

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



TESIS:

**MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO
HIERBA BUENA, CACHACHI, CAJABAMBA.**

**Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO GEÓLOGO**

Autor:
Bach. Zambrano Chilón Willan

Asesor:
M. Cs. Ing. Arapa Vilca Víctor Ausberto

Cajamarca – Perú

- 2026-

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

— FACULTAD DE INGENIERÍA —

1. Investigador : ZAMBRANO CHILÓN WILLAN
DNI : 47726414
Escuela Profesional : INGENIERÍA GEOLÓGICA
2. Asesor : M. CS. ING. ARAPA VILCA VICTOR AUSBERTO
Facultad : INGENIERÍA
3. Grado académico o título profesional
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
4. Tipo de Investigación:
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
5. Título de Trabajo de Investigación:
"MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO HIERBA BUENA,
DISTRITO DE CACHACHI, CAJABAMBA"
6. Fecha de evaluación: 20 DE ENERO DEL 2026
7. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 14%
9. Código Documento: trn:oid::: 3117:547850240
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 26/01/2026



FIRMA DEL ASESOR
M. CS. ING. ARAPA VILCA VICTOR AUSBERTO
DNI: 29552145



UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI

Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20140250801 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 26/01/2026 22:49:23-0500



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

ACTA N° 0054-2026

TITULO : *MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO HIERBA BUENA, DISTRITO DE CACHACHI, CAJABAMBA*

ASESOR : *M. Cs. Ing. Victor Ausberto Arapa Vilca*

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

Presidente : Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Vocal : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Secretario : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada *MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO HIERBA BUENA, DISTRITO DE CACHACHI, CAJABAMBA*, presentado por el Bachiller en Ingeniería Geológica *WILLAN ZAMBRANO CHILÓN* asesorada por M. Cs. Ing. Victor Ausberto Arapa Vilca, para la obtención del Título Profesional

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

EVALUACIÓN PRIVADA : *07.00* PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : *21.00* PTS.
EVALUACIÓN FINAL : *15.00* PTS. *Quince* (En letras)

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

[Firma]
Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

[Firma]
Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Vocal

[Firma]
M. Cs. Roberto Severino Gonzales Yana.
Secretario

[Firma]
M. Cs. Ing. Victor Ausberto Arapa Vilca.
Asesor

AGRADECIMIENTO

A mi alma Mater UNC y docentes de la EPIG por haberme compartido sus conocimientos a lo largo de la carrera profesional.

Agradecer a Dios por guiarme y darme fortaleza para seguir adelante.

A mis compañeros de aula por las risas, los consejos, la compañía y los momentos difíciles que hemos compartido.

WZCH

DEDICATORIA

A mi familia, en especial a mis padres y a mi novia que estuvieron ahí en cada paso que di para lograr este objetivo.

WZCH

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTO	xiii
DEDICATORIA	xiii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1.	ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
2.1.1.	Locales	3
2.1.2.	Nacionales	4
2.1.3.	Internacionales	5
2.2.	BASES TEÓRICAS	6
2.2.1.	Geomorfología	6
2.2.2.	Geoforma	7
2.2.3.	Procesos Geomorfológicos	9
2.2.4.	Sistemas Geomorfológicos	11
2.2.5.	Estructura de La Geomorfología	12
2.2.6.	Jerarquización Geomorfológica	15
2.2.7.	Ambientes Morfogenéticos	17
2.2.8.	SIG y Geomorfología	24
2.2.9.	Modelización Geológica	27
2.3.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	28

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	29
3.1.1.	Ubicación Geográfica	29

	Pág.
3.1.2. Ubicación Política	29
3.1.3. Accesibilidad.....	29
3.2. PROCEDIMIENTOS	30
3.2.1. Etapa Preliminar	30
3.2.2. Etapa de Campo	30
3.2.3. Etapa de Gabinete.....	30
3.2.4. Metodología	31
3.2.4.1. <i>Población de Estudio</i>	31
3.2.4.2. <i>Muestra</i>	31
3.2.4.3. <i>Unidad de Análisis</i>	32
3.2.5. Identificación de Variables.....	32
3.2.6. Técnicas.....	32
3.2.7. Instrumentos y Equipos	33
3.3. GEOLOGÍA LOCAL	34
3.3.1. Grupo Goyllarisquizga	34
3.3.1.1. <i>Formación Chimú (Ki - Chi)</i>	34
3.3.1.2. <i>Formación Santa (Ki - Sa)</i>	34
3.3.1.3. <i>Formación Carhuaz (Ki – Ca)</i>	35
3.3.1.4. <i>Formación Farrat (Ki- Fa)</i>	36
3.3.2. Depósitos Aluviales (Qh – Al).....	37
3.3.3. Depósitos Coluviales (Qh – Co).....	37
3.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	38
3.4.1. Estructuras Continuas.....	38
3.4.2. Estructuras Discontinuas.....	40
3.5. GEOMORFOLOGÍA	42
3.5.1. Componentes del Ambiente Estructural	42
3.5.2. Componentes del Ambiente Denudacional.....	44
3.5.2. Componentes de Ambiente Fluvial.....	48
3.6. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	52
3.6.1. Morfogénesis.....	52
3.6.2. Morfometría	54

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

	Pág.
4.1. MODELO DE EVOLUCIÓN	59
4.2. MODELAMIENTO GEOMORFOLÓGICO	62
4.2.1. Ambientes Morfogenéticos.....	62
4.2.2. Componentes Geomorfológicos.....	64
4.2.3. Morfometría	66
4.2. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	68

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES	69
5.2. RECOMENDACIONES	70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
ANEXOS.....	75

Anexo 01: Planos

- Plano N° P-01 Ubicación
- Plano N° P-02 Modelo Digital de Elevaciones
- Plano N° P-03 Pendientes
- Plano N° P-04 Geológico
- Plano N° P-05 Geomorfológico

Anexo 02: Perfiles

- Perfiles morfométricos

Anexo 03: Secciones

- Secciones geológicas

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Geoformas a diferentes escalas y sus interacciones con procesos exógenos y endógeno.	7
Figura 2. Interacciones proceso-forma: el núcleo de la geomorfología.	8
Figura 3. Estructura de la geomorfología.	13
Figura 4. Esquema de jerarquización geomorfológica.	15
Figura 5. Perfil esquemático de unidades morfoestructurales, en un ambiente estructural.	18
Figura 6. Geoformas asociadas a estratos inclinados y horizontales. Se muestran las principales corrientes que se encuentran en paisajes con estratos inclinados. La banda marrón representa una formación de roca dura que cubre a la meseta, mesa y otero:	19
Figura 7. Perfil esquemático con laderas estructurales y denudacionales con terrazas aluvial-torrenciales de edad relativa variable.	20
Figura 8. Perfil esquemático de los piedemontes aluvio-torrenciales compuestos por abanicos con grados de disección variables según su edad.	20
Figura 9. Secciones de llanuras aluviales. (a) Llanura fluvial convexa. Los depósitos de barras se producen en las curvas interiores de los meandros y raramente frente a los diques en desarrollo. (b) Llanuras de inundación planas.	22
Figura 10. Terrazas emparejadas y no emparejadas. (a) Terrazas policíclicas emparejadas. (b) Terrazas no emparejadas, no cíclicas. Las terrazas están numeradas 1,2,3,4 y 5.	23
Figura 11. Formación de terrazas en estratos (capa rocosa). (a) Valle original en forma de V excavado en la capa rocosa. (b) La erosión lateral corta una terraza de roca. (c) Una nueva incisión corta el suelo de la terraza.	23
Figura 12. Imagen satelital con trazo simbólico longitudinal de NW–SE de los plegamientos.	39
Figura 13. Imagen satelital con trazo simbólico de fallas con orientaciones de NW–SE y SW – NE.	41

	Pág.
Figura 14. Imagen satelital donde las líneas rojas representa a familias de fracturas. La cual por teoría de Anderson (195) la intersección en dirección al ángulo agudo es el sentido de orientación de los esfuerzos tectónicos, en este caso los esfuerzos son: σ_1 de NW a SE y σ_1' de SW a NE.....	53
Figura 15. Corte morfométrico A-A' al NW de la comunidad Hierba Buena.....	55
Figura 16. Corte morfométrico B-B' al oeste de la comunidad Hierba Buena.	57
Figura 17. Modelo 3D geológico.	60
Figura 18. Modelo 3D satelital.....	61
Figura 19. Gráfico de porcentajes de los ambientes.	62
Figura 20. Modelo 3D de ambientes morfogenéticos.....	63
Figura 21. Gráfico de porcentajes de componentes geomorfológicos.	64
Figura 22. Modelo 3D de los componentes geomorfológicos.	65
Figura 23. Gráfico de porcentajes de la pendiente.	66
Figura 24. Modelo 3D de pendientes.	67

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Foto 1. Estratos de rocas areniscas de la Formación Chimú, este afloramiento se encuentra en el flanco NE del anticlinal Laderon.	34
Foto 2. En la parte inferior izquierda de la foto se observa estratos de rocas lutitas bituminosas y calizas margosas de la Formación Santa, este afloramiento se encuentra en quebrada Calvario.	35
Foto 3. Estratos delgados de rocas areniscas intercaladas con limolitas de la Formación Farrat, este afloramiento se encuentra al noreste del área de investigación.	36
Foto 4. Vista de los estratos de rocas areniscas de la Formación Farrat, este afloramiento se ubica al norte del área de investigación en la quebrada Cauday.	37
Foto 5. Vista de los depósitos coluviales y aluviales, ubicadas en el flanco NE del anticlinal Laderón cubriendo a las Formaciones Santa y Carhuaz.	38
Foto 6. Vista del anticlinal Laderon, se puede apreciar su charnela, sus flancos SW y NE por la inclinación de sus estratos, longitudinalmente presenta una orientación NW – SE.	39
Foto 7. En las fotos se observa sistemas de diaclasas. (a) Color azul diaclasas con azimuts de $N\pm 223^\circ$ y buzamientos de $\pm 83^\circ NW$, color anaranjado con azimuts de $N\pm 150^\circ$ y buzamientos de $\pm 80^\circ SW$. (b) Color rojo diaclasas con azimuts de $N\pm 321^\circ$ y buzamientos de $\pm 29^\circ NE$, color celeste diaclasas con azimuts de $N\pm 38^\circ$ y buzamientos de $\pm 83^\circ SE$	40
Foto 8. (a) Trazo de falla de rumbo dextral con componente normal, que es perpendicular al eje del anticlinal Laderon, la cual dividió en dos bloques grandes a este plegamiento. (b) Se observa el plano de falla, la cual nos indica que el sentido de deslizamiento es dextral.	41
Foto 9. Vista de las laderas del cerro Laderón. (a) Flanco SW del anticlinal Laderón. (b) Flanco NE del anticlinal Laderón.	42

	Pág.
Foto 10. Vista de los componentes geomorfológicos de un ambiente estructural en el área de investigación.	43
Foto 11. Vista del escaparte estructural definida por una falla inversa de orientación N-S, este escarpe tiene una longitud de afloramiento de 0.5km.	43
Foto 12. Lomadas ubicadas al SW del área de investigación. (a) Vista lomada sobre rocas areniscas, al mismo tiempo se aprecia un deslizamiento rotacional que tiene un eje de orientación hacia NE. (b) Vista de lomada Con superficie suave ondulada cubierta por sembríos agrícolas.....	44
Foto 13. Vista de colinas. (a) Colina ubicada al NE del área de estudio sobre rocas de la formación Carhuaz. (b) Colina ubicada al SW del área de investigación, se observa en ella afloramientos de rocas areniscas, y de otras geoformas como cárcava y piedemonte.	45
Foto 14. Vista de deslizamientos rotacional ubicadas al SW del área de estudio, estos deslizamientos se encuentran en laderas que poseen inclinaciones mayores a los 25°.	45
Foto 15. Vista de geoformas perteneciente al ambiente denudacional, ladera, altiplanicie, piedemonte, ubicadas al NE del área de investigación.	46
Foto 16. Vista de la geoforma altiplanicie y del cambio de pendiente de su superficie hacia su NW, donde se encuentra una ladera denudacional con un ángulo de inclinación mayor a 35°.	46
Foto 17. Vista tomada en el NE del área de investigación, donde se puede observar una planicie, que posee pendientes con ángulos menores a 5°, esta geoforma se encuentra sobre la Formación Farrat.	47
Foto 18. Geoformas ubicadas sobre la Formación Carhuaz hacia el NE del área de estudio, en estas geoformas se aprecia el cambio gradual de la pendiente y distinguir un piedemonte de una planicie.	47
Foto 19. Vista panorámica ubicada hacia el NE del área y paralela al eje del anticlinal Laderón, en esta foto se puede apreciar distintas geoformas del ambiente dunudacional.	48

	Pág.
Foto 20. (a) vista de valle en V, la erosión significativa ha sido sobre la Formación Santa. (b) Vista de valle en U, la erosión significativa ha sido sobre las Formaciones Santa y Carhuaz.	49
Foto 21. Vista de terrazas aluviales no apareadas, ubicadas al NE del área de estudio y sobre la Formación Carhuaz.....	50
Foto 22. Vista de abanicos aluviales antiguos ubicados al NNW, donde se observa una forma que se aproxima a un cono que se extiende radialmente hacia abajo.	50
Foto 23. Vista ubicada al SW del área de estudio, en la cual se aprecia un abanico aluvial antiguo de superficie lisa y a la parte inferior en su zona distal se ha formado pequeños deslizamientos.....	51
Foto 24. Vista de tres conos de deyección jóvenes, donde se aprecia depósitos recientes y activas.....	51
Foto 25. Cauce activo perteneciente a la quebrada Quinual.	51

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Procesos geomorfológicos.....	10
Tabla 2. Vértices del área de investigación.....	29
Tabla 3. Accesibilidad al caserío de Hierba Buena.....	30
Tabla 4. Clasificación y Tipo de investigación.....	31
Tabla 5. Descripción de Instrumentos y equipos.....	33
Tabla 6. Agentes y procesos geomorfológicos exógenos del área de investigación.....	53
Tabla 7. Rango de pendientes asociadas a las unidades morfogenéticas.....	54
Tabla 8. Áreas de los ambientes morfogenéticos.....	62
Tabla 9. Áreas de los componentes geomorfológicos en el área de estudio.	64
Tabla 10. Área de las pendientes.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS

Ha	:	Hectáreas
Ki-ca	:	Formación Carhuaz
Ki-chi	:	Formación Chimú
Ki-sa	:	Formación Santa
Qh- co	:	Cuaternario coluvial
Qh-al	:	Cuaternario aluvial
UTM	:	Universal transversal de Mercator
WGS-84	:	Sistema Geodésico Mundial de 1984
WNW	:	Oeste noroeste
σ_1	:	Primer evento de esfuerzo tectónico principal
σ_1'	:	Segundo evento de esfuerzo tectónico principal

RESUMEN

La investigación se sitúa en el distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba y región de Cajamarca. Litológicamente presenta rocas del cretácico inferior de las Formaciones Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat. A lo largo de la historia geológica, se ha ido formando geoformas en los ambientes morfogenéticos estructural, denudacional y fluvial; producto de los procesos endógenos y exógenos. Para determinar la geomorfología y su modelamiento 3D del área, se llevó a cabo un cartografiado geológico y geomorfológico en una escala 1:15000, donde se identificaron y se describieron 17 componentes geomorfológicos en los 3 ambientes morfogenéticos. Así mismo se desarrolló 2 perfiles morfométricos teniendo como unidad de análisis a la pendiente. El modelamiento geomorfológico en 3D se llevó a cabo el software Leapfrog Geo realizando una previa interpretación geológica y geomorfológica, en este modelo se puede observar tridimensionalmente las formaciones geológicas, los ambientes morfogenéticos, los componentes geomorfológicos y la pendiente del relieve terrestre actual del área de investigación. Finalmente se concluyó que el ambiente predominante en el área de investigación es la denudacional con un área de 571ha. Por otro lado, los componentes geomorfológicos que predominan son los cerros con un área de 462.71ha, lomadas con un área de 204.06ha, ladera con un área de 157.74ha, piedemonte con un área de 99.23ha y flancos con un área de 92.83ha. Y respecto a la morfometría la pendiente que más predomina tiene un ángulo de inclinación de 20° a 50°.

Palabras claves: Componentes geomorfológicos, denudacional, estructural, fluvial, modelamiento geomorfológico, morfogenético y morfometría.

ABSTRACT

The research is located in the Cachachi district, Cajabamba province, and Cajamarca region. Lithologically, it presents rocks from the Lower Cretaceous of the Chimú, Santa, Carhuaz, and Farrat Formations. Throughout geological history, geoforms have been formed in structural, denudational and fluvial morphogenetic environments; product of endogenous and exogenous processes. To determine the geomorphology and its 3D modeling of the area, geological and geomorphological mapping was carried out on a scale of 1:15,000, where 17 geomorphological components were identified and described in the three morphogenetic environments. Two morphometric profiles were also developed, using slope as the unit of analysis. The 3D geomorphological modeling was carried out using Leapfrog Geo software, following a prior geological and geomorphological interpretation. This model allows three-dimensional observation of the geological formations, morphogenetic environments, geomorphological components, and the slope of the current landforms in the research area. Finally, it was concluded that the predominant environment in the research area is denudational with an area of 571 ha. On the other hand, the predominant geomorphological components are hills with an area of 462.71 ha, hillocks with an area of 204.06 ha, slopes with an area of 157.74 ha, foothills with an area of 99.23 ha and flanks with an area of 92.83 ha. And regarding morphometry, the slope that predominates the most has an inclination angle of 20° to 50°.

Keywords: Geomorphological, denudational, structural, fluvial, geomorphological modelling, morphogenetic and morphometric components.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La geomorfología investiga las formas del relieve y los procesos que las configuran para comprender el origen y el desarrollo de las geoformas (Huggett, 2011). Las estructuras geológicas definen geoformas de todos los tamaños, es por ello la importancia de la interacción entre los factores endógenos y los procesos exógenos para explicar las principales características de la topografía terrestre.

En el caserío Hierba Buena del distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba, conformada geológicamente por rocas del cretácico inferior, han actuado factores endógenos y procesos exógenos para su actual relieve terrestre, dando una configuración de distintas geoformas.

Por lo cual, en la investigación se desarrollará trabajos de cartografiado litológico, estructural y geomorfológico. En la cual a través del procesamiento de la toma de datos realizados en campo se desarrollará la interpretación de secciones para la elaboración del modelo 3D del área de investigación en el software LeapFrog Geo.

Según lo planteado nos preguntamos ¿Cuál es el modelamiento 3D de la geomorfología del caserío Hierba Buena?

La hipótesis considera es que el caserío Hierba Buena presenta un ambiente morfoestructural generado por una macro estructura geológica del tipo plegamiento anticlinal, la cual es el resultado del proceso endógeno principal. Y los procesos exógenos define geoformas de ambientes denudativos y agradacional a lo largo del tiempo geológico.

Este estudio dará a conocer el modelo en 3D de las geoformas del área de investigación, dado que no se han desarrollado estudios de geomorfología en el caserío de Hierba Buena del distrito de Cachachi y así poder contribuir con un conocimiento base de la geomorfología local para posteriores trabajos de gestión de riesgos u ordenamiento territorial. Además, da un aporte informativo a los

profesionales interesados en realizar estudios del modelamiento en 3D de geoformas en otras zonas de estudio.

Este estudio tiene un alcance descriptivo, analítico y explicativo, de carácter transversal, en el cual se pretende dar a conocer el modelamiento en 3D de la geomorfología del caserío Hierba Buena.

Las limitaciones del presente estudio es que el área no cuenta con investigaciones geológicas anteriores que nos puedan ayudar en el tema de tesis. También un sector del área de investigación es de propiedad privada, lo que dificultará el ingreso para hacer el cartografiado geomorfológico.

El objetivo general de la tesis es realizar el modelamiento 3D de la geomorfología del caserío Hierba Buena; y como objetivos específicos del área de investigación son: Identificar las estructuras geológicas, Identificar y describir las características de las geoformas, identificar y describir los ambientes morfogenéticos, y elaborar el modelo 3D de los componentes geomorfológicos en el software LeapFrog.

Los contenidos de los capítulos se describen a continuación:

Capítulo II. Marco teórico, la cual abarca los antecedentes internacionales, nacionales y locales, bases teorías y definición de términos referentes al tema de investigación. Capítulo III. Materiales y Métodos, se presenta la ubicación, accesibilidad, clima y vegetación y los procedimientos, tratamiento, y específicamente el contexto geomorfológico. Capítulo IV. Análisis y Discusión de Resultados; se describe, explica y se discuten los resultados en función a la geomorfología y su modelamiento 3D del área estudiada. Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones, de acuerdo a los resultados obtenidos y considerando los objetivos propuestos, se determina las conclusiones, y además se plantean recomendaciones.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Locales

Calderón (2022), Caracterización geológica y geomorfológica en la microcuenca de la laguna Yahuarcocha, distrito de Cajabamba. Determino la litología y las unidades geomorfológicas de microcuenca Yahuarcocha, donde concluyo que el área de investigación predomina rocas carbonatadas del Grupo Pulluicana y la identificación de 20 unidades geomorfológicas perteneciente principalmente al ambiente Morfoestructural.

García (2022), Caracterización geomorfológica del centro Poblado de Tinyayoc - San Marcos. Determinó la geomorfología del área con el contexto morfogenético, donde explica los procesos endógenos y exógenos que actuaron para la formación de los ambientes estructural, Denudacional, Volcánico, Fluvial, Kárstico y Antrópico. También hizo el análisis de la superficie mediante la elaboración de perfiles morfométricos determinado principalmente por cerros, colinas pertenecientes a los flancos, lomas y laderas; y elaboro el plano geomorfológico resultado del cartografiado de las unidades geomorfológicas según su ambiente de formación.

Terrones (2023), Caracterización geomorfológica del distrito de Magdalena, caserío La Viña y Huaquillas. Concluyo que la caracterización de las unidades geomorfológicas presente en el distrito de Magdalena caseríos la Viña y Huaquillas manifiesta seis ambientes morfogenéticos los cuales son: Kárstico, Denudacional, Fluvial, Volcánico, Estructural y Antrópico. Además, se identificaron veinticuatro componentes o subunidades geomorfológicas; y los ambientes morfogenéticos de la zona, están referidos a procesos endógenos y exógenos que dieron origen al

relieve del área de investigación.

2.1.2. Nacionales

Álvarez et al (2018), Estudio Temático Geomorfología Las Piedras - Madre de Dios. Determinaron que el territorio del distrito Las Piedras es parte de la megaestructura de la depresión Amazónica, la cual funciona desde el inicio del Paleozoico como una cuenca de relleno sedimentario. Y que la morfología del área presenta dos grandes conjuntos morfológicos: el de planicies, ligadas a la acumulación de materiales aluviales; y el de colinas y lomadas, que son pequeñas elevaciones de pendientes pronunciadas, que se han formado por procesos denudativos.

Chiroque (2016), Caracterización geodinámica y modelamiento del deslizamiento - Flujo Yanacolpa en el distrito de Parobamba, provincia de Pomabamba, región Ancash. Establecieron que las geoformas presentes han sido fácilmente modeladas debido a la poca resistencia que ofrecen las rocas y sedimentos, es por ello que presenta formas suaves onduladas, pero con cambios de pendientes bruscas, lo que se observa en la zona de transición entre el deslizamiento y el flujo; y que la actividad geodinámica de la zona es intensa, esto propicia la ocurrencia de movimientos en masa frecuentemente, como ocurrió en la última reactivación que se dio en el mes de Julio del año 2013, que afectó la seguridad física del poblado Yanacolpa Nuevo conformado por 20 viviendas.

Gómez (2017), Evaluación geodinámica y modelamiento geotécnico del deslizamiento de madrigal – Arequipa. Concluyeron que la geodinámica en la localidad de Madrigal tiene como antecedente la ocurrencia de una avalancha de escombros por el colapso de la ladera Norte del volcán Hualca Hualca, donde quedaron como evidencia depósitos lacustres, la cual en estos suelos se han originado deslizamientos recurrentes, de tipo rotacional; y que la geomorfología en las inmediaciones de Madrigal la conforma un sistema de terrazas, la zona próxima al cañón (laderas empinadas) y la zona de montañas y la zona de valle represado.

2.1.3. Internacionales

Espinoza (2017), Caracterización Geomorfológica para la Estimación General de Riesgo de Inundación en el Municipio de Tlacotalpan Veracruz. Determino una caracterización geomorfológica del Municipio de Tlacotalpan Veracruz; donde a partir de la morfometría y morfografía del municipio concluyo que la condición plana del terreno relacionado con la nula pendiente, aunado a la gran cantidad de ríos y lagunas existentes dentro del municipio permite que las zonas sean inundadas con facilidad, e incluso permanentes como son los pantanos.

Noriega (2016), Geomorfología tectónica del noroccidente de la cordillera central, Andes del norte – Colombia. Estableció la historia termotectónica de la corteza superior y la respuesta morfotectónica, en la zona de influencia de la Falla Espíritu Santo y en los bloques litotectónicos asociados. La cual se evidencia interacción de procesos tectónicos y geomorfológicos relacionados con las fases de levantamiento/exhumación/enfriamiento Paleoceno/Eoceno y la formación de superficies de erosión como una aproximación al estado de equilibrio termal y topográfico; el levantamiento diferencial de bloques litotectónicos post-Oligocenos, los posteriores flujos de materia y la evolución del paisaje en cada dominio geomorfológico; y la captura fluvial, la reorganización de la red de drenaje y el rejuvenecimiento del paisaje como efecto de las fases orogénicas finales y las fluctuaciones climáticas del cuaternario.

Ramonell (2021), Geomorfología y morfodinámica de la planicie aluvial del río Paraná en su tramo medio. Caracterizo variables regionales que inciden en aspectos morfodinámicos y rasgos geomorfológicos mayores de la planicie aluvial. Donde identifiqué nueve unidades geomorfológicas generadas por el río Paraná en lo que es su planicie aluvial (Islas del Cauce Principal, Albardones y Derrames; Espiras de Meandro, Espiras de Meandro con Drenaje Anastomosado, Planicie Multilagunar, Planicie Multilagunar con Drenaje Anastomosado, Planicie Multilagunar con Drenaje Distributivo, Grandes Lagunas, Islas y Espiras de Meandro Disipadas).

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Geomorfología

La geomorfología es el área de estudio que permite comprender y apreciar las geoformas y los paisajes, incluidas las de continentes y las islas, los que se encuentran bajo los océanos, lagos, ríos, glaciares y otras masas de agua, así como los de los planetas terrestres y las lunas de nuestro Sistema Solar. (Goudie, 2004)

Las preocupaciones pasadas y presentes se han centrado en la descripción y clasificación de las geoformas, en los procesos dinámicos que caracterizan su evolución y existencia, así como su relación y asociación con otras formas y procesos. La Geomorfología es una ciencia empírica que intenta formular respuestas a las siguientes preguntas fundamentales. ¿Qué diferencia a una geoforma de otra? ¿Cómo se asocian las diferentes geoformas? ¿Cómo ha evolucionado una determinada geoforma o paisaje complejo? ¿Cómo podría evolucionar en el futuro? ¿Cuáles son las ramificaciones para los seres humanos y la sociedad humana?

En la actualidad, la geomorfología moderna se subdivide y practica en función de ámbitos especializados:

- La geomorfología fluvial, se ocupa del agua que fluye (principalmente en forma de ríos, arroyos y canales) y del trabajo que realiza durante su viaje a través de la fase terrestre del ciclo hidrológico.
- Geomorfología de laderas, estudia las propiedades geotécnicas de suelo y roca, la mecánica de los deslizamientos y el movimiento del agua en el subsuelo
- Geomorfología tectónica, estudian los campos de esfuerzos neotectónicos, las cuencas sedimentarias a escala continental y los paisajes de márgenes activos/pasivos.
- Geomorfología glacial y periglacial, estudian los glaciares alpinos y continentales, permafrost y otras formas o procesos de clima frío que implican hielo y nieve.
- Geomorfología kárstica, se ocupan de las rocas solubles y de los procesos químicos de disolución que dan lugar a geoformas como gargantas, cavernas y

arroyos subterráneos.

- Geomorfología costera, estudian los sistemas costeros, lacustres y marinos en los que predominan los procesos de flujo oscilatorio en lugar de unidireccional.
- Geomorfología eólica, estudian el transporte de arena y polvo por el viento, principalmente en entornos desérticos o semiáridos, pero también a lo largo de playas, sobre campos agrícolas y en la Luna y Marte.
- Otras subespecialidades son: geomorfología de suelos, biogeomorfología (zoogeomorfología), geomorfología climática, geomorfología tropical, geomorfología desértica, geomorfología de montaña, geomorfología extraterrestre (planetaria), geomorfología por teledetección, geomorfología experimental, geomorfología medioambiental, geomorfología forestal, geomorfología aplicada, geomorfología de la ingeniería y antropogeomorfología.

2.2.2. Geoforma

Huggett (2017), manifiesta que las geoformas son rasgos característicos de la Tierra y están presentes en todas partes. Su tamaño varía desde un pequeño montículo de tierra a montañas, pasando por grandes placas tectónicas, y su "vida útil" oscila entre días, milenios y eones (Figura 1).

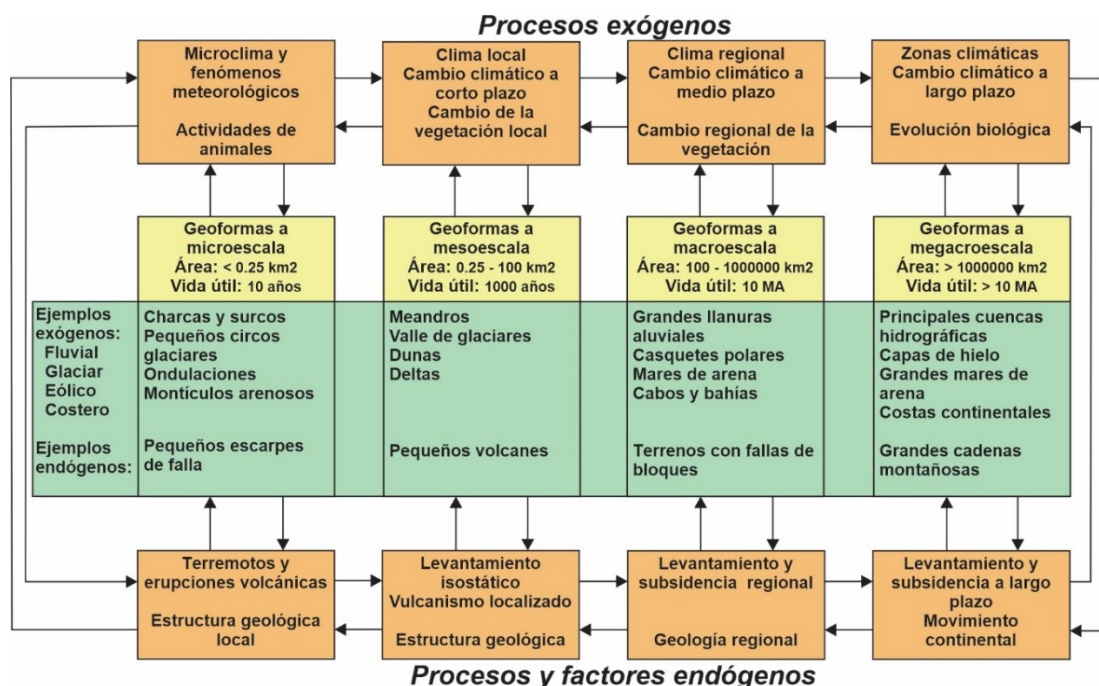


Figura 1. Geoformas a diferentes escalas y sus interacciones con procesos exógenos y endógeno (Huggett, 2017).

Mark & Smith (2004), enumeraron veintiséis tipos generales de relieve, muchos de los cuales incluyen subtipos: cuenca, cuenca de captación, caverna, circo glaciar, farallón, continente, cráter, desmonte, superficie terrestre, llanura aluvial, brecha, suelo, superficie terrestre, llanura de inundación, barranco, tierra a nivel del suelo, superficie del suelo, morrena, montaña, cordillera, cima, pilar rocoso, llanura, meseta, colina, divisoria, terraza, valle glaciar y valle. La geomorfología investiga formas del relieve como éstas y los procesos que las configuran.

La forma, el proceso y las interrelaciones entre ellos son fundamentales para comprender el origen y el desarrollo de las geoformas. En geomorfología, la morfología tiene tres facetas: constitución (propiedades químicas y físicas descritas por variables de las propiedades de los materiales), configuración (tamaño y forma descritos por variables de geometría) y flujo de masa (índices de flujo descritos por variables de flujo de masa como descarga, índice de precipitación e índice de evaporación) (Figura 2). Estas variables de forma contrastan con las variables dinámicas asociadas a los procesos geomórficos.

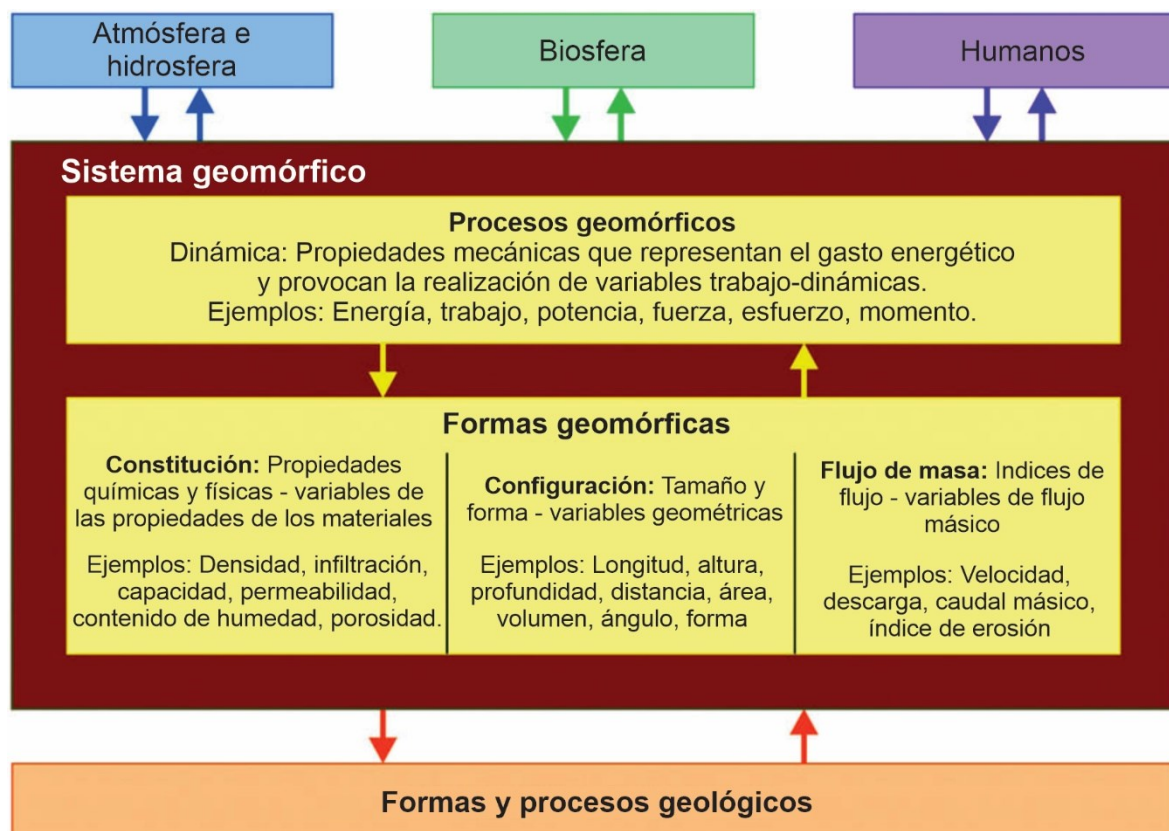


Figura 2. Interacciones proceso-forma: el núcleo de la geomorfología (Strahler, 1980).

Según Slaymaker (2009), en la actualidad, los geomorfólogos utilizan al menos cuatro enfoques para estudiar las geoformas:

1. Un enfoque de proceso-respuesta (proceso-forma) o funcional que se basa en la química y la física, y utiliza una metodología sistémica.
2. Un enfoque de la evolución de las geoformas que tiene sus raíces en la ciencia de la geología histórica (geohistoria), y que explora la importante dimensión histórica de muchas geoformas.
3. Un enfoque que se centra en la caracterización de las geoformas.
4. Un enfoque sensible al medio ambiente de las geoformas, los sistemas las geoformas y los paisajes a escala regional y mundial. Este enfoque incluye temas como la geoconservación y el geopatrimonio.

2.2.3. Procesos Geomorfológicos

La expresión "Procesos geomorfológicos" está ya bien establecida y muchos la han caracterizado como el enfoque predominante de la investigación en esta disciplina. Una tendencia emergente en la última década es abandonar o minimizar la referencia a la geomorfología como campo científico distinto, sustituyéndola por términos como procesos de la superficie terrestre y planetaria, o simplemente procesos de la superficie terrestre. (National Research Council, 2010)

Los procesos geomórficos son los múltiples medios químicos y físicos por los que se modifica la superficie terrestre. Son impulsados por fuerzas geológicas que emanan del interior de la Tierra (procesos endógenos), por fuerzas originadas en la superficie terrestre o cerca de ella y en la atmósfera (procesos exógenos) y por fuerzas procedentes del exterior de la Tierra (procesos extraterrestres). Incluyen procesos de transformación y transferencia asociados a la meteorización, la gravedad, el agua, el viento y el hielo. Las interacciones mutuas entre forma y proceso son el núcleo de la investigación geomórfica: la forma afecta al proceso y el proceso afecta a la forma. (Huggett, 2017)

A principios de la década de 1950 apareció el libro clásico de Thornbury (1954), en el que los procesos geomórficos tienen su propio capítulo y se detallan descriptivamente los distintos tipos de agentes que modelan el paisaje (Tabla 1).

Tabla 1. Procesos geomorfológicos.

Procesos exógenos Todos los procesos que se originan fuera de la corteza terrestre y tienden a llevar la superficie de la litosfera a un nivel común	Degradación Erosión descendente de superficie	Meteorización Desintegración o descomposición de la roca en el lugar	Física	▪ Expansión por descarga (exfoliación en masa y granular) ▪ Crecimiento de los cristales ▪ Dilatación térmica ▪ Actividad orgánica ▪ Meteorización mecánica por coloides del suelo en contacto con roca
			Química	▪ Hidratación ▪ Hidrólisis ▪ Oxidación ▪ Carbonatación ▪ Disolución
		Transporte en masa Transferencia gravitacional de material	Flujo lento	▪ Reptación (suelo, derrubios de ladera, roca, roca-glaciár) ▪ Solifluxión
			Flujo rápido	▪ Flujo de tierra ▪ Flujo de lodo ▪ Avalancha de detritos
			Deslizamiento de tierras	▪ Deslizamiento rotacional ▪ Deslizamiento de detritos ▪ Caída de detritos ▪ Deslizamiento de roca ▪ Desprendimiento de roca
			Subsidencia	
	Erosión Arrastre y transporte de material por agentes móviles		Agua superficial	Acción hidráulica, abrasión, corrosión, desgaste, tracción, saltación, suspensión, disolución, flotación
			Agua subterránea	Corrosión, disolución
			Olas y corrientes	Acción hidráulica, abrasión, corrosión, desgaste, tracción, saltación, suspensión, disolución, flotación
			Viento	Deflación, abrasión, desgaste, tracción, saltación, suspensión

...pase

Procesos exógenos Todos los procesos que se originan fuera de la corteza terrestre y tienden a llevar la superficie de la litosfera a un nivel común	Degradación Erosión descendente de superficie	Erosión Arrastre y transporte de material por agentes móviles	Glaciares	Burilado glaciático, arranque y transporte por los glaciares de bloques entre diaclasas/socavamiento, abrasión, surcos, desgaste, tracción, suspensión
	Agradación Acumulación de superficies	Sedimentación Acumulación de material debido a la pérdida de potencia de transporte	Agua superficial Agua subterránea Olas y corrientes Viento Glaciares	
Procesos endógenos Procesos que originan a profundidad de la tierra y cambian la elevación de la superficie terrestre	Diastrofismo Procesos de cambio de la corteza terrestre con y sin deformación de los estratos rocosos	Orogénico Construcción de montañas con deformación sustancia	Compresión y tensión de los estratos rocosos	
	Vulcanismo Movimiento de roca fundida hacia o sobre la superficie terrestre	Epirogénico Elevación regional sin deformación importante		

Fuente: Tomado de Rhoads (2013).

2.2.4. Sistemas Geomorfológicos

Strahler (1980), indica que el desarrollo de la geomorfología es completo cuando las formas y procesos están relacionados como sistemas dinámicos y la transformación de las masas y la energía es función del tiempo. Muchos de los procesos geomorfológicos operan en sistemas definidos, que pueden aislarse para su análisis.

Los sistemas geomórficos, al menos en ausencia de intervención humana, pueden considerarse sistemas de proceso - respuesta o de proceso - forma, es decir,

sistemas que implican la interacción entre variables que representan aspectos de flujo de masa, geométricos o de propiedades materiales de las formas del relieve y variables que representan mecanismos de proceso asociados con el gasto o las aplicaciones de energía, fuerza, esfuerzo e impulso. Los sistemas pueden considerarse abiertos, cerrados y aislados. (Chorley & Kennedy, 1971)

En un sistema aislado no se importa o exporta materia o energía. En el sistema cerrado se puede transferir energía, pero no materia. Finalmente, en un sistema abierto se puede intercambiar energía y la materia puede movilizarse. (Hugget, 2003)

En cualquier sistema geomórfico se manifiestan procesos endógenos y procesos exógenos, que derivan en gran parte de las fuerzas climáticas. (Scheidegger, 1961)

En pocas palabras, los procesos endógenos crean el relieve y los exógenos lo destruyen. La cadena resultante entre ambos constituye una gran parte del desarrollo de la Geomorfología. El ciclo de erosión de Davis forma parte de lo que se conoce como sistema cerrado, mientras que el sistema abierto deriva de la teoría general de sistemas en la que se enmarca el estudio de los procesos. (Kennedy, 2004)

2.2.5. Estructura de la Geomorfología

Jennings (1973), propone una estructura de esta disciplina (Fig. 3), en su esquema, indica que las técnicas empleadas y los estudios relacionados pueden aplicarse a diferentes regiones o dominios de la geomorfología, tales como fluvial, costero, glaciar, karst, etc. También en la figura enmarca las materias que están afectadas por la revolución matemática y en parte por la nueva geomorfología.

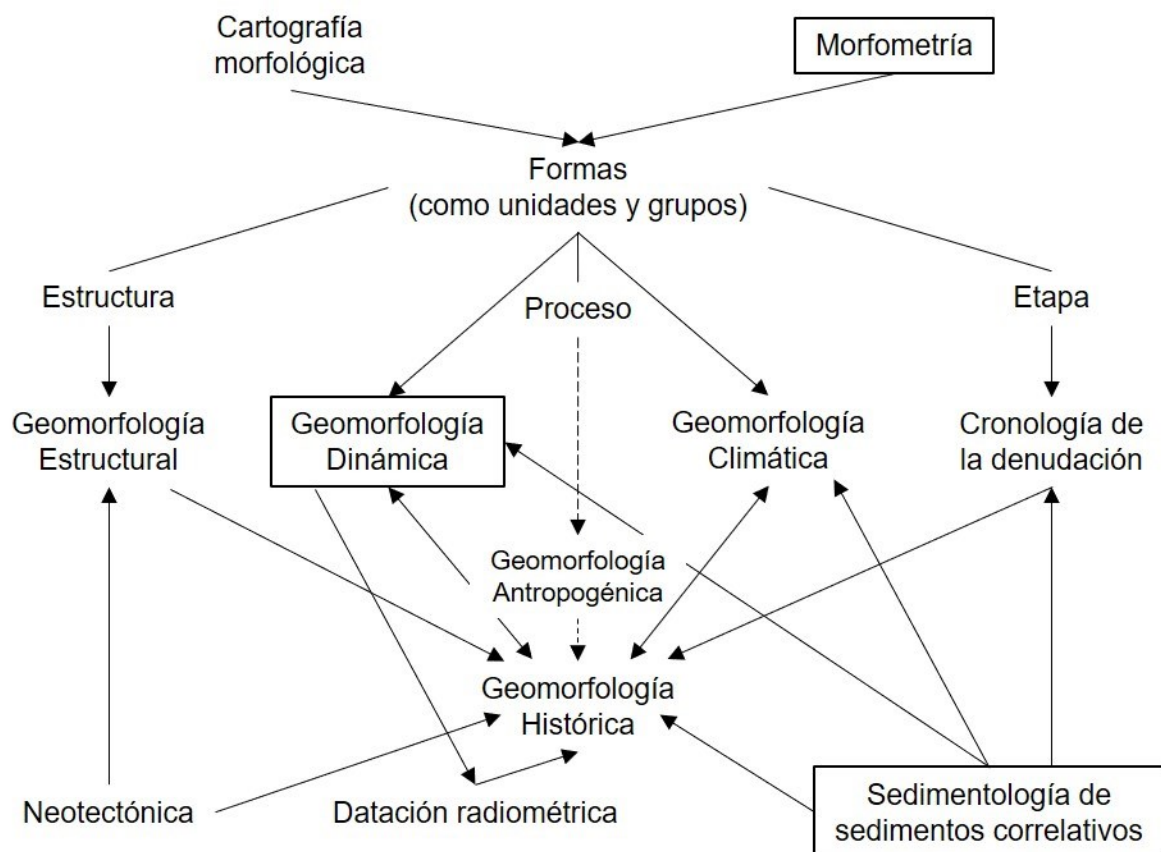


Figura 3. Estructura de la geomorfología (Gutiérrez, 2008).

El armazón de la geomorfología comprende: geomorfología estructural, dinámica, climática y la cronología de la denudación. Todas ellas alimentan a la geomorfología histórica. Las formas pueden cartografiarse y analizarse por morfometría, teniendo en cuenta sus influjos estructurales estáticos y dinámicos. El estudio de los procesos, la sedimentología de los sedimentos correlativos y las dataciones radiométricas, también convergen en la geomorfología histórica. Finalmente, el cambio climático y antrópico terminan por configurar la estructura de la geomorfología.

Carvajal (2012), manifiesta el marcado desarrollo evolutivo de algunas temáticas de la geomorfología con respecto a otras a lo largo de la historia y su aplicación a diferentes escalas, y que la geomorfología involucra conceptos como:

- Morfología. Trata de la apariencia y forma del relieve en general.
- Morfografía. Descripción cualitativa de las geoformas.

- **Morfometría.** Trata de los aspectos cuantitativos de las geoformas. Medidas, dimensiones y valores.

La morfometría tiene dos componentes: la morfometría general y la morfometría específica. La morfometría general estudia la forma de la superficie terrestre, que es continua y abarca todo el globo (tanto subaéreo como subacuático y la morfometría específica estudia las características geométricas y topológicas de las geoformas, que son segmentos delimitados y a veces discontinuos de una superficie terrestre. (Evans 2012)

- **Morfogénesis.** Estudia el origen y la evolución de las formas del terreno.
- **Morfoestructura.** Relacionado con la disposición, composición y dinámica interna de la tierra. Es pasiva cuando trata de las características de los materiales involucrados y su disposición estructural; y activa cuando está relacionado con el volcanismo y tectonismo.
- **Morfodinámica.** Estudia los procesos activos en el presente o aquellos que se pueden activar en el futuro. Se refiere a la dinámica exógena relacionada con la actividad de agentes como el viento, agua, hielo y la acción de la gravedad terrestre, que modifica las geoformas preexistentes. Los procesos se refieren a la meteorización, erosión y deposición que generan la modificación de los materiales y las formas superficiales de la tierra, definiendo un equilibrio dinámico de las geoformas a través de la gradación y degradación de los materiales.
- **Morfocronología.** Se refiere a la edad relativa y/o absoluta de cada geoforma del terreno, como el tiempo de su formación o de procesos que definieron su desarrollo posterior. Hacer una distinción entre las edades diferentes de las formas del terreno es de suma importancia, en particular de las formas recientes y de periodos anteriores que tenían condiciones geológicas diferentes.
- **Morfoclimatología.** Las geoformas en si reflejan en gran medida las condiciones climáticas en las que se formaron en el pasado, o a las que se encuentran sometidas en la actualidad. El clima influye sobre la meteorización y erosión,

que se acentúan directamente o no, dependiendo de las características estructurales del terreno e indirectamente de las características topográficas y de la cobertura vegetal.

2.2.6. Jerarquización Geomorfológica

Una jerarquía de unidades o categorías geomorfológicas se pueden definir en una región dada, dependiendo de la escala de trabajo, y sistemáticamente deben permitir el análisis de la evolución geomorfológica y geológica de la región, con el fin de enfocar el análisis de las geoformas de manera sistemática y coherente. (Carvajal, 2012)

Carvajal (2012), propone retomar la jerarquización propuesta por Ingeominas de 1999, modificando los nombres para darle un sentido estrictamente geomorfo-genético y unificar criterios de estandarización. Por la cual se adopta los siguientes rasgos de clasificación de mayor a menor como se ve en la Figura 4.

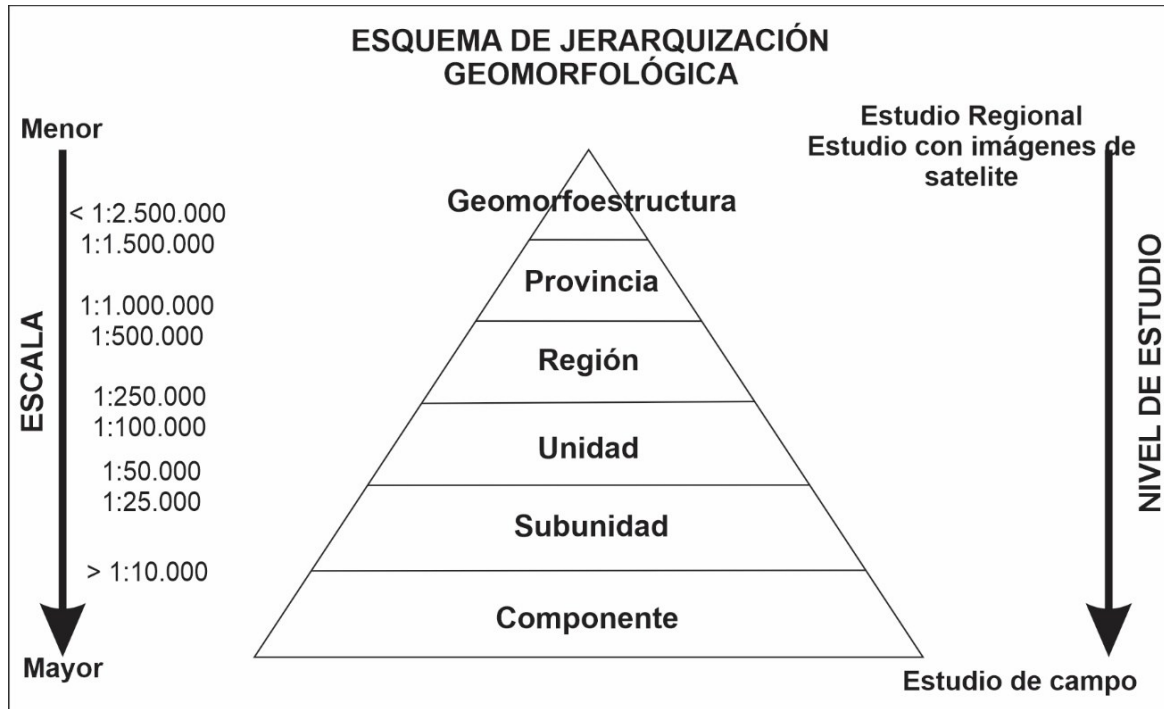


Figura 4. Esquema de jerarquización geomorfológica (Carvajal, 2012).

2.2.6.1. Geomorfoestructura

Son grandes áreas geográficas o amplios espacios continentales o intracontinentales, caracterizados y definidos por estructuras geológicas y topográficas regionales que han tenido deformación o basculamiento, y posiblemente metamorfismo o intrusión ígnea. Se considera geomorfoestructuras los escudos, los bloques de origen continental, grandes cuencas sedimentación, cuencas intracratónicas y rift valleys, plataformas y cinturones orogénicos. (Carvajal, 2012)

2.2.6.2. Provincia Geomorfológica

Conjunto de regiones con geoformas parecidas y definidas por macrorelieve y una parecida génesis geológica (Carvajal, 2012).

Se diferencian y delimitan las formas del relieve tomando como base sus características geológicas, morfológicas y geográficas. Son cinturones montañosos, llanuras, peneplanicies, cordilleras y serranías. El nombre de provincia geomorfológica es compuesto y consta de un término morfológico de macrorelieve, combinado con un nombre geográfico definido por el nombre terrestre geológico o región natural respectiva.

2.2.6.3. Región Geomorfológica

Agrupación de geoformas relacionadas genéticamente y geográficamente, las cuales estas definidas por los ambientes morfogenéticos y geológicos que fueron afectados por procesos geomórficos parecidos (Carvajal, 1999).

El ambiente morfogenético se refiere a las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas en las que se originaron las geoformas. Se determina con base en la interpretación de los procesos endógeno y exógenos registrados, que dieron lugar a la formación, evolución y modificación de las geoformas.

2.2.6.4. Unidad Geomorfológica

Es la unidad básica de la cartografía geomorfológica. También se define como una geoforma individual genéticamente homogénea, generada por un proceso

geomorfológico de agradación o degradación, típico de un ambiente morfogenético dado. Esta determinado con criterios genéticos, morfológicos y geométricos (Carvajal, 2012).

2.2.6.5. Subunidad Geomorfológica

Compuesta fundamentalmente por los contrastes morfológicos y morfométricos, que relacionan el tipo de material o la disposición estructural de estos con correspondiente topografía del terreno. Definida por el contraste de las formaciones superficiales asociadas a procesos morfodinámicos actuales de meteorización, erosión, transporte y acumulación bien determinados. (Carvajal, 2012)

2.2.6.6. Componente Geomorfológico

Es el máximo nivel de detalle de jerarquía, está establecida por los rasgos del relieve como: escarpes naturales o antrópicos, relieves internos de laderas o flancos, crestas, formas de valle, etc.; que están definidos en lugares puntuales y determinados por la morfometría detallada del terreno en una subunidad geomorfológica. También está definida por microrelieves asociados con una característica litológica o sedimentaria establecida con un análisis detallado. (Velásquez, 1999)

2.2.7. Ambientes Morfogenéticos

Según Zinck (2012), el ambiente morfogenético se refiere a un tipo general de medio biofísico, originado y controlado por un estilo de geodinámica interna y/o externa.

2.2.7.1. Ambiente Estructural

El ambiente estructural está dominado por zonas de bloques tectónicos de rocas sedimentarias plegadas y de macizos ígneos - metamórficos sin geoformas marcadas de otros ambientes. Tanto la litología como la estructura de las rocas inciden para favorecer una disección distintiva de los bloques levantados y plegados. Mientras la intensidad del plegamiento de las rocas sedimentarias

favorece a geoformas como mesetas y crestas estructurales, el lineamiento predominante de las rocas ígneo - metamórficas forman colinas onduladas con pendientes similares y patrones de drenaje en relación a sistemas de diaclasas y fallas geológicas. (Robertson & Jaramillo, 2013)

Por ello, los criterios de clasificación se agrupan principalmente en las diferencias litológicas y controles estructurales de plegamiento y fallamiento que presentan las zonas levantadas. En las rocas sedimentarias plegadas se presentan tres geoformas clásicas en función de los buzamientos de las capas de rocas competentes: mesetas, laderas y crestas largas estrechas (Fig. 5).

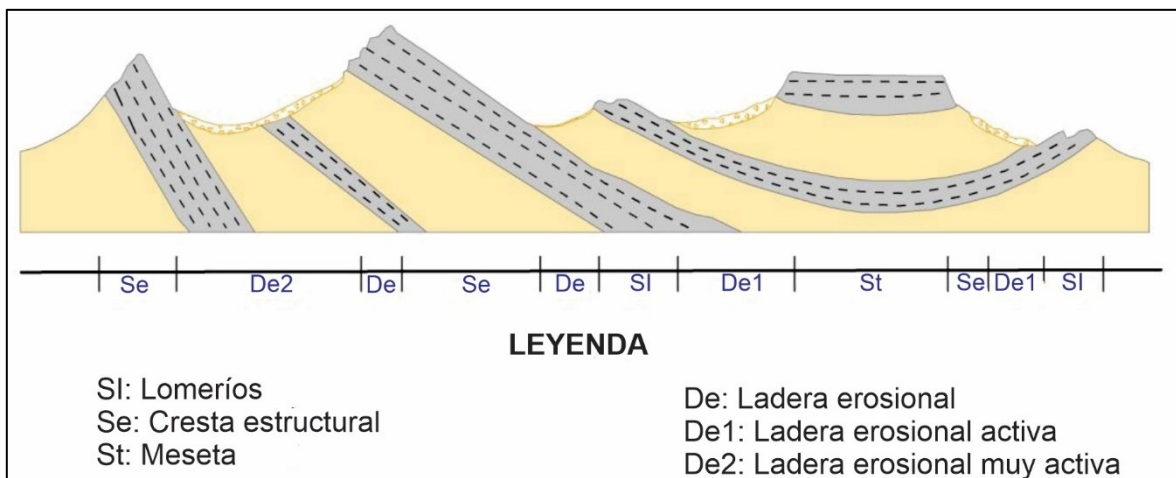


Figura 5. Perfil esquemático de unidades morfoestructurales, en un ambiente estructural (Robertson & Jaramillo, 2013).

Cuando los estratos de diferente resistencia se inclinan en una amplia zona, se desarrollan varias geoformas según la inclinación de las capas (Figura 6). Las cuestras se forman en las capas con una inclinación suave, de hasta 5°. Son formas asimétricas caracterizadas por un escarpe, que normalmente forma laderas escarpadas de acantilados. Las crestas homoclinales, o crestas de rumbo, son apenas asimétricas y se desarrollan en estratos más inclinados con un buzamiento de entre 10° y 30°. Los Hogbacks son formas simétricas que se desarrollan en estratos muy inclinados, con un buzamiento de 40° o más. (Huggett, 2017)

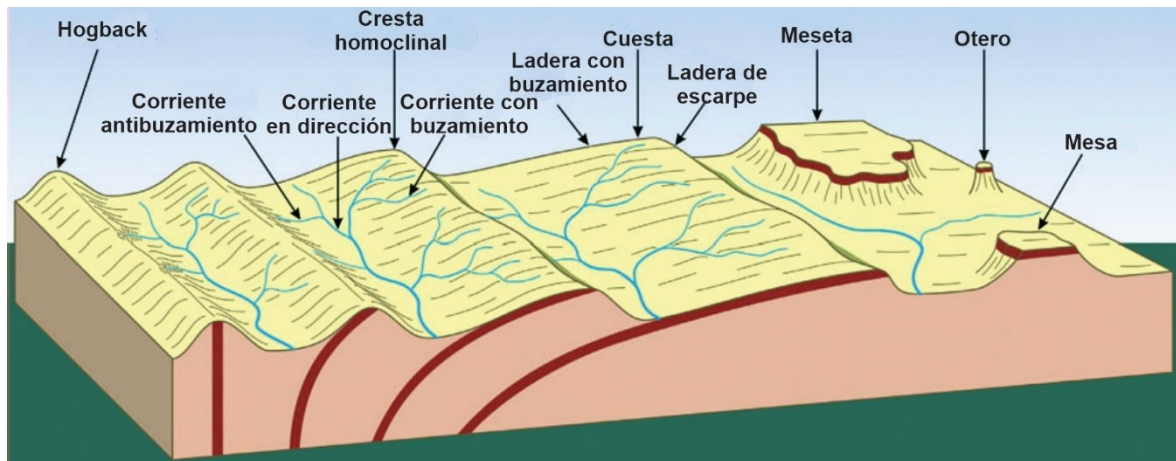


Figura 6. Geoformas asociadas a estratos inclinados y horizontales. Se muestran las principales corrientes que se encuentran en paisajes con estratos inclinados. La banda marrón representa una formación de roca dura que cubre a la meseta, mesa y otero (Huggett, 2017).

2.2.7.2. Ambiente Denudacional

Según Shorder (2013), manifiesta que el término denudacional se refiera a descubrir un objeto subyacente mediante la eliminación del material suprayacente. Y en geomorfología, ha pasado a significar la disminución de la superficie por la acción combinada de los procesos de erosión y pérdida de masa.

La separación de las geoformas por los procesos exógenos se ve en procesos erosivos hídricos y gravitatorios o ambos. Bajo condiciones climáticas secas, las formas erosivas relacionadas con separación y pérdida del suelo generan fenómenos de erosión en forma laminar, surcos y cárcavas. Por otra parte, las condiciones húmedas favoreces la meteorización del subsuelo y los movimientos gravitatorios con sus deslizamientos, flujos de suelos y escombros. Los procesos erosivos hídricos y de remoción en masa, constituyen los dos subambientes dominantes del Ambiente Denudacional. En la remoción en masas se identifican laderas erosionales con escarpes estrechos y las laderas coluviales con remoción en masas más o menos activa (Fig. 7). También son notorios los flujos torrenciales en la forma de vegas y conos de estabilidad variable, esta morfología también se relaciona con un drenaje complejo de dos o tres cauces secundarios separados por los flujos recientes dentro del mismo valle menor. (Robertson & Jaramillo, 2013)

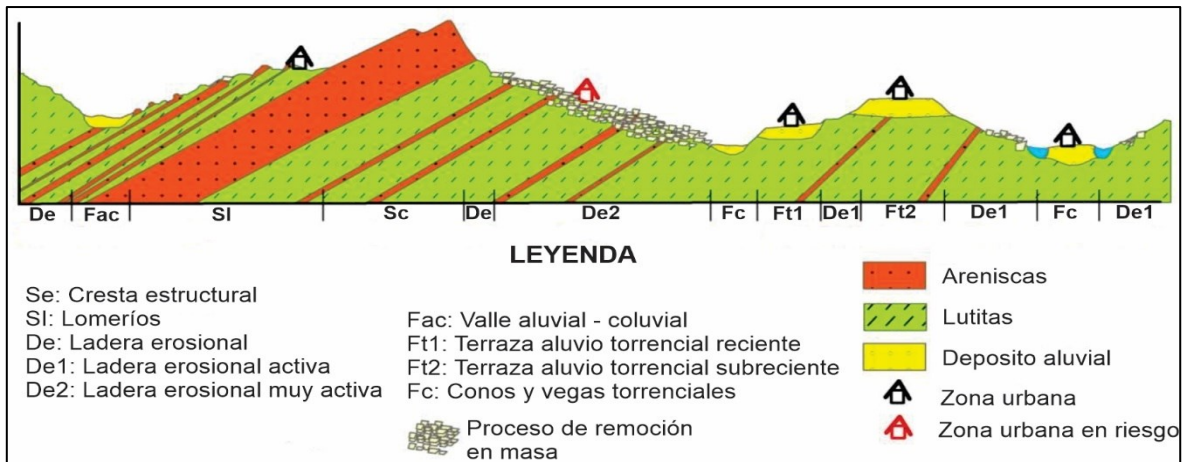


Figura 7. Perfil esquemático con laderas estructurales y denudacionales con terrazas aluvial-torrenciales de edad relativa variable (Robertson & Jaramillo, 2013).

2.2.7.3. Ambiente Fluvial

Ambiente dominado por la acción de las corrientes de agua y el transporte de sedimentos sobre la superficie terrestre. Los ríos transportan carga líquida y sólida a lo largo del sistema fluvial generando procesos erosivos y de acumulación en función de su pendiente, caudal y carga de sedimentos; formando geoformas como: abanicos de piedemonte, vegas aluviales de divagación, albardones, llanuras aluviales de inundación y terrazas aluviales (Walker, 1987)

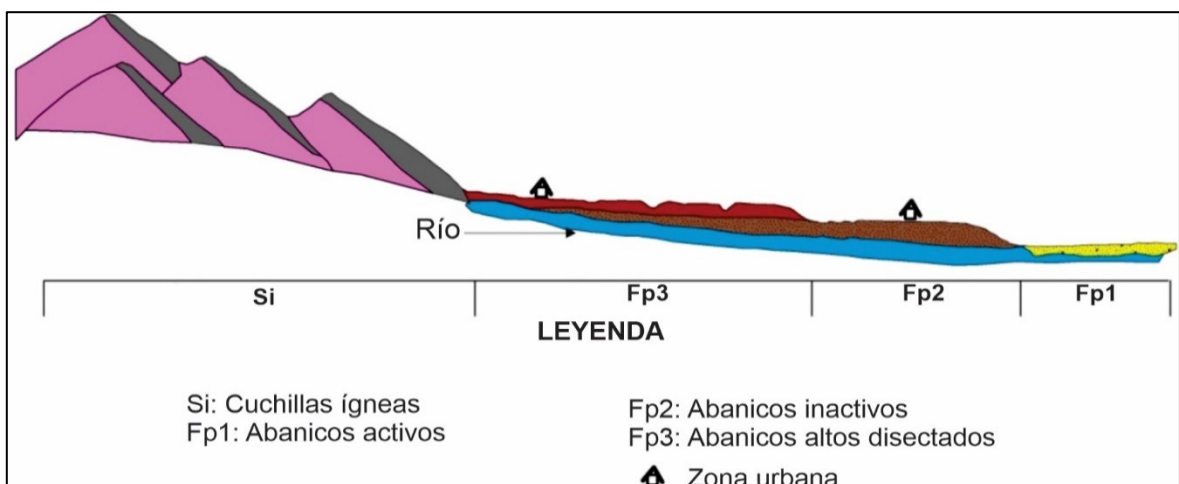


Figura 8. Perfil esquemático de los piedemontes aluvio-torrenciales compuestos por abanicos con grados de disección variables según su edad (Robertson & Jaramillo, 2013).

Los piedemontes con sus abanicos coalescentes con distintos grados de disección

y edad, son los más destacados dentro de los sub ambientes (Fig. 8). La disección de piedemonte puede asociarse con los ríos principales o en casos de disección avanzada incluir hasta las quebradas y caños superficiales, un fuerte indicio de su inactividad y edad antigua de formación. En general, sobre los abanicos activos se observan comúnmente orillares u otras evidencias de la migración reciente de los ríos sobre la superficie mientras los abanicos antiguos solo presentan superficies disectadas y suelos superficiales más evolucionadas. (Robertson & Jaramillo, 2013)

La mayoría de los ríos, salvo los de montaña, están flanqueados por una zona de terreno moderadamente llano denominada llanura de inundación, que se forma a partir de los escombros depositados cuando el río se desborda. Las pequeñas crecidas que se producen con frecuencia cubren una parte de la llanura de inundación, mientras que las grandes crecidas, poco frecuentes, sumergen toda la zona. La anchura de las llanuras de inundación es aproximadamente proporcional al caudal del río. Las llanuras de inundación adyacentes en regiones de topografía suave pueden unirse para formar llanuras aluviales. (Huggett, 2017)

Existen varios tipos de llanuras de inundación. Se distingue entre llanuras de inundación convexas y llanuras de inundación planas. Las llanuras de inundación convexas son las llanuras de inundación de baja pendiente de la mayoría de los grandes ríos. Estas llanuras de inundación son amplias y tienen secciones transversales ligeramente convexas, la tierra se inclina desde la orilla del río hacia los lados del valle (Figura 9a). La convexidad se debe principalmente a la sedimentación. En consecuencia, las orillas del cauce y los diques crecen más rápido que las cuencas de inundación y pueden alcanzar entre 1 y 15 m de altura. Las llanuras de inundación planas suelen ser pequeñas y planas o suavemente cóncavas en sección transversal (Figura 9b). Acá los diques naturales son pequeños o inexistentes y las llanuras aluviales se elevan suavemente hacia las laderas del valle. La forma cóncava se ve favorecida por una pequeña zona de llanura de inundación que está sujeta a una continua reestructuración por parte de la corriente. La mayoría de los ríos de tamaño medio, y muchos de los grandes ríos, tienen llanuras de inundación planas formadas principalmente por acreción lateral (sedimentación en el interior de los meandros). (Huggett, 2017)

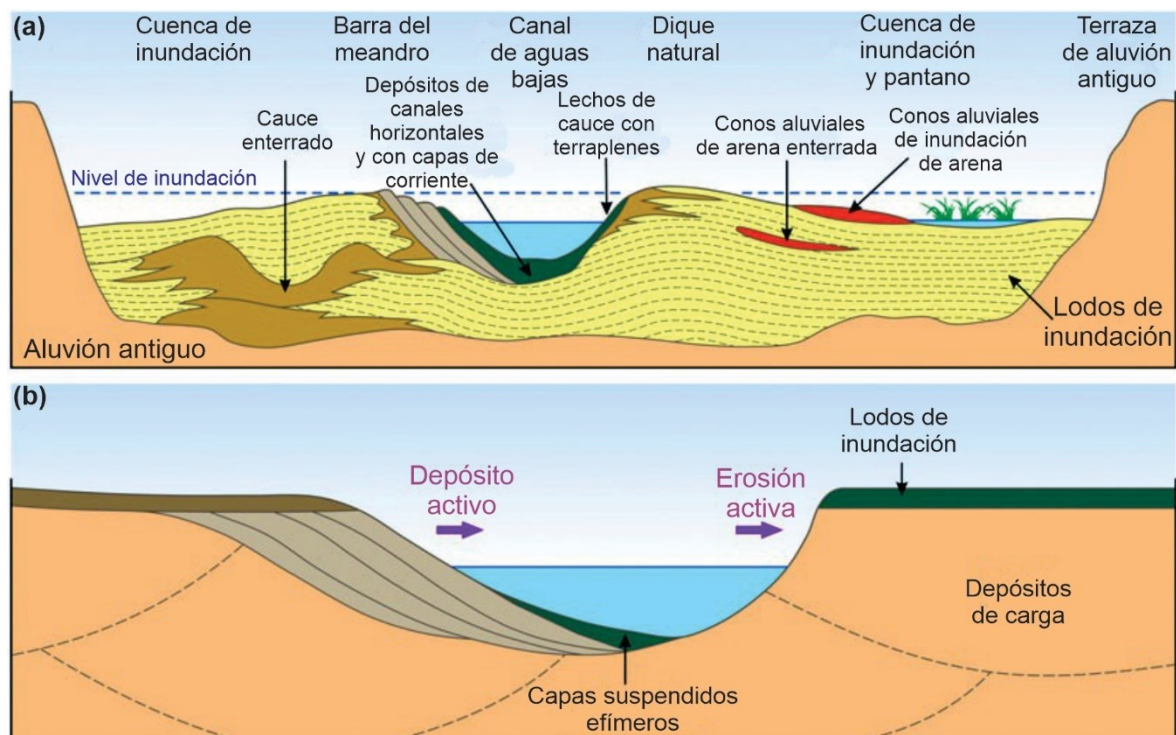


Figura 9. Secciones de llanuras aluviales. (a) Llanura fluvial convexa. Los depósitos de barras se producen en las curvas interiores de los meandros y raramente frente a los diques en desarrollo. (b) Llanuras de inundación planas (Huggett, 2017).

Una terraza es una zona más o menos llana limitada por superficies inclinadas en los lados ascendente y descendente. Las terrazas fluviales son los restos de antiguos fondos de valle que quedan asentados en las laderas de los valles tras el descenso de los ríos. Las terrazas fluviales se inclinan aguas abajo pero no necesariamente al mismo nivel que la llanura de inundación activa. Las terrazas emparejadas se forman cuando el descenso vertical del río es más rápido que la migración lateral del cauce (Figura 10a). Las terrazas no emparejadas se forman cuando el canal se desplaza lateralmente más rápido de lo que corta hacia abajo, por lo que las terrazas se forman al ser cortadas a su vez a cada lado del valle (Figura 10b). (Huggett, 2017)

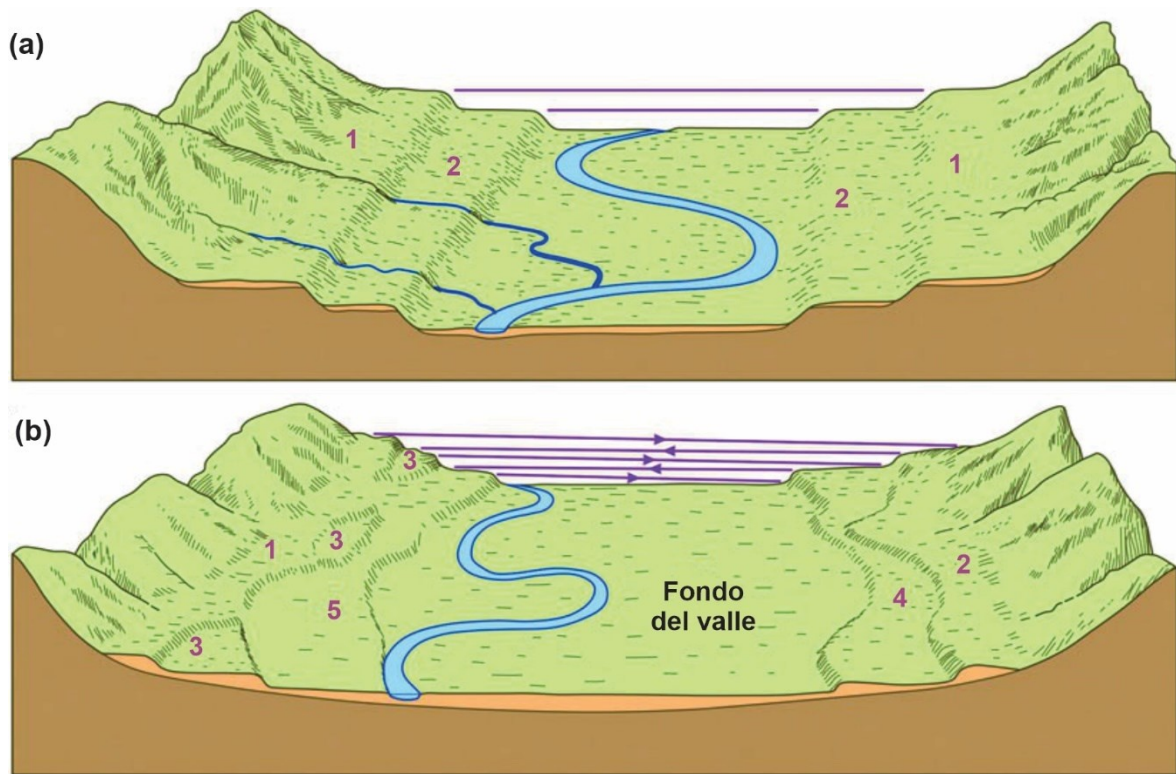


Figura 10. Terrazas emparejadas y no emparejadas. (a) Terrazas policíclicas emparejadas. (b) Terrazas no emparejadas, no cíclicas. Las terrazas están numeradas 1,2,3,4 y 5 (Huggett, 2017).

Huggett (2017), manifiesta que el fondo de un valle fluvial es una condición previa para la formación de terrazas fluviales. Existen dos tipos principales de terrazas fluviales que corresponden a dos tipos de fondo de valle: las terrazas de capa de roca y las terrazas aluviales.

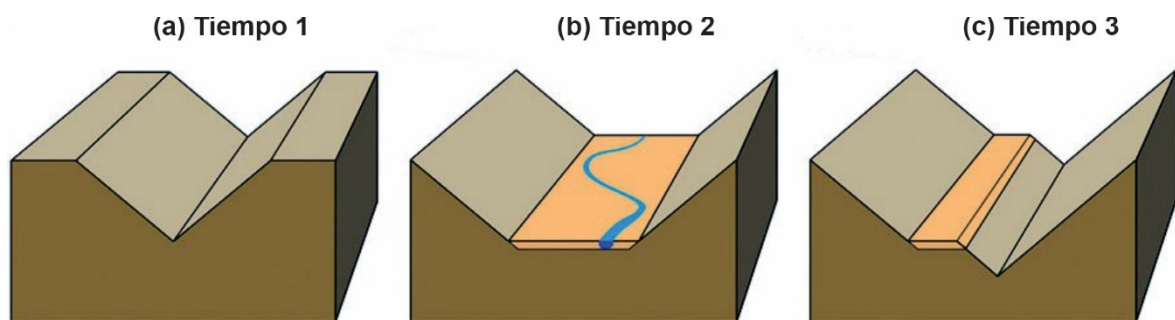


Figura 11. Formación de terrazas en estratos (capa rocosa). (a) Valle original en forma de V excavado en la capa rocosa. (b) La erosión lateral corta una terraza de roca. (c) Una nueva incisión corta el suelo de la terraza (Huggett, 2017).

2.2.8. Sistema de Información Geográfica (SIG) y Geomorfología

El rápido incremento de la tecnología de la información geográfica permite mejorar las capacidades de gestión, manipulación, análisis, modelización y visualización de datos. En las bases de datos de los SIG pueden almacenarse diversas formas de datos espaciotemporales, y una abundancia de herramientas informáticas permiten a los científicos estudiar eficazmente las pautas y relaciones espaciotemporales. Estas nuevas capacidades representan una evolución sustancial de la evaluación y la cartografía geomorfológicas en comparación con los enfoques tradicionales. (Bishop et al., 2012)

Los resultados de los análisis cuantitativos y los modelos numéricos basados en SIG dependen de numerosos factores y supuestos simplificadores, y pueden no ser representativos de las mediciones objetivas obtenidas sobre el terreno. En consecuencia, es necesario reconocer las cuestiones conceptuales y prácticas. Por la cual se han identificado una serie de cuestiones que deben tenerse en cuenta, entre ellas se incluyen la representación, la naturaleza predominantemente empírica del uso del SIG moderno, la escala y las perspectivas cartográficas. En general, los avances en geomorfología han sido el resultado de abordar estas cuestiones y utilizar las tecnologías geoespaciales para resolver problemas específicos. (Rhoads 2013)

2.2.8.1. Modelado Digital del Terreno (MDT)

La geomorfología necesita información cuantitativa sobre la superficie terrestre. Una de las principales aportaciones de la teledetección ha sido el desarrollo y la utilización de sensores pasivos y activos para generar Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Para obtener un MDT pueden utilizarse diversas técnicas, como la fotogrametría de imágenes, la altimetría por radar o láser y el SAR interferométrico. Del mismo modo, se utilizan ampliamente las imágenes de radar y, en concreto, la misión de cartografía topográfica por radar del transbordador. SRTM y ASTER se diseñaron específicamente para producir un producto de datos DEM global que facilitara las aplicaciones de las ciencias de la Tierra. Estos MDE han dado lugar a muchos nuevos desarrollos para caracterizar la morfología de la superficie y evaluar y cartografiar mejor el paisaje. (Rhoads 2013)

Más recientemente, los sistemas de Detección y Alcance de la Luz (LiDAR) aerotransportados de alta resolución y los sistemas terrestres de escaneo láser generan millones de mediciones de puntos tridimensionales. Estas "nubes de puntos" deben analizarse y manipularse para garantizar una interpolación precisa que genere un campo de altitud de la Tierra descubierta. Los MDE LiDAR de alta resolución permiten una caracterización geomorfológica detallada de la superficie y una mayor precisión cartográfica. Estos datos permiten explotar los avances en geomorfología, mientras que las mismas técnicas pueden no ser tan útiles si la escala de medición del MDE es más gruesa.

El MDT implica muchas cuestiones relacionadas con la naturaleza de la adquisición y el muestreo de datos, el preprocesamiento, la interpolación espacial, la caracterización cuantitativa del error y la incertidumbre, y el postprocesamiento. Numerosos estudios han revelado la importancia de utilizar una resolución óptima para caracterizar adecuadamente los parámetros geomorfológicos en las investigaciones sobre erosión y cartografía (Napieralski & Nalepa, 2010).

2.2.8.2. Análisis del Terreno

Según Pike (2000), la cuantificación y el análisis de la superficie terrestre se denomina geomorfología, esta desempeña un papel fundamental en el estudio de los procesos superficiales y la cartografía geomorfológica. En consecuencia, se ha caracterizado como geomorfología general y específica. La geomorfología aborda cuestiones de:

- Muestreo de atributos de superficies terrestres
- Geodesia y MDT
- Preprocesamiento de MDE y evaluación de errores
- Generación de parámetros, índices y objetos de superficies terrestres
- Producción de información geomórfica y resolución de problemas utilizando parámetros y objetos.

Cada aspecto de la geomorfología representa una subdisciplina de investigación y contribuye significativamente al desarrollo de herramientas de software y

tecnología geoespacial. Se espera que aumente su importancia en geomorfología, ya que puede utilizarse para evaluar y cartografiar la geología y la tectónica, los elementos del relieve y la forma del terreno, las unidades funcionales relacionadas con los recursos hídricos y la hidrología, los dominios de procesos, los patrones de erosión, así como las condiciones climáticas y meteorológicas. (Bishop et al., 2012)

2.2.8.3. Cartografía de Geoformas

Históricamente, la cartografía de las geoformas ha sido principalmente una actividad sobre el terreno, aunque ha evolucionado rápidamente con la llegada de las tecnologías geoespaciales y la disponibilidad cada vez mayor de datos espaciotemporales. Las nuevas imágenes y MDE, junto con los nuevos algoritmos y enfoques de procesamiento, permiten ahora la evaluación de los materiales de la superficie, la evaluación de las condiciones cercanas a la superficie mediante técnicas geofísicas y la evaluación de la morfología del terreno. Una cuestión fundamental en la cartografía es la complejidad espacial y la taxonomía, ya que se requiere una clasificación sólida y fiable para cartografiar los accidentes geográficos. (Bishop et al., 2012).

2.2.8.4. Visualización

Gahegan (2000), manifiesta que la visualización representa avances de la investigación cartográfica, gráficos por ordenador, geometría computacional, ciencia cognitiva y psicología. Se utiliza de diversas formas para visualizar imágenes, integrar información, ver patrones espaciales y temporales y examinar interactivamente espacios de datos abstractos y simulaciones numéricas.

En las ciencias de la Tierra, muchos han reconocido la importancia de visualizar y percibir patrones de estructura, procesos, características y relaciones, en un intento de validar los enfoques de análisis y modelización y comprender muchos conceptos de geomorfología relativos a procesos, formas del relieve y dinámica de sistemas. En general, la visualización es la interacción entre ordenadores y humanos basada en un entorno de interfaz gráfica de usuario que utiliza diversas técnicas de visualización. En las geociencias, la visualización se utiliza de diversas maneras, y los científicos de la Tierra deben estar familiarizados con las técnicas de

visualización adecuadas para trabajar con conjuntos de datos y aplicaciones específicas.

2.2.9. Modelización Geológica

Según Mallet (2002), la geomodelación tridimensional consiste en modelizar la topología, la geometría y las propiedades de una región concreta de la Tierra. Este proceso no requiere reconstruir la historia del área a lo largo del tiempo, sino interpolar entre datos de muestra siguiendo reglas y principios esenciales.

Esta falta de consideración de los procesos geológicos puede considerarse un punto débil, por la cual nos preguntamos: ¿cuál es el valor científico de la interpolación en comparación con los modelos basados en procesos que intentan reproducir explícitamente los procesos acoplados a escalas temporales geológicas? Un primer elemento de respuesta reside en la extrema dificultad de encontrar leyes físicas y condiciones de contorno apropiadas en modelos basados en procesos que se ejecutan a escalas de tiempo geológicas. La interpolación aparece, por tanto, como una alternativa viable y eficiente desde el punto de vista computacional para obtener una imagen coherente del subsuelo, respetando al mismo tiempo una gran variedad de observaciones.

Los métodos de geomodelado constituyen un muy buen ejemplo del "conjunto distintivo de procedimientos lógicos" para describir el razonamiento geológico. Por ello, la interpretación y las consideraciones históricas son esenciales para la ciencia geológica en general y para la geomodelación en particular (Frodeman, 1995).

En la práctica, la historia geológica y los conceptos interpretativos se han traducido en la geomodelación como:

- Formas de definir y representar formaciones geológicas matemáticamente y numéricamente
- Flujos de trabajo para construir modelos respetando la información disponible.

Las dificultades de la tecnología de modelado de cuerpos geológicos en 3D se centran en cómo pueden utilizarse datos geológicos discretos para reconstruir con precisión estructuras geológicas complejas. En la actualidad, el modelado

geológico 3D ha ido formando gradualmente dos métodos de modelado basados respectivamente en el modelo facial y el modelo volumétrico. (Shao et al., 2011)

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Estructural: La disposición general, actitud, arreglo o posiciones relativas de los macizos rocosos de una región o área; la suma total de las características estructurales de un área, como consecuencia de procesos de deformación tales como fallas, plegamiento e intrusión ígnea. Utilizado en geología del petróleo para cualquier arreglo físico de rocas que pueda contener una acumulación de petróleo o gas. (Saklani, 2008)

Flujo: Movimiento del aire o un fluido como el agua o lava. Se aplica también a la marea alta, contrario de reflujo. La característica principal del flujo es el movimiento individual de partículas que constituyen una masa determinada. (Lugo, 2011)

Paisaje: Unidad físico-geográfica principal de la división de un territorio con un mismo tipo de relieve, estructura geológica, clima, hidrografía y aguas subterráneas; con conjugaciones secuenciales de suelos, vegetación y fauna. Cada paisaje geográfico consiste en unidades físico-geográficas simples con límites interrelacionados. Por otro lado, los paisajes complejos y semejantes por su estructura pueden ser incluidos en las unidades físico geográficas del paisaje de orden mayor (provincia, región, zonas, etc.). (Lugo, 2011)

Pendiente: En la geomorfología se refiere a la inclinación de una superficie medida entre dos puntos, misma que resulta de la altura vertical dividida entre la distancia horizontal correspondiente (triángulo rectángulo). El valor resultante es el de la tangente del ángulo y al multiplicarlo por cien se obtiene el valor en tanto por ciento. (Lugo, 2011)

Procesos fluviales: Conjunto de mecanismos que operan como resultado del flujo de agua dentro del cauce de un arroyo, provocando la erosión, transferencia y deposición de sedimentos. (Allaby, 2008)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Ubicación Geográfica.

El área de investigación está delimitada por cuatro vértices con las coordenadas en el sistema Unidad Técnica de Medida (UTM) Datum WGS-84 (Ver en anexos, Plano 01). Las coordenadas de los vértices son se describe en la Tabla 2.

Tabla 2. Vértices del área de investigación.

Vértices	Norte	Este
1	9153161.7	802000
2	9153161.7	805500
3	9149661.7	805500
4	9149661.7	802000

3.1.2. Ubicación Política

El área de investigación se sitúa en el caserío de Hierba Buena, distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba y departamento de Cajamarca.

3.1.3. Accesibilidad

El acceso al área de investigación se realiza por vía terrestre desde la ciudad de Cajamarca a la provincia de Cajabamba con una distancia de 121 km. Luego de ello se recorre una distancia de 33 km hacia el centro poblado de Algamarca, para luego recorrer 13 km hacia caserío de Hierba Buena (Tabla 3).

Tabla 3. Accesibilidad al caserío de Hierba Buena.

Tramo	Distancia	Tipo de vía	Tiempo
Cajamarca – Cajabamba	121 km	Asfaltado	170 min
Cajabamba – C.P. Algamarca	33 km	Afirmado	60 min
C.P. Algamarca - Caserío Hierba Buena	6.6 km	Afirmado	13 min

3.2. PROCEDIMIENTOS

3.2.1. Etapa Preliminar

Esta etapa inicia con recopilación de antecedentes teóricos, y la selección bibliográfica de informes, tesis y trabajos relacionados al tema para proceder a la investigación del proyecto. También se desarrolló un análisis de imágenes satelitales del área de investigación, dándole énfasis en la interpretación de estructuras geológicas, vías de acceso, drenajes y la topografía del área de investigación.

3.2.2. Etapa de Campo

Con visitas técnicas se procedió a reconocer el área de estudio, para identificar y cartografiar la litología, estructuras y primordialmente las geoformas. En el aspecto litológico se identificó los afloramientos rocosos y el tipo de roca que presentan. En las estructuras se describió la geometría que presenta, interpretación de cinemática; mediciones de rumbo, buzamiento. Finalmente se cartografió las geoformas teniendo en cuenta su ambiente morfogenético y a los procesos que está asociado.

3.2.3. Etapa de Gabinete

Esta etapa consiste en el procesamiento de los datos obtenidos en campo, donde:

- La interpretación de las estructuras geológicas y análisis geodinámico se hizo con los softwares Dips, FaultKin y Stereonet.
- Para la elaboración de planos (geológico y geomorfológico) y perfiles (geológicos y morfométricos) se usó el software ArcGis 10.5.
- La creación del modelamiento en 3D geológico y geomorfológico se desarrolló

en el software Leapfrog Geo.

- Finalmente se hizo la discusión de resultados obtenidos y la elaboración final del presente documento.

3.2.4. Metodología

La investigación es descriptiva, la cual se detalla: según su objetivo, su nivel, su naturaleza, su diseño y su periodo. Todos estos aspectos desarrollados en la presente investigación se describen en la siguiente tabla:

Tabla 4. Clasificación y Tipo de investigación.

Clasificación	Tipos de investigación
Según su objetivo	Aplicativa: Porque se utilizaron conocimientos teóricos para cartografiar las geoformas y sus procesos que lo formaron.
Según su nivel	Exploratoria- descriptiva: La investigación identifica y describe las características de los componentes geomorfológicos.
Según su naturaleza	Cualitativa - cuantitativa: La investigación es cualitativa porque se basa en sucesos complejos en su medio natural, con información cualitativa como las características de las geoformas; y cuantitativa por el porcentaje de distribución espacial asociados a la morfometría y morfogénesis en el área.
Según su diseño	No experimental: Los objetivos de la investigación se desarrollará con base a eventos que ya sucedieron sin manipulación de estos.
Según el periodo	Transversal: La investigación estudió en un determinado tiempo los componentes geomorfológicos del área y la creación de su modelamiento en 3D.

Fuente: Modificado de Arias, (2012).

3.2.4.1. Población de Estudio

Relieve terrestre del caserío Hierba Buena que comprende 12.25km², localizada en el Distrito de Cachachi.

3.2.4.2. Muestra

Está constituida por los ambientes morfogenéticos estructural, denudacional y

fluvial del caserío Hierba buena.

3.2.4.3. Unidad de Análisis

Constituida por los componentes geomorfológicos, las cuales son: Cerro, Escarpe estructural, Flanco, Altiplanicie, Cárcava, Colinas, Deslizamiento, Laderas, Lomadas, Piedemonte, Planicie, Surco, Abanico aluvial, Cauce, Cono de deyección, Terraza aluvial, Terraza de acumulación; y el modelamiento geomorfológico en 3D.

3.2.5. Identificación de Variables

3.2.5.1. Independientes:

Procesos endógenos: Son todos los procesos relacionados a las condiciones reinantes en movimientos tectónicos.

Procesos exógenos: Son todos los procesos cuyos agentes se relacionan con la atmosfera y el clima, agua pluvial, hielo, viento.

3.2.5.2. Dependiente

Ambientes morfogenéticos: Ambiente estructural, Ambiente denudacional y Ambiente fluvial.

3.2.6. Técnicas

Las técnicas que se utilizaron para recolección de datos se basaron en la observación, descripción, caracterización y análisis de los componentes geomorfológicos según sus ambientes morfogenéticos presentes en el área de investigación.

Fueron necesarios el uso de materiales e instrumentos para la toma de datos en campo, tales como plano topográfico y satelital, formatos para toma de azimuts y buzamientos de las estructuras geológicas, y fichas para la descripción de la geomorfología. Al mismo tiempo se dio la toma de coordenadas con GPS en el sistema UTM. Datum WGS-84, para plotear la litología, estructuras y geoformas.

3.2.7. Instrumentos y Equipos

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron instrumentos y equipos, estos:

Tabla 5. Descripción de Instrumentos y equipos.

Instrumentos	Descripción
Planos Satelital (P-01) y topográfico a escala (P-02) 1/15000	Para cartografiar en el área de investigación la litología, estructuras geológica y geoformas.
Libreta de campo	Anotar datos de geología, hacer croquis o dibujos observados en campo
Protactor de escalas 1/5000 y 1/2500	Instrumento complementario para plotear datos en los planos a una escala determinada.
Picota de geólogo	Para extraer muestras de mano de rocas y poderlas clasificarlas.
Lupa de aumento 20x	Observar la textura y mineralogía de las rocas.
Lápiz rayador	Identificar la dureza de algunos minerales.
Ácido clorhídrico de 40%	Detectar rocas con contenido de carbonatos.
Equipos	Descripción
Brújula Geo Brunton	Para medir azimuts y buzamientos de las estructuras y sacar pendientes.
GPS Garmin navegador	Ubicar las geoformas, estructuras geológicas y puntos de control dentro del área de investigación.
Cámara fotográfica digital de 32MP	Tomar fotografías para tener evidencia del trabajo en campo e ilustrar mejor las geoformas en el informe.
Laptop Lenovo ThinkPad	Para desarrollar todo el trabajo en gabinete y el informe final de la presente tesis.

3.3. GEOLOGÍA LOCAL

3.3.1. Grupo Goyllarisquizga

3.3.1.1. Formación Chimú (Ki - Chi)

La Formación chimú que es la unidad basal del grupo Goyllarisquisga, aflora en el anticlinal “Laderón” cubriendo gran parte del área de investigación. Está compuesta principalmente por niveles de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso con espesores de estratos mayores a 50cm, por la cual en esta unidad se forma prominentes afloramientos rocosos debido a que las rocas son compactas, duras, y resistentes a la erosión. Por la Formación Chimú se observaron fallas de dirección SW-NE y fracturas con relleno de Hematita, Jarosita y Goethita. Se considera que la formación Chimú tiene un grosor que va de 500 a 700 metros.



Foto 1. Estratos de rocas areniscas de la Formación Chimú. Este afloramiento se encuentra en el flanco NE del anticlinal Laderon.

3.3.1.2. Formación Santa (Ki - Sa)

La Formación Santa aflora en los flancos NE y SW del anticlinal “Laderón” en contacto con la Formación Chimú y asimismo hacia el NE del área de investigación. Está compuesta principalmente por niveles de lutitas bituminosas y calizas margosas con espesores de estratos de 10cm a 50cm, la mayor parte de esta

formación está cubierta por vegetación hacia el flanco SW, y cubierta de detritos de las rocas cuarzosas de la formación chimú hacia el flanco NE.

El piso de esta unidad es un cambio definido de areniscas gruesas blanquecinas en estratos métricos a lutitas gris oscuras en estratos delgados laminares, mientras que el techo es un cambio gradual hacia limolitas y areniscas grises dispuestos en estratos delgados de la Formación Carhuaz. El grosor de esta unidad se estima que esta entre 50 y 200 metros.

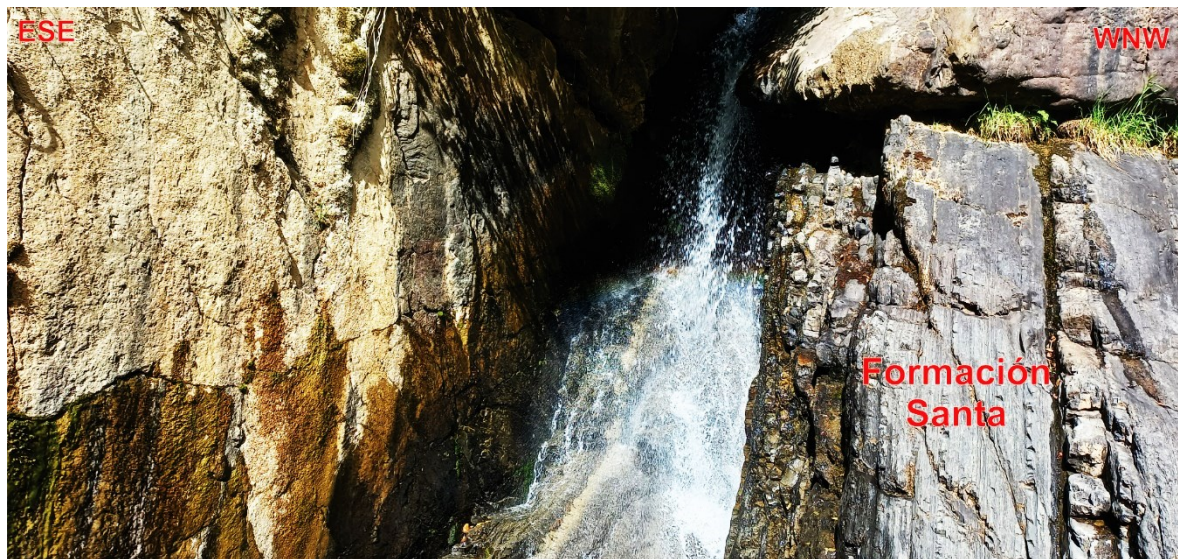


Foto 2. En la parte inferior izquierda de la foto se observa estratos de rocas lutitas bituminosas y calizas margosas de la Formación Santa. Este afloramiento se encuentra en la quebrada Calvario.

3.3.1.3. Formación Carhuaz (Ki-Ca)

Esta formación se caracteriza por la intercalación de limolitas con areniscas grises, las limolitas tienen estratificación delgada a laminar, aunque se observa estratos masivos deleznales, el grosor es variable, va de 10 centímetros hasta metros, mientras que las areniscas están en capas delgadas tabulares de espesor variable de 10 hasta 100 centímetros. La Formación Carhuaz en el área de investigación aflora hacia el sector del flanco NE del anticlinal “Laderón”, aflorando donde sería el eje del sinclinal que es la continuación del plegamiento del anticlinal “Laderon”, así mismo esta Formación en gran parte se encuentra cubierta por vegetación. El piso de esta unidad está dado por el paso gradual de las lutitas negras de la Formación Santa a las limolitas abigarradas de la Formación Carhuaz, mientras que

el techo es el paso gradual de las limolitas Carhuaz a las areniscas cuarzosas blanquecinas de la Formación Farrat. El grosor de esta unidad va de 300 a 5000 metros.



Foto 3. Estratos delgados de rocas areniscas intercaladas con limolitas. Este afloramiento se encuentra al noreste del área de investigación.

3.3.1.4. Formación Farrat (Ki- Fa)

Esta Formación es la unidad superior del grupo Goyllarisquizga, litológicamente está constituida por niveles de areniscas cuarzosas blanquecinas de grano medio a grueso similares a las areniscas de la Formación Chimú, se diferencia por su grado de compactación, granulometría y pureza, siendo mayor en la Chimú y de menor grado en la Farrat; por otro lado la Formación Farrat muestra conspicuos niveles de limolitas de granulometría media a gruesa, blanquecinas laminares algo compactas, los niveles basales están mejor expuestos en la parte norte del área, donde se puede apreciar un pliegue del tipo sinclinal. La relación estratigráfica del piso es un paso gradual de las limolitas abigarradas de la Formación Carhuaz a areniscas gruesas blanquecinas de la Formación Farrat, mientras que el techo es un paso gradual de areniscas medias cuarzosas blanquecinas a lutitas con calizas fosilíferas de la Formación Inca, el grosor de esta unidad se estima de 500 a 700 metros.



Foto 4. Vista de los estratos de rocas areniscas cuarzosas de la Formación Farrat. Este afloramiento se ubica al norte del área de investigación en la quebrada Cauday.

3.3.2. Depósitos Aluviales (Qh – Al)

En el área de investigación se encuentran en las partes bajas de las quebradas Quinual, Chuñiga y Calvario. Estos depósitos son materiales transportados y depositados por el agua. Su tamaño varía desde las arcillas hasta gravas gruesas, cantos y bloques.

3.3.3. Depósitos Coluviales (Qh – Co)

Son acumulaciones de gravas y bloques angulosos a subangulosos, en el área de investigación se ubican en flanco NE y SW del anticlinal “Laderon” cubriendo parcialmente a las Formaciones Santa y Carhuaz.



Foto 5. Vista de los depósitos coluviales y aluviales, ubicadas en el flanco NE del anticlinal Laderón cubriendo a las Formaciones Santa y Carhuaz.

3.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

3.4.1. Estructuras Continuas

Las estructuras continuas están referidas a los plegamientos (anticlinal y sinclinal). El área de investigación, según la orientación y buzamiento de las estratificaciones está conformada por 4 plegamientos, de la cual se puede apreciar la geometría completa de la estructura de un anticlinal denominado “Laderón” (Foto 6), los otros plegamientos por procesos exógenos a través de la historia geológica han sido erosionadas quedando solo rastros de sus flancos por medio de la inclinación de sus estratos que lo conforman.

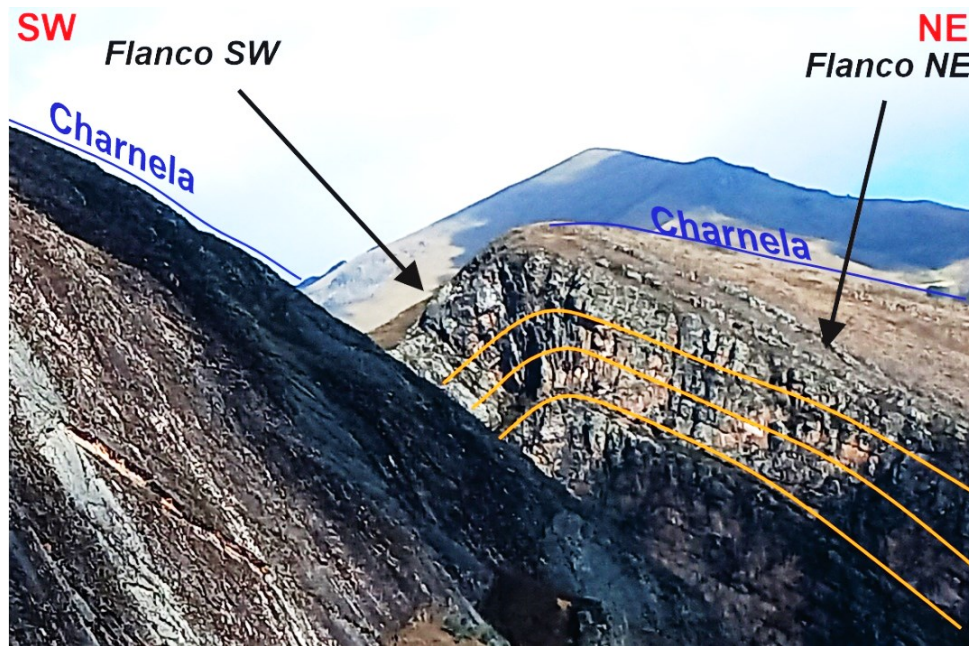


Foto 6. Vista del anticlinal Laderón, se puede apreciar su charnela, sus flancos SW y NE por la inclinación de sus estratos, longitudinalmente presenta una orientación NW – SE.



Figura 12. Imagen satelital con trazo simbólico longitudinal de NW–SE de los plegamientos.

3.4.2. Estructuras Discontinuas

Las estructuras discontinuas están referidas a las fracturas y fallas. Dentro de las fracturas, en el área de investigación se pudo observar fracturas de extensión mayormente conocidas como diaclasas, de la cual se identificaron 2 sistemas pseudo conjugados, cada sistema está compuesta por 2 familias de diaclasas, estas familias forman una letra "X" por la intersección entre ellas (Foto 7).

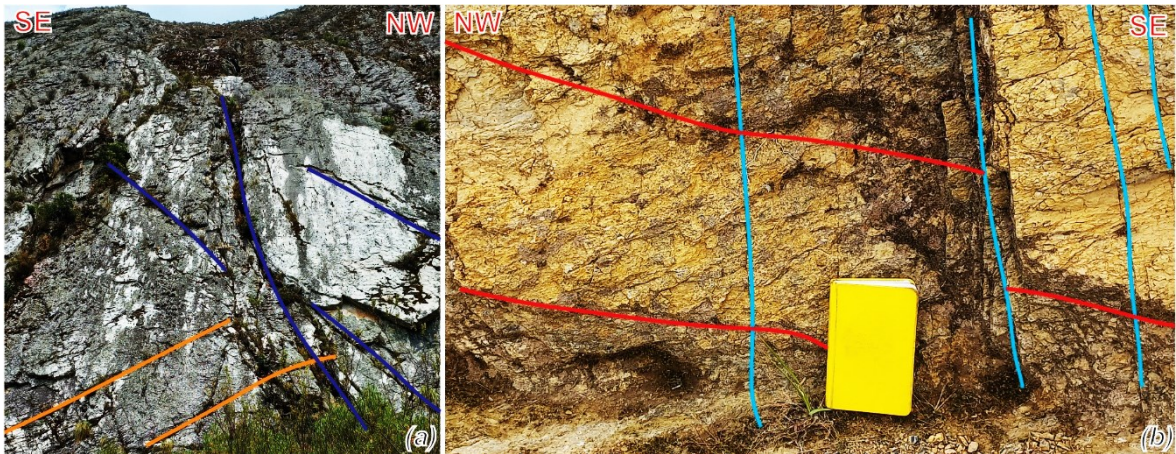


Foto 7. En las fotos se observa sistemas de diaclasas. (a) Color azul diaclasas con azimuts de $N\pm 223^\circ$ y buzamientos de $\pm 83^\circ NW$, color anaranjado con azimuts de $N\pm 150^\circ$ y buzamientos de $\pm 80^\circ SW$. (b) Color rojo diaclasas con azimuts de $N\pm 321^\circ$ y buzamientos de $\pm 29^\circ NE$, color celeste diaclasas con azimuts de $N\pm 38^\circ$ y buzamientos de $\pm 83^\circ SE$.

Por otra parte, las fallas que se identificaron en el área de investigación son de orientaciones NW-SE y SW-NE. Se infirió 2 fallas de orientaciones NW-SE una del tipo inversa y otra del tipo normal. También se identificó indicadores cinemáticos de estas fallas por la presencia de planos de fallas.

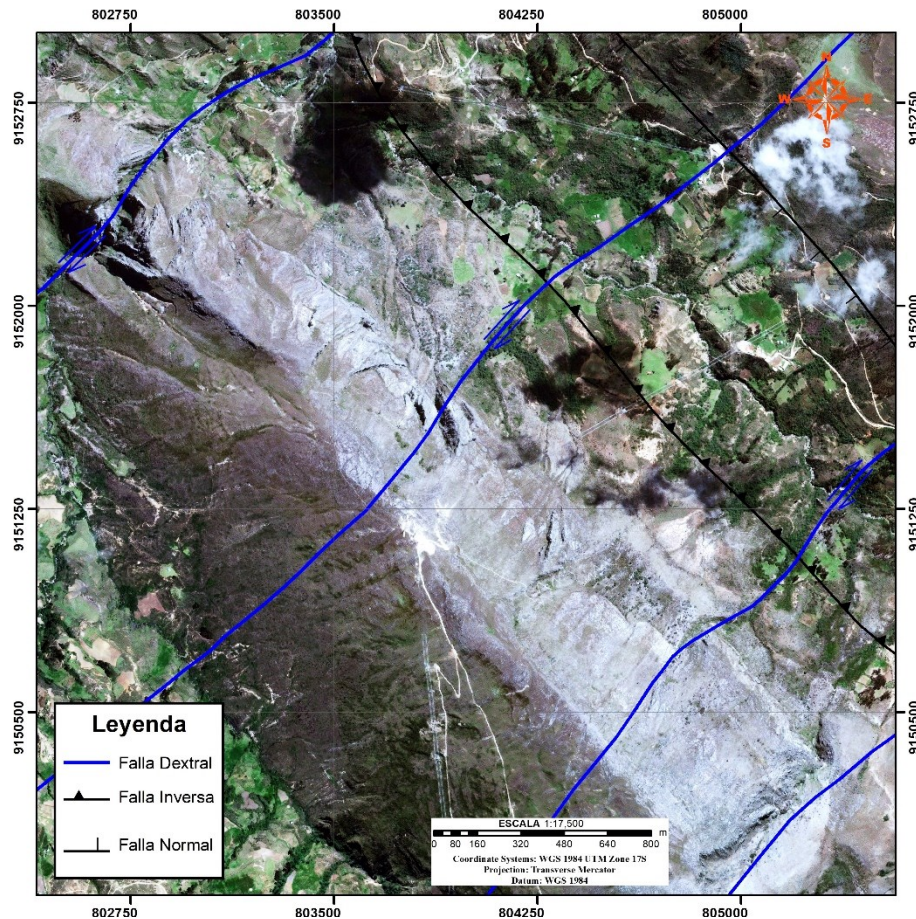


Figura 13. Imagen satelital con trazo simbólico de fallas con orientaciones de NW–SE y SW – NE.

Las fallas de orientaciones SW-NE son de rumbo de tipo dextral (ver Foto 8), la cual se consideran que fueron posteriores a las fallas de orientación NW-SE, al igual que las fallas inversas; también se identificaron indicadores cinemáticos que nos indican la dirección del movimiento.



Foto 8. (a) Trazo de falla de rumbo dextral con componente normal, que es perpendicular al eje del anticlinal Laderón, la cual dividió en dos bloques grandes a este plegamiento. (b) Se observa el plano de falla, la cual nos indica que el sentido de deslizamiento.

3.5. GEOMORFOLOGÍA

3.5.1. Componentes del Ambiente Estructural

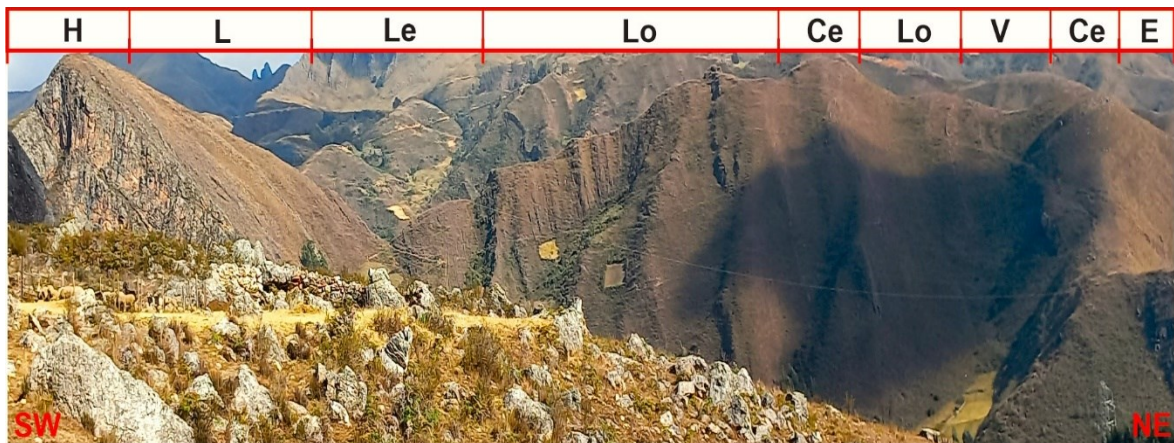
El área de investigación litológicamente compuesta por rocas sedimentarias ha sufrido procesos tectónicos, la cual han generado un ambiente estructural compuesta por geoformas que son característicos de este ambiente.

Las geoformas principales de este ambiente en el área de estudio están determinadas por los plegamientos, dentro del cual el anticlinal Laderón conserva su geometría estructural (Foto 6), este anticlinal posee flancos que a la vez forman un cerro por presentar laderas cuya inclinación es mayor a 25° , en la Foto 9 se puede observar los Flancos SW y NE del anticlinal Laderón.



Foto 9. Vista de las laderas del cerro Laderón. (a) Flanco SW del anticlinal Laderón. (b) Flanco NE del anticlinal Laderón.

Otras geoformas de este ambiente que se identificaron y describieron en el área de estudio son: Hogback, Ladera estructural, Ladera erosional, Lomeríos, Cresta estructural, Valle y Escarpe estructural, estas se pueden apreciar en la Foto 10. Estas geoformas están definidas por los plegamientos, a excepción del escarpe estructural que está definida por una falla inversa que es paralela al eje del anticlinal Laderón, este escarpe tiene una dirección entre $N320^\circ$ a $N340^\circ$ y una inclinación mayor a 70° al NE (Ver Foto 11).



H: Hogback
L: Ladera estructural
Le: Ladera erosional
Lo: Lomerios
Ce: Cresta estructural
V: Valle
E: Escarpe estructural

Foto 10. Vista de los componentes geomorfológicos de un ambiente estructural en el área de investigación.



Foto 11. Vista del escarpe estructural definida por una falla inversa de orientación N-S, este escarpe tiene una longitud de afloramiento de 0.5km.

3.5.2. Componentes del Ambiente Denudacional

En el ambiente denudacional se da la disminución de la superficie por acción de procesos de erosión y pérdida de masa, esto lleva a moldear la superficie terrestre teniendo en cuenta el tipo de roca y estructuras geológicas que presenta cada componente.

Las lomadas en el área de investigación son poco accidentadas y de superficie ondulada ubicadas mayormente en intercalación de estratos de roca areniscas con rocas limolitas (ver Foto 12). A diferencia de las lomadas, en el área de estudio las colinas son más accidentadas con inclinaciones mas pronunciadas, y su elevación natural del terreno no supera los 150 m (ver Foto 13).

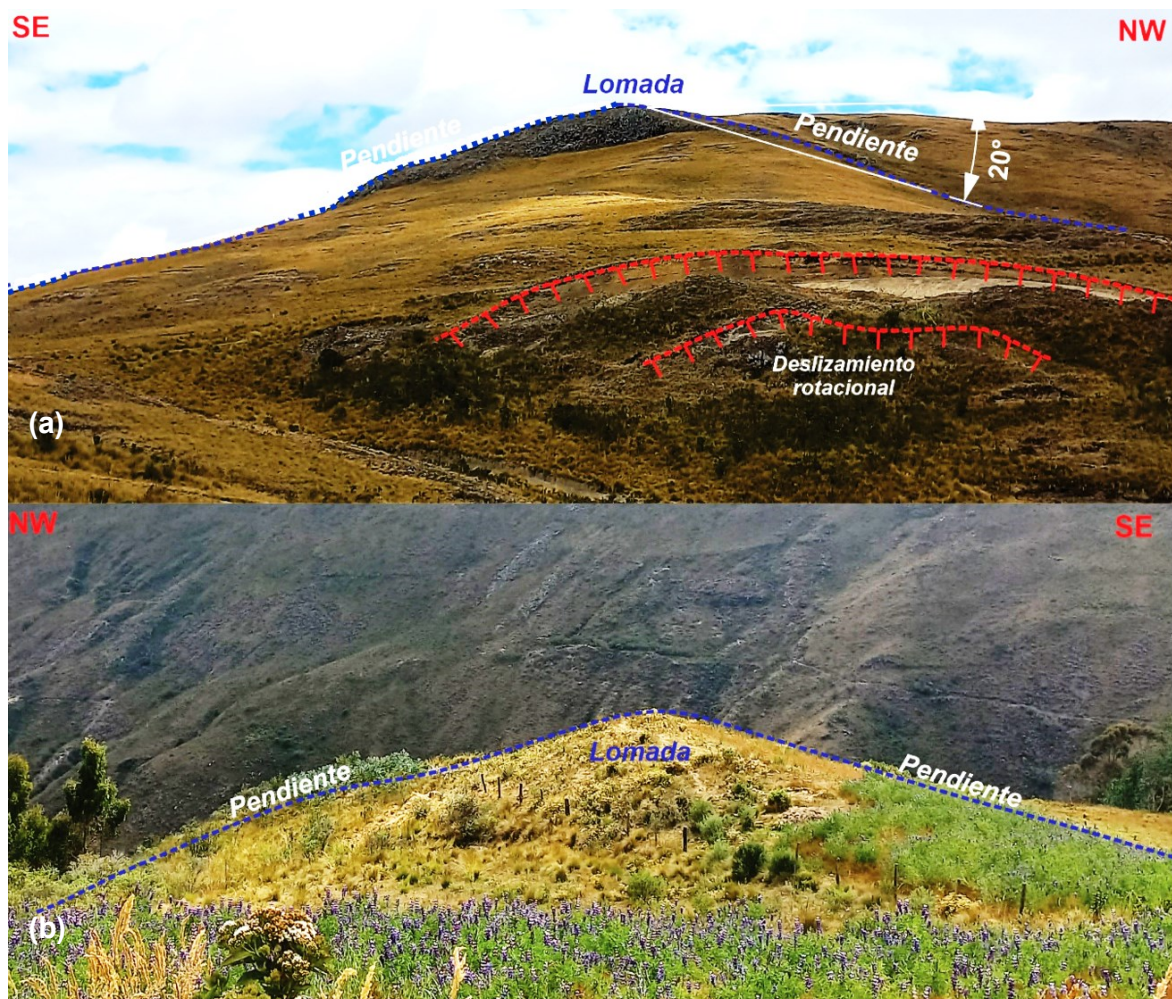


Foto 12. Lomadas ubicadas al SW del área de investigación. (a) Vista lomada sobre rocas areniscas, al mismo tiempo se aprecia un deslizamiento rotacional que tiene un eje de orientación hacia NE. (b) Vista de lomada con superficie suave ondulada cubierta por sembríos agrícolas.

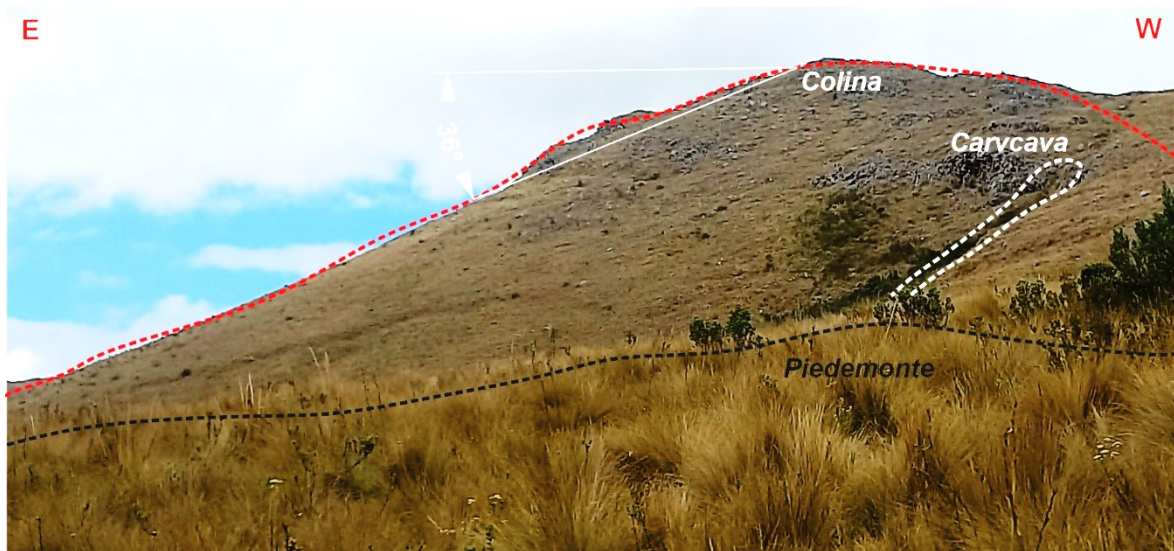


Foto 13. Vista de colina ubicada al SW del área de investigación, se observa en ella afloramientos de rocas areniscas, y de otras geoformas como cárcava y piedemonte.

Las geoformas típicas relacionadas a transporte de masas son los deslizamientos, el área tiene varios deslizamientos del tipo rotacional (ver Foto 14), con geometrías circulares hacia la corona del deslizamiento; los escarpes poseen medidas no mayores a un metro, estas geoformas están ubicadas sobre las laderas. Estas laderas denudacionales pueden contener deslizamiento, cárcavas, surcos o simplemente presentar inclinaciones pronunciadas mayores a los 35° (ver Fotos 15, 16 y 19).



Foto 14. Vista de deslizamientos rotacional ubicadas al SW del área de estudio, estos deslizamientos se encuentran en laderas que poseen inclinaciones mayores a los 25°.



Foto 15. Vista de geoformas perteneciente al ambiente denudacional, ladera, altiplanicie, piedemonte, ubicadas al NE del área de investigación.

Dentro de las geoformas con pendientes bajas o llanas tenemos a las planicies, que son superficies planas, estas están ubicadas en partes bajas del área de estudio, tienen extensiones menores a 1km^2 . Por otra parte, las altiplanicies que pertenecen a superficies de terreno relativamente elevados, presentan ondulaciones más bruscas, limitada por lo menos en un lado por un fuerte cambio de pendiente como laderas denudacionales (ver Fotos 15, 16, 17 y 18).



Foto 16. Vista de la geoforma altiplanicie y del cambio de pendiente de su superficie hacia su NW, donde se encuentra una ladera denudacional con un ángulo de inclinación mayor a 35° .



Foto 17. Vista tomada en el NE del área de investigación, donde se puede observar una planicie, que posee pendientes con ángulos menores a 5° , esta geoforma se encuentra sobre la Formación Farrat.

Los componentes del ambiente denudacional en el área de investigación es muy notorio como ya se pudo observar con la ilustración de las fotos presentadas en este ítem. En la Foto 19 se tiene una vista más panorámica, donde se puede observar más el arreglo o forma del relieve terrestre respecto a este ambiente, claro que hay que tener en cuenta que la estructura anticlinal Laderón es sin duda la que controla el origen de estas geoformas por la envergadura de afloramiento.

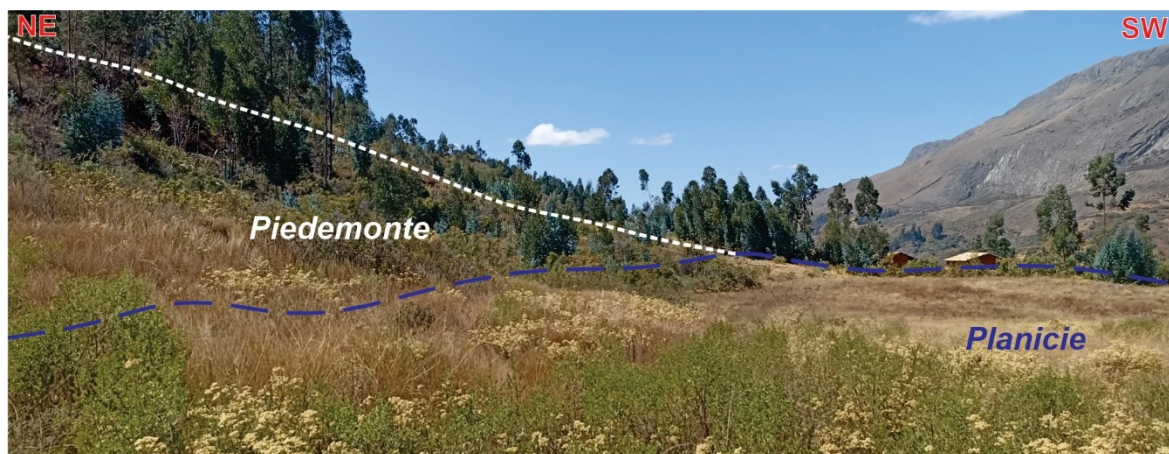


Foto 18. Geoformas ubicadas sobre la Formación Carhuaz hacia el NE del área de estudio, en estas geoformas se aprecia el cambio gradual de la pendiente y distinguir un piedemonte de una planicie.

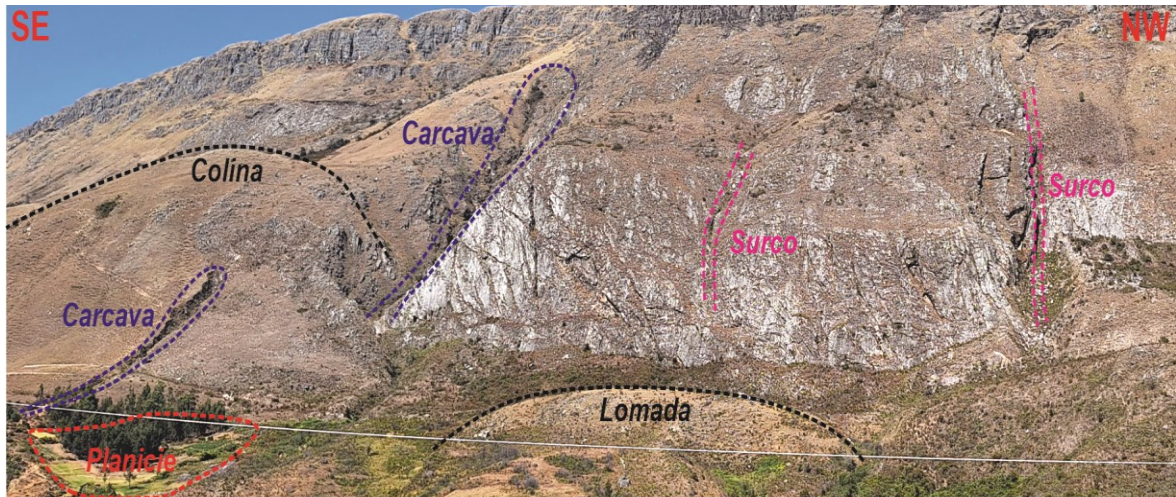


Foto 19. Vista panorámica ubicada hacia el NE del área y paralela al eje del anticlinal Laderón, en esta foto se puede apreciar distintas geoformas del ambiente dunudacional.

3.5.2. Componentes de Ambiente Fluvial

El ambiente fluvial está controlado por la acción del agua y el transporte de sedimentos sobre la superficie terrestre. Dentro del cual las geoformas principales son los valles tanto del tipo V como del tipo U (Foto 20), el valle tipo V se encuentra hacia SW y el valle tipo U se encuentra al NE del área, estos valles simbolizan que hacia el lado SW del flanco del anticlinal la erosión ha sido más significativa que hacia el lado del flanco NE.



Foto 20. (a) vista de valle en V, la erosión significativa ha sido sobre la Formación Santa.

(b) Vista de valle en U, la erosión significativa ha sido sobre las Formaciones Santa y Carhuaz.

Dentro del ambiente fluvial por lo general siempre se va encontrar terrazas, estas geoformas son superficies planas, en el área de estudio generalmente se presentan de forma estrecha y alargada al margen de las quebradas. El tipo de terrazas encontradas en área de estudio es aluvial o de acumulación (Foto 21), por lo general no son apareadas porque la incisión del río o la evolución lateral del cauce no fue simétrica o simultánea en ambos márgenes del valle (Ritter, 1986).



Foto 21. Vista de terrazas aluviales no apareadas, ubicadas al NE del área de estudio y sobre la Formación Carhuaz.

Otra geoforma típica de este ambiente son los abanicos aluviales, estos son depósitos producidos por el avance de residuos granulares que se extienden desde la base de una montaña hacia una zona llana. En el área de investigación se puede observar abanicos antiguos de tamaños grandes con una superficie lisa (ver fotos 22 y 23); y también abanicos jóvenes o también llamados conos de deyección que tiene superficies de depósitos recientes o que prestan aun corrientes activas (Foto 24). Por último, se considera como geoforma a los cauces activos (Foto 25), las cuales son superficies ocupadas por una corriente de agua, con trazos rectos a curvados.

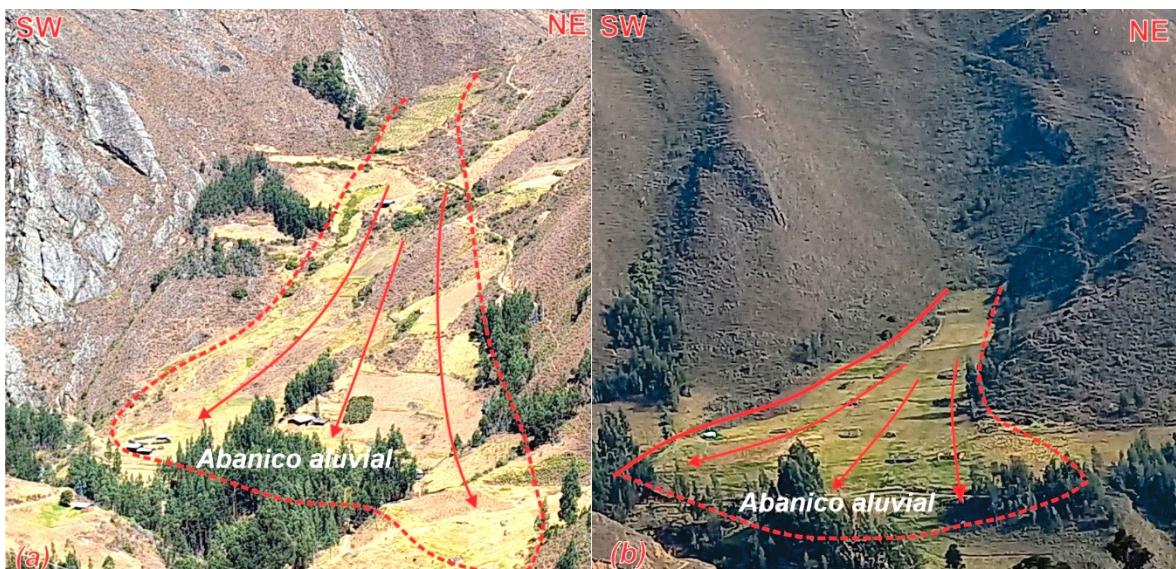


Foto 22. Vista de abanicos aluviales antiguos ubicados al NW, se observa una forma que se aproxima a un cono que se extiende radialmente hacia abajo.

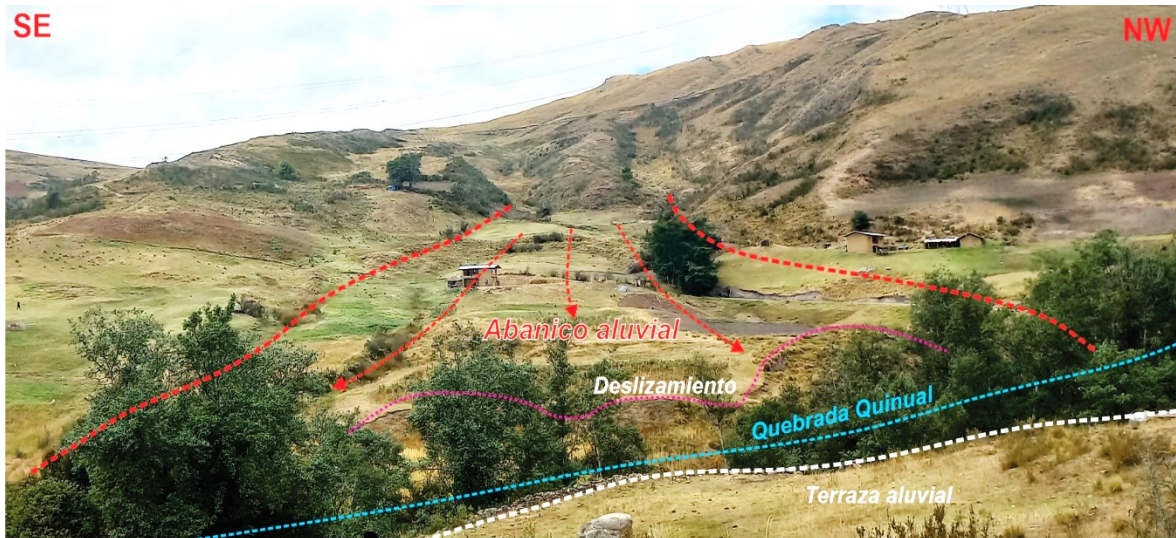


Foto 23. Vista ubicada al SW del área de estudio, en la cual se aprecia un abanico aluvial antiguo de superficie lisa y a la parte inferior en su zona distal se ha formado pequeños deslizamientos.

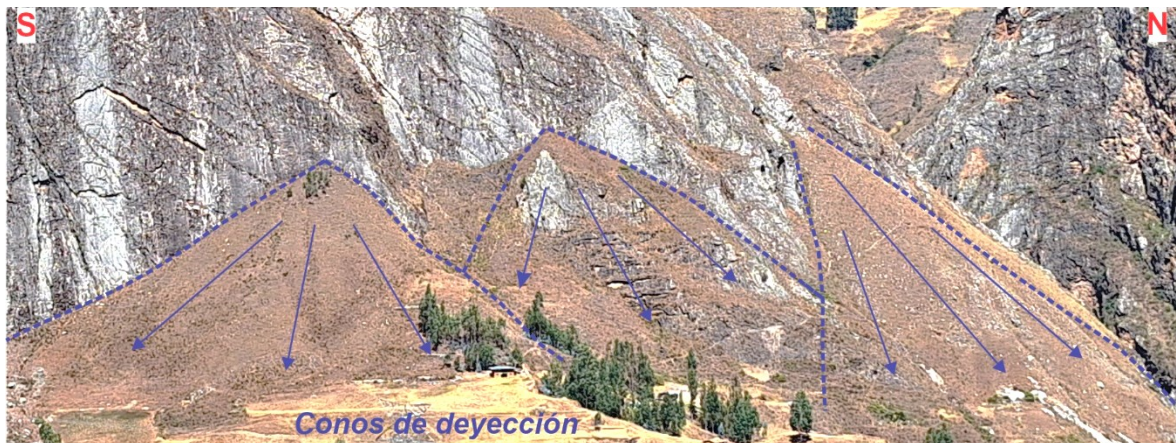


Foto 24. Vista de tres conos de deyección jóvenes, donde se aprecia depósitos recientes y activos.



Foto 25. Cauce activo perteneciente a la quebrada Quinual.

3.6. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.6.1. Morfogénesis

Respecto a la morfogénesis, que se encarga de estudiar el origen y evolución de las geoformas, en el área de investigación las formas del relieve se deben a procesos geomorfológicos endógenos y exógenos. Los procesos endógenos están dados por la formación de estructuras geológicas como plegamientos, fracturas y fallas; y los procesos exógenos están dados por procesos denudacionales y procesos de agradación.

El área de investigación ubicada en la cordillera de los andes ha sido afectado por esfuerzos tectónicos compresionales, las cuales provocaron plegamientos de las Formaciones geológicas del cretácico inferior, longitudinalmente los plegamientos en el área presentan ejes de charnela desde el NW a SE, la cual son paralelas a dos fallas con la misma orientación; interpretando de esta manera que estas estructuras se formaron en un primer evento de compresión de esfuerzos tectónicos (σ_1'). El área de estudio también presenta fallas de rumbo, estas fallas tienen orientación de SW a NE, la cual se ha observado que ha cortado los plegamientos, en algunos casos es muy notorio el daño producido por la falla (Damage zone), se ve claramente como el plegamiento se ha dividió en dos bloques y desplazándose en sentidos contrarios (Ver Foto 6); interpretando de esta manera que estas fallas de rumbo se han desarrollado en un segundo evento de esfuerzos tectónicos compresivos (σ_1).

Corroborando a esta interpretación de los dos esfuerzos tectónicos compresivos, se encuentran las fracturas, de las cuales hay cuatro familias de diaclasas bien identificadas, siendo dos familias originadas por los esfuerzos tectónicos σ_1' , y las otras dos familias originadas por los esfuerzos tectónicos σ_1 , y teniendo la teoría de Anderson (1951), donde manifiesta que los esfuerzos tectónicos tienen orientación en dirección al ángulo agudo que se forma por la intersección de dos familias de diaclasas (Figura 14).

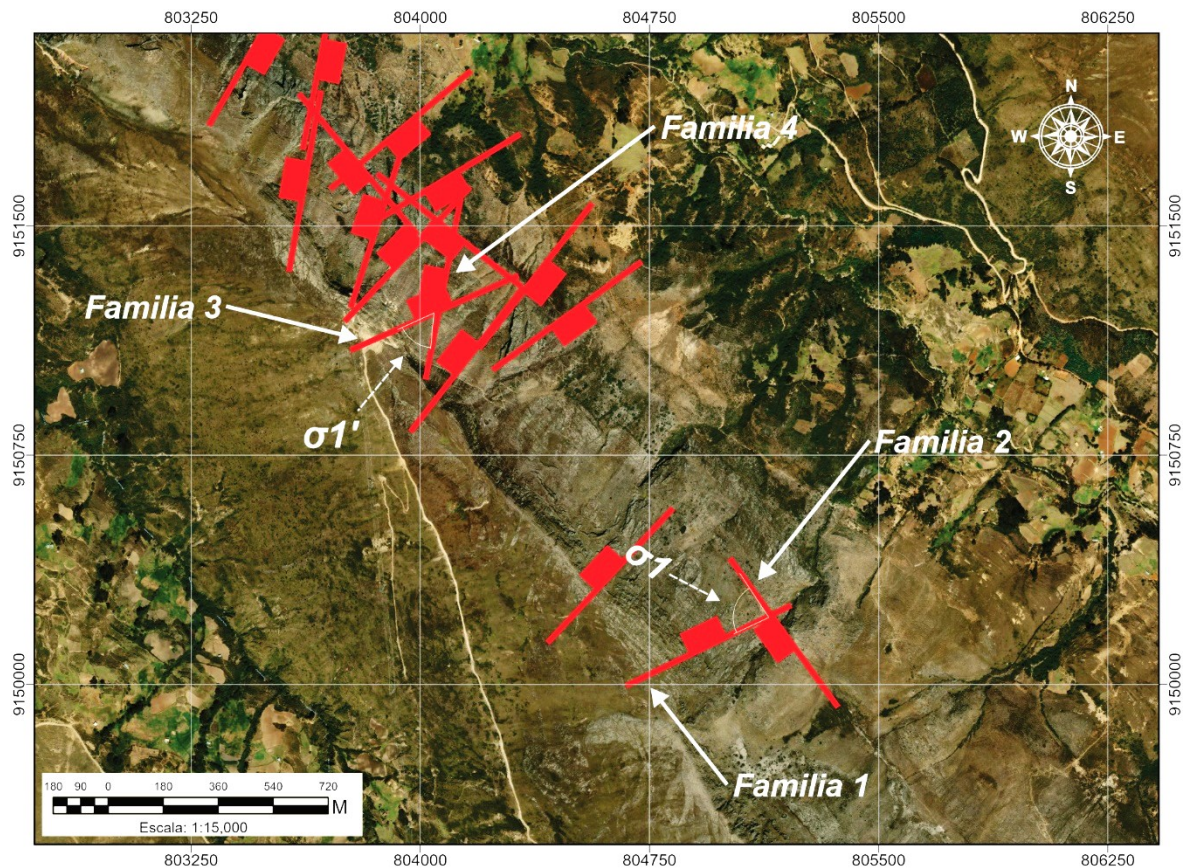


Figura 14. Imagen satelital donde las líneas rojas representa a familias de fracturas. La cual por teoría de Anderson (1951) la intersección en dirección al ángulo agudo es el sentido de orientación de los esfuerzos tectónicos, en este caso los esfuerzos son: σ_1 de NW a SE y σ_1' de SW a NE.

Por otra parte, los procesos de geodinámica externa o procesos exógenos en el área de investigación son denudativo y agradacional, como a continuación se describe en la Tabla 6.

Tabla 6. Agentes y procesos geomorfológicos exógenos del área de investigación.

Fuerza o Agente	Procesos Geomorfológicos	
	Denudativo	Agradacional
Agua, hielo y temperatura	Meteorización de las rocas.	Principios de formación de suelos.
Lluvia	Erosión pluvial	Sedimentación coluvial
Escorrentía	Erosión fluvial	Sedimentación aluvial
Gravedad	Remoción de masas	Sedimentación coluvial

Fuente: Villota (2015).

3.6.2. Morfometría

La unidad de referencia del análisis morfométrico es la pendiente del terreno. Es por ello que el análisis de las pendientes de las componentes geomorfológicas del área de investigación se elaboró a través de los softwares de sistema de información geográfica.

Los rangos de pendientes para clasificar las unidades morfogenéticas son basadas en el estudio de Rodríguez (2016), la cual se muestra en la Tabla 7. Las áreas de cada componente morfogenético según la pendiente se obtuvieron por medio del plano de pendientes (Ver plano de pendientes: P-03).

Tabla 7. Rango de pendientes asociadas a las unidades morfogenéticas.

Unidades morfogenéticas	Pendiente
Planicies	0° - 8°
Lomadas	8° - 20°
Laderas	20° - 50°
Escarpes	>50°

Fuente: Rodríguez (2016).

Asimismo, se desarrolló el análisis de las formas de las unidades geomorfológicas, todo ello con la ayuda del software AutoCAD, se elaboraron dos secciones morfométricas representativas del área; en primera instancia se hizo la toma fotográfica, para después en el software realizar trazos de segmentos continuos sobre el contorno de la geoforma, de esa manera determinara su tipo de segmento y la variación de sus pendientes.

Se elaboraron dos cortes morfométricos que se muestran en las figuras 15 y 16. Corte A-A' con orientación de NW a SE (Figura 15) y B-B' con orientación de SE a NW (Figura 16).

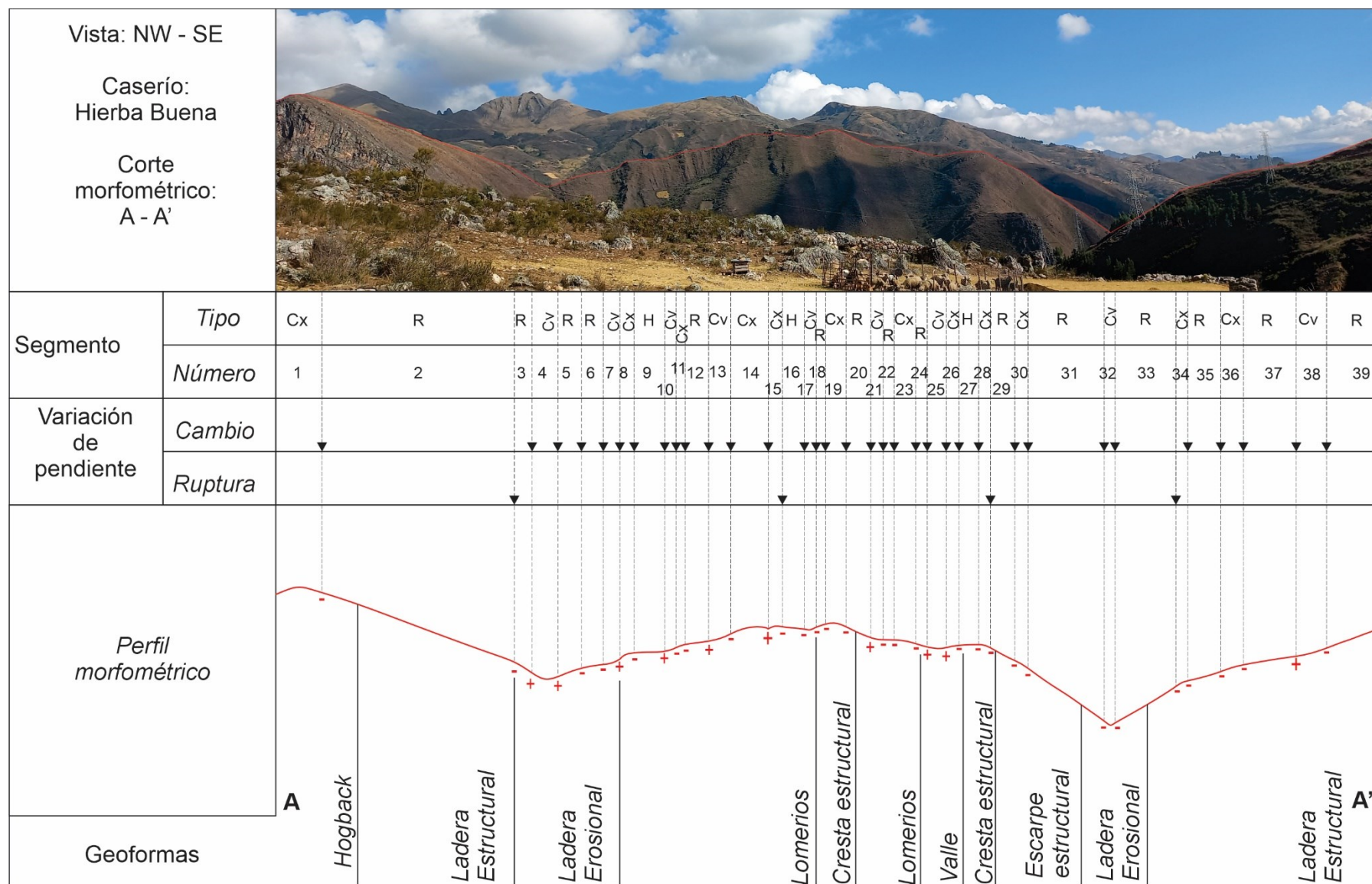


Figura 15. Corte morfométrico A-A' al NW de la comunidad Hierba Buena.

En esta sección morfométrica (ver plano C-01) hay 39 segmentos de los cuales: 15 son segmentos rectilíneos, indicando que a lo largo de la inclinación de la pendiente no ha sufrido cambios considerables producto a la erosión, 09 son segmentos cóncavos presentes en aquellas porciones de terreno inclinado de pendiente progresivamente creciente en altura, 12 convexos asociado a porciones de terreno que tienen una pendiente progresivamente descendente con la altura, y 03 son segmentos horizontales indicando que parte de la geoforma ha sufrido una erosión homogénea. Respecto a la variación de la pendiente se observa 34 cambios porque es el punto de inflexión entre dos segmentos y 04 rupturas porque si existe uno de inflexión neta.

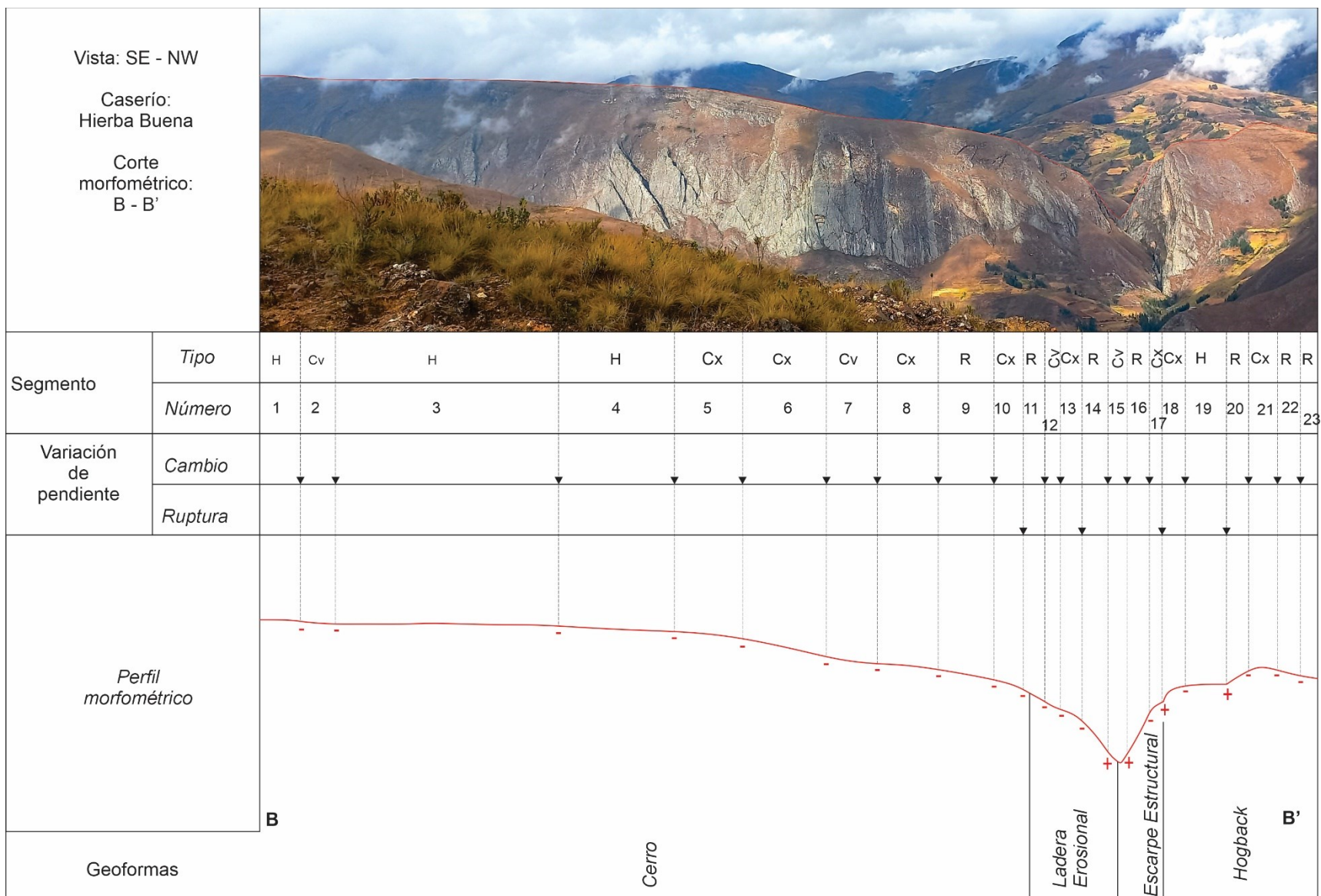


Figura 16. Corte morfométrico B-B' al oeste de la comunidad Hierba Buena.

En esta sección morfométrica (ver plano C-02) hay 23 segmentos de los cuales: 07 son segmentos rectilíneos, indicando que a lo largo de la inclinación de la pendiente no ha sufrido cambios considerables producto a la erosión, 04 son segmentos cóncavos presentes en aquellas porciones de terreno inclinado de pendiente progresivamente creciente en altura, 08 convexos asociados a las porciones de terreno que tienen una pendiente progresivamente descendente con la altura, y 04 son segmentos horizontales indicando que parte de la geoforma ha sufrido una erosión homogénea. Respecto a la variación de la pendiente se observa 18 cambios porque es el punto de inflexión entre dos segmentos y 04 rupturas porque si existe uno de inflexión neta.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. MODELO DE EVOLUCIÓN

Las formaciones geológicas que alberga el área de investigación son del cretácico inferior, estas se formaron por el proceso de sedimentación. Para luego en el mioceno ser deformados por procesos tectónicos que tuvieron esfuerzos con orientaciones de SW-NE en una primera instancia pertenecen a la fase tectónica INCA I, II y III (Bazán, 2018), formando plegamientos como el pliegue Laderón en el caso del área de estudio y fallamiento paralelo al eje de los pliegues. Después la orientación de los esfuerzos cambio a NW-SE en el transcurso de la fase tectónica IV, produciendo mayor fallamiento y levantamiento de la cordillera que se ve reflejada en el aumento de la pendiente, la cual conlleva a producir mayores zonas denudacionales.

Durante el Pleistoceno y el Holoceno en el área de investigación se desarrollaron diversos procesos exógenos los cuales modelaron de manera significativa el paisaje actual. Estos procesos fueron impulsados principalmente por agentes erosivos como el agua, la variación de temperatura, la precipitación pluvial, el hielo, las escorrentías superficiales y la acción del viento. La interacción continua de estos factores provocó fenómenos de meteorización, erosión, transporte y sedimentación, los cuales transformaron progresivamente la morfología del terreno.

En la Figura 17, se observa el modelo 3D geológico del área de investigación, donde se puede observar como las formaciones geológicas fueron deformadas por los procesos tectónicos y ser parte de la forma del relieve terrestre actual.

En la Figura 18, se puede observar la imagen satelital sobre el modelo 3D del área de investigación, para tener una idea visual más clara de cómo se encuentra los componentes geomorfológicos en el área de estudio.

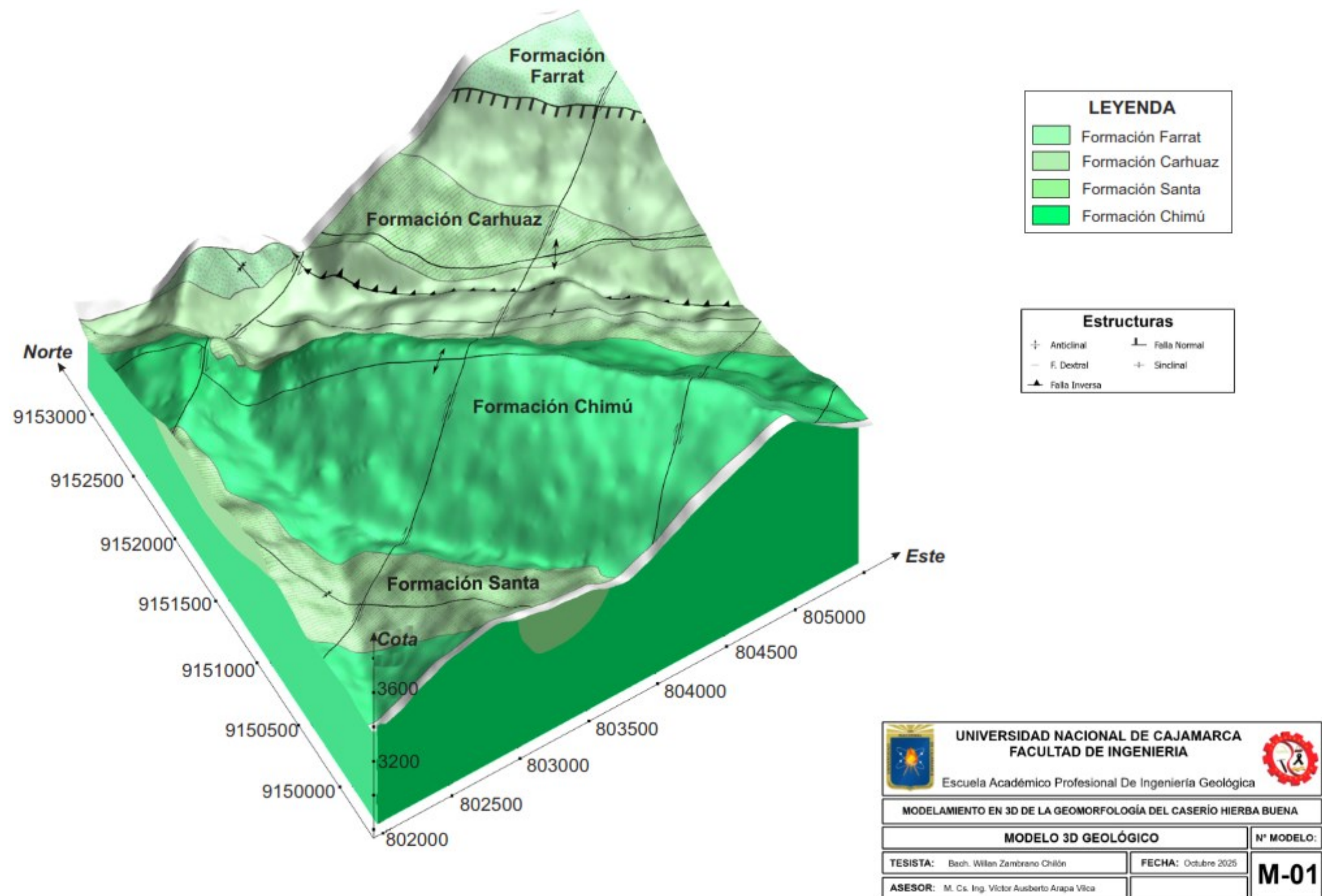


Figura 17. Modelo 3D geológico.

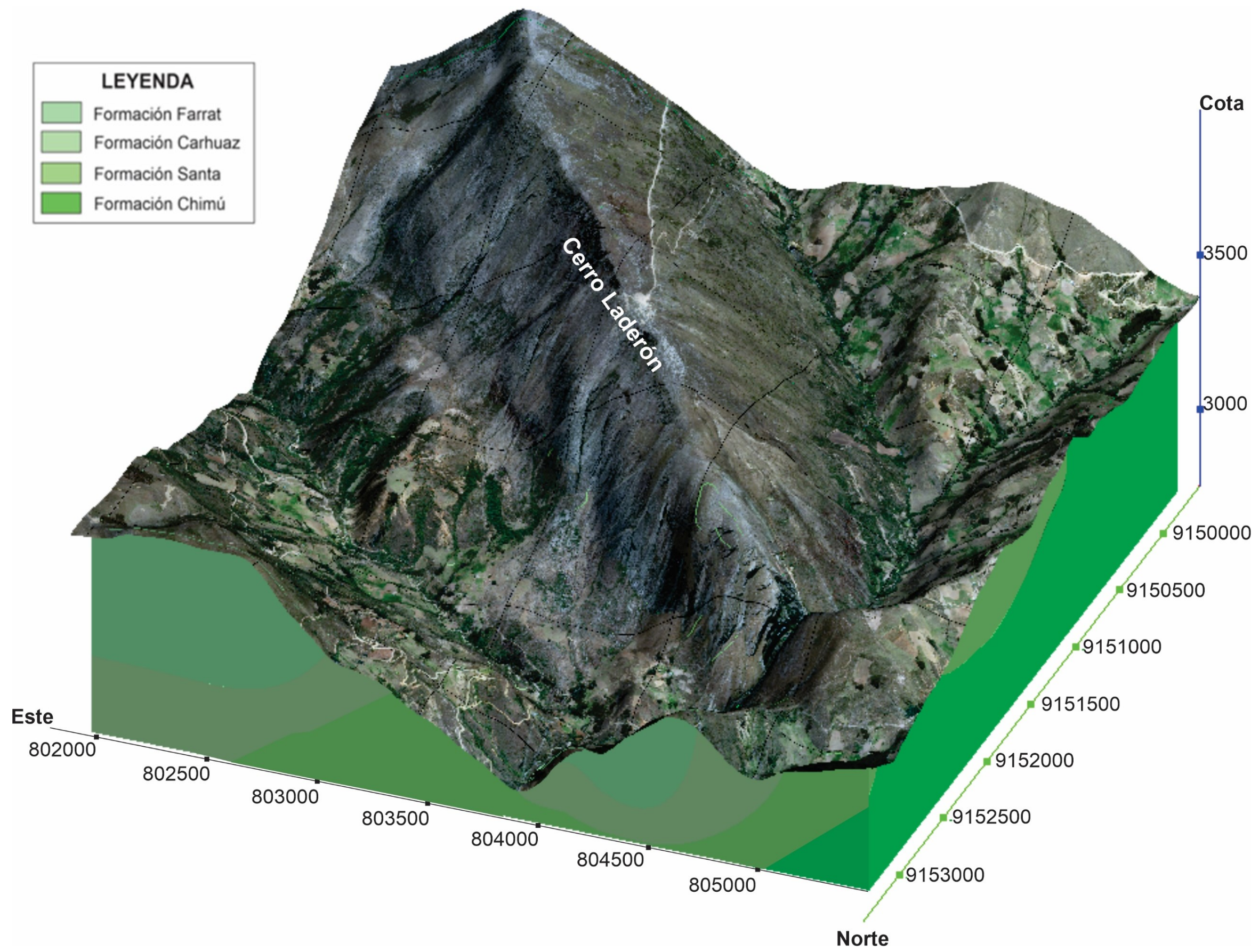


Figura 18. Modelo 3D satelital.

4.2. MODELAMIENTO GEOMORFOLÓGICO

4.2.1. Ambientes Morfogenéticos

El área de investigación está conformada por varios componentes geomorfológicos los cuales han sido moldeados y modificados a lo largo del tiempo geológico por la acción de procesos endógenos, los cuales han dado lugar al ambiente estructural; asimismo, los procesos exógenos han intervenido de manera continua, generando los ambientes denudacional y fluvial que caracterizan el relieve actual del área. La figura 20 muestra el modelo 3D de ambientes morfogenéticos.

El ambiente estructural ocupa un área de 557.24 hectáreas, dentro de las principales geoformas está el anticlinal Laderón generado por procesos geodinámicos internos.

El ambiente denudacional ocupa un área de 571.00 hectáreas, siendo el ambiente con mayor extensión, este ambiente ha modificado el relieve y lo sigue haciendo hasta la actualidad producto de procesos de erosión, meteorización y movimientos de masa. Por último, el ambiente fluvial ocupa 96.94 hectáreas en cual se identificaron terrazas, cauces y sobre todo abanicos o conos de deyección.

Tabla 8. Áreas de los Ambientes Morfogenéticos.

Ambiente morfogenético	Área (ha)	Porcentaje (%)
Estructural	557.24	46.61
Denudacional	571.00	45.48
Fluvial	96.94	7.91

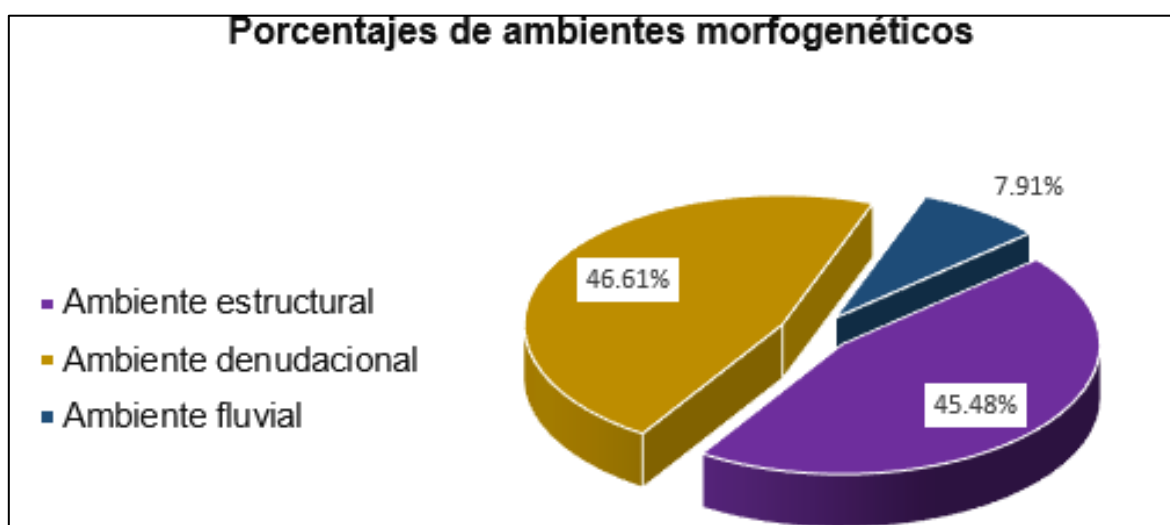


Figura 19. Gráfico de porcentajes de los ambientes.

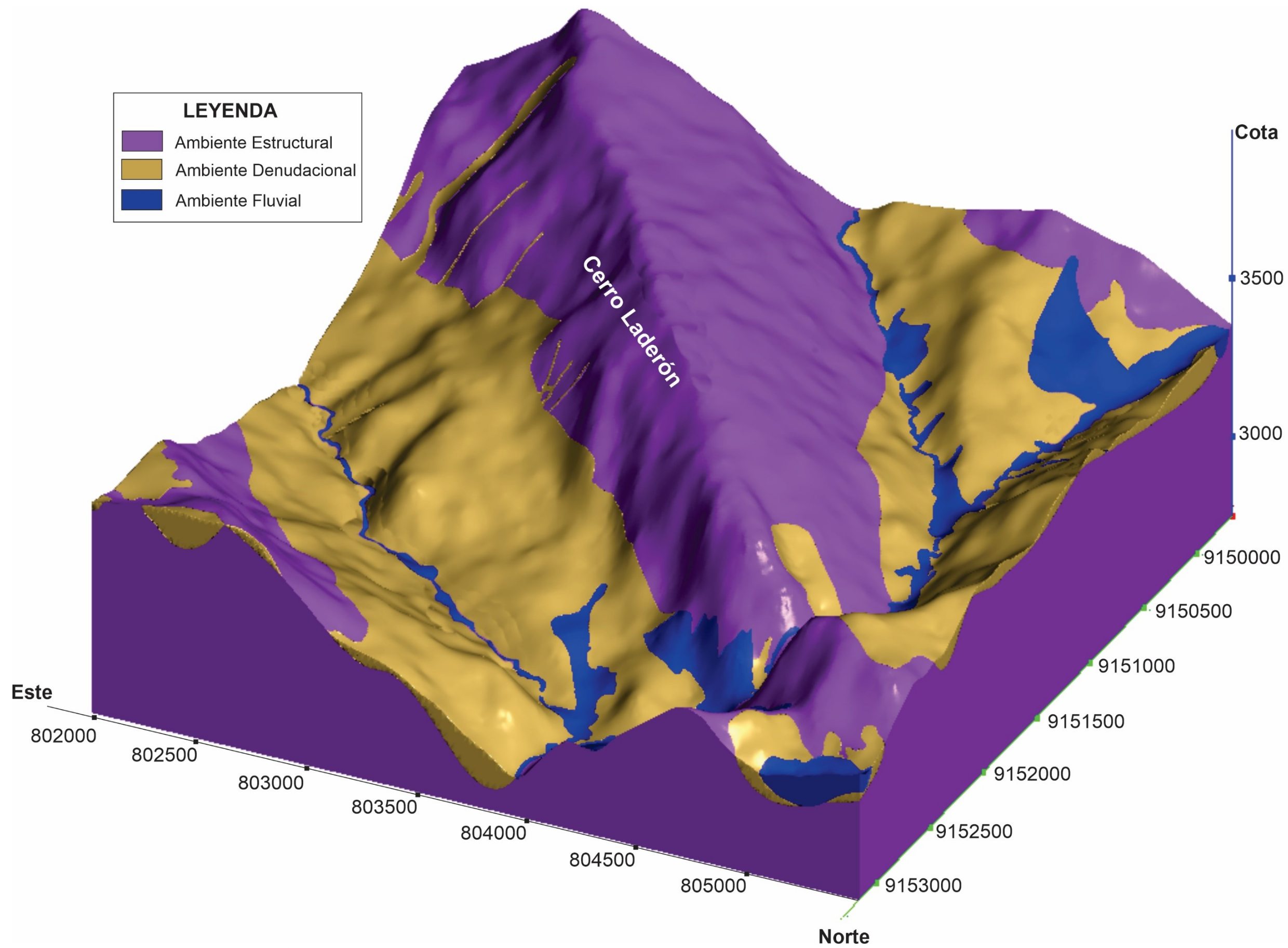


Figura 20. Modelo 3D de ambientes morfogenéticos.

4.2.2. Componentes Geomorfológicos

Los componentes geomorfológicos presentes en el área de investigación (Figura 22), se han desarrollado debido a los procesos endógenos y exógenos. Los componentes identificados en el área de estudio se describen en la Tabla 9.

Tabla 9. Áreas de los componentes geomorfológicos en el área de estudio.

Ambiente	Geoforma	Simbología	Área (ha)	Porcentaje (%)
Estructural	Cerro	Sce	462.71	37.77
	Escarpe estructural	See	1.70	0.14
	Flanco	Sfl	92.83	7.58
Denudacional	Altiplanicie	Dal	10.02	0.82
	Cárcava	Dca	7.86	0.64
	Colinas	Dco	44.63	3.64
	Deslizamiento	Dde	15.72	1.28
	Laderas	Dla	157.74	12.88
	Lomadas	Dlo	204.06	16.66
	Piedemonte	Dpm	99.23	8.10
	Planicie	Dpl	30.98	2.53
	Surco	Dsu	0.76	0.06
	Abanico aluvial	Fal	26.59	2.17
Fluvial	Cauce	Fca	23.93	1.95
	Cono de deyección	Fcd	10.04	0.82
	Terraza aluvial	Ftal	14.39	1.17
	Terraza de acumulación	Ftac	21.99	1.79

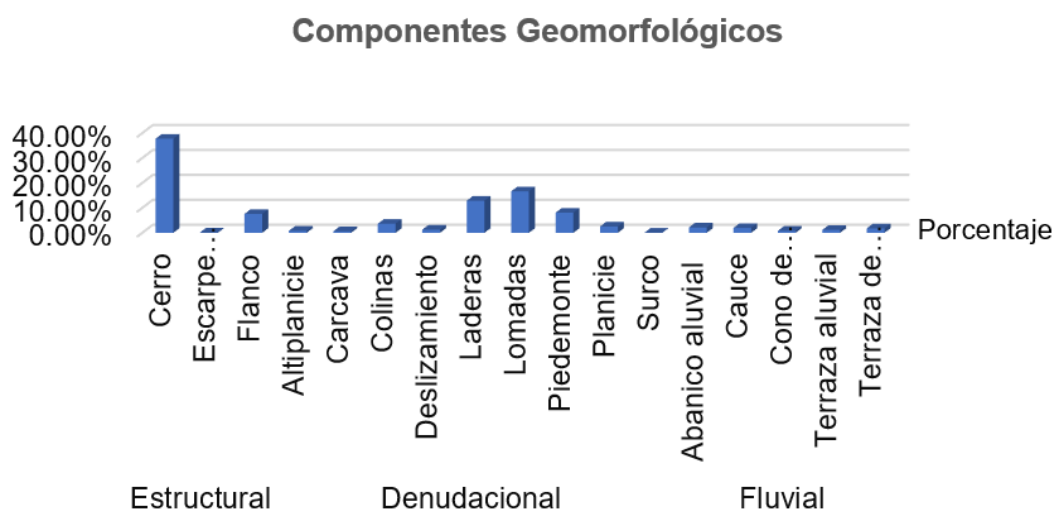


Figura 21. Gráfico de porcentajes de componentes geomorfológicos.

Leyenda			
Ambiente morfogenético	Componente geomorfológico	Simbología	
Estructural	Cerro	Sce	
	Flanco	Sfl	
	Escarpe estructural	See	
	Anticlinal	Spa	↔↔↔
	Sinclinal	Sps	↔↔↔
	Falla Normal	Sfn	┆┆┆┆┆
	Falla Inversa	Sfi	▲▲▲
	F. Dextral	Sfd	↗↗↗
	Fractura	Sfr	---
Denudacional	Planicie	Dpl	
	Altiplanicie	Dal	
	Piedemonte	Dpm	
	Laderas	Dla	
	Lomadas	Dlo	
	Colinas	Dco	
	Deslizamiento	Dde	
	Carcava	Dca	
	Surco	Dsu	---
Fluvial	Cauce	Fca	
	Abanico aluvial	Fal	
	Cono de deyección	Fcd	
	Terraza de acumulación	Ftac	
	Terraza aluvial	Ftal	

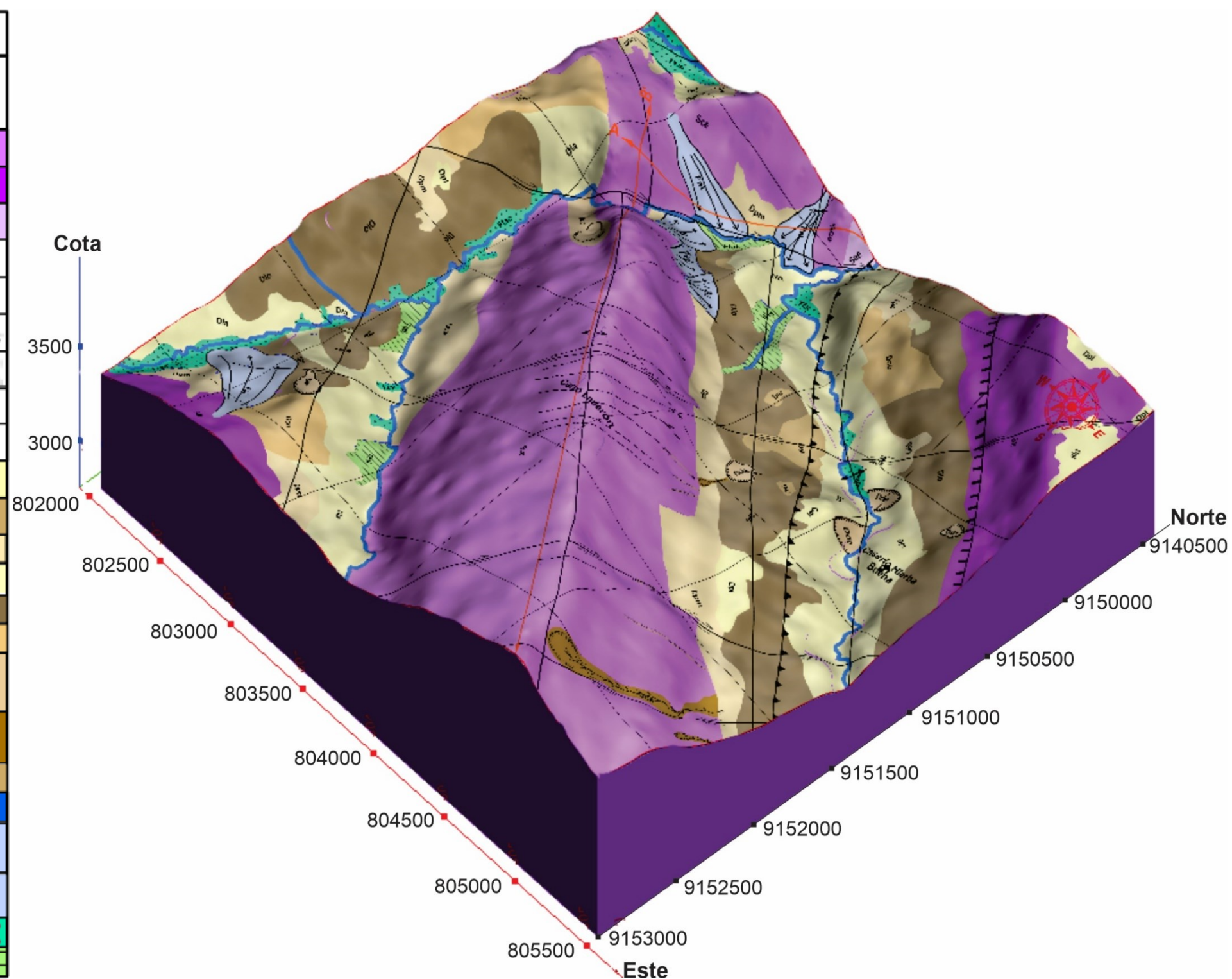


Figura 22. Modelo 3D de los componentes geomorfológicos.

4.2.3. Morfometría

Respecto a la morfometría, el área de los componentes geomorfológicos está asociadas a la pendiente (Ver plano de pendientes: P-03), en la cual la pendiente con un grado de inclinación de 20°-50° es el más resaltante en el área de estudio. A continuación, se detalla en tabla y gráfico, la áreas y porcentajes de la pendiente en el área.

Tabla 10. Área de las pendientes.

Pendiente	Área (ha)	Porcentaje (%)
0° - 8°	54.55	4.453
8° - 20°	500.61	40.866
20° - 50°	654.09	53.395
>50°	15.76	1.287

Fuente: Rodríguez (2016).

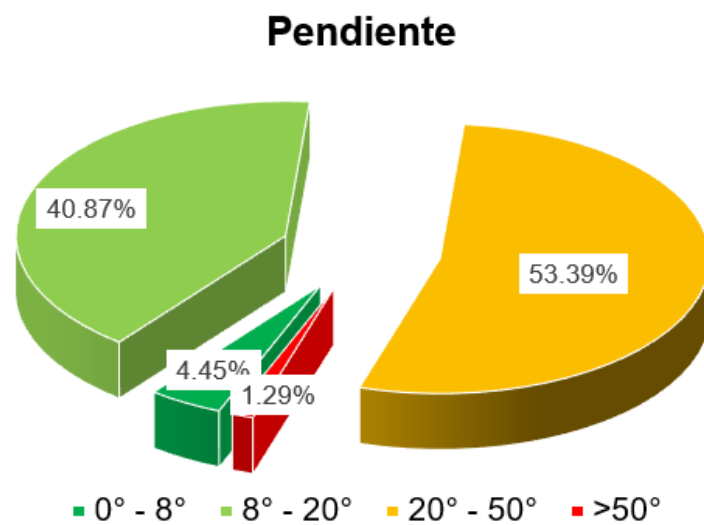


Figura 23. Gráfico de porcentajes de la pendiente.

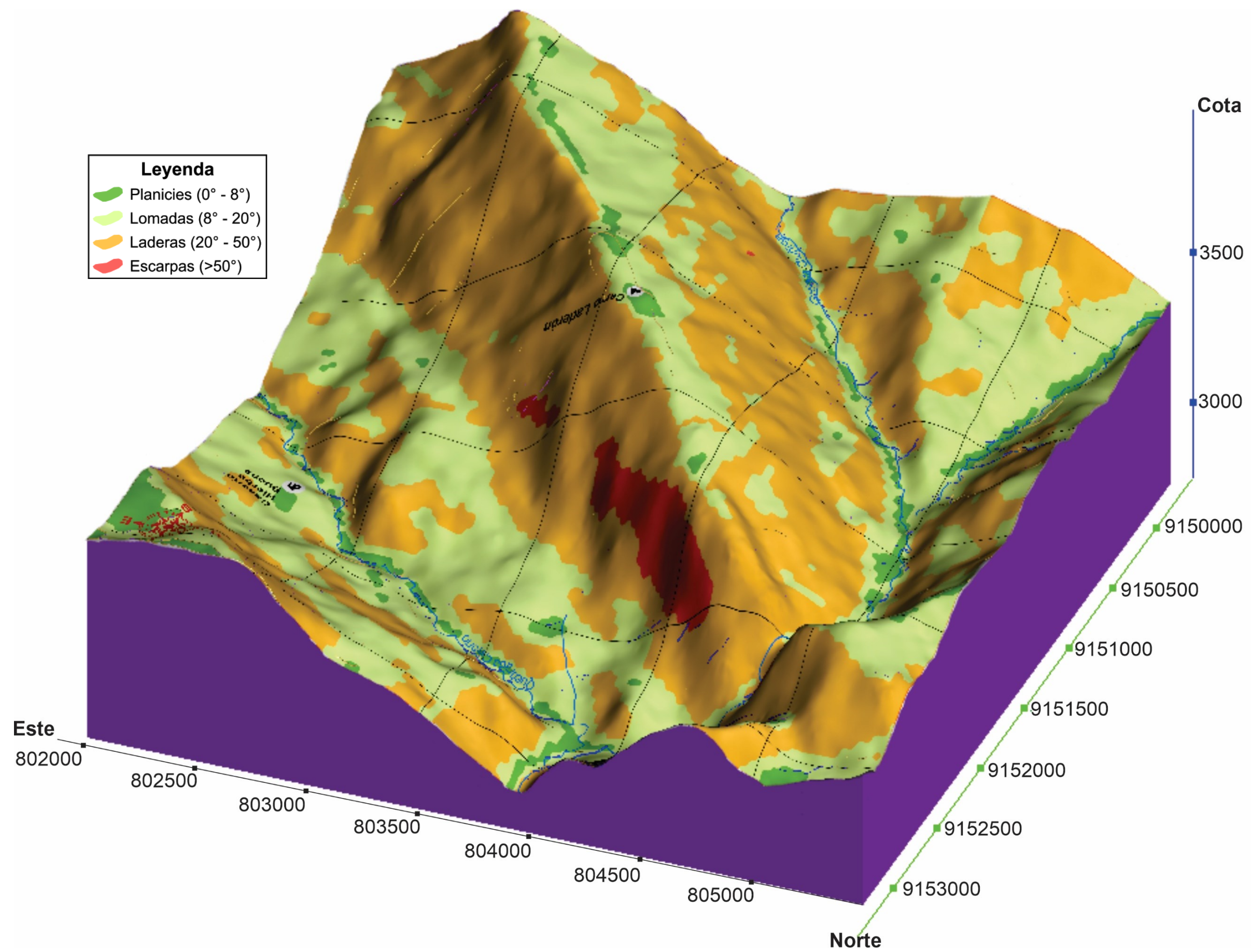


Figura 24. Modelo 3D de pendientes.

4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Con la investigación se ha verificado que el área que los procesos endógenos han originado el ambiente estructural, resaltando el plegamiento anticlinal denominado “Laderón” por su envergadura y la conservación de su geometría en superficie, además de otros componentes como flancos y escarpe estructural pertenecientes a este ambiente. Con respecto a los procesos exógenos, es importante destacar la presencia de los ambientes denudacional y fluvial, estos se encuentran representados por diversos componentes geomorfológicos, tales como altiplanicies, cárcavas, colinas, deslizamientos de ladera, lomadas, piedemontes, planicies, surcos, abanicos aluviales, cauces, conos de deyección, terrazas aluviales y terrazas de acumulación. Estos rasgos del relieve son el resultado de la acción combinada de agentes exógenos como el agua, el hielo, las variaciones de temperatura, la precipitación, la esorrentía y la fuerza de la gravedad. Validando así la hipótesis inicial.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Se realizó el modelamiento 3D de la geomorfología del caserío Hierba Buena, donde se desarrolló el cartografiado de las geoformas y los modelos 3D de los ambientes morfogenéticos, componentes geomorfológicos y de pendientes.

Se identificó las estructuras geológicas, teniendo como estructura principal el anticlinal Laderón el cual aflora su geometría en la Formación Chimú. Además, se encontraron indicadores cinemáticos de fallas paralelas al eje del anticlinal. Y también se identificaron 4 familias de diaclasas, éstas producto de dos esfuerzos tectónicos (σ_1' y σ_1).

Se identificaron y describieron las geoformas, de la cual predominan: los cerros con un área de 462.71ha, lomadas con 204.06ha, ladera con 157.74ha, piedemonte con 99.23ha y flacos con 92.83ha

Se identificó y describió los ambientes morfogenéticos, la cual son: ambiente estructural con un área de 557.24ha, el ambiente denudacional con 571.00ha y el ambiente fluvial con 96.94ha.

Se elaboró el modelo 3D de los componentes geomorfológicos, dentro de estos tenemos: Escarpe estructural, Flanco, Altiplanicie, Cárcava, Colinas, Deslizamiento, Laderas, Lomadas, Piedemonte, Planicie, Surco, Abanico aluvial, Cauce, Cono de deyección, Terraza aluvial.

5.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda a la Municipalidad Distrital de Cachachi realizar estudios más detallados a una escala de 1/2500 para un ordenamiento territorial, en la evaluación de paisajes relacionados con riesgos naturales y antrópicos.

Se recomienda a profesionales en la investigación complementar el modelamiento geomorfológico con otras ramas de la geología como geotecnia, hidrología e hidrogeología para correlacionar formas de relieve con litología, estructuras, propiedades de los materiales, analizar escorrentía, drenajes, zonas de recarga y susceptibilidad de inundaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Allaby, M; 2008. Dictionary of earth sciences (3er ed.). Oxford University Press Inc. Ney York, The United States.
- Álvarez et al; 2018. Estudio Temático Geomorfología Las Piedras - Madre de Dios. Municipalidad Distrital Las Piedras. Madre de Dios.
- Anderson, E.M.;1951. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain. Oliver and Boyd
- Bazán. O; 2018. Fallamiento en bloques y desacople cortical en la deflexión de Cajamarca durante la tectónica andina. SGP. Cajamarca
- Bishop et al.; 2012. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: concepts, issues and research. Geomorphology 136, 5–26.
- Calderón. M; 2022. Caracterización geológica y geomorfológica en la microcuenca de la laguna Yahuarcocha, distrito de Cajabamba. UNC. Cajamarca.
- Carvajal. H; 2012. Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia. Bogotá: INGEOMINAS.
- Chiroque. C; 2016. Caracterización geodinámica y modelamiento del deslizamiento - Flujo Yanacolpa en el distrito de Parobamba, provincia de Pomabamba, región Ancash. UNP. Piura.
- Chorley. R & Kennedy. B; 1971. Physical Geography. A Systems Approach. Prentice Hall, London, 370 pp.
- DÁVILA. J; 2011. Diccionario Geológico. INGEMET. Perú.
- Espinoza. L; 2017, Caracterización Geomorfológica para la Estimación General de

Riesgo de Inundación en el Municipio de Tlacotalpan Veracruz. Universidad Autónoma De México. México

Frodeman. R; 1995. Geological reasoning: Geology as an interpretive and historical science. GSA Bulletin 107 (8), 960{968.

García. D; 2022, Caracterización geomorfológica del centro Poblado de Tinyayoc - San Marcos. UNC. Cajamarca.

Gómez. J; 2017. Evaluación geodinámica y modelamiento geotécnico del deslizamiento de madrigal – Arequipa. UNMSM. Lima.

Goudie. A; 2004. Encyclopedia of Geomorphology. Routledge. London.

Hugget. R; 2003. Fundamentals of Geomorphology. Routledge. London, 342 págs.

Huggett. R; 2011. Fundamentals of Geomorphology. Tercera edición. Routledge. London.

Huggett. R; 2017. Fundamentals of Geomorphology. Fourth edition. Routledge. London.

Jennings. J; 1973. Any Milleniums today, lady. The geomorphic bandwaggon parade. Australian Geographical Studies, 11, 115-133.

Kennedy. A; 2004. Systems in Geomorphology. En Goudie, A.S. (Ed.): Encyclopedia of Geomorphology. Routledge. London, 1031-1033.

Mallet. J; 2002. Geomodeling. Oxford University Press. London.

Mark, D & Smith, B; 2004. A science of topography: from qualitative ontology to digital representations. In M. P. Bishop and J. F. Shroder (eds) Geographic Information Science and Mountain Geomorphology, pp. 75–97. Berlin:

Springer Verlag.

- Napieralski. J & Nalepa. N: 2010. The application of control charts to determine the effect of grid cell size on landform morphometry. *Computers and Geosciences* 36, 222–230.
- National Research Council; 2010. *Landscapes on the Edge: New Horizons for Research on the Earth's Surface*. National Academies Press, Washington, D.C, 164 pp.
- Noriega. S; 2016. *Geomorfología tectónica del noroccidente de la cordillera central, Andes del norte*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Pike. R; 2000. Geomorphometry – Diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography* 24(1), 1–20.
- Ramonell. C; 2021. *Geomorfología y morfodinámica de la planicie aluvial del río Paraná en su tramo medio*. Universidad Nacional De La Plata. Buenos Aires.
- Rhoads. B; 2013. Process in Geomorphology. In *Treatise on Geomorphology* (Vol. 1, pp. 190–204). Elsevier. EEUU.
- Saklani. P; 2008. *Glossary of structural geology and tectonics*. Satish serial publishing house. Delhi, India.
- Scheidegger. A; 1961. *Theoretical Geomorphology*. Springer. Berlin, 333 págs.
- Shao et al.; 2011. 3D geological modeling and its application under complex geological conditions. School of Geosciences. Yangtze University. China
- Slaymaker. O; 2009. The future of geomorphology. *Geography Compass* 3, 329–49.
- Strahler, A; 1980. *Systems theory in physical geography*. University of California.

- Terrones. D; 2023. Caracterización geomorfológica del distrito de Magdalena, caserío La Viña y Huaquillas. UNC. Cajamarca.
- Villota. H; 2005. Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras. Bogotá.
- Zinck. J; 2012. Geopedologia. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation. Países Bajos.

ANEXOS

ANEXO 01: PLANOS

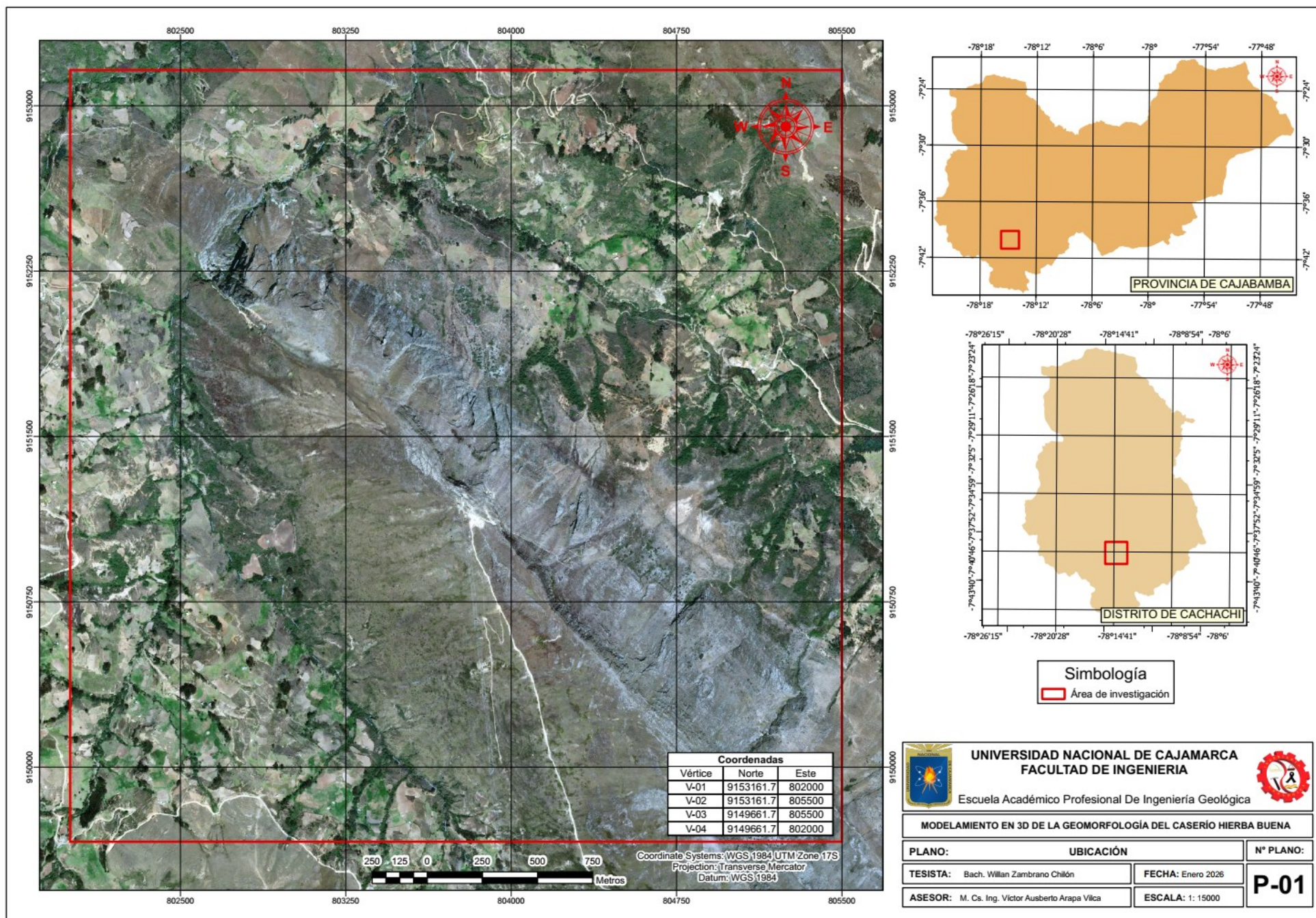
Plano N° P-01	Ubicación
Plano N° P-02	Modelo Digital de Elevaciones
Plano N° P-03	Pendientes
Plano N° P-04	Geológico
Plano N° P-05	Geomorfológico

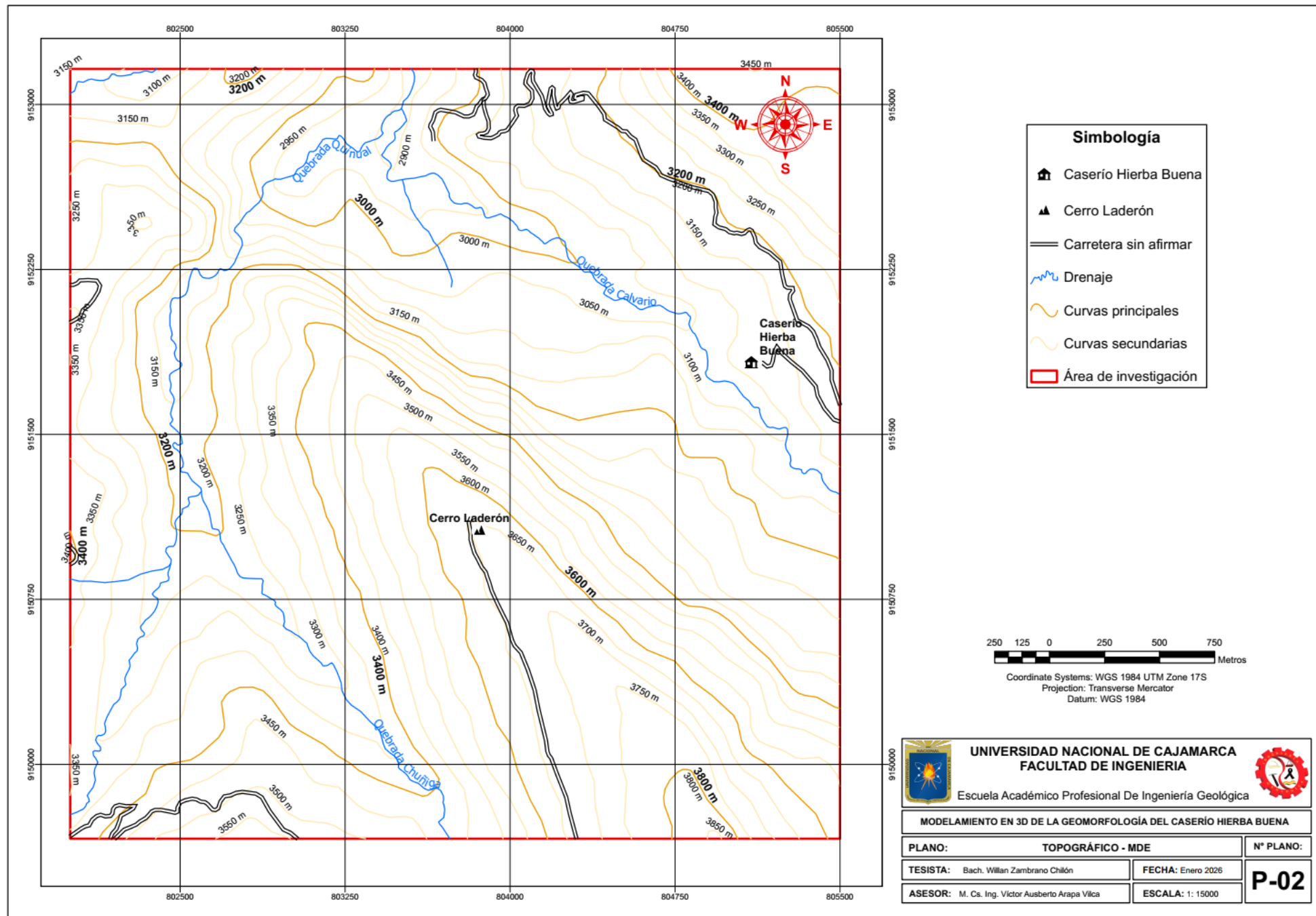
ANEXO 02: PERFILES:

Perfiles Morfométricos

ANEXO 03: SECCIONES:

Secciones Geológicas





Simbología

- Caserío Hierba Buena
- Cerro Laderón
- Carretera sin afirmar
- Drenaje
- Curvas principales
- Curvas secundarias
- Área de investigación

250 125 0 250 500 750 Metros

Coordinate Systems: WGS 1984 UTM Zone 17S
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERIA

Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica



MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO HIERBA BUENA

PLANO: TOPOGRÁFICO - MDE

N° PLANO:

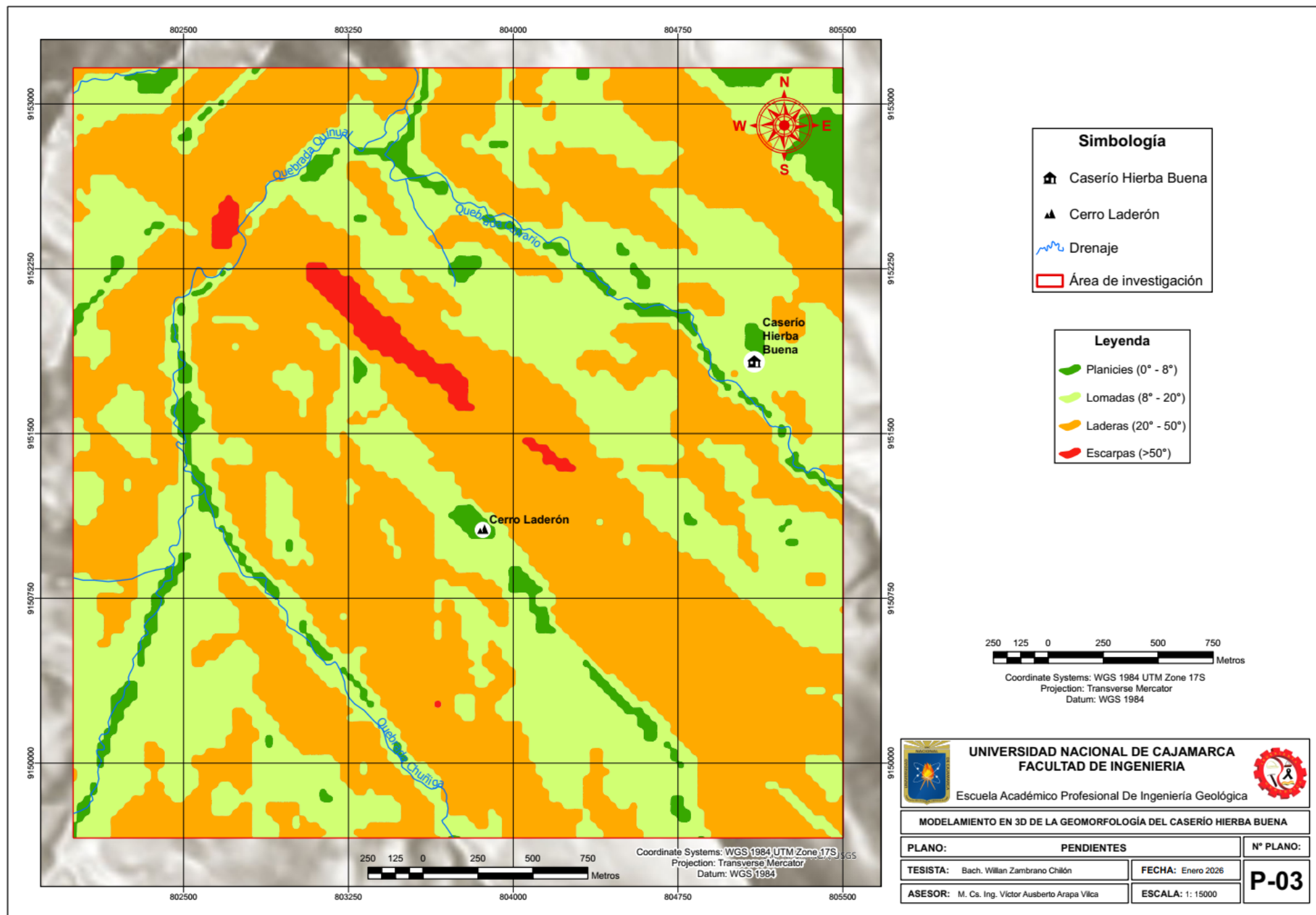
TESISTA: Bach. Willan Zambrano Chilón

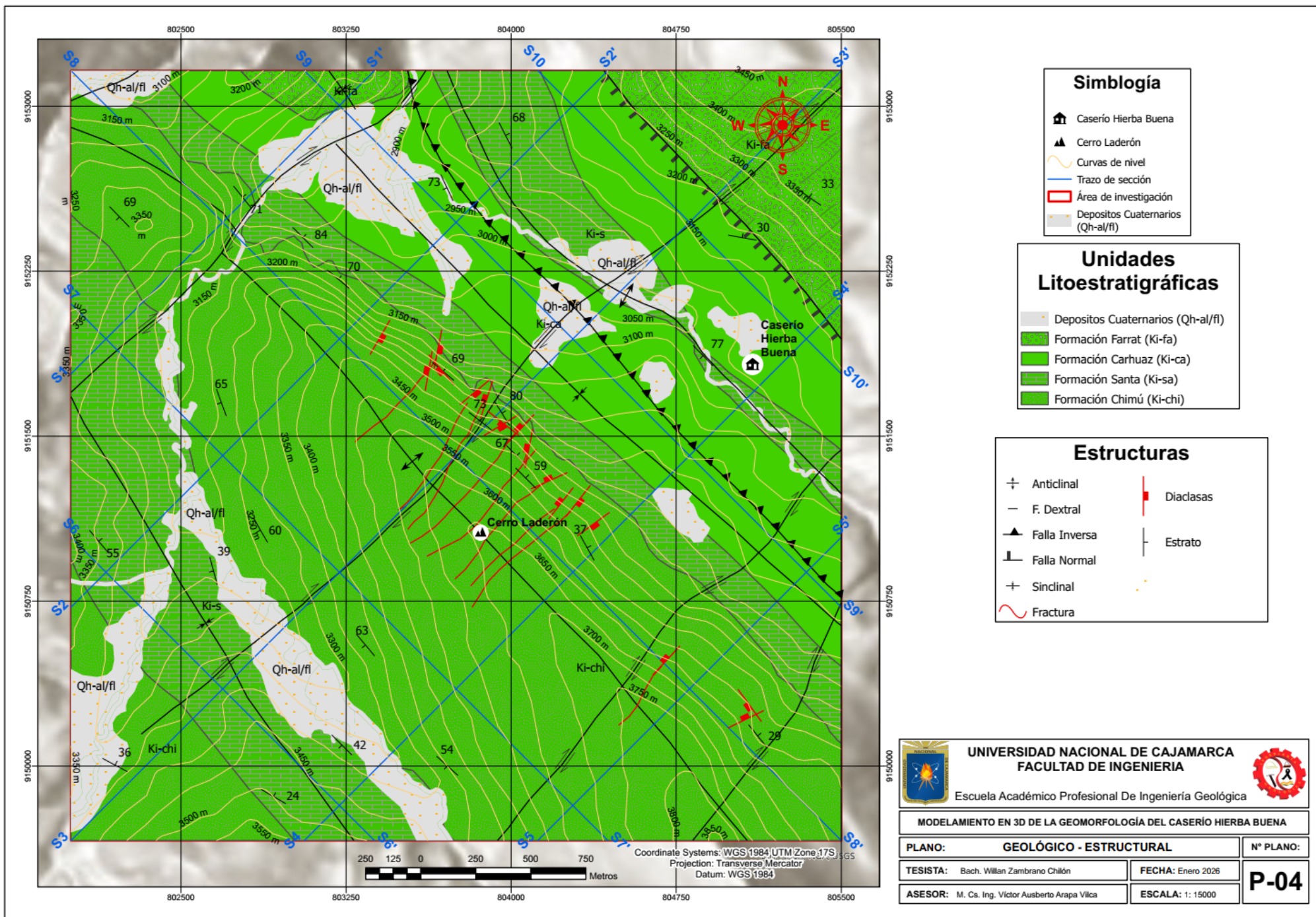
FECHA: Enero 2026

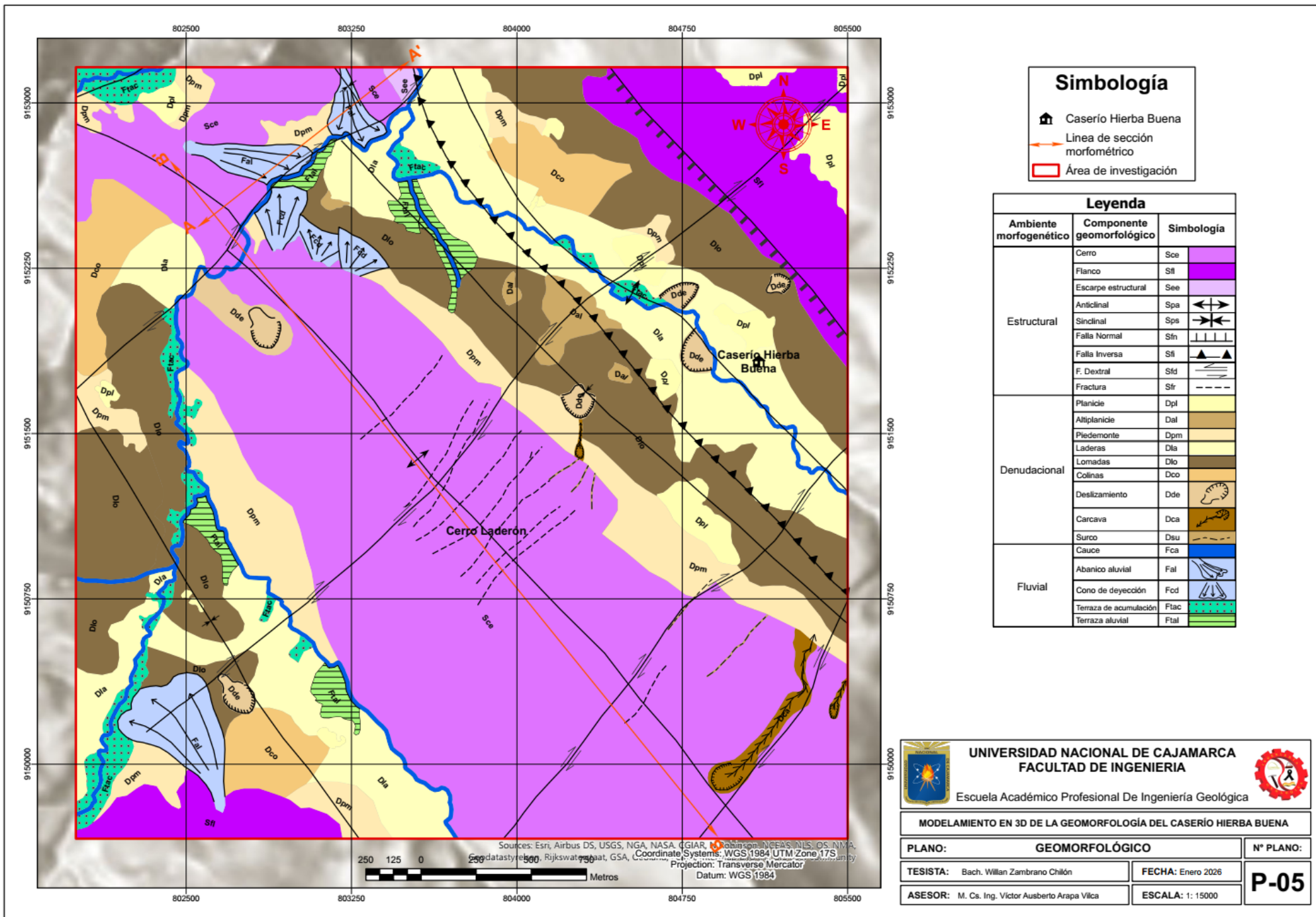
ASESOR: M. Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca

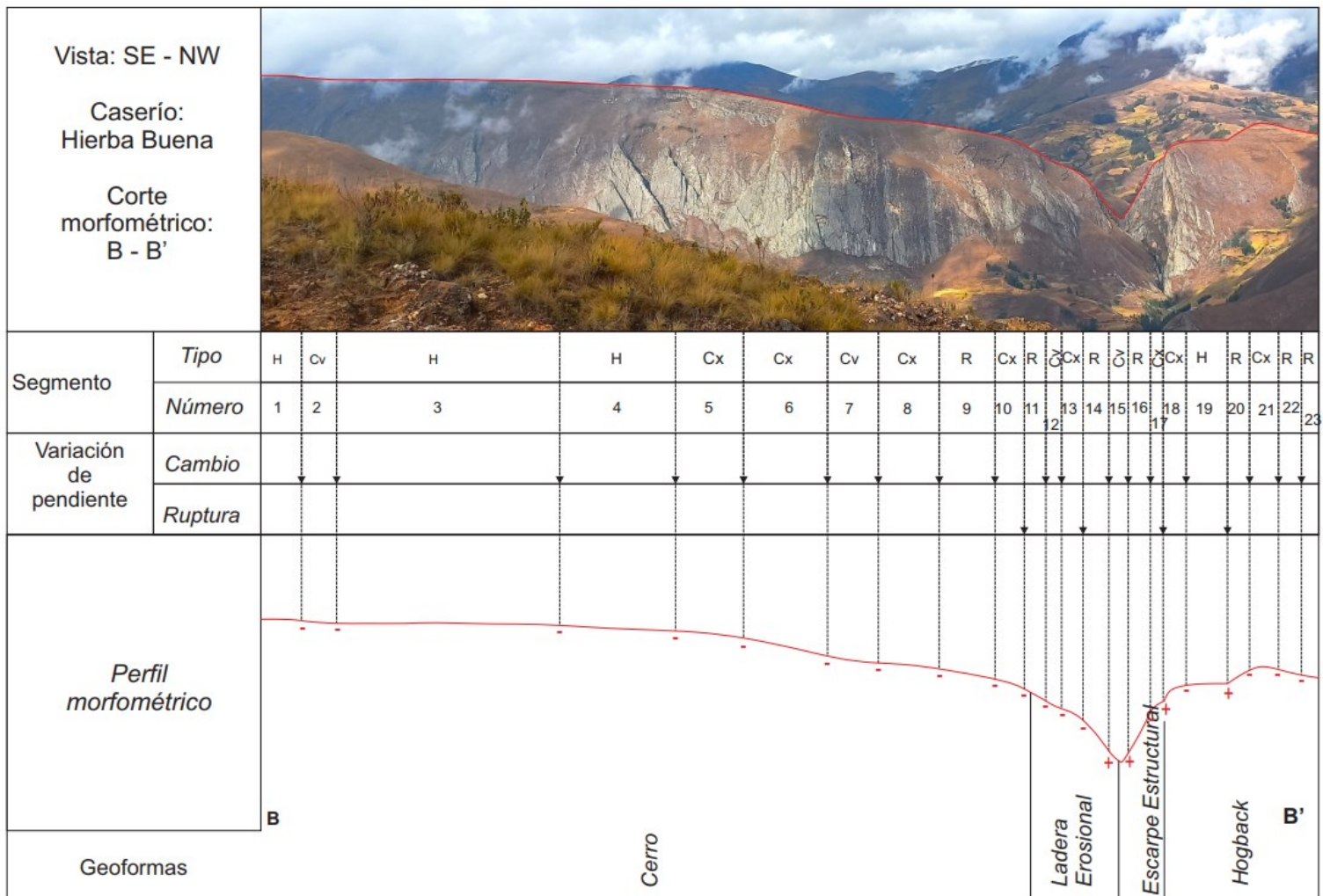
ESCALA: 1: 15000

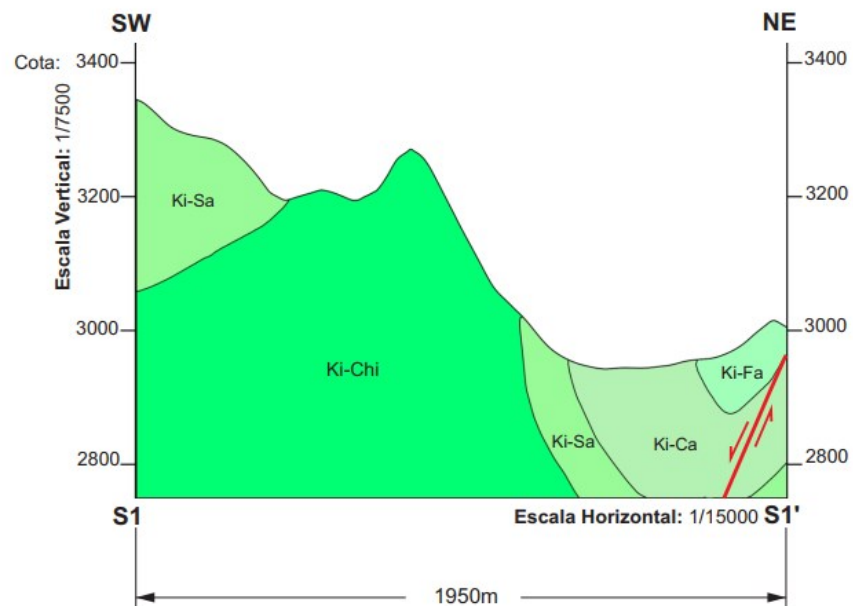
P-02







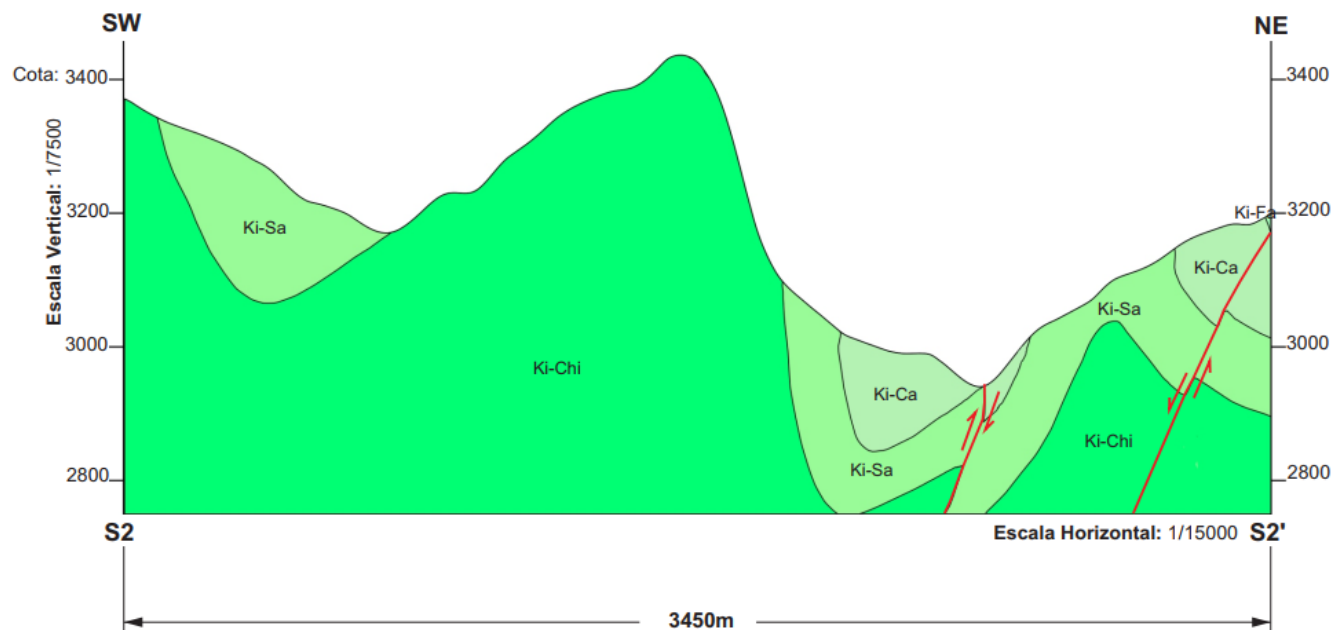




Geología	
	Formación Farrat (Ki-Fa)
	Formación Carhuaz (Ki-Ca)
	Formación Santa (Ki-Sa)
	Formación Chimú (Ki-Chi)

Leyenda	
	Falla normal

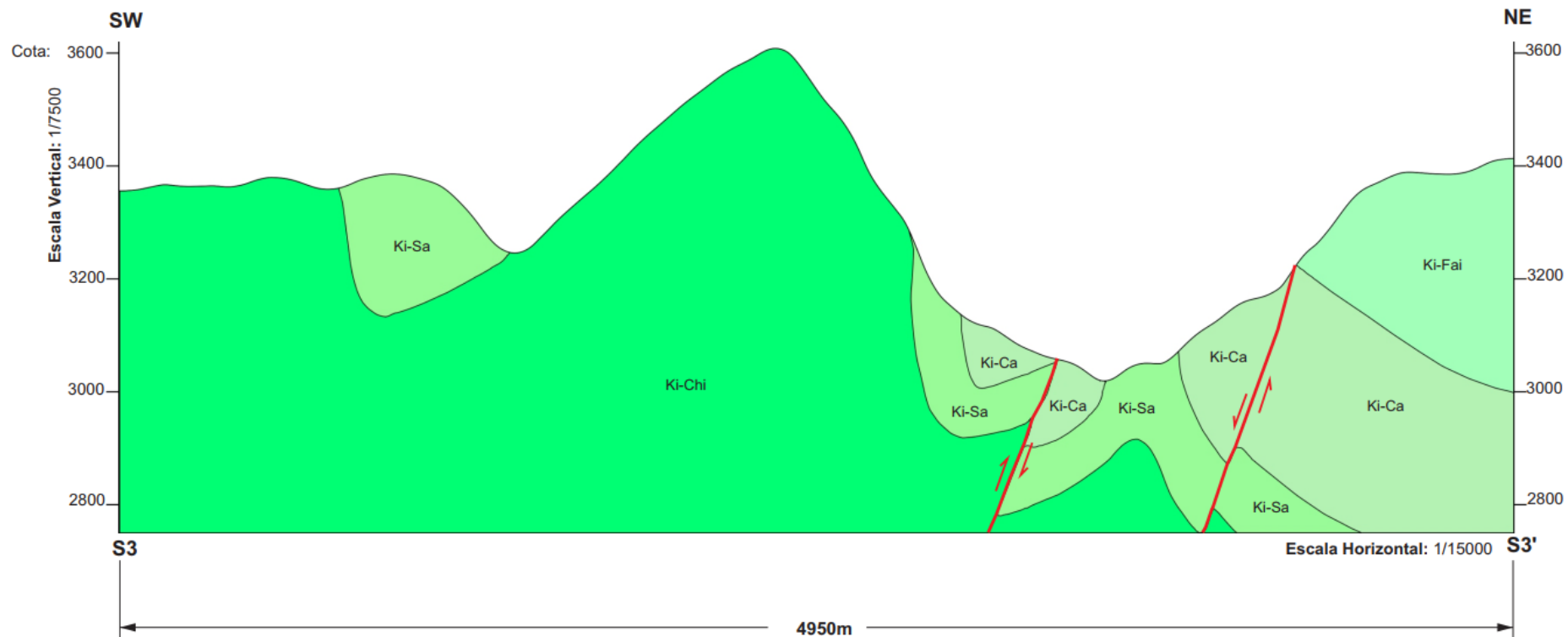
	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA		
	Escuela Profesional De Ingeniería Geológica		
MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO HIERBA BUENA			
SECCIÓN S1 - S1'			PLANO N°:
TESISTA: Bach. Willan Zambrano Chilón		FECHA: Enero 2026	
ASESOR: M. Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca		ESCALA H: 1:15000 ESCALA V: 1:7500	
			S-01



Geología	
	Formación Farrat (Ki-Fa)
	Formación Carhuaz (Ki-Ca)
	Formación Santa (Ki-Sa)
	Formación Chimú (Ki-Chi)

Leyenda	
	Falla normal
	Falla inversa

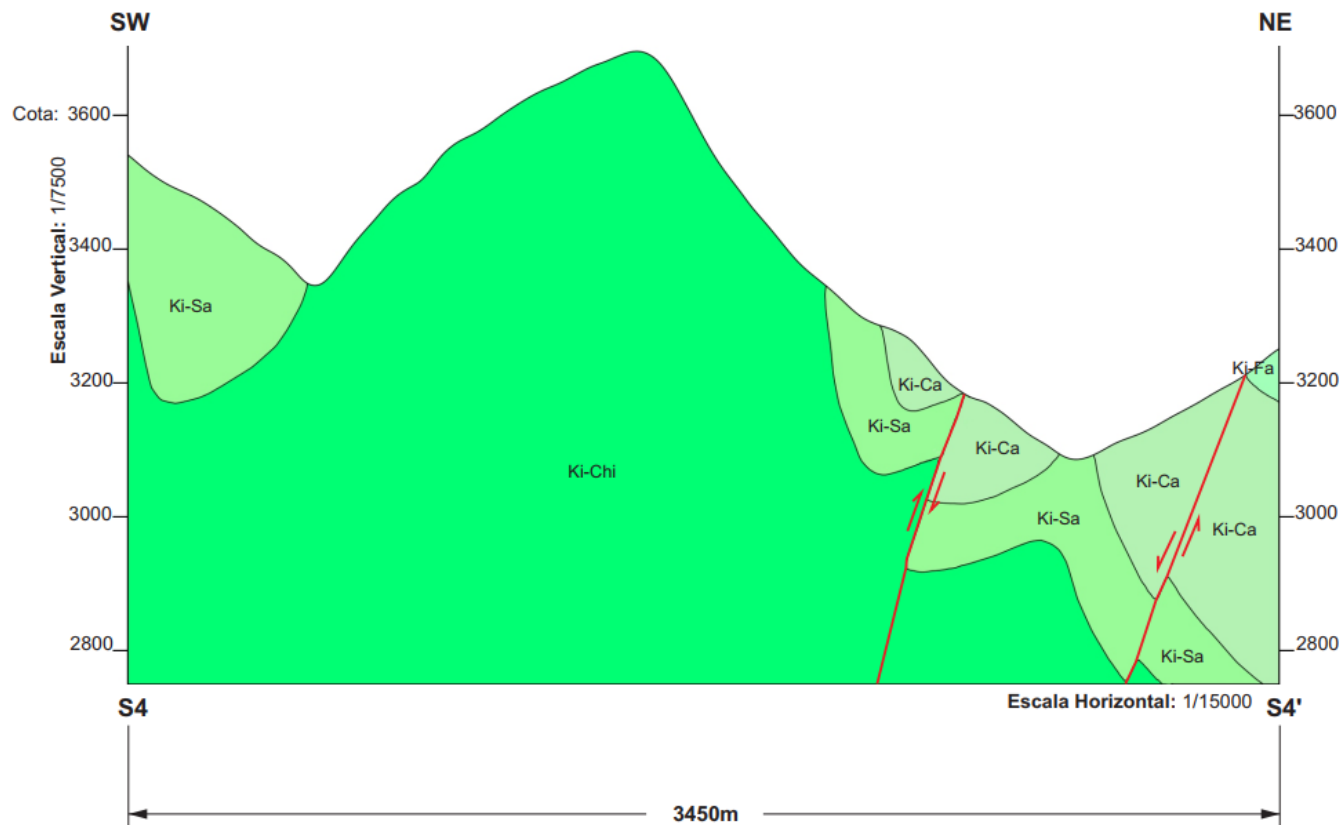
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA Escuela Profesional De Ingeniería Geológica		
MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO HIERBA BUENA		
SECCIÓN S2 - S2'		PLANO N°:
TESISTA: Bach. Willan Zambrano Chilón	FECHA: Enero 2026	
ASESOR: M. Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca	ESCALA H: 1:15000	S-02
	ESCALA V: 1:7500	



Geología	
	Formación Farrat (Ki-Fa)
	Formación Carhuaz (Ki-Ca)
	Formación Santa (Ki-Sa)
	Formación Chimú (Ki-Chi)

Leyenda	
	Falla normal
	Falla inversa

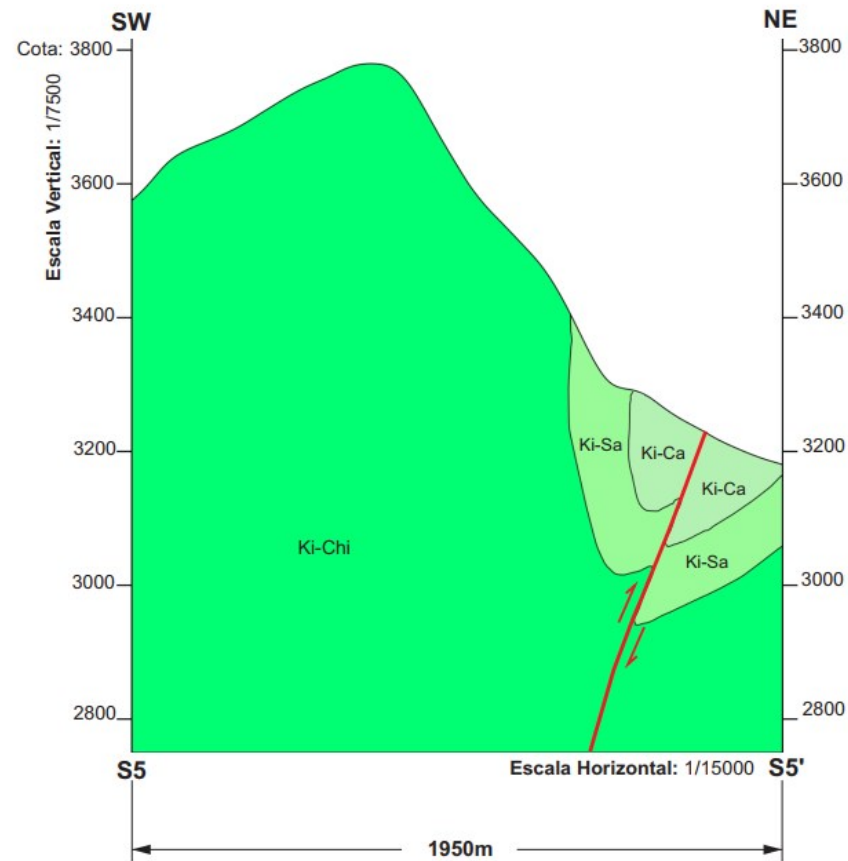
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA Escuela Profesional De Ingeniería Geológica		
MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO HIERBA BUENA		
SECCIÓN S3 - S3'		PLANO N°:
TESISTA: Bach. Willan Zambrano Chilón	FECHA: Enero 2026	
ASESOR: M. Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca	ESCALA H: 1:15000 ESCALA V: 1:7500	S-03



Geología	
	Formación Farrat (Ki-Fa)
	Formación Carhuaz (Ki-Ca)
	Formación Santa (Ki-Sa)
	Formación Chimú (Ki-Chi)

Leyenda	
	Falla normal
	Falla inversa

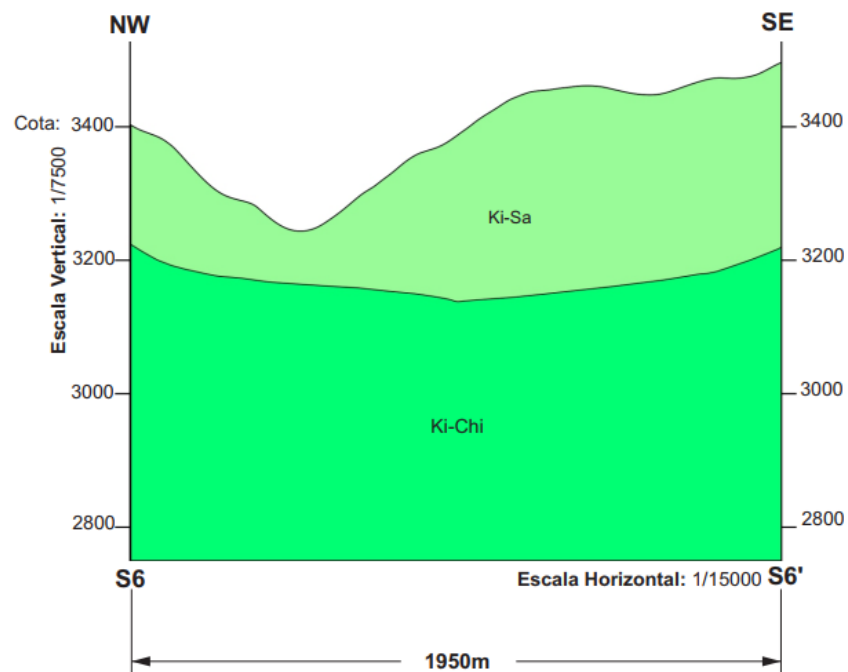
	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA		
	Escuela Profesional De Ingeniería Geológica		
MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO HIERBA BUENA			
SECCIÓN S4 - S4'			PLANO N°:
TESISTA: Bach. Willan Zambrano Chión		FECHA: Enero 2026	
ASESOR: M. Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca		ESCALA H: 1:15000 ESCALA V: 1:7500	
			S-04



Geología	
	Formación Carhuaz (Ki-Ca)
	Formación Santa (Ki-Sa)
	Formación Chimú (Ki-Chi)

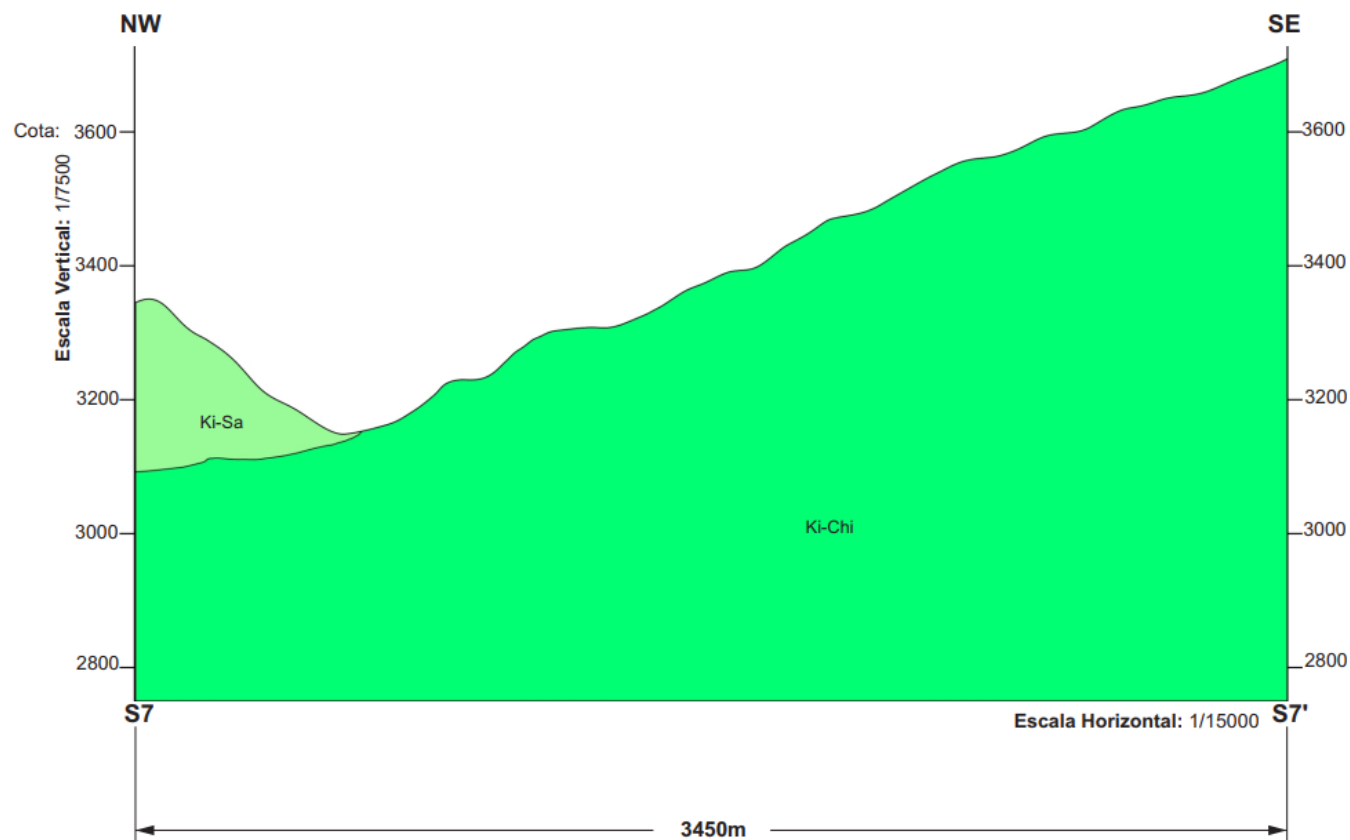
Leyenda	
	Falla inversa

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA		
	Escuela Profesional De Ingeniería Geológica		
MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO HIERBA BUENA			
SECCIÓN S5 - S5'			PLANO N°:
TESISTA: Bach. Willan Zambrano Chilón	FECHA: Enero 2026		S-05
ASESOR: M. Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca	ESCALA H: 1:15000 ESCALA V: 1:7500		



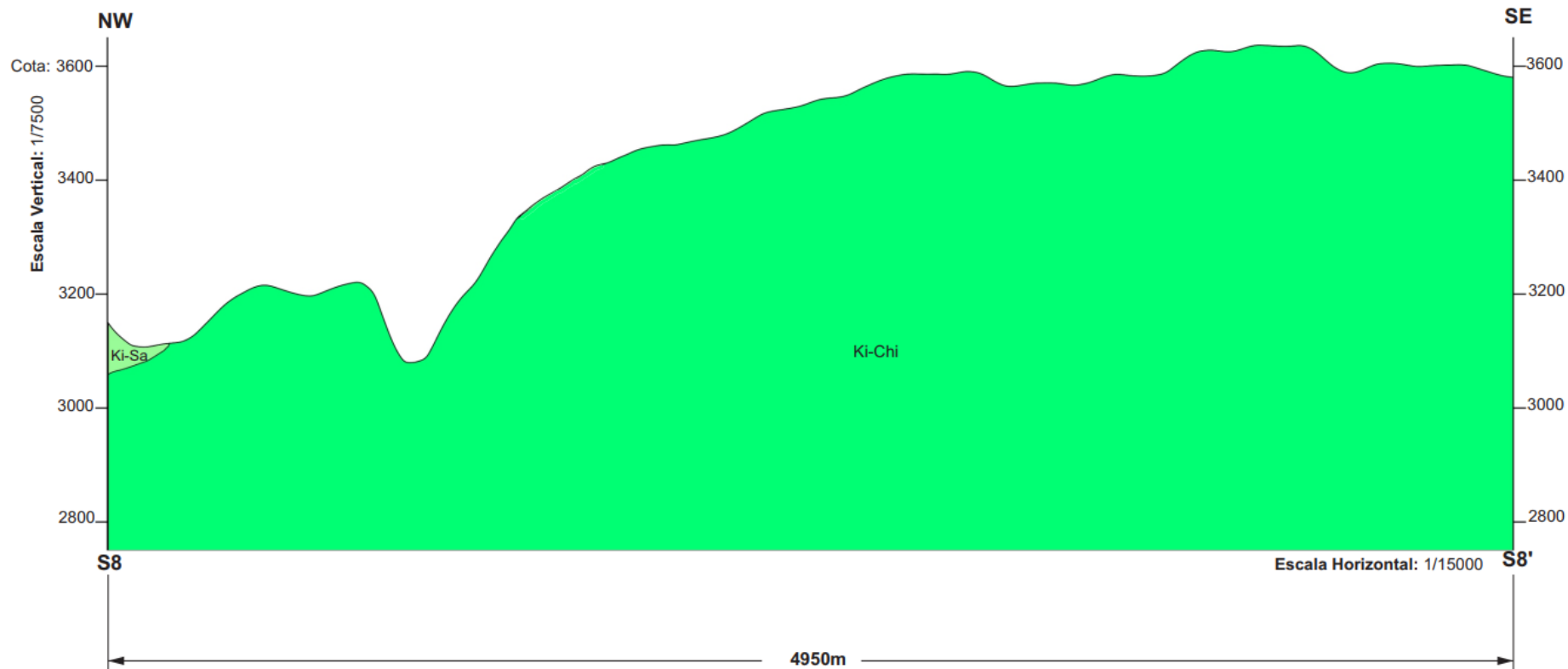
Geología	
	Formación Santa (Ki-Sa)
	Formación Chimú (Ki-Chi)

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA			
	FACULTAD DE INGENIERIA			
Escuela Profesional De Ingeniería Geológica				
MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO HIERBA BUENA				
SECCIÓN S6 - S6'			PLANO N°:	
TESISTA:	Bach. Willan Zambrano Chilón	FECHA:	Enero 2026	
ASESOR:	M. Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca	ESCALA H:	1:15000	
			ESCALA V:	1:7500
			S-06	



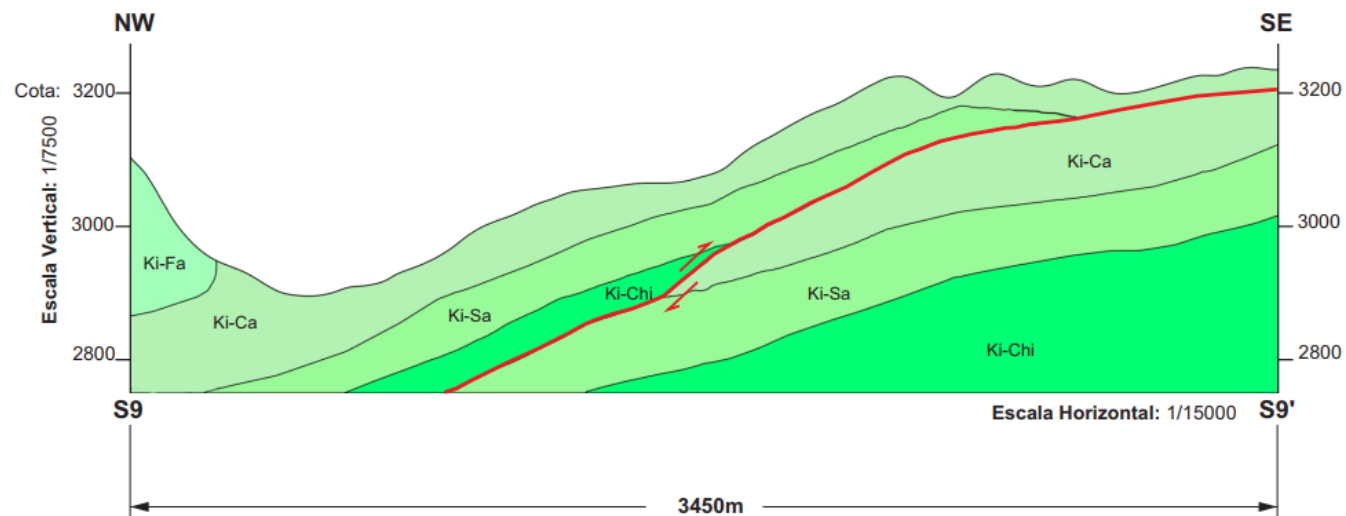
Geología	
	Formación Santa (Ki-Sa)
	Formación Chimú (Ki-Chi)

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA Escuela Profesional De Ingeniería Geológica		
MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO HIERBA BUENA		
SECCIÓN S7 - S7'		PLANO N°:
TESISTA: Bach. Willan Zambrano Chión	FECHA: Enero 2026	
ASESOR: M. Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca	ESCALA H: 1:15000 ESCALA V: 1:7500	
		S-07



Geología	
	Formación Santa (Ki-Sa)
	Formación Chimú (Ki-Chi)

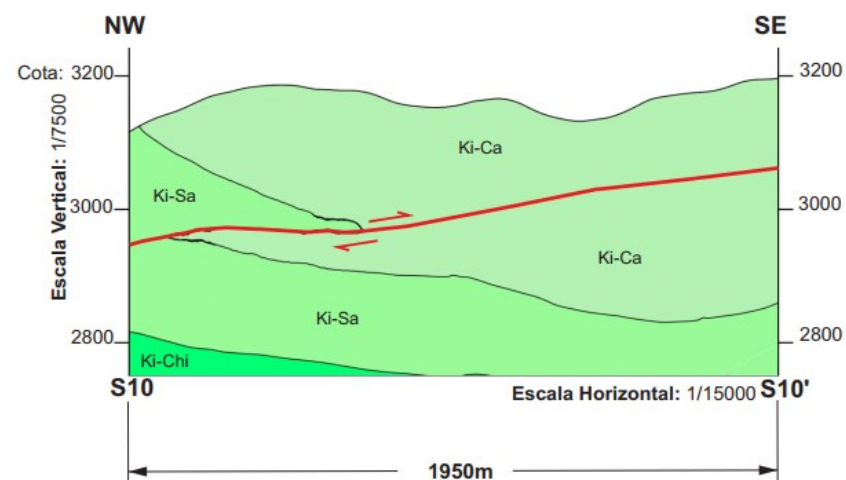
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA Escuela Profesional De Ingeniería Geológica		
MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO HIERBA BUENA		
SECCIÓN S8 - S8'		PLANO N°:
TESISTA: Bach. Willan Zambrano Chión	FECHA: Enero 2026	
ASESOR: M. Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca	ESCALA H: 1:15000 ESCALA V: 1:7500	
		S-08



Geología	
	Formación Farrat (Ki-Fa)
	Formación Carhuaz (Ki-Ca)
	Formación Santa (Ki-Sa)
	Formación Chimú (Ki-Chi)

Leyenda	
	Falla inversa

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA Escuela Profesional De Ingeniería Geológica		
MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO HIERBA BUENA		
SECCIÓN S9 - S9'		PLANO N°:
TESISTA: Bach. Willan Zambrano Chilón	FECHA: Enero 2026	
ASESOR: M. Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca	ESCALA H: 1:15000	ESCALA V: 1:7500
		S-09



Geología	
	Formación Carhuaz (Ki-Ca)
	Formación Santa (Ki-Sa)
	Formación Chimú (Ki-Chi)

Leyenda	
	Falla inversa

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA			
	FACULTAD DE INGENIERIA			
Escuela Profesional De Ingeniería Geológica				
MODELAMIENTO EN 3D DE LA GEOMORFOLOGÍA DEL CASERÍO HIERBA BUENA				
SECCIÓN S10 - S10'			PLANO N°:	
TESISTA:	Bach. Willan Zambrano Chilón	FECHA:	Enero 2026	
ASESOR:	M. Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca	ESCALA H:	1:15000	
			ESCALA V:	1:7500
			S-10	