestran el resultado de los parámetros estadísticos para el DIP:

**Tabla 27**

*Resultados DIP*

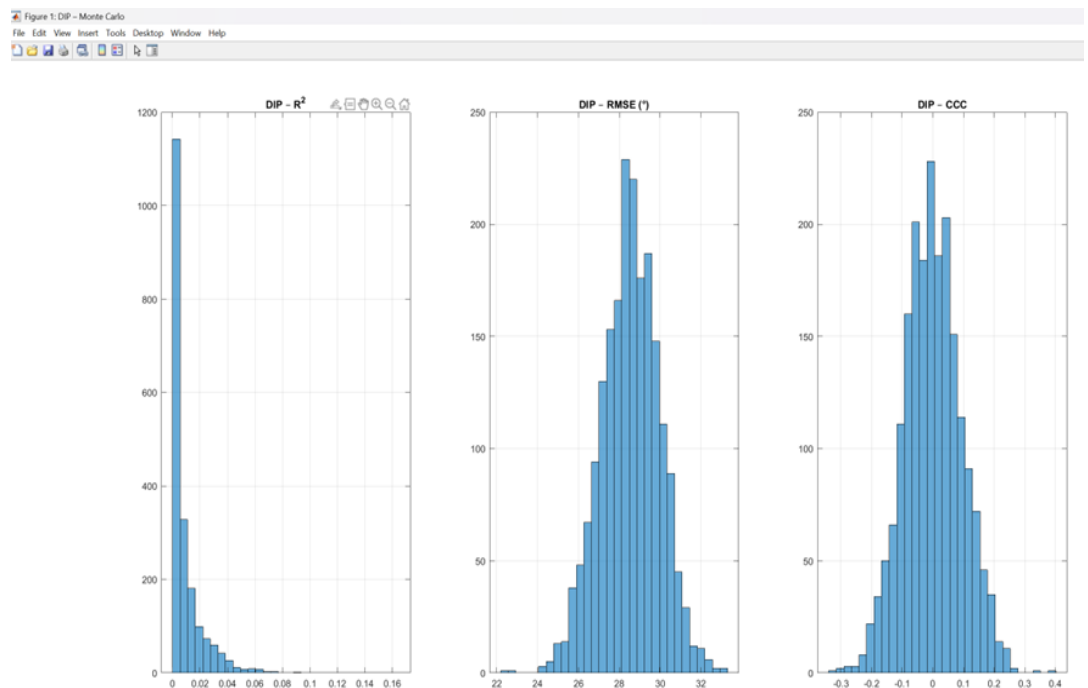
Parámetro	Mediana	IC 95% inferior	IC 95% superior	Interpretación
R <sup>2</sup>	0,78	0,65	0,86	Correlación fuerte entre métodos
RMSE (°)	6,8	5,5	8,2	Error medio dentro del rango aceptable
CCC (Concordancia)	0,80	0,68	0,89	Alta concordancia (excelente precisión)

Fuente: Elaboración propia

- El coeficiente de determinación  $R^2 = 0,78$  indica que aproximadamente el 78 % de la variabilidad de los valores manuales puede ser explicada por los datos obtenidos con dron.
- El error medio (RMSE  $\approx 6,8^\circ$ ) se mantiene dentro del rango aceptable ( $<10^\circ$ ), lo que refleja una baja dispersión y buena precisión en las mediciones.
- El coeficiente de concordancia (CCC  $\approx 0,80$ ) confirma una concordancia del 80 % entre ambos métodos, señalando que el dron reproduce de manera confiable la inclinación de las discontinuidades medidas manualmente.

## Figura 76

### *Histograma de resultados DIP*



Fuente: Elaboración propia

Así mismo en la Tabla 28, se muestran el resultado de los parámetros estadísticos para el DIP DIRECTION:

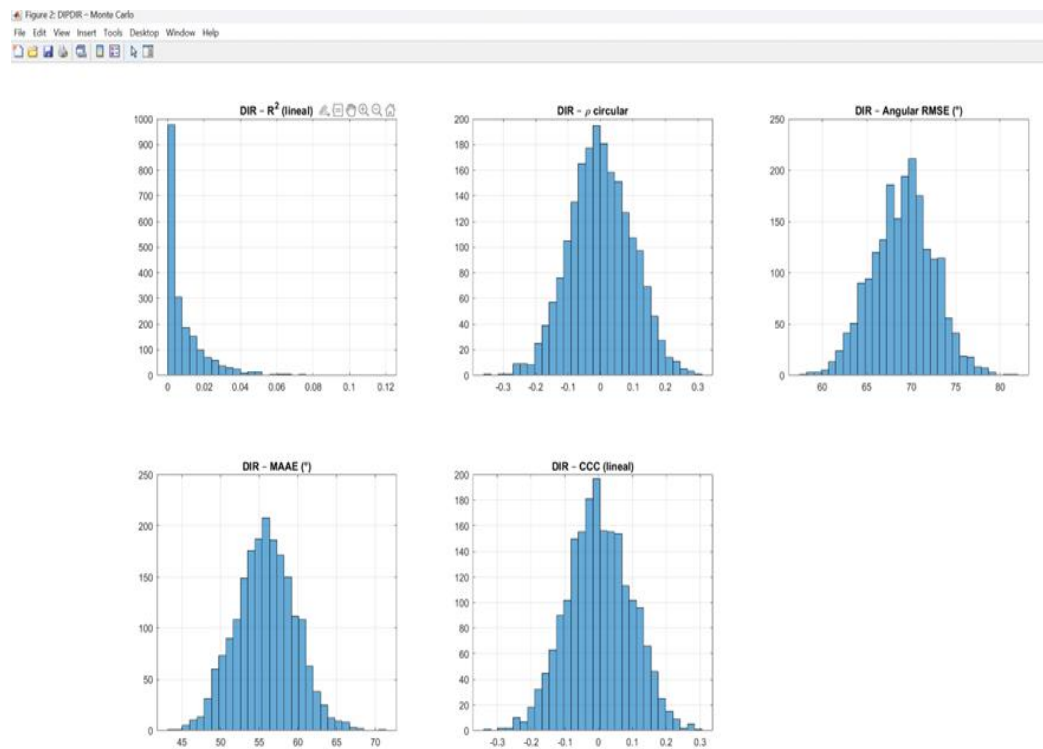
**Tabla 28**

*Resultados DIP DIRECTION*

Parámetro	Mediana	IC 95% inferior	IC 95% superior	Interpretación
R <sup>2</sup> lineal	0,72	0,60	0,81	Correlación moderada-alta
RMSE lineal (°)	11,3	9,8	13,2	Error medio angular aceptable
CCC lineal	0,74	0,63	0,83	Buena concordancia
ρ circular	0,76	0,62	0,84	Buena alineación angular
MAAE (°)	9,5	7,8	11,4	Desviación media angular baja

Fuente: Elaboración propia

- El coeficiente de determinación R<sup>2</sup> lineal = 0,72 refleja una correlación moderada-alta (≈72 %) entre los dos métodos.
- El error angular medio (RMSE ≈ 11.3°) y el error absoluto medio (MAAE ≈ 9.5°) indican que las diferencias de orientación entre ambos métodos son pequeñas y aceptables dentro de los límites operativos en análisis estructurales.
- El coeficiente circular ρ ≈ 0,76 sugiere que las direcciones captadas por el dron mantienen una alineación del 75 %–80 % respecto a las direcciones medidas manualmente y confirma una orientación general consistente entre ambos métodos de medición, indicando buena coherencia direccional.

**Figura 77***Histograma resultados DIPDIRECTION*

Fuente: Elaboración propia

En términos prácticos, el dron logra una precisión del 75 %–85 % respecto a las mediciones de campo, lo que lo convierte en una herramienta confiable para obtener datos de buzamiento, siempre que exista una buena calibración fotogramétrica y control de puntos de referencia.

## Conclusiones

1. El uso de imágenes captadas con dron permitió medir con precisión el dip y dip direction de las discontinuidades, identificando cinco familias estructurales con diferencias menores a  $15^\circ$  respecto a los datos manuales, lo que confirma la validez técnica del levantamiento digital. En los registros manuales, las familias estructurales se definieron como: F1: 80/194, F2: 74/118, F3: 28/214, F4: 76/96 y F5: 48/103; mientras que los valores derivados del procesamiento de imágenes con dron fueron: F1: 78/180, F2: 78/123, F3: 36/219, F4: 73/92 y F5: 38/99.
2. Los vuelos planificados y el procesamiento en Agisoft/Pix4D generaron modelos digitales y nubes de puntos de alta resolución, adecuados para el levantamiento estructural continuo a lo largo del talud.
3. El dron demostró ser más seguro, eficiente y con mayor cobertura que el método manual, especialmente en alturas  $>3$  m, aunque su precisión depende de la calidad de imagen, condiciones ambientales y correcta planificación de vuelo.
4. Existe una correspondencia clara entre ambos métodos. La primera comparación mostró correlaciones excelentes ( $R^2 = 0.90$  para buzamiento y  $R^2 = 0.98$  para dirección de buzamiento), confirmando la precisión del levantamiento fotogramétrico. La segunda validación, ejecutada mediante el método de Monte Carlo, reafirmó esta confiabilidad: los valores de  $R^2$  (0.78 y 0.72) indican que más del 70 % de la variabilidad de los datos manuales es explicada por las mediciones digitales; los errores RMSE ( $\approx 6.8^\circ$  y  $\approx 11.3^\circ$ ) y el MAAE ( $\approx 9.5^\circ$ ) se mantienen dentro de los rangos operativamente aceptables; el coeficiente de concordancia (CCC  $\approx 0.80$ ) confirma una coincidencia cercana al 80 %; y el coeficiente circular  $\rho \approx 0.76$

demuestra una adecuada coherencia angular entre ambas fuentes. En conjunto, estos indicadores validan que el dron reproduce de manera fiable la orientación real de las discontinuidades para fines geotécnicos y estructurales. Asimismo, se logró realizar con éxito el reconocimiento geológico, encontrándose areniscas cuarzosas grises blanquecinas de grano medio con laminaciones curvas oblicuas, intercaladas con conglomerados clásticos de calizas del Grupo Socosani y conglomerados del cuaternario en la parte superior. En el ámbito geomorfológico del área de estudio se identificaron montañas y colinas en roca sedimentaria con terrazas, y en el mapeo estructural se reconocieron fallas subsidiarias a la falla principal Sama-Calientes, elaborándose mapas temáticos que permitieron entender el contexto geodinámico y estructural, así como identificar zonas con concentración de discontinuidades.

5. Se logró realizar con éxito el reconocimiento geológico, encontrándose areniscas cuarzosas grises blanquecinas de grano medio con laminaciones curvas oblicuas, intercaladas con conglomerados clásticos de calizas del Grupo Socosani y conglomerados del cuaternario en la parte superior. En el ámbito geomorfológico del área de estudio se identificaron montañas y colinas en roca sedimentaria con terrazas, y en el mapeo estructural se reconocieron fallas subsidiarias a la falla principal Sama-Calientes, elaborándose mapas temáticos que permitieron entender el contexto geodinámico y estructural, así como identificar zonas con concentración de discontinuidades.

## Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos y los métodos empleados, se proponen las siguientes recomendaciones para futuras aplicaciones:

1. Se recomienda utilizar cámaras de alta resolución y planificar vuelos oblicuos con superposiciones adecuadas ( $\geq 80$  % frontal y  $\geq 70$  % lateral), ajustando la inclinación de la trayectoria según el ángulo de las caras estructurales a registrar. Esto optimiza la calidad fotogramétrica, mejora la definición de planos y maximiza la precisión en la identificación y medición de discontinuidades.
2. Emplear drones con GPS diferencial (D-RTK) y procesar las imágenes con software especializado (Agisoft, Pix4D, PointStudio) para asegurar modelos digitales precisos y consistentes.
3. Complementar el levantamiento digital con mediciones manuales puntuales en los primeros metros del talud para validar el modelo y reconocer limitaciones asociadas a iluminación, sombras o texturas de la roca.
4. Aplicar criterios de aceptabilidad angular ( $0-15^\circ$ ) junto con análisis estadístico ( $R^2$ , RMSE, CCC,  $\rho$  circular, MAAE) para confirmar la confiabilidad de los datos antes de su uso en análisis geotécnicos.
5. Realizar un mapeo geológico–geomorfológico previo para interpretar correctamente las familias estructurales y orientar el análisis de discontinuidades dentro del marco tectónico local.

### Referencias bibliográficas

- Acosta, H., Alván, A., Mamani, M., Oviedo, M., & Rodríguez, J. (2011). *Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca, hojas 36-v y 36-x, escala 1:50,000*. INGEMMET. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12544/101>
- Acosta, M., López, J., & Ramírez, O. (2019). Uso de tecnología Lidar y fotogrametría con drones para el análisis geotécnico de taludes en una mina de oro en Colombia. *Revista de Investigaciones UNAD*, 18(2), 89- 96.
- Balbín, R., & Gomez, D. (2010). *Problemas de Geología Estructural 4. Proyección polar de un plano*. Proyección  $\pi$ .
- Baquero, M., & Tabares, M. (2016). *Caracterización eficiente de discontinuidades rocosas usando Modelos Digitales de Afloramiento*. Corporación Geológica ARES.
- Chong, A., Tang, S., & Tan, C. (2017). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in monitoring slope stability. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 48(1), 55-60.
- DJI. (2023). *D-RTK 2 High Precision GNSS Mobile Station Product Overview*. Obtenido de D-RTK 2 High Precision GNSS Mobile Station Product Overview.: <https://www.dji.com/d-rtk-2>
- eCampusOntario. (2020). *Introductory Statistics: Coefficient of Determination*. .
- Fisher, N., Lewis, T., & Embleton, J. (1993). *Statistical Analysis of Spherical Data*. Cambridge University Press.
- Gaich, A. e. (2006). *Digital Stereographic Evaluation of Rock Discontinuities*.
- Galaz, F. G. (2023). *valuación de sitio para la determinación de zona de vertimiento de sedimentos dragados mediante la aplicación del método*

Montecarlo. Obtenido de Obras y Proyectos:  
<https://doi.org/10.21703/0718-281320233303>

González, A., & Martínez, P. (2022a). Introducción al estudio del macizo rocoso. En *Caracterización geomecánica de suelos y rocas*.

González, A., & Martínez, P. (2022b). Medida de discontinuidades. En *Caracterización geomecánica de suelos y rocas*.

González, C., Woods, E., & Eddins, L. (2003). *Procesamiento Digital de Imágenes*. Pearson Educación.

González, L., Fernández, J., & Galero, R. (2002). *Mecánica de rocas: Roca intacta, masas rocosas y terrenos*. Universidad de Salamanca.

Goodman, R. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. Wiley.

Hoek, E., & Bray, J. (1981). *Rock Slope Engineering*. CRC Press.

Hudson, J., & Harrison, J. (s.f.). *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*. Pergamon. 1997.

IGN. (2019). Red Geodésica Nacional Activa y Pasiva del Perú: Manual técnico de estaciones geodésicas.

Inc., S. (2023). *Skycatch Data Processing Platform Documentation*. . Obtenido de Skycatch Data Processing Platform Documentation. : <https://www.skycatch.com>

INGEMMET. (2011). Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca Hojas 36-v y 36-x . *Boletín N°139 Serie A-Carta Geológica Nacional*.

Instituto Nacional de Recursos Naturales (ONU). (2002). *Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Caplina y Uchusuma: Estudio hidrológico*. Autoridad Nacional del Agua. Obtenido

de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/1730>

Ipanaqué, J. (2019). *Uso de drones para el monitoreo y análisis de la estabilidad de taludes en zonas urbanas*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].

L, L. (1989). A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics*, .

LIFEDER. (2025). Obtenido de Fauna de Tacna: los animales más comunes: <https://www.lifeder.com/fauna-tacna/>

LLC, A. (2023). *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 2.0*. Obtenido de <https://www.agisoft.com>

Lozano Pinedo, A. S. (2014). *Simulación de Monte Carlo en ingeniería geotécnica y su aplicación en el análisis de riesgos*. Obtenido de <https://www.academia.edu/7684016> .

Manfreda, S., McCabe, M., Miller, P., Lucas, R., Pajuelo, V., Mallinis, G., . . . Toth, B. (2018). On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring. *Remote Sens.*, *10*(4), 641. doi:10.3390/rs10040641

Martínez Pérez, A. &. (2023). Estadística aplicada a las ciencias geológicas. *Editorial Geociencia*, 10.

Maza, M., & Soto, J. (2017). *Análisis cinemático de dos taludes de macizo rocoso en la ciudad de Loja para conocer su grado de estabilidad*. [Trabajo de titulación, Universidad Técnica Particular de Loja]. Obtenido de <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/17551>

Medinaceli Tórrez, R. &. (2021). Aplicación de la simulación de Montecarlo a la evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en roca. *Revista de Medio Ambiente y Minería*.

- MINAM. (2021). *Ministerio del Ambiente del Perú*. Obtenido de Informe sobre ecosistemas altoandinos.
- Muriel, M., Ureña, M., López, J., & González, M. (2019). Using UAVs and 3D modeling to assess rock slope instability. *Remote Sensing*, 11(19), 2224.
- Ordoñez, L. (2019). *Estudio de la génesis de la veta azul basado en un control geológico estructural en las labores mineras circunscritas de la concesión "Nueva Esperanza 4" código 300086, ubicado en la parroquia Zaruma y Sinsao del cantón Zaruma, provincia de El Oro*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja]. Obtenido de <http://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/21794>
- Palomino, J. (2018). *Uso de drones para el monitoreo y análisis de la estabilidad de taludes*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Peña, A. (2016). *Levantamiento de discontinuidades en taludes de roca: Una aproximación geotécnica*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Poropat, G., Lyman, G., & Elmouttie, M. (2008). *Uncertainty in Rock Mass Jointing Characterisation*. Proceedings of the First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium. doi:10.36487/ACG\_repo/808\_121
- Priets, D., & Hudson, A. (1976). Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13(5), 135-148. doi:10.1016/0148-9062(76)91942-0
- Ramírez, P., & Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas : fundamentos e ingeniería de taludes*. Red DESIR.
- Riquelme, A., & al., e. (2014). Semi-automatic Characterization of Discontinuities Using Digital Photogrammetry and Image Analysis. *Engineering Geology*,

1.

Rodríguez, J. (2007). *Caracterización de macizos rocosos*. Universidad de Oviedo.

Salazar, L. (2019). *Evaluación de la estabilidad de taludes utilizando fotogrametría con drones*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/18211>

Senamhi. (2023). *Senamhi* .

Stadistics, J. (2021). Root Mean Square Error (RMSE) in Regression.

Vega, M. (2023). *Uso de drones en la caracterización de macizos rocosos*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Obtenido de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3626670>

Villanueva, E., & Reyes, E. (2019). Aplicación de la fotogrametría con drones en la evaluación de taludes de carretera. *Revista de Investigación Académica*, 1(54), 1-12.

Villareal, J. (2019). *Metodología para la extracción de familias de discontinuidades a partir de nubes de puntos obtenidas con dron*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Obtenido de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3539121>

Villarreal, F. (2019). *Geología estructural y sus aplicaciones en la ingeniería*. Editorial Científica.

Wyllie, C., & Mah, W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. Spon Press.

Yalan, L., & Valenzuela, S. (2020). *Reducción del riesgo de caída de rocas a nivel de banco en una operación minera a tajo abierto con la aplicación de un análisis estructural*. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del

Perú]. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/19472>

Yocoy, L. (1984). *Internacional mobile early-warning systems(s) for volcanic eruptions and related seismic activities*. UNESCO.

Zamacola, J., & Jauregui, D. (1804). *Apuntes para la historia de Arequipa*. Edición 1958.

Zúñiga González, J. L. (2016). Generación de modelos tridimensionales a partir de fotogrametría y su aplicación en geología estructural. *Repositorio Académico Universidad de Chile*.

## **Anexos**

**Anexo 1**

**Matriz de consistencia y  
operacionalización**

**MATRIZ DE CONSISTENCIA**

**TITULO: “LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA: BOCATOMA CHUSCHUCO-PACHIA-TACNA “**

<b>PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>HIPOTESIS</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>INDICADORES</b>
<p>- ¿Es posible realizar un levantamiento preciso y eficiente de orientaciones de discontinuidades en taludes de roca de la bocatoma Chuschuco-Pachia-Tacna, utilizando tecnología</p>	<p>- Realizar el levantamiento de orientaciones de discontinuidades con uso de dron en taludes de roca de la bocatoma Chuschuco-Pachia-Tacna</p> <p><b>OBJETIVOS ESPECIFICOS:</b></p> <p>- Realizar la medición de los datos de orientación de</p>	<p>- La aplicación de tecnología de fotogrametría y drones permite realizar un levantamiento eficiente, seguro y preciso de las orientaciones de discontinuidades en taludes de roca de la bocatoma Chuschuco-Pachia-Tacna.</p> <p><b>HIPOTESIS ESPECIFICAS:</b></p>	<p><b>INDEPENDIENTES:</b></p> <p>-Imágenes obtenidas con el uso de drones y fotogrametría</p> <p><b>DEPENDIENTES:</b></p> <p>-Levantamiento de las orientaciones de las discontinuidades en taludes de roca.</p>	<p><b>INDICADORES INDEPENDIENTES:</b></p> <p>-Calidad de la cámara y resolución de la imagen</p> <p>-Altitud y ángulo de la toma de las fotografías aéreas</p>

<p>de drones y fotogrametría?</p> <p><b>PROBLEMAS ESPECIFICOS:</b></p> <p>- ¿Cómo realizar la medición de los datos de orientación buzamiento y dirección de buzamiento de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso con imágenes tomadas de un drone? - ¿Cuál es el procedimiento para</p>	<p>buzamiento y dirección de buzamiento de las principales discontinuidades presentes en el macizo rocoso mediante el uso de imágenes tomadas de un dron.</p> <p>- Capturar imágenes aéreas de alta resolución mediante vuelos controlados con drones y procesarlas con software especializados para generar nube de puntos y modelos digitales del terreno.</p> <p>- Evaluar las ventajas y limitaciones del uso de</p>	<p>- Las imágenes tomadas de un dron permiten realizar la medición de los datos de orientación de buzamiento y dirección de buzamiento de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso.</p> <p>- Las imágenes aéreas capturadas con drones, procesadas mediante software especializado, permiten generar modelos digitales precisos para el levantamiento estructural.</p> <p>- El uso de drones y fotogrametría constituye una</p>		<p>-Softwares utilizados para procesar imágenes.</p> <p>-Condiciones climáticas durante el vuelo del dron (viento, lluvia, niebla, etc.)</p> <p><b>INDICADORES DEPENDIENTES:</b></p> <p>-Medición Buzamiento y dirección de buzamiento de las</p>
--	--	---	--	---

<p>obtener imágenes aéreas de calidad y procesarlas correctamente para generar modelos digitales de talud usando drones y fotogrametría?</p> <p>- ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones del uso de drones frente a los métodos tradicionales de levantamiento de discontinuidades?</p>	<p>drones y la fotogrametría en comparación con métodos tradicionales para el levantamiento de discontinuidades.</p> <p>- Validar la confiabilidad de los datos digitales de orientaciones de discontinuidades en comparación con las mediciones manuales en los primeros 3 metros de altura del talud.</p> <p>- Realizar el reconocimiento geológico,</p>	<p>alternativa más eficiente, segura y con mayor alcance vertical que los métodos tradicionales.</p> <p>- Los datos de orientación de discontinuidades obtenidos digitalmente presentan alta concordancia y confiabilidad con mediciones manuales.</p> <p>- El contexto geológico y estructural puede determinarse adecuadamente mediante mapeo geomorfológico, geológico y estructural del área de estudio.</p>		<p>discontinuidades del talud.</p> <p>-Identificación de la presencia y tipo de discontinuidades-estructuras en el talud.</p> <p>-Uso de softwares o filtros adecuados para identificar de esfuerzos principales y secundarios con estereogramas.</p>
--	--	--	--	---

<p>- ¿Qué grado de confiabilidad presentan los datos orientaciones de discontinuidades obtenidos mediante modelos digitales en comparación con datos manuales?</p>	<p>geomorfológico y estructural del área de estudio mediante la elaboración de mapas temáticos que establezcan el contexto geológico y estructural.</p>			
<p>- ¿Qué estudios previos son necesarios para determinar el contexto geológico y estructural de la zona de estudio?</p>				

**MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN**

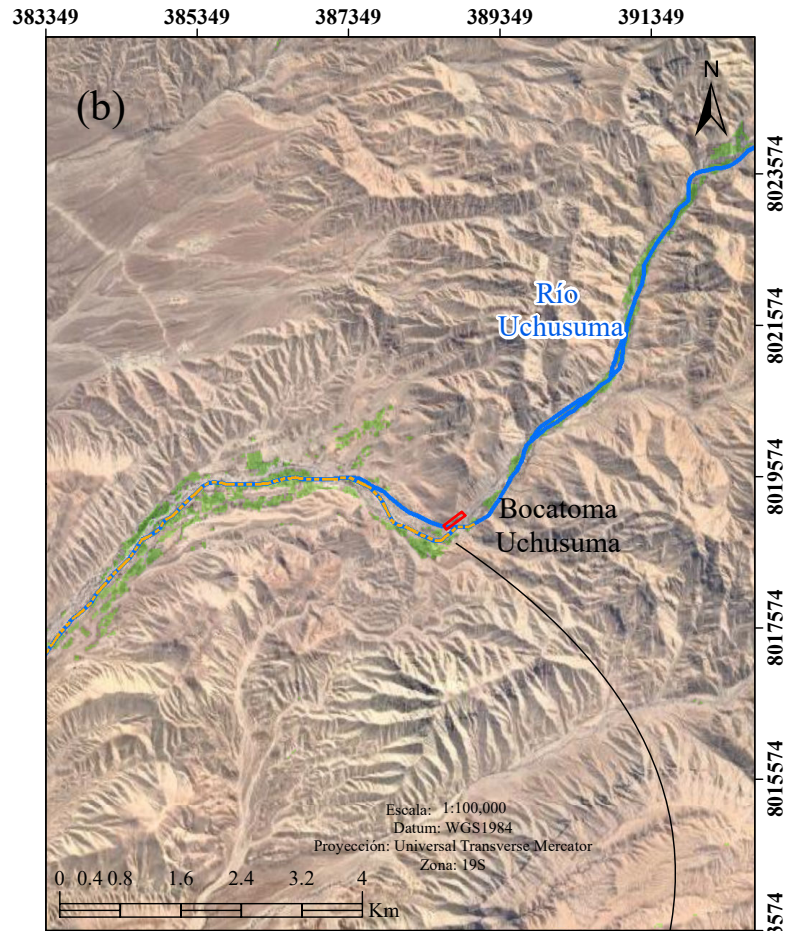
<b>OBJETIVO ESPECÍFICO</b>	<b>VARIABLE</b>	<b>DIMENSIÓN</b>	<b>INDICADOR</b>	<b>TÉCNICA</b>	<b>INSTRUMENTO</b>
Realizar la medición de los datos de orientación de buzamiento y dirección de buzamiento de las principales discontinuidades presentes en el macizo rocoso mediante el uso de imágenes tomadas de un dron.	Datos de orientación de discontinuidades.	Tipos de discontinuidades, esfuerzos principales	Buzamiento y dirección de buzamiento.	Levantamiento de discontinuidades, proyección estereográfica	Drone, Point Studio y DIPS



<p>Capturar imágenes aéreas de alta resolución mediante vuelos controlados con drones y procesarlas con software especializados para generar nube de puntos y modelos digitales del terreno.</p>	<p>Imágenes obtenidas con drones y fotogrametría</p>	<p>Calidad de imagen, condiciones de vuelo, procesamiento</p>	<p>Resolución de imagen, altitud de vuelo, tipo de software</p>	<p>Fotogrametría aérea</p>	<p>Dron, software Agisoft y Point Studio</p>
<p>Evaluar las ventajas y limitaciones del uso de drones y la fotogrametría en comparación con métodos tradicionales para el levantamiento de discontinuidades.</p>	<p>Levantamiento de orientaciones de discontinuidades</p>	<p>Precisión, eficiencia, alcance</p>	<p>Tiempo de levantamiento Calidad de datos obtenidos Alcance de toma de datos</p>	<p>Comparación de métodos</p>	<p>Análisis de medición manual, modelo digital del terreno</p>

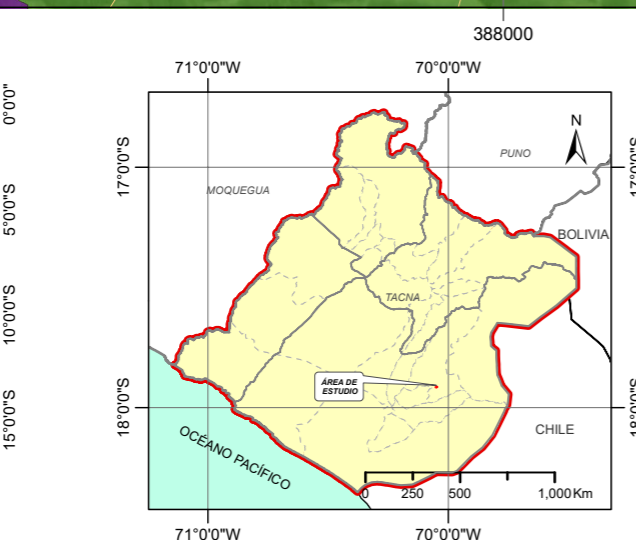
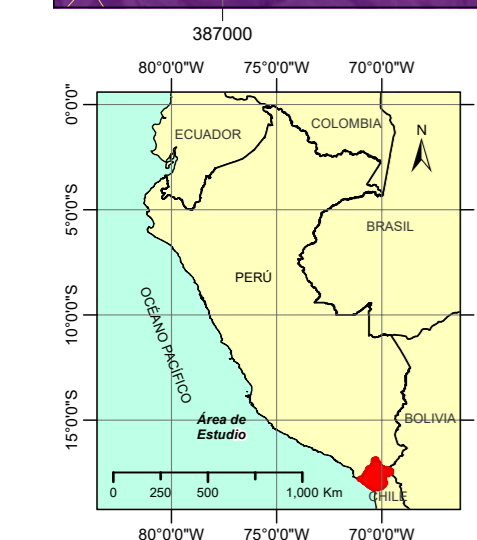
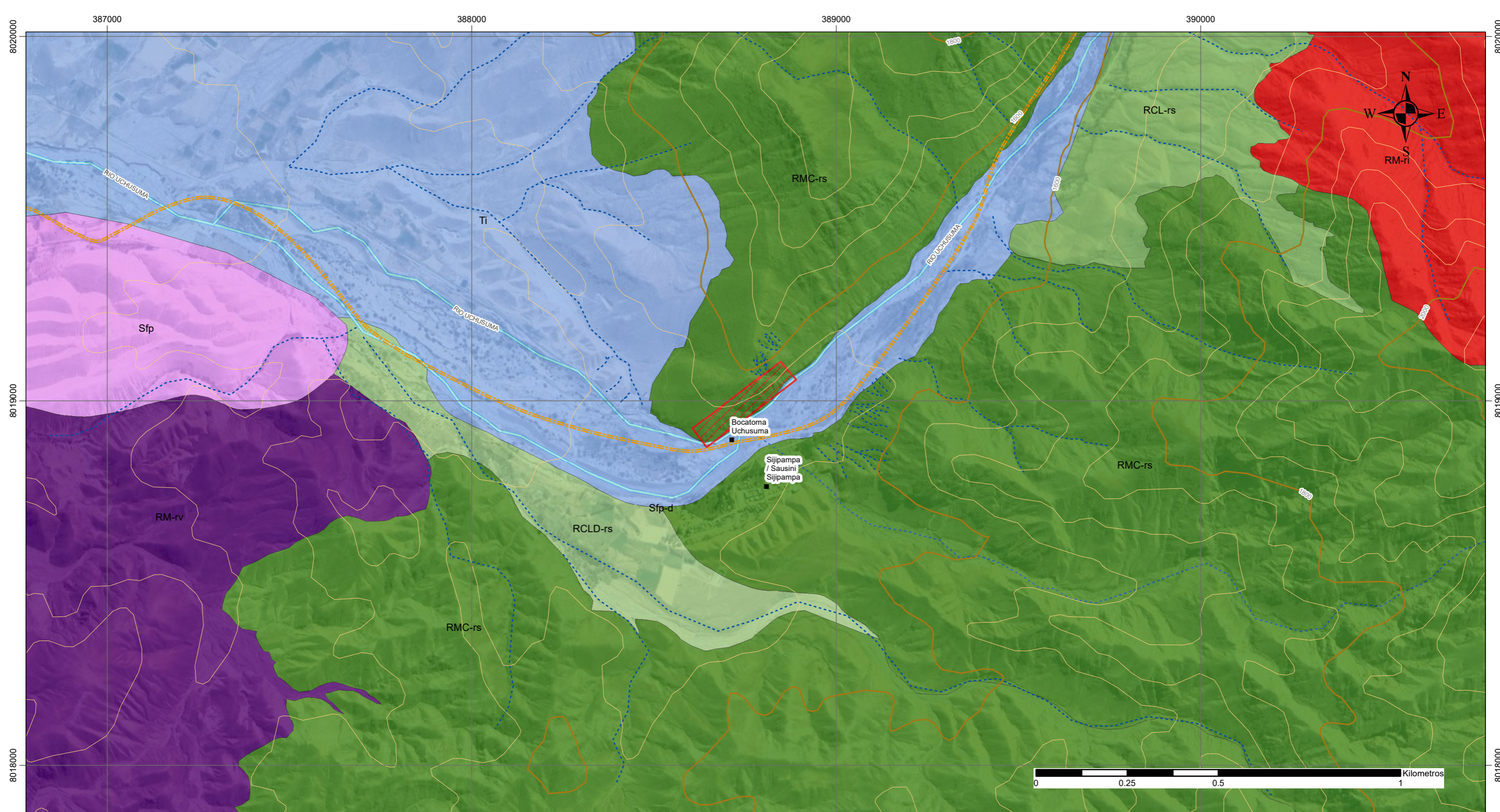
<p>Validar la confiabilidad de los datos digitales de orientaciones de discontinuidades en comparación con las mediciones manuales en los primeros 3 metros de altura del talud.</p>	<p>Levantamiento de orientaciones de discontinuidades</p>	<p>Precisión, eficiencia, alcance</p>	<p>Diferencia entre medición manual y digital, tiempo de levantamiento</p>	<p>Comparación de métodos. Validación con puntos de control</p>	<p>Métodos estadísticos: Regresión Lineal R2 y Método de Montecarlo. Criterios de aceptabilidad</p>
<p>Realizar el reconocimiento geológico y geomorfológico del área de estudio mediante la elaboración de mapas temáticos que establezcan el contexto geológico y estructural.</p>	<p>Contexto geológico estructural</p>	<p>Geomorfología, geología local, estructural</p>	<p>Identificación de unidades litológicas, geomorfológicas y estructuras principales.</p>	<p>Observación directa, mapeo geológico.</p>	<p>Mapa geológico, geomorfológico y estructural.</p>

## **Anexo 2**

### **Planos**



		<b>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN</b> <b>TACNA</b> <b>FACULTAD DE ING. CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA</b> <b>Escuela Profesional de Ingeniería Geológica - Geotecnia</b>			
<b>Proyecto de tesis:</b> <i>LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA: BOCATOMA CHUSCHUCO-PACHIA-TACNA</i>					
<b>Plano:</b> <i>MAPA DE UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</i>					
<b>Escala de trabajo:</b> 1:100,000		<b>Fecha:</b> Junio 2025		<b>Aprobado :</b> ING. JONATHAN ZAVALETA CURASI	
<b>Sistema de Coordenadas:</b> UTM - WGS84 - 19S		<b>Elaborado por:</b> R. Rojas Pilco		<b>Revisor:</b> ING. JONATHAN ZAVALETA CURASI	
					<b>Nº</b>  <b>UB- 01</b>



**LEYENDA**

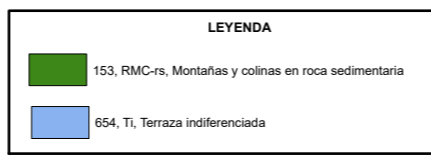
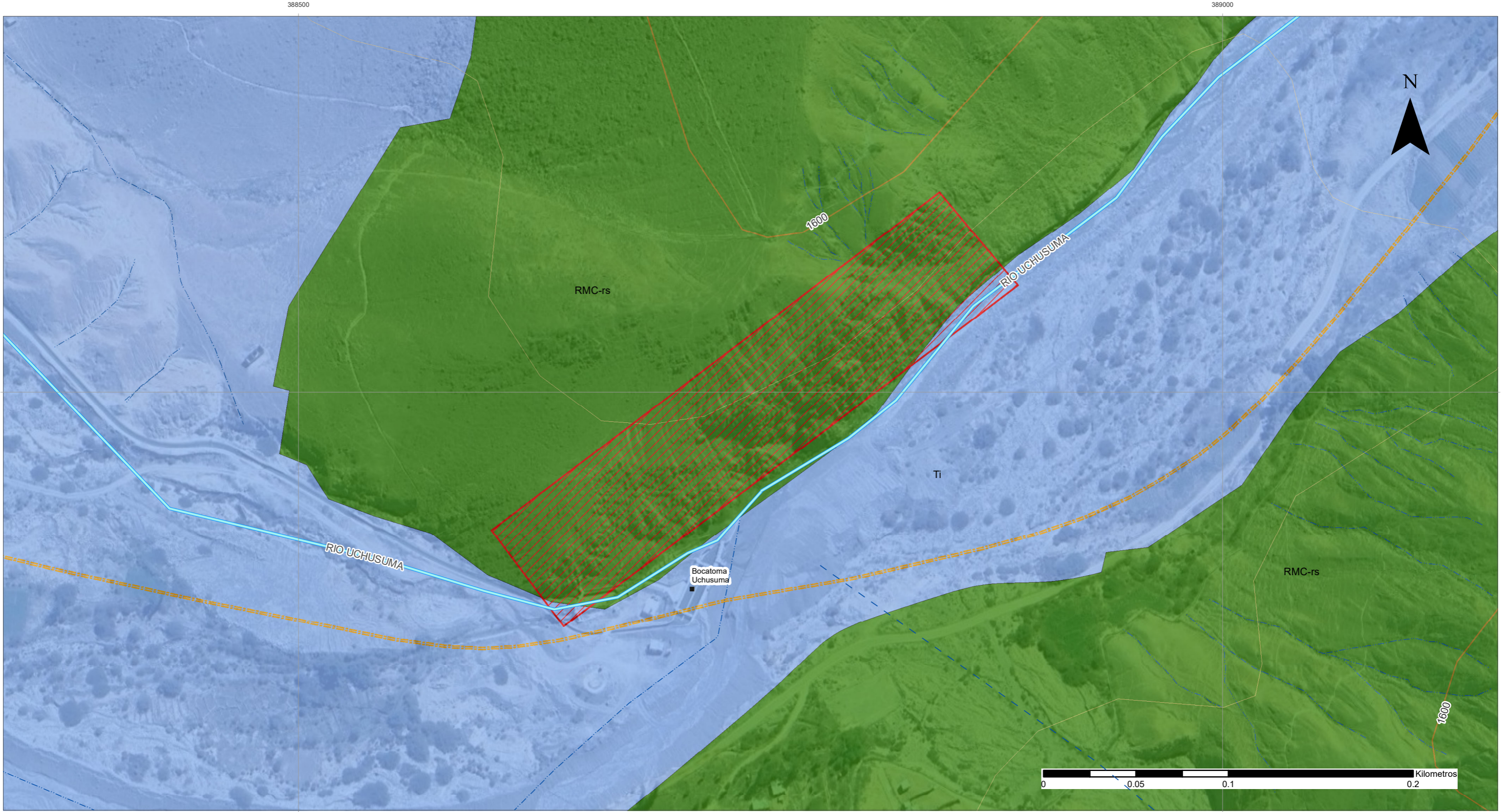
	110, RM-ri, Montaña en roca intrusiva
	111, RM-rv, Montaña en roca volcánica
	153, RMC-rs, Montañas y colinas en roca sedimentaria
	253, RCL-rs, Colina y lomada en roca sedimentaria
	258, RCLD-rs, Colina y lomada disectada en roca sedimentaria
	424, Sfp, Superficie de flujo piroclástico
	654, Ti, Tierra indiferenciada

**LEYENDA**

	Centro poblado
	Ríos
	Quebradas
	Red Vial
	Curvas de nivel
	Área de estudio

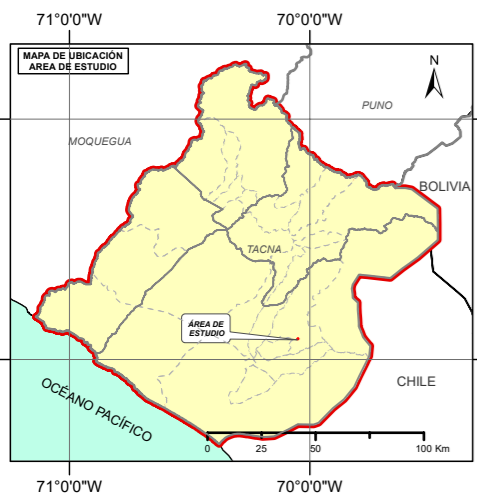
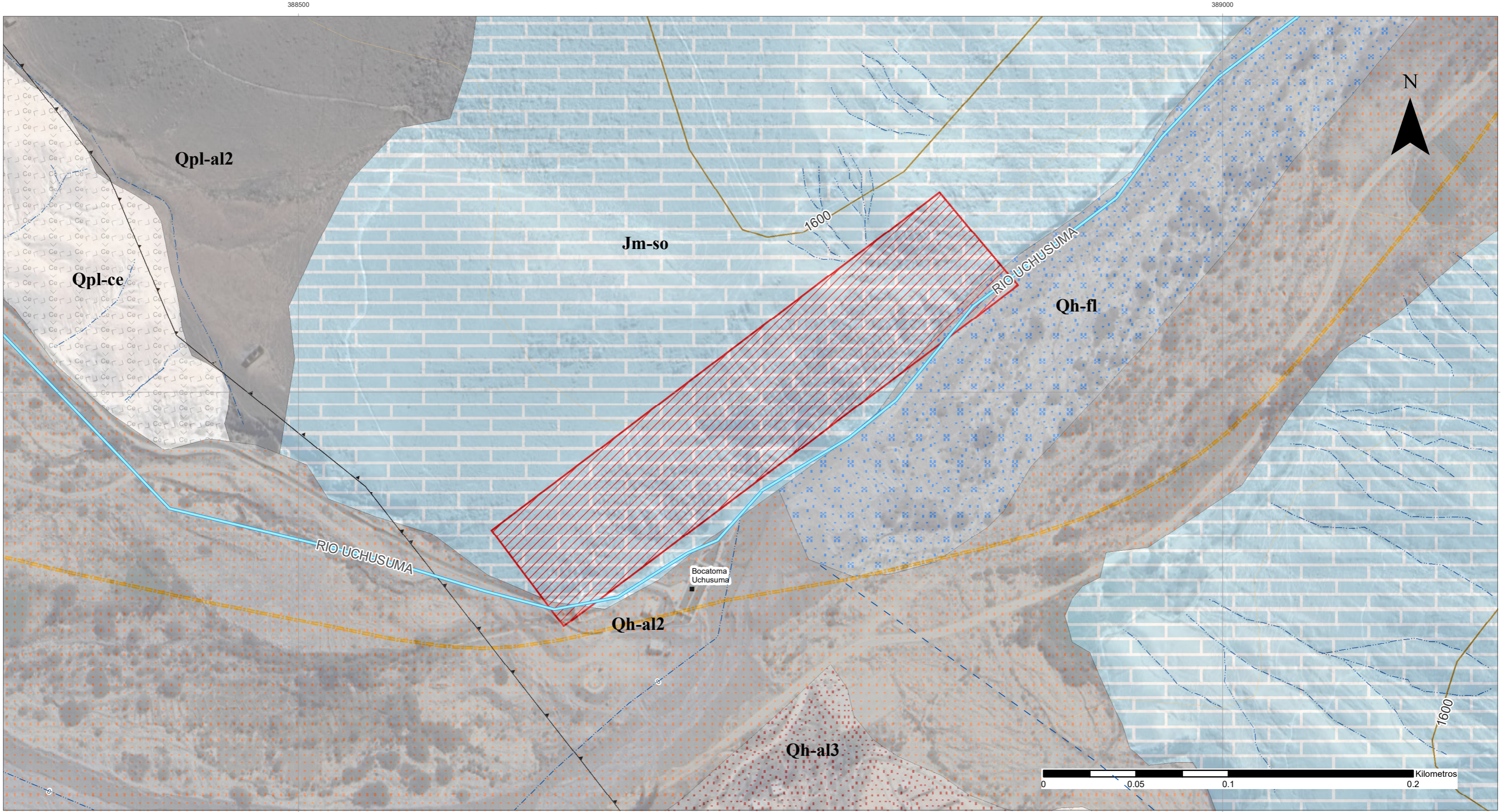
Escala: 1:10,000  
 Datum: WGS1984  
 Proyección: Universal Transverse Mercator  
 Zona: 19S

<p><b>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN</b>  <b>TACNA</b>      FACULTAD DE ING. CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA      Escuela Profesional de Ingeniería Geológica - Geotecnia</p>			
<p>Proyecto de tesis: <b>LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA: BOCATOMA CHUSCHUCO-PACHIA-TACNA</b></p>			
<p>Plano: <b>GEOMORFOLOGIA REGIONAL DE LA QUEBRADA UCHUSUMA</b></p>			
<p>Escala de trabajo: 1:10,000</p>	<p>Fecha: Junio 2025</p>	<p>Aprobado: ING. JONATHAN ZAVALETA CURASI</p>	<p>N°</p>
<p>Fuente: INGEMMET</p>	<p>Elaborado por: R. Rojas Pilco</p>	<p>Revisor: ING. JONATHAN ZAVALETA CURASI</p>	<p><b>PG-01</b></p>



Escala: 1:2,000  
 Datum: WGS1984  
 Proyección: Universal Transverse Mercator  
 Zona: 19S

<b>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN</b> <b>TACNA</b>		
<b>FACULTAD DE ING. CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA</b> <b>Escuela Profesional de Ingeniería Geológica - Geotecnia</b>		
<b>Proyecto de tesis:</b> LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA: BOCATOMA CHUSCHUCO-PACHIA-TACNA		
<b>Plano:</b> GEOMORFOLOGIA LOCAL DE LA QUEBRADA UCHUSUMA		
<b>Escala de trabajo:</b> 1:10,000	<b>Fecha:</b> Junio 2025	<b>Aprobado:</b> ING. JONATHAN ZAVALA CURASI
<b>Sistema de Coordenadas:</b> UTM - WGS84 - 19S	<b>Elaborado por:</b> R. Rojas Pilco	<b>Revisor:</b> ING. JONATHAN ZAVALA CURASI
		<b>PG-02</b>

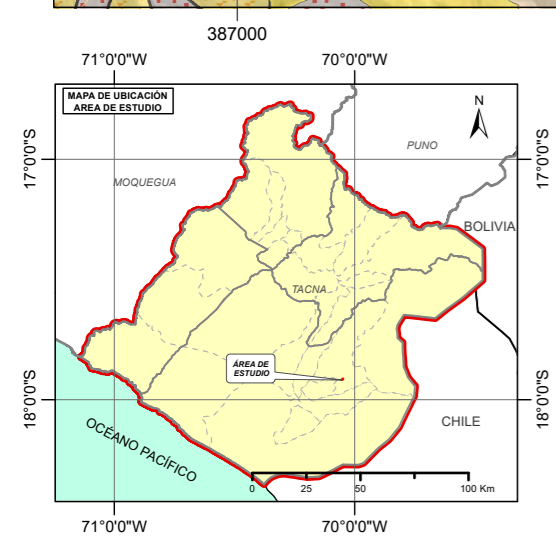
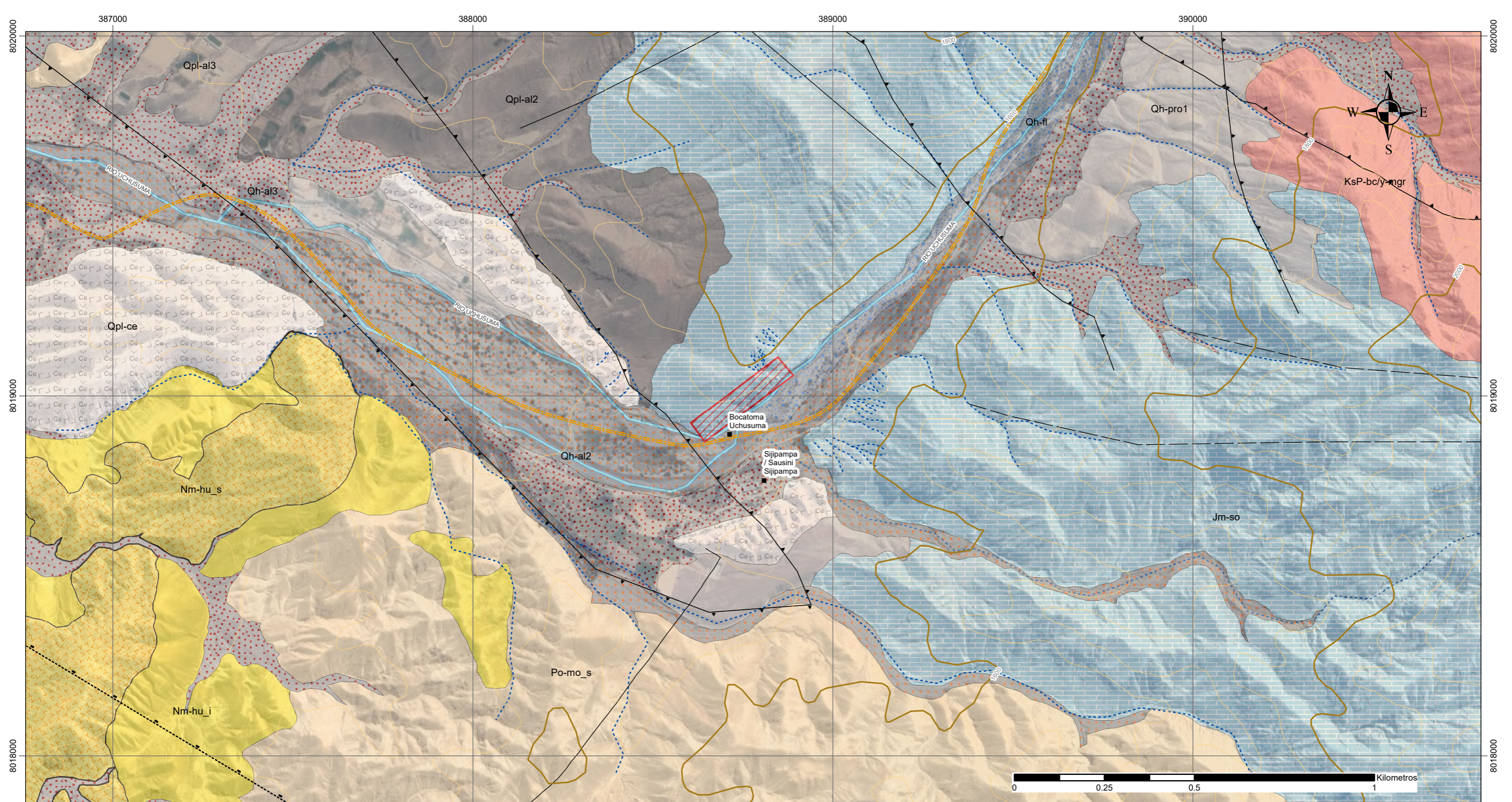


ERA	SISTEMA	SERIE	EDAD (MA)	UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	0.01	<b>Qh-fl</b> <b>Depósito fluvial:</b> Constituido de arenas, gravas y cantos rodados sub redondeados <b>Qh-al3</b> <b>Depósito aluvial 3:</b> Acumulación de grava, arena, limo y arcilla con clastos subangulosos a angulosos de diferente composición <b>Qh-al2</b> <b>Depósito aluvial 2:</b> Cantos, grava y arena subredondeados a redondeados polimicticas en una matriz limo arcillosa formando terrazas
			PLEISTOCENO	2.58
		MESOZOICO	JURASICO	MEDIO

LEYENDA	
	Falla inversa
	Falla Inversa Inferida
	Falla Normal Cubierta
	Falla sin movimiento definido
	Falla inferida
	Lineamiento
	Centro poblado
	Ríos
	Quebradas
	Red Vial
	Curvas de nivel
	Área de estudio

Escala: 1:2,000  
Datum: WGS1984  
Proyección: Universal Transverse Mercator  
Zona: 19S

<b>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN</b> <b>TACNA</b> FACULTAD DE ING. CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica - Geotecnia			
<b>Proyecto de tesis: LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA: BOCATOMA CHUSCHUCO-PACHIA-TACNA</b>			
<b>Plano: GEOLOGIA LOCAL DE LA QUEBRADA UCHUSUMA</b>			
<b>Escala de trabajo:</b> 1:2,000	<b>Fecha:</b> Junio 2025	<b>Aprobado:</b> ING. JONATHAN ZAVALA CURASI	<b>Nº</b> <div style="text-align: center; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">PG-03</div>
<b>Sistema de Coordenadas:</b> UTM - WGS84 - 19S	<b>Elaborado por:</b> R. Rojas Pilco	<b>Revisor:</b> ING. JONATHAN ZAVALA CURASI	



ERA	SISTEMA	SERIE	EDAD	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	ROCAS INTRUSIVAS Y SUBVOLCÁNICAS
CENOZÓICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	0.01	Qh-fl Depósito fluvial: Constituido de arenas, gravas y cantos rodados sub redondeados	Batolito de la Costa   Unidad Yarabamba   KsP-bcl/y-mgr Roca intrusiva monzogranito
		Qh-pro1 Depósito proluvial: Fragmentos subangulosos, heterométricos, cantos, gravas y arenas, con relleno limo-arenoso			
	PLEISTOCENO	Qh-al3 Depósito aluvial 3: Acumulación de grava, arena, limo y arcilla con clastos subangulosos a angulosos de diferente composición			
		Qh-al2 Depósito aluvial 2: Cantos, grava y arenas subredondeadas a redondeados polimicticas en una matriz limoarcillosa formando terrazas			
NEOCENO	MIOCENO	2.58	Qpl-al3 Depósito aluvial 3: Cantos, bloques, grava y arenas subredondeadas a redondeados polimicticas en una matriz limoarcillosa formando terrazas en los flancos de los ríos		
			Qpl-al2 Depósito aluvial 2: Cantos, bloques, grava y arenas subredondeadas a redondeados polimicticas en una matriz limoarcillosa formando terrazas en los flancos de los ríos		
PALEOGENO	OLIGOCENO	39.9	Qpl-ce Depósito volcánico-ceniza: Depósito de flujo piroclástico de caída de ceniza, pómez		
			Nm-hu_s Miembro Superior: Tobas de cristales lodalíticos osáceas, lignimbritas blancas y rosáceas poco soldadas con fragmentos líticos de pómez		
MESOZOICO	JURÁSICO	SUPERIOR	163.5	Nm-hu_i Miembro Inferior: Tobas rosáceas con abundantes fragmentos de líticos fragmentos de pómez intercaladas en matriz de areniscas cuarzo-feldespáticas	
		MEDIO		174.1	Po-mo_s Miembro Superior: Conglomerados polimicticos de clastos soportados en estratos gruesos, con areniscas de grano grueso
				Jm-so Formación Socosani: Calizas grises, lutitas negras, rojizas, areniscas calcáreas	

LEYENDA	
	Falla inversa
	Falla Inversa Inferida
	Falla Normal Cubierta
	Falla sin movimiento definido
	Falla inferida
	Lineamiento
	Centro poblado
	Ríos
	Quebradas
	Red Vial
	Curvas de nivel
	Área de estudio

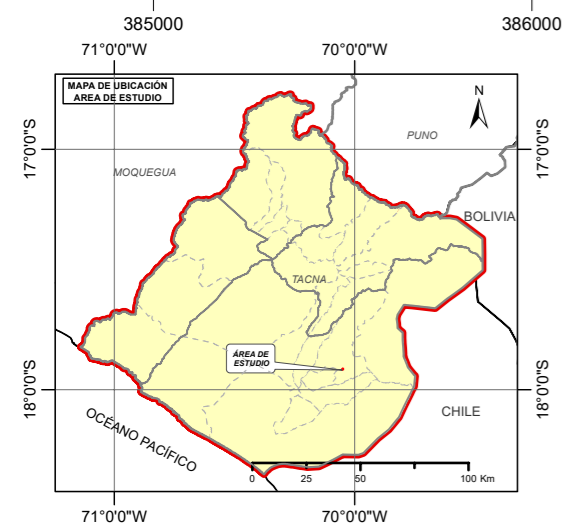
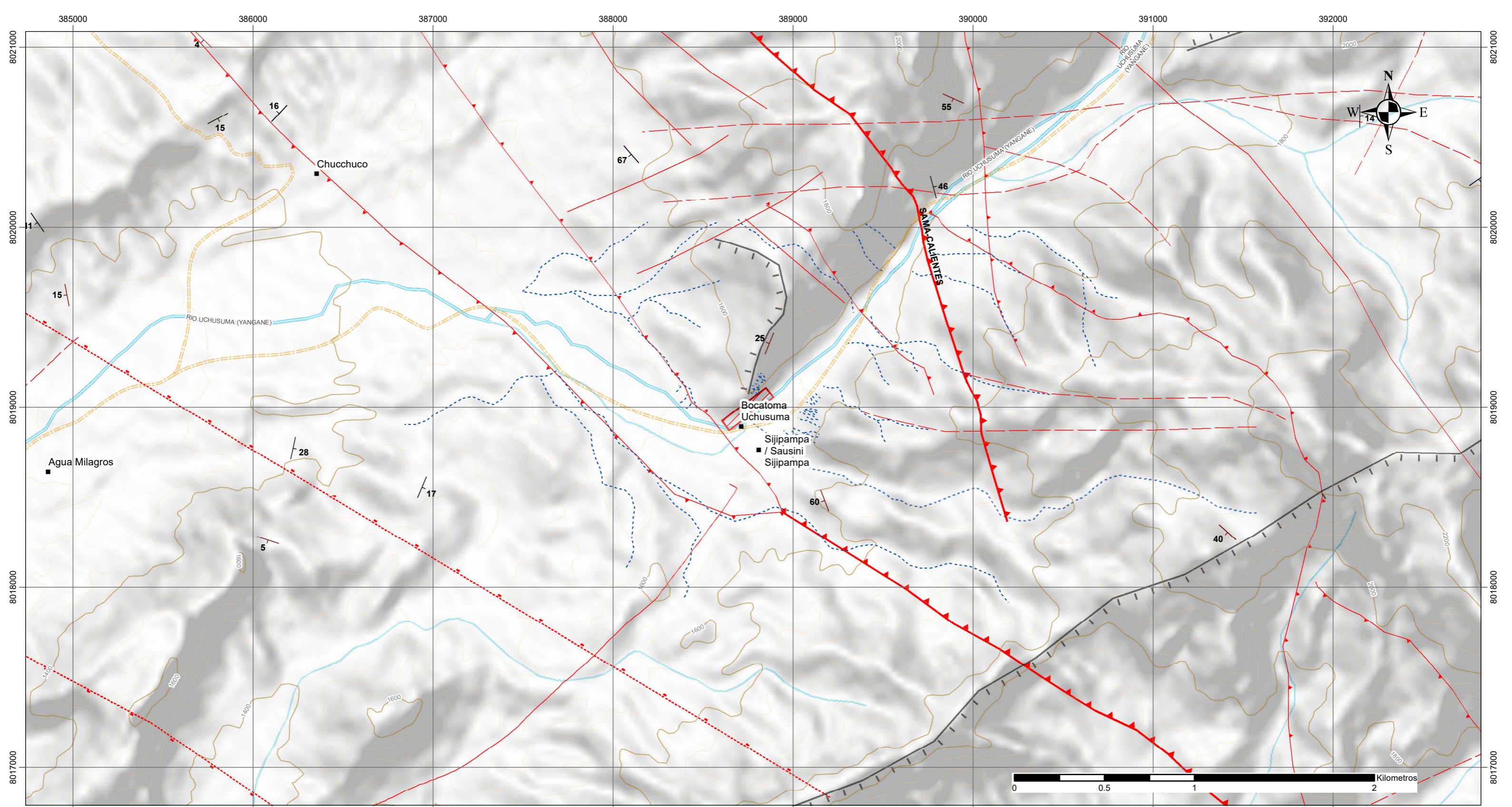
Escala: 1:10,000  
Datum: WGS1984  
Proyección: Universal Transverse Mercator  
Zona: 19S

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**  
**TACNA**  
FACULTAD DE ING. CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA  
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica - Geotecnia

**Proyecto de tesis:** LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA: BOCATOMA CHUSCHUCO-PACHIA-TACNA

**Plano:** GEOLOGIA REGIONAL DE LA QUEBRADA UCHUSUMA

<b>Escala de trabajo:</b> 1:10,000	<b>Fecha:</b> Junio 2025	<b>Aprobado:</b> ING. JONATHAN ZAVALA CURASI	<b>N°</b> PG-04
<b>Fuente:</b> INGEMMET	<b>Elaborado por:</b> R. Rojas Pilco	<b>Revisor:</b> ING. JONATHAN ZAVALA CURASI	

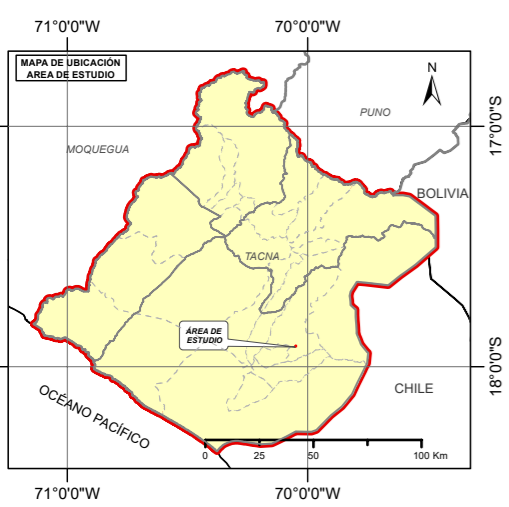
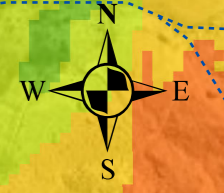
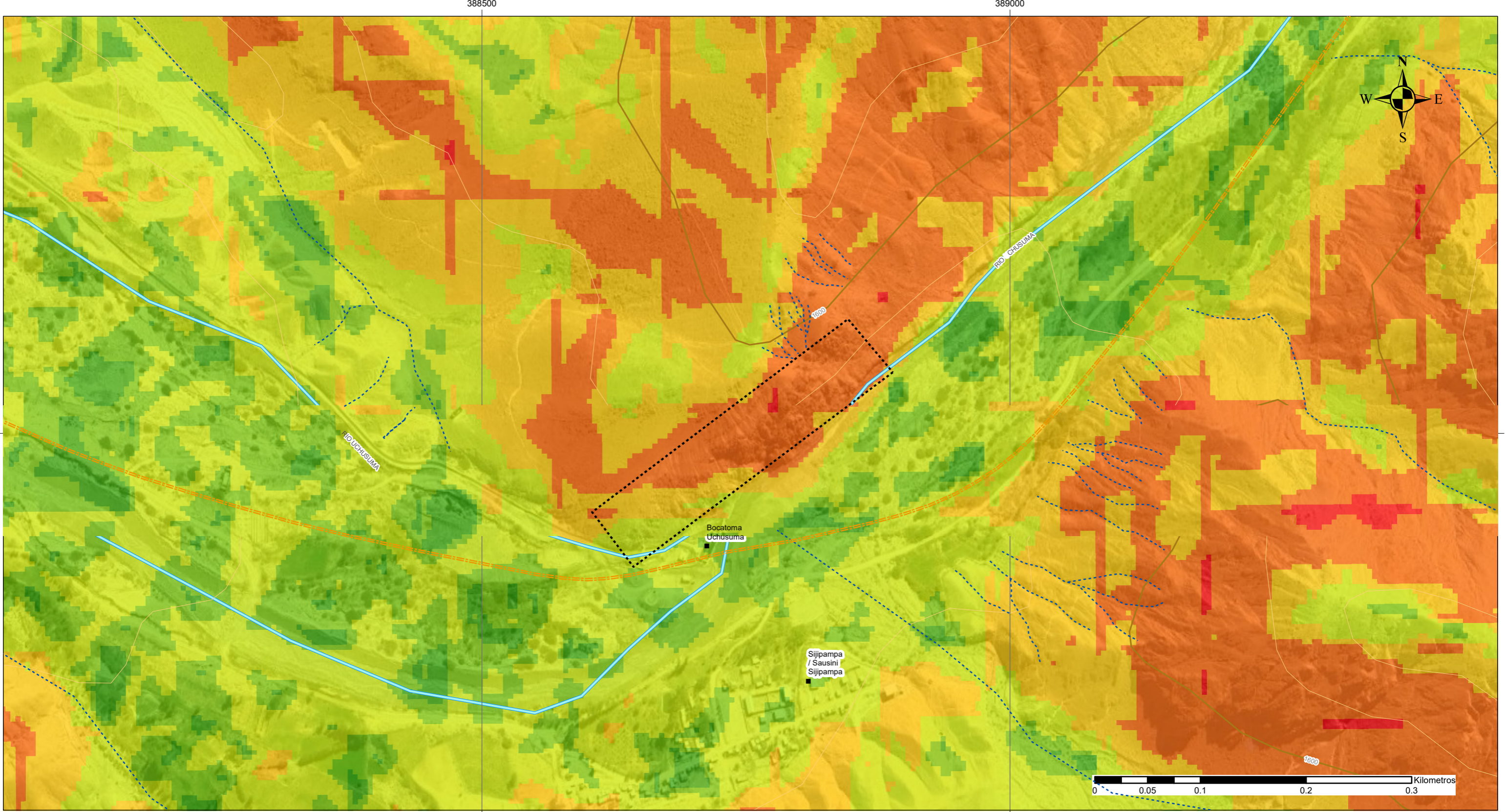


Escala: 1:20,000  
 Datum: WGS1984  
 Proyección: Universal Transverse Mercator  
 Zona: 19S

SIMBOLOGÍA		POG- INGEMMET	
	Falla inversa		Rumbo y buzamiento de estratos
	Falla Inversa Inferida		Rumbo y buzamiento de foliación
	Falla Inversa Cubierta		Rumbo y buzamiento de diaclasas
	Falla Normal		Rumbo y buzamiento de plano de falla
	Falla Normal Inferida		
	Falla Normal Cubierta		
	Falla sin movimiento definido		
	Falla inferida		
	Lineamiento		
	Deslizamiento		

LEYENDA	
	Centro poblado
	Ríos
	Quebradas
	Red Vial
	Curvas de nivel
	Área de estudio

<p align="center"><b>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN</b>  <b>TACNA</b>          FACULTAD DE ING. CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA          Escuela Profesional de Ingeniería Geológica - Geotecnia</p>			
Proyecto de tesis: <b>LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA: BOCATOMA CHUSCHUCO-PACHIA-TACNA</b>			
Plano: <b>MAPA ESTRUCTURAL REGIONAL</b>			
Escala de trabajo: 1:20,000	Fecha: Junio 2025	Aprobado : ING. JONATHAN ZAVALA CURASI	N° <b>PE-05</b>
Fuente: INGEMMET	Elaborado por: R. Rojas Pilco	Revisor: ING. JONATHAN ZAVALA CURASI	





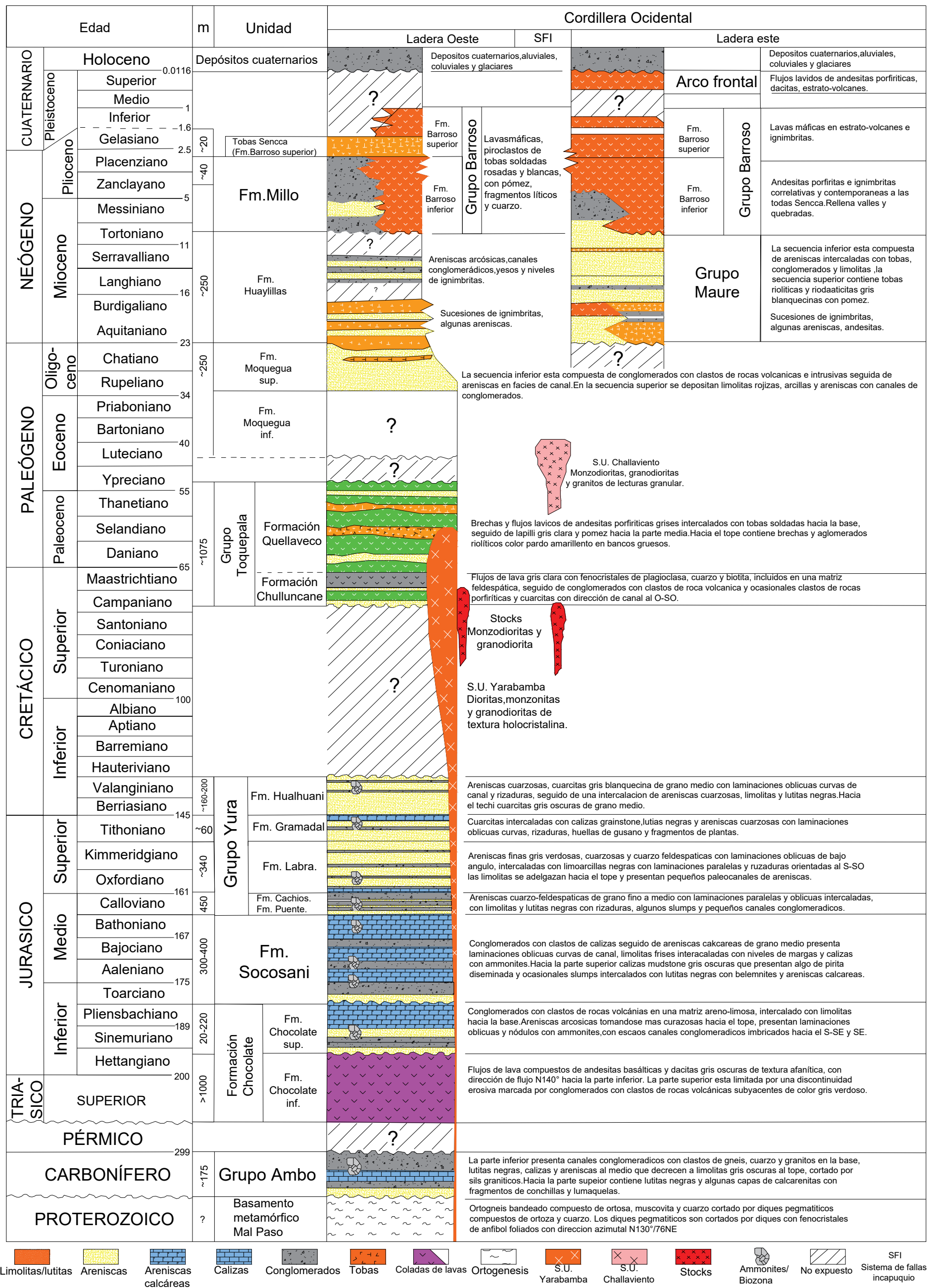
Rango de pendiente en grados (°)	Superficie Topográfica
0 - 1°	Terreno llano
1 - 5°	Terreno inclinado con pendiente suave
5 - 15°	Pendiente moderada
15 - 25°	Pendiente fuerte
25 - 45°	Pendiente muy fuerte y escarpada
> 45°	Terreno escarpado

Fuente: INGEMMET



LEYENDA	
■	Centro poblado
~	Ríos
- - -	Quebradas
- - -	Red Vial
~	Curvas de nivel
⋯	Área de estudio

Escala: 1:3,500  
 Datum: WGS1984  
 Proyección: Universal Transverse Mercator  
 Zona: 19S

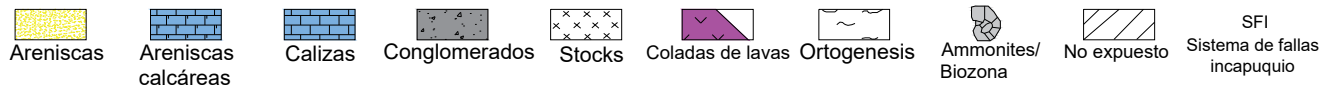
 <b>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN</b> <b>TACNA</b> FACULTAD DE ING. CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica - Geotecnia				
<b>Proyecto de tesis:</b> LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA: BOCATOMA CHUSCHUCO-PACHIA-TACHA				
<b>Plano:</b> MAPA DE PENDIENTES DE LA QUEBRADA UCHUSUMA				
<b>Escala de trabajo:</b> 1:3,500	<b>Fecha:</b> Junio 2025	<b>Aprobado:</b> ING. JONATHAN ZAVALA CURASI	<b>N°</b>	
<b>Sistema de Coordenadas:</b> UTM - WGS84 - 19S	<b>Elaborado por:</b> R. Rojas Pilco	<b>Revisor:</b> ING. JONATHAN ZAVALA CURASI	<b>PP-06</b>	





Oganizacion estatigráfica generalizada de los cuadrángulos de Pachía(36-v) y Palca(36-x). Tomado de Marocco (1984), Vicente (1989), Woner et al. (2000), Monge & Cervantes (2000), Pino et al. (2002), Flores et al.(2004), Jacay et al. (2004), Sempere et al. (2004a), Quang et al. (2005), Roperch et al. (2006), Thouret et al. (2007), Acosta et al.(2008), Mamani et al. (2010), y del presente estudio

		UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN TACNA FACULTAD DE ING. CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia			
Tesis: LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA: BOCATOMA CHUSCHUCO-PACHÍA-TACNA					
Plano: COLUMNA ESTATIGRÁFICA REGIONAL DEL CUADRÁNGULO DE PACHÍA Y PALCA, HOJAS 36v Y 36x		Fecha: Octubre 2025	Adaptado por: R. Rojas Pilco	Aprobado: ING. JONATHAN ZAVALETA CURASI	Revisor: ING. JONATHAN ZAVALETA CURASI
Fuente: INGEMMET					N° CE-01

Edad		m	Unidad		Cordillera Occidental			
					Ladera Oeste	SFI	Ladera este	
CRETÁCICO	Inf.	Valanginiano	Grupo Yura	Fm. Hualhuani		SFI	Areniscas cuarzosas, cuarcitas gris blanquecina de grano medio con laminaciones oblicuas curvas de canal y rizaduras, seguido de una intercalacion de areniscas cuarzosas, limolitas y lutitas negras. Hacia el techi cuarcitas gris oscuras de grano medio.	
		Berriasiano		Fm. Gramadal			Cuarcitas intercaladas con calizas grainstone, lutias negras y areniscas cuarzosas con laminaciones oblicuas curvas, rizaduras, huellas de gusano y fragmentos de plantas.	
JURASICO	Superior	Tithoniano		Fm. Labra.			Areniscas finas gris verdosas, cuarzosas y cuarzo feldespaticas con laminaciones oblicuas de bajo angulo, intercaladas con limoarcillas negras con laminaciones paralelas y ruzaduras orientadas al S-SO las limolitas se adelgazan hacia el tope y presentan pequeños paleocanales de areniscas.	
		Kimmeridgiano		Fm. Cachios. Fm. Puente.			Areniscas cuarzo-feldespaticas de grano fino a medio con laminaciones paralelas y oblicuas intercaladas, con limolitas y lutitas negras con rizaduras, algunos slumps y pequeños canales conglomeradicos.	
		Oxfordiano		Fm. Socosani				Conglomerados con clastos de calizas seguido de areniscas calcareas de grano medio presenta laminaciones oblicuas curvas de canal, limolitas frises intercaladas con niveles de margas y calizas con ammonites. Hacia la parte superior calizas mudstone gris oscuras que presentan algo de pirita diseminada y ocasionales slumps intercalados con lutitas negras con belemnites y areniscas calcareas.
		Calloviano						
Bathoniano								
JURASICO	Medio	Bajociano		Fm. Socosani				Conglomerados con clastos de calizas seguido de areniscas calcareas de grano medio presenta laminaciones oblicuas curvas de canal, limolitas frises intercaladas con niveles de margas y calizas con ammonites. Hacia la parte superior calizas mudstone gris oscuras que presentan algo de pirita diseminada y ocasionales slumps intercalados con lutitas negras con belemnites y areniscas calcareas.
		Aaleniano						
		Toarciano						
JURASICO	Inferior	Pliensbachiano	Formación Chocolate	Fm. Chocolate sup.		Conglomerados con clastos de rocas volcánias en una matriz areno-limosa, intercalado con limolitas hacia la base. Areniscas arcosicas tomándose mas curazosas hacia el tope, presentan laminaciones oblicuas y nódulos con ammonites, con escaos canales conglomeradicos imbricados hacia el S-SE y SE.		
		Sinemuriano						
		Hettangiano		Fm. Chocolate inf.		Flujos de lava compuestos de andesitas basálticas y dacitas gris oscuras de textura afanítica, con dirección de flujo N140° hacia la parte inferior. La parte superior esta limitada por una discontinuidad erosiva marcada por conglomerados con clastos de rocas volcánicas subyacentes de color gris verdoso.		
TRIASICO	SUPERIOR	>1000	Formación Chocolate	Fm. Chocolate inf.		Flujos de lava compuestos de andesitas basálticas y dacitas gris oscuras de textura afanítica, con dirección de flujo N140° hacia la parte inferior. La parte superior esta limitada por una discontinuidad erosiva marcada por conglomerados con clastos de rocas volcánicas subyacentes de color gris verdoso.		
PÉRMICO		299						
CARBONÍFERO		~175	Grupo Ambo				La parte inferior presenta canales conglomeradicos con clastos de gneis, cuarzo y granitos en la base, lutitas negras, calizas y areniscas al medio que decrecen a limolitas gris oscuras al tope, cortado por sils graniticos. Hacia la parte superior contiene lutitas negras y algunas capas de calcarenitas con fragmentos de conchillas y lumaquelas.	
PROTEROZOICO		?	Basamento metamórfico Mal Paso				Ortogneis bandeado compuesto de ortosa, muscovita y cuarzo cortado por diques pegmatiticos compuestos de ortosa y cuarzo. Los diques pegmatiticos son cortados por diques con fenocristales de anfíbol foliados con direccion azimuthal N130°/76NE	



 UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN <b>TACNA</b> FACULTAD DE ING. CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia						
Tesis: <b>LEVANTAMIENTO DE ORIENTACIONES DE DISCONTINUIDADES CON USO DE DRON EN TALUDES DE ROCA: BOCATOMA CHUSCHUCO-PACHIA-TACNA</b>						N°
Plano: COLUMNA ESTATIGRÁFICA LOCAL DE LA ZONA DE ESTUDIO		Fecha: Octubre 2025	Elaborado por: R. Rojas Pilco	Aprobado: ING. JONATHAN ZAVALETA CURASI	Revisor: ING. JONATHAN ZAVALETA CURASI	Fuente: INGENMET
						<b>CE-02</b>

## **Anexo 3**

# **Galería fotográfica**

### 3.1. Trabajo en campo

#### 3.1.1. Mapeo Geológico en Campo



Foto N°1.- Revisión de zona de estudio



Foto N°2.-Identificación y mapeo de contactos litológicos



Foto N°3.-Registro de toba volcánica



Foto N°4.-Mapeo local



Foto N°5.-Mapeo geomorfológico local



Foto N°6.- Registro de pendientes



Foto N°7.- Identificación de venillas de calcita en mapeo de talud



Foto N°8.-Identificación de venillas de Calcita y yeso



### 3.1.2. Levantamiento de discontinuidades





Foto N°1.- Levantamiento de discontinuidades y puntos de control

### 3.1.3. Vuelo con dron



Foto N°1.- Marca de punto topográfico



Foto N°2.- Equipos D-RTK2-DJI

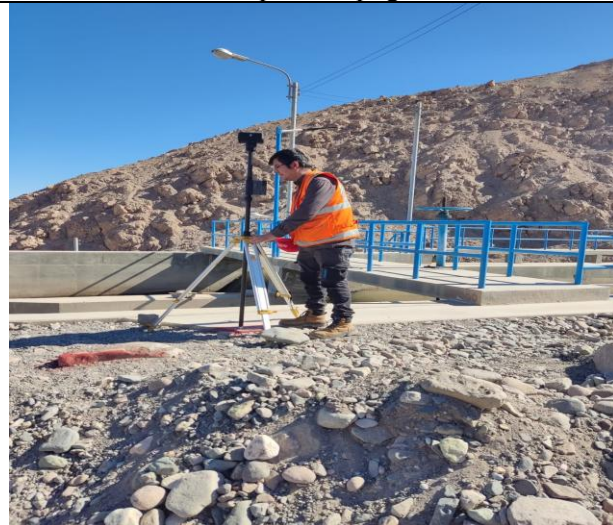


Foto N°3.- Instalación y verificación de equipo



Foto N°4.- Configuración de equipo



Foto N°5.- Pre vuelo

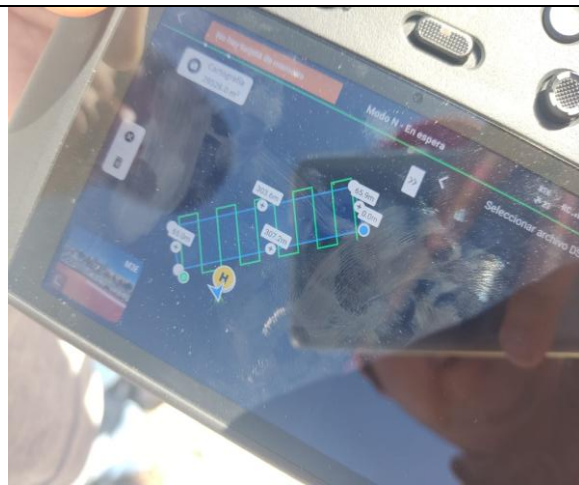


Foto N°6.- Diseño del vuelo



Foto N°7.- Vuelo del dron

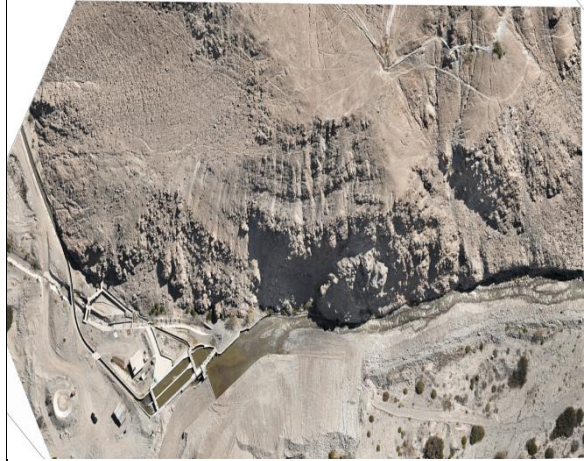


Foto N°8.- Imagen del vuelo

### 3.2. Trabajo en gabinete

#### 3.2.1 Procesamiento en Point Studio

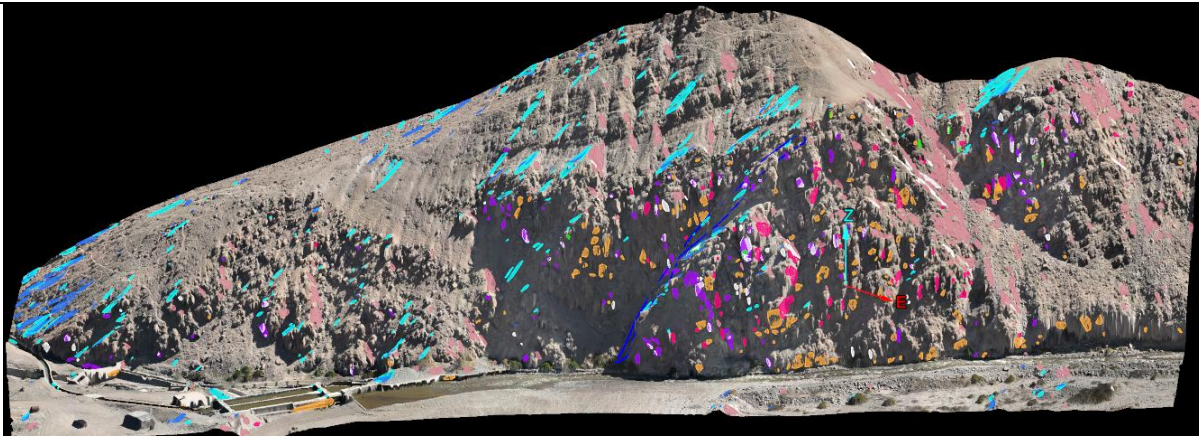


Foto N°1.- Identificación de planos de discontinuidades con MGA (Global Mapping Automatic)

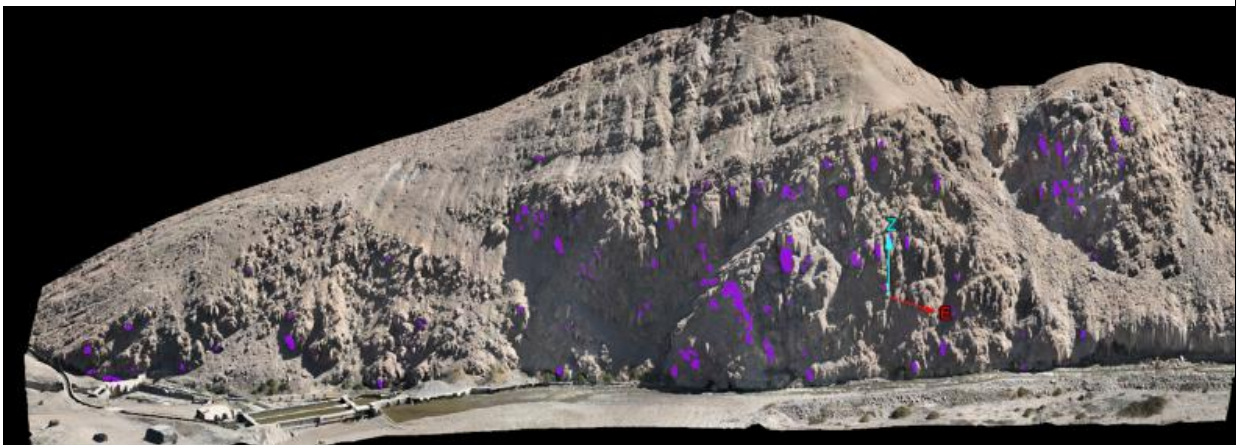


Foto N°2.- Revisión de discontinuidades del Set 1

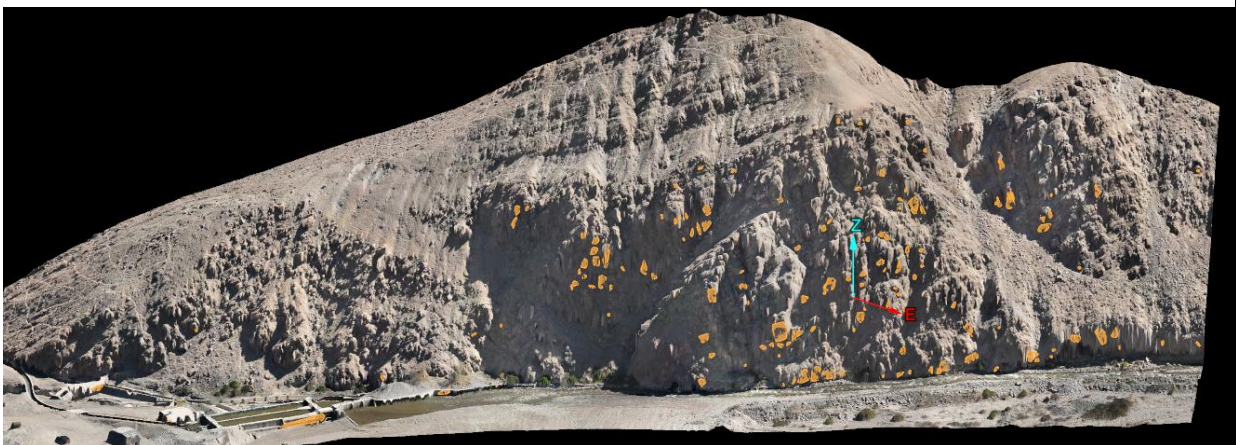


Foto N°3.- Revisión de discontinuidades del Set

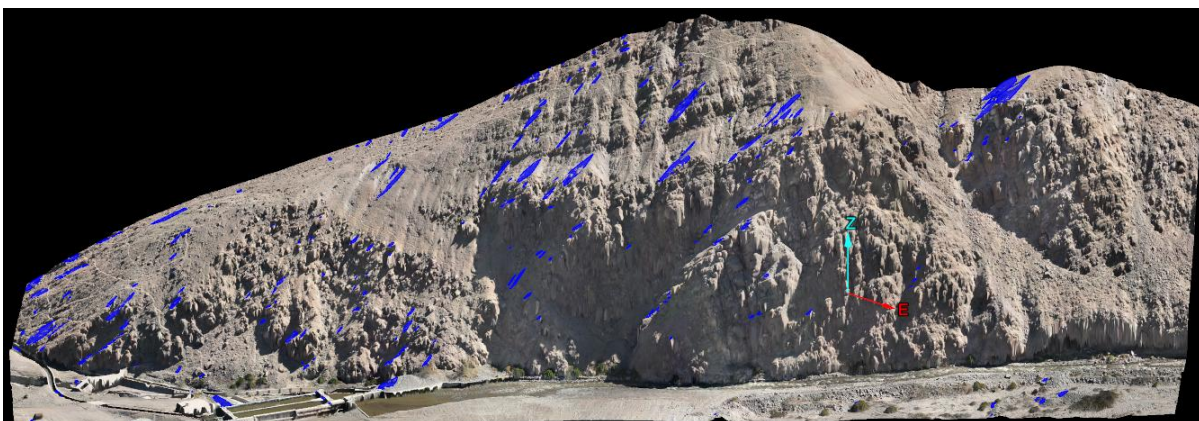


Foto N°4.- Revisión de discontinuidades del Set 3

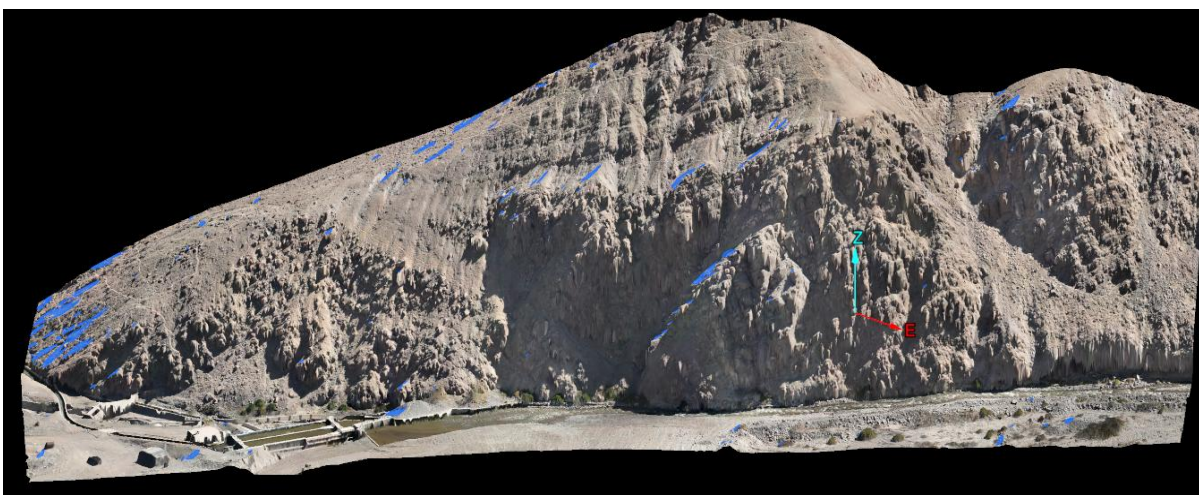


Foto N°5.- Revisión de discontinuidades del Set 4

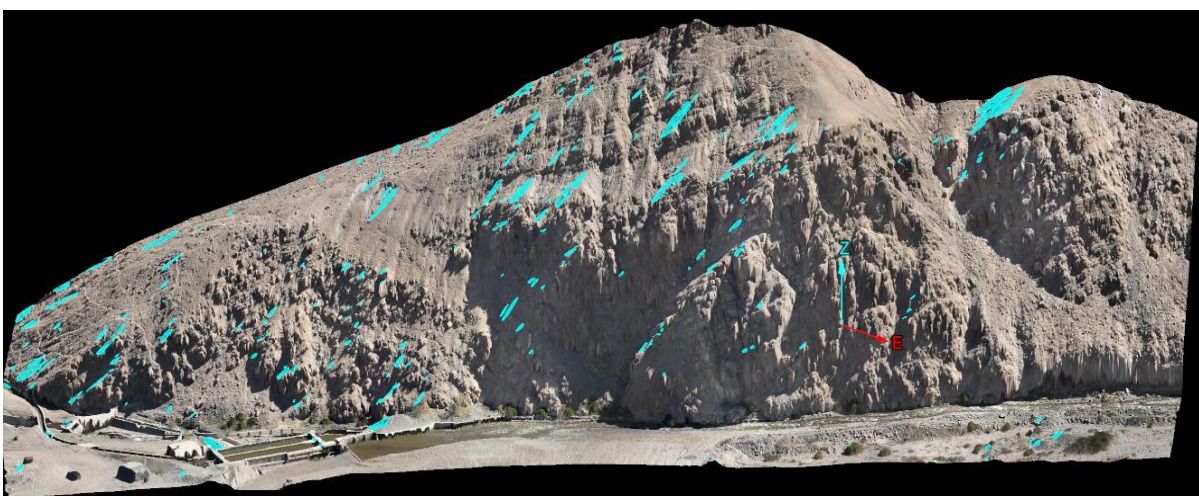


Foto N°6.- Revisión de discontinuidades del Set 5

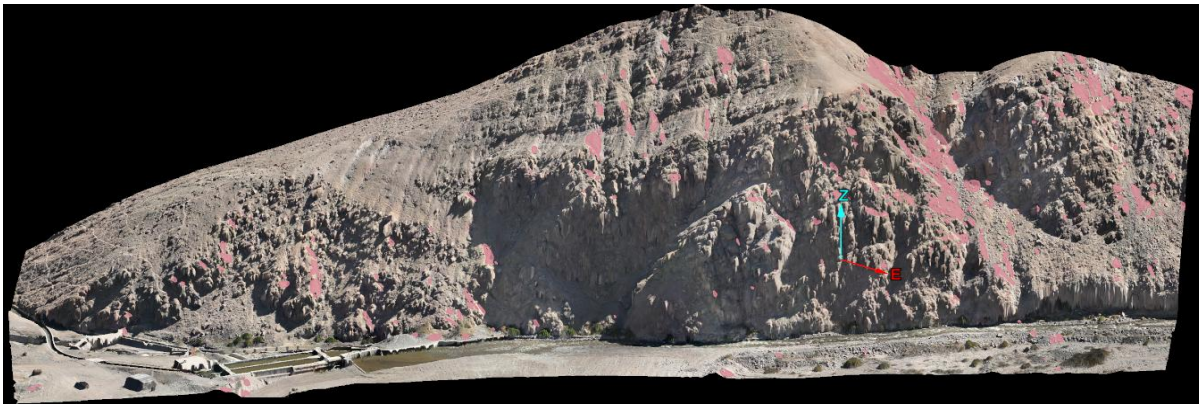


Foto N°7.- Revisión de discontinuidades del Set 6

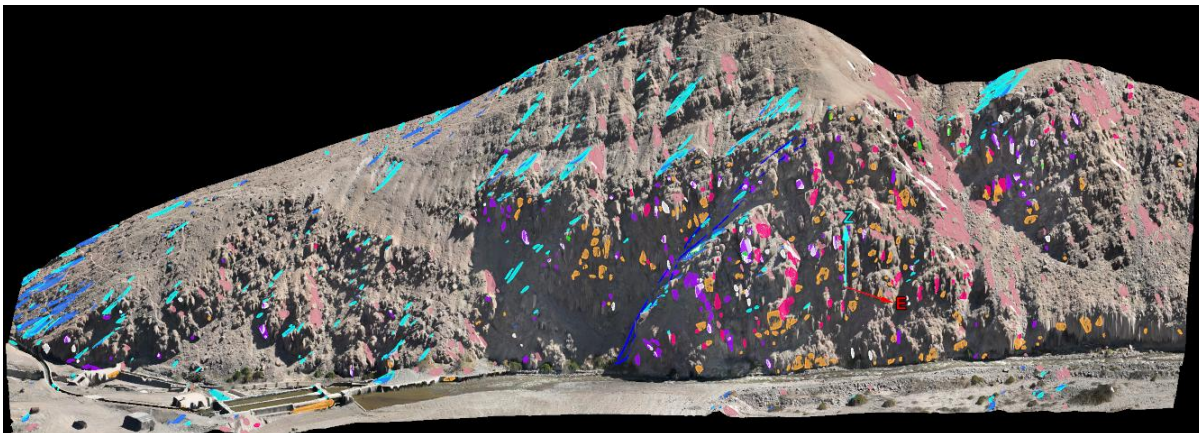


Foto N°8.- Set de discontinuidades resultantes después de limpieza y verificación de Sets

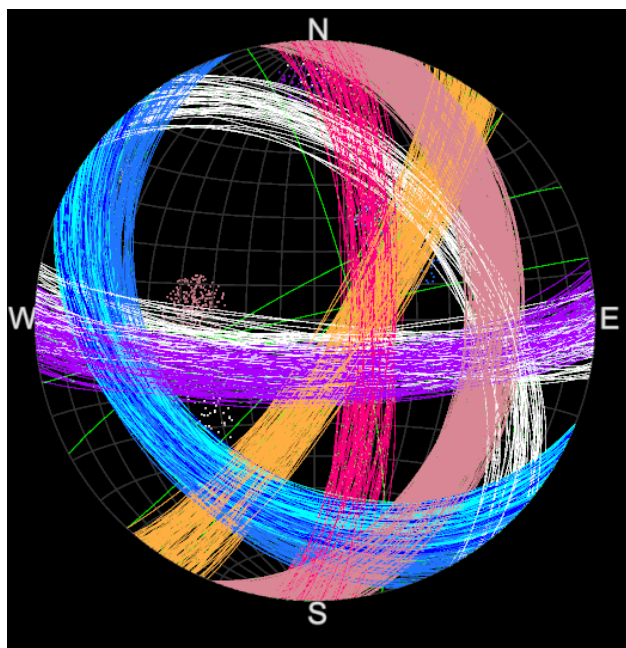


Foto N°9.- Generación de estereograma con todos del Set resultantes

# **Anexo 4**

## **Codificación MatLab**

```

%% =====
% MONTE CARLO PAIRING con TUS DATOS (TSV pegado)
% Lee: mis_datos.tsv (columnas: ID, DIP, DIPDIRECTION, FAMILIA, METODO)
% Martin - Bocatoma Chuschuco
%% =====
clear; clc; close all;

%% ===== CONFIGURACIÓN =====
% Opción A (Excel) desactivada
useExcel = false;
excelFile = 'Datos comparativos dron-manual_data limpia.xlsx';
sheetName = 1;

% Opción B (TSV) ACTIVADA
useTSV = true;
tsvFile = 'mis_datos.tsv'; % <<-- Asegúrate que existe y está tab-delimited

% Columnas esperadas
colID = 'ID';
colDIP = 'DIP';
colDIR = 'DIPDIRECTION';
colFAM = 'FAMILIA';
colMET = 'METODO';

% Iteraciones Monte Carlo
Niters = 2000;
rng(123); % semilla reproducible

%% ===== 1) CARGAR DATOS =====
if useExcel
    T = readtable(excelFile, 'Sheet', sheetName);
elseif useTSV
    T = readtable(tsvFile, 'FileType', 'text', 'Delimiter', '\t');
else
    error('Activa useExcel=true o useTSV=true.');
```

=

```

end
T.Properties.VariableNames =
matlab.lang.makeValidName(T.Properties.VariableNames);
getCol = @ (name)
T.(T.Properties.VariableNames{strcmpi(T.Properties.VariableNames, name)});

ID = getCol(colID);
DIP = getCol(colDIP);
DIR = getCol(colDIR);
MET = getCol(colMET);

if iscell(MET); MET = string(MET); end
MET = lower(strtrim(MET));

% Normalización de rangos
DIP(~isfinite(DIP) | DIP<0 | DIP>90) = NaN; % DIP ? [0,90]
DIR = mod(DIR, 360); % DIR ? [0,360]
DIR(~isfinite(DIR)) = NaN;

isDron = (MET=="dron");
isManual = (MET=="manual");

dip_dron = DIP(isDron);
dip_manual = DIP(isManual);
dir_dron = DIR(isDron);
dir_manual = DIR(isManual);

fprintf('Censos válidos -> DIP: DRON=%d, MANUAL=%d | DIR: DRON=%d,
MANUAL=%d\n', ...
        nnz(~isnan(dip_dron)), nnz(~isnan(dip_manual)), nnz(~isnan(dir_dron)),
        nnz(~isnan(dir_manual)));

%% ===== 2) MONTE CARLO - BUZAMIENTO (DIP) =====
[dip_r, dip_r2, dip_rmse, dip_ccc] = deal(zeros(Niters,1));
xLarge = dip_dron(isfinite(dip_dron));
ySmall = dip_manual(isfinite(dip_manual));

```

```

nSmall = numel(ySmall);

for it = 1:Niters
    idx = randperm(numel(xLarge), nSmall); % sin reemplazo
    xs = xLarge(idx);
    ys = ySmall(randperm(nSmall)); % permutar manual
    r = corr(xs, ys, 'type','Pearson','rows','complete');
    dip_r(it) = r;
    dip_r2(it) = r.^2;
    dip_rmse(it) = sqrt(mean((ys - xs).^2));
    dip_ccc(it) = linsCCC(xs, ys);
end
sum_DIP = summarizeMC(dip_r2, dip_rmse, dip_ccc);

%% ===== 3) MONTE CARLO - DIRECCIÓN (DIPDIRECTION) =====
[dir_r2_lin, dir_rmse_lin, dir_ccc_lin, dir_rho_circ, dir_armse, dir_maae] =
deal(zeros(Niters,1));
xLarge = dir_dron(isfinite(dir_dron));
ySmall = dir_manual(isfinite(dir_manual));
nSmall = numel(ySmall);

for it = 1:Niters
    idx = randperm(numel(xLarge), nSmall);
    xs = xLarge(idx);
    ys = ySmall(randperm(nSmall));
    rlin = corr(xs, ys, 'type','Pearson','rows','complete'); % referencia
lineal
    dir_r2_lin(it) = rlin.^2;
    dir_rmse_lin(it) = sqrt(mean((ys - xs).^2));
    dir_ccc_lin(it) = linsCCC(xs, ys);
    dir_rho_circ(it) = circCorrJammalamadaka(xs, ys); % circular
    diff = wrap180(ys - xs);
    dir_armse(it) = sqrt(mean(diff.^2));
    dir_maae(it) = mean(abs(diff));
end
sum_DIR = summarizeMCdir(dir_r2_lin, dir_rmse_lin, dir_ccc_lin, dir_rho_circ,
dir_armse, dir_maae);

%% ===== 4) EXPORTAR A EXCEL =====
outFile = 'MC_Comparativo_Dron_vs_Manual.xlsx';
if exist(outFile,'file'), delete(outFile); end
T_DIP = table(dip_r, dip_r2, dip_rmse, dip_ccc, ...
'VariableNames',{'r','R2','RMSE','CCC'});
T_DIR = table(dir_r2_lin, dir_rmse_lin, dir_ccc_lin, dir_rho_circ, dir_armse,
dir_maae, ...
'VariableNames',{'R2_lin','RMSE_lin','CCC_lin','rho_circ','Angular_RMSE','MAAE'});
writetable(T_DIP, outFile, 'Sheet','MC_DIP');
writetable(T_DIR, outFile, 'Sheet','MC_DIR');
writetable(struct2table(sum_DIP), outFile, 'Sheet','Resumen_DIP');
writetable(struct2table(sum_DIR), outFile, 'Sheet','Resumen_DIR');
fprintf('\nGuardado: %s\n', outFile);

%% ===== 5) GRÁFICOS =====
figure('Color','w','Name','DIP - Monte Carlo');
subplot(1,3,1); histogram(dip_r2,30); title('DIP - R^2'); grid on;
subplot(1,3,2); histogram(dip_rmse,30); title('DIP - RMSE (°)'); grid on;
subplot(1,3,3); histogram(dip_ccc,30); title('DIP - CCC'); grid on;

figure('Color','w','Name','DIPDIR - Monte Carlo');
subplot(2,3,1); histogram(dir_r2_lin,30); title('DIR - R^2 (lineal)'); grid
on;
subplot(2,3,2); histogram(dir_rho_circ,30); title('DIR - \rho circular');
grid on;
subplot(2,3,3); histogram(dir_armse,30); title('DIR - Angular RMSE (°)'); grid
on;
subplot(2,3,4); histogram(dir_maae,30); title('DIR - MAAE (°)'); grid on;
subplot(2,3,5); histogram(dir_ccc_lin,30); title('DIR - CCC (lineal)'); grid
on;

disp('--- Resumen DIP (mediana [p2.5-p97.5]) ---'); disp(sum_DIP);

```

```

disp('--- Resumen DIR (mediana [p2.5-p97.5]) ---'); disp(sum_DIR);

%% ===== FUNCIONES LOCALES =====
function ccc = linsCCC(x, y)
    x = x(:); y = y(:);
    mX = mean(x, 'omitnan'); mY = mean(y, 'omitnan');
    sX = std(x, 0, 'omitnan'); sY = std(y, 0, 'omitnan');
    r = corr(x, y, 'type', 'Pearson', 'rows', 'complete');
    ccc = (2*r*sX*sY) / (sX^2 + sY^2 + (mX - mY)^2);
end
function rho = circCorrJammalamadaka(aDeg, bDeg)
    a = deg2rad(aDeg(:)); b = deg2rad(bDeg(:));
    mask = isfinite(a) & isfinite(b);
    a = a(mask); b = b(mask);
    if numel(a) < 3, rho = NaN; return; end
    sa = sin(a); ca = cos(a);
    sb = sin(b); cb = cos(b);
    aBar = atan2(mean(sa), mean(ca));
    bBar = atan2(mean(sb), mean(cb));
    num = sum( sin(a - aBar) .* sin(b - bBar) );
    den = sqrt( sum(sin(a - aBar).^2) * sum(sin(b - bBar).^2) );
    if den == 0, rho = NaN; else, rho = num / den; end
end
function x = wrap180(x)
    x = mod(x + 180, 360) - 180;    % [-180, 180)
end
function S = summarizeMC(R2, RMSE, CCC)
    S.R2_p50      = median(R2, 'omitnan');
    S.R2_p2_5    = prctile(R2, 2.5);
    S.R2_p97_5   = prctile(R2, 97.5);
    S.RMSE_p50   = median(RMSE, 'omitnan');
    S.RMSE_p2_5  = prctile(RMSE, 2.5);
    S.RMSE_p97_5 = prctile(RMSE, 97.5);
    S.CCC_p50    = median(CCC, 'omitnan');
    S.CCC_p2_5   = prctile(CCC, 2.5);
    S.CCC_p97_5  = prctile(CCC, 97.5);
end
function S = summarizeMCdir(R2_lin, RMSE_lin, CCC_lin, rho_circ, ARMSE, MAAE)
    S.R2lin_p50  = median(R2_lin, 'omitnan');
    S.R2lin_p2_5 = prctile(R2_lin, 2.5);
    S.R2lin_p97_5 = prctile(R2_lin, 97.5);
    S.RMSElin_p50 = median(RMSE_lin, 'omitnan');
    S.RMSElin_p2_5 = prctile(RMSE_lin, 2.5);
    S.RMSElin_p97_5 = prctile(RMSE_lin, 97.5);
    S.CCclin_p50  = median(CCC_lin, 'omitnan');
    S.CCclin_p2_5 = prctile(CCC_lin, 2.5);
    S.CCclin_p97_5 = prctile(CCC_lin, 97.5);
    S.rhoCirc_p50 = median(rho_circ, 'omitnan');
    S.rhoCirc_p2_5 = prctile(rho_circ, 2.5);
    S.rhoCirc_p97_5 = prctile(rho_circ, 97.5);
    S.AngRMSE_p50 = median(ARMSE, 'omitnan');
    S.AngRMSE_p2_5 = prctile(ARMSE, 2.5);
    S.AngRMSE_p97_5 = prctile(ARMSE, 97.5);
    S.MAAE_p50    = median(MAAE, 'omitnan');
    S.MAAE_p2_5   = prctile(MAAE, 2.5);
    S.MAAE_p97_5  = prctile(MAAE, 97.5);
end

```