

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS
CARRERA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



TRABAJO DIRIGIDO

**“CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL DESLIZAMIENTO DE
HUANU HUANUNI”**

**POSTULANTE: UNIV. NÁTALY ANDREA ZABALA LICIDRO
TUTOR : ING. MARCO ANTONIO GUZMAN PORREZ**

LA PAZ – BOLIVIA

2023

*Con mucho amor a mis padres y mi hermana.
Por ser mi gran bendición, mi fortaleza y apoyo constante.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por guiarme y estar siempre a mi lado, brindándome fortaleza para sobrellevar los momentos difíciles en esta etapa de mi vida y por bendecirme infinitamente con la mejor familia que hoy tengo.

Agradezco de todo corazón a mis Papás: Francisco Zabala Llave. y María Magda Licidio Villanueva. por el amor incondicional que me proporcionaron, por la confianza y la oportunidad de poder realizar un sueño más en mi vida y de no desistir en mi vida profesional, por ser un ejemplo de perseverancia y valentía para afrontar los golpes y problemas que nos da la vida. Solo me queda decir: “Gracias, mil gracias por todo el apoyo y paciencia que me brindaron, los amo mucho”.

A mi hermana Rossana por ser un apoyo constante y mi cómplice en los proyectos de mi vida. A Iván Quiroz por sus palabras de motivación, comprensión, apoyo, paciencia y cariño.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a la carrera de Ingeniería Geológica de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) por haber sido el medio y proveedor de conocimientos fundamentales durante este proceso. Agradezco sinceramente al cuerpo docente por todas las enseñanzas brindadas a lo largo de mis años de estudio en esta institución. También deseo agradecer al Ingeniero Marco Antonio Guzmán por haber aceptado dirigir este trabajo de grado. Quiero expresar mi gratitud a mis tribunales, el Ingeniero Germán Núñez, el Ingeniero Rafael Cortez y especialmente al Ingeniero Félix Espinoza, por sus significativas contribuciones y por motivarme durante la realización de este trabajo.

También quiero agradecer a mis amigos que formaron parte en esta etapa de mi vida, gracias por sus consejos y su amistad desinteresada.

INDICE

RESÚMEN	9
SUMMARY.....	10
CAPÍTULO I.....	11
1. GENERALIDADES	11
1.1. Introducción	11
1.2. Planteamiento del problema.....	12
1.2.1. Identificación	12
1.2.2. Justificación	12
1.3. Objetivos	13
1.3.1. Objetivo general.....	13
1.3.2. Objetivos específicos.....	13
1.4. Metodología del trabajo	14
1.4.1. Metodología Principal	14
1.4.2. Metodología secundaria	15
CAPÍTULO II.....	17
2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	17
2.1. Ubicación del área de estudio	17
2.2. Vías de acceso al área de estudio	18
2.3. Topografía.....	19
2.4. Condiciones climáticas	19
CAPÍTULO III.....	21
3. MARCO TEÓRICO	21
3.1. Introducción	21
3.2. Consideraciones geológicas.....	21
3.2.1. Procesos geomorfológicos	21
3.2.2. Geomorfología de la cuenca de La Paz.....	23
3.2.3. Movimiento en masa.....	24
3.2.4. Deslizamiento	26
3.2.5. Reptación.....	34
3.2.6. Flujo de barro.....	35
3.3. Fotogeología	35
3.3.1. Alcances.....	36

3.3.2. Limitaciones	36
3.3.3. Criterios de observación geológica	37
3.4. Hidrogeología.....	38
3.4.1. Origen del agua subterránea.....	39
3.4.2. Porosidad.....	39
3.4.3. Permeabilidad	39
3.5. Geotecnia.....	40
3.5.1. Ensayos de Laboratorio.....	40
3.6. Estabilidad de talud	44
3.6.1. Análisis de estabilidad	44
3.7. Estratigrafía.....	46
3.7.1. Formación La Paz.....	46
3.7.2. Gravas Pampahasi	47
3.8. Neotectónica	47
CAPÍTULO IV	49
4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL ÁREA.....	49
4.1. Geología regional.....	49
4.2. Geología local	49
4.2.1. Unidades estratigráficas	50
4.3. Fotogeología	65
4.3.1. Análisis multitemporal.....	65
4.4. Neotectónica	74
4.5. Geomorfología	76
4.5.1. Deslizamiento rotacional.....	76
4.5.2. Geoformas de flujo	80
4.5.3. Geoformas fluviales	81
4.5.4. Geoformas de erosión hídrica	83
4.5.5. Geoformas antrópicas	85
4.6. Clasificación de pendientes.....	91
4.7. Hidrogeología.....	93
4.7.1. Zona de recarga.....	94
4.7.2. Zona de descarga	95
4.7.3. La vegetación.....	96
4.7.4. Porosidad y permeabilidad	98

4.7.5. Aguas superficiales.....	99
4.7.6. Aguas subterráneas.....	100
CAPÍTULO V	102
5. RESULTADOS.....	102
5.1. Geotecnia.....	102
5.1.1. Metodología de trabajo.....	102
5.2. Evaluación físico mecánica del área de estudio.....	113
5.2.1. Descripción Litológica.....	113
5.2.2. Propiedades Geotécnicas	113
5.3. Análisis de los ensayos de laboratorio.....	114
5.4. Posibles causas del movimiento de tierra.....	114
5.4.1. La calidad de los suelos	114
5.4.2. Carga de las Construcciones	115
CAPÍTULO VI	116
6. ESTABILIDAD DE TALUD.....	116
6.1. Análisis de estabilidad	116
6.2. Rocscience Slide 6.0	116
6.3. Métodos de estabilización de taludes	118
6.3.1. Modificación de la geometría.....	118
6.3.2. Elementos resistentes	119
6.3.3. Vegetación	120
CAPÍTULO VII	122
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	122
7.1. Conclusiones	122
7.2. Recomendaciones.....	126
BIBLIOGRAFÍA.....	129
ANEXOS.....	132

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO – DESLIZAMIENTO HUANU HUANUNI	17
FIGURA 2. IMAGEN SATELITAL	18
FIGURA 3. DIAGRAMA CLIMATOLÓGICO DE LA CIUDAD DE LA PAZ	20
FIGURA 4. EROSIÓN GRAVITATORIA EN SUELOS BLANDOS	23
FIGURA 5. DIAGRAMA DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA – TIPO ROTACIONAL	25
FIGURA 6. DESLIZAMIENTO EN SUELOS BLANDOS	26
FIGURA 7. DESLIZAMIENTOS RELACIONADOS A ALTAS PENDIENTES)	27
FIGURA 8. LADERA NATURAL.....	28
FIGURA 9. TALUD ARTIFICIAL.....	28
FIGURA 10. ESQUEMA DE UN DESLIZAMIENTO ROTACIONAL.....	30
FIGURA 11. DESLIZAMIENTO ROTACIONAL EN SUELOS.....	32
FIGURA 12. DESLIZAMIENTO ROTACIONAL TÍPICO	33
FIGURA 13. DESPLAZAMIENTO ROTACIONAL.....	33
FIGURA 14. ESQUEMAS DE UN PROCESO DE REPTACIÓN.....	34
FIGURA 15. DIAGRAMA DE FLUJO DE BARRO.....	35
FIGURA 16. MAPA GEOLÓGICO, PROYECCIÓN WGS 84 UTM, ZONA 19K	51
FIGURA 17. FOTOGRAFÍA AÉREA DEL AÑO 1976, PROYECCIÓN UTM WGS 84 – 19 K.....	66
FIGURA 18. FOTOGRAFÍA AÉREA DEL AÑO 1988, PROYECCIÓN UTM WGS 84 – 19 K.....	68
FIGURA 19. IMAGEN SATELITAL DEL AÑO 2005, PROYECCIÓN UTM WGS 84 – 19 K.....	69
FIGURA 20. IMAGEN SATELITAL DEL AÑO 2009, PROYECCIÓN UTM WGS 84 – 19 K.....	70
FIGURA 21. IMAGEN SATELITAL DEL AÑO 2011, PROYECCIÓN UTM WGS 84 – 19 K.....	72
FIGURA 22. FOTOGRAFÍA AÉREA DEL AÑO 2022, PROYECCIÓN UTM WGS 84 – 19 K.....	73
FIGURA 23. MAPA GEOMORFOLÓGICO HUANU HUANUNI, PROYECCIÓN WGS 84 UTM, ZONA 19 K.....	76
FIGURA 24. MAPA DEL DRENAJE TIPO DENDRÍTICO, PROYECCIÓN WGS 84 UTM, ZONA 19 K	91
FIGURA 25. MAPA DE ELEVACIONES HUANU HUANUNI, PROYECCIÓN WGS 84 UTM, ZONA 19 K.....	92
FIGURA 26. MAPA DE PENDIENTES HUANU HUANUNI, PROYECCIÓN WGS 84 UTM, ZONA 19 K.....	93
FIGURA 27. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA MEMBRANA PERMEABLE CUANDO CAE UNA GOTA DE AGUA	98

FIGURA 28. UBICACIÓN DE CALICATAS – IMAGEN SATELITAL	103
FIGURA 29. ESTABILIDAD DEL DESLIZAMIENTO HUANU HUANUNI CON EL PROGRAMA SLIDE.	117
FIGURA 30. DRENAJES TRANSVERSALES EN BERMAS	119
FIGURA 31. UBICACIÓN DE LA PANTALLA DE PILOTES.....	120
FIGURA 32. DISTRIBUCIÓN DE ÁRBOLES DE EUCALIPTOS Y PINOS PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD DEL DESLIZAMIENTO	121

INDICE DE FOTOGRAFIAS

FOTOGRAFÍA 1. VISTA DE LA FORMACIÓN LA PAZ AL NORESTE Y SURESTE DEL DESPLAZAMIENTO DE HUANU HUANUNI	52
FOTOGRAFÍA 2. VISTA DE LA FORMACIÓN LA PAZ, EXTREMO NORESTE DEL DESPLAZAMIENTO HUANU HUANUNI	54
FOTOGRAFÍA 3. FORMACIÓN LA PAZ, VISTA AL SURESTE DEL DESPLAZAMIENTO	55
FOTOGRAFÍA 4. FORMACIÓN LA PAZ, CERCA AL PIE DEL DESPLAZAMIENTO.....	57
FOTOGRAFÍA 5. CONTACTO EROSIVO DE LAS GRAVAS PAMPAHASI SOBRE LOS SEDIMENTOS DE LA FORMACIÓN LA PAZ	59
FOTOGRAFÍA 6. VISTA DEL FLUJO DE BARRO	60
FOTOGRAFÍA 7. DEPOSITO ALUVIAL – NORTE DEL DESPLAZAMIENTO.....	61
FOTOGRAFÍA 8. DEPÓSITO ALUVIAL, ACTUALMENTE EL RIO KOLLPAJAUIRA EMBOVEDADO, CUYA FUNCIÓN ES UNA VÍA DE COMUNICACIÓN VEHICULAR.....	62
FOTOGRAFÍA 9. DESPLAZAMIENTO ANTIGUO – URBANIZACIÓN VERDE OLIVO	63
FOTOGRAFÍA 10. DESPLAZAMIENTO RECIENTE – HUANU HUANUNI	64
FOTOGRAFÍA 11. MATERIAL DE ORIGEN ANTRÓPICO (MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN, ESCOMBROS Y BASURA)	65
FOTOGRAFÍA 12. FALLA NORMAL DEXTRAL.....	75
FOTOGRAFÍA 13. DEFORMACIÓN QUE SE LIMITA A MATERIALES	75
FOTOGRAFÍA 14. PERFIL LONGITUDINAL DEL DESPLAZAMIENTO TIPO	78
FOTOGRAFÍA 15. VISTA FRONTAL DEL DESPLAZAMIENTO HUANU HUANUNI 2010	79
FOTOGRAFÍA 16. CARACTERÍSTICAS LONGITUDINALES DEL DESPLAZAMIENTO HUANU HUANUNI	80
FOTOGRAFÍA 17. FLUJO DE BARRO	81
FOTOGRAFÍA 18. CÁRCAVAS DANDO LUGAR A QUEBRADAS.	81
FOTOGRAFÍA 19. DEPÓSITO DE UNA LLANURA ALUVIAL, ACTUALMENTE CALLE 1	83
FOTOGRAFÍA 20. FORMACIÓN DE CANALES A PARTIR DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL.	84
FOTOGRAFÍA 21. SURCOS DE EROSIÓN AL PIE DEL DESPLAZAMIENTO DE HUANU HUANUNI	84
FOTOGRAFÍA 22. SURCOS DE EROSIÓN EN LA CABECERA DEL DESPLAZAMIENTO	85
FOTOGRAFÍA 23. BANQUINAS DE ESTABILIZACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DE HUANU HUANUNI	85
FOTOGRAFÍA 24. ASENTAMIENTO DE VIVIENDAS EN LAS BANQUINAS DE ESTABILIZACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DE HUANU HUANUNI	86

FOTOGRAFÍA 25. MATERIAL DE RELLENO, PARTE ALTA DEL DESLIZAMIENTO, CONSTRUCCIÓN DE LA CANCHA.....	87
FOTOGRAFÍA 26. ESCARPE DEL DESLIZAMIENTO DE HUANU HUANUNI	88
FOTOGRAFÍA 27. CRESTA DE EROSIÓN – DISCONTINUIDAD FM LA PAZ Y GVA PAMPAHASI.	89
FOTOGRAFÍA 28. BARRANCOS A LOS ALREDEDORES DEL DESLIZAMIENTO HUANU HUANUNI.....	89
FOTOGRAFÍA 29. RIO CANALIZADO AL MARGEN IZQUIERDO DEL DESLIZAMIENTO HUANU HUANUNI	90
FOTOGRAFÍA 30. CANALIZACIÓN DEL RIO TRIBUTARIO PARA EL INGRESO A LA URBANIZACIÓN VERDE OLIVO.....	90
FOTOGRAFÍA 31. DETERIORO Y MALA CONEXIÓN DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO HUANU HUANUN	94
FOTOGRAFÍA 32. NUEVA URBANIZACIÓN HUANU HUANUNI, NO CUENTA CON SERVICIO DE ALCANTARILLADO.....	95
FOTOGRAFÍA 33. ZANA DE DESCARGA – RIO KOLLPAJAHUIRA	96
FOTOGRAFÍA 34. PRESENCIA DE ÁRBOLES EN EL ANTIGUO TALUD DEL DESLIZAMIENTO HUANU HUANUNI	96
FOTOGRAFÍA 35. DESPLAZAMIENTO DEL ÁRBOL DESPUÉS DEL DESLIZAMIENTO DEL AÑO 2010.....	97
FOTOGRAFÍA 36. SECTORES DEFORESTADOS QUE PUEDEN AFECTAR NUEVAMENTE LA ESTABILIDAD DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	98
FOTOGRAFÍA 37. MALA CONEXIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJES Y SUMINISTRO DE AGUA .	99
FOTOGRAFÍA 38. CURSO DEL RIO, MARGEN DERECHO E IZQUIERDO DEL ANTIGUO TALUD	99
FOTOGRAFÍA 39. ANTIGUO CURSO DEL RIO, PASA POR VIVIENDA DE 3 PLANTAS.....	100
FOTOGRAFÍA 40. BORDE DERECHO DEL DESLIZAMIENTO HUANU HUANUNI, PRESENCIA DE HUMEDAD EN PAREDES PERIMETRALES.....	101
FOTOGRAFÍA 41. BORDE DERECHO DEL DESLIZAMIENTO HUANU HUANUNI, PRESENCIA DE AGUAS EN LA SUPERFICIE DE LOS SUELOS	101
FOTOGRAFÍA 42. NUEVAS CONSTRUCCIONES.....	115

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. COORDENADAS DEL ÁREA DE ESTUDIO (DATUM: UTM-WGS 84, ZONA 19K)	18
TABLA 2. AGENTES GEOMORFOLÓGICOS.....	22
TABLA 3. ESCALA DE VELOCIDADES	26
TABLA 4. ELEMENTOS DE UN TALUD O LADERA TOMADO DE SUÁREZ, 2017	29
TABLA 5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL ENSAYO SPT.....	40
TABLA 6. CUANDO NO SE CUENTA CON TAMICES DE ABERTURAS NOMINALES EN MM, LOS TAMAÑOS NOMINALES DE LOS TAMICES PUEDEN SER LOS CORRESPONDIENTES A ASTM.....	43
TABLA 7. RANGO DE ÍNDICES DE PLASTICIDAD.....	43
TABLA 8. FACTOR DE ESTABILIDAD.....	45
TABLA 9. NEOTECTÓNICA DE LA ZONA DE LA PAZ	48
TABLA 10. CUADRO ESTRATIGRÁFICO DEL ÁREA DE TRABAJO.....	50
TABLA 11. COLUMNA LITOESTRATIGRÁFICA – FM. LA PAZ, NW DEL DESLIZAMIENTO HUANU HUANUNI.....	53
TABLA 12. COLUMNA LITOESTRATIGRÁFICA – FM. LA PAZ, SE DEL DESLIZAMIENTO HUANU HUANUNI.....	56
TABLA 13. COLUMNA LITOESTRATIGRÁFICA – FM. LA PAZ, PIE DEL DESLIZAMIENTO HUANU HUANUNI.....	58
TABLA 14. RANGO DE PENDIENTES	92
TABLA 15. CORRECCIÓN DE LOS GOLPES $N_{SPT} - N_{60}$	104
TABLA 16. FACTOR DE CORRECCIÓN CN	105
TABLA 17. CORRECCIÓN NORMALIZADA $(N_1)_{60}$	105
TABLA 18. CORRELACIÓN PARÁMETROS GEOTÉCNICOS COMO EL ÁNGULO DE FRICCIÓN DRENADA (DISTINTOS MÉTODOS); COHESIÓN NO DRENADA	106
TABLA 19. NORMAS DE LA AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) ...	106
TABLA 20. RESULTADO DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	107
TABLA 21. RESUMEN DE LÍMITES DE ATTERBERG	107
TABLA 22. RESULTADOS ENSAYO DE CORTE DIRECTO POZO P1-P4-P6	108
TABLA 23. RESUMEN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.....	114

RESÚMEN

La ciudad de La Paz se caracteriza por su compleja geología, evidenciando la superposición de eventos de diferentes orígenes. Los deslizamientos son eventos predominantes en la cuenca de La Paz, compuesta mayormente por depósitos jóvenes poco consolidados. Estos movimientos, que varían en magnitud, afectan directamente a la calidad de vida de los residentes.

El área de estudio se localiza en el sector sur de la cuenca de Irpavi. La evolución geológica ha dejado un registro de interacciones entre diversos eventos, reflejados en las geoformas presentes. Los habitantes de esta zona residen sobre un terreno geológicamente complejo, marcado por deslizamientos. Dado el origen de los materiales sueltos, se realizó un modelo de estabilidad para comprender los procesos de remoción en masa. Para ello, se consideraron variables como geología, geomorfología, pendientes, agua subterránea y geotecnia.

El deslizamiento de Huanu huanuni, ocurrido el 28 de enero de 2010, fue estudiado mediante una interpretación multitemporal donde se diferenció materiales en contacto con este deslizamiento, donde incluyen depósitos de la formación La Paz, flujos de barro y material de relleno. Además, las Gravas Pampahasi sobreyacen a estas capas, evidenciando un cambio de facies. La heterogeneidad de los materiales es notable en la zona de deslizamientos, donde los flujos de barro indican pendientes pronunciadas que coinciden con los valles actuales. Los depósitos aluviales señalan cambios en el nivel de base y altas cargas del río Kollpajahuira.

La deformación observada en las cercanías del deslizamiento sugiere fases de deformación distensivas del Cuaternario. En términos geotécnicos, el deslizamiento de Huanu huanuni presenta parámetros de baja plasticidad y valores moderados de cohesión y ángulo de fricción. Con base en esta información, se ha realizado un modelamiento de estabilidad de taludes, considerando la geometría de la superficie del talud y las cargas actuales de las infraestructuras presentes en el deslizamiento. Sin embargo, los resultados muestran un factor de seguridad por debajo del nivel permitido ($FS = 1$), así mismo se proponen métodos de estabilización de taludes como drenajes transversales, pantalla de pilotes y la incorporación de la vegetación dentro del deslizamiento.

SUMMARY

The city of La Paz is characterized by its complex geology, revealing the overlap of events from different origins. Landslides are predominant events in the La Paz basin, mainly composed of poorly consolidated young deposits. These movements, varying in magnitude, directly impact the quality of life of residents.

The study area is located in the southern sector of the Irpavi basin. Geological evolution has left a record of interactions between various events, reflected in the existing landforms. The inhabitants of this area live on geologically complex terrain, characterized by landslides. Given the loose material's origin, a stability model was developed to understand mass removal processes. For this purpose, variables such as geology, geomorphology, slopes, groundwater, and geotechnics were considered.

The Huanu huanuni landslide, which occurred on January 28, 2010, was studied through a multi-temporal interpretation that differentiated materials in contact with this landslide. These materials include deposits from the La Paz Formation, mudflows, and infill material. Additionally, the Pampahasi gravels overlie these layers, indicating a change in facies. The heterogeneity of the materials is notable in the landslide area, where mudflows indicate steep slopes that coincide with the current valleys. The alluvial deposits indicate changes in the base level and high loads from the Kollpajahuira River.

The deformation observed near the landslide suggests Quaternary extensional deformation phases. In geotechnical terms, the Huanu Huanuni landslide exhibits low plasticity parameters and moderate values of cohesion and friction angle. Based on this information, a slope stability modeling has been conducted, considering the slope surface geometry and the current loads of the infrastructure present in the landslide. However, the results indicate a factor of safety below the permissible level ($FS = 1$). Therefore, proposed slope stabilization methods include transverse drainage, pile screens, and incorporating vegetation within the landslide.

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

La cuenca de La Paz exhibe una diversidad de características topográficas influenciadas por su geología. Los procesos gravitacionales, conocidos como movimientos en masa, son de particular relevancia en este entorno y tienen un impacto directo en la calidad de vida de los residentes.

En la actualidad, la temática de la estabilidad de taludes está ganando cada vez más importancia debido a su relevancia. Los taludes son estructuras complejas y críticas que tienden a fallar por deslizamiento debido a una serie de factores, generando riesgos e inseguridad para las nuevas construcciones.

Generalmente, las zonas montañosas y aquellas con depósitos jóvenes son más propensas a deslizamientos, dado que varios elementos favorecen su ocurrencia. Estos elementos incluyen la topografía, procesos de meteorización, erosión, saturación de suelos por aguas superficiales y subterráneas, así como incremento de cargas en el suelo.

En el contexto específico de La Paz, los tipos de suelo exhiben características geológicas y geotécnicas complejas que varían de una ubicación a otra. El aumento en la construcción de edificios en la zona urbana de la ciudad ha resultado en la colocación de estructuras sobre suelos que presentan una diversidad de propiedades materiales. En áreas como Huanu huanuni, se han observado construcciones que no se ajustan a las normativas establecidas y movimientos de tierra que carecen de los debidos permisos y aprobaciones. En consecuencia, el deslizamiento de Huanu huanuni tuvo lugar en 2010 ocasionó la destrucción de 72 viviendas, con un impacto negativo en 118 familias y causando daños a la infraestructura pública, incluyendo calles y avenidas.

En este contexto, el presente estudio se enfoca en el deslizamiento de Huanu huanuni, ya que después de ese evento se han vuelto a realizar construcciones de

viviendas por parte de los habitantes. Esta acción pone en riesgo la vida humana y no considera los posibles daños físicos asociados con nuevos asentamientos.

Por ende, surge la necesidad de elaborar esta investigación que abarque un análisis multitemporal y geotécnico. El objetivo es determinar las propiedades físicas y mecánicas del material del suelo, así como estudiar las características y estabilidad del deslizamiento. Esto se logrará mediante métodos simples que satisfagan los principios de equilibrio, con la finalidad de brindar información relevante para abordar los desafíos actuales y futuros relacionados con la estabilidad de taludes en la zona.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Identificación

La ciudad de La Paz presenta una topografía especial y única, es decir está caracterizada por poseer pendientes abruptas, totalmente disectadas por quebradas conformando básicamente por tres cuencas importantes que son: la del Choqueyapu, Orkojahuirra y de la Zona Sur. (Salamanca, 2011)

Los deslizamientos más importantes en la ciudad de La Paz, se debe a factores condicionantes y desencadenantes que sufrió el suelo, los cuales tienen un rol muy importante en la actualidad para la gestión de riesgos.

En el año 2010, el deslizamiento de Huanu huanuni arrasó con 72 viviendas y dejó sin techo a 118 familias. Sin embargo, los damnificados comenzaron a reconstruir sus casas pese a la amenaza. El 16 de diciembre de 2011 otro movimiento de tierra obligó a evacuar a 40 casas en el sector (CEDIB, 2013), por el cual continúa siendo una amenaza constante, ya que hoy en día se encuentra activo, provocando fisuras y/o grietas en el suelo y en las estructuras de las viviendas.

1.2.2. Justificación

A vista de la falta de información que existe en el lugar, se realizará la caracterización geotécnica del deslizamiento de Huanu huanuni para una mejor interpretación, para ello se determinará; los parámetros geotécnicos del área de estudio realizando ensayos de laboratorio de suelos como también interpretación geológica a partir de

un mapeo en campo del área de estudio y el modelamiento de la estabilidad del deslizamiento.

A través de los resultados obtenidos en este estudio se podrá planificar y hacer uso de sus derechos como parte del desarrollo del bienestar de la comunidad. También comprometiéndose a las instituciones y gobierno local a impulsar emprendimientos y estrategias que puedan fortalecer las capacidades de la zona de Huanu huanuni.

La existencia de amenazas de riesgo de los desastres en el área de estudio, principalmente en la época lluviosa tiene causas no solo naturales sino antrópicas, razón por la cual es necesario hacer una caracterización del deslizamiento para reducir riesgos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar las características geológicas - geotécnicas del sector afectado por el proceso de remoción en masa, para determinar los parámetros físico-mecánicos y prever un nuevo deslizamiento en la zona de Huanu huanuni de la ciudad de La Paz.

1.3.2. Objetivos específicos

- ↗ Describir las características geológicas, geotécnicas y neotectónicas del área de estudio.
- ↗ Determinar los parámetros geotécnicos del deslizamiento de Huanu huanuni.
- ↗ Determinar las causas que originaron la manifestación del evento geológico de remoción en masa.
- ↗ Realizar un modelamiento de estabilidad, otorgando áreas críticas y más susceptibles a deslizamientos.
- ↗ Proponer soluciones específicas a los problemas que afectan la zona de estudio.

1.4. Metodología del trabajo

El método de trabajo se adecua a los objetivos de la investigación y considera varias etapas, las mismas que definirán un mejor desenvolvimiento teórico y práctico para una caracterización geotécnica del área de estudio, que abarca el deslizamiento de Huanu huanuni.

1.4.1. Metodología Principal

ETAPA 1. Etapa de investigación bibliográfica

- ↪ *Recopilación bibliográfica:* se consultó toda la investigación posible de estudios anteriores que hayan realizado en el área de estudio, como ser artículos, informes, información geológica publicada e inédita, cartas geológicas, etc. También se buscó información sobre deslizamientos en libros y artículos los cuales ayudó a realizar una buena interpretación del área de interés.

ETAPA 2. Etapa de gabinete pre- campo

- ↪ *Recopilación cartográfica:* consistió en la obtención de mapas temáticos que corresponde al área de estudio, tales como mapas topográficos a escala 1:5000, mapas geológicos a escala 1:10000.
- ↪ *Fotointerpretación:* mediante fotografías aéreas de los años 1976, 1988 e imágenes satelitales del año 2005, 2009, 2011 y 2022 se realizó un reconocimiento de la geología regional del área de estudio para un análisis multitemporal el cual nos ayudó para la interpretación de los procesos geodinámicos que ha sufrido el sector de Huanu huanuni.
- ↪ *Selección de áreas:* se seleccionaron áreas de interés donde presenten afloramientos litológicos pertenecientes a la formación La Paz y depósitos cuaternarios, así mismo se localizaron 8 calicatas o pozos en todo el deslizamiento para el levantamiento de columnas litoestratigráficas.

- ↗ *Análisis de información recopilada:* en esta etapa se analizó e interpretó la información bibliográfica existente con criterio geotécnico para así comprender los procesos geodinámicos del sector.
- ↗ *Preparación para el trabajo de campo:* para la preparación de esta etapa se hace uso de todos los medios recopilados tales como la información de mapas existentes y generados para la planificación del trabajo de campo, así también reunir todos los materiales y herramientas para lograr un buen desempeño en dicha etapa.

1.4.2. Metodología secundaria

ETAPA 3. Estudio de campo

- ↗ Se describió los datos a nivel litoestratigráfico y sedimentario, mediante levantamiento de columnas estratigráficas de los afloramientos existentes en el deslizamiento y también de calicatas o pozos, identificando propiedades físicas como ser: color, composición, estructuras sedimentarias, textura, cohesión, etc.
- ↗ Se realizó un relevamiento de fallas, para determinar la actividad Neotectónica del área de estudio.
- ↗ Se efectuó Ensayos de Penetración Estándar (SPT) y toma de muestra respectivas con la cuchara de Terzaghi, para luego determinar la capacidad de carga admisible y el tipo de material que conforma el suelo del deslizamiento.
- ↗ Se tomo muestras de suelo para el ensayo de corte directo y se determinó los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna del subsuelo.

ETAPA 4. Gabinete y laboratorio post-campo

- ↗ Se elaboró columnas estratigráficas a escala 1:100 y perfiles geológicos a escala 1:1000.
- ↗ Se realizó e interpretó los ensayos correspondientes a las muestras obtenidas en campo en el laboratorio de suelos.

- ↗ Se realizaron mapas temáticos como: mapa de ubicación, geológico y geomorfológico a partir de un mapa topográfico con cotas de 3 metros.

ETAPA 5. Elaboración del informe final

- ↗ Por último, se llevó a cabo la redacción del documento final cuyo resultado será el trabajo dirigido, donde se presentará las conclusiones finales de la Caracterización Geotécnica del Deslizamiento de Huanu huanuni, también se proporcionará sugerencias para un estudio a futuro de este deslizamiento.

CAPÍTULO II

2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1. Ubicación del área de estudio

La ciudad de La Paz, oficialmente Nuestra Señora de La Paz, está localizada en el departamento de La Paz - Bolivia, a unos 68 km al sureste del lago Titicaca. Se encuentra encajonada en un cañón formado por el río Choqueyapu y rodeada por las majestuosas montañas del altiplano, incluyendo el imponente nevado Illimani.

El área afectada por este deslizamiento abarca aproximadamente 4000 m² y se encuentra en el macrodistrito Sur de la ciudad de La Paz, en la región entre las zonas de Alto Obrajes y Bella Vista, en la quebrada Kollpajahuira. (Figura 1).

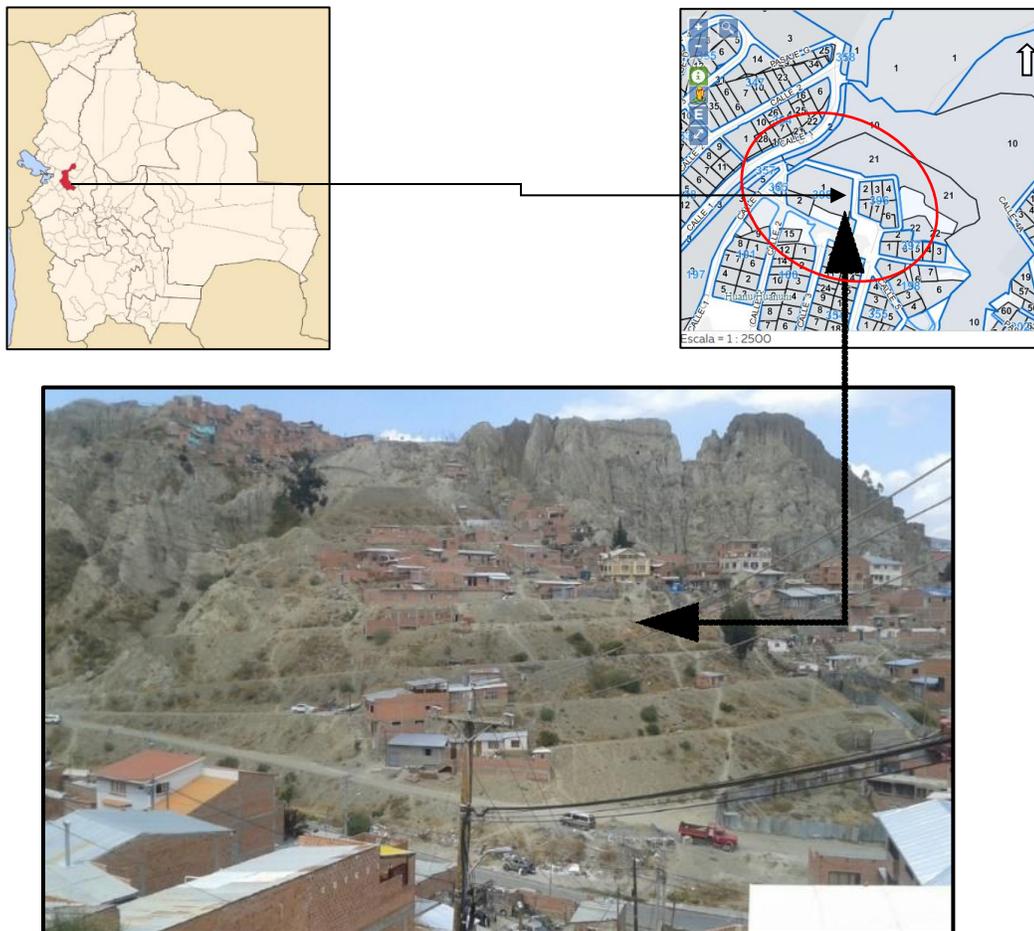


Figura 1. Ubicación del área de estudio – Deslizamiento Huanu huanuni (Google Earth Pro & SIT v2, 2011)

2.2. Vías de acceso al área de estudio

Al área de estudio se puede acceder por la prolongación de la calle 17 de obrajes Av. Tomas Monje Gutiérrez, el cual se conecta con la calle 1 de Huanu huanuni y por Alto Obrajes se accede por la Av. Max Portugal Zamora (Figura 2).

La seccion de trabajo, se ubican dentro de las coordenadas UTM – Datum: WGS – 1984, zona 19K (tabla 1).



Figura 2. Imagen satelital (Google Earth Pro, 2011)

Punto de Control	Este	Norte
1	596319	8172838
2	596330	8172854
3	596331	8172875
4	596308	8172892
5	596287	8172914
6	596243	8172944
7	596222	8172958
8	596203	8172956
9	596166	8172937
10	596120	8172890
11	596136	8172844
12	596179	8172837
13	596223	8172831
14	596231	8172842
15	596290	8172836
16	596309	8172833

Tabla 1. Coordenadas del área de estudio (Datum: UTM-WGS 84, zona 19K)

2.3. Topografía

En el ámbito de la ingeniería, es esencial contar con una representación precisa del terreno en el que se llevará a cabo una construcción. Según García, et al (1994), para lograr una representación exhaustiva de la superficie terrestre y todos sus detalles, se requiere emplear los instrumentos adecuados para esta tarea.

El levantamiento topográfico del deslizamiento se llevó a cabo en intervalos de 3 metros, tal como lo indica Guzmán Porrez (2016). Este proceso capturó de manera precisa los elementos naturales vinculados a las características topográficas y los rasgos morfológicos del terreno. Esta evaluación proporcionará datos fundamentales sobre el terreno, incluyendo su elevación y distribución espacial.

En términos generales, la región exhibe un relieve que varía desde ligeramente ondulado hasta fuertemente ondulado, caracterizado por la alternancia de pequeñas colinas y cerros. Estas formaciones son el resultado de la acción de una red fluvial que ha esculpido un valle en el entorno. Desde una perspectiva topográfica y en un contexto local, la superficie del deslizamiento de Huanu huanuni muestra una pendiente que oscila entre 4° y 40°, extendiéndose en dirección Noreste a Sureste. Este relieve topográfico es el resultado de la influencia de la quebrada Kollpajahuira y sus afluentes.

2.4. Condiciones climáticas

La altitud de la ciudad de La Paz es de 3700 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). El clima dominante en esta área se clasifica como tundra, lo que implica que incluso durante los meses más cálidos del año, las temperaturas siguen siendo bajas. De acuerdo con la clasificación de Köppen-Geiger, este clima específico se designa como ET (Tundra Polar).

En términos de temperaturas, el promedio anual es de aproximadamente 6.8 °C. La precipitación anual alcanza los 782 mm/año, siendo junio el mes más seco con tan solo 16 mm/año de precipitación, mientras que en enero se registra la mayor cantidad de precipitación con un promedio de 142 mm/año (Climate-Data.org, 2021). (Figura 3)

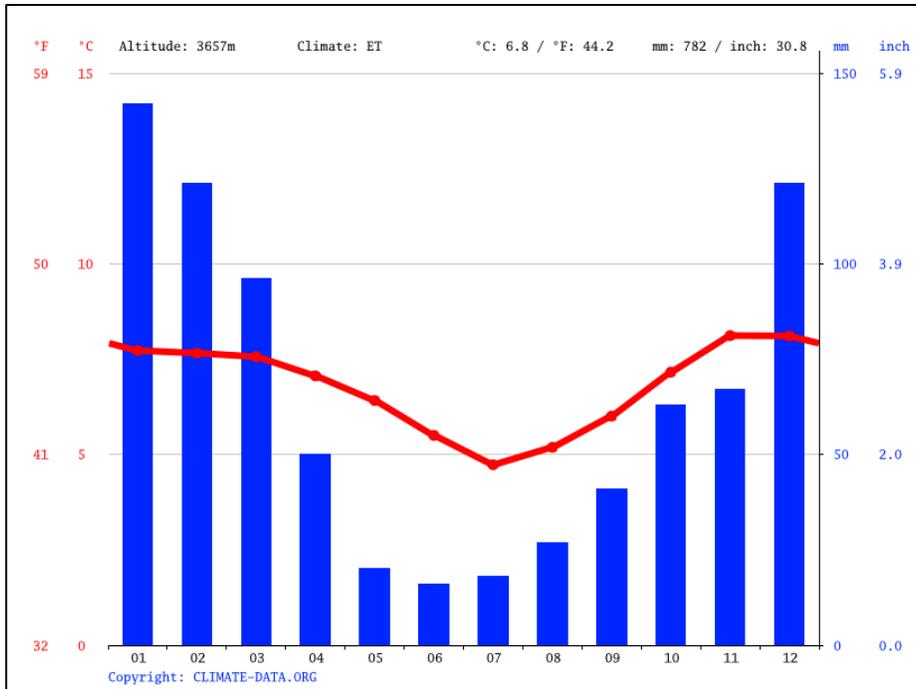


Figura 3. Diagrama Climatológico de la Ciudad de La Paz (Climate-Data.org, 2021)

CAPÍTULO III

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Introducción

Este estudio tiene como objetivo abordar la problemática asociada a los procesos gravitacionales y los factores que pueden afectar a los habitantes de la zona Huanu huanuni. Es crucial presentar ciertos parámetros que ayuden a comprender las deficiencias presentes en dicha área.

Para lograr esto, es esencial brindar definiciones clave sobre geología, geomorfología y deslizamientos, ya que estos elementos constituyen el núcleo de la temática abordada. Asimismo, otro concepto de gran relevancia es el estudio de la mecánica de suelos, ya que nos permitirá analizar el comportamiento y las propiedades físicas del deslizamiento en cuestión.

3.2. Consideraciones geológicas

3.2.1. Procesos geomorfológicos

Los procesos geomorfológicos, tanto físicos como químicos, juegan un papel crucial en la configuración de la forma superficial de la tierra.

La acción geomorfológica tiene una capacidad de obtener y transportar material de la tierra, así mismo Thornbury (1966) indica, que esta acción se debe a fuerzas o agentes móviles que remueven materiales de una parte de la corteza terrestre para transportarlos y depositarlos (tabla 2). No es considerado un agente geomorfológico la gravedad, pero si se origina dentro de la atmosfera de la tierra y están regidos por la fuerza de la gravedad.

Fuerza o agentes	Procesos geomorfológicos	
	Denudativo	Constructivo
Agua, hielo, temperatura, organismos	Meteorización de las rocas	Principio de formación de suelo
Gravedad, movimientos sísmicos	Remoción en masa	Sedimentación coluvial
Lluvia	Erosión pluvial	Sedimentación coluvial Sedimentación diluvial
Escorrentía	Erosión fluvial	Sedimentación aluviales
Oleaje, corrientes costeras, mareas	Erosión marina o lacustre	Sedimentación marina o lacustre
Nieve y hielo en movimiento (glacial)	Erosión glacial	Sedimentación glacial
Viento	Erosión eólica	Sedimentación eólica
Hombre	Erosión antropica	Acción antropica positiva

Tabla 2. Agentes geomorfológicos (Thornbury, Principios de Geomorfología, 1966)

Raffino (2020) destaca que la erosión es una de las principales causas de la desintegración del suelo. Esta se refiere al desgaste de la superficie terrestre debido a factores geológicos, como las corrientes de agua o el deshielo, así como condiciones climáticas como lluvias intensas o fuertes vientos. Además, la actividad humana, como la agricultura, la deforestación, la expansión urbana y los movimientos de tierra, también contribuye significativamente a este proceso.

Los tipos de erosión natural que afecta a este suelo son:

- ↪ La erosión hídrica
- ↪ La erosión gravitatoria
- ↪ La erosión antrópica

Las causas principales para la erosión del suelo se destacan:

- ↪ El movimiento del agua
- ↪ El uso y abuso de la tierra



Figura 4. Erosión gravitatoria en suelos blandos (elaboración propia)

3.2.2. Geomorfología de la cuenca de La Paz

Es posible conocer las zonas en donde ocurrirá un desastre, más aún si la topografía es irregular y con pendiente, donde el material que los compone es deleznable, según Gonzales de Vallejos (2002) los procesos geológicos y climáticos que afectan a la superficie terrestre crean el relieve y definen la morfología de las laderas, que se modifica a lo largo del tiempo para adaptarse a nuevas condiciones geológicas o climáticas. Las laderas suelen adoptar pendientes naturales que tienden hacia el equilibrio, y su forma se ajusta en busca de ese equilibrio. En este contexto, los movimientos en las laderas son interpretados como reajustes del terreno para restablecer el equilibrio ante cambios en las condiciones ambientales.

Según Dobrovoly, 1962, los relieves de la cuenca de la ciudad de La Paz derivan de “la interacción de diversos agentes, factores y procesos entre los cuales se puede citar: variaciones climáticas, erosión, deposición fluvial y/o glacial, meteorización física, remoción en masa, y la actividad antrópica”.

Actualmente son los procesos fluviales, remoción en masa y meteorización física los que dominan en la cuenca, estos a su vez están condicionados por factores climáticos, litológicos, estructurales, morfológicos.

El término de cuenca de La Paz se emplea para designar a la depresión topográfica en que se encuentran confinados los sedimentos de la formación La Paz y otros más recientes (Ahlfeld, Formación La Paz, 1945).

Algunos procesos de remoción en masa ocurren esencialmente durante las estaciones lluviosas agravándose considerablemente durante el final de la época de precipitación, las unidades estratigráficas también juegan un papel importante en los procesos gravitacionales, más aún, aquellos que ocurren por el socavamiento en los flancos del río (Dobrovlny, 1962).

En la zona de estudio, las formas del relieve son el resultado de procesos hídricos, especialmente flujos de barro, que han dado lugar a la formación de quebradas, cárcavas y deslizamientos debido a la acción erosiva del agua. Desde el punto de vista litológico, el deslizamiento está compuesto por depósitos de flujo de barro y por la formación geológica conocida como "La Paz", la cual se encuentra en las partes más bajas de los valles principales.

Localmente la Formación La Paz pertenece a la época del Neógeno, conformado por la unidad inferior de dicha formación, esta unidad aflora en el valle de Achocalla, a lo largo de los ríos principales desde la angostura de Aranjuez hasta San Pedro y Miraflores y forma parte de la pendiente meridional de Pampahasi (Dobrovlny, 1962, pág. 22).

Reafirmando, según Troll & Finsterwalder, (1935); Ahlfeld, (1945), estos autores indican que cerca al área de estudio se encuentran las gravas Pampahasi que presenta una ligera inclinación hacia el sud.

Los procesos gravitacionales se desarrollan a lo largo de uno o varios planos de deslizamiento, y se distinguen de los movimientos por fallas que suelen ser fracturas profundas en la tierra. En el caso del deslizamiento Huanu Huanuni, se caracteriza por un movimiento de tipo rotacional, el cual es influenciado por la composición litológica del material presente y por la pendiente del terreno.

3.2.3. Movimiento en masa

Según Cruden, 1991, este término incluye "todos aquellos movimientos ladera abajo de rocas, detritos o de tierras por efectos de la gravedad". Algunos tipos de

movimientos en masa, como la reptación de suelos, tienden a ser lentos, a veces incluso imperceptibles y difusos en su avance. Por otro lado, existen movimientos más rápidos, como ciertos deslizamientos, que pueden desarrollar velocidades considerables y pueden ser definidos por la superficie de rotura. (Croizer, 1999; Glade & Croizer, 2005) (figura 5).

Es cierto que la mayoría de las clasificaciones de deslizamientos se fundamentan en el tipo de material involucrado. Sin embargo, estas clasificaciones no se limitan exclusivamente a considerar el tipo de material, sino que también tienen en cuenta otros factores cruciales como los mecanismos de movimiento, el nivel de deformación y el grado de saturación del terreno afectado.

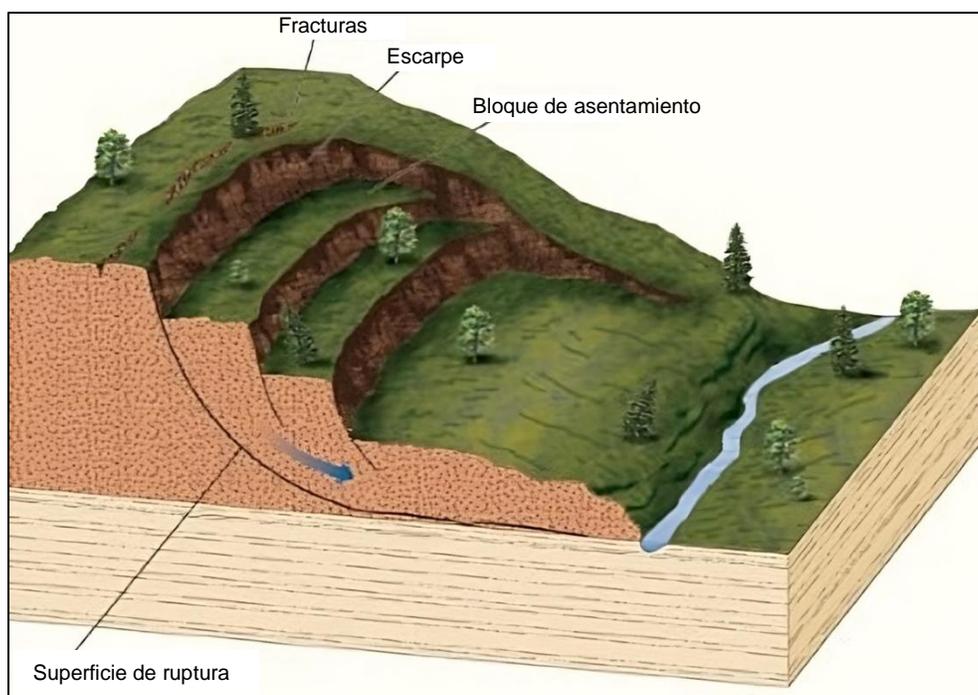


Figura 5. Diagrama de los movimientos en masa – tipo rotacional (Glade & Croizer, 2005)

Para cada tipo de movimiento en masa se describe el rango de velocidades, parámetro importante ya que este se relaciona con la intensidad de aquello y la amenaza que pueden significar. Se menciona la relación del intervalo de velocidades típicas con la escala de velocidades (Cruden & Varnes, 1996), la cual se presenta en la siguiente tabla.

Clase de velocidad	Descripción	Velocidad (mm/s)	Velocidad típica
7	Extremadamente rápido		
		5×10^3	5 m/s
6	Muy rápido		
		5×10^1	3 m/s
5	Rápido		
		5×10^{-1}	1,8 m/s
4	Moderada		
		5×10^{-3}	13 m/s
3	Lenta		
		5×10^{-5}	1,6 m/s
2	Muy lenta		
		5×10^{-7}	16 m/s
1	Extremadamente lenta		

Tabla 3. Escala de velocidades (Cruden & Varnes, 1996)

3.2.4. Deslizamiento

La definición de deslizamiento es referida a un movimiento ladera abajo de una masa de suelo, detritos o roca, cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante (Alcántara, 2000).

Según Suárez (1998) este movimiento implica el desplazamiento de las capas de suelo a lo largo de una o varias superficies de falla. Estas superficies de falla pueden ser claramente detectables o pueden encontrarse en una zona relativamente estrecha. Los deslizamientos pueden originarse tanto por procesos naturales como por factores inducidos por la actividad humana, como cortes, rellenos, deforestación, entre otros. La figura 6 ilustra este tipo de movimiento.

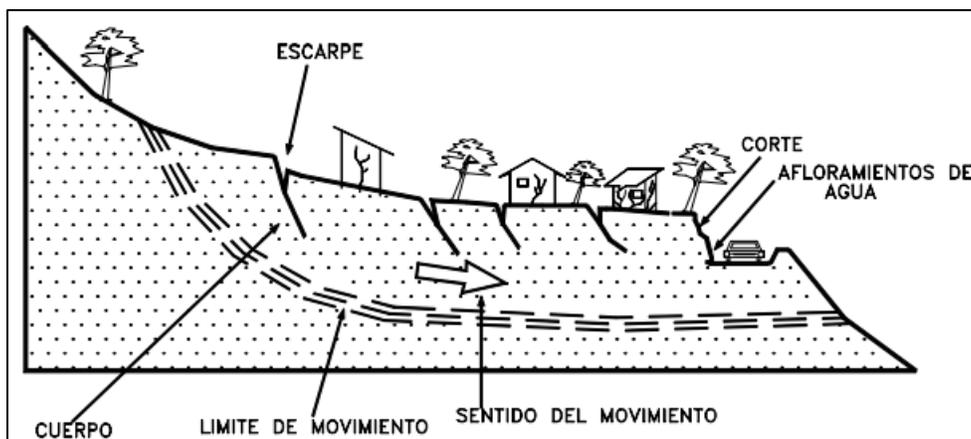


Figura 6. Deslizamiento en suelos blandos (Suárez, 1998, pág. 16-17)

Los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos causando miles de muertes y daños en las propiedades.

Los movimientos en masa producen cambios en la morfología del terreno, diversos daños ambientales, daños en las obras de infraestructura, destrucción de viviendas, puentes, bloqueo de ríos, etc. (Suárez, 1998).

El volumen total de daños que causa un deslizamiento es superior al de los terremotos y las inundaciones. Sin embargo, un gran porcentaje de pérdidas de los deslizamientos se pueden evitar si el problema se identifica con anterioridad y se implementan las medidas de prevención o control.

Cabe mencionar que los deslizamientos frecuentemente se relacionan con pendientes altas (figura 7), aunque por lo general el problema de estos se debe a la presencia de lluvias intensas, meteorización, erosión y en algunas regiones por la sismicidad.



Figura 7. Deslizamientos relacionados a altas pendientes (Suárez, 1998)

Un talud o ladera, es una masa de tierra que no es plana sino representa una pendiente o cambios significativos de altura. En la literatura técnica se define como "ladera" cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural (figura 8) y "talud" cuando se formó artificialmente (figura 9) (Suárez, 2017).

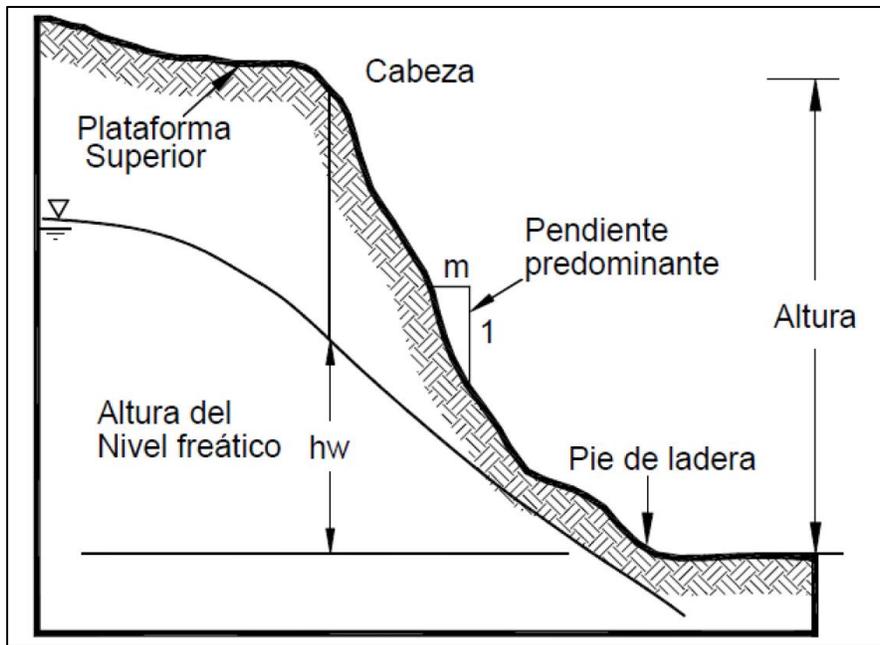


Figura 8. Ladera natural (Suárez, 2017)

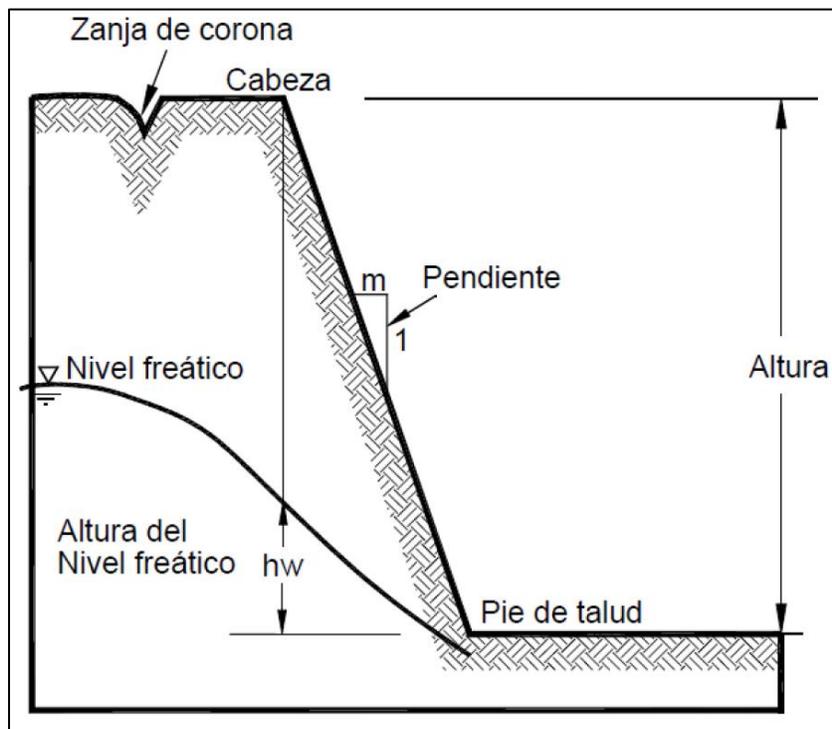


Figura 9. Talud artificial (corte o relleno) (Suárez, 2017)

Según Suárez (2017), las laderas o taludes que han permanecido estables por muchos años, pueden fallar debido a cambios topográficos, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o a factores de tipo

antrópico o natural que modifiquen su estado de estabilidad. Un talud estable puede convertirse en un “deslizamiento”.

En un talud o ladera se definen los siguientes elementos (tabla 4):

TALUD O LADERA	ELEMENTOS	DESCRIPCION
	Pie, pata o base	Cambio brusco de pendiente en la parte inferior del talud o ladera, generalmente presentan una forma cóncava.
	Cabeza, cresta, cima o escarpe	Cambio brusco de pendiente en la parte superior del talud o ladera, si la pendiente en un punto bajo es semivertical o de alta pendiente se denomina escarpe y pueden coincidir con coronas de deslizamientos.
	Altura	Distancia vertical entre el pie y la cabeza, definida en taludes artificiales.
	Altura del nivel freático	Distancia vertical desde el pie de talud o ladera hasta el nivel de agua.
Pendiente	Inclinación de la superficie del talud o ladera, puede medirse en grados, porcentajes o en relación m:1, en donde m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. Ejemplo: $45^\circ = 100\%$.	

Tabla 4. Elementos de un talud o ladera tomado de Suárez, 2017

Los suelos o rocas más resistentes generalmente forman laderas de mayor pendiente, por el contrario, los materiales de baja resistencia o blandos tienden a formar laderas de baja pendiente.

3.2.4.1. *Deslizamiento rotacional*

En el sistema de Cruden & Varnes, (1996), los deslizamientos rotacionales son masas que desplazan importantes volúmenes de material y se desprenden y mueven hacia abajo sobre una superficie de ruptura con forma curva cóncava (forma de cuchara) (figura 10).

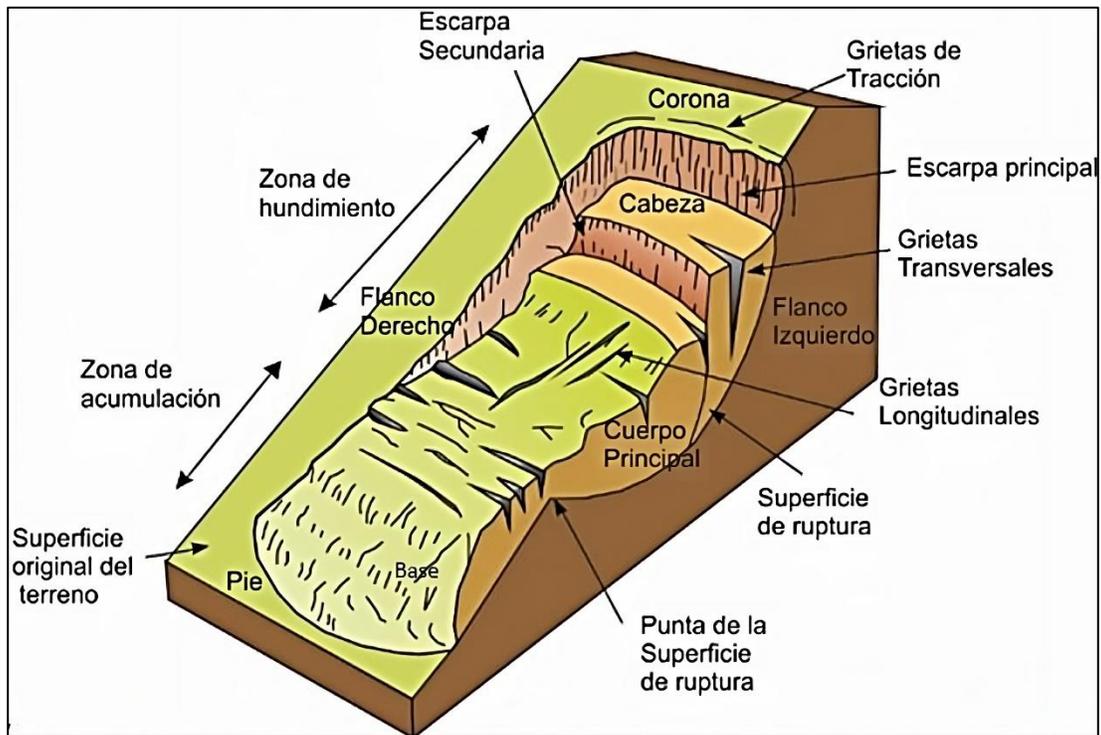


Figura 10. Esquema de un deslizamiento rotacional (Cruden & Varnes, 1996)

↗ Cabeza

Parte superior de la masa de material que se mueve. La cabeza del deslizamiento no corresponde necesariamente a la cabeza del talud. Arriba de la cabeza está la corona.

↗ Corona.

El material que se encuentra en el sitio, (prácticamente inalterado), adyacente a la parte más alta del escarpe principal, por encima de la cabeza.

↗ Escarpa principal.

Superficie muy inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material conforma la superficie de la falla.

↗ Escarpe secundario.

Superficie muy inclinada producida por el desplazamiento diferencial dentro de la masa que se mueve. En un deslizamiento pueden formarse varios escarpes secundarios.

↗ Superficie de falla.

Área por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material desplazado. El suelo por debajo de la superficie de la falla no se mueve, mientras que el que se encuentra por encima de ésta, se desplaza. En algunos movimientos no hay superficie de falla.

↗ Pie de la superficie de falla.

La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.

↗ Base.

El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.

↗ Punta o uña.

El punto que se encuentra en la parte alta de la base.

↗ Cuerpo principal del deslizamiento

El material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla. Se pueden presentar varios cuerpos en movimiento.

↗ Superficie original del terreno.

La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.

↗ Costado o flanco.

Un lado (perfil lateral) del movimiento. Se debe diferenciar el flanco derecho y el izquierdo.

↗ Derecha e izquierda.

Para describir un deslizamiento se recomienda utilizar la orientación geográfica (Norte, Sur, Este, Oeste); pero si se emplean las palabras derecha e izquierda, deben referirse al deslizamiento observado desde la corona hacia el pie.

Según Suárez (1998), los deslizamientos se originan por procesos geotécnicos activos en donde “la superficie de falla es formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento” (figura 11).

Visto en planta, el deslizamiento de rotación posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento, lo cual genera, comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento. La cabeza del movimiento bascula hacia atrás y los árboles se inclinan, de forma diferente, en la cabeza y en el pie del deslizamiento (figura 12).

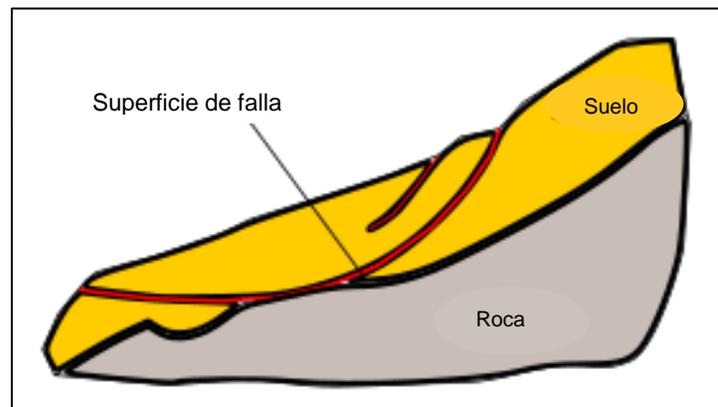


Figura 11. Deslizamiento rotacional en suelos (Suárez, 1998)

Frecuentemente este tipo de deslizamientos son frecuentes en suelos homogéneos (cohesivos), caracterizados por tener la forma de una cuchara, en este deslizamiento la masa deslizada se acumula al pie de la ladera, así como un lóbulo.

Debido a su facilidad de análisis son el tipo de deslizamiento más estudiados en la literatura.



Figura 12. Deslizamiento rotacional típico (Suárez, 1998)

En la parte superior del deslizamiento, el desplazamiento es mayormente en dirección semivertical y muestra una rotación limitada. Sin embargo, se puede notar que la superficie del terreno gira en la dirección de la cresta del talud, aunque algunos bloques pueden girar en dirección opuesta.

Los escarpes con una inclinación semivertical propician la posibilidad de que se generen movimientos regresivos o progresivos hacia arriba. Además, en el contexto de estos deslizamientos, pueden ocurrir otros movimientos curvos que dan origen a escarpes secundarios (figura 13).

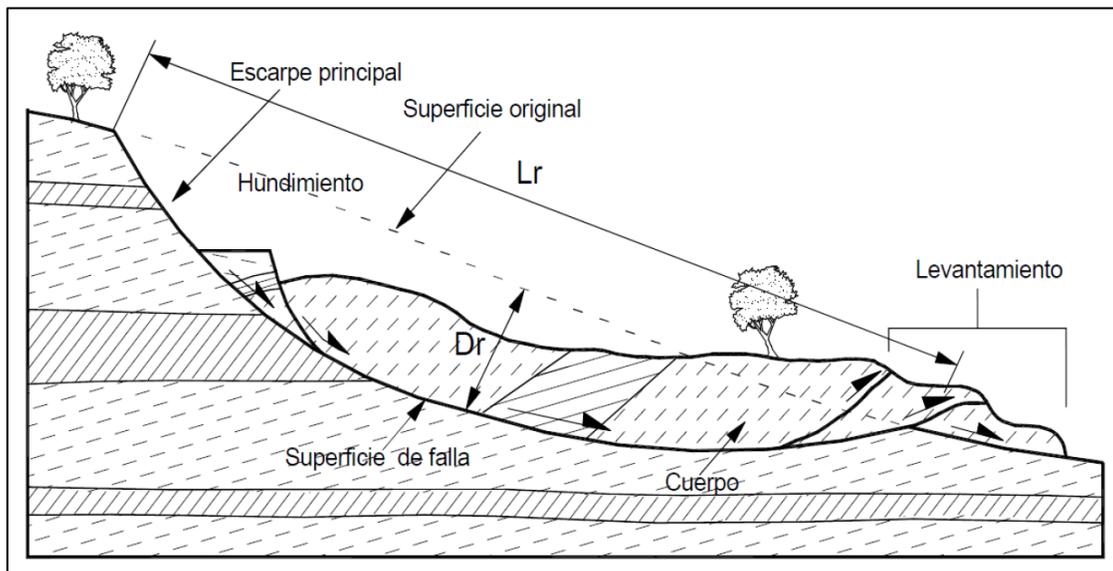


Figura 13. Deslizamiento rotacional (Suárez, 1998)

3.2.5. Reptación

La reptación en los suelos se relaciona con procesos de humedecimiento y secado que ocurren principalmente en suelos de consistencia suave. Estos procesos pueden dar lugar a movimientos más acelerados, como flujos o deslizamientos. La reptación se caracteriza por movimientos sumamente lentos, llegando a ser extremadamente lentos, en el suelo subsuperficial, sin que se forme una superficie de falla claramente definida (Suárez, 1998, pág. 16).

Por lo general, estos movimientos implican desplazamientos de solo unos pocos centímetros al año, pero pueden afectar áreas extensas de terreno (figura 14).

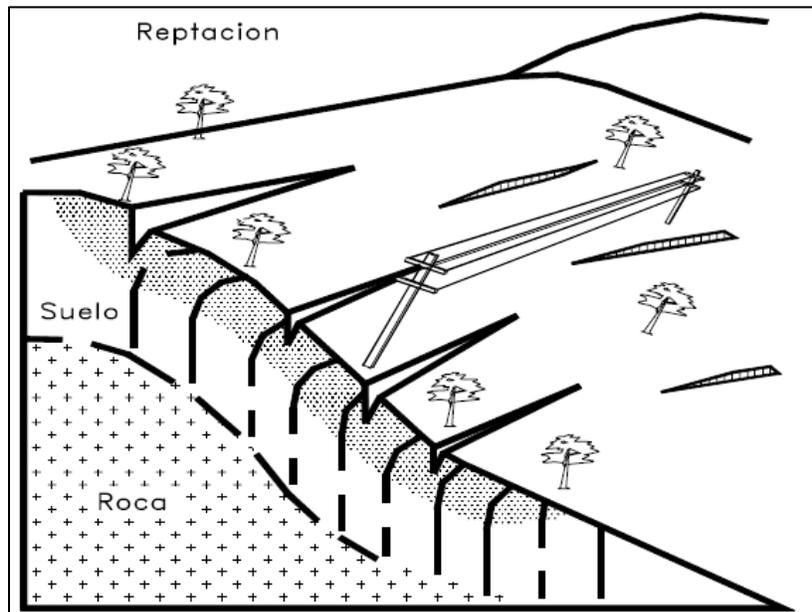


Figura 14. Esquemas de un proceso de reptación (Suárez, 1998)

Según Sharpe (1960) reconoce cuatro tipos de reptación: reptación del suelo, reptación de escombros de talud, reptación de un glaciar de piedra y reptación de piedra.

Los efectos visibles de una reptación se proyectan en la vegetación, estructuras construidas por el hombre, arboles encorvados, postes de alumbrados, de teléfono y de telégrafos inclinados (Thornbury, 1960).

3.2.6. Flujo de barro

El flujo de barro es un movimiento rápido a extremadamente rápido, según la Cruden y Varnes, presentan un rango entre clase 7 a 6 y velocidad típica de 7 m/s a 3 m/s, donde los materiales transportados por lo general son finos cuya plasticidad se encuentra entre los 20% a 45% (figura 15).

“Este tipo de movimiento es similar al del flujo de detritos, pero la fracción arcillosa modifica la reología del material. También se distingue de los deslizamientos por flujo de arcilla, en que el flujo de lodo incorpora agua superficial durante el movimiento, mientras que el deslizamiento por flujo ocurre por licuación in situ, sin un incremento significativo del contenido de agua”.
(Hungar, 2001, pág. 23)

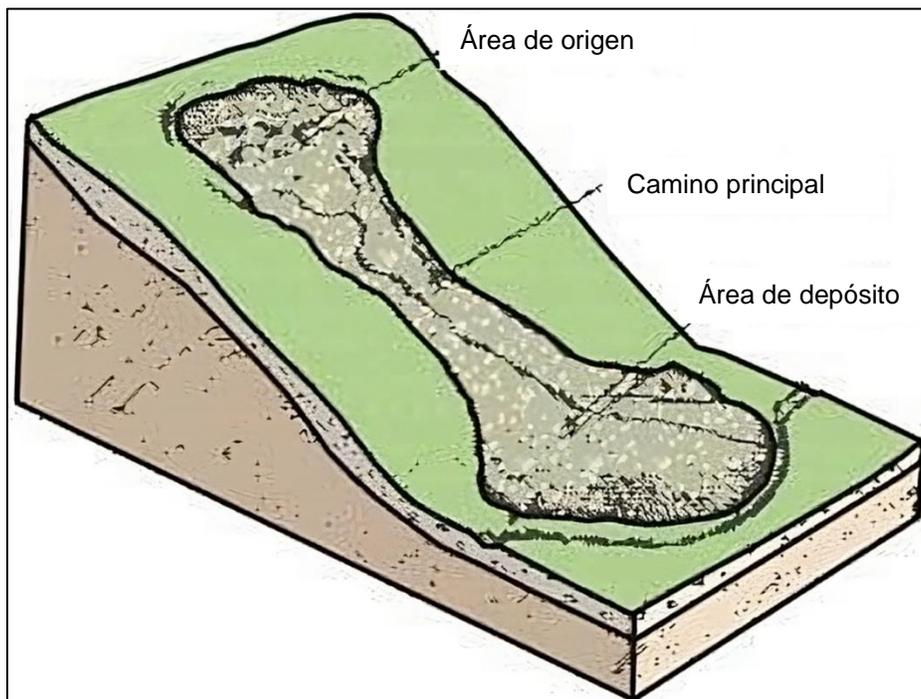


Figura 15. Diagrama de Flujo de barro (Berkeley, 2010).

3.3. Fotogeología

La fotogeología se define como el estudio e interpretación de fotografías aéreas con el objetivo de obtener información geológica (Vargas Còrdova, 1992). Esto implica la presentación adecuada de dicha información en forma apropiada, como mosaicos, mapas geológicos o secciones geológicas.

Al realizar un análisis multitemporal, se recurre a la fotografía aérea y a imágenes satelitales. Según Vargas (1992), la fotointerpretación es el resultado del registro gráfico directo de una imagen captada mediante un sistema fotográfico. Sin embargo, existen otros sistemas, como el radar e infrarrojo térmico, que registran imágenes utilizando radiaciones no visibles y no generan fotografías, sino lo que se conoce como “IMÁGENES”.

Tanto las fotografías aéreas como las imágenes satelitales brindan información geológica sobre rasgos estructurales, características litológicas y morfológicas del área en estudio. Además, los avances tecnológicos de las últimas décadas han permitido obtener registros repetidos de imágenes a intervalos cortos, gracias a las características orbitales de los satélites (Vargas, 1992).

3.3.1. Alcances

La utilización de fotografías e imágenes satelitales georreferenciadas ofrece la posibilidad de adquirir información detallada sobre la geología, drenajes y eventos de remoción en masa que han afectado la región de interés. También permite identificar impactos antrópicos que hayan ocurrido en el área.

Este enfoque analítico brinda varias ventajas. En primer lugar, posibilita la interpretación y el análisis en distintos momentos y ubicaciones, lo que resulta especialmente útil para áreas de difícil acceso. Además, proporciona resultados de manera rápida y precisa, lo que contribuye a tomar decisiones informadas sobre la gestión del terreno y la planificación de actividades.

3.3.2. Limitaciones

En el caso de la ciudad de La Paz, la mayoría de las fotografías aéreas antiguas se centran en las áreas cercanas al centro metropolitano, dejando a un lado las zonas más alejadas. Debido a esta limitación, se ha llevado a cabo una selección cuidadosa de las imágenes aéreas que mejor representen y abarquen el área de estudio en cuestión.

3.3.3. Criterios de observación geológica

Los elementos que se deben analizar en una fotografía aérea, son agrupados de la siguiente manera.

a) Elementos analíticos referidos a las características físicas

- ↗ Características del tipo general
- ↗ Tono de la fotografía
- ↗ Textura de la imagen fotográfica
- ↗ Características de tipo particular
- ↗ Forma
- ↗ Sombra
- ↗ Tamaño
- ↗ Tipo de configuración

b) Elementos analíticos fotogeológicos

- ↗ Geoformas
- ↗ Emplazamientos
- ↗ Gradiente
- ↗ Discordancias
- ↗ Anomalías topográficas
- ↗ Alineamientos
- ↗ Erosión
- ↗ Drenaje
- ↗ Anomalías geomorfológicas

- ↗ Suelos
- ↗ Rocas
- ↗ Estructuras

Para la fotointerpretación geológica de las fotografías aéreas adjuntadas en el presente trabajo, de acuerdo con Vargas, (1992), corresponden a los elementos que utiliza el interprete para obtener informacion VISUAL de tipo geologico en una fotografia. Estos son:

- ↗ Tono fotografico y color
- ↗ Textura fotografica
- ↗ Sombra
- ↗ Diseño
- ↗ Geoformas (geomorfologia)
- ↗ Escala, tamaño
- ↗ Sitio
- ↗ Vegetacion

3.4. Hidrogeología

Según Diez (2016), la hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de almacenamiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y sus propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación.

El agua subterránea se mueve según las fuerzas de la gravitación, pero más lento que el agua superficial. La velocidad y los movimientos dependen de la porosidad y permeabilidad del substrato (la roca o el suelo).

El tipo hidrogeológico de cualquier roca o formación geológica está definido por dos factores: i) su capacidad de almacenamiento, de retener agua y después dejarla fluir (porosidad, que está determinada por el volumen de agujeros o vacíos sobre el volumen total), ii) su capacidad de transmisión, o sea de permitir que el agua circule a través de la roca (Diez, 2016).

3.4.1. Origen del agua subterránea

El origen de las aguas subterráneas es uno de los problemas que más han preocupado al hombre desde los tiempos más remotos. La teoría de la infiltración, que supone que todas las aguas subterráneas provienen bien de infiltración directa en el terreno de las lluvias, nieves o de manera indirecta de ríos y lagos (Espinoza, 2004).

3.4.2. Porosidad

De acuerdo Gonzales de Vallejos, et al. (2002) define la porosidad como la relación entre el volumen de huecos y el volumen total de una roca. Es un parámetro adimensional y depende únicamente de la constitución de la roca o suelo, es decir, de su textura características, sin que intervenga la forma geométrica ni la potencia de la formación o su mecanismo funcionamiento hidráulico en la naturaleza.

Los poros pueden estar relacionada a los espacios intergranulares, ya sean estas detríticas, grietas o fisuras, por lo general la porosidad puede estar relacionada a la textura de una formación o bien depender de las características del fluido que se mueve en el interior.

La porosidad total n , conceptualmente referida al volumen total de poros, independientemente de que el fluido tenga o no la capacidad de circular entre ellos:

$$n = \frac{\text{volumen de los poros}}{\text{volumen total}}$$

3.4.3. Permeabilidad

La permeabilidad es el parámetro que permite evaluar la capacidad de transmitir agua de una formación en función de la textura de la misma, sin seleccionarla con su estructura o forma geométrica. Dentro de este concepto pueden definirse otros dos:

La permeabilidad ligada tanto a las características texturales del medio físico como del fluido que transmite, denominada permeabilidad efectiva o conductividad hidráulica, representada por el coeficiente de permeabilidad k . (Gonzales de Vallejos, Ferrer, Ortuño, & Carlos, 2002).

3.5. Geotecnia

3.5.1. Ensayos de Laboratorio

A partir de la realización de ensayos de laboratorio se obtuvo un análisis cuantitativo, el cual permitió la obtención de parámetros geotécnicos del deslizamiento de Huanuni, estos ensayos son:

Ensayo de Penetración Standard (SPT)

El SPT (Standard Penetration Test) es el método más conocido y usado en la exploración de suelos, tal vez por su sencillez de ejecución y sobre él existe una literatura muy abundante. El método ha sido estandarizado desde 1958, con varias revisiones (ASTM D-1586) y consiste en hincar una toma muestras partido de 45 cm de largo colocado al extremo de una varilla, por medio de un peso (martillo) de 63.5 kg que se deja caer "libremente" desde una altura de 76 cm, anotando los golpes necesarios para penetrar cada 15 cm (Álvaro J., 1999).

Según Bermejo (2013), la suma del número de golpes para los próximos dos incrementos de 150 mm se usa como el número de penetración "N" a menos que el último incremento no pueda completarse. En este caso las sumas de las primeras dos penetraciones de 150 mm se graban como N.

❖ **Ventajas y desventajas**

Se resumen en la siguiente tabla:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Sencillos y de bajo costo	Muestra alterada (solo para caracterización)
Funciona en muchos tipos de suelo	Número muy crudo para analizar
Se puede utilizar en rocas blandas	No se aplica en arcillas blandas y limos
Disponible en todo el mundo	Variabilidad e incertidumbre

Tabla 5. Ventajas y desventajas del ensayo SPT. (Suárez, Ensayos in situ, 2010)

A partir de este ensayo realizado en campo se obtendrá la muestra en la cuchara partida y se realizará los siguientes ensayos en el laboratorio de suelos:

- ↪ Análisis granulométrico
- ↪ Clasificación de suelo a partir del sistema unificado de suelos (USCS).
- ↪ Límites de Atterberg, para determinar el límite plástico, límite líquido y el índice de plasticidad del suelo.
- ↪ Ensayo de corte directo, es aquel que establece la cohesión y la fricción de la muestra drenada o no drenada.

Por otra parte, existen correlaciones en el caso de los terrenos cohesivos, pero al ser un ensayo prácticamente instantáneo, no se produce la disipación de los incrementos de presiones intersticiales producidos en estos suelos arcillosos por efecto del golpeo, lo que por cierto debe influir en el resultado de la prueba. Por ello los resultados en suelos cohesivos no son muy fiables para la aplicación de correlaciones. Actualmente este criterio está cuestionado, siendo cada vez más aceptado que las pruebas penetrométricas pueden dar resultados igualmente válidos en todo tipo de suelos. (Bermejo, 2013).

❖ **Correcciones de los valores “N”**

Cuando se efectúan los ensayos de “SPT”, se genera una energía de caída, por eso, es necesario realizar correcciones de los valores de “N” rebotes obtenidos en campo mediante factores de corrección. Los resultados de penetración dinámica, se los ha corregido por factores como las que se citan (Salgado R. 2008):

- ↪ Tipo de martinete (altura y peso de martinete)
- ↪ Longitud y diámetro del tubo guía
- ↪ Corrección por confinamiento del suelo
- ↪ Presencia del nivel freático

La mayoría de las correlaciones, toman como patrón, el procedimiento de ejecución del ensayo de SPT de Terzaghi, mismo que, proporciona una energía equivalente al

60% (ensayo estándar), en este sentido, en principio se realizó una corrección del ensayo de SPT para determinar el número de golpes equivalente al de un procedimiento con 60% de energía; de esta forma se determinó el número de golpes estandarizados N_{60} .

La energía aplicada a la prueba difiere en diferentes partes del mundo, es por ello que ER es la razón de la energía aplicada por el martillo al tubo muestreador estándar.

$$N_{60} = N_{\text{spt}} * (ER/60)$$

❖ **Análisis Granulométrico**

El análisis granulométrico es una técnica fundamentalmente empleada para describir la distribución de tamaños de partículas presentes en muestras de suelo. Esta información es esencial para establecer la clasificación del suelo y para comprender sus propiedades mecánicas y geotécnicas (ASTM). Esta evaluación puede llevarse a cabo utilizando el método de tamizado (Barahona et al., 2022).

El análisis granulométrico se realiza utilizando dos métodos principales: el tamizado y la sedimentación. El tamizado es empleado cuando las partículas son de tamaño relativamente mayor, mientras que la sedimentación se aplica para partículas más pequeñas. En el proceso de tamizado, se utilizan una serie de tamices con aberturas graduadas que permiten separar el material en diferentes fracciones de tamaño decreciente.

Si bien el análisis granulométrico es adecuado para determinar la distribución de tamaños en gravas y arenas, cuando se trata de materiales como arcillas, limos, turbas y margas, es necesario complementar el estudio con ensayos que determinen la plasticidad del suelo.

Los análisis granulométricos se llevan a cabo en el laboratorio mediante la utilización de tamices con distintas aperturas de malla. Las partículas que pasan a través de los tamices o quedan retenidas en ellos proporcionan información sobre las características granulométricas del material (tabla 7).

Tamaños nominales de abertura	
(mm)	ASTM
75	3"
63	2 1/2"
50	2"
37.5	1 1/2"
25	1"
19	3/4"
9.5	3/8"
4.75	N° 4
2	N° 10
0.425	N° 40
0.075	N° 200

Tabla 6. Cuando no se cuenta con tamices de aberturas nominales en mm, los tamaños nominales de los tamices pueden ser los correspondientes a ASTM.

❖ Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg proporcionan una indicación indirecta de la resistencia al corte de los suelos y su comportamiento estructural en relación a la humedad natural presente en ellos. Sin embargo, estos límites son aplicables principalmente en suelos con una proporción significativa de partículas finas, ya que en suelos granulares, el comportamiento está más influenciado por la interacción de las partículas. Por esta razón, se utilizan los límites de Atterberg en suelos arcillosos para inferir su comportamiento.

Según Franch & Torrijo (2013) El límite plástico es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo puede considerarse no plástico o sólido, mientras que el límite líquido es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo muestra comportamiento plástico. El índice de plasticidad refleja el rango de comportamiento plástico del suelo. Un valor nulo en el índice de plasticidad (NP) indica que el suelo no es influenciado significativamente por el agua y no presenta potencial de expansión ni deformación. Sin embargo, valores altos indican que el suelo es más propenso a deformaciones y fenómenos de expansión. La siguiente tabla proporciona rangos de comportamiento en función del índice de plasticidad:

ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)	COMPORTAMIENTO
$IP \leq 7$	Baja Plasticidad
$7 < IP \leq 17$	Media Plasticidad
$IP > 17$	Alta Plasticidad

Tabla 7. Rango de índices de plasticidad (Franch & Torrijo, 2013)

Es importante destacar que estos valores y comportamientos varían según el contenido de finos y la composición mineralógica del suelo, y que los límites de Atterberg son solo uno de los muchos factores que influyen en el comportamiento y las propiedades geotécnicas de los suelos.

3.6. Estabilidad de talud

3.6.1. Análisis de estabilidad

La modelación matemática de los taludes es una parte esencial de la ingeniería geotécnica. Su objetivo principal es analizar las condiciones de estabilidad de los taludes, tanto naturales como contruidos artificialmente. En este análisis, se persiguen varios objetivos clave:

- ↪ Determinar las condiciones de estabilidad del talud.
- ↪ Explorar los posibles mecanismos de falla que podrían ocurrir.
- ↪ Evaluar la susceptibilidad del talud a distintos mecanismos de activación.
- ↪ Comparar la eficacia de diversas opciones de remediación o estabilización y su impacto en la estabilidad del talud.
- ↪ Diseñar taludes óptimos en términos de seguridad, confiabilidad y economía.

En resumen, la modelación matemática de taludes en ingeniería geotécnica es un proceso esencial para garantizar la seguridad y la estabilidad de los taludes en diversas condiciones y situaciones, permitiendo tomar decisiones informadas y adoptar medidas adecuadas para prevenir fallas y riesgos asociados.

Efectivamente, en el campo de la ingeniería geotécnica, existen numerosas metodologías para llevar a cabo el análisis de estabilidad de taludes. Estas metodologías se fundamentan en el principio del equilibrio límite, que parte de la premisa de que, en una condición de falla, las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes a lo largo de la superficie de falla se encuentran en equilibrio, resultando en un factor de seguridad igual a 1 (ver Tabla 18).

El método de equilibrio límite es especialmente apreciado debido a su simplicidad y facilidad de uso. Permite analizar una variedad de casos de falla, incluyendo fallas rotacionales, traslacionales, de inclinación (toppling) y de cuña. Esta metodología es una herramienta fundamental para evaluar la estabilidad de taludes en una amplia gama de situaciones y condiciones.

Es importante destacar que, aunque el método de equilibrio límite es relativamente sencillo, su aplicación efectiva requiere considerar una serie de variables y factores geotécnicos para obtener resultados precisos y confiables. Por lo tanto, se debe llevar a cabo un análisis detallado y riguroso que tome en cuenta las características específicas del sitio y del material del talud.

FACTOR DE ESTABILIDAD		Nivel o grado de estabilidad
Estático	Seudoestático	
1.0 a 1.2	Menos a 1.0	Inestable
1.2 a 2.0	1.0 a 1.2	Estable
Mayor a 2.0	Mayor a 1.2	Muy estable

Tabla 8. Factor de estabilidad

Los métodos de cálculo utilizados para evaluar la estabilidad de taludes se basan principalmente en los principios de la estática, que analizan el equilibrio de una masa de suelo que potencialmente puede ser inestable. Estos métodos tienen en cuenta una serie de factores influyentes, que incluyen parámetros geológicos, la geometría del talud, el flujo de agua y las propiedades mecánicas del suelo. Estos factores se consideran de manera integral para determinar la seguridad del talud con una precisión considerable en sus resultados.

Dentro de los métodos de análisis de estabilidad de taludes que se utilizan en la ingeniería geotécnica, se encuentran los siguientes:

Método Ordinario o Fellenius: Este método se basa en la comparación de las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes en el talud. Calcula el factor de seguridad comparando los momentos resistentes con los momentos actuantes.

Método de Janbú simplificado: Es una simplificación del método original de Janbú. Se utiliza para calcular el factor de seguridad y se basa en considerar la suma de momentos de las fuerzas resistentes y actuantes.

Método de Spencer: Utiliza una forma simplificada de la superficie de falla y considera la contribución de cada segmento de la superficie de falla para calcular el factor de seguridad.

Método de Morgenstern-Price: Emplea círculos de falla y se basa en el concepto de equilibrio límite. Es útil para calcular el factor de seguridad de una superficie de falla circular.

Método de Bishop: Este método considera una superficie de falla no circular y tiene en cuenta tanto la resistencia al corte como la cohesión del suelo. Calcula el factor de seguridad teniendo en cuenta múltiples segmentos de la superficie de falla.

Cada uno de estos métodos tiene sus propias ventajas y limitaciones, y la elección del método dependerá de la complejidad de la situación y de la información disponible sobre las características geológicas y geotécnicas del sitio.

3.7. Estratigrafía

3.7.1. Formación La Paz

La Formación La Paz litológicamente está compuesto de areniscas, limolitas y conglomerados, en general poco consolidados, son del periodo Neógeno de época Pliocena, distribuido al borde oriental del Altiplano Norte, Suárez (1996), indica que el espesor de dicha formación espesor alcanza más de 600 m, los límites inferior y superior discordantes con diferentes unidades, se encuentra en la cuenca hidrográfica del río La Paz, aguas arriba de la Angostura de Aranjuez, al Sueste de la ciudad de La Paz, Provincia Murillo del departamento de La Paz.

Según Suárez & Díaz (1996), la formación La Paz se encuentra, al Norte de la serranía de Aranjuez, compuestas por capas discontinuas, lenticulares de arenas, limos, gravas y arcillas, todas ellas pocas consolidadas, con algunos filones delgados de lignito, estas capas presentan una coloración gris; unos cuantos estratos lenticulares de arenas roja y de color canela se encuentran cerca de Obrajes y San Jorge.

Los afloramientos que están al Oeste del Pico de Pampahasi corresponden a los estratos superiores de la Formación La Paz los cuales presentan una granulometría gruesa.

3.7.2. Gravas Pampahasi

Las gravas Pampahasi presenta un espesor de hasta 20 metros e incluso más, compuesta de clastos subredondeados a redondeados de cuarcitas, pizarras, areniscas y granitos, con predominancia de limos, la superficie de erosión sobre la cual descansa este depósito ha biselado la parte inferior de la Formación Purapurani y la parte superior de la Formación La Paz, localizada en los valles de Chuquiaguillo e Irpavi, estos depósitos fueron descritos como terrazas (Troll & Finsterwalder, 1935; Ahlfeld, Geología descriptiva, 1945).

Dobrovoly (1962), que las gravas Pampahasi se encuentra limitado por paredes abruptas que caen casi verticalmente.

3.8. Neotectónica

Según Lavenu (1977), Las deformaciones observadas en los depósitos de la formación La Paz exhiben una superposición de los movimientos tectónicos que han ocurrido contemporáneamente o después de la deposición del propio material. En este contexto, el estudio microtectónico se ve favorecido por la naturaleza relativamente fina de la litología, lo que permite una mejor identificación de las microestructuras en comparación con otros depósitos, que son más gruesos y menos arcillosos. Las deformaciones en la formación La Paz se caracterizan por fallas de rumbo dextral con una dirección promedio de N 070.

Esta sección del estudio será fundamental para detectar la actividad tectónica a través del análisis de pequeñas fallas, rasgos de fracturas, pliegues y diaclasas presentes en los depósitos cuaternarios y en la formación La Paz. Para lograr este objetivo, se ha planificado llevar a cabo investigaciones relacionadas con la Neotectónica de la cuenca de La Paz, lo que implica el estudio de las fallas que han afectado a los suelos de las épocas Plioceno y Cuaternario. Cabe destacar que se han llevado a cabo estudios relevantes en este ámbito, algunos de los cuales fueron realizados por la consultora francesa B.R.G.M (1977), (Bles & B.R.G.M., 1977), Lavenu (1977, 1986),

llegaron a la siguiente conclusión asociado a la deformación de la cuenca de La Paz, la cual se pueden resumir en la siguiente tabla.

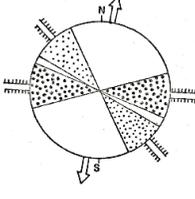
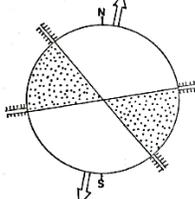
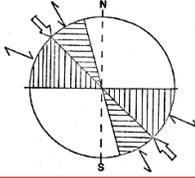
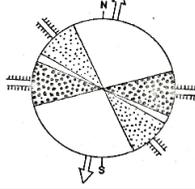
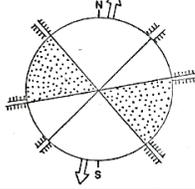
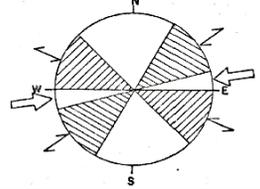
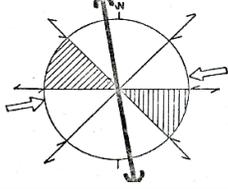
Deformaciones Neotectónicas de la cuenca de La Paz			
		Pequeñas deformaciones	Grandes deformaciones
DEFORMACIONES CUATERNARIAS	FASE 3 = DISTENSION N - S A NNE - SSE		
	FASE 2 = COMPRESION NW - SE		
DEFORMACIONES CUATERNARIAS	FASE 1 = DISTENSION N - S S A NNE - SSE		
DEFORMACIONES CUATERNARIAS	FASE DE COMPRESION E - W A WNW -		
LEYENDA			
DIRECCIONES PROMEDIO O LIMITES DE VARIACIONES DE :			
	LAS FALLAS NORMALES		LOS ANTICLINALES Y SINCLINALES
	LAS FALLAS DE RUMBO CON DESPLAZAMIENTO SINISTRAL		LOS ESFUERZOS DE COMPRESION
	LAS FALLAS DE RUMBO CON DESPLAZAMIENTO DEXTRAL		LOS ESFUERZOS DE DISTENSION

Tabla 9. Neotectónica de la zona de La Paz (Bles & B.R.G.M., 1977)

En un análisis de los comportamientos de la región de La Paz y de los movimientos sísmicos más recientes, se ha permitido relacionar los movimientos tectónicos con la actividad sísmica, de modo que se pueda definir el grado de riesgo sísmico en La Paz.

Según (Bles & B.R.G.M., 1977), la formación La Paz está afectada desde su base hasta el techo por pliegues de baja intensidad, los ejes que tienen direcciones que varían de Norte – Sur hasta Noroeste – Sureste, se puede decir que la fase de compresión se ha producido a finales del Plioceno, o principios del Cuaternario.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL ÁREA

4.1. Geología regional

Investigaciones Preliminares

Desde 1954 y 1955 se efectuaron estudios relacionados con la geodinámica del Valle de La Paz, enfocados sobre todo en las amenazas, desarrollando varios trabajos sostenidos por parte del municipio de la ciudad de La Paz, encomendó a la Misión de Asistencia Técnica de los EE.UU., la realización de una investigación geológica de la cuenca de La Paz y sus alrededores, misma que fue elaborada por el Ingeniero Ernest Dobrovolny del Servicio Geológico de los Estados Unidos, cuyo título de la investigación es Geología del valle de La Paz.

Inicialmente la Geología del valle de La Paz instruye sobre una paleogeografía constituida por sedimentos Paleozoicos y Paleógenos plegados y fallados, sobre esta paleogeografía rugosa y áspera, se depositaron materiales Cuaternarios y una serie de cuerpos ígneos de pequeñas dimensiones, Bles et al (1978) juntamente las consultoras BRGM-BCEOM, realizaron el Estudio Cuadro Geológico Regional de la Cuenca de La Paz y sus Alrededores, donde especificaron importantes características litoestratigráficas y su conformación geológica, para el Plan de Ordenamiento Urbano de la Ciudad de La Paz, de la Honorable Alcaldía Municipal de La Paz, clasifican a las unidades litológicas en Formaciones del Zócalo, que agrupan a rocas de los sistemas Silúrico, Devónico, Cretácico, Paleógeno y Neógeno.

Según el mapa Geológico de la ciudad de La Paz realizado por la Dirección Especial de Gestión Integral de Riesgos 2011, la zona de estudio corresponde a un Deslizamiento activo, conformados por materiales arcillosos con arenas finas de color gris claro con tonalidad amarillenta.

4.2. Geología local

La geología de la cuenca de La Paz es compleja ya que presenta una sobreposición de varios eventos geodinámicos. La evolución de esta cuenca hace referencia a las fases distensivas que provocaron la generación de un sistema de fallas ocasionando

deformación en los sedimentos de la Formación La Paz. Contemporáneo a esto la erosión de los depósitos de sedimentos aluviales y movimientos gravitacionales dieron lugar al debilitamiento del pie del talud incluido los movimientos de tierra realizados por la comunidad han dado lugar a la morfología actual del área de trabajo.

Los procesos y depósitos producto de la interacción de los distintos factores hasta la actualidad, se detallan en los siguientes capítulos, y los mismos se encuentran plasmados en los mapas a escala 1:1000 (Anexos 1 y 2).

En general y debido al detalle prestado en la descripción geológica, la información se procederá a describir de manera detallada, con el objetivo de mostrar las variaciones litológicas de las distintas unidades geológicas.

4.2.1. Unidades estratigráficas

La estratigrafía es la disposición y características de los depósitos sedimentarios, es por ello, que la estratigrafía del área de estudio se resume en la siguiente tabla:

ERA	PERIÓDO	DEPÓSITOS
CENOZOICO	CUATERNARIO	Material de relleno
		Deslizamiento - r
		Deslizamiento - a
		Depósitos aluviales
		Flujo de barro
		Gravas Pampahasi
	NEÓGENO	Fm La Paz

Tabla 10. Cuadro estratigráfico del área de trabajo (Elaboración propia)

Las unidades mostradas en la parte superior varían de acuerdo al área de aporte y los procesos geodinámicos dominantes.

El mapa geológico que se elaboró, es la representación de los diferentes tipos de procesos de sedimentación y formación de los depósitos sedimentarios, se distingue por el tipo de color, además reflejan las estructuras geológicas que se encontraron el sitio (figura 16) (Anexo 1).

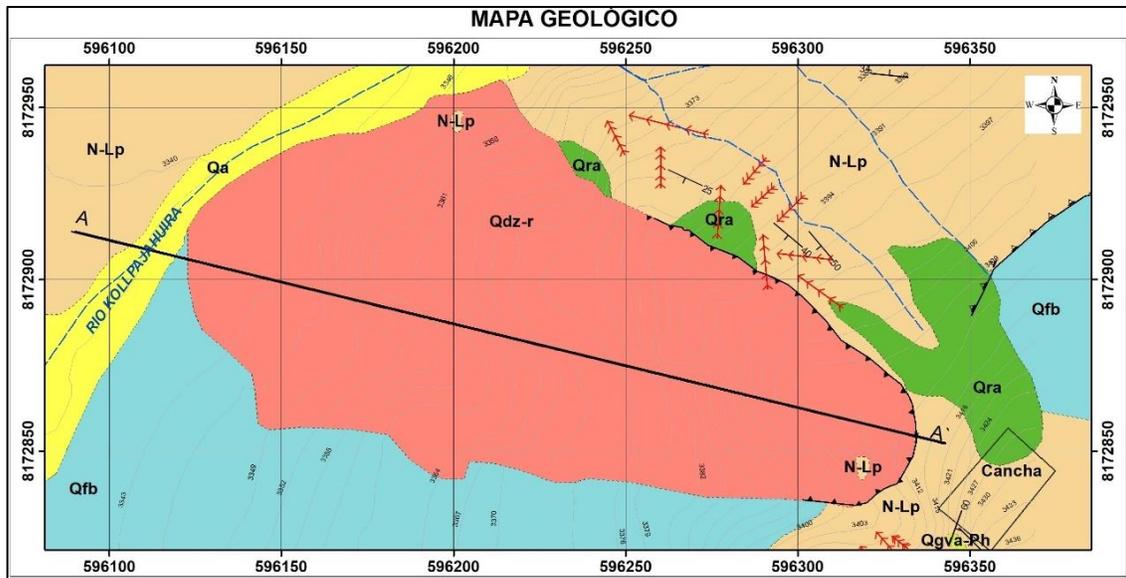


Figura 16. Mapa geológico, proyección WGS 84 UTM, zona 19k (elaboración propia) (anexo 1)

LEYENDA		
DEPÓSITOS GEOLÓGICOS	SÍMBOLOS GEOLÓGICOS	SÍMBOLOS TOPOGRÁFICOS
Qra: Material de relleno antrópico	▲ Escarpe_deslizamiento	— Ríos
Qdz-r: Deslizamiento reciente	▲ Borde_talud	— Curvas de nivel
Qfb: Flujo de barro	»»» Carcavas	A—A' Perfil
Qa: Llanura aluvial	Rb	
Qgva-Ph: Gravas Pampahasi		
N-Lp: Formación La Paz		

4.2.1.1. Sistema Terciario – Neógeno

↗ Formación La Paz (N-Lp)

La formación La Paz aflora al Noreste y Sureste del deslizamiento, también hay un afloramiento que resalta cerca al pie del deslizamiento, la descripción se detalla a continuación: (Ver fotografía 1)



Fotografía 1. Vista de la formación La Paz al Noreste y Sureste del deslizamiento de Huanu Huanuni (elaboración propia).

Al *Noreste del deslizamiento de Huanu huanuni* (tabla 11), la formación La Paz presenta variaciones de facies, desde la base del afloramiento constituye materiales arcillosos con intercalaciones de niveles delgados de arenas limosas de color amarillento, en la parte media conformado de estratos arcillosos interrumpidos por lentes de arenas finas con gravas, los clastos presentan tamaños entre los 0.3 cm hasta los 2.5 cm, al tope del afloramiento se muestra depósitos de arenas gravosas con una matrix arcilloso limoso con una estratificación paralela donde los clastos son principalmente de granitos y cuarcitas. (fotografía 2)



UMSA
 UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
 FACULTAD DE CIENCIAS GEOLOGICAS
 INGENIERIA GEOLOGICA



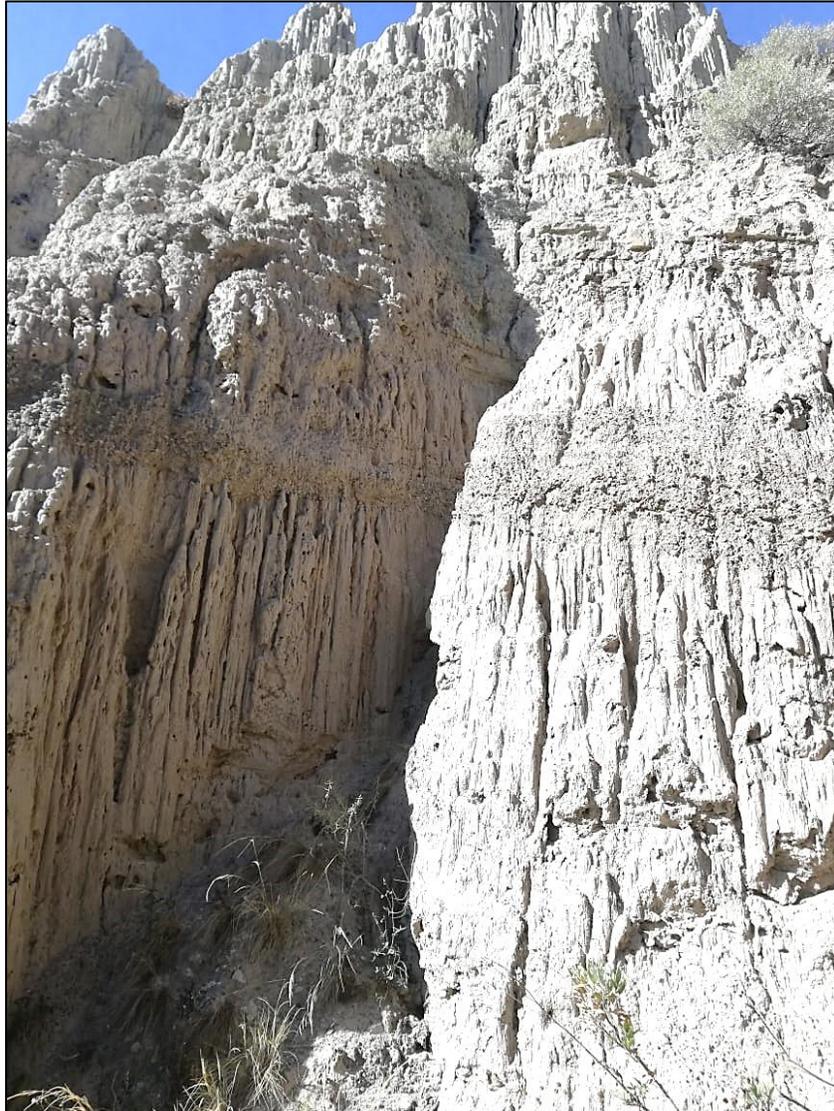
COLUMNAS LITOSTRATIGRAFICAS

“CARACTERIZACION GEOTECNICA DEL DESLIZAMIENTO DE HUANU HUANUNI“	COORDENADAS: WGS-84 Zona 19 K E: 596292 N: 8172926
UBICACIÓN: ZONA HUANU HUANUNI	TALUD
ALTURA: 60 m	

EDAD	FORMACIÓN	PROF. (m)	LITOLOGIA	DESCRIPCION LITOLOGICA
TERCIARIO - NEOGENO	Fm La Paz	0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60		<p>Arcillas con lentes de arenas y gravas Arenas gravosas</p> <p>Arcillas amarillentas con lentes de arenas y gravas pequeñas de color marrón amarillento.</p> <p>Arenas gravosas cuyos clastos ostentan tamaños entre 0.8 cm a 2 cm.</p> <p>Arcillas amarillentas con lentes de arenas finas y entrecruzamiento de arenas con gravas pequeñas y gravas de tamaños variables.</p> <p>Arenas gravosas</p> <p>Arcillas amarillentas con lentes de arenas finas.</p>

Tabla 11. Columna litoestratigráfica – Fm. La Paz, NW del deslizamiento Huanu huanuni.

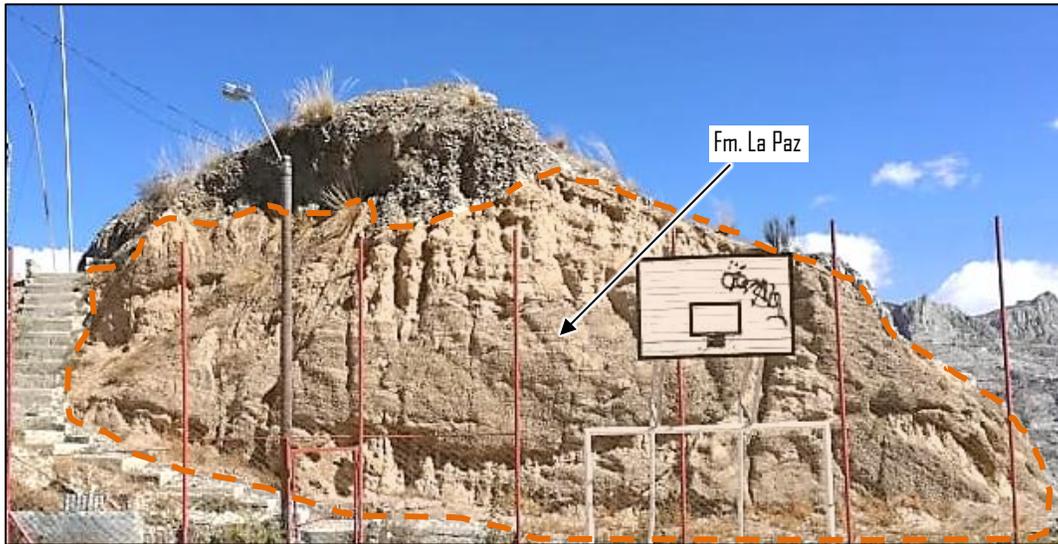
Espesor del afloramiento 60 metros



Fotografía 2. Vista de la formación La Paz, extremo Noreste del deslizamiento Huanu Huanuni (elaboración propia).

La formación La Paz (tabla 12), presente al sureste del deslizamiento, tiene un espesor de aproximadamente 4.20 metros. Esta formación muestra una secuencia de depósitos caracterizados por diferentes tipos de sedimentos. En la base del afloramiento, se encuentran capas de arenas arcillosas con gravas de "cantos", principalmente compuestas por granito. Encima de estas capas se observan arenas de tamaño medio mezcladas con pequeñas gravas. En la parte superior de la formación, hay una intercalación de depósitos arcillosos con gravas, que se encuentran dentro de una matriz arcilloso-arenosa de color marrón amarillento. Esta

secuencia de sedimentación sugiere diferentes episodios y condiciones de deposición a lo largo del tiempo geológico en esa área. (fotografía 3)



Fotografía 3. Formación La Paz, vista al Sureste del deslizamiento (elaboración propia).

Se observa en la fotografía 3 un contacto discordante de tipo erosivo la cual corresponde a las gravas Pampahasi.



UMSA
 UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
 FACULTAD DE CIENCIAS GEOLOGICAS
 INGENIERIA GEOLOGICA



COLUMNAS LITOESTRATIGRAFICAS

“CARACTERIZACION GEOTECNICA DEL DESLIZAMIENTO DE HUANU HUANUNI “	COORDENADAS: WGS-84 Zona 19 K E: 596350 N: 8172823
UBICACIÓN: ZONA HUANU HUANUNI	TALUD
ALTURA: 5.5 m	

EDAD	FORMACIÓN	PROF (m)	LITOLOGIA	DESCRIPCION LITOLOGICA
CUATERNARIO	Gva Pampahasi	0 0.5 1		Gravas soportadas en una matrix arcillo arenosa de color marron amarillento, cuyos clastos presentan diámetros entre ellos 5 cm a 12 cm.
TERCIARIO - NEOGENO	Fm La Paz	1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5		<p>Arcillas amarillentas con lentes de arenas finas.</p> <p>Arenas medias de color marrón claro con gravas subangulosos a subredondeados con tamaños entre los 0,5 cm a 5.0 cm.</p> <p>Gravas arenosas de color marrón claro a gris claro, con formas subredondeadas compuestas de granito, cuarcitas y areniscas, ostentando un tamaño entre los 0.6 cm a 4.0 cm.</p> <p>Arenas arcillosas con gravas de color amarillento a marrón claro.</p> <p>Gravas arenosas de color marrón claro.</p> <p>Arcillas arenosas de color amarillento.</p>

Tabla 12. Columna litoestratigráfica – Fm. La Paz, SE del deslizamiento Huanu huanuni.

En la cercanía de la base del deslizamiento, se puede observar una exposición de la formación La Paz (fotografía 4). En esta exposición, se identifica una secuencia de diferentes tipos de sedimentos. En la *base del afloramiento*, se encuentran capas de material arcilloso intercaladas con lentes de arenas finas. Sobre estas capas, se observan depósitos de gravas arenosas que están respaldados por una matriz arcillosa de color marrón amarillento. En la parte superior de esta secuencia, se encuentran capas de arcillas mezcladas con gravas y sedimentos limo arenosos. Esta sucesión de capas revela un registro de eventos de sedimentación y cambios ambientales a lo largo del tiempo geológico en esta área (tabla 13).

Espesor afloramiento 7.6 metros.



Fotografía 4. Formación La Paz, cerca al pie del deslizamiento (elaboración propia).



UMSA
 UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
 FACULTAD DE CIENCIAS GEOLOGICAS
 INGENIERIA GEOLOGICA



COLUMNAS LITOSTRATIGRAFICAS

“CARACTERIZACION GEOTECNICA DEL DESLIZAMIENTO DE HUANU HUANUNI“	COORDENADAS: WGS-84 Zona 19 K
	E: 596206 N: 8172941
UBICACIÓN: ZONA HUANU HUANUNI	TALUD
ALTURA: 7.6 m	

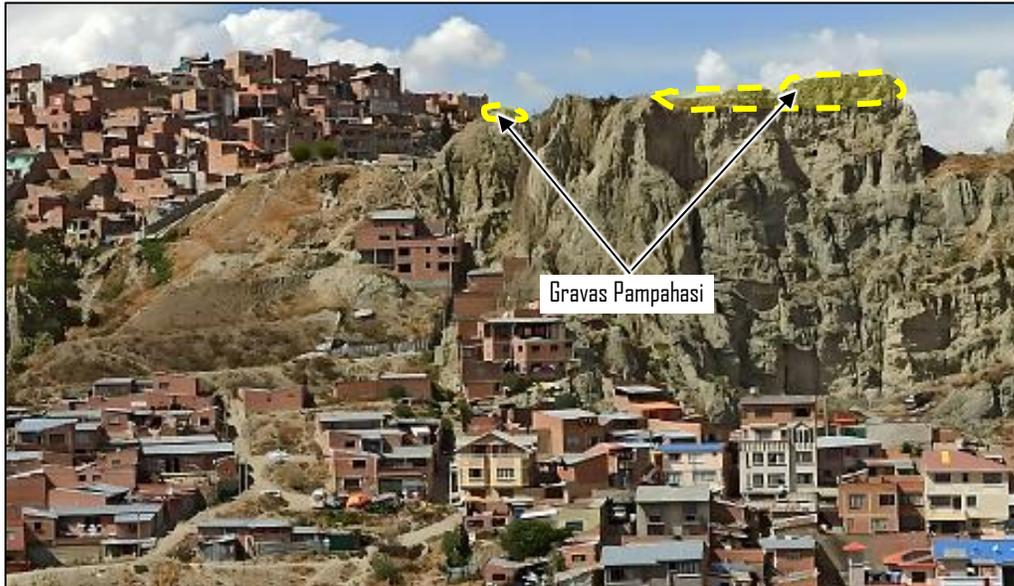
EDAD	FORMACIÓN	PROF. (m)	LITOLOGIA	DESCRIPCION LITOLOGICA
TERCIARIO - NEOGENO	Fm La Paz	0		Arcillas con pequeñas gravas y limos arenosos de color marrón amarillento.
		1.5		Gravas arenosas subangulosas, angulosas y subredondeadas, soportadas en una matrix arcillosa de color marrón amarillento a grisáceo claro.
		3		Se identifican arcillas amarillentas con inclusiones de arenas finas y gravas de tamaños que oscilan entre 0.3 cm y 1.5 cm. Estas muestran una tonalidad marrón amarillenta.
		4.5		
		6		
		7.5		

Tabla 13. Columna litoestratigráfica – Fm. La Paz, pie del deslizamiento Huanu huanuni.

4.2.1.2. Sistema cuaternario

↗ Gravas Pampahasi (Qgva-Ph)

Se encuentra en contacto erosivo con la formación La Paz, al sureste del deslizamiento de Huanu Huanuni. (fotografía 5)

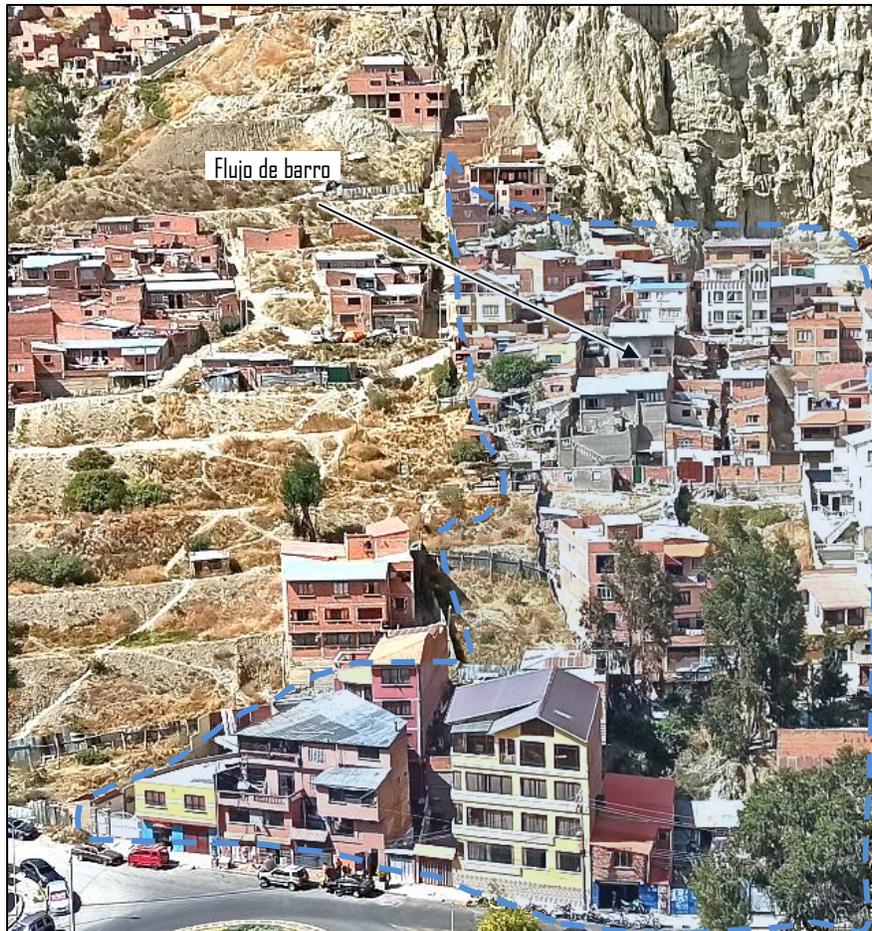


Fotografía 5. Contacto erosivo de las Gravas Pampahasi sobre los sedimentos de la Formación La Paz (elaboración propia).

En la base de la formación, se encuentran gravas limosas mal seleccionadas. A medida que ascendemos hacia la parte superior, la composición de las gravas cambia. Las gravas superiores están compuestas por clastos que consisten en areniscas de grano fino y granitos blancos. Estos clastos son de forma redondeada a subredondeada y están soportados en una matriz arcillo arenosa de color marrón amarillento. Los clastos en esta parte de la formación tienen tamaños que varían entre los 5 cm y 12 cm. Este cambio en la composición y tamaño de los clastos a lo largo de la formación puede proporcionar información sobre los procesos de sedimentación y cambios ambientales que ocurrieron durante la deposición de estos sedimentos.

↗ Flujo de barro (Qfb)

Este depósito aflora al sur del deslizamiento en donde se encuentran asentados construcciones de 1 a 5 plantas. (fotografía 6)



Fotografía 6. Vista del flujo de barro (elaboración propia)

El flujo de barro está formado por una mezcla de limos arcillosos y arenas finas. Estos sedimentos tienen un color marrón claro. Además de los limos y las arenas, también se pueden encontrar bloques de arcilla en el flujo de barro. La procedencia de estos materiales es de la formación La Paz, lo que indica que estos sedimentos fueron erosionados y transportados desde esa formación geológica. La presencia de bloques de arcilla en el flujo de barro puede tener implicaciones en la viscosidad y comportamiento de este material, ya que los bloques pueden afectar la fluidez y la capacidad de deslizamiento del flujo.

↗ Depósitos aluviales (Qa)

Se ha verificado la existencia de depósitos aluviales al norte del área del deslizamiento, que se extienden a lo largo de la quebrada Kollpajahuira. Estos depósitos aluviales están conformados por materiales que fueron transportados y depositados por las corrientes de agua de los ríos en la zona. Predominantemente,

estos depósitos carecen de cohesión y su composición generalmente consiste en una mezcla de gravas junto con arenas finas y fracciones arcillosas. Los depósitos aluviales son característicos de áreas cercanas a cursos de agua y su formación es el resultado del transporte y sedimentación de material a lo largo del lecho del río. (fotografía 7)



Fotografía 7. Deposito aluvial – Norte del deslizamiento (elaboración propia)

Entiendo que se ha rellenado el depósito aluvial que existía en la zona debido al embovedado del río Kollpajahuira. Este embovedado ha sido realizado con el propósito de crear un acceso vehicular que conecte las zonas de alto Obrajes y Bolognia. Esta acción de embovedar el río y rellenar el depósito aluvial tiene como objetivo facilitar el transporte urbano y mejorar la conectividad entre estas áreas dentro de la ciudad. Sin embargo, es importante considerar que modificar los cursos de agua y los depósitos aluviales puede tener impactos en los procesos naturales de drenaje y sedimentación en la zona (fotografía 8).



Fotografía 8. Depósito aluvial, actualmente el río Kollpajauira embovedado, cuya función es una vía de comunicación vehicular (elaboración propia).

↗ Depósitos de Deslizamientos (Qdz)

Se han identificado dos tipos de deslizamientos: un deslizamiento antiguo al Noreste del área de estudio, que será referido como "deslizamiento antiguo (Qdz-a)", y un deslizamiento más reciente, que está siendo objeto de investigación y será denominado como "deslizamiento reciente (Qdz-r)", dicho evento es de tipo rotacional y será analizado en los siguientes apartados.

1. *Deslizamiento antiguo (Qdz-a)*

Este deslizamiento se ha identificado cerca de la Urbanización Verde Olivo, esta colindante con el área de estudio, este tipo de depósitos están compuesto por una mezcla de materiales arcillosos con arenas finas y pocas gravas, procedentes del flujo de barro y pequeños bloques de la formación La Paz. (fotografía 9)



Fotografía 9. Deslizamiento antiguo – Urbanización Verde Olivo (elaboración propia).

2. Deslizamiento reciente (Qdz-r)

El deslizamiento reciente, que es objeto de análisis en este estudio, se enfoca en la reactivación de eventos geodinámicos previos y en la influencia de la actividad humana en la manifestación de dichos eventos. Se han identificado varios factores que han contribuido a este nuevo movimiento en masa, incluida la inclinación del terreno, las aguas subterráneas, las escorrentías superficiales, la composición litológica, la carga adicional de las estructuras construidas, las precipitaciones y los movimientos de tierra, entre otros (fotografía 10).



Fotografía 10. Deslizamiento reciente – Huanu Huanuni (elaboración propia).

El material involucrado en el deslizamiento reciente presenta una composición heterogénea, principalmente conformada por una combinación de arcillas lomasas con arenas y gravas pequeñas. Además, se han observado pequeños lentes de arenas originarios de la formación La Paz, junto con depósitos de origen antrópico.

↗ **Material de relleno antrópico (Qra)**

En el contexto de esta investigación, se define como "material de relleno" a cualquier depósito que no sea originario de la zona de estudio. Debido a la pronunciada pendiente del área investigada, es común encontrar este tipo de depósitos.

El relleno antrópico, en su mayoría, está compuesto por materiales de construcción, que a menudo se conocen como escombros o desechos. Estos materiales son el resultado de actividades humanas y suelen ser evidentes en la región noreste del deslizamiento de Huanu huanuni (fotografía 11).



Fotografía 11. Material de origen antrópico (material de construcción, escombros y basura) (elaboración propia).

4.3. Fotogeología

4.3.1. Análisis multitemporal

En relación a las fotografías presentadas en la investigación, es importante destacar que muestran tonos grises intermedios y un diseño bandeado. Estos elementos sugieren la presencia de rocas sedimentarias, tanto de grano fino y grueso, como las arcillas y las gravas. Además, la textura observada presenta una clasificación media, lo cual indica que la superficie del suelo ha experimentado un alto grado de erosión, evidenciándose una estratificación tanto horizontal como sub-horizontal.

Es fundamental destacar que la distribución de los objetos en las fotografías proporciona información valiosa y específica sobre diversos aspectos geológicos. Entre ellos, podemos mencionar los procesos geológicos presentes en la región, la morfología del área estudiada, las estructuras geológicas identificadas y la litología característica.

Por otra parte, al analizar el drenaje hidrogeológico presente en las fotografías e imágenes satelitales, se observa que se trata de un tipo de drenaje de naturaleza destructiva. Esto implica que los ríos han comenzado a erosionar el suelo de manera significativa. En cuanto a su diseño, se aprecia un patrón detrítico, con una jerarquía de ríos, incluyendo ríos insecuentes y ríos bien integrados con ángulos agudos. Asimismo, la textura del drenaje y las densidades variables presentes permiten diferenciar distintas unidades litológicas.

4.3.1.1. Interpretación – fotografía aérea 1976

La fotografía aérea utilizada en este estudio tiene una fecha de origen en 1976. Para su análisis, se llevó a cabo un proceso de georreferenciación y rectificado utilizando el software ArcGIS 10.8.

Este proceso se realizó utilizando parámetros fotográficos y geomorfológicos del terreno que se consideran constantes a lo largo del tiempo.

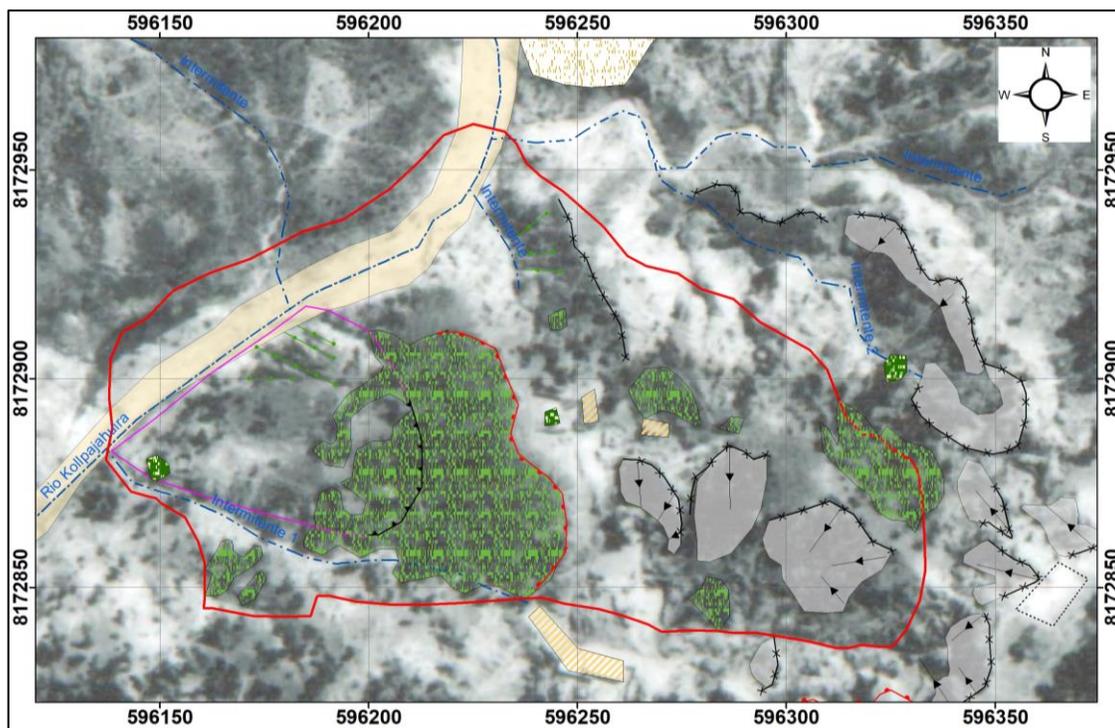


Figura 17. Fotografía aérea del año 1976, proyección UTM WGS 84 – 19 k (elaboración propia)

Referencias Simbolos		
Geomorfológicos	Topográficos	Hidrográficos
→ Barrancos	Arboles	--- Rio intermitente
▲ Escarpe de deslizamiento	Arbustos	--- Rio intermitente 1
— Escarpe de erosión	Cancha	--- Rio intermitente 2
× Cresta de erosión	Área de estudio	--- Rio Kollpajahuira
— Surcos de erosión	Sembradíos	
Deslizamiento antiguo	Viviendas	
Cárcavas		
Llanura aluvial		

De acuerdo a la fotografía aérea tomada en 1976, se puede inferir que el suelo está compuesto por material fino debido a la evidente erosión en la superficie, evidenciada por la presencia de cárcavas. En ese momento, observamos que el área de estudio estaba en su estado natural, con una notable cantidad de vegetación resaltada en verde, lo que sugiere la presencia de aguas subterráneas en la zona y un terreno irregular. El tipo de drenaje presente, clasificado según las características litológicas y topográficas, se ha identificado como dendrítico debido a la presencia de ríos intermitentes o secundarios que se ramifican y se conectan a un río principal.

Sin embargo, se puede destacar un fenómeno particular en la imagen: un deslizamiento antiguo que se encuentra dentro del área de estudio, marcado en color fucsia, que ocurrió antes del año en que se tomó la fotografía. Este deslizamiento se localiza en la base de la pendiente, cerca del río Kollpajahuira, y se distingue claramente el escarpe de deslizamiento.

Es importante señalar que, en ese momento, el deslizamiento no representaba una amenaza para la zona, ya que no había viviendas en las proximidades. Por lo tanto, la Secretaría Municipal de Gestión Integral de Riesgos de la Alcaldía de La Paz (SMGIR) no intervino para estabilizar la pendiente.

En cuanto a la actividad humana en el área, esta era mínima, y no se observan cambios significativos en la topografía del terreno causados por ella.

4.3.1.2. Interpretación - fotografía aérea, 1988

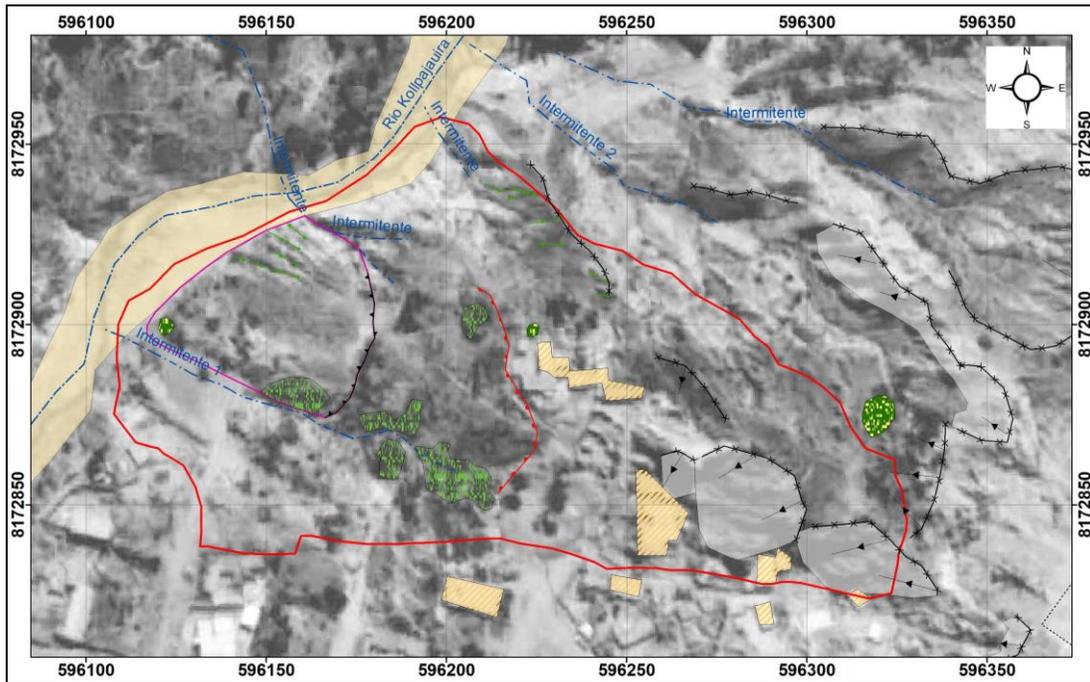


Figura 18. Fotografía aérea del año 1988, proyección UTM WGS 84 – 19 k (elaboración propia).

Referencias Simbolos		
Geomorfológicos	Topográficos	Hidrográficos
→ Barrancos	Arboles	--- Río intermitente
▲ Escarpe de deslizamiento	Arbustos	--- Río intermitente 1
— Escarpe de erosión	Cancha	--- Río intermitente 2
× Cresta de erosión	Área de estudio	--- Río Kollpajahuira
— Surcos de erosión	Viviendas	
□ Deslizamiento antiguo		
■ Cárcavas		
■ Llanura aluvial		

Realizando una comparación entre la fotografía tomada en 1976 y la de 1988, se observa un aumento significativo de la actividad humana en el transcurso de los 12 años. En la imagen de 1988, se pueden apreciar nuevas construcciones dentro del área de estudio, representadas por las enmarcaciones anaranjadas. Además, se observan construcciones en las zonas más elevadas, cerca del borde del río intermitente 1. Esto indica que ha habido una mayor urbanización en el área.

En cuanto a la topografía del terreno, se evidencia que ha sufrido algunas modificaciones leves en el transcurso de esos años. Se han realizado obras para facilitar el acceso peatonal, como la creación de calles y senderos.

A pesar de estos cambios, la dirección de los ríos intermitentes se mantiene sin cambios, al igual que el curso del río principal, Kollpajahura.

4.3.1.3. Interpretación de la imagen satelital del año 2005

A partir del año 2005, las interpretaciones del área de estudio se basaron en imágenes satelitales de Google Earth (Landsat/Copernicus). Estas imágenes fueron georreferenciadas y rectificadas utilizando el software ArcGIS 10.8, utilizando parámetros fotográficos y geomorfológicos del terreno que no cambian con el tiempo.

Al analizar y comparar las fotografías aéreas de 1976 y 1988 con las imágenes satelitales posteriores, se puede observar un crecimiento significativo de nuevas viviendas. En la parte alta del talud, se ha llevado a cabo nivelación y relleno del suelo para la construcción de una cancha.

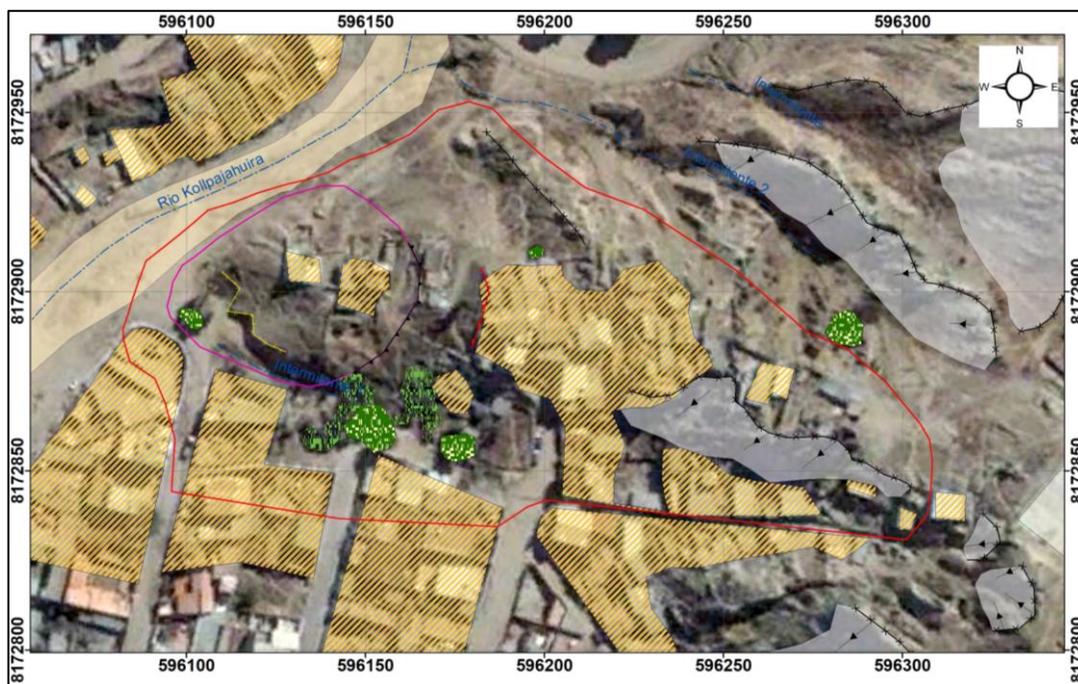


Figura 19. Imagen satelital del año 2005, proyección UTM WGS 84 – 19 (elaboración propia)

Referencias Simbolos		
Geomorfológicos	Topográficos	Hidrográficos
→ Barrancos	Arboles	--- Rio intermitente
▲ Escarpe de deslizamiento	Arbustos	--- Rio intermitente 1
— Escarpe de erosión	Cancha	--- Rio intermitente 2
× Cresta de erosión	Área de estudio	— Rio Kollpajahura
— Corte de talud	Viviendas	
Deslizamiento antiguo		
Cárcavas		
Llanura aluvial		

En la imagen obtenida del historial de Google Earth del año 2005, se puede apreciar un notorio incremento en la población del área en los últimos 17 años desde 1988. En el sector afectado por el deslizamiento, se observa un aumento gradual en la construcción de viviendas familiares.

Se evidencia una considerable actividad de movimiento de tierra tanto en el área de estudio como en sus alrededores, destinada a la creación de accesos vehiculares y peatonales, así como a la construcción de viviendas. Un ejemplo destacado se encuentra dentro de la zona afectada por el antiguo deslizamiento, donde se aprecia un corte de talud sin las medidas preventivas adecuadas, lo que indica un desprendimiento significativo en ese lugar.

4.3.1.4. Imagen satelital del año 2009

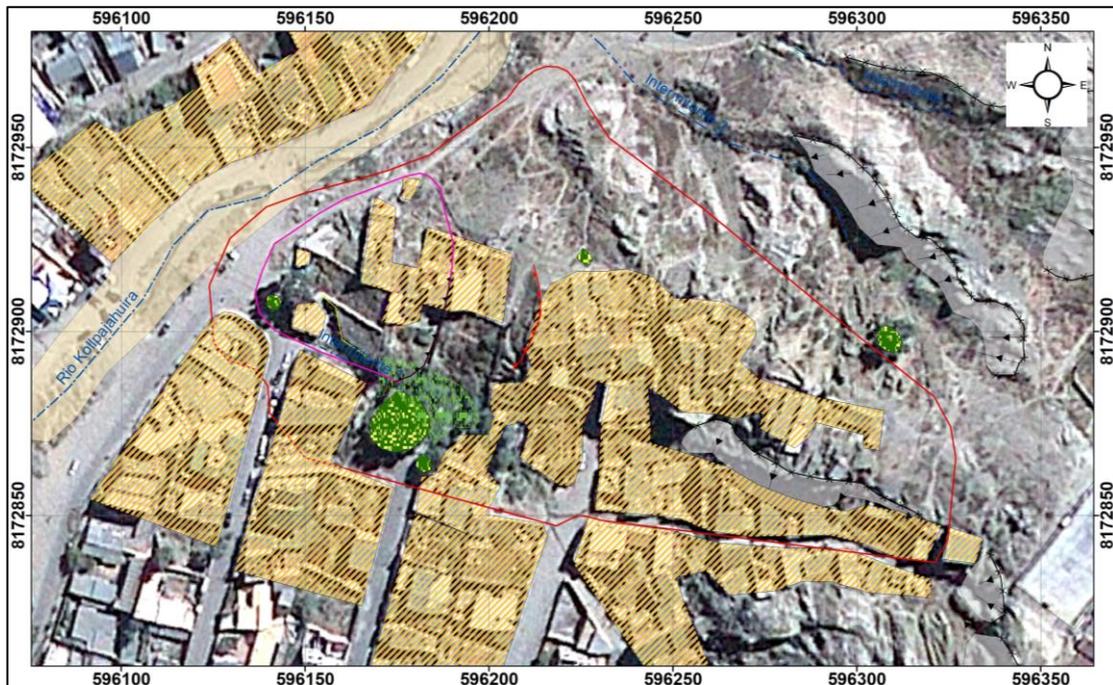


Figura 20. Imagen satelital del año 2009, proyección UTM WGS 84 – 19 (elaboración propia).

Referencias Simbolos		
Geomorfológicos	Topográficos	Hidrográficos
→ Barrancos	Arboles	--- Rio intermitente
▲ Escarpe de deslizamiento	Arbustos	--- Rio intermitente 1
— Escarpe de erosión	Cancha	--- Rio intermitente 2
× Cresta de erosión	Área de estudio	--- Rio Kollpajahuira
— Corte de talud	Viviendas	
— Deslizamiento antiguo		
— Cárcavas		
— Llanura aluvial		

En la figura 20, se puede observar un incremento poblacional en el área de estudio en comparación con la imagen satelital del año 2005. Han transcurrido 4 años y los lotes amurallados que se vieron en la imagen anterior están siendo ocupados por nuevas construcciones. Es importante destacar que estas viviendas están siendo ubicadas tanto en la zona del deslizamiento como en la parte media y alta del área de estudio, sobre las crestas de erosión y cárcavas.

En la imagen satelital de 2009, se observa la aparición de nuevas construcciones de entre 1 y 3 plantas dentro de la zona afectada por el deslizamiento antiguo. Es importante destacar que, en el año 2005, en el mismo terreno, se llevaron a cabo trabajos de movimiento de tierra que incluyeron cortes verticales. A pesar de estos antecedentes, es relevante mencionar que los movimientos de tierra continuaron, evidenciados por una mayor profundización del corte del talud.

Es evidente que estas viviendas construidas no cuentan con sistema sanitario. Esto se debe a que las construcciones se están realizando de manera aleatoria y sin ninguna supervisión.

4.3.1.5. Imagen satelital del año 2011

El 28 de enero de 2010, la ciudad de La Paz fue escenario de un deslizamiento en la zona de Huanu Huanuni. Este evento fue inesperado y sin precedentes, sin que se tuvieran referencias anteriores. Como resultado inicial de este desastre natural, se vieron afectadas aproximadamente 1.8 hectáreas de terreno, con el colapso de 72 viviendas y 118 familias quedaron damnificadas.

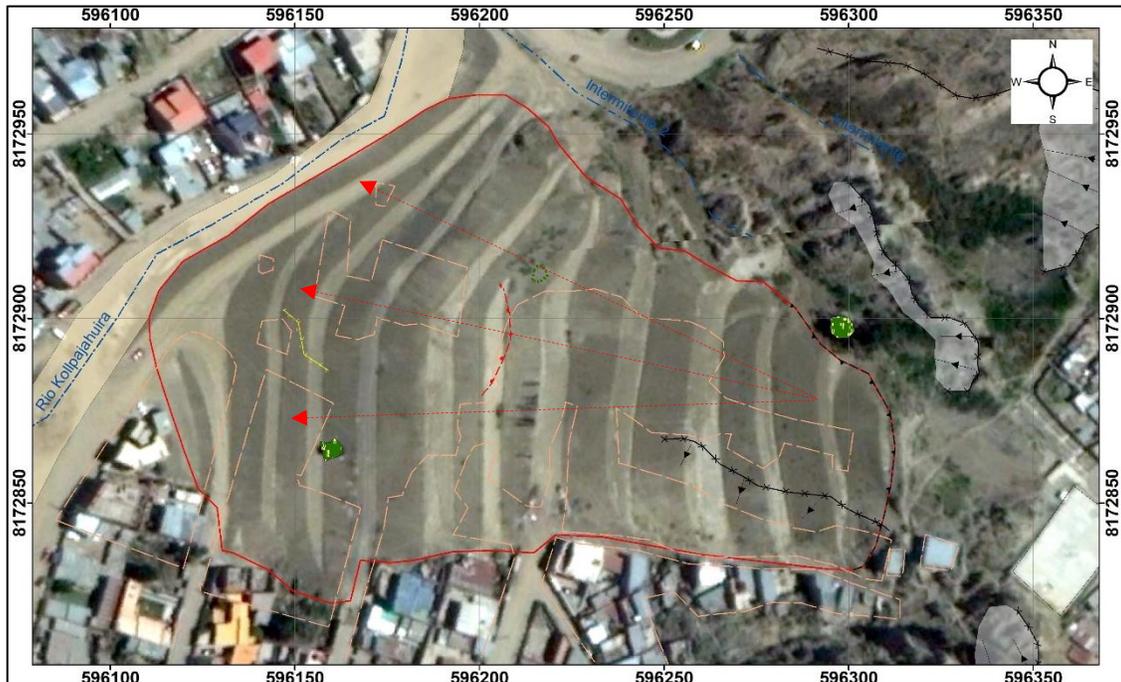


Figura 21. Imagen satelital del año 2011, proyección UTM WGS 84 – 19 (elaboración propia).

Observamos en la Figura 21, correspondiente a la imagen satelital del año 2011, el estado del terreno después del deslizamiento imprevisto ocurrido en 2010. Se llevaron a cabo trabajos de estabilidad por parte de SMGIR realizando terraceo a lo largo del deslizamiento. El volumen estimado del deslizamiento es de aproximadamente 75.000 m³.

El deslizamiento se caracteriza por tener una dirección de desplazamiento de sureste a noroeste y se clasifica geológicamente como un deslizamiento de tipo rotacional, debido a la presencia de suelos heterogéneos y caóticos en el área.

Varios factores fueron desencadenantes de este suceso, según se observa en fotografías aéreas e imágenes satelitales anteriores. Estos incluyen el aumento de la

población con la construcción de viviendas, el redireccionamiento de los ríos intermitentes, y la falta de un sistema de drenaje sanitario. Sin embargo, llama la atención la coincidencia entre la dirección del deslizamiento y los movimientos de tierra con cortes verticales realizados en la zona, lo cual ha generado un desequilibrio en el talud propiciando el deslizamiento.

Las quebradas y ríos que anteriormente estaban presentes en el área fueron modificados o desaparecieron debido a estas actividades.

4.3.1.6. Interpretación fotográfica del año 2022

En la imagen satelital del año 2022, tomada después del deslizamiento ocurrido en 2010, se puede observar el terraseo realizado por la Unidad de Riesgo de la Alcaldía Municipal de La Paz. Sin embargo, es notable que nuevamente se está llevando a cabo la urbanización con la construcción de viviendas de 1 a 3 plantas, las cuales están siendo construidas en el área afectada por el deslizamiento.

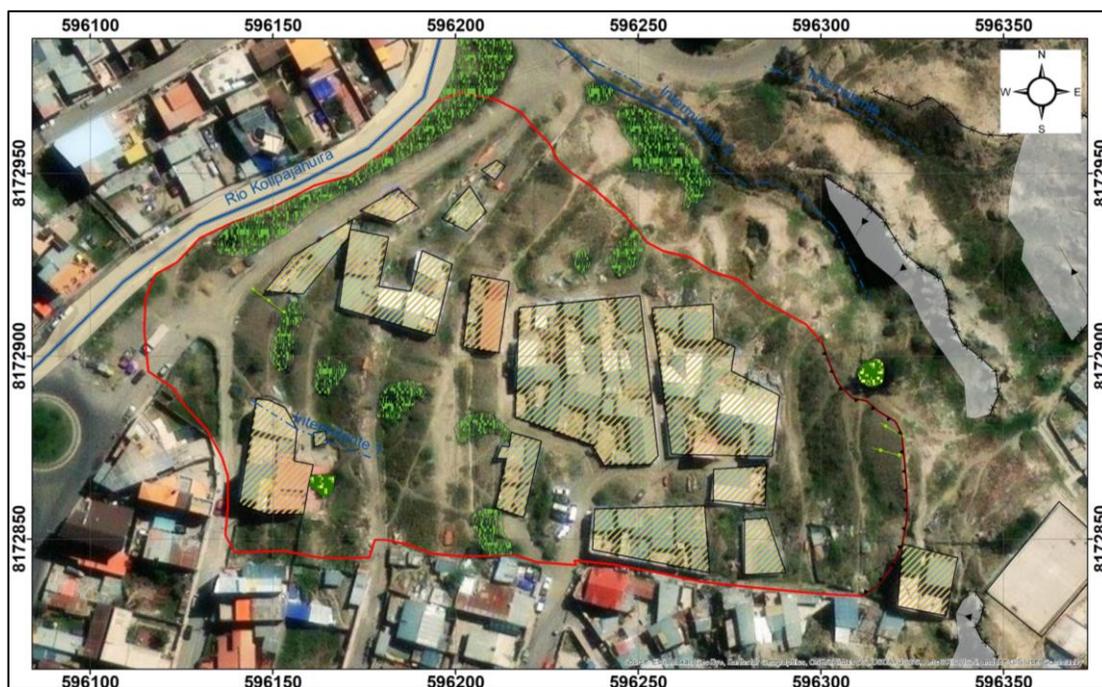


Figura 22. Fotografía aérea del año 2022, proyección UTM WGS 84 – 19 (elaboración propia).

Referencias Símbolos		
Geomorfológicos	Topográficos	Hidrográficos
→ Barrancos	Arbol	--- Rio intermitente
--- Escarpe de deslizamiento	Arbustos	--- Rio intermitente 2
× Cresta de erosión	Área de estudio	--- Rio Kollpajahuira
— Rio canalizado	Cancha	
— Rio embovedado	Viviendas	
— Surcos de erosión		
□ Cárcavas		
□ Llanura aluvial		

Las condiciones del suelo en la actualidad siguen siendo inestables, ya que el área de estudio cuenta con antecedentes de movimientos de tierra. Además, se observa que el suelo ha sido perturbado y presenta deficiencias en las conexiones sanitarias.

En el mapa fotogeológico, se identifica el deslizamiento del área de estudio con un color rojo, que indica un nivel de riesgo alto. A pesar de esta advertencia, actualmente se está llevando a cabo la urbanización en esta zona, sin tener en cuenta la situación de riesgo.

4.4. Neotectónica

Neotectónica del área de estudio

El área de trabajo está sometido a deformaciones asociadas al solevantamiento de la cordillera oriental, es por ello que se observan deformaciones sin-sedimentaria y deposito posterior a algunas unidades formacionales, esta caracterizado por presencia de zonas de falla de fase compresiva del Plioceno que afectan a la formación La Paz.

Al caracterizarse por presentar un alto grado de deformación, aunque debido a la sobreposición de eventos, el reconocimiento de las estructuras asociadas a las distintas fases, no ha sido tan viable, bajo esta limitante se procede a mencionar las estructuras observadas e interpretadas en campo.

La observación minuciosa de los afloramientos en campo y de la interpretación, permitió definir la presencia de pequeñas fallas en el área, como en la parte alta del deslizamiento colindante con la zona de Bolognia y otra en la calle 1 colindante con la urbanización Verde Olivo. (fotografía 13)

Las deformaciones que correspondientes a la zona de estudio son pequeñas fallas normales dextrales y sinestrales. Las fallas con sentidos de movimientos dextral

tienen rumbos promedios que varían de NNE – SSW hasta ENE – WSW, las fallas sinestrales tienen direcciones que varían desde E - W hasta NW – SE.

Litológicamente en la parte superior del deslizamiento colindante con la zona de Bologna, el material predominante son las arcillas arenosas con limos, intercalados con niveles de arenas gruesas y gravas pequeñas subredondeadas, redondeadas y subagulosas, y niveles lenticulares de gravas inmersas en una matrix arenosa, correspondiente a la formación La Paz, a este supra yace las gravas Pampahasi conformadas por gravas soportadas en una matrix arcillo arenoso.

La deformación que presenta el lugar se limita a los materiales finos, el cual refleja la presencia de fallas. (ver fotografía 14)



Fotografía 12. Falla normal dextral (elaboración propia)



Fotografía 13. Deformación que se limita a materiales finos (elaboración propia).

4.5. Geomorfología

La geomorfología del área de estudio se debe a procesos exógenos que son responsables de la morfología del terreno. Estos procesos, que ocurren en la capa superficial de la corteza terrestre, han sido los principales agentes modeladores que han dado forma al área de investigación. Los principales agentes que continúan remodelando la zona de Huanu Huanuni y sus alrededores son el agua superficial, incluyendo las corrientes como las aguas subterráneas, la gravedad, que da lugar a procesos de remoción en masa y la actividad humana (figura 23).

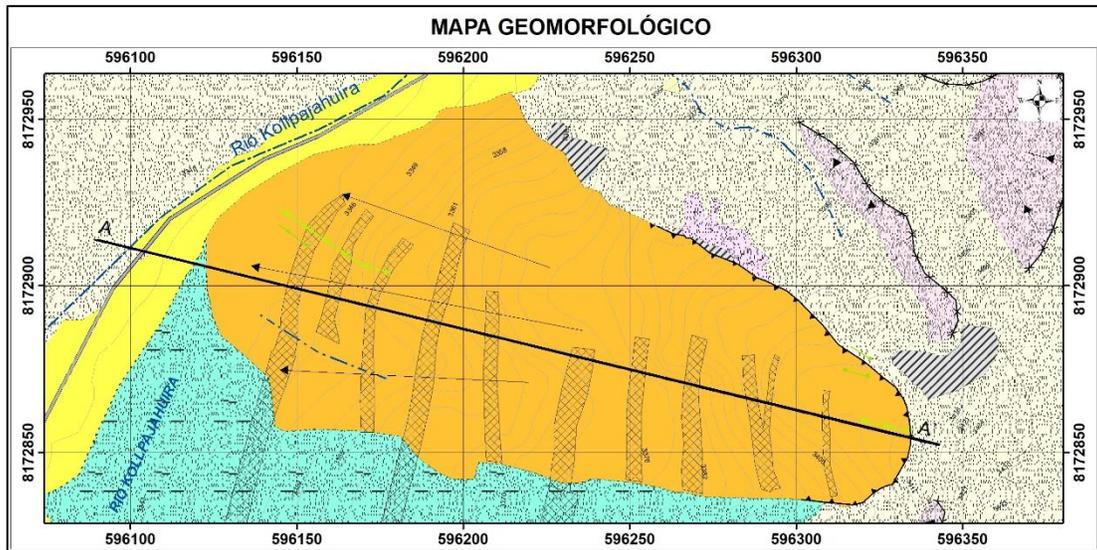


Figura 23. Mapa Geomorfológico Huanu huanuni, proyección WGS 84 UTM, zona 19k
(elaboración propia) (anexos 2)

LEYENDA		
GEOFORMAS DE REMOCIÓN EN MASA	GEOFORMAS ANTRÓPICAS	SÍMBOLOS TOPOGRÁFICOS
<ul style="list-style-type: none"> Deslizamiento Rotacional Dirección de Deslizamiento 	<ul style="list-style-type: none"> Escombros de talud Aterrazamiento Relleno Escarpe deslizamiento Cresta de erosión Río Canalizado Barranco 	<ul style="list-style-type: none"> Ríos Curvas de nivel Perfil
GEOFORMAS DE FLUJO		
<ul style="list-style-type: none"> Flujo de barro 		
GEOFORMAS FLUVIALES		
<ul style="list-style-type: none"> Llanura Aluvial Cárcavas 		
GEOFORMAS DE EROSIÓN HÍDRICA	GEOLOGIA	
<ul style="list-style-type: none"> Surcos de erosión 	<ul style="list-style-type: none"> N-Lp: Formación La Paz 	

4.5.1. Deslizamiento rotacional

La zona de estudio se caracteriza por la presencia de materiales blandos, como arcillas y arenas finas a medias con limos. Estas características de los materiales del suelo han dado lugar a un tipo de deslizamiento conocido como rotacional. En este

tipo de deslizamiento, presenta una superficie de falla que tiene una forma curva y su centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del deslizamiento. Además, se pueden observar agrietamientos concéntricos y cóncavos en dirección al movimiento.

Durante un evento que ocurrió en el año 2010, se produjo un colapso de todo el material en la zona, deslizándose pendiente abajo. Esto generó una mezcla heterogénea de material aflorante y material proveniente de las construcciones de viviendas. En la parte superior del deslizamiento, se formaron pequeñas depresiones que provocaron acumulaciones de agua, lo cual indujo el movimiento. El cuerpo del deslizamiento experimentó una sobrecarga debido a las edificaciones, lo que llevó a que la capacidad de carga del suelo alcanzara su límite, ocasionando un deslizamiento de tipo rotacional (fotografía 15).



Fotografía 14. Perfil longitudinal del deslizamiento tipo rotacional – Huanu huanuni (elaboración propia).

La parte alta del deslizamiento, conocida como la cabecera, exhibe un desplazamiento semivertical con una rotación mínima. Por el contrario, la superficie del terreno gira en dirección a la corona del deslizamiento. Esta configuración del escarpe semivertical facilita la ocurrencia de movimientos retrógrados o progresivos hacia arriba. El cuerpo del deslizamiento tiene una forma similar a la de una cuchara, y el material acumulado se encuentra al pie de la ladera, lo que origina un levantamiento y forma un lóbulo.



Fotografía 15. Vista frontal del deslizamiento Huanu huanuni 2010 (elaboración propia).

Los taludes pueden experimentar fallas debido a diversos factores. Entre ellos se incluyen los cambios topográficos del terreno, los flujos de aguas subterráneas o superficiales que pueden originar cárcavas o grietas de tracción, así como cambios en la resistencia del suelo. Además, los factores antrópicos o naturales que alteren el estado natural del talud o la ladera también pueden comprometer su estabilidad del suelo (fotografía 16).

El deslizamiento abarca aproximadamente 4000 m². Se estima que la cantidad de material deslizado es de alrededor de 75000 m³. El desplazamiento del deslizamiento se produce en dirección sureste a noroeste.



Fotografía 16. Características longitudinales del deslizamiento Huanu Huanuni (elaboración propia).

La pendiente tiene una inclinación de 40 grados a lo largo de los 210 metros que presenta, es decir la pendiente del deslizamiento es muy pronunciado, tiene 110 metros de ancho y 12 metros de alto (fotografía 17).

4.5.2. Geformas de flujo

4.5.2.1. Flujo de barro

Este tipo de geformas se observa al sureste del deslizamiento, caracterizadas por poseer una pendiente y una composición de agua con material fino que otorga una alta viscosidad y densidad.



Fotografía 17. Flujo de barro

4.5.3. Geoformas fluviales

4.5.3.1. Cárcavas

Estas cárcavas se desarrollan debido a flujos concentrados de aguas subterráneas y superficiales. Presentan formas de canales o zanjas de diferentes tamaños. El agua que circula a través de ellas lo hace de manera intermitente, principalmente durante o poco después de una intensa precipitación.



Fotografía 18. Cárcavas dando lugar a quebradas (elaboración propia).

Estas cárcavas se originan a partir de la erosión causada por las aguas superficiales durante la época de lluvias. El proceso se inicia con el entallamiento de un canal debido al escurrimiento, y a medida que avanza, se ensancha desde la base hasta alcanzar su punto de equilibrio. Un factor importante a considerar es el tipo de material presente en el área, que consiste en arcillas poco cohesivas con arenas silíceas. Estas características contribuyen a este proceso de formación.

Se ha observado que estas cárcavas alcanzan profundidades superiores a los 12 metros. (fotografía 18)

4.5.3.2. Llanura aluvial

Cuando hay un aumento en el volumen de agua en un arroyo o río, como resultado de períodos de fuertes lluvias, el agua puede elevarse por encima de los bordes y provocar inundaciones en el área circundante (Ames, 2018).

Cuando se produce este fenómeno, los materiales arrastrados en el lecho del río son llevados río abajo y se desbordan depositándose en los márgenes del río. Estos materiales consisten en una mezcla de arcillas, arenas y gravas de diversas dimensiones. (Castilla & Elez, 2020).

A lo largo del tiempo, se ha formado este tipo de geoforma en el área de estudio debido a los cambios constantes en los volúmenes de agua ocasionados por las lluvias en la ciudad de La Paz. Se han observado depósitos de materiales más gruesos a lo largo de las orillas del río Kollpajahuira como consecuencia de la reducción del caudal del río. En la actualidad, esta llanura aluvial, situada al pie del deslizamiento de Huanu huanuni, se utiliza como una vía de tránsito vehicular. Para aprovechar esta área, se llevaron a cabo obras de ingeniería, incluyendo el embovedado del río Kollpajahuira (fotografía 19)



Fotografía 19. Depósito de una Llanura aluvial, actualmente calle 1 (elaboración propia).

La llanura aluvial en estudio tiene un ancho de 4.00 metros. Esta característica puede plantear un problema en la zona, especialmente durante períodos de lluvia intensa, ya que puede haber un aumento en la crecida del río, lo que puede resultar en inundaciones. Estas inundaciones pueden superar tanto la capacidad de absorción del suelo como la capacidad de carga del río.

4.5.4. Geoformas de erosión hídrica

4.5.4.1. Surcos de erosión

Los surcos de erosión se forman como resultado de las precipitaciones pluviales, lo que provoca que el agua superficial fluya y erosione parte del suelo, formando pequeños canales por donde se transporta el material erosionado. Estos surcos pueden alcanzar profundidades de hasta 25 cm. En el caso de que las profundidades sean mayores, se requerirán medidas para detener la erosión, ya que, de lo contrario, los surcos continuarán profundizándose (Ibañez, 2007).



Fotografía 20. Formación de canales a partir de la escorrentía superficial (elaboración propia).

Dentro del área de estudio, este proceso es más relevante que la escorrentía superficial, especialmente durante la época de lluvias. Durante este período, se forman canales en los cuales el flujo de agua es más rápido (fotografía 21). Estos canales, conocidos como surcos, no son muy profundos, ya que, presentan una profundidad inferior a los 25 cm, y varían en longitud entre 7.00 metros y 16.00 metros. Los surcos se encuentran en la cabecera y al pie del deslizamiento. Sin embargo, es importante destacar que estos surcos pueden tratarse para evitar que se profundicen y den lugar a cárcavas. (fotografía 22 - 23)



Fotografía 21. Surcos de erosión al pie del deslizamiento de Huanu Huanuni (elaboración propia).



Fotografía 22. Surcos de erosión en la cabecera del deslizamiento (elaboración propia).

4.5.5. Geoformas antrópicas

4.5.5.1. Aterrazamiento

Según la Real Academia de Ingeniería, Aterrazamiento esta definido como “la preparación del terreno para la repoblacion mediante la construccion de terrazas en ladera, para aumentar la capacidad de retencion de agua, disminuir la escorrentia y favorecer el crecimietno de las plantas” (RAINING, s.f.).



Fotografía 23. Banquinas de estabilización del deslizamiento de Huanu Huanuni (Guzmán, 2016).

En la fotografía 24 la alcaldía de la ciudad de La Paz utilizó este método en el área de estudio después del deslizamiento del año 2010, es así, como también las llamadas banquinas se realizaron para que el deslizamiento alcance la estabilidad.



Fotografía 24. Asentamiento de viviendas en las banquinas de estabilización del deslizamiento de Huanu Huanuni (elaboración propia).

Actualmente las banquinas están siendo nuevamente urbanizadas por algunos vecinos de la zona Huanu huanuni (fotografía 25).

4.5.5.2. Relleno antrópico

El término “relleno” hace referencia a las alteraciones causadas por la intervención humana en el área de estudio. Se utiliza cuando se han realizado actividades como la expansión de zonas urbanas o la construcción de accesos vehiculares y peatonales.

En nuestro caso, la actividad antrópica ha tenido un impacto significativo en el área de estudio, especialmente en la parte superior del deslizamiento, donde se realizaron trabajos de nivelación del terreno. Estos trabajos fueron llevados a cabo para rellenar las cárcavas preexistentes con el propósito de construir una cancha. (fotografía 26)



Fotografía 25. Material de relleno, parte alta del deslizamiento, construcción de la cancha (elaboración propia).

Durante la elaboración del mapa geológico y geomorfológico en campo, se ha observado una clara relación entre la actividad antrópica y los movimientos en masa, siendo el deslizamiento atribuido a un deficiente sistema de drenaje de aguas servidas y a los cambios topográficos causados por cortes y rellenos. Estos factores han aumentado la susceptibilidad a nuevos fenómenos en el área.

Es importante tener en cuenta estas acciones humanas y su influencia en la estabilidad del terreno para implementar medidas adecuadas de prevención y mitigación de futuros deslizamientos.

4.5.5.3. Escarpe de deslizamiento

Es la superficie inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento, producto del movimiento ladera abajo del material, formando una superficie de falla.



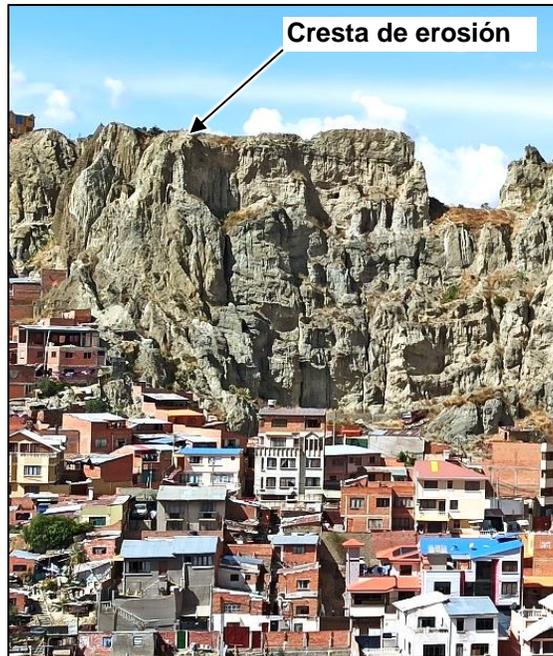
Fotografía 26. Escarpe del deslizamiento de Huanu huanuni (elaboración propia).

Dentro del área de estudio (fotografía 27), al Sureste del deslizamiento y cerca de la cancha, colindante con la zona Bologna, se encuentra un escarpe de deslizamiento. Este escarpe se forma como resultado del movimiento de masa, creando una superficie de falla por donde todo el material se desplaza pendiente abajo.

4.5.5.4. Cresta de erosión

La cresta de erosión es el resultado del desgaste causado por el agua superficial y meteórica en suelos fácilmente degradables debido a su composición litológica. Se refiere a cualquier tipo de salto que interrumpe la continuidad de un paisaje.

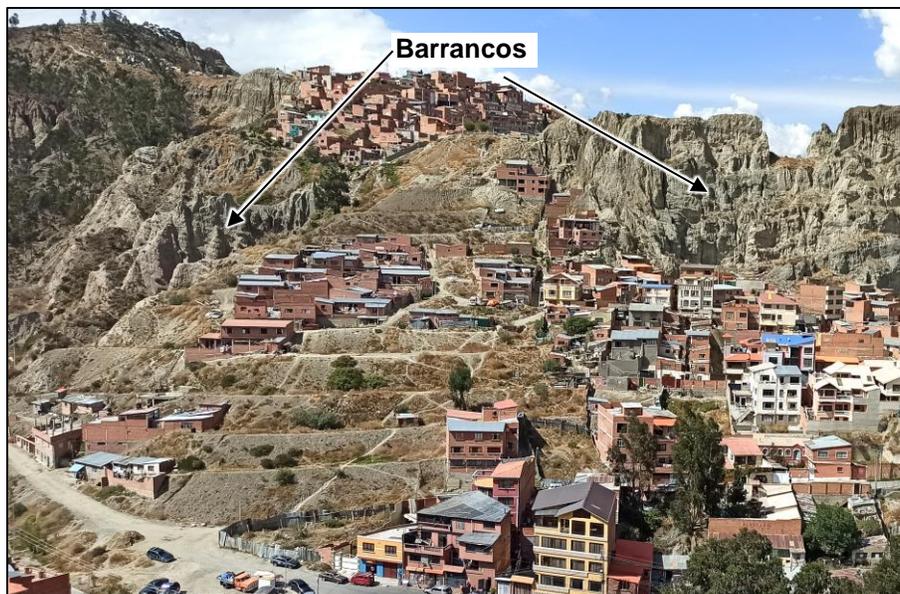
En los alrededores del área de estudio, se encuentran varios escarpes de erosión, cuyo origen se debe inicialmente al desgaste del material del suelo y, posteriormente, a su ruptura (fotografía 28)



Fotografía 27. Cresta de erosión – discontinuidad Fm La Paz y Gvas Pampahasi (elaboración propia).

4.5.5.5. Barranco

Este tipo de geofomas se puede observar en los alrededores del deslizamiento Huanu huanuni. Estas geofomas se forman debido a la erosión causada por la acción del agua en terrenos con pendientes pronunciadas, siendo una de sus características principales la formación en terrenos accidentados.



Fotografía 28. Barrancos a los alrededores del deslizamiento Huanu huanuni.

4.5.5.6. Río canalizado

Al norte del deslizamiento de Huanu huanuni, se puede observar un río secundario que ha sido canalizado mediante una obra de acondicionamiento. Esta obra consiste en la construcción de muros o márgenes de contención a lo largo del río. Estos muros tienen como objetivo mantener el caudal del río bajo control y evitar que el agua se desborde, manteniéndola dentro del cauce adecuado. (fotografía 29)



Fotografía 29. Río canalizado al margen izquierdo del deslizamiento Huanu Huanuni (elaboración propia).

El río secundario, que anteriormente desembocaba en el río Kollpajahuira, ha sido canalizado y, como parte de este proyecto, se ha construido un pequeño puente que facilita el acceso a la urbanización Verde Olivo. (fotografía 30)



Fotografía 30. Canalización del río tributario para el ingreso a la urbanización Verde Olivo (elaboración propia).

4.5.6. Tipo de drenaje

El sistema de drenaje junto con la composición litológica del suelo y la topografía del terreno desempeñan un papel crucial en el área de estudio y sus alrededores, donde se observa una predisposición de drenaje tipo dendrítico. Este patrón se caracteriza por una serie de ramificaciones de formas irregulares, que siguen antiguas quebradas y torrentes afluentes del río Kollpajahuira.

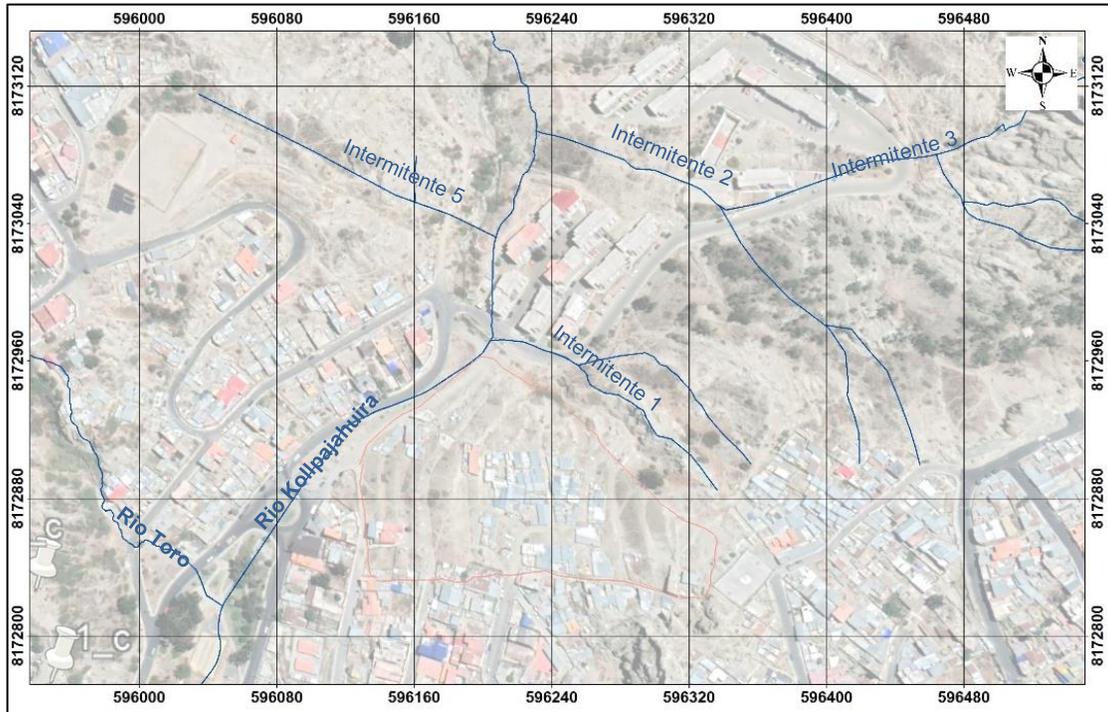


Figura 24. Mapa del drenaje tipo dendrítico, proyección WGS 84 UTM, zona 19k (elaboración propia).

En la actualidad, algunos ríos se encuentran reacomodados y cubiertos por terrazas, lo que ha dado lugar al diseño topográfico actual del terreno.

4.6. Clasificación de pendientes

Un mapa de pendientes, es un mapa de elevación a partir de un mapa base (mapa topográfico) o de un DEM (modelo de elevación digital), muestran los cambios de pendiente a nivel muy detallado, uno de los usos más importantes de este tipo de mapas es predecir el flujo de agua, por otra parte, nos muestra un aspecto fundamental para tener en cuenta al momento de realizar cualquier tipo de obra por parte del ser humano.

Inicialmente, se ha confeccionado un mapa de elevaciones en el cual se procedió a la clasificación de las alturas respecto al nivel del mar. (figura 25).

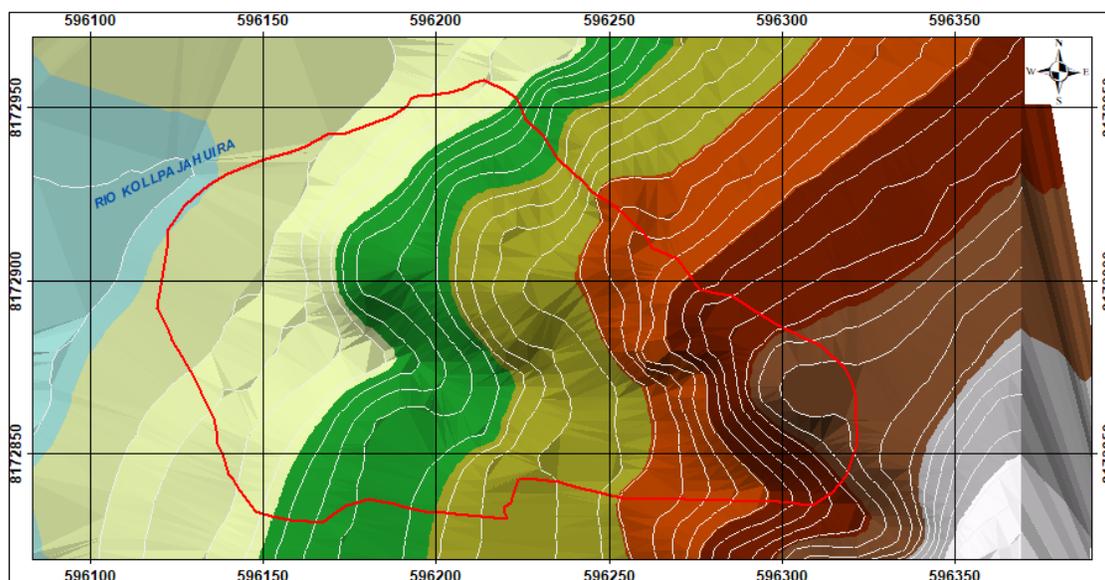
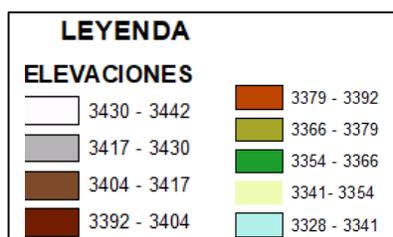


Figura 25. Mapa de elevaciones Huanu Huanuni, proyección WGS 84 UTM, zona 19k (elaboración propia).



Para la elaboración del mapa de pendientes en el área de estudio utilizaremos la clasificación de Lugo (Salamanca-González, Valencia-Ariza, & Fuentes-Rojas, 2019).

Rango	Lugo (grados)	Clasificación
1	0 a 3	Plano (planicie)
2	3 a 12	Ligeramente inclinado
3	12 a 30	Deslizamiento
4	30 a 40	Deslizamiento
5	> 40	Caída libre

Tabla 14. Rango de pendientes (elaboración propia).

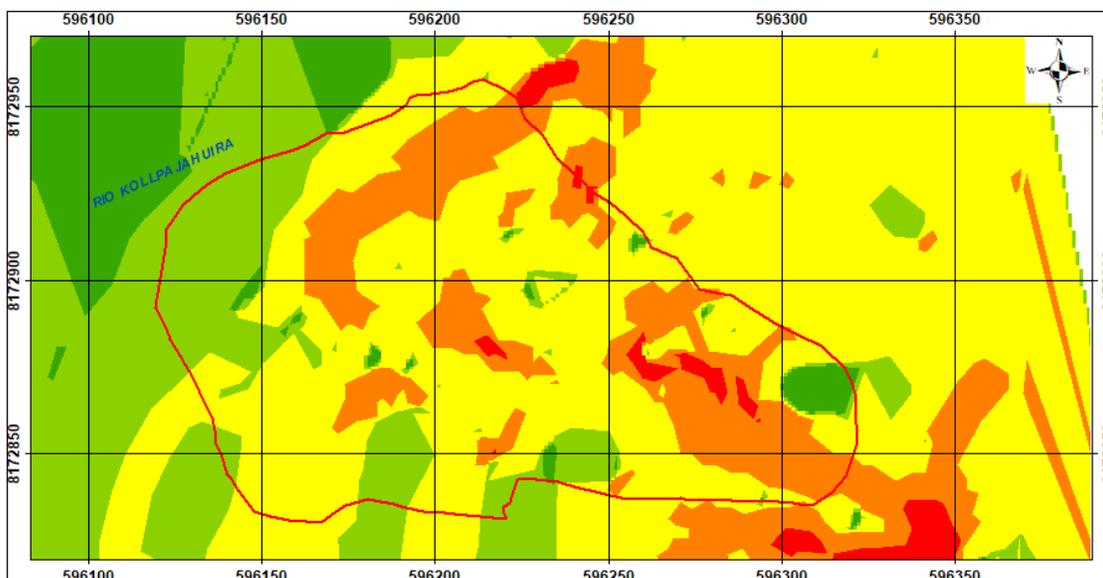
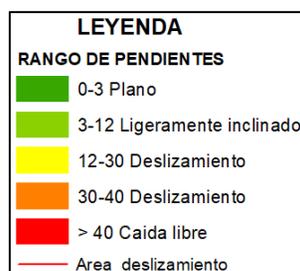


Figura 26. Mapa de pendientes Huanu Huanuni, proyección WGS 84 UTM, zona 19k (elaboración propia).



Con los rangos definidos se generó el mapa de pendientes para posteriormente analizar otros factores desencadenantes para la amenaza por remoción en masa, como por ejemplo los movimientos por caída libre, el cual tiene mayor énfasis al sueste del área de estudio cerca a la calle Gregorio Gamarra.

4.7. Hidrogeología

Dentro del área de estudio, tanto en el lugar en sí como en sus alrededores, se investigó el comportamiento, causas y consecuencias que puedan originar tanto las aguas subterráneas como las superficiales. Se prestará especial atención al proceso erosivo que estas aguas puedan causar al suelo y su impacto como amenaza natural.

En el trabajo de campo, se han analizado los cursos de agua actuales y también aquellos que han existido en el pasado. Además, se ha investigado la posible presencia de manantiales o las mal llamadas vertientes, se ha evaluado la existencia

de la humedad presente en las viviendas y se ha estudiado la erosión causada por las aguas superficiales.

4.7.1. Zona de recarga

Las aguas meteóricas han desempeñado un papel importante en el área de estudio, ya que constituyen una fuente de recarga significativa, tanto a través del escurrimiento superficial como del subsuperficial, así como por medio de manantiales y cuerpos de agua subterráneos.

La infiltración del agua en el subsuelo es de gran importancia debido a que el material predominante en el área de estudio está compuesto principalmente por arcillas limosas con arenas y gravas. Es importante destacar que en el terreno existían antiguos cursos de agua que desaparecieron o fueron cubiertos por el deslizamiento.

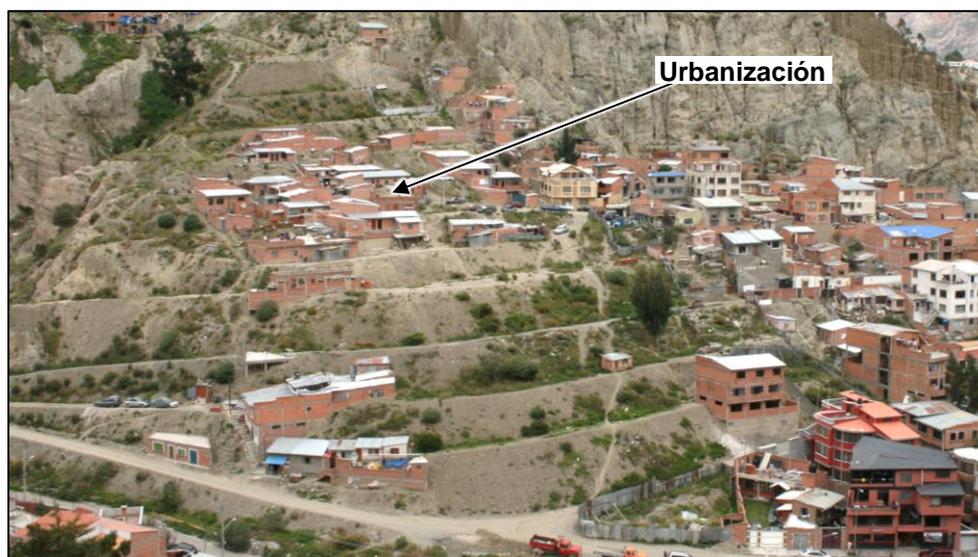
Por otro lado, los antiguos sistemas de drenaje de aguas servidas y pluviales estaban deteriorados y descubiertos, lo que, junto con las lluvias y los efectos del intemperismo, ocasionó el debilitamiento y la aparición de fisuras en los tubos de PVC (fotografía 31).



Fotografía 31. Deterioro y mala conexión del sistema de alcantarillado Huanu Huanuni (Guzmán, 2016)

Después del deslizamiento ocurrido en el año 2010, el sector ha sido nuevamente urbanizado. Sin embargo, es importante mencionar que estas áreas urbanizadas no cuentan con un sistema de drenaje y alcantarillado adecuado. Además, no se han instalado cámaras de inspección para el manejo de las instalaciones sanitarias y la evacuación de aguas servidas.

El deslizamiento anterior cubrió los ríos antiguos, lo que ha dado lugar a infiltraciones en el suelo. Estas infiltraciones representan una amenaza para el deslizamiento y también para las nuevas viviendas construidas en la zona (fotografía 32).



Fotografía 32. Nueva urbanización Huanu huanuni, no cuenta con servicio de alcantarillado (elaboración propia).

4.7.2. Zona de descarga

Al presentar una pendiente en el área de estudio, las aguas que fluyen en la superficie y subterráneas siguen esta dirección hacia el este, donde finalmente confluyen con el río Kollpajahuira. Es importante destacar que, en la actualidad, el río Kollpajahuira se encuentra embovedado (Fotografía 33).

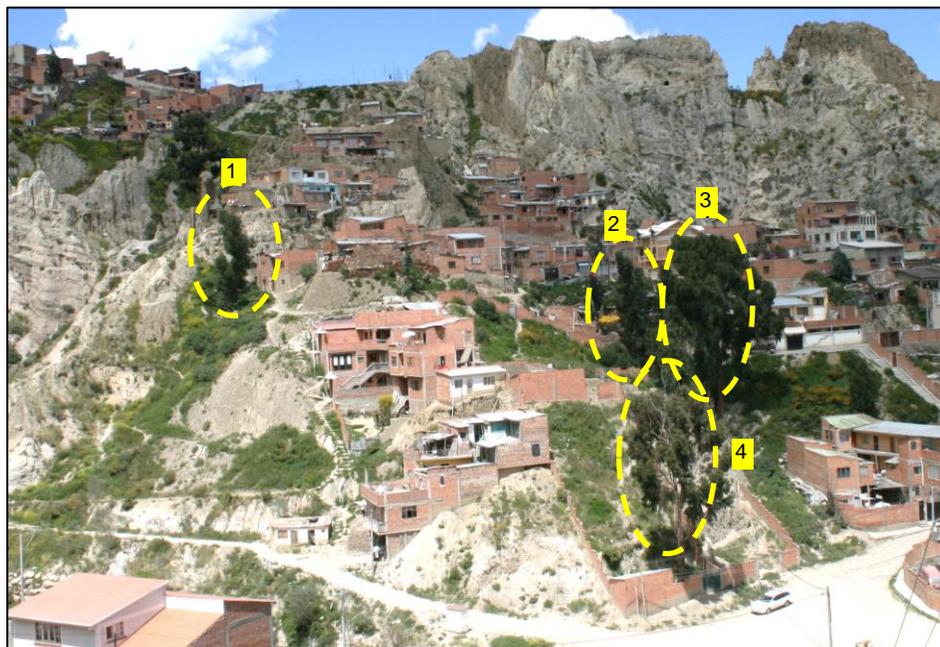
En esta configuración, las zonas de descarga de las aguas estarían ubicadas cerca de las laderas del río Kollpajahuira, justo al pie del deslizamiento, el cual sigue experimentando erosión.



Fotografía 33. Zona de descarga – río Kollpajahuira (elaboración propia).

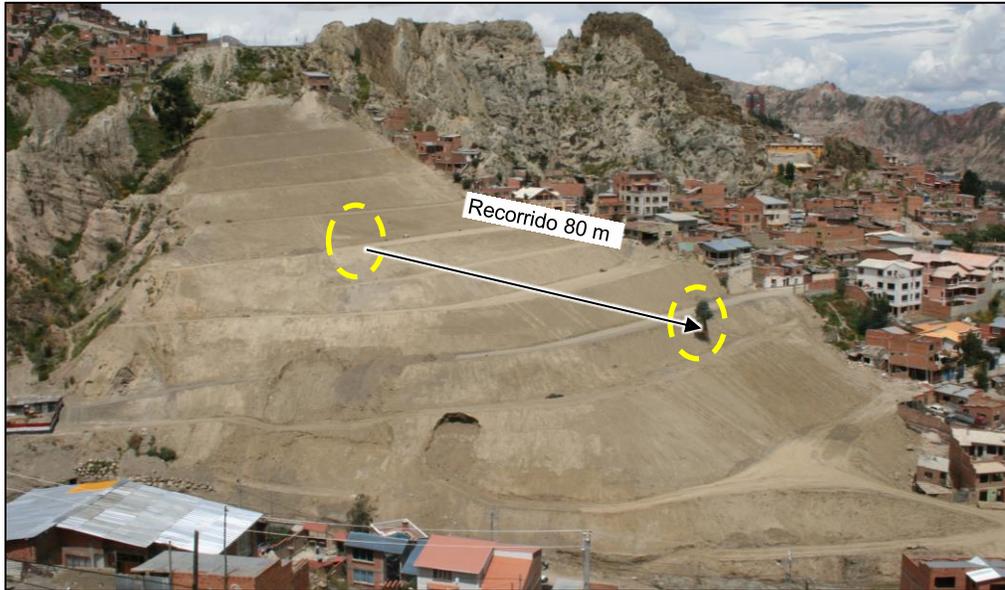
4.7.3. La vegetación

El efecto de la vegetación juega un papel muy importante en la estabilidad del talud en los deslizamientos, ya que ayuda a evitar problemas de erosión, desmoronamiento, reptación, entre otros. Antes del deslizamiento del 2010, se encontraban cuatro árboles en los extremos del área de estudio, así como arbustos que se distribuían por toda la zona (fotografía 34).



Fotografía 34. Presencia de árboles en el antiguo talud del deslizamiento Huanu huanuni

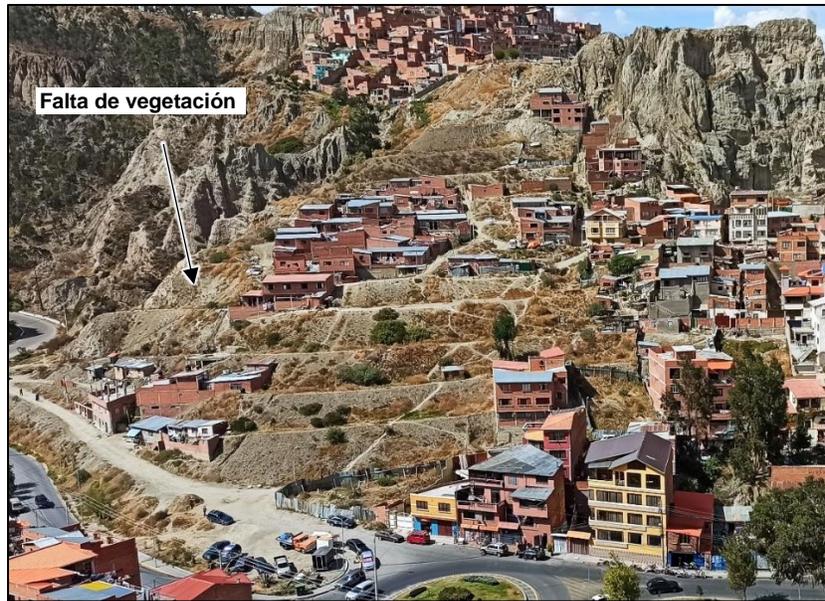
Después del evento ocurrido en 2010, solo quedó un árbol en pie, el cual se desplazó aproximadamente unos 80 metros en dirección al movimiento del deslizamiento desde el punto donde se encontraba (fotografía 35).



Fotografía 35. Desplazamiento del árbol después del deslizamiento del año 2010 (Guzmán, 2016).

Actualmente, con el paso del tiempo, en el área de estudio ha crecido vegetación compuesta principalmente por arbustos pequeños. Esta vegetación puede, en cierta medida, controlar o limitar las infiltraciones de agua. Sin embargo, también existen sectores que carecen de vegetación, lo cual afecta directamente a la estabilidad del talud del deslizamiento.

La ausencia de vegetación en esos sectores produce una disminución en la tensión capilar de la humedad superficial, lo que facilita la percolación masiva del agua hacia niveles inferiores bajo la superficie del suelo (Fotografía 36).



Fotografía 36. Sectores deforestados que pueden afectar nuevamente la estabilidad del área de estudio

4.7.4. Porosidad y permeabilidad

Por las características litológicas que presenta el área de estudio se define como un suelo permeable y poroso, ya que estos están constituidos por arcillas limosas con arenas y gravas, lo que significa que permite que los fluidos sean almacenados y atraviesen el suelo sin alterar su composición ni estructura en un determinado período de tiempo (figura 27).

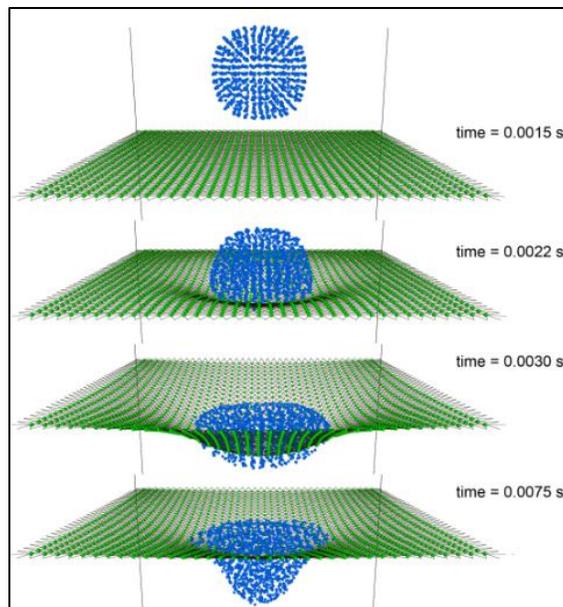


Figura 27. Simulación del comportamiento de una membrana permeables cuando cae una gota de agua (Wiki, 2023)

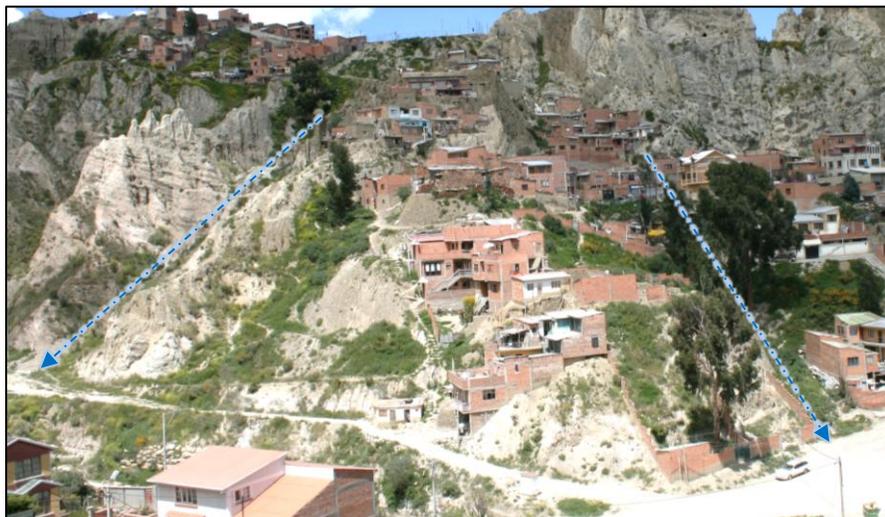
4.7.5. Aguas superficiales

Las aguas superficiales pueden tener un impacto negativo en el deslizamiento debido a diferentes factores. Uno de ellos es la infiltración a través de sumideros de la red de drenaje pluvial deteriorados y la mala conexión en el sistema de drenaje sanitario, que permite que el agua se filtre directamente al subsuelo y afecte nuevamente a la estabilidad del talud (fotografía 37).



Fotografía 37. Mala conexión de sistemas de drenajes y suministro de agua

Otro factor importante que debemos mencionar son los ríos intermitentes que se encontraban en los dos flancos del deslizamiento antes que ocurra el movimiento en masa del año 2010 (fotografía 38).



Fotografía 38. Curso del río, margen derecho e izquierdo del antiguo talud (Guzmán, 2016).

4.7.6. Aguas subterráneas

Al excavar los pozos con profundidades de 2.00 metros a 3.00 metros, no se evidenció la presencia de aguas subterráneas. Sin embargo, considerando las características litológicas y los antecedentes del área de estudio, como la presencia de ríos intermitentes, vegetación y la morfología del terreno, es probable que las aguas subterráneas se encuentren a niveles más profundos.

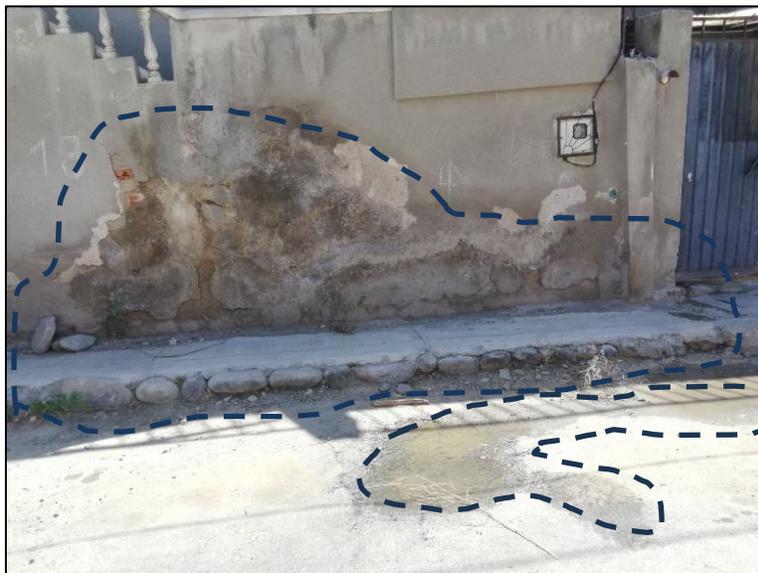
A consecuencia del deslizamiento de Huanu huanuni ocurrido en 2010, los ríos intermitentes fueron sepultados (fotografía 39), lo que ha llevado a que en algunas áreas cercanas a ellos se observe humedad en las paredes perimetrales y pequeños charcos de agua en algunas calles de la zona, esto puede agravarse en épocas de lluvia (fotografía 40 - 41).



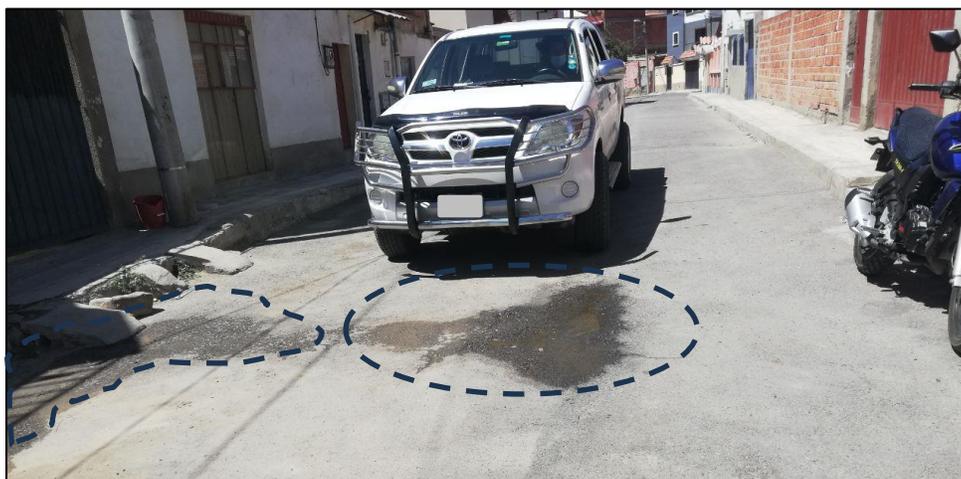
Fotografía 39. Antiguo curso del río, pasa por vivienda de 3 plantas

Es así que, ante el aumento poblacional continuo de esta urbanización sin las respectivas medidas de seguridad, como se observa en la fotografía 39, se ha construido una vivienda de 3 plantas en un área donde hace unos 14 años atrás existía un cauce de río. Esta situación puede representar un peligro inminente en

épocas de lluvia, ya que el río podría retomar su antiguo curso y causar inundaciones o daños a la estructura construida.



Fotografía 40. Borde derecho del deslizamiento Huanu Huanuni, presencia de humedad en paredes perimetrales



Fotografía 41. Borde derecho del deslizamiento Huanu huanuni, presencia de aguas en la superficie de los suelos

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS

5.1. Geotecnia

Para realizar el análisis geotécnico del deslizamiento de Huanu huanuni, se tomó en cuenta parámetros geotécnicos como la densidad o peso específico, la cohesión y el ángulo de fricción interna en condiciones drenadas y saturadas. Una vez identificada la litología de la zona de estudio, se llevó a cabo ensayos de laboratorio utilizando muestras tomadas de los 8 pozos o calicatas ubicadas en distintos puntos dentro del área de estudio.

La evaluación de campo, los resultados de laboratorio, el análisis geológico y el análisis de riesgo, han permitido identificar las propiedades físicas y de resistencia del suelo.

5.1.1. Metodología de trabajo

❖ Campo

↗ Exploración del subsuelo

La cantidad y disposición de las calicatas o pozos exploratorios se ajustan a la necesidad de obtener una comprensión completa del suelo en el área del deslizamiento de Huanu huanuni, el cual actualmente sirve como suelo de fundación para algunas estructuras.

Con este fin, se recopiló información de 8 pozos distribuidos a lo largo del deslizamiento, con profundidades que oscilaron entre los 2.00 y 3.00 metros. Este enfoque de trabajo permitió llevar a cabo una descripción detallada de la litología presente en el suelo del deslizamiento y también se realizó el ensayo de penetración estándar (SPT) (figura 31).

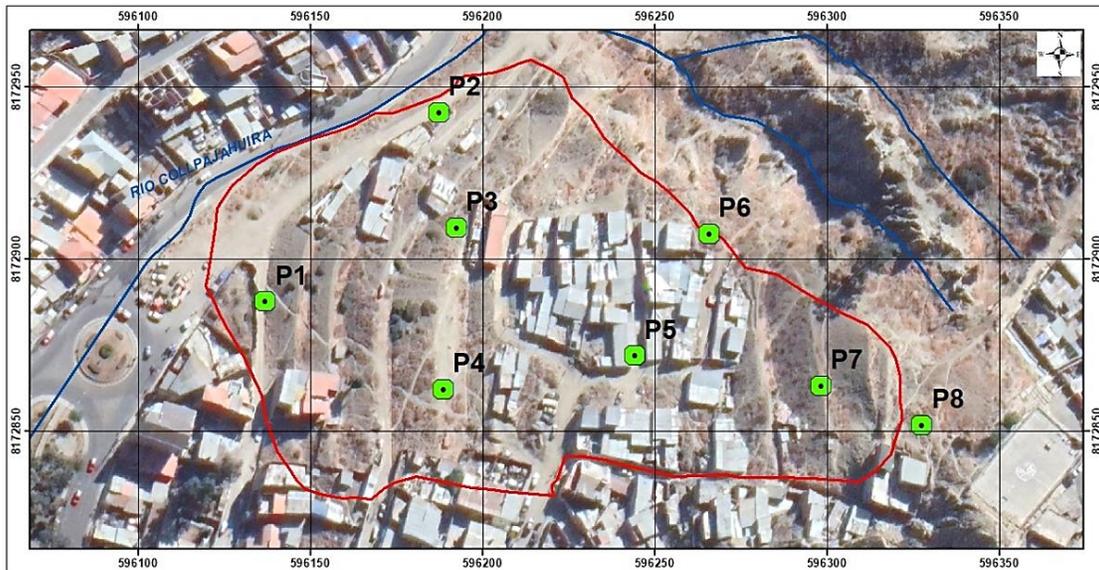


Figura 28. Ubicación de calicatas – Imagen Satelital (Google Earth Pro, 2022) (elaboración propia).

↗ Ensayo de penetración dinámica SPT

Se registro la excavación de 8 pozos con profundidades de 2.00 metros y 3.00 metros, donde se llevaron a cabo un total de 8 ensayos de Penetración Estándar (SPT, por sus siglas en inglés) en estos niveles. Estos ensayos se llevaron a cabo de acuerdo con las normas ASTM D: 1586-84. Durante la ejecución de los ensayos, se establecieron tres intervalos de 15 cm cada uno, y se realizó el conteo preciso de golpes para los últimos 30 cm de penetración.

Posteriormente, se aplicó el método de correlación del ensayo SPT desarrollado por Terzagui. A partir de esta correlación, se realizó una corrección en el número de golpes obtenidos en el ensayo para determinar su equivalente en un procedimiento con un 60% de la energía inicial, lo que se conoce como el número de golpes corregido N_{60} .

La fórmula que se utilizo es la siguiente:

$$N_{60} = N_{spt} * (ER/60)$$

ER es la razón normalizada al 60 %, este valor se obtiene mediante la calibración del equipo (ASTM - D4633) del laboratorio de suelos (tabla 12).

Valor medido en campo ER = 75

N° de Pozo	Prof. [m]	SPT/15cm			N _{SPT} Campo	N ₆₀
		15	30	45		
P1	3,0	6	8	12	20	25,0
P2	3,0	4	4	6	10	12,5
P3	2,0	5	7	11	18	22,5
P4	3,0	4	5	6	11	13,8
P5	2,0	2	4	4	8	10,0
P6	2,0	4	6	11	17	21,3
P7	3,0	4	6	10	16	20,0
P8	3,0	3	5	9	14	17,5

Tabla 15. Corrección de los golpes N_{SPT} – N₆₀ (elaboración propia).

Esta información se aplica para estimar las condiciones subsuperficiales para el diseño de fundaciones.

↗ Efecto de la sobrecarga del terreno

El efecto de corrección del número de golpes (N₁)₆₀ nos permite determinar la resistencia entre suelos a distintas profundidades. Esta corrección es necesaria debido a la sobrecarga del terreno, lo que hace que el valor del número de golpes sea mayor a medida que se investiga a mayor profundidad.

Para obtener el valor corregido (N₁)₆₀, calculamos el factor de corrección C_n, que dependerá de las tensiones efectivas (σ') presentes en cada profundidad. A efectos prácticos, es posible adoptar la siguiente relación:

$$C_n = (98/\sigma')^{0.5}$$

Dónde:

C_n = corrección del número de golpes por sobrecarga

σ' = tensión efectiva

por tanto:

$$\sigma' = 1900 \text{ g/cm}^3$$

$$18.6 \text{ kN/m}^3$$

Nº de Pozo	Prof, [m]	γD_f (Kpa)	C_N
P1	3,0	56	1,32
P2	3,0	56	1,32
P3	2,0	37	1,62
P4	3,0	56	1,32
P5	2,0	37	1,62
P6	2,0	37	1,62
P7	3,0	56	1,32
P8	3,0	56	1,32

Tabla 16. Factor de corrección C_N (elaboración propia).

Los factores de corrección se resumen de la siguiente manera:

$$(N_1)_{60} = C_N * N_{60}$$

Dónde:

$(N_1)_{60}$ = Número de golpes corregido

C_N = corrección por sobrecarga equivalente

Nº de Pozo	C_N	N_{60}	$(N_1)_{60}$
P1	1,32	25	33,1
P2	1,32	12,5	16,6
P3	1,62	22,5	36,5
P4	1,32	13,75	18,2
P5	1,62	10	16,2
P6	1,62	21,25	34,5
P7	1,32	20	26,5
P8	1,32	17,5	23,2

Tabla 17. Corrección normalizada $(N_1)_{60}$ (Elaboración propia)

Es cierto que con el ensayo SPT es posible obtener parámetros de corte, lo que nos permite tener una interpretación completa de la resistencia del terreno que servirá de fundación para las estructuras proyectadas. Este ensayo proporciona información valiosa sobre la capacidad de carga y la estabilidad del suelo.

Además, a través del ensayo SPT, es posible establecer correlaciones con otros parámetros geotécnicos, como el módulo elástico y el módulo de balasto del terreno.

Estas correlaciones nos permiten comprender mejor el comportamiento del suelo y su respuesta a las cargas aplicadas, lo que es fundamental para el diseño seguro y adecuado de las estructuras.

Nº de Pozo	Prof. [m]	N ₆₀ (N ₁) ₆₀	Angulo de fricción interna (Φ)			Angulo Fricción promedio (Φ)	Elasticidad "E" (kg/cm ²)	Cohesión "Su" (kg/cm ²)	Balasto Meyerhof (K ₃₀) (kg/cm ³)
			[1]	[2]	[3]				
P1	3.0	58.1	42.7	39.8	49.9	44.1	418	0.829	11.44
P2	3.0	29.1	35.4	34.2	41.2	36.9	228	0.415	5.72
P3	2.0	59.0	42.9	39.9	50.1	44.3	424	0.842	11.61
P4	3.0	32.0	36.1	34.9	42.2	37.7	247	0.456	6.29
P5	2.0	26.2	34.6	33.6	40.1	36.1	209	0.374	5.16
P6	2.0	55.7	42.1	39.4	49.3	43.6	402	0.795	10.97
P7	3.0	46.5	39.9	37.8	46.8	41.5	342	0.664	9.15
P8	3.0	40.7	38.4	36.7	45.0	40.0	304	0.581	8.01

Tabla 18. Correlación parámetros geotécnicos como el ángulo de fricción drenada (distintos métodos); Cohesión no drenada (Método Stroud 1974); Modulo elástico Bowless; Modulo de balasto Meyerhof. [1]Peck, Hanson & Thornburn (1974), [2]Peck y [3]Hatanaka and Uchida (1996).

❖ Ensayos del laboratorio de suelos

Todas las muestras recolectadas durante el proceso de exploración en el campo fueron trasladadas al laboratorio de mecánica de suelos para llevar a cabo la evaluación de sus propiedades físico-mecánicas. Los ensayos se realizaron de acuerdo con las normas establecidas por la American Society for Testing and Materials (ASTM), y la clasificación de los suelos se llevó a cabo siguiendo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Este enfoque se implementó con el objetivo de cumplir con los requisitos mínimos de información necesarios para el análisis. Dichos requisitos abarcan aspectos cruciales como:

Descripción de los análisis	Norma
Clasificación de Suelos	ASTM D-2487
Porcentaje de humedad natural	ASTM D-2216
Límites de Atterberg	ASTM D-4318
Corte directo	ASTM D-3080
Peso específico de los sólidos	ASTM D-854

Tabla 19. Normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM)

➤ Análisis Granulométrico

El resultado del análisis granulométrico para las muestras extraídas en los ocho pozos se presenta en la siguiente tabla.

Pozo	Prof (m)	Granulometría (%)			Clasificación SUCS	Descripción SUCS	Cap. De carga admisible (kg/cm ²)
		Grava	Arena	Finos			
P1	3.0	42.2	19.1	38.7	GC-GP	Grava pobremente gradada con arcilla y arena.	1.9
P2	3.0	48.7	26.9	24.4	GC-GM	Grava limo arcillosas con arena.	1.4
P3	2.0	10.6	17.5	71.9	CL-ML	Arcilla limosa con arenas.	1.2
P4	3.0	12.6	42.3	45.1	SC	Arenas arcillosas.	0.9
P5	2.0	38.4	42.9	18.9	SC	Arenas arcillosas con gravas.	0.7
P6	2.0	44.6	35.6	19.8	SC	Arenas arcillosas con gravas.	1.3
P7	3.0	44.1	25.2	30.7	GC	Gravas arcillosas con arenas.	2.1
P8	3.0	46.2	30.6	23.2	GC	Gravas arcillosas con arenas.	1.8

Tabla 20. Resultado del análisis granulométrico (elaboración propia).

El análisis granulométrico, como se resume en la Tabla 17, indica que el suelo está mayormente compuesto por arenas arcillosas y gravas arcillosas con arenas. Además, la distribución de tamaños de partículas sugiere que estos suelos poseen una buena permeabilidad y porosidad. Esta información nos permite determinar la capacidad de carga admisible en el área de estudio cuyos valores se encuentran entre los 0.7 kg/cm² y 2.1 kg/cm².

➤ Límites de Atterberg

Pozo	Prof. (m)	Límites (%)			Humedad (%)
		L.L.	L.P.	I.P.	
P1	3.0	25.8	18.9	6.9	9.5
P2	3.0	23.8	17.9	5.9	5.8
P3	2.0	27.2	20.2	7.8	8.8
P4	3.0	22.6	13.4	9.3	8.5
P5	2.0	26.6	16.1	10.5	15.7
P6	2.0	26.5	14.1	12.4	6.6
P7	3.0	26.8	17.9	8.9	6
P8	3.0	24.8	16.4	8.4	7.3

Tabla 21. Resumen de límites de Atterberg (elaboración propia).

En la Tabla 18, los valores del índice de plasticidad obtenidos sugieren que este suelo es susceptible a deformarse en condiciones de humedad, según Franch & Torrijo (2013) los valores alcanzados muestran que los suelos son de media y baja plasticidad.

↗ Resistencia al Corte

N° POZO	Prof. (m)	Suelo (SUCS)	Corte Directo		Densidad aparente gr/cm ³	Tipo de parámetro
			c (kg/cm ²)	Φ (°)		
P1	3.0	GC-GP	0.051	31.36	1.999	Ensayo en muestra remoldeada, saturada y consolidada.
P4	3.0	SC	0.14	26.8	1.840	
P6	2.0	SC	0.19	27.5	1.570	

Tabla 22. Resultados ensayo de corte directo pozo P1-P4-P6

En la Tabla 19, se observa que los valores del ángulo de fricción son relativamente altos y los valores de la cohesión son más bajos, lo que este análisis sugiere que el suelo tiene una resistencia significativa debida al ángulo de fricción, pero su capacidad para resistir esfuerzos cortantes sin esfuerzos normales adicionales es limitada debido a la baja cohesión.

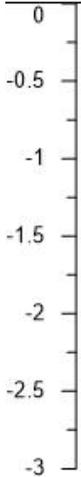
❖ Gabinete

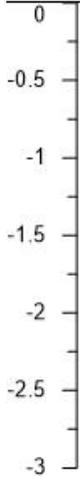
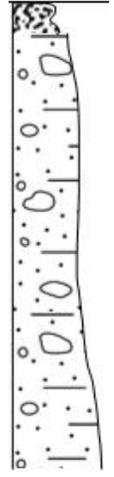
Con la información recopilada tanto en campo como en el laboratorio, se llevó a cabo una exhaustiva evaluación de las propiedades físico-mecánicas del suelo y los parámetros geotécnicos. Esta evaluación tuvo como objetivo principal la obtención de medidas fundamentales para la caracterización precisa del suelo.

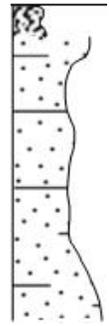
En consecuencia, los datos obtenidos no solamente son representativos, sino que también son lo suficientemente amplios como para no establecer limitaciones. Estos datos resultarán de gran utilidad para futuros replanteos y en el momento de la implementación de proyectos de obras civiles.

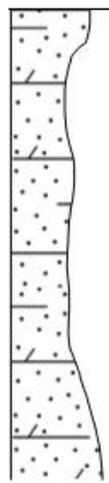
↗ Registro estratigráfico de las calicatas

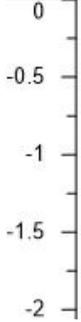
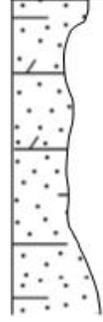
Se recopiló información de un total de 8 pozos o calicatas exploratorios, realizados en los años 2018 y 2019. Estos pozos tuvieron como objetivo principal identificar la composición litológica en profundidad. A través de las muestras obtenidas en estos pozos, se procedió a llevar a cabo análisis detallados en el laboratorio de mecánica de suelos. Se detallan a continuación la descripción litológica:

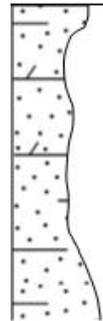
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN		Pozo 1				UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN	
Profundidad: 3.00 m					Coordenadas: E: 596147 WGS-84 Zona 19S N: 8172878		
PERIODO	UNIDAD	TIPO DE DEPOSITO	PROF.	LITOLOGIA	DESCRIPCION LITOLOGICA		
CUARTERNARIO	Qr	Relleno antrópico			Material de relleno: 0.00 m a 0.50 m Material de relleno con escombros, presentan pequeñas raíces en el subsuelo.		
	Qdz	Deslizamiento			Material de deslizamiento: 0.50 m a 3.00 m Mezcla de material heterogéneo de arcillas arenosas con gravas pequeñas de coloración marrón claro amarillento.		

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN		Pozo 2				UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN	
Profundidad: 3.00 m					Coordenadas: E: 596187 WGS-84 Zona 19S N: 8172942		
PERIODO	UNIDAD	TIPO DE DEPOSITO	PROF.	LITOLOGIA	DESCRIPCION LITOLOGICA		
CUARTERNARIO	Qr	Relleno antrópico			Material de relleno: 0.00 m a 0.20 m Mezcla de arcillas arenosas con escombros de construcción.		
	Qdz	Deslizamiento			Material de deslizamiento: 0.20 m a 3.00 m Mezcla de material heterogéneo de arcillas limosas con arenas de coloración marrón claro amarillento.		

		Pozo 3				
Profundidad: 2.00 m				Coordenadas: E: 596191 WGS-84 Zona 19S N: 8172945		
PERIODO	UNIDAD	TIPO DE DEPOSITO	PROF.	LITOLOGIA	DESCRIPCION LITOLÓGICA	
CUARTERNARIO	Qr	Relleno antrópico	0		Material de relleno: 0.00 m a 0.20 m Mezcla de arcillas limosas con pequeñas raíces en el subsuelo.	
	Qdz	Deslizamiento	-0.5 -1 -1.5 -2		Material de deslizamiento: 0.20 m a 2.00 m Mezcla de material heterogéneo de arcillas limosas de coloración marrón claro amarillento	

		Pozo 4				
Profundidad: 3.00 m				Coordenadas: E: 596203 WGS-84 Zona 19S N: 8172924		
PERIODO	UNIDAD	TIPO DE DEPOSITO	PROF.	LITOLOGIA	DESCRIPCION LITOLÓGICA	
CUARTERNARIO	Qdz	Deslizamiento	0 -0.5 -1 -1.5 -2 -2.5 -3		Material de deslizamiento: 0.00 m a 3.00 m Mezcla de material heterogéneo de arcillas gravosas con limos de coloración marrón claro amarillento	

		Pozo 5					
Profundidad: 2.00 m				Coordenadas: E: 596183 WGS-84 Zona 19S N: 8172890			
PERIODO	UNIDAD	TIPO DE DEPOSITO	PROF.	LITOLOGIA	DESCRIPCION LITOLOGICA		
CUARTERNARIO	Qdz	Deslizamiento			<p>Material de deslizamiento: 0.00 m a 2.00 m</p> <p>Mezcla de material heterogéneo de arcillas gravosas con limos de coloración marrón claro amarillento.</p>		

		Pozo 6					
Profundidad: 2.00 m				Coordenadas: E: 596204 WGS-84 Zona 19S N: 8172871			
PERIODO	UNIDAD	TIPO DE DEPOSITO	PROF.	LITOLOGIA	DESCRIPCION LITOLOGICA		
CUARTERNARIO	Qdz	Deslizamiento			<p>Material de deslizamiento: 0.00 m a 2.00 m</p> <p>Mezcla de material heterogéneo de arcillas gravosas con arenas y limos de coloración marrón claro amarillento.</p>		

		Pozo 7				
Profundidad: 3.00 m				Coordenadas: E: 596231 WGS-84 Zona 19S N: 8172925		
PERIODO	UNIDAD	TIPO DE DEPOSITO	PROF.	LITOLOGIA	DESCRIPCION LITOLOGICA	
CUARTERNARIO	Qr	Relleno antrópico	0		Material de relleno: 0.00 m a 0.50 m Material de relleno con escombros, presentan pequeñas raíces en el subsuelo.	
	Qdz	Deslizamiento	-0.5 -1 -1.5 -2 -2.5 -3		Material de deslizamiento: 0.50 m a 3.00 m Mezcla de material heterogéneo de arcillas arenosas con limos de coloración marrón claro amarillento.	

		Pozo 8				
Profundidad: 3.00 m				Coordenadas: E: 596256 WGS-84 Zona 19S N: 8172911		
PERIODO	UNIDAD	TIPO DE DEPOSITO	PROF.	LITOLOGIA	DESCRIPCION LITOLOGICA	
CUARTERNARIO	Qdz	Deslizamiento	0 -0.5 -1 -1.5 -2 -2.5 -3		Material de deslizamiento: 0.50 m a 3.00 m Mezcla de material heterogéneo de arcillas arenosas con limos de coloración marrón claro amarillento.	

5.2. Evaluación físico mecánica del área de estudio

Realizaremos una descripción de las características geotécnicas principales encontradas en el deslizamiento de Huanu huanuni.

5.2.1. Descripción Litológica

La composición del suelo está formada por una mezcla heterogénea de arcillas limosas, arenas y gravas. Estos depósitos son característicos de un deslizamiento y presentan granos de grava con tamaños que oscilan entre 0.02 cm y 5 cm. La coloración predominante de estos depósitos es marrón amarillento.

5.2.2. Propiedades Geotécnicas

5.2.2.1. Análisis granulométrico

A continuación, se presenta un resumen de la distribución de tamaños de partículas en el área de estudio, expresada en porcentajes.

- ❖ *Gravas = 48.7 a 10.6*
- ❖ *Arenas = 42.9 a 17.5*
- ❖ *Finos = 71.9 a 18.9*

5.2.2.2. Clasificación

La clasificación del suelo se realizó mediante el Sistema unificado de clasificación de suelos – USCS (Unified Soil Classification System (USCS)).

- ❖ GC – GP = Gravas pobremente gradada con arcillas y arenas.
- ❖ GC – GM = Grava limo arcillosa con arenas.
- ❖ CL – ML = Arcilla limosa con arenas.
- ❖ SC = Arenas arcillosas con gravas.
- ❖ GC = Gravas arcillosas con arenas.

5.3. Análisis de los ensayos de laboratorio

Los ensayos de suelos fueron realizados siguiendo los criterios establecidos por la norma ASTM. Estos ensayos se llevaron a cabo en las 8 calicatas, con la correspondiente toma de muestras, con el propósito de investigar y determinar las capacidades de carga admisible del suelo en la zona afectada por el deslizamiento (tabla 20).

Pozos	Coordenadas UTM	Prof. (m)	Ensayos de laboratorio						
			SPT	SUCS	Humedad natural	Límites de Atterberg	Granulometría	Corte directo	Densidad aparente del suelo
P1	596147.13	3.0	X	X	X	X	X	X	X
	8172878.10								
P2	596187.30	3.0	X	X	X	X	X		
	8172942.79								
P3	596191.35	2.0	X	X	X	X	X		
	8172945.87								
P4	596203.69	3.0	X	X	X	X	X	X	X
	8172924.33								
P5	596183.88	2.0	X	X	X	X	X		
	8172890.74								
P6	596203.98	2.0	X	X	X	X	X	X	X
	8172871.21								
P7	596231.26	3.0	X	X	X	X	X		
	8172924.90								
P8	596255.95	3.0	X	X	X	X	X		
	8172910.83								

Tabla 23. Resumen de los ensayos de laboratorio (elaboración propia).

5.4. Posibles causas del movimiento de tierra

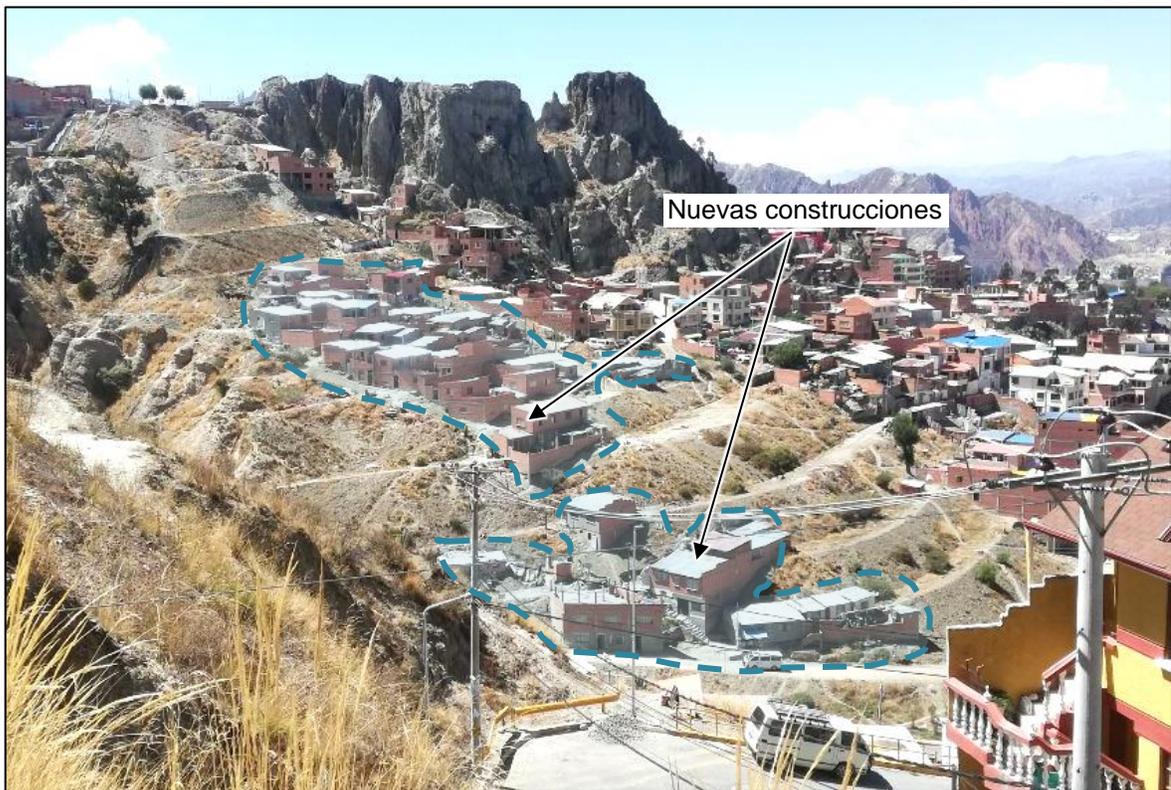
5.4.1. La calidad de los suelos

La presencia de depósitos de deslizamiento plantea un riesgo significativo para futuras construcciones en la zona, ya que este material exhibe una consistencia deficiente y su estructura interna es propensa a la erosión, especialmente en presencia de aguas subterráneas o superficiales. Además, los depósitos de relleno de origen antrópico que se encuentran en el área de estudio también representan un potencial problema para la nueva urbanización, ya que, estos son materiales colapsables y tienen la capacidad de generar asentamientos diferenciales de manera rápida, lo que podría poner en peligro la integridad de las futuras edificaciones.

5.4.2. Carga de las Construcciones

El rápido aumento de la población en la ciudad de La Paz, así como en la zona de estudio, ha resultado en un incremento significativo en la carga y peso sobre áreas ya inestables al llevar a cabo la construcción de viviendas. Esta situación puede potencialmente desencadenar movimientos en el terreno.

Además, las nuevas construcciones erigidas en el área afectada por el deslizamiento enfrentan la carencia inicial de servicios públicos, incluyendo sistemas de alcantarillado. Como resultado, las aguas residuales se descargan en pozos ciegos, contribuyendo a que estos se infiltren en el terreno de manera gradual (fotografía 42).



Fotografía 42. Nuevas construcciones (elaboración propia).

CAPÍTULO VI

6. ESTABILIDAD DE TALUD

6.1. Análisis de estabilidad

En relación a los métodos de cálculo, la definición de la estabilidad de un talud en el deslizamiento se basa primordialmente en los principios de la estática, los cuales analizan el estado de equilibrio de una masa de suelo potencialmente inestable. Estos métodos consideran factores influyentes como los parámetros geológicos, la geometría del talud, el flujo de agua y las propiedades mecánicas del suelo. Los resultados obtenidos mediante estos enfoques son altamente precisos. Entre las metodologías utilizadas se encuentran el método Ordinario o Fellenius, el método Janbú modificado y los métodos Bishop, Spencer y Morgenstern-Price.

6.2. Rocscience Slide 6.0

Para determinar el factor de seguridad, se empleará el software SLIDE, un programa 2D destinado a evaluar la estabilidad de taludes. Este software es particularmente idóneo para analizar el factor de seguridad de superficies de falla, ya sean circulares o no circulares, en taludes compuestos por suelo o roca. SLIDE es una herramienta informática sumamente accesible en su manejo, que permite crear y analizar con rapidez y facilidad modelos complejos.

Este programa aborda el análisis de la estabilidad de las superficies de deslizamiento mediante el empleo de Métodos de Equilibrio Límite de Corte Vertical. Además, presenta la opción de aplicar métodos de búsqueda para identificar la superficie crítica de deslizamiento, específica para una pendiente determinada.

Las características incluyen:

- ↗ Búsqueda de superficie crítica para circular o no circular superficies de deslizamiento.
- ↗ Los métodos de análisis incluyen Ordinario o Fellenius, el método Janbú modificado y los métodos Bishop, Spencer y Morgenstern-Price.

- ↗ Múltiples materiales. Materiales anisotrópicos, no lineales de Mohr-Coulomb y otros modelos de resistencia.
- ↗ Agua subterránea: superficies piezoeléctricas, factores Ru, poros rejillas de presión o análisis de aguas subterráneas en estado estacionario.
- ↗ Grietas de tensión (seca o llena de agua)
- ↗ Carga externa: lineal, distribuida o sísmica
- ↗ Soporte: clavos para suelo, amarres, geotextiles, pilotes.

Es por esta razón que se optó por utilizar el software mencionado para llevar a cabo el modelamiento de la estabilidad del talud del deslizamiento de Huanu Huanuni. En este proceso, se tuvieron en cuenta los siguientes componentes:

- ↗ La geometría de la superficie del talud del deslizamiento, el cual se obtuvo a partir del levantamiento topográfico.
- ↗ Las características geomecánicas del suelo mediante ensayos de laboratorio.
- ↗ Cargas evaluadas de las edificaciones que yacen en el sitio.

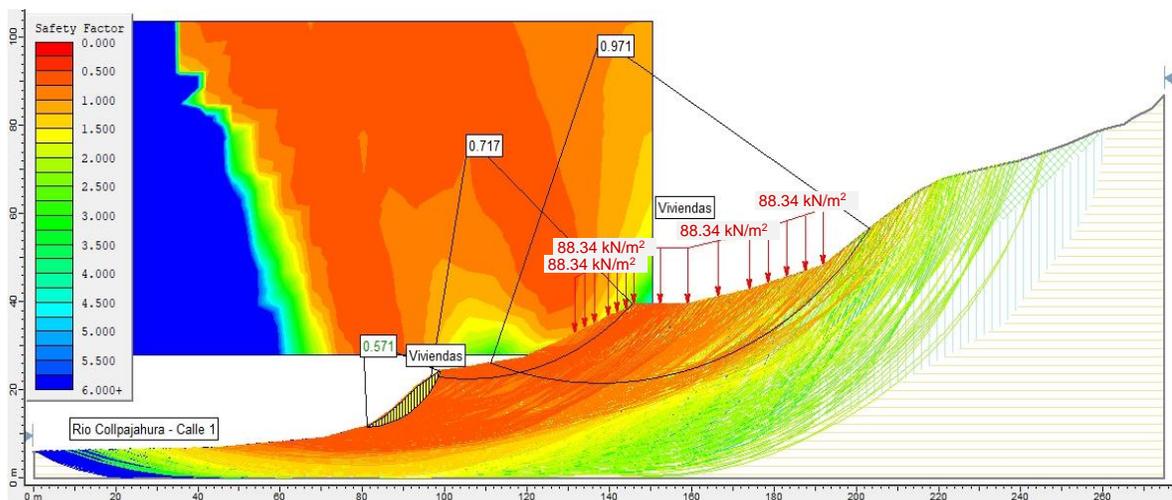


Figura 29. Estabilidad del deslizamiento Huanu huanuni con el programa Slide (elaboración propia).

Cuando el programa se ejecuta, se deben proporcionar ciertas características para llevar a cabo el modelamiento. En este caso, se utilizó la fuerza de fricción de Mohr-Coulomb como modelo y se optó por el método de Morgenstern-Price. La imagen

muestra una cuadrícula que representa la superficie de falla en cada punto del deslizamiento, con colores que indican diferentes condiciones.

Durante el proceso de modelamiento, se incorporaron cargas de 88.34 kN/m en el cuerpo del deslizamiento. Estas cargas se representaron en color rojo y simulan el peso actual de las viviendas construidas en la zona.

Al realizar el modelamiento del deslizamiento mediante el programa, se obtuvo un factor de seguridad inferior a uno, lo cual se refleja en colores anaranjados y amarillos en la representación gráfica. Estos colores indican valores por debajo de la unidad. Esta situación implica que las propiedades geomecánicas del suelo no poseen la suficiente resistencia para afrontar las condiciones actuales del deslizamiento. Por lo tanto, los resultados del análisis de estabilidad del deslizamiento de Huanu huanuni revelan la existencia de vulnerabilidades en toda el área de estudio en caso de que no se tomen precauciones adecuadas al construir viviendas.

Los valores representados en la figura 32 señalan las zonas inestables en la base y el cuerpo del deslizamiento, con valores respectivos de 0.571 y 0.717. En las cercanías de la cabeza del deslizamiento, el valor asciende a 0.971, que, si bien está cercano a la unidad, sigue siendo inestable para la edificación de viviendas.

6.3. Métodos de estabilización de taludes

6.3.1. Modificación de la geometría

Luego del deslizamiento ocurrido en 2010 en Huanu huanuni, se implementó el método de terrazas o bermas como medida para reducir la pendiente del terreno. Este método involucra la creación de cortes escalonados (banquinas) en el deslizamiento, dividiéndolo en múltiples terrazas de diferentes dimensiones y tamaños, con el propósito de que sean más manejables y controlables.

Es relevante señalar que estas bermas, que originalmente se establecieron con el fin de estabilizar el terreno, han sido intervenidas por los residentes de la urbanización de Huanu huanuni para su urbanización. Sin embargo, para mantener la integridad del área y reducir los riesgos futuros de erosión e inestabilidad, es esencial implementar drenajes transversales en estas bermas modificadas.

↗ Drenajes transversales

La inclusión de drenajes transversales en las bermas urbanizadas permitirá un adecuado control de las aguas superficiales. Esto no solo contribuiría a preservar la estabilidad del terreno, sino que también reduciría los peligros potenciales de erosión y deslizamientos en el futuro. Esta medida es crucial para garantizar la seguridad y la sostenibilidad de la urbanización en la zona afectada por el deslizamiento.

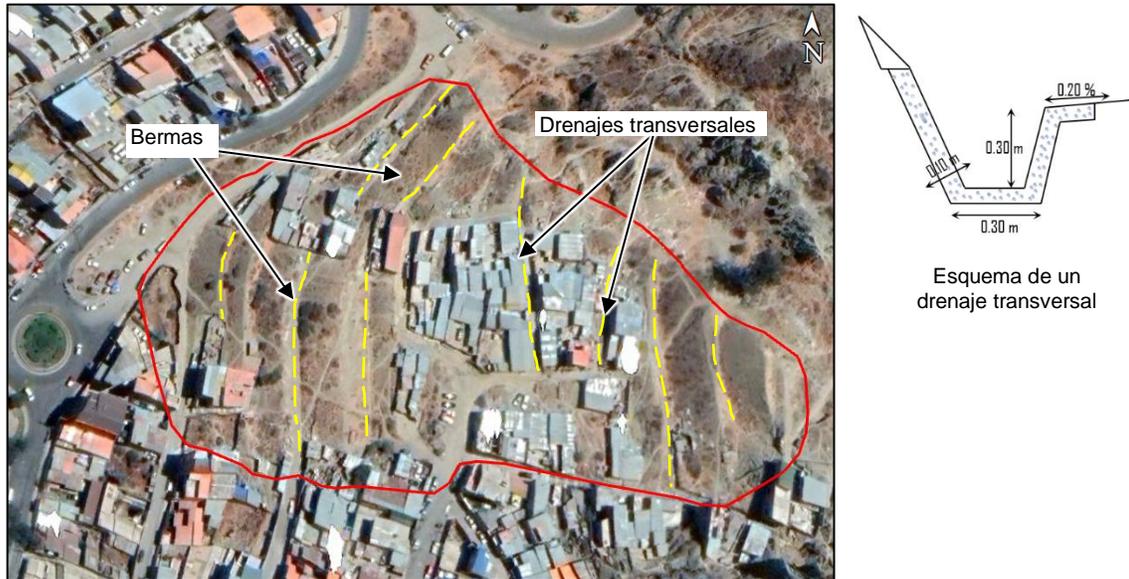


Figura 30. Drenajes transversales en bermas (elaboración propia).

Los sistemas de drenaje deben ser construidos utilizando concreto, con un espesor de 0.15 cm. El ancho del canal debe ser aproximadamente de 0.40 cm, mientras que la altura debería ser de 0.30 cm. Además, se recomienda aplicar una inclinación del 2% en el canal para asegurar un adecuado flujo del agua.

6.3.2. Elementos resistentes

↗ Pantalla de pilotes

Este método seguro de estabilización puede ser aplicado efectivamente en la base del deslizamiento de Huanu huanuni. Se recomienda la construcción de un conjunto de pilotes densamente agrupados para lograr un sólido soporte del área afectada por el deslizamiento. Estos pilotes pueden ser utilizados para reforzar las bases de las estructuras, ofreciendo un mayor soporte y protección contra futuros movimientos del terreno.

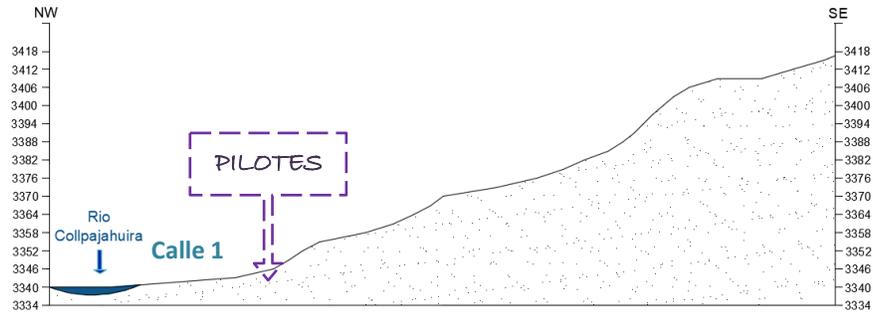


Figura 31. Ubicación de la pantalla de pilotes (elaboración propia).

6.3.3. Vegetación

La vegetación juega un papel esencial en la estabilización de los taludes, especialmente en aquellos que han sufrido deslizamientos. Las raíces de las plantas desempeñan un papel crucial al mantener el suelo cohesionado, absorber el agua y mejorar la resistencia del terreno. Por lo tanto, se recomienda encarecidamente llevar a cabo la plantación de árboles en las zonas afectadas por los deslizamientos para mejorar la estabilidad del terreno.

La selección adecuada de las especies vegetales desempeña un papel fundamental en este proceso. En este sentido, se dará prioridad a la plantación de árboles con raíces profundas, como los eucaliptos y los pinos. Estos tipos de árboles poseen la capacidad de penetrar en el suelo y unirlo, lo que contribuirá de manera significativa a prevenir futuros deslizamientos y a mantener la estabilidad del talud a lo largo del tiempo.



Figura 32. Distribución de árboles de eucaliptos y pinos para mejorar la estabilidad del deslizamiento

Se recomienda plantar árboles de eucalipto cada 12 m de distancia entre ellos, tanto al pie y cabecera del deslizamiento, colindante con el río intermitente. Las raíces del eucalipto desempeñarán un papel fundamental al proporcionar una cohesión adicional al material del deslizamiento, contribuyendo así a su estabilización.

En el caso del material compuesto por arcillas limosas y arenas característico del deslizamiento, el pino es una excelente opción como estabilizador de taludes. Por lo tanto, se sugiere plantar árboles de pino en la parte superior (cabecera) y en la parte más alta del talud (coronamiento), así como en el cuerpo del deslizamiento en donde atravesaba anteriormente un pequeño río. Es importante destacar que los pinos no generan una carga excesiva en el talud ni deformación en el terreno, lo que los convierte en una opción idónea para mejorar la estabilidad de la zona afectada.

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

El presente estudio, titulado "Caracterización geotécnica del deslizamiento de Huanu huanuni", ha alcanzado las siguientes conclusiones, en línea con los objetivos establecidos:

- El deslizamiento de Huanu huanuni está ubicado en el macrodistrito sur de la ciudad de La Paz, específicamente en la región entre las zonas de Alto Obrajes y Bella Vista, sobre la quebrada Kollpajahuira. La extensión total del área afectada por el deslizamiento es de 4000 m², con un volumen aproximado de 75000 m³.
- La zona de estudio presenta un relieve que abarca desde áreas ligeramente onduladas hasta zonas de fuertes ondulaciones. Esto se caracteriza por la presencia de pequeñas colinas y cerros, cuya formación es atribuida a la acción de una red fluvial que ha esculpido un valle en el entorno. Desde un punto de vista topográfico y en el contexto local, la superficie del deslizamiento de Huanu Huanuni exhibe una variación de pendientes que va desde 4° hasta 40°, extendiéndose en dirección sureste a noroeste. Este relieve topográfico es el resultado de la influencia ejercida por la quebrada del río Kollpajahuira y sus afluentes.
- Las unidades que se encuentran en el área de estudio corresponden a depósitos del Terciario – Neógeno, como la formación La Paz, así también depósitos Cuaternarios como la llanura aluvial, gravas Pampahasi, flujo de barro, deslizamiento reciente y material relleno.
- El deslizamiento de Huanu huanuni está compuesto por una mezcla de material arcillo-limoso con arenas y gravas de menor tamaño, estas condiciones nos determinan que el tipo de suelo no es beneficioso para realizar algún tipo de edificación en el área.

- En el marco de un enfoque multitemporal, el análisis fotogeológico del deslizamiento de Huanu huanuni se basó en un conjunto de fuentes temporales que abarcan desde 1976 hasta 2022. Las fotografías aéreas de esta serie de años revelan la presencia de un antiguo deslizamiento en las proximidades del río Kollpajahuira, así como el inicio de un proceso incipiente de urbanización en la zona. Con el tiempo, esta urbanización experimentó un crecimiento notable, manifestándose en la construcción de edificaciones de varios pisos. Sin embargo, es importante destacar que estas construcciones adolecían de un sistema de drenaje adecuado. Además, se han registrado movimientos de tierra que incluyeron cortes verticales y rellenos de cárcavas, factores que tuvieron un impacto significativo en la estabilidad del talud y que culminaron en un deslizamiento en el año 2010.
- La imagen satelital de 2011 muestra un nuevo deslizamiento que ocurrió en 2010, con dirección sureste a noroeste. La alcaldía respondió a este evento mediante la construcción de bermas o banquetas para estabilizar la zona. Sin embargo, en la imagen de 2022, se observa que el mismo deslizamiento está siendo urbanizado nuevamente, aparentemente sin la adopción de medidas preventivas adecuadas ni la implementación de normativas específicas por parte de la alcaldía.
- En la zona superior del deslizamiento de Huanu huanuni, adyacente a la región de Bologna, se presentan pequeñas fallas con un comportamiento mayormente normal, acompañadas de desplazamientos en sentido dextral y sinistral. Las direcciones predominantes de estas pequeñas fallas normales dextrales son principalmente hacia NNE – SSW hasta ENE – WSW, las fallas sinestrales tienen direcciones que varían desde E - W hasta NW – SE
- Desde una perspectiva geomorfológica, el área de estudio está influenciada por procesos exógenos que han tenido un papel fundamental en la configuración del terreno. Estos procesos incluyen tanto la acción fluvial como la intervención humana. Se han identificado diversas características que son resultado de estos procesos, tales como cárcavas en la zona noreste del deslizamiento, surcos de erosión dentro del propio deslizamiento, una llanura aluvial ubicada en la base del deslizamiento, escarpes generados por la

erosión, escarpes asociados a deslizamientos y el efecto de la escorrentía superficial.

- Vale la pena mencionar que los ríos han modelado el sector con un patrón de drenaje de tipo dendrítico. En cuanto a los procesos gravitacionales, es importante destacar que, aunque no constituyan una geoforma en sí mismos, el deslizamiento que caracteriza el área de estudio se clasifica como de tipo rotacional. Este tipo de deslizamiento implica movimientos en los que la masa de suelo y roca se desplaza sobre una superficie curva, característica que influye en la forma en que se desarrollan y evolucionan los deslizamientos en esta región específica.
- Desde una perspectiva hidrogeológica, se ha realizado un análisis tanto de los cursos de agua presentes en la actualidad como de aquellos que han existido en el pasado. Se ha identificado que el proceso erosivo desempeña un papel crucial en la desestabilización del material que compone el deslizamiento, contribuyendo a la generación del evento ocurrido en el año 2010. La zona de recarga hídrica es alimentada por las precipitaciones pluviales, así como por sistemas de drenaje de aguas servidas y pluviales antiguos que han sufrido deterioro y se encuentran expuestos. Este proceso se desencadena a través del escurrimiento superficial y la infiltración del agua hacia el subsuelo.
- Es relevante destacar que en el terreno existieron cursos de agua en el pasado que han desaparecido o fueron cubiertos por el deslizamiento, lo que ha dado origen a infiltraciones en el subsuelo. Estas infiltraciones pueden representar una amenaza para la estabilidad del deslizamiento. Aunque las aguas convergen en una zona de descarga que se conecta con el río Kollpajahuirá, es importante tener en cuenta que este río se encuentra embovedado en ciertas áreas.
- Los aspectos hidrogeológicos desempeñan un papel significativo en la dinámica del deslizamiento, ya que las aguas pluviales, los sistemas de drenaje antiguos y el proceso erosivo interactúan para afectar la estabilidad del material en el deslizamiento. Esta comprensión es esencial para abordar las posibles amenazas relacionadas con el agua y contribuir a un manejo adecuado de la zona afectada.

- ↗ Las edificaciones que no cumplen con las normativas establecidas pueden resultar en un aumento de la carga sobre el suelo, al igual que los movimientos de tierra u otras acciones de origen antrópico que podrían contribuir nuevamente a la inestabilidad del deslizamiento.
- ↗ Las 8 calicatas realizadas han contribuido a identificar los tipos de materiales presentes en el subsuelo. Según las observaciones realizadas en estas calicatas, los materiales finos predominan en el porcentaje granulométrico. Conforme al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS), los tipos de suelo identificados corresponden a GC - GP (Gravas pobremente gradadas con arcillas y arenas), GC - GM (Grava limo arcillosa con arenas), CL - ML (Arcilla limosa con arenas), SC (Arenas arcillosas con gravas) y GC (Gravas arcillosas con arenas). Los valores de corrección del número de golpes $N_{1(60)}$ oscilan entre 16.2 y 36.5, las capacidades de carga admisibles varían en un rango de 0.7 kg/cm² a 2.1 kg/cm², cuyos valores más bajos se encuentran al norte del deslizamiento, el cual nos indica que el suelo no es resistente para soportar cargas pesadas.
- ↗ Además, se llevaron a cabo ensayos de corte directo en el laboratorio utilizando muestras extraídas de los pozos P1, P4 y P6. Estos ensayos proporcionaron resultados en la cohesión (c) de 0.051 kg/cm², 0.14 kg/cm² y 0.19 kg/cm² y ángulo de fricción (ϕ) de 31.36°, 26.8° y 27.5°, esto indica que el material del área de estudio presenta una baja resistencia al corte. Es importante mencionar que no se han detectado niveles freáticos en el área.
- ↗ Se realizó un análisis de estabilidad del deslizamiento de Huanu huanuni a lo largo de un perfil de 277 metros, en dirección sureste a noroeste. Se evaluaron tres tramos: la parte superior del deslizamiento (escarpe) con un factor de seguridad de FS = 0.971, el cuerpo central con cargas nuevas que arrojó FS = 0.717, y el pie del deslizamiento con FS = 0.571. Este último tramo indicó un inminente desequilibrio en comparación con los otros dos. El análisis subraya la importancia de mejorar la estabilidad en la parte inferior para asegurar la estabilidad general del deslizamiento. Estos resultados son cruciales para tomar medidas preventivas y de gestión adecuadas en la zona.

- ↗ La existencia de canales de erosión y cárcavas, además de la pronunciada pendiente del deslizamiento y los escarpes, contribuyen a la inestabilidad del terreno. Esta inestabilidad se agrava debido al aumento de peso causado por nuevas construcciones. Los movimientos de tierra sin control también son un factor de origen antrópico que impacta negativamente en la estabilidad del talud en general.
- ↗ Las características del deslizamiento llevan a la conclusión de que el sector permanece en un estado de inestabilidad debido a las condiciones previamente mencionadas. Esto resulta en la posibilidad de nuevas deformaciones que podrían afectar a las viviendas ubicadas en la zona.

7.2. Recomendaciones

- ↗ Después del evento de movimiento en masa que tuvo lugar en 2010, la mayor parte del área ha experimentado perturbaciones que han resultado en deformaciones tanto superficiales como internas. Esta situación ha aumentado la vulnerabilidad del suelo a la erosión, debido a su composición litológica desde su origen. En consecuencia, se clasifica como un suelo débil con una alta susceptibilidad a deformaciones. En este sentido, se recomienda evitar el uso de este tipo de material como base para cimentaciones y se desaconseja cualquier forma de desarrollo urbano hasta que se hayan realizado las obras de estabilización necesarias.
- ↗ En este trabajo, también se han propuesto medidas de mitigación para contrarrestar los efectos del deslizamiento, con el objetivo de mejorar el factor de seguridad del deslizamiento. Entre estas medidas, se incluyen:
 - Modificación de la geometría del deslizamiento mediante la construcción de bermas. Además, se plantea la instalación de drenajes transversales en estas bermas para controlar las aguas subterráneas.
 - Implementación de una pantalla de pilotes al pie del deslizamiento, con el propósito de fortalecer su estabilidad.
 - Distribución de vegetación en toda el área del deslizamiento, mediante la plantación de árboles de eucalipto y pinos. Estos árboles

contribuyen al mejoramiento del terreno, ya que sus raíces absorben agua y aumentan la resistencia del suelo.

La adopción de estas medidas de mitigación tiene como objetivo principal aumentar la estabilidad del área afectada por el deslizamiento y reducir los riesgos asociados

- Si el proyecto constructivo contempla un uso forestal o recreativo, se sugiere considerar las siguientes medidas adicionales:
 - Impermeabilización de la base utilizando geomembranas para prevenir la infiltración de agua en el terreno.
 - Implementación de un sistema de drenaje interno para gestionar las aguas superficiales y subterráneas de manera eficiente.
 - Posible tratamiento del suelo mediante un cambio de material, con el propósito de mejorar sus propiedades y reforzar la estabilidad del área.

Estas recomendaciones adicionales contribuirán a garantizar la seguridad y durabilidad del proyecto, especialmente en contextos de uso forestal o recreativo, donde la interacción con el terreno es mayor.

- Es crucial enfocarse en una gestión adecuada de las aguas superficiales y asegurar la correcta interconexión del sistema de drenaje. Esto es esencial para prevenir fugas que puedan causar futuros asentamientos debido a la saturación del suelo. Un control efectivo de las aguas contribuirá en gran medida a la estabilidad y durabilidad del proyecto en el tiempo.
- Es fundamental llevar a cabo de manera periódica labores de mantenimiento en las estructuras que se construyan, incluyendo acciones como la gestión del flujo de agua superficial en las zonas circundantes, la limpieza de cunetas, canales y sumideros. Además, es necesario mejorar las condiciones de la infraestructura pública, lo que implica la impermeabilización de las vías. Estas acciones asegurarán la funcionalidad y la integridad de las obras, así como la prevención de problemas futuros.

- ↗ Durante la ejecución de construcciones o proyectos civiles, es esencial llevar a cabo las excavaciones o movimientos de tierra con extrema precaución. Esto implica aplicar métodos adecuados para la excavación de taludes y cumplir con las medidas de seguridad correspondientes a cada tipo de obra. Es fundamental garantizar la seguridad de los trabajadores y la integridad de las estructuras, siguiendo procedimientos de excavación precisos y normativas de seguridad específicas para cada proyecto.
- ↗ La implementación de herramientas modernas como Geoslope 2018 es de gran importancia, ya que facilita el análisis de taludes al considerar distintas características intrínsecas. Esto incluye aspectos como geometría, tipo de material, ángulo de fricción interna, cohesión, condiciones hidráulicas y las fuerzas que actúan (cargas). Mediante esta herramienta, se pueden realizar cálculos basados en diversas metodologías de equilibrio límite, lo que permite identificar el factor de seguridad más crítico con mayor precisión. La utilización de tecnología avanzada en este proceso asegura resultados más confiables y eficientes en la evaluación de la estabilidad de los taludes.
- ↗ Se sugiere complementar estos análisis con estudios geofísicos para verificar las unidades litológicas en el subsuelo. Esto proporcionará una base más sólida para el análisis y permitirá una evaluación más precisa en relación a las medidas de mitigación necesarias. La información obtenida de los estudios geofísicos en conjunto con otros datos recopilados enriquecerá el entendimiento de la composición del terreno y ayudará a tomar decisiones más fundamentadas en cuanto a las estrategias de mitigación a implementar.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahlfeld. (1945). Geología descriptiva. En *Geología del Valle de La Paz* (págs. 20-24). La Paz: Pensas de "Servicio Multilith".
- Alcántara, I. (abril de 2000). Landslide: ¿deslizamiento o movimiento del terreno? definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geograficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*(41), 11. Recuperado el 2 de Abril de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112000000100002
- Álvaro J., G. G. (1999). Estimativos de parametros efectivos de resistencia con el SPT. *X Jornadas Geotecnicas de la Ingenieria Colombiana-SCI-SCG*, 1-12.
- Ames, H. (01 de Febrero de 2018). *Geniolandia*. Obtenido de <https://www.geniolandia.com/13171304/que-son-los-llanuras-aluviales>
- Berkeley. (2010). *La naturaleza de Berkeley*. Recuperado el 8 de Junio de 2022, de <https://berkeleynature.wordpress.com/2010/01/25/berkeley-hills-landslide/mudslide-diagram/>
- Bermejo, V. (2013). En "*Laboratorio de Mecanica de suelos I*" UMSA (págs. 11 - 29). La Paz: Facultad de Ingenieria, Ingenieria Civil.
- Bles et al. (1978). *Mapa de Riesgo de los Distritos Urbanos del Municipio de La Paz*. La Paz.
- Bles, J. L., & B.R.G.M. (1977). *Neotectónica y Sismicidad de la región de La Paz*. La Paz: B.R.G.M. - B.C.E.O.M.
- Castilla, G., & Elez, J. (2020). *Geología desde Ávila*. Recuperado el 3 de 11 de 2022, de <https://geolodiaavila.com/2020/03/21/el-abanico-aluvial-de-candeleda-la-huella-de-una-montana-vaciada/>
- CEDIB;. (17 de 11 de 2013). *Centro de Documentacion e informacion Bolivia*. Obtenido de https://cedib.org/post_type_titulares/afectados-reconstruyen-casas-en-area-deslizada-de-huanu-huanuni-la-razon-17-11-2013/

- Climate-Data.org. (2022). *Climate-Data.org*. Recuperado el 09 de Junio de 2022, de <https://es.climate-data.org/america-del-sur/bolivia/la-paz/la-paz-764108/>
- Croizer. (1999). Tipos de Movimiento en Masa - Clasificaciones. En P. M. Andinas, *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas* (pág. 1). Canada: Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicacion Geologica Multinacional. No. 4.
- Cruden. (1991). Tipos de Movimiento en Masa - Clasificaciones. En P. M. Andinas, *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas* (pág. 1). Canada: Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicaion Geologica Multinacional. No. 4.
- Diez Canseco, E. (25 de July de 2016). *Muchik Corp Sac*. Recuperado el 13 de Abril de 2020, de <http://muchik.com/que-es-la-hidrogeologia/>
- Dobrovoly, E. (1962). Geología descriptiva. En *Geología del Valle de La Paz* (págs. 20-24). La Paz: Prensas de "Servicio Multilith".
- Espinoza, C. (2004). Existencia y Origen de las Aguas Subterráneas. *CI51J Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento*, 1.
- Franch, J., & Torrijo, J. (6 de Enero de 2013). *Estudios Geotécnicos*. Obtenido de <https://estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-5-plasticidad-limites-de-atterberg-y-consistencia/>
- García, A., Rosique, M. F., & Segado, F. E. (1994). *Concepto de Topografía* (IV ed.). Murcia: Servicio de publicaciones, Universidad de Murcia.
- Glade, & Croizer. (2005). Tipos de Movimiento en Masa - Clasificaciones. En P. M. Andinas, *Movimientos en Masa en la Region Andina: Una guia para la evaluacion de amenazas* (pág. 1). Canada: Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicacion Geologica Multinacional, No. 4.
- Gonzales de Vallejos, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Carlos, O. (2002). Hidrogeología. En L. Gonzales de Vallejos, M. Ferrer, L. Ortuño, & C. Oteo, *Ingeniería Geológica* (págs. 264-302). Madrid: Pearson Educacion.

- Google Earth Pro, & SIT v2. (2011).
- Guzmán Porrez, M. A. (10 de 2016). Levantamiento topográfico Huanu huanuni. La Paz, La Paz, Bolivia.
- Henríquez, C., Azócar, G., & Aguayo, M. (2006). *SciELO*. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022006000200004
- Hungr, e. (2001). Tipos de Movimiento en Masa - Clasificaciones. En P. M. Andinas, *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas* (pág. 23). Canada: Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicacion Geologica Multinacional, No, 4.
- Ibañez, J. J. (15 de Marzo de 2007). *madri+d blogs*. Obtenido de <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/03/15/61348>
- Lavenu, A. (1977). Neotectonica de los sedimentos Plio-Cuaternarios de la cuenca de La Paz-(Bolivia). *Revista de Geología - UMSA Vol. 1*, 31-38.
- Pañuela Arèvalo, L. A., & Carrillo Rivera, J. J. (23 de Julio de 2012). *Scielo*. Recuperado el 5 de 10 de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112013000200003
- Raffino, M. E. (12 de febrero de 2020). *Concepto.de*. Recuperado el 10 de marzo de 2020, de <https://concepto.de/erosion-del-suelo/>
- RAING. (s.f.). *Real Academia de Ingeniería*. Obtenido de Diccionario Español de Ingeniería: <http://diccionario.raing.es>
- Salamanca, L. A. (2011). La Paz. *La Paz: Amenazas, vulnerabilidades y Riesgo*, 5.
- Salamanca-Gonzàles, K. D., Valencia-Ariza, K. L., & Fuentes-Rojas, E. À. (2019). Desarrollo del sistema de gestion de riesgo de desastres del municipio de Càqueza, Cundinamarca, basado en una metodologia de anàlisis integral de riesgos. *Scielo*, 16(1).

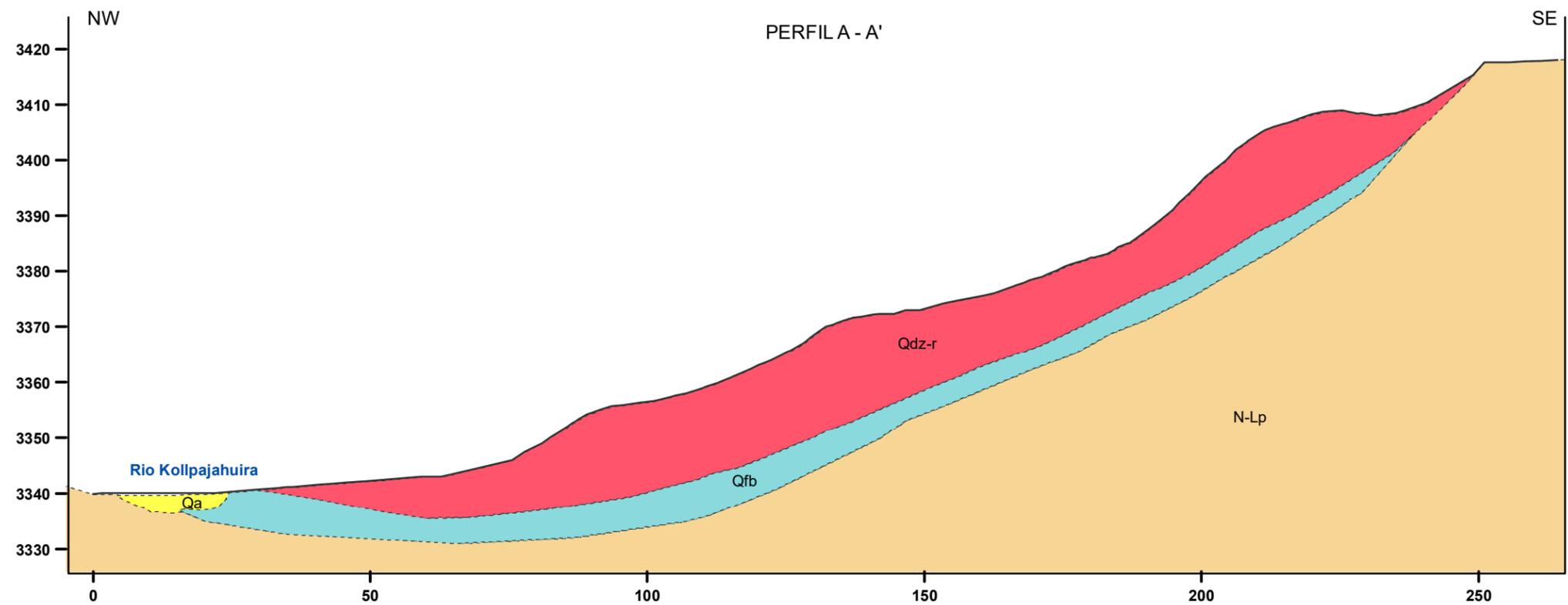
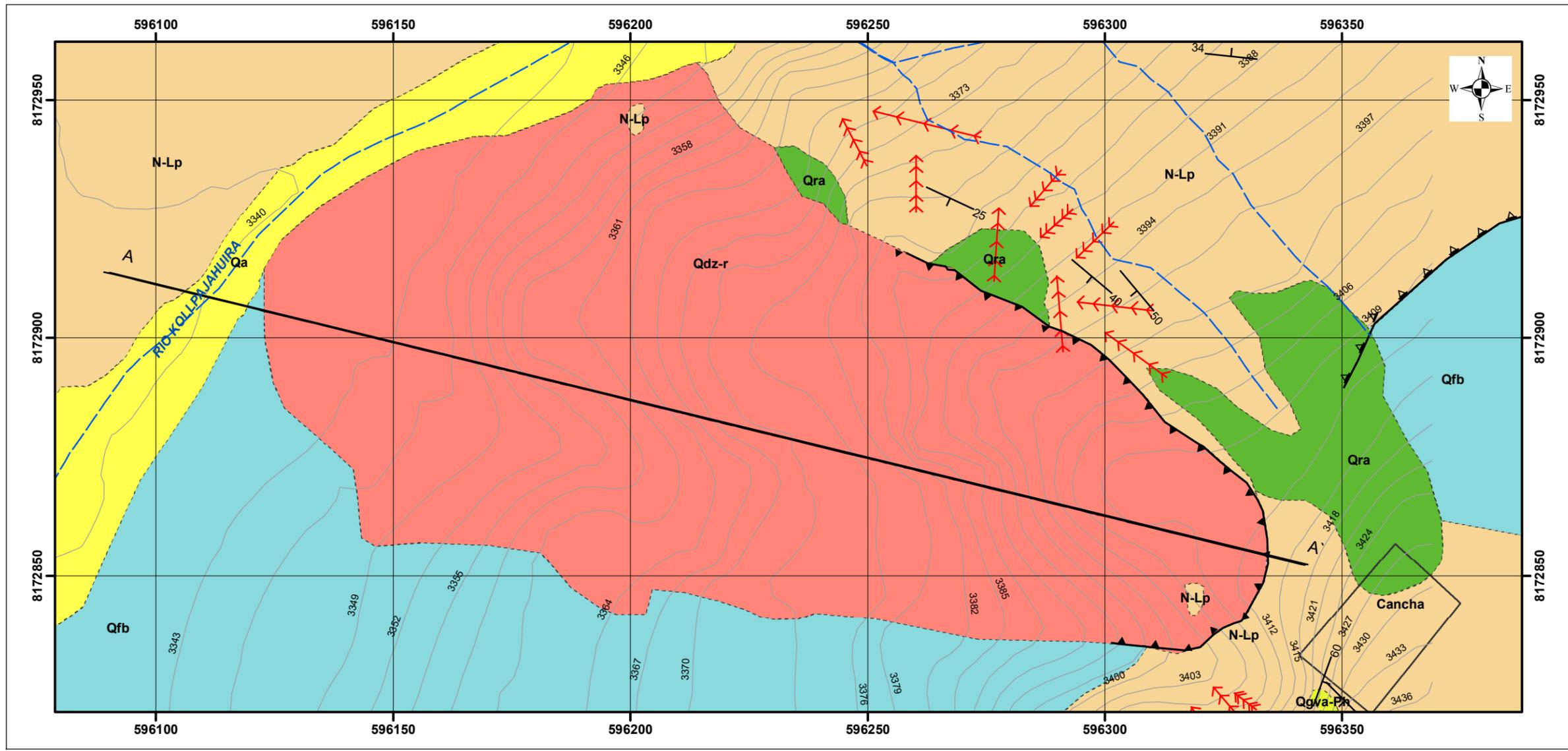
- Sharpe. (1960). Reptacion y Solifluxion. En W. D. Thornbury, *Principios de Geomorfología* (pág. 89). Buenos Aires: KAPELUSZ.
- Suárez, J. (1998). Caracterizacion de los Movimientos. En I. d. Ltda (Ed.), *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (págs. 16-17). Bucaramanga-Colombia: Publicaciones UIS.
- Suárez, J. (2010). En *Ensayos in situ* (págs. 15 -17). Colombia.
- Suárez, J. (2017). Obtenido de Métodos de Manejo y Estabilización. En *Métodos de Manejo y Estabilización*.
- Suárez, R., & Díaz, E. (1996). Lexico Estratigrafico de Bolivia. *Revista Tecnica de Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivianos*, 87-88.
- Thornbury, W. D. (1960). La meteorizacion, los procesos del suelo y la remocion en masa. En *Principios de Geomorfología* (pág. 89). Buenos Aires: KAPELUSZ.
- Thornbury, W. D. (1966). *Principios de Geomorfología*. Buenos Aires: KAPELUSZ.
- Troll, & Finsterwalder. (1935). Geologia descriptiva. En *Geologia del Valle de La Paz* (págs. 20-24). La Paz: Prensas de "Servicio Multilith".
- Vargas Còrdova, E. (1992). Elementos de Percepciòn Remota. En U. M. Andres (Ed.), *La Fotografia Aerea y su Aplicacion a EStudios Geologicos y Geomorfologicos* (págs. 1-38). La Paz: Imprenta del Comite Ejecutivo de la Universidad Boliviana.
- Wiki, (2023). *Wikipedia*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Permeabilidad#/media/Archivo:Permeable_and_impervious_membranes.png

ANEXOS

Anexo 1: Mapa Geológico

Anexo 2: Mapa Geomorfológico

ANEXOS



Escala 1:1.000

0 10 20 40 60 80 m

Proyeccion: WGS 84 UTM
Zona: 19 Sur
Fuente: Elaboracion propia

	"CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL DESLIZAMIENTO DE HUANU HUANUNI"		
	POSTULANTE: NÁTALY ANDREA ZABALA LICIDRO TUTOR: ING. MARCO ANTONIO GUZMAN PORREZ	ANEXO 01	
LA PAZ - BOLÍVIA 2023			

MAPA GEOMORFOLÓGICO

LEYENDA

GEOFORMAS DE REMOCIÓN EN MASA

- Deslizamiento Rotacional
- Dirección de Deslizamiento

GEOFORMAS DE FLUJO

- Flujo de barro

GEOFORMAS FLUVIALES

- Llanura Aluvial
- Cárcavas

GEOFORMAS DE EROSIÓN HÍDRICA

- Surcos de erosión

GEOFORMAS ANTRÓPICAS

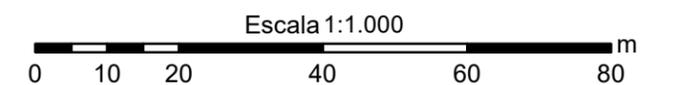
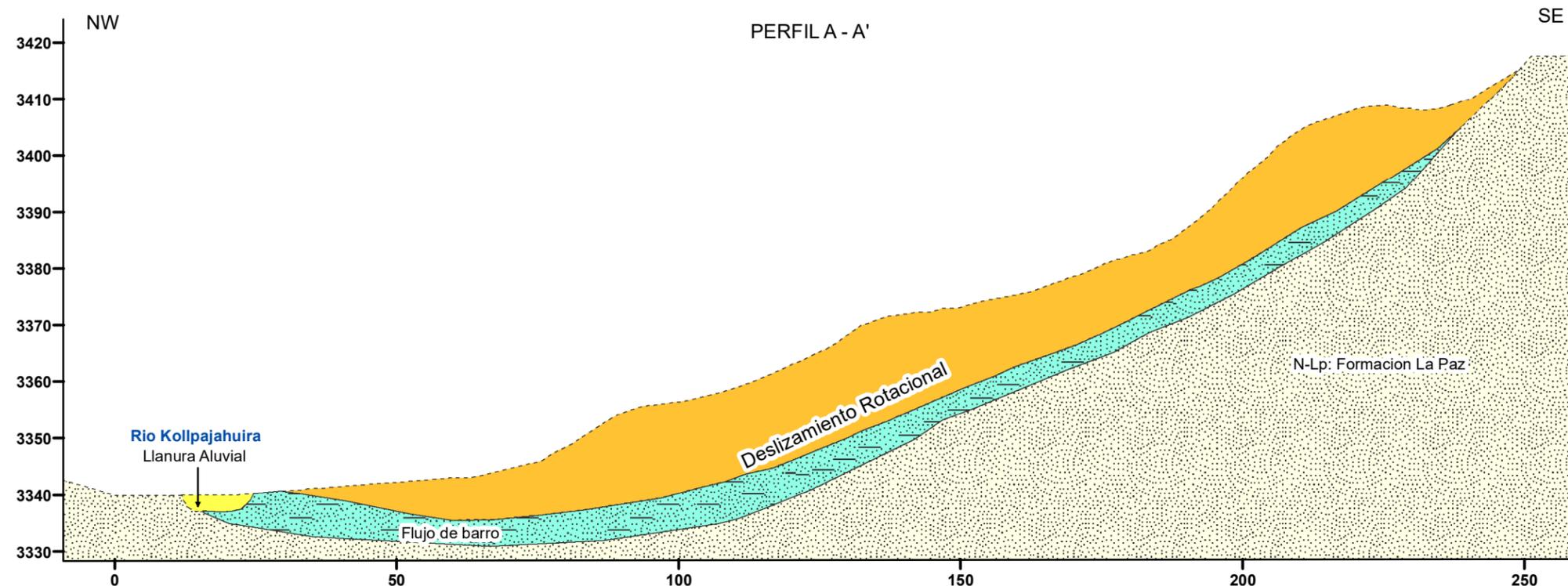
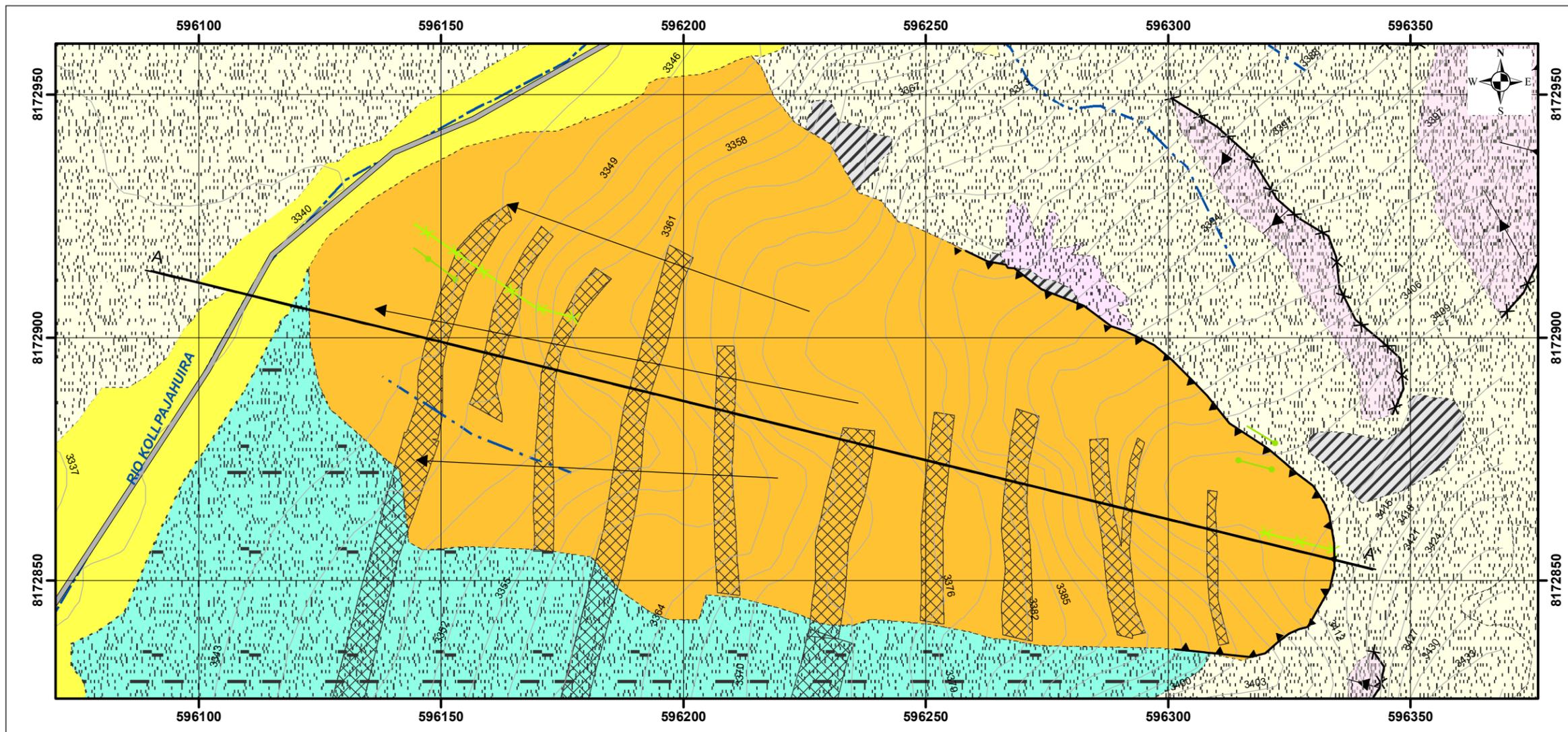
- Escombros de talud
- Aterrazamiento
- Relleno
- Escarpe deslizamiento
- Cresta de erosión
- Río Canalizado
- Barranco

GEOLOGIA

- N-Lp: Formación La Paz

SÍMBOLOS TOPOGRÁFICOS

- Ríos
- Curvas de nivel
- Perfil



Proyeccion: WGS 84 UTM
Zona: 19 Sur
Fuente: Elaboracion propia

	"CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL DESLIZAMIENTO DE HUANU HUANUNI"		
	POSTULANTE: NÁTALY ANDREA ZABALA LICIDRO	ANEXO 02	
TUTOR: ING. MARCO ANTONIO GUZMÁN PORREZ		LA PAZ - BOLIVIA 2023	