



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO

## ESCUELA DE POSGRADO

### DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE



#### TESIS

#### CARACTERIZACIÓN DE LA GEOHIDROLOGÍA EN EL MOVIMIENTO EN MASA DE SUELOS EN LA URBANIZACIÓN BELLAVISTA – ABANCAY

PRESENTADA POR:

FRANKLIN AGUIRRE HUILLCAS

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

PUNO, PERÚ

AÑO 2022



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO  
AMBIENTE**

**TESIS**

**CARACTERIZACIÓN DE LA GEOHIDROLOGÍA EN EL MOVIMIENTO EN  
MASA DE SUELOS EN LA URBANIZACIÓN BELLAVISTA – ABANCAY**



**PRESENTADA POR:**

**FRANKLIN AGUIRRE HUILLCAS**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

APROBADO POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE

  
.....  
Pr.D. BERNARDO ROQUE JUANCA

PRIMER MIEMBRO

  
.....  
Dr. FÉLIX ROJAS CHAHUARES

SEGUNDO MIEMBRO

  
.....  
D.Sc. FRANZ XIRENA VILCA

ASESOR DE TESIS

  
.....  
Dra. SOFÍA LOURDES BENAVENTE FERNANDEZ

Puno, 04 de febrero del 2022

**ÁREA:** Ciencias de la Ingeniería.

**TEMA:** Caracterización de la Geohidrología en el Movimiento en Masa de Suelos en la Urbanización Bellavista – Abancay.

**LÍNEA:** Recursos Naturales y Medio Ambiente.



## DEDICATORIA

A mi padre Vicente que en paz descanse  
y a mi madre Irene, quienes fueron los  
artífices para mi formación profesional  
y su apoyo incondicional que he  
recibido para el desarrollo y la  
consolidación del presente trabajo.

A mi esposa, compañera de la vida Clara por su  
apoyo incondicional y a mis hijos Yesika,  
Franklin, Arnold, Smith y Rubí por ser fuente  
de motivación e inspiración de superación.

A mis hermanos José, Belarmino, Raúl  
y Dina, por haberme brindado su apoyo  
en todo momento.



## AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional de Altiplano (UNA) a la Escuela de Posgrado, a la plana docente del programa del Doctorado en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, por haber impartido sus conocimientos y brindar una formación óptima.
- Al Dr. Bernardo Roque Huanca por sus consejos, orientación y haberme dado la oportunidad de continuar con mis estudios de Posgrado.
- Al honorable Jurado Evaluador presidido por el Ph.D. Bernardo Roque Huanca, primer miembro Dr. Félix Rojas Chahuares, segundo miembro D.Sc. Franz Zirena Vilca.
- A la asesora Dra. Sofía Benavente Fernández, por el apoyo desinteresado en el desarrollo del presente trabajo de investigación.
- Al personal administrativo, que sin su ayuda no hubiese sido posible lograr este propósito.



## INDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
INDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico	3
1.1.1 Origen del movimiento de masas de suelos	3
1.1.2 Tipos de movimiento de masas	4
1.1.2.1 Caída	4
1.1.2.2 Derrumbe	4
1.1.2.3 Deslizamiento	4
1.1.2.4 Flujo	4
1.1.2.5 Propagación	4
1.1.2.6 Arrastre	5
1.1.3 Factores de inestabilidad de movimiento de masas	5



1.1.3.1 Factores condicionantes	5
1.1.3.2 Factores desencadenantes	5
1.1.4 Geomorfología	6
1.1.5 Hidrogeología	6
1.1.6 Geohidrología	6
1.1.7 Precipitación pluvial	7
1.1.8 Infiltración	8
1.1.9 Suelos	9
1.1.9.1 Tipos de suelos	9
1.1.10 Infiltración de la precipitación pluvial en el suelo	11
1.1.11 Infiltración de aguas pluviales en la roca	11
1.1.12 Geología	11
1.1.13 Escorrentía	11
1.2 Antecedentes	12

## **CAPÍTULO II**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

2.1 Identificación del problema	24
2.2 Enunciados del problema	28
2.2.1 Problema general	28
2.2.2 Problemas específicos	28
2.3 Justificación	29
2.4 Objetivos	29
2.4.1 Objetivo general	29



2.4.2	Objetivos específicos	30
2.5	Hipótesis	30
2.5.1	Hipótesis general	30
2.5.2	Hipótesis específicas	30

### **CAPÍTULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1	Lugar de estudio	31
3.2	Población	33
3.3	Muestra	33
3.4	Método de investigación	34
3.4.1	Geología regional	36
3.4.1.1	Depósitos cuaternarios	36
3.4.2	Geología local	37
3.4.3	Áreas cubiertas por suelos	39
3.4.4	Rocas	41
3.4.5	Precipitación anual en la provincia de Abancay	41
3.5	Descripción detallada de los métodos por objetivos específicos	41
3.5.1	Descripción del procedimiento de los softwares utilizados	43
3.5.1.1	ArcMap 10.5	43
3.5.1.2	AutoCAD Civil 3D 2016	43
3.5.1.3	CRUTEM4 Google Earth	43
3.5.1.4	Global Mapper 19	43
3.5.1.5	Google Earth Pro	44



3.5.1.6	Microsoft Office (Excel)	44
3.5.1.7	Rocscience (Slides v6.00)	44
3.5.1.8	JAMOVI	44
3.5.1.9	IMB SPSS	44
3.5.2.	Materiales y laboratorio	45
3.5.2.1	Equipos utilizados	45
3.5.2.2	Softwares utilizados	45
3.5.2.3	Laboratorio	45

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Influencia de la infiltración de las precipitaciones pluviales en las rocas, en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay	46
4.2	Influencia de la infiltración de las precipitaciones pluviales en el suelo, en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay	47
4.2.1	Cambio de ángulo de pendiente	48
4.2.2	Proceso de remoción en masa en la urbanización Bellavista	49
4.2.2.1	Deslizamiento traslacional	49
4.2.2.2	Movimiento de reptación	50
4.2.3	Volumen de masa de suelos potencialmente inestable	57
4.2.4	Análisis de factor de seguridad	59
4.2.4.1	Rotura no circular. Método simplificado de Janbu	60
4.2.4.2	Factor de seguridad por el método de Janbu simplificado	62
4.2.5	Amenaza por deslizamiento	64



4.3 Discusión	73
4.4 Aporte metodológico	77
CONCLUSIONES	79
RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	81



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Eventos más desastrosos ocurridos en la ciudad de Abancay y cuenca río Mariño	27
2. Estadística de pendiente	48
3. Descripción de las calicatas	55
4. Perfil estratigráfico calicata 1	55
5. Perfil estratigráfico calicata 2	56
6. Perfil estratigráfico calicata 3	56
7. Propiedades determinadas de las muestras de suelos	57
8. Carga distribuida por áreas	59
9. Clasificación de los factores de susceptibilidad y detonantes	65
10. Tabla de escorrentía método racional	70
11. Determinación de coeficiente de escorrentía, para la zona de estudio	71
12. Regresión logística multinomial – Medidas de ajuste del modelo	72
13. Prueba Omnibus de razón de verosimilitud	72
14. Coeficiente del modelo - Evento	73



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Tipos de suelos en la urbanización Bellavista	10
2. Escenario de riesgo por movimiento en masa, región Apurímac	21
3. Ubicación y localización de la urbanización Bellavista	32
4. Urbanización Bellavista	33
5. Levantamiento topográfico de la urbanización Bellavista	35
6. Geología regional del valle de Abancay	37
7. Geología local de la urbanización Bellavista	38
8. Suelo limo y arcilla	39
9. Suelo grava y bolonería	39
10. Área cubierta por suelo y vegetación	40
11. Cambio de ángulo de pendiente en porcentaje (%)	49
12. Proceso de remoción en masa en la urbanización Bellavista	51
13. Fisuras generadas por reptación de suelo en la urbanización Bellavista	52
14. Presencia de aguas subterráneas (Nivel freático)	52
15. Perfil geográfico de la urbanización Bellavista	53
16. Ubicación de calicatas	54
17. Geometría de una rebanada y fuerzas actuantes	61
18. Factor de corrección $f_o$ para el método de Janbu ( $F=f_o.F_r$ )	62
19. Configuración de las propiedades de suelos y los ángulos	62
20. Factor de seguridad sin considerar la carga distribuida causada por la infiltración de las aguas pluviales.	63



- |  |    |
|--|----|
| <b>21.</b> Factor de seguridad considerando la carga distribuida por la infiltración de las aguas pluviales. | 64 |
| <b>22.</b> Amenaza de deslizamiento en la urbanización Bellavista  | 67 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Precipitación pluvial mensual en mm, periodo 1970 - 2019	93
2. Proceso de cálculo del peso de la infiltración de la precipitación pluvial	95
3. Base de datos para el proceso estadístico	97
4. Resultado del proceso estadístico en software jamovi	99
5. Base de datos para el procesamiento de amenaza por deslizamiento	100
6. Foto 1. Corte de talud de carretera de evitamiento, muestra el tipo de suelo limo arcilloso (zona norte de Bellavista)	82
7. Foto 2. Corte artificial, talud de carretera que muestra el estrato del suelo	82
8. Foto 3. Suelo cubierto por vegetación en la parte superior del talud de carretera	82
9. Foto 4. Fisuras en la carpeta asfáltica de la carretera Panamericana (Urb. Bellavista)	82
10. Foto 5. Hundimiento de la plataforma de la carretera Panamericana (Urb. Bellavista)	82
11. Foto 6. Construcción de viviendas sobre suelos por encima del nivel freático	82
12. Foto 7. Presencia de aguas subterráneas en pie de talud superior de la carretera Panamericana (Urb. Bellavista).	82
13. Foto 8. Fisuras en muro de contención, talud inferior de la carretera Panamericana (Urb. Bellavista).	82
14. Foto 9. Laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA).	82
15. Foto 10. Preparación de muestras para el análisis en laboratorio - UNAMBA	82
16. Foto 11. Secado de muestra en el horno	82
17. Foto 12. Preparación de muestra para el pesaje	82

## RESUMEN

En la urbanización Bellavista y zonas aledañas en épocas de precipitaciones pluviales, las aguas de lluvia se infiltran e influyen en los deslizamientos de masas de suelos, las cuales se evidencian en las infraestructuras de viviendas y la plataforma de la vía principal de acceso a la ciudad de Abancay. El objetivo de esta investigación fue determinar las características geohidrológicas que influyen en el movimiento de masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay. Las variables independientes fueron: infiltración de las precipitaciones pluviales en las rocas y en el suelo. La variable dependiente: movimiento en masa de suelos. La información se recogió en su ambiente natural, se ubicaron tres puntos donde se excavaron calicatas, se tomaron muestras de suelos y se determinaron las propiedades de cohesión: suelo limo y arcilla  $110,325 \text{ kN/m}^2$ , grava y bolonería  $153,964 \text{ kN/m}^2$ ; ángulo de fricción: limo y arcilla  $35,75^\circ$ , grava y bolonería  $21,50^\circ$ ; densidad: limo y arcilla  $16,819 \text{ kN/m}^3$ , grava y bolonería  $18,829 \text{ kN/m}^3$ . Para determinar la influencia de las características geohidrológicas en el movimiento en masa, los datos se procesaron usando el software Slide v 6.0 y ArcMap v 10.5. Los resultados demostraron que el factor de seguridad (0,976) es menor que uno, lo que indica que las características geohidrológicas influyen en el movimiento en masa de suelos. Los daños ocasionados a las infraestructuras de viviendas y viales demuestran el movimiento en masa de suelos. Se concluye que existe influencia de las características geohidrológicas en el movimiento en masa de suelos.

**Palabras clave:** Infiltración, geohidrología, movimiento, precipitaciones, suelos.



## ABSTRACT

In the urbanization Bellavista and surrounding areas in times of rainfall, rainwater infiltrates and influence landslides of soil masses, the which are evident in the infrastructures of houses and the platform of the main access road to the city of Abancay. The objective of this research was to determine the geohydrological characteristics that influence the movement of soil mass in urbanization Bellavista-Abancay. The Independent variables were: infiltration of rainwater in the rocks and on the ground. The dependent variable: movement in soil mass. The information was collected in natural environment, three points were located where pits were dug, soil samples were taken and determined the cohesion properties: soil and clay  $110,325 \text{ kN/m}^2$ , gravel, large rocks and boulders  $153,964 \text{ kN/m}^2$ , friction angle: silt and clay  $35,75^\circ$ , gravel, large rocks and boulders  $21,50^\circ$ ; density: silt and clay  $16,819 \text{ kN/m}^3$ , gravel, large rocks and boulders  $18,829 \text{ kN/m}^3$ . To determine the influence of the geohydrological characteristics in the movement in mass, the data was processed using the software Slide v 6.0 y ArcMap v 10.5. The results showed that the security factor (0,976) is less than one which indicates that geohydrological characteristics influence the mass movement of soils. The damage caused to housing and road infrastructures demonstrate the mass movement of soils. It is concluded that there is influence of geohydrological characteristics on the mass movement of soils.

**Keywords:** Infiltration, geohydrology, movement, rainfall, soils.

## INTRODUCCIÓN

En diversas partes del mundo los desastres asociados al movimiento en masa generan impactos negativos en el ámbito socioeconómico y ambiental. Además de las pérdidas de vidas, y el daño a la cubierta vegetal, las afectaciones a las viviendas y la infraestructura son frecuentes (Galindo y Alcántara, 2015). Las causas principales para la ocurrencia de movimiento en masa, son las intensas precipitaciones pluviales de la temporada (García *et al.*, 2018). Los fragmentos de roca en la superficie del suelo pueden disminuir y aumentar la infiltración. Se ha demostrado que el tamaño de las rocas en la superficie está directamente relacionado con la infiltración, es decir, las rocas más pequeñas disminuyen y las rocas más grandes en la superficie aumentan la infiltración (Brakensiek & Rawls, 1994). Su particular comportamiento físico-mecánico a favor de una matriz compuesta por arcillas expansivas (montmorillonita, illita) durante precipitaciones intensas y una coetánea saturación, se expresa mediante un incremento de volumen y consiguiente desintegración de sus componentes rocosos y movilización bajo las condiciones de un flujo denso (González y Folguera, 2009). Sin embargo, en la determinación de algunos factores como los litológicos, las susceptibilidades a la humedad y los desencadenantes de la intensidad de las lluvias, es importante incluir opiniones y juicios experimentados, así como y tener en cuenta la influencia de elementos locales y regionales (Mora & Vahrson, 1994).

La infiltración del agua en el suelo está más influenciada por la cubierta vegetal, según el tipo de uso de la tierra, que por el sistema de labranza del suelo. El laboreo del suelo provoca mayores cambios en la infiltración del agua que el efecto de la cubierta vegetal. Además, la infiltración de agua tiende a ser menor en las áreas bajo suelo desnudo que en aquellas bajo sistemas de conservación del suelo (Sampaio de Almeida *et al.*, 2018). El uso de la tierra afecta significativamente a la variación espacial de las características de infiltración y a sus relaciones con los factores ambientales (Zhipeng *et al.*, 2018). En la infiltración no saturada, tanto el aumento de la capacidad de infiltración del suelo causada por el agrietamiento y el aumento gradual de las precipitaciones harán que la pendiente evolucione hacia un estado inestable. Cuanto más extenso sea el desarrollo de las grietas en el suelo, mayor será la capacidad de infiltración del suelo. Con el aumento de la duración de las precipitaciones, el efecto de los estados de agrietamiento del suelo en la estabilidad de los taludes durante la infiltración será gradualmente cubierto por el efecto de la lluvia en todas las profundidades (Zhang *et al.*, 2020). El contenido de limo, arena,

materia orgánica del suelo, la densidad de la hojarasca vegetal y la densidad de la masa radicular son los principales factores que influyen en las propiedades de infiltración del suelo (Zhu *et al.*, 2020).

Las infiltraciones generadas en épocas de precipitaciones pluviales, en la urbanización Bellavista, zona de expansión urbana de la ciudad de Abancay, se ha visto afectado por el movimiento en masas de suelos, evento que se manifiesta en la urbanización y en la vía principal de acceso a la ciudad de Abancay (talud superior, y la plataforma de la carretera panamericana).

Frente a esta problemática se planteó la realización de la investigación titulada “Caracterización de la Geohidrología en el Movimiento en Masa de Suelos en la Urbanización Bellavista – Abancay”. A través de esta investigación y los resultados se logró determinar que la infiltración de las aguas pluviales influye en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista.

Acorde a la investigación lógica y científica, el trabajo se ha estructurado en cuatro capítulos:

Capítulo I: Revisión de literatura: Marco teórico y antecedentes de la investigación.

Capítulo II: Planteamiento del problema: Definición del problema, enunciados del problema, justificación, objetivos de la investigación e hipótesis.

Capítulo III: Materiales y Métodos: Ámbito de estudio, población y muestra, materiales, descripción de métodos por objetivos.

Capítulo IV: Resultados y Discusión. Se ilustra los resultados a través de tablas y figuras con las interpretaciones y análisis.

En el criterio sintético se consignan las conclusiones y las recomendaciones pertinentes.

Finalmente, se nominan la bibliografía y se insertan los anexos correspondientes.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1 Marco teórico

##### 1.1.1 Origen del movimiento de masas de suelos

Los movimientos en masa pueden tener diversas causas, los terremotos, la degradación del permafrost (capa de suelo permanentemente congelado), los incendios forestales y las lluvias torrenciales son factores comunes que contribuyen a los desprendimientos naturales (Geertsema & Chiarle, 2013). El agua desempeña un papel importante en el desarrollo de diferentes procesos de movimiento de masas en relación con la influencia a largo plazo en el material subterráneo y al mecanismo de activación a corto plazo por la precipitación y la infiltración. La acción del agua en el sistema de poros o juntas de los suelos y las rocas influye en la interacción de las partículas (Dikau, 2013). Los cambios en el ángulo de pendiente pueden ser un factor desencadenante del movimiento de masas (Claessens *et al.*, 2013).

En términos generales los movimientos en masa son las resultantes de diversos factores geomorfológicos, geológicos e hidrológicos, y que predisponen a las laderas hacia la inestabilidad. Son el producto de la reducción progresiva de la resistencia de los geomateriales de las vertientes por las intervenciones antrópicas o por procesos naturales, como la infiltración de la precipitación pluvial que juega un papel importante en el movimiento en masa. La plasticidad de los suelos es causada por la absorción de agua en las superficies de las partículas, lo que da como resultado características de plasticidad y procesos de hinchamiento y contracción específicos. Tanto la erosión del suelo como el movimiento de masas son dos formas de degradación de la tierra.

## **1.1.2 Tipos de movimiento de masas**

Según Guthrie (2013) se describen varios tipos de movimiento de masas: caída, derrumbe, deslizamiento, flujo, propagación y arrastre.

### **1.1.2.1 Caída**

La caída implica el desprendimiento del suelo o de la roca de una pendiente o acantilado. Esto describe un proceso en el que no hay desplazamiento por cizallamiento a lo largo de la superficie de falla y en el que el material es transportado por el aire mediante la caída rodando o rebotando.

### **1.1.2.2 Derrumbe**

Es la rotación hacia delante de la roca o del suelo alrededor de un eje o punto que se encuentra por debajo del centro de gravedad de la masa desplazada (normalmente en la base del talud o cerca de ella).

### **1.1.2.3 Deslizamiento**

El deslizamiento es el movimiento descendente de una masa de roca o suelo a lo largo de una superficie de ruptura (la zona relativamente delgada de tensión). Los deslizamientos se caracterizan por una superficie de cizallamiento bien definida y una masa desplazada relativamente coherente. El deslizamiento se suele dividir en: deslizamientos traslacionales y deslizamientos rotacionales.

### **1.1.2.4 Flujo**

Los flujos se caracterizan por el movimiento turbulento espacialmente continuo de roca o suelo disgregado sobre un lecho rígido. Los flujos se comportan típicamente como un líquido viscoso, con superficies de cizallamiento poco espaciadas (cizallamiento distribuido).

### **1.1.2.5 Propagación**

El extendido es la dilatación o extensión espacial de una masa de roca o suelo cohesivo, junto con un hundimiento en el material subyacente. Los desprendimientos pueden extenderse muchos kilómetros y a menudo se producen en un terreno que, por lo demás, parece benigno.

### 1.1.2.6 Arrastre

Es la deformación lenta, plástica y descendente de la roca o el suelo sin superficies de cizallamiento definidas. La fluencia afecta a las masas de roca y suelo a escalas muy grandes y pequeñas.

### 1.1.3 Factores de inestabilidad de movimiento de masas

Según el Instituto Nacional de Defensa Civil INDECI (2011) la inestabilidad de un movimiento en masas en ladera, es el resultado de la interacción de factores condicionantes y factores externos o desencadenantes:

#### 1.1.3.1 Factores condicionantes

Factores propios del fenómeno o intrínsecos, de acción estática o pasiva, que representa debilidades inherentes en rocas y suelos en laderas:

- a) **Geológicos:** litológicos, estratigrafía y comportamiento geodinámico.
- b) **Geomorfológicos:** Geometría de taludes, topografía, pendientes y cercanía a fallas o fisuras progresivas.

#### 1.1.3.2 Factores desencadenantes

Factores que tienen una acción activa en la remoción en masas en laderas, que originan la inestabilidad:

- a) **Fenómenos de origen natural:** precipitaciones pluviales, variación de temperatura, acciones erosivas de los vientos, acción de la gravedad, sismos, cambios de presión hidrostática por acciones hidrometeorológicas.
- b) **Fenómenos tecnológicos o inducidos por el ser humano:** deforestación, corte de talud, socavaciones, explotaciones mineras, usos inadecuados de riegos, asentamientos humanos en terrenos de capacidad portante baja o ubicados en laderas inestables.
- c) **Meteorización física:** que dependen de la naturaleza de las rocas y sus propiedades y de los que dependen de las condiciones externas como clima, humedad, vegetales, animales.

**d) meteorización química:** descomposición de algunas rocas por efecto de los factores externos como infiltraciones de lluvias, intemperismo, acción eólica etc.

#### **1.1.4 Geomorfología**

La geomorfología es el estudio científico de las formas terrestres y procesos de formación de la tierra (Sack & Orme, 2013) y los estudios detallados en las zonas críticas juegan un papel importante (Mana *et al.*, 2015). La zona de estudio presenta diferentes unidades geomorfológicas que evidencian las condiciones climáticas y la actividad geodinámica preponderante en el pasado geológico y su evolución (INGEMMET, 2019). El área donde se asienta la urbanización Bellavista y zonas adyacentes ha sido afectada por intensa actividad geodinámica tanto interna como externa que se refleja en su variada topografía y su tendencia a la ocurrencia de fenómenos geológicos y geológico – climáticos (INDECI, 2007). En el área de estudio la zona montañosa presenta fuertes pendientes con afloramientos rocosos cuyas laderas muchas veces se encuentran cubiertas de vegetación. Se puede observar una variedad de formas gravitacionales producto de los grandes deslizamientos (Villacorta *et al.*, 2016). Hacia la zona baja se observa material depositado producto del movimiento en masa.

#### **1.1.5 Hidrogeología**

Tanto el impacto físico de las gotas de lluvia como la energía cinética del agua de escorrentía tienen una gran influencia en la erosión y la deposición. Las condiciones presentes en la superficie del suelo determinan en gran medida si las precipitaciones entran en el suelo o se escurren sobre la superficie del suelo (Buol *et al.*, 2011). El agua subterránea no solo se usa para el abastecimiento público de la ciudad de Abancay y el regadío de zonas agrícolas, sino que también es un factor condicionante a la ocurrencia de peligros geológicos, principalmente los movimientos en masa (INGEMMET, 2019).

#### **1.1.6 Geohidrología**

La geohidrología estudia el agua en las rocas y suelos, estudia la textura y la estratificación de las rocas y los suelos, ya que son estos los que forman los receptáculos y conductos por donde el agua se infiltra. En las rocas impermeables el

agua se desliza, pero en rocas permeables penetra, se infiltra. Es raro que una roca sea absolutamente permeable; la descomposición superficial permite filtraciones no muy profundas y, en cambio, por las grietas y fisuras el agua gana en profundidad (Ramos *et al.*, 2003). Los acuíferos se recargan básicamente a partir de la infiltración de agua de lluvia que se precipita sobre los flancos (Lesser *et al.*, 1990), la recarga por infiltración del agua de lluvia es un proceso que se reconoce en todos los subambientes pese a las diferencias de permeabilidad entre estos (Melo, 2019). La inundación, es un tipo de peligro geohidrológico que se caracteriza por la invasión de masas de agua sobre espacios que habitualmente están libres de esta. Pueden darse por diversas causas; desborde del cauce de un río, rotura de diques, activaciones de quebradas secas por intensas precipitaciones, etc. (Medina y Gonzales, 2018). En base a los conocimientos vertidos, **los peligros geohidrológicos son aquellos procesos cuya ocurrencia está relacionado estrechamente a la lluvia** e incremento del caudal de los cursos fluviales, así como la geomorfología y pendiente local (Borga *et al.*, 2014), dentro de estos peligros tenemos las inundaciones que se producen sobre todo en época de intensas y prolongadas lluvias y la erosión de laderas que es un proceso denudativo de la superficie terrestre producto de la acción de la escorrentía que constituyen un agente erosivo que desgasta los materiales que conforman las laderas de los cerros que forman cárcavas, el grado de erosión puede variar por factores como la presencia de vegetación y meteorización de los suelos (INGEMMET, 2019).

### 1.1.7 Precipitación pluvial

La elevada precipitación pluvial genera infiltración en el sub suelo volviendo inestable los terrenos (Villacorta *et al.*, 2016). Si las predicciones del cambio climático son exactas, junto con el calentamiento global, se esperan lluvias más intensas y extremas que pueden aumentar drásticamente el peligro de desprendimiento, el riesgo y los desprendimientos asociados a deslizamiento de tierra (Borgatti & Soldati, 2013).

Las constantes lluvias, en algunos casos, extremas; generan diversos fenómenos geohidrológicos que afectan a la ciudad de Abancay y poblados aledaños (Villacorta *et al.*, 2016). En Abancay, cada año son registrados una serie de deslizamientos, ocurridos en su mayoría durante la época de lluvias. Entre lo más relevantes se

cuentan los de Ccocha – Pumararra, el cerro Chuyllurpata, quebrada Sahuanay (INGEMMET, 2019). Las lluvias son un factor decisivo en la ocurrencia de los desastres geohidrológicos (Borga *et al.*, 2014). La precipitación pluvial promedio anual de Abancay es de 598 mm, los meses de octubre a marzo corresponden al periodo de lluvias, donde el mes más lluvioso es febrero con una precipitación promedio de 113 mm/mes; los meses poco lluviosos son de abril a setiembre, la precipitación pluvial promedio mensual con menos lluvia, es junio con 2 mm/mes (Condori y Peña, 2016).

### **1.1.8 Infiltración**

La elevada precipitación pluvial genera infiltración en el sub suelo volviendo inestable los terrenos, así por ejemplo, la avalancha del cerro Chuyllurpata (Villacorta *et al.*, 2016).

La capacidad de infiltración de la superficie influye en que se produzca una escorrentía superficial o un flujo subterráneo en respuesta a la precipitación (Wohl, 2015), las precipitaciones exceden la capacidad de infiltración del suelo e inducen una saturación de agua estacional o permanente dentro del perfil del suelo (Perdrial *et al.*, 2015); la presencia de antiguos movimientos en masa, frecuentemente son reactivados por la infiltración de agua y circulación de flujos sub-superficiales, durante la época de lluvias (Villacorta *et al.*, 2016).

El principal componente que contribuye en la ocurrencia de los movimientos en masa en la cuenca del rio Mariño sería el agua de infiltración producto de las constantes precipitaciones y el deshielo del nevado Ampay, que junto con las condiciones litológicas y estructurales de dicha cuenca son los principales factores de la ocurrencia de la inestabilidad de los terrenos en ese sector (INGEMMET, 2019).

Cuando las formaciones rocosas debajo del subsuelo son porosas, el agua puede penetrar a grandes profundidades. Cuando las formaciones de rocas debajo del subsuelo son impermeables, el agua no puede penetrar a gran profundidad, se acumulará encima de las rocas. Los fragmentos de roca afectan a la infiltración por su presencia en la matriz del suelo y en la superficie del mismo (Brakensiek & Rawls, 1994).

### 1.1.9 Suelos

La textura, la estructura y la cantidad de materia orgánica en el suelo influyen en el movimiento del agua en el suelo (infiltración y percolación) y determinan la capacidad de retención del agua (Quiring *et al.*, 2015). En la urbanización Bellavista los depósitos coluviales procedentes de la erosión de las rocas sedimentarias arcillosas de color rojo, gris hasta negro, constituyen los mejores suelos de cultivos de la zona, alberga a la mayor masa de cobertura vegetal de la zona, pero su comportamiento geotécnico es malo, sensible a procesos de remoción en masa (INDECI, 2007).

#### 1.1.9.1 Tipos de suelos

Un suelo está conformado por sólidos, líquido conformado por el agua y el gas principalmente el aire y gases sulfurosos o el anhídrido carbónico que también pueden hacer parte de ella, mezclados entre ellos en forma natural, por lo que resulta difícil encontrar las proporciones relativas de cada uno de estos componentes.

##### a) Suelos finos (F)

Según INDECI (2007) en la urbanización Bellavista el suelo se compone de dos tipos de suelos (Fig.1), suelos en los que predominan limo y arcillas resaltando que los más frecuentes son los suelos limosos; tiene un color rojizo y mayor plasticidad que yace sobre suelo de grava y bolonería.

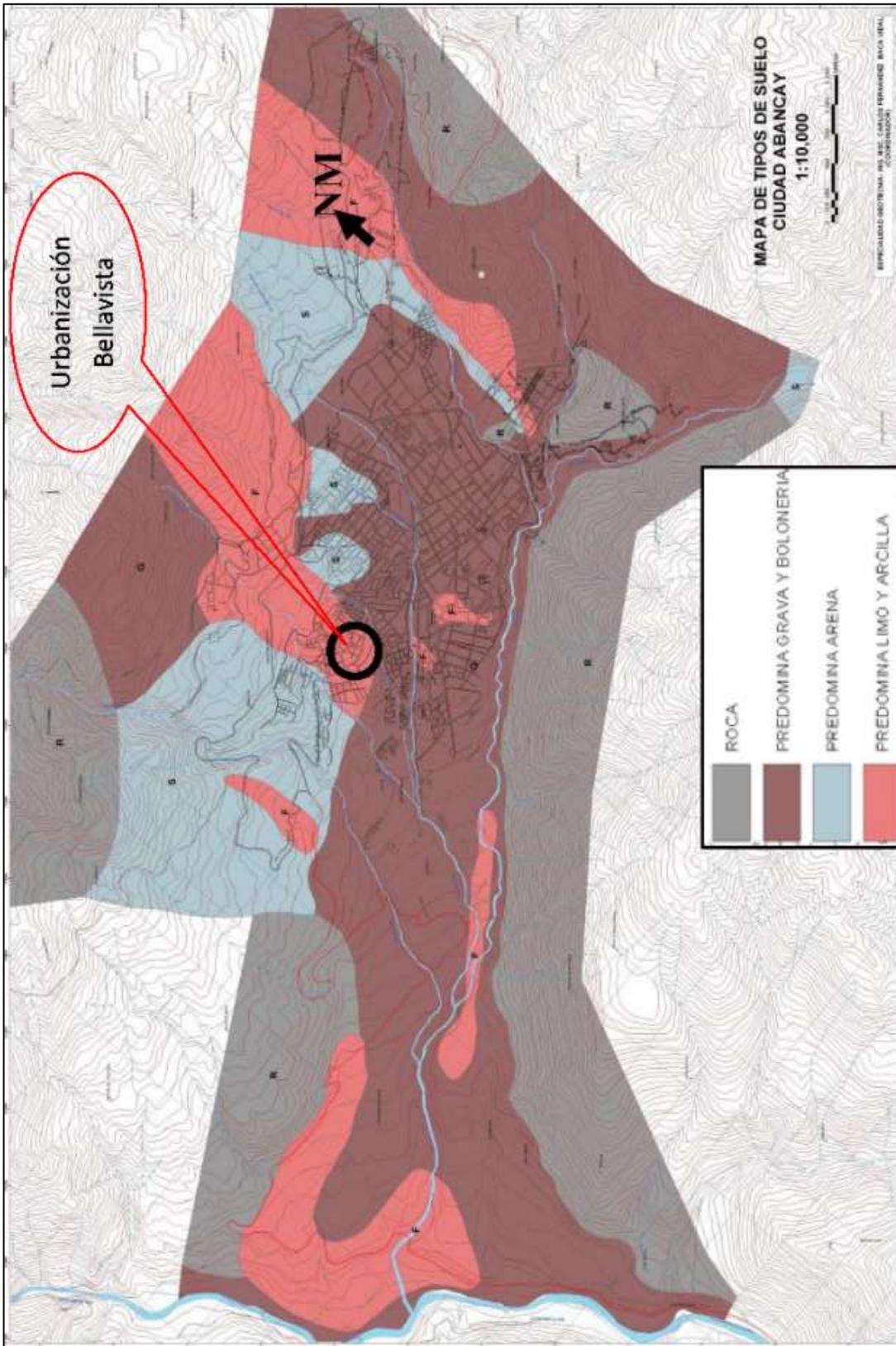


Figura 1. Tipos de suelos en la urbanización Bellavista

Fuente: INDECI (2007)

### **1.1.10 Infiltración de la precipitación pluvial en el suelo**

Proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de la superficie de la tierra y queda retenida o alcanza un nivel acuífero incrementando el volumen de agua almacenado. La relación entre la intensidad de la lluvia y la capacidad de infiltración es la que determina la cantidad de agua que penetrará en el suelo. La capacidad de infiltración decrece con el tiempo, a partir de un máximo al inicio de la lluvia y después de algunas oscilaciones (Schulz y García, 2018).

### **1.1.11 Infiltración de aguas pluviales en la roca**

Las recargas de los acuíferos se producen de las lluvias, donde un porcentaje se infiltra en los espacios vacíos de rocas (fracturas abiertas) (Condori y Peña, 2016). Esto se evidencia en los materiales encontrados en el cerro Chuyllurpata, margen derecha de la quebrada Sahuanay (norte de la ciudad de Abancay). En dicho sector el afloramiento de calizas del Grupo Copacabana inferior altamente fracturadas constituye un acuífero fisurado – kárstico. El ingreso de las aguas de lluvia en las calizas que tiene puntos de surgencia en la parte baja en numerosos manantiales (56 inventariados). En contacto con las lutitas y areniscas del Grupo Copacabana superior y con las areniscas y lutitas rojas del Grupo Mitu, estas dos unidades tienen características impermeables y se clasifican como acuitardos (Villacorta *et al.*, 2016).

### **1.1.12 Geología**

Según Ariyo *et al.* (2011) la geología y otras características estructurales de las rocas influyen fuertemente y correlacionan la capacidad de almacenamiento y la transmisividad de los acuíferos; por lo tanto, toda la información referida a la geología de la urbanización Bellavista y alrededores se ha colectado in situ dentro del área de interés y las zonas adyacentes, desarrollándose las siguientes actividades: reconocimiento de la litología, estructuras, geomorfología y fenómenos de origen climático y geológico – climático de mayor ocurrencia.

### **1.1.13 Escorrentía**

Se puede definir como la cantidad de agua de una tormenta que drena o escurre sobre la superficie del suelo. Cuando se produce, fluye a los cauces incrementando su volumen; a medida que llega agua de las partes más lejanas comienza suavemente a

decrecer el caudal al poco tiempo de terminada la lluvia (Gaspari *et al.*, 2007).

## 1.2 Antecedentes

Hashimoto *et al.* (2020) con el objetivo de prevenir y mitigar desastres en el futuro provocado por las lluvias torrenciales en la zona del oeste de Japón, describen desastres geológicos en la prefectura de Hiroshima y algunas de sus características, y se discuten sugerencias para la prevención y mitigación de desastres en el futuro. Concluyeron que el evento de lluvias torrenciales, el daño se vio reforzado por la ocurrencia simultánea de varios desastres, incluyendo flujos de escombros, fallas en los taludes, erosión y depresión, inundaciones, causados por el volumen extremo de las precipitaciones.

Lugo *et al.* (2005) con el propósito de analizar el fenómeno de procesos gravitacionales en la Sierra Norte de Puebla, generado por las lluvias voluminosas, y la transformación del relieve resultante y la relación con la vulnerabilidad y el riesgo. Considerando las dimensiones de la zona de estudio (más de 4000 km<sup>2</sup>), se procedió a realizar un análisis del relieve enfocado a determinar el tipo de procesos gravitacionales ocurridos y su relación con diversos factores. El trabajo de campo se hizo por medio de recorridos de las carreteras de la zona afectada, y en vuelos de helicópteros. En el relieve ocurrieron cambios. Los procesos gravitacionales de caída, deslizamiento, flujo y combinación de estos fueron generados por una lluvia de cuatro días, que representó en algunas localidades el 50 – 60% del total anual.

Méndez *et al.* (2011) explican que los movimientos de remoción de masa, derrumbes o caídas, son fenómenos muy destructivos debido a la cantidad de material que transportan, principalmente tierra y lodo. Con el propósito de estudiar el esfuerzo de cedencia en función del contenido de agua para los suelos propensos a flujos de detritus debido a las lluvias, se analiza el esfuerzo de cedencia en función del contenido de agua a partir de una prueba de asentamiento realizado en laboratorio. Las muestras se tomaron en el lugar de Xico a una profundidad menores a 0,50 m. Se aprecia que, para concentraciones de agua del 23, 24 y 25 % el valor del asentamiento se incrementa gradualmente al aumentar el contenido de agua. Los resultados obtenidos son consistentes con el comportamiento esperado para el suelo arcilloso. Se determinó el esfuerzo de cedencia a partir de una prueba de asentamiento en función del contenido en peso de agua para un suelo arcilloso susceptible a generar un flujo de detritos hiperconcentrado a causa de las precipitaciones pluviales.

Aristizábal *et al.* (2019) revelan que los movimientos en masa detonados por lluvia son una de las amenazas que cobra el mayor número de víctimas anuales en terrenos montañosos y ambientes tropicales. Se evaluó la amenaza por movimiento en masa detonados por lluvias en el Valle de Aburrá (Colombia) donde se asienta un número importante de viviendas y familiares en áreas altamente susceptibles. Los resultados obtenidos señalan que la categoría de amenaza alta representa el 75 % de los movimientos en masa del inventario elaborado. La evaluación de la amenaza por movimiento en masa detonados por lluvias requiere estimación cuantitativa, tanto de la probabilidad espacial de ocurrencia de un movimiento en masa, al igual que la probabilidad temporal del factor detonante, en este caso la lluvia, y finalmente la probabilidad de la magnitud del evento.

Jiménez y Aristizábal (2018) señalan que los movimientos en masa son una de las principales causas de pérdidas económicas y humanas alrededor del mundo, y una de las medidas más importantes para la prevención y reducción de pérdidas por estos fenómenos se refiere a la zonificación de la susceptibilidad y amenazas del territorio. El método propuesto se fundamenta en la combinación de diferentes métodos de zonificación, que se ajustan de forma eficiente a las necesidades de escala regional y local que este tipo de proyectos demanda. Se identificaron 286 movimientos en masa que ocupan un porcentaje de 4,12 % del área total. Se combinan diferentes análisis disponibles en la literatura con criterios independientes en términos de la escala, y uso del inventario del movimiento en masa y la unidad de análisis, permitiendo comparar sus resultados y coherencia en la distribución de la ocurrencia de movimientos en masa.

Salinas *et al.* (2017) comentan que los movimientos en masa se caracterizan por el desplazamiento descendente de masas de roca, suelo o detritos. La influencia de agentes externos como precipitaciones, sismicidad, vulcanismo y actividades antropogénicas acelera la ocurrencia del fenómeno. Por lo que es necesario realizar un inventario de movimiento en masa dentro de la Saliente de Monterrey en el cañón Santa Rosa (México). Sean realizado varias visitas de campo a la zona de estudio con el fin de identificar de manera directa movimientos en masa y reconocer futuras zonas potenciales a inestabilidades de ladera. Un total de 429 movimientos en masa ocurridos durante los últimos 30 años fueron identificados y marcados como puntos sobre distintos mapas base. La mayoría de los movimientos en masa fueron caídos, deslizamientos someros y flujos de detritos debido principalmente a huracanes, y en menor proporción, a sismicidad.

Rodríguez *et al.* (2014) mencionan que la precordillera andina del extremo norte de Chile está expuesta a fenómenos naturales como sismos y lluvias intensas, estos fenómenos pueden producir movimiento en masa, que se encuentran mayoritariamente asociados a la susceptibilidad del terreno a ser afectados por desplazamiento. Se utilizó imágenes satelitales, imágenes de Google Earth, cartas topográficas. El conjunto de información obtenida por las distintas fuentes se trabajó mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG). Se concluye que dentro del área estudiada existen sectores que poseen un alto índice de susceptibilidad de movimiento en masa, lo que favorecería la ocurrencia de estos fenómenos en el futuro.

Ocakoglu *et al.* (2002) con el objetivo detallar los factores condicionantes de un gran y complejo movimiento de masas y el desprendimiento de Dagkoy (Turquía), llevó a cabo algunas observaciones de campo, estudios cartográficos y estudios de muestreo para describir los materiales del deslizamiento. Además, se evaluaron cuidadosamente las observaciones de los testigos oculares. El escenario propuesto para el deslizamiento revela que el movimiento se inició cerca de la corona como resultado del exceso de contenido de agua en las margas al final de 3 días de fuertes lluvias. Las observaciones mostraron que la zona de suave pendiente está cubierta en su mayor parte por densos árboles forestales en donde se inició el movimiento. La geología, la geomorfología y la cubierta vegetal se consideraron los factores condicionantes de la falla.

López (2015) con la finalidad de analizar el registro histórico de precipitación en 24 horas, asociado a procesos de remoción en masa, desencadenados durante los años 1990 – 1999 y 2000 a 2013 (Talcahuano – Chile), analizaron umbrales de precipitación mediante la relación intensidad – duración (I – D) y se determinó el periodo de retorno y la probabilidad de excedencia. El resultado indicó que a partir de un periodo de retorno de 4 años existe un 75% de probabilidad de exceder, bajo las condiciones climáticas registradas en los años mencionados, una precipitación menor o igual a 85,1 mm en 24 horas. La precipitación concentrada en un tiempo menor a 4 horas sería el umbral crítico de desestabilización, con intensidades del orden de 26,5 mm.

Trujillo *et al.* (2015) con el objetivo de tener mayores insumos para mejorar el entendimiento del problema de detonación de los procesos de remoción en masa y los factores que influyen sobre éstos, introduce una base de datos de procesos de remoción en masa para Bogotá, construida a partir de informes técnicos. Se recopilieron de forma

sistemática variables como tipo de suelos, tipo de movimiento, posible causa detonante del evento, cobertura de suelo, pendiente promedio del lugar de la inestabilidad y el volumen de material deslizado, con el fin de condensar la mayor cantidad de información posible. Se encontró una fuerte relación entre el régimen de lluvias de Bogotá y la ocurrencia de movimiento en masa, marcado por un régimen bimodal con los máximos para los meses de abril – mayo y noviembre – diciembre. Se concluye que los eventos de remoción en masa están asociados a nivel temporal con la reactivación de procesos ocurridos 6 meses antes, lo que ratifica la relación lluvia deslizamiento de carácter bimodal.

Villacorta *et al.* (2012) indican que el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), elaboró el Mapa de Susceptibilidad por Movimiento en Masa en Perú, con el objetivo de plantear un modelo que indique las zonas de mayor propensión a los movimientos en masa, a fin de contar con una herramienta dinámica para la gestión de riesgos. El modelo de susceptibilidad se obtuvo usando un modelo heurístico multivariado, que implica el análisis cruzado de mapas y geoprocamiento. Para la validación del modelo se utilizó el Inventario de Peligros Geológicos Nacional, resultando que el 86% de movimientos en masa inventariados, se concentran en las categorías de alta a muy alta susceptibilidad. Como resultado del análisis se puede concluir que las zonas de mayor susceptibilidad a los movimientos en masa en Perú se localizan: 1) Al oeste, entre Cajamarca - La Libertad – Ancash – Lima – Huancavelica; 2) Ayacucho – Apurímac – Cusco - Puno, en el lado suroriental; 3) Arequipa – Moquegua - Tacna, en el lado suroccidental; 4) Junín – Pasco – Huánuco - San Martín, en la región central y nororiental; 5) otras franjas menores.

Young & León (2009) con el objetivo de ofrecer una visión general de las amenazas naturales en el Perú, especialmente en relación con la distribución, la vulnerabilidad y la gestión de riesgos, evalúan las vulnerabilidades individuales y colectivas, basados en el conocimiento de las frecuencias y magnitudes naturales de los peligros. Las perspectivas históricas, incluidos los estudios geológicos y geomórficos, ayudaron a comprender los efectos a largo plazo y a contextualizar los diferentes fenómenos ocurridos. La exposición al riesgo es variable a lo largo del tiempo y de un lugar a otro, mientras que la vulnerabilidad también varía especialmente en relación con la capacidad de las personas para predecir, prepararse y recuperarse de los peligros naturales. Los objetivos y las

orientaciones de gestión de riesgos de los habitantes de las zonas rurales y urbanas difieren profundamente.

García *et al.* (2018) con el propósito de contribuir una opinión técnica sobre la problemática, además de proponer medidas a implementar en post de la prevención y mitigación ante la ocurrencia de desastres naturales realizaron una evaluación técnica en el deslizamiento de Lutto (Chumbivilcas – Cusco). Asimismo, una inspección técnica – geológica de los alrededores del movimiento en masa para una futura reubicación de los pobladores afectados. Las tareas desarrolladas para este propósito fueron visita de campo en Lutto, inspección en la corona del deslizamiento, inspección técnica geológica, reuniones sostenidas con especialistas del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), Instituto del Medio Ambiente (IMA) y sobrevuelo en dron para realizar cartografía, perfiles, etc. Las rocas calcáreas muy fracturadas y alteradas son capaces de acumular aguas superficiales y/o subterráneas, presenta pendientes moderadas a altas, se observa la presencia de drenajes naturales y antrópicos, capaces de acumular importantes cantidades de agua en épocas de intensas precipitaciones pluviales, existen grietas ampliándose a los flancos este y oeste del deslizamiento. Las causas principales para la ocurrencia de este movimiento en masa son las intensas precipitaciones pluviales de la temporada.

Zavala *et al.* (2012) con el objetivo de validar el mapa de susceptibilidad y su utilidad como herramienta de prevención de desastres y planificación de desarrollo, se evaluó el deslizamiento de Rodeopampa que fue reactivado. La zona fue previamente evaluada en el estudio de riesgo geológico regional, y en particular el sector Rodeopampa las mismas que fueron comparadas con el mapa de susceptibilidad elaborado la cual se elaboró con la interpretación de fotos aéreas e imágenes satelitales y comprobación de campo a sí mismo se tomó las características de cada factor: litología, pendiente, morfología, hidrogeología a partir de las características de permeabilidad en las rocas y el tipo de cobertura vegetal y uso de suelos. La ladera del cerro Rodeopampa (con existencia de un deslizamiento antiguo), compuesta por material coluvial permeable y substrato sedimentario muy fracturado, en parte brechado y triturado (panizo), relacionado a una falla adyacente, fue sobrecargada por la infiltración de la zona agrícola superior de Rodeopampa. La desestabilización en la cara libre del talud rocoso ocurrió como resultado del uso de explosivos en la construcción de una trocha carrozable que cruza en todo lo ancho al deslizamiento.

Carlotto (2007) realizó una investigación sobre el deslizamiento del cerro Huamancharpa (Cusco), para determinar el mecanismo del movimiento en masa. Se realizó la localización general de deslizamiento de Huamancharpa y la geología regional del área, se tomó vista aérea del deslizamiento y se ubicó los detalles del movimiento de masas. El deslizamiento involucra un gran volumen de areniscas y lutitas que se deslizaron rápidamente. En la corona se encuentran agrietamientos en las lutitas, distanciados entre 4 y 13 m del escarpe principal y con aberturas entre 10 cm y 0,50 cm estos agrietamientos facilitan la infiltración de aguas de lluvia y por lo tanto favorecen la ocurrencia de nuevos deslizamientos a lo largo de los planos de estratificación. El mecanismo del movimiento fue esencialmente traslacional, ya que el material se desplazó ladera abajo siguiendo los planos de estratificación.

Fidel (2007) con el propósito de describir el movimiento de masa de Mayunmarca, que corresponde a una síntesis de los trabajos realizados para el Comité Suramericano de Movimientos en Masa. Localiza el deslizamiento en la quebrada Ccochaca afluente del río Mantaro, tomó fotografías aéreas. Afloran rocas con edades que van desde el Paleozoico inferior hasta el Holoceno. Existen rocas metamórficas constituidas por esquistos foliados y muy fracturados, estas rocas subyacen discordante a capas de areniscas rojas, lutitas, conglomerados y lavas andesíticas. Las causas del deslizamiento fueron varias y entre ellas se pueden mencionar: sobresaturación de la cubierta de suelo, intensa erosión retrogresiva, fuertes precipitaciones, estratificación a favor de la pendiente, espesos depósitos de material holocénico, deslizamiento traslacional inicial. El deslizamiento tuvo una forma rectangular, con una longitud aproximada de 6 km, un ancho promedio de 1 km, un espesor de aproximadamente 150 m y una pendiente promedio de 30°.

Evans *et al.* (2007) teniendo la finalidad de elaborar una guía para la evaluación de amenazas, describe el movimiento en masa de gran escala y altamente complejo ocurrido en el Valle del río Santa (Perú) el 31 de mayo de 1970. Se tomó como referencia los expedientes de los movimientos en masa de 1962 y 1970 que han sido bien documentados en numerosas publicaciones en español, francés, inglés y alemán. Durante el evento, el movimiento en masa original se transformó en un rápido flujo de detritos el cual viajó corriente abajo hacia el valle del río Shacsa. Parte de los detritos se esparcieron sobre los costados del valle. La parte principal del flujo de detritos se desplazó sobre el abanico de Ranrahirca. Una revisión y reevaluación del evento con el fin de caracterizar la amenaza

en el área es necesaria, especialmente considerando la reocupación del área por los pobladores y la construcción de nueva infraestructura sobre los depósitos del evento de 1970.

Juarez y Gómez (2019) con el propósito de realizar la evaluación técnica de peligros geológicos en la quebrada Sicre, previa coordinación con el personal del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) y autoridades locales. Realizaron las siguientes acciones, recopilación y análisis de información existente de trabajos anteriores, la interpretación de imágenes satelitales, preparación de mapas para trabajos de campo, toma de datos (fotografía y GPS), cartografiado. El informe se pone a consideración de INDECI, autoridades y funcionarios competentes, para la ejecución de medidas de mitigación y reducción de riesgos, a fin de que sea instrumento técnico para la toma de decisiones.

Vilchez (2015) en el proyecto denominado Zonas Críticas por Peligros Geológicos en la Región Cusco, que tiene por objetivo obtener mejor conocimiento de los peligros geológicos existentes en la región Cusco y su implicancia en la seguridad física de los centros poblados, obras de infraestructura importante y vías de comunicación. Realizó trabajos de campo y gabinete; en el primer caso las actividades se realizaron en 3 salidas a la región enmarcada en el estudio, además de los trabajos de gabinete en el que se incluye la recopilación y análisis de información existente, la interpretación geológica, geomorfológica y de peligros geológicos por movimiento en masa, peligros geohidrológicos y de los denominados otros peligros, usando fotografías aéreas e imágenes satelitales de diferentes años. Se identificaron y describieron todas las zonas consideradas críticas, debido al alto grado de peligro, la exposición de los elementos involucrados y su vulnerabilidad, que representan los procesos geológicos en el espacio. Se dan las recomendaciones generales con las cuales se busca mitigar y prevenir desastres o daños causados por los peligros geológicos.

Soncco y Manrique (2018) en su investigación Peligro por deslizamientos en el sector Matarani (Tacna) con el objetivo realizar una evaluación de peligros por movimiento en masa en el sector Matarani. La información se basó en una inspección de campo y entender los factores que desencadenaron este evento. Los sectores Matarani y Quilahuani se encuentran en una zona de alto peligro, porque están ubicados sobre cuerpos de deslizamientos. El deslizamiento principal en el sector de Quilahuani presenta sectores

donde actualmente se están desarrollando múltiples reactivaciones a manera de pequeños deslizamientos. Por lo que se considera como peligro muy alto.

Zavala *et al.* (2007) con el objetivo de brindar información geológica oportuna sobre peligros, pone a consideración el reporte de las zonas críticas por peligros geológicos e hidrológicos en la región Ancash. Los trabajos consistieron en: elaboración de una síntesis bibliográfica con la recopilación de información geológica, geodinámica y de peligros existentes; trabajos de gabinete; campañas de trabajos de campo, entre dos brigadas de geólogos especialistas en riesgo geológico. Resume en general los avances del estudio dando énfasis en la descripción sucinta de zonas o áreas consideradas como críticas, con peligros potenciales de acuerdo a la vulnerabilidad asociada. Es necesario considerar dentro de los planes o políticas nacionales, regionales y/o locales sobre prevención y atención de desastres.

Producto de la interacción de aspectos ambientales, geológicos y antrópicos se producen eventos de movimientos en masa, los cuales en un contexto de cambio climático se intensifican por efecto principalmente de la infiltración de lluvias intensas, que en varias ocasiones han producido daños y afectan periódicamente a la infraestructura física y centros poblados de la región de Apurímac.

Villacorta *et al.* (2013) con el propósito de diagnosticar los procesos geológicos que pueden causar desastres en la región Apurímac, presentan los resultados del inventario de peligros geológicos y el análisis de susceptibilidades por movimiento en masa. Acudieron a fuentes escritas, orales, gráficas (fotografías aéreas e imágenes de satélite) y trabajo de campo para cartografiar y georeferenciar los procesos y representarlos mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica. Se han registrado al 2012 un total de 849 peligros geológicos y 32 zonas críticas por estos procesos. Para prevenir las consecuencias de posibles desastres en la región es importante considerar el desarrollo de estudios de peligrosidad a escalas de detalle en las zonas críticas identificadas considerando como detonante las precipitaciones, además la aplicación de monitoreo instrumentado en los movimientos en masa activos principalmente en las zonas más vulnerables por sus características de infraestructura y población.

La región de Apurímac presenta el nivel de riesgo por movimiento en masa, desde bajo hasta muy alto, como se observa en la figura 2, la mayor parte de la extensión del territorio regional es susceptible al movimiento en masa en un nivel de riesgo alto a muy alto. Las



provincias con riesgo muy alto son Abancay, Antabamba, Aymaraes, Chincheros, Grau y Cotabambas. La ciudad de Abancay y las zonas adyacentes son susceptibles a movimientos en masa generados por diversos fenómenos geohidrológicos, con daños a la vida humana, desaparición de viviendas y destrucción de hectáreas de terrenos de cultivo, como ocurrieron en años anteriores.

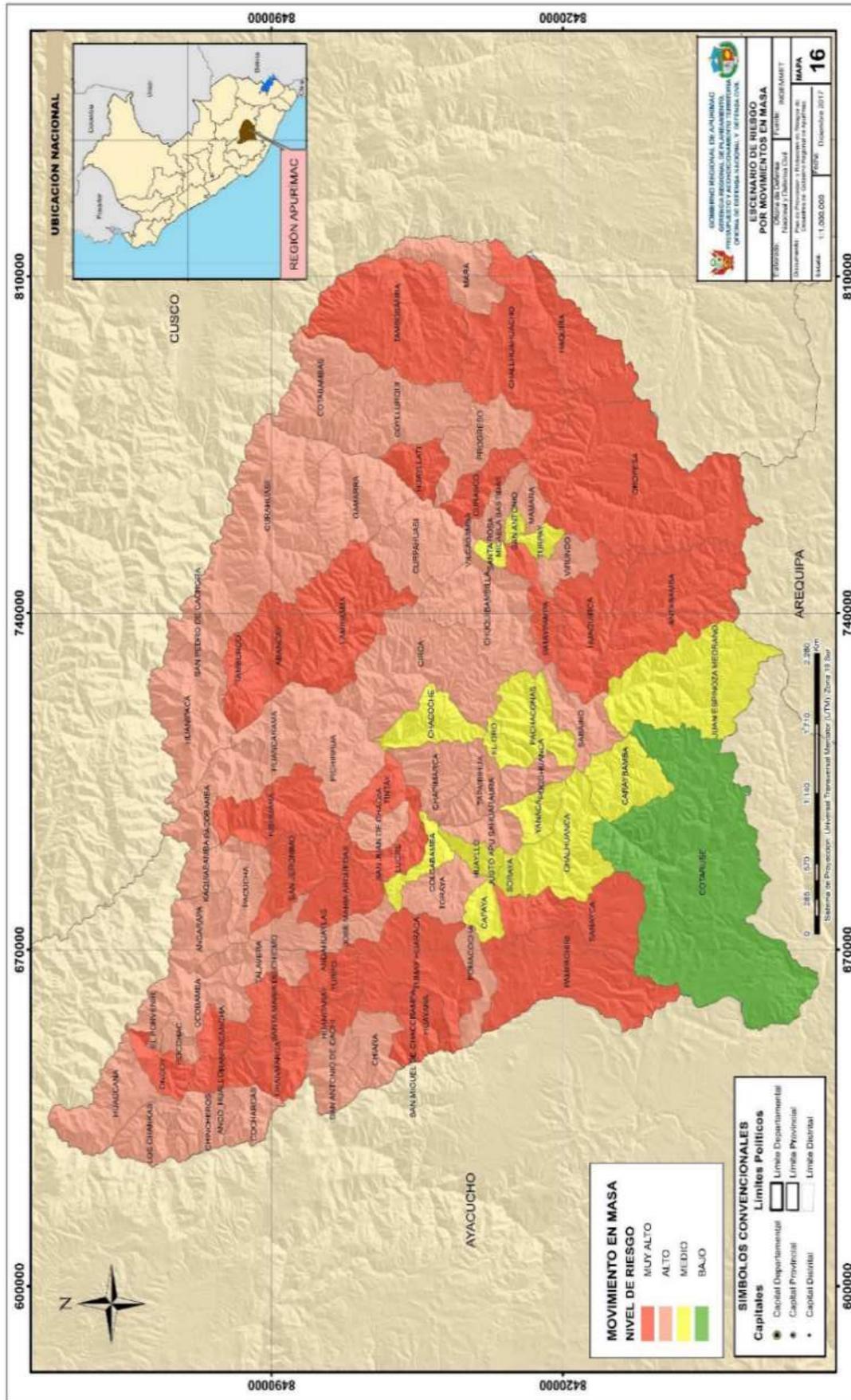


Figura 2. Escenario de riesgo por movimiento en masa, región Apurímac

Fuente: Gobierno Regional de Apurímac

Villacorta *et al.* (2016) con el objetivo de evaluar los procesos geohidrológicos en la cuenca del río Mariño, Abancay (Perú) desarrollaron en la microcuenca del río Mariño estudios geológicos, hidrogeológicos, geofísicos y dendrocronológicos a escala de detalle, a fin de estimar potenciales desastres geohidrológicos que pudiesen ocurrir en el futuro en el área. Los resultados del estudio muestran que gran parte de la cuenca del río Mariño es altamente susceptible a la generación de movimientos en masa y que los principales condicionantes son: i) abrupta topografía del área, ii) la presencia de antiguos movimientos en masa que son reactivados por la infiltración de agua y circulación de flujos sub – superficiales, durante la época de lluvias y iii) la alta meteorización del sustrato rocoso que facilita la tendencia a la fracturación y creación de cavidades. Los resultados obtenidos fueron puestos a consideración de las autoridades y población local para una adecuada gestión del riesgo de desastres en la ciudad de Abancay.

INGEMMET (2019) en colaboración con la universidad de Geneva (Suiza) con el objetivo de generar información temática sobre los peligros geológicos que afectan a la ciudad de Abancay, como herramienta básica y de utilidad para la gestión de riesgos de desastres y su adecuación a los planes de ordenamiento territorial en su jurisdicción. Realiza el artículo Evaluación Integral de la Cuenca del Río Mariño (Abancay, Apurímac) para la prevención de desastres de origen geológico y geo – hidrológico. El trabajo considera tres etapas: trabajos previos que consistió en la recolección, revisión de información y bases de datos; trabajo de campo etapa que consistió en tres campañas en el ámbito de la cuenca del río Mariño; los métodos de trabajo han incluido la ejecución de diferentes estudios. Actualmente, la ciudad de Abancay presenta un crecimiento poblacional desordenado, producto de la ocupación de áreas para vivienda y cultivo sin considerar las características geográficas, geodinámicas y climáticas de la zona. Las constantes lluvias, en algunos casos extremas, provocan diversos fenómenos geohidrológicos que generan importantes pérdidas personales y económicas en la ciudad y sus pueblos circundantes. Es evidente que la presencia de agua tanto superficial (escorrentía) como subterránea es fundamental en la ocurrencia de fenómenos geohidrológicos en Abancay. La lluvia, por tanto, juega un papel importante en la generación de estos eventos, por lo que un buen conocimiento del registro climático del área es fundamental para entender la frecuencia y magnitud de los procesos que suceden.

Luza *et al.* (2015) con el objetivo de realizar la caracterización geodinámica de la ciudad de Abancay para la prevención de desastres, desarrolla estudios geológicos,



hidrogeológicos, geofísicos y geodinámicos, a fin de conocer en detalle el comportamiento de los procesos geológicos que comprometerían la seguridad de sus habitantes y la infraestructura construida, configurando futuros escenarios de riesgo de desastres en su ámbito. Los resultados indican que los macizos rocosos en Abancay presentan una calidad de regular a buena, disminuyendo esta hacia el oeste de la cuenca del río Mariño, los que afloran en la región son más estables en la dirección oeste – este y de sur a norte. Concluyen en que la mayoría de los problemas se presentan en la capa de los suelos por la circulación de flujos subsuperficiales (incremento de la presión de poros) los cuales se ven incrementados en los periodos de lluvia.

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1 Identificación del problema

Los movimientos en masa se producen en todos los continentes del planeta, incluida la Antártida. Los deslizamientos de tierra son históricamente poco reportados en áreas remotas y escasamente pobladas y en países subdesarrollados. Los desprendimientos de tierra no se notifican históricamente en las zonas remotas y poco pobladas y en los países subdesarrollados, o se agrupan con otros peligros naturales como las inundaciones, los terremotos y los volcanes. Estos países (incluidos China, Taiwán, India e Indonesia) se encuentran entre los más afectados por los movimientos de masas en el mundo (Guthrie, 2013).

Los desprendimientos de tierra son uno de los riesgos geológicos más importantes en todo el mundo y especialmente en Europa. Pueden causar víctimas mortales y graves lesiones a las personas, así como daños a la propiedad. Los desprendimientos pueden dañar las infraestructuras de transporte (carreteras y ferrocarriles) situadas aguas abajo de la zona de deslizamiento. Los elevados impactos socioeconómicos de los deslizamientos de tierra han aumentado el interés por el desarrollo de técnicas para el monitoreo de deslizamientos y la alerta temprana antes de eventos catastróficos (Hojat *et al.*, 2019).

La intensidad y la duración de las precipitaciones y la fluctuación de la presión atmosférica se han relacionado fuertemente con el inicio y el movimiento de masas de tierra. Las precipitaciones provocan la acumulación de presión de agua en el suelo, además de producir una sobrecarga adicional, y la fluctuación de la presión atmosférica influye en el flujo de agua en los poros del sedimento (Regmi *et al.*, 2015).

Los deslizamientos de tierra poco profundos inducidos por las precipitaciones son un peligro geológico común en todo el mundo que puede representar una seria amenaza tanto para la vida como para la propiedad. Estudios anteriores sugirieron que los deslizamientos de tierra poco profundos inducidos por la lluvia siempre ocurrían por encima del fondo de un frente de humectación descendente en la infiltración o debajo de un nivel freático ascendente (Ran *et al.*, 2018).

Cada uno de los procesos geomórficos tiene factores causales específicos, como el desbroce de la vegetación, la intensidad de las precipitaciones, el volumen de las mismas, el ángulo de la pendiente, las propiedades del suelo, el uso y la gestión de la tierra, que afectan a la erosión del suelo y al movimiento de masas, tanto en zonas urbanas como rurales. Dependiendo de la frecuencia y la magnitud de cada uno de estos factores, pueden producirse desprendimientos catastróficos (Guerra *et al.*, 2017).

Se ha llegado a la conclusión de que la existencia de agua estancada en una capa de suelo residual y el aumento de la presión del agua de los poros son las principales causas de los deslizamientos inducidos por la lluvia. Aunque, el esfuerzo de corte puede en realidad aumentar a medida que el perfil del suelo se satura, lo que posiblemente disminuya la estabilidad del talud. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el fallo se produce después de un cierto periodo de precipitaciones. Por lo tanto, ignorando el aumento del peso unitario del suelo debido a la infiltración de agua, el proceso que lleva a la falla esencialmente tiene lugar bajo una condición de tensión total constante y el aumento de la presión de agua en los poros debido a la infiltración de agua, donde la tensión normal total (perpendicular a la superficie),  $r$ , y la tensión de corte,  $s$ , permanecen esencialmente constantes durante la infiltración del agua de lluvia (Chen *et al.*, 2020).

Los deslizamientos de masas de suelos en el Perú se generarán en la época de lluvias y estas ocurren en su mayoría en la zona de la sierra. En su mayoría son causados o desencadenados por otras catástrofes naturales, como los terremotos y las fuertes lluvias (Young y León, 2009). En Perú, los deslizamientos de tierra vienen causando daños y víctimas anualmente debido al alto relieve de las montañas y a la distribución estacional de las precipitaciones. Los desprendimientos de tierra son una de las principales catástrofes naturales que causan víctimas mortales y pérdidas económicas en las regiones montañosas de todo el mundo, sobre todo allí donde el desarrollo rápido aumenta la exposición de las personas y las infraestructuras (Strozzi *et al.*, 2018).

Los peligros originados por fenómenos hidrometeorológicos / oceanográficos externa entre los cuales se encuentran las inundaciones, deslizamientos y huaycos respectivamente, y que han sido generados teniendo como factor detonante o desencadenante a las precipitaciones intensas. La ocurrencia de los peligros inducidos por la acción humana y generados por fenómenos de geodinámica externa presentan el segundo y tercer mayor valor registrado de ocurrencias a nivel nacional respectivamente. Los departamentos que pertenecen a la sierra han reportado la ocurrencia del mayor número de peligros que son generados por fenómenos hidrometeorológicos y oceanográficos, entre ellos las bajas temperaturas, lluvias intensas, sequías, tormentas eléctricas y vientos fuertes (Gobierno Regional de Apurímac (GRA), 2017).

En la región Apurímac, la época de lluvias, con precipitaciones máximas se presenta entre los meses de diciembre y marzo y precipitaciones pequeñas de mayo a setiembre. El registro de la ocurrencia de peligros durante los años 2003 al 2015 ha permitido elaborar un ranking de su ocurrencia a nivel de la región de Apurímac donde se han registrado en mayor número (6282) de ocurrencias de peligros generados por fenómenos naturales e inducidos por acción humana, representando el 11% del total nacional. Se puede desatacar que las lluvias ocupan el primer lugar con 2169 ocurrencias considerados como factor detonante de los movimientos en masa e inundaciones (GRA, 2017).

Durante el verano austral 2011-12, la provincia de Abancay (centro-sur de los Andes peruanos) experimentó unas precipitaciones sin precedentes precipitaciones persistentes en el registro local que se remonta a 1982. Como consecuencia, el 18 de marzo de 2012 se desencadenó un gran flujo de escombros en la parte alta de la quebrada de Sahuanay, con consecuencias catastróficas en los distritos altamente poblados de Tamburco (Rodríguez *et al.*, 2019).

INDECI (2007) en su informe indica que gran parte de la cuenca del río Mariño es altamente susceptible a la generación de movimiento en masa, la parte más crítica se encuentra en las Urbanizaciones San Luis Baja, Miraflores, Bellavista (alta) y FONAVI, debido a que se han cerrado los cauces naturales que alimentan al río San Luis, con construcciones transversales a los drenes naturales, por lo que en periodos de lluvias éstas no fluyen libremente y se infiltran. El proceso específico que genera esta inestabilidad deriva en parte de la infiltración del agua de lluvia en las discontinuidades y fracturas de la roca meteorizando sus paredes y formando arena o arcilla (Villacorta *et al.*, 2016).

Los movimientos de remoción de masa, derrumbes o caídas son fenómenos muy destructivos debido a la cantidad de material que transportan, principalmente tierra y lodo. Previo a un movimiento, este material se comporta como sólido, pero, una vez que se inicia, el material removido en muchos casos tiene un comportamiento líquido donde el flujo es no uniforme y no estacionario (Méndez *et al.*, 2011).

En la tabla 1 se muestra los eventos más desastrosos ocurridos en la ciudad de Abancay y la cuenca del río Mariño.

Tabla 1

*Eventos más desastrosos ocurridos en la ciudad de Abancay y cuenca del río Mariño*

Paraje/lugar	Evento	Peligro	Vulnerabilidad	Fecha
Limapata, Puchuorcco	Deslizamiento	Alto	Alto	2010
Qda. Puyo-Huayco	Flujo	Alto	Alto	2010
Espinoza Alto	Deslizamiento	Alto	Alto	2011
Cerro Chuyllurpata	Movimiento complejo	Alto	Muy alto	1951, 2012
Ccocha Pumararra	Movimiento complejo	Muy alto	Muy alto	1997
Asillo	Deslizamiento	Alto	Alto	Abril 2012

Fuente: Villacorta *et al.* (2016)

Como referencia se tiene el deslizamiento de grandes proporciones de flujos de lodo y barro por saturación de agua ocurrido en el sector de Ccocha – Pumararra (1997) con daños a la vida humana, heridos y viviendas desaparecidas y varias hectáreas de terreno de cultivo destruidas; otro deslizamiento ocurrido en el sector Cconchopata sector de Aymas (2005) que afectó a familias, viviendas destruidas (INDECI, 2007), igualmente la magnitud del flujo de detritos que sucedió en la quebrada de Sahuanay (2012). Gran parte de la cuenca del río Mariño es altamente susceptible a la generación de movimientos en masa (Villacorta *et al.*, 2016).

En general podemos indicar que la ciudad de Abancay es sensible a los procesos geodinámicos externos por su ubicación y la naturaleza de sus suelo, morfología, condiciones climáticas y proceso de crecimiento desordenado de la población y la inapropiada explotación de sus recursos.

La relación entre la ocurrencia de procesos geohidrológicos y la presencia de aguas subterráneas y aguas superficiales están evidenciadas en el sector de Fondo Nacional de

Vivienda (FONAVI) adyacente a la urbanización Bellavista, con acumulaciones de agua y la cobertura cuaternaria. Se deben tener en cuenta las zonas de bajas resistividades (Zonas Anómalas) que corresponden a filtraciones de agua y/o sectores húmedos, así como el espesor del material de remoción en masa (coluviales acumulados) (INGEMMET, 2019).

En la urbanización Bellavista se percibe de manera recurrente, durante los meses de enero a marzo una preocupación sistemática de sus pobladores en relación al hábitat y a los problemas de estabilización de las paredes de adobe y material noble, y además en la principal vía de acceso a la ciudad de Abancay (Panamericana); esta situación es interpretada por sus pobladores como un problema que se deriva del incremento de las lluvias que generan el movimiento en masa de las laderas y de sus posibles impactos medioambientales.

Los umbrales de lluvia expresan los niveles mínimos de lluvia que deben alcanzarse o superarse para que ocurran deslizamientos de tierra en un área en particular. Son una herramienta común para expresar la parte temporal del análisis de peligros de deslizamientos de tierra (Martinović *et al.*, 2018).

La presente investigación se ha realizado con la finalidad de obtener datos objetivos acerca de la caracterización de la geohidrología en la textura y la estratificación de las rocas y los suelos en el movimiento de masa de suelos y contribuir a detectar las zonas potenciales de las amenazas naturales específicamente en la amenaza por movimiento en masa de suelos, revisando y promoviendo conocimientos y capacidades requeridas para reducir las pérdidas por estos procesos, para beneficio de todos los habitantes de las zonas vulnerables.

## **2.2 Enunciados del problema**

### **2.2.1 Problema general**

¿Cómo las características geohidrológicas influyen en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay?

### **2.2.2 Problemas específicos**

1. ¿Cómo la infiltración de las precipitaciones pluviales en las rocas influye en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay?

2. ¿Cómo la infiltración de las precipitaciones pluviales en el suelo, influyen en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay?

### **2.3 Justificación**

Ante la falta de trabajo de investigación sobre el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay, el propósito de esta investigación es contribuir a las investigaciones efectuadas en diferentes zonas de deslizamiento de masas de la ciudad de Abancay e incluso a nivel de la región de Apurímac y nacional, de tal forma que se preste la debida atención a estos fenómenos que tanto daño han ocasionado a los habitantes, suelos agrícolas e infraestructuras de viviendas y viales.

Actualmente hay crecimiento poblacional urbana en la ciudad de Abancay y conlleva a la demanda de suelo en las zonas adyacentes a la ciudad como es el caso de la urbanización Bellavista zona considerada susceptible al movimiento en masas de suelos la misma que se acrecienta en los meses de lluvia (diciembre – marzo) peor aun cuando la precipitación es muy intensa. La zona de estudio comprende de viviendas construidas de adobe (construcciones antiguas) y material noble (construcciones nuevas) en las cuales se pueden observar fisuras, con más notoriedad en la plataforma de la carretera asfaltada en el tramo río San Luis – Iglesia Guadalupe que presenta fisuras de longitudes considerables tanto longitudinales y transversales (Foto 4).

Considerando que hay antecedentes de los sucesos de movimientos de masas en el sector de Fondo Nacional de Vivienda (FONAVI), sector que colinda con la urbanización Bellavista (zona de estudio) es necesario realizar una investigación para determinar las causas que generan este fenómeno y tomar decisiones oportunas y adecuadas que beneficien no solo a los moradores de Bellavista sino también a la población de la ciudad de Abancay, a su vez prevenir futuros desastres, que con frecuencia se ocasionan en las zonas adyacentes a la ciudad de Abancay.

### **2.4 Objetivos**

#### **2.4.1 Objetivo general**

Determinar las características geohidrológicas que influyen en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.

## **2.4.2 Objetivos específicos**

1. Establecer la influencia de la infiltración de las precipitaciones pluviales en las rocas, en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.
2. Establecer la influencia de la infiltración de las precipitaciones pluviales en el suelo, en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.

## **2.5 Hipótesis**

### **2.5.1 Hipótesis general**

Las características geohidrológicas influyen en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.

### **2.5.2 Hipótesis específicas**

1. La infiltración de las precipitaciones pluviales en las rocas, influyen en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.
2. La infiltración de las precipitaciones pluviales en el suelo, influyen en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Lugar de estudio

La investigación fue realizada en la urbanización Bellavista, distrito de Abancay, provincia de Abancay, región de Apurímac (Fig. 3), localizada a una altitud de 2386 m.s.n.m., latitud sur  $13^{\circ}38'2,57''$  y longitud oeste  $72^{\circ}53'27.88''$  a 1 km y al lado oeste de la ciudad de Abancay, dividida en dos zonas por la carretera Abancay – Lima (Bellavista Alta y Bellavista Baja).

La ciudad de Abancay se encuentra ubicado en el valle de la subcuenca del río Mariño, tributario de la cuenca del río Pachachaca, es la capital política del mismo nombre y la región de Apurímac.

Los estudios realizados por INDECI (2007) indican que la ciudad de Abancay tiene una larga historia de desastres naturales causados por fenómenos de origen climático y geodinámico, tales como deslizamientos, huaycos, inundaciones, socavación, fríos intensos, incendios en laderas y otros. Muchos de estos fenómenos están asociados al aparato glaciar del nevado Ampay que se encuentra al norte de la ciudad.

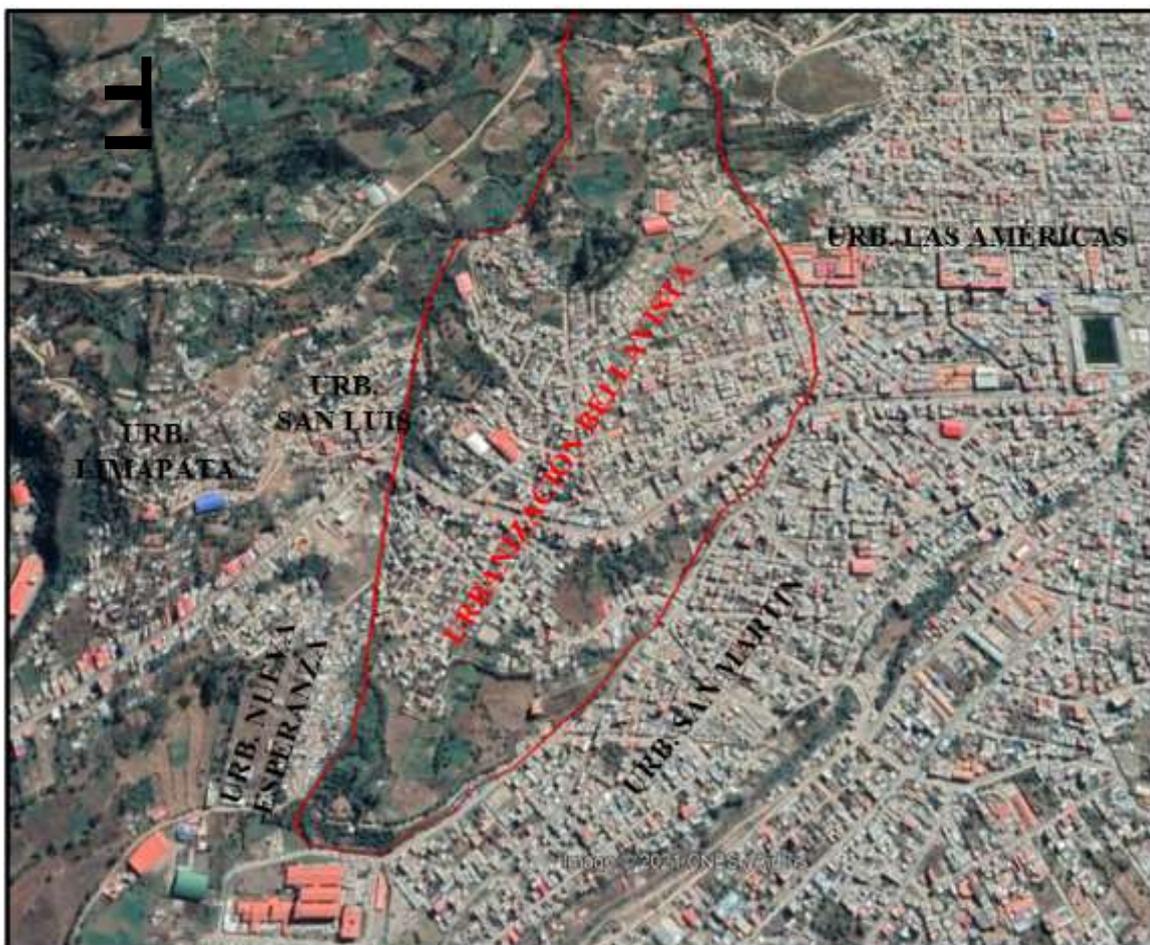


### 3.2 Población

La población para la presente investigación está conformada por toda el área ocupada de la ciudad de Abancay conformada por los distritos de Tamburco y Abancay, con una superficie de 5400 y 28800 ha respectivamente (tomado del link: [distrito.pe/distrito-abancay.html](http://distrito.pe/distrito-abancay.html) fecha:17-01-2021)

### 3.3 Muestra

La muestra está constituida por la urbanización Bellavista que forma parte del crecimiento de la ciudad de Abancay y es una zona potencialmente inestable (Fig. 4), limitado por el este con la urbanización Las Américas, por el sur la urbanización San Martín, Nueva Esperanza, por el oeste urbanización San Luis y Limapata y por el norte sector Moyocorral.



*Figura 4.* Urbanización Bellavista

Fuente: Google Earth Pro (fecha de imagen 25-05-2020)

### 3.4 Método de investigación

El método de investigación es cuantitativo, el estudio es de tipo descriptivo y explicativo. Descriptivo porque se busca especificar las características geohidrológicas que influyen en el movimiento en masa de suelos. Para ello es necesario conocer la infiltración de las precipitaciones pluviales en las rocas y suelos, debido a que el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista se evidencia en los meses de enero a marzo de cada año, meses con intensa precipitación pluvial. Los diseños descriptivos y los estudios de caso en particular generan datos que son útiles para otros fines (Whitney, 2000), exhibe el conocimiento de la realidad tal como se presenta en una situación de espacio y de tiempo dado (Rojas, 2015); la investigación descriptiva permite realizar una revisión crítica y analizar a profundidad la corriente de investigación con el objeto de reseñar las condiciones que originaron su aparición, así como los resultados más relevantes alcanzados por los diversos estudios realizados sobre el tema (Tinto, 2013). Explicativo porque está dirigido a responder las causas de los eventos y fenómenos físicos, que ocasionan el movimiento en masa de suelos. El diseño explicativo o aclaratorio es utilizado cuando los resultados o preguntas derivadas del estudio cuantitativo son investigadas cualitativamente para producir datos, que pueden ser usados de manera complementaria o con el fin de aclarar los hallazgos originales (Hamui-Sutton, 2013).

Para cumplir con los objetivos propuestos de la investigación, se inició con los trabajos de revisión documental de los estudios previos realizados en cuanto a movimiento en masa de suelos a nivel mundial, nacional, regional y local. Específicamente se tomó la mayor cantidad posible de información contenida, antecedentes relacionados al movimiento de masas dentro del área de interés y sus alrededores.

Sean realizado trabajos de campo con la finalidad de obtener información in situ referida al problema en estudio para ello ha sido necesario implementar el levantamiento topográfico, contar con el plano del mapeo geológico regional y realizar el mapeo geológico local para ubicar las zonas de movimiento de masas y las zonas potenciales al movimiento. En los trabajos de campo realizados se delimitó la zona de estudio en una extensión de 70 ha (Fig.4) ubicando a su vez las zonas que aún componen áreas de cultivo, vegetación, áreas lotizadas e infraestructuras de vivienda (adobe y material noble) y viales.

Se comprobó que el proceso de reptación de suelos en las laderas de Moyocorral, Limapata produjo daños importantes en las estructuras del conjunto habitacional de FONAVI y sus alrededores (INDECI, 2007).

Se delimitó la zona de Bellavista porque hay evidencia de reptación de suelos, que afecta toda el área urbana incluido la vía principal (carretera Panamericana) de acceso a la ciudad de Abancay.

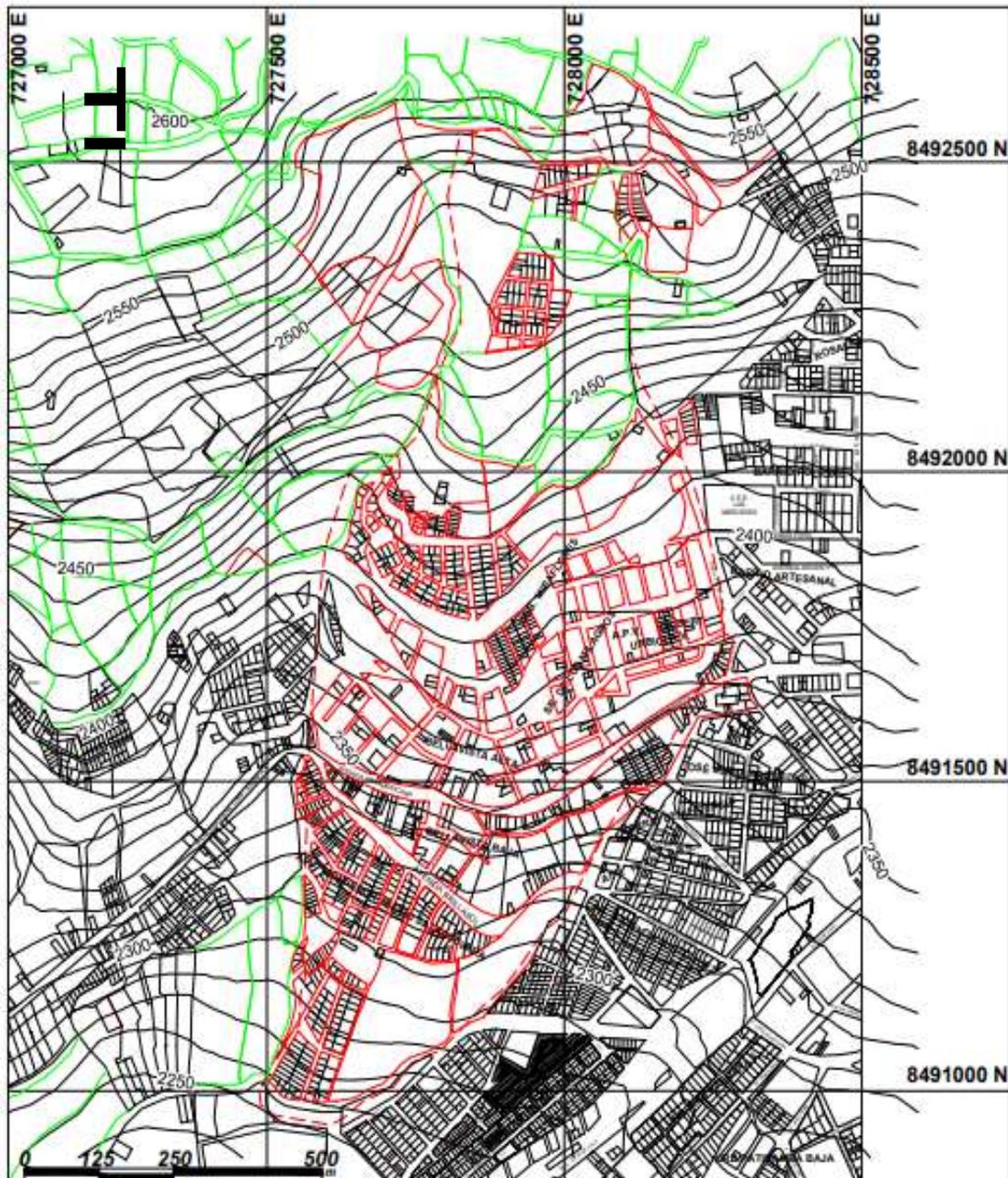


Figura 5. Levantamiento topográfico de la urbanización Bellavista

### 3.4.1 Geología regional

Según Valdivia y Latorre (2003) son varios los estudios realizados por diferentes geólogos, entre ellos se puede mencionar a Heim (1948), Egeler y Booy (1961) que realizaron estudios regionales. Posteriormente Marocco, R., (1975, 1977, 1978), realizó trabajos sobre los cuadrángulos de Andahuaylas, Abancay y Cotabambas, la Deflexión de Abancay y el Estudio Geológico de la Cordillera de Vilcabamba, respectivamente.

#### 3.4.1.1 Depósitos cuaternarios

En el valle de Abancay se han podido diferenciar dos tipos de depósitos cuaternarios (Fig. 6): **Depósitos aluviales (Qh-al)** que corresponden a los depósitos de conos aluviales y algunas terrazas, que están principalmente asociados a la desembocadura de las quebradas principales, adyacentes a los valles de los ríos. Están conformados por grandes bloques de rocas y gravas subangulosas a subredondeadas, envueltos por una matriz areno-limosa. En la zona de estudio se han identificado zonas con estos depósitos, que presentan volúmenes importantes. **Depósitos coluviales (Qh-co)** se encuentran en los flancos de los valles y corresponden a depósitos compuesto por bloques y cantos angulosos de tamaños variables, envueltos en una matriz areno arcillosa. En la zona se encuentran en los flancos noroeste de Abancay (Valdivia y Latorre, 2003).

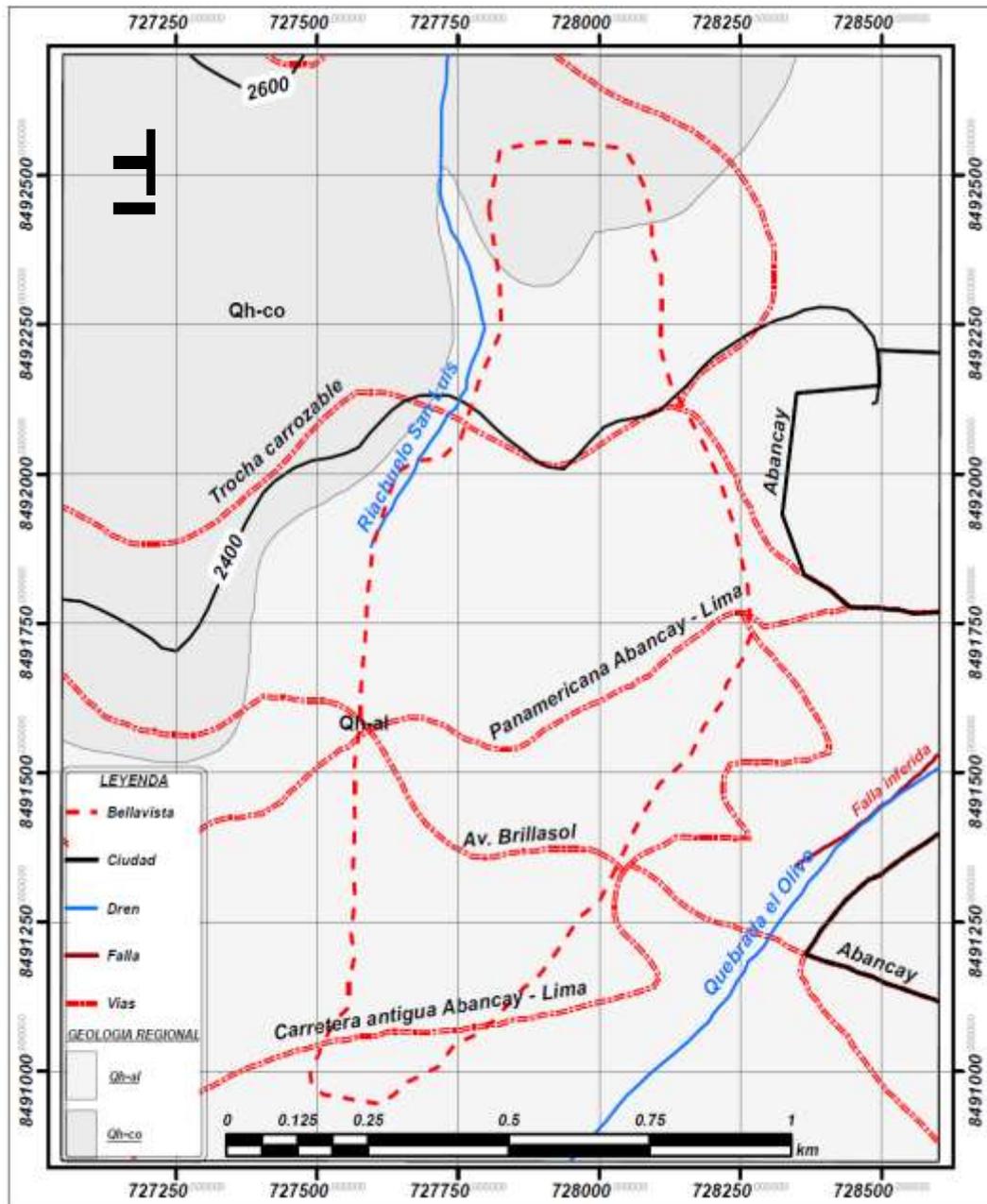


Figura 6. Geología regional del valle de Abancay

Fuente: Valdivia y Latorre (2003)

### 3.4.2 Geología local

Para describir la geología local (Fig. 7) se ha procedido a describir los cortes naturales y artificiales que se encuentran visibles en la urbanización Bellavista. En el área de estudio se presentan depósitos cuaternarios donde predomina el limo y la arcilla (Fig.8), tiene un color rojizo y mayor plasticidad la misma yace sobre la capa de grava y bolonería (Fig. 9).

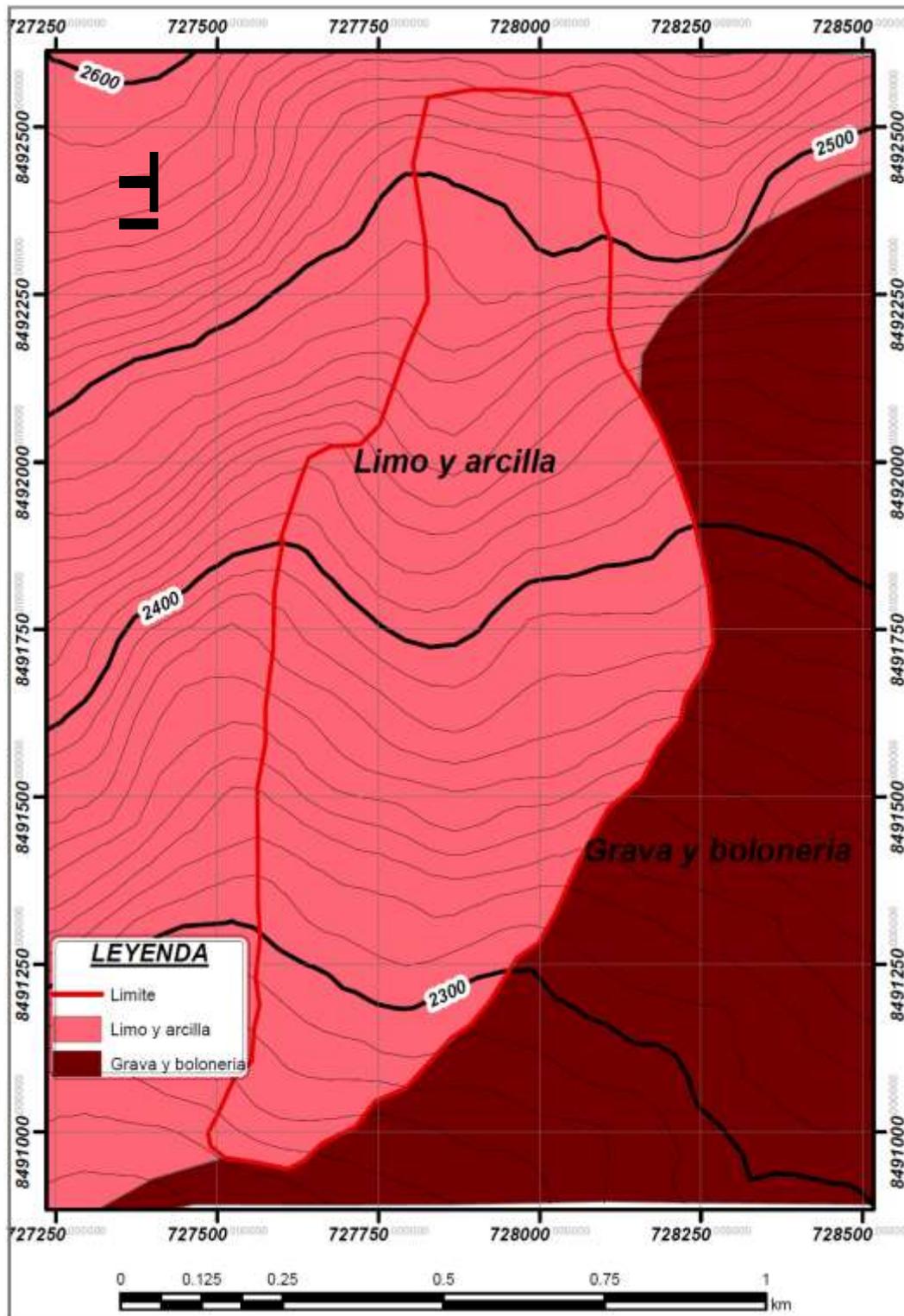


Figura 7. Geología local de la urbanización Bellavista



*Figura 8.* Suelo limo y arcilla



*Figura 9.* Suelo grava y bolonería

### **3.4.3 Áreas cubiertas por suelos**

El área afectada por la infiltración de las precipitaciones pluviales está constituida por suelos libres de construcción de viviendas y suelos de cultivo, que incluye 34,55 ha el 49,34% del área total que alcanza 70 ha (Fig.10). Se estima que los factores que condicionan la ocurrencia de deslizamientos son la infiltración del agua debida a las precipitaciones, como al uso humano en los riegos de cultivos (GEMMA, 2007). Los deslizamientos de tierra latentes se reactivan con el agua de riego (Orme, 2013). El subsuelo cargado pierde resistencia y fuerza, lo que puede dar lugar al desarrollo de

una superficie de cizallamiento en el inicio de un proceso de deslizamiento o en la reactivación de un cuerpo de deslizamiento latente (Dikau, 2013).

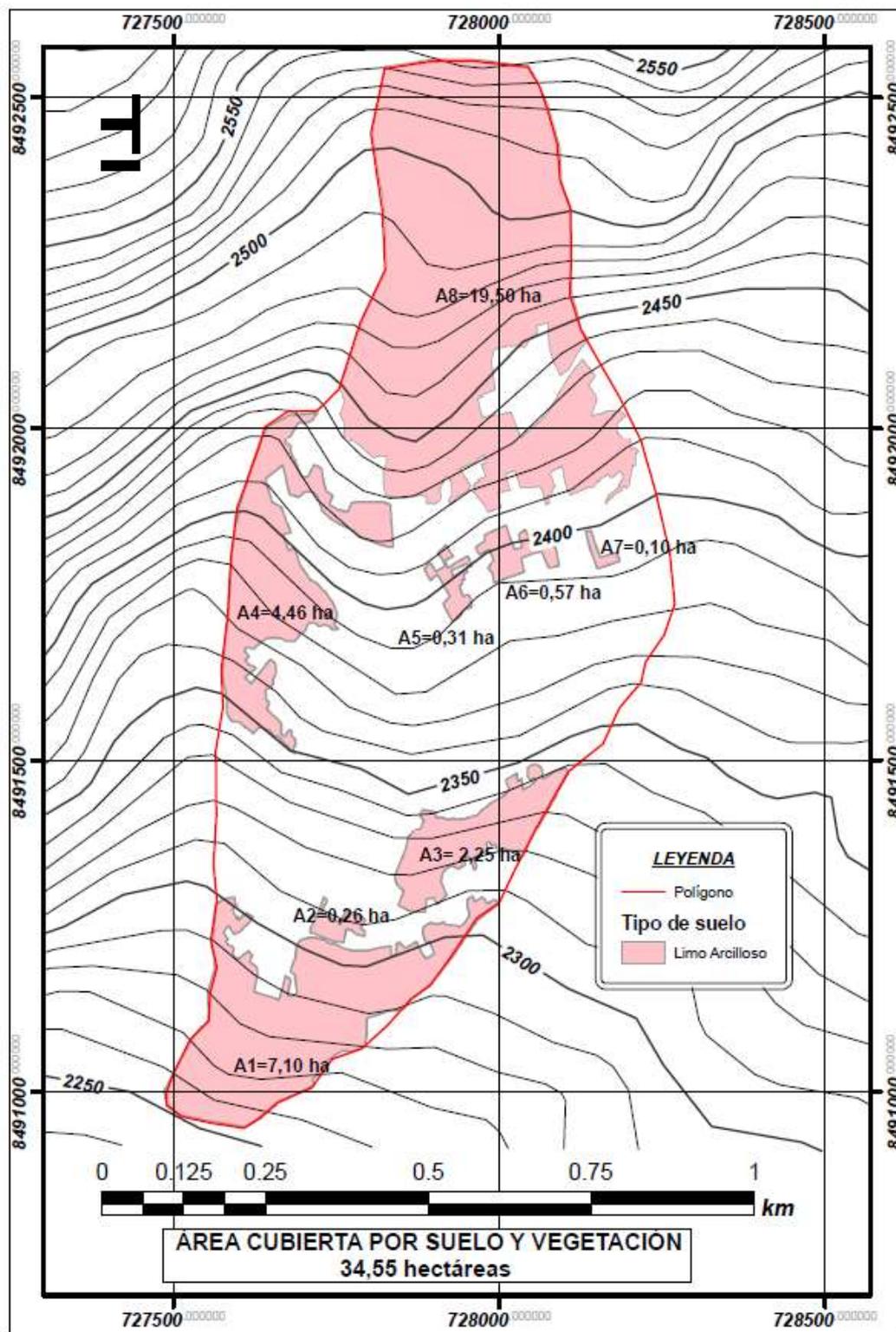


Figura 10. Área cubierta por suelo y vegetación

#### **3.4.4 Rocas**

En este sector, la geología corresponde a rocas calizas y suelos formados por erosión y meteorización (Condori y Peña, 2016). Al norte de la ciudad de Abancay se presentan rocas sedimentarias muy tectonizadas y forman la estructura alta de Abancay. Sin embargo la mayoría de los problemas geodinámicos se presentan en la capa de suelos por la circulación de flujos sub-superficiales (incremento de la presión de poros) los cuales se incrementan en los periodos de lluvias (Villacorta *et al.*, 2016).

#### **3.4.5 Precipitación anual en la provincia de Abancay**

La precipitación pluvial anual en la provincia de Abancay es variada como se aprecia en el anexo 1. Para el presente estudio se consideró datos de precipitación de los últimos 50 años desde 1970 hasta 2019.

En el año 1997 ocurrió el movimiento complejo de Ccocha y Pumaranra, la precipitación promedio anual en ese entonces fue de 722,7 mm; el 2010 se produjo dos eventos el deslizamiento en sector Limapata, Puchurcco y el flujo de la quebrada Puyo Huayco, este año la precipitación promedio anual fue 654,90 mm; el 2011 hubo deslizamiento de Espinoza Alto, la precipitación promedio anual fue de 832,30 mm; el 2012 se producen dos eventos movimiento complejo del cerro Chuyllurpata y deslizamiento en Asillo, este año la precipitación promedio anual fue de 1012,80 mm, históricamente la más alta en los últimos 50 años. Los meses de mayor precipitación son habitualmente enero, febrero y marzo de cada año.

Los meses de intensas lluvias se manifiestan en el mes de enero, febrero y marzo con mayor intensidad en febrero, estas intensas precipitaciones hacen que se genere infiltración de sus aguas que reducen la cohesión y fricción de los materiales, incrementa la presión del agua de los poros y la hidrostática normal a las pendientes, haciendo proclives a su desestabilización (González y Folguera, 2009).

### **3.5 Descripción detallada de los métodos por objetivos específicos**

Inicialmente se realizó la visita de campo y se delimitó el área de estudio, para luego realizar el levantamiento topográfico. Con la ayuda del plano geológico regional, el plano topográfico se ubicaron zonas agrícolas y las zonas donde se han construido

infraestructuras de viviendas y las vías de circulación terrestre. Se realizó el mapeo geológico local.

La metodología seguida para la presente investigación se presenta según los objetivos específicos propuestos en la investigación, el mismo se detalla a continuación:

1. Para establecer la influencia de la infiltración de las precipitaciones pluviales en las rocas, en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.

En la zona de estudio al realizar el mapeo geológico regional (Fig. 6) se ubicó depósitos coluviales (Qh-Co) en la parte superior (norte) y en la parte inferior (sur) depósitos aluviales (Qh-al); realizado el mapeo geológico local (Fig. 7) no se ubicó zonas con afloramiento de rocas, por lo que se deduce que la infiltración de las precipitaciones pluviales en las rocas, en el movimiento de la masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay, es nula, por lo que se prescinde de esta posibilidad.

2. Para establecer la influencia de la infiltración de las precipitaciones pluviales en el suelo, en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.

Se acopió información de las precipitaciones pluviales (Anexo 1) desde el año 1970 hasta el año 2019. La precipitación pluvial de mayor intensidad se produjo el año 2012 con un promedio anual de 1012,80 mm que generó un volumen de 230948,78 m<sup>3</sup> de agua infiltrada (Anexo 2) que provocó movimientos en masa en diversos lugares de la ciudad de Abancay. El pronóstico para los años venideros, como consecuencia del calentamiento global las precipitaciones pluviales serán más intensos. Por consiguiente, para la presente investigación se ha como base la precipitación promedio anual de 1012,80 mm, la más alta de los últimos 50 años.

Se realizó el mapeo geológico local (Fig.7) determinándose dos tipos de suelos, limo – arcilla y grava – bolonería. En el tipo de suelo limo – arcilloso existen áreas de cultivo y vegetación con pastos naturales, este tipo de suelo es más vulnerable a la infiltración de las aguas de lluvia.

Se ha ubicado infraestructuras agrietadas en las viviendas (Fig. 13) y en la plataforma de la carretera asfaltada (Foto 4).

En los cortes de las carreteras, taludes y cauces naturales (río San Luis) las observaciones se realizaron de forma directa determinándose los componentes del

suelo (Fig. 8, foto 1).

Se determinó que en el área de estudio existen depósitos cuaternarios que definen dos tipos de suelo limo – arcilla (parte superior) y grava – bolonería según se va profundizando (Fig. 8 y Fig. 9).

### **3.5.1 Descripción del procedimiento de los softwares utilizados**

#### **3.5.1.1 ArcMap 10.5**

Utilizado en la elaboración del plano de ubicación y localización de la urbanización Bellavista, plano geológico regional, plano geológico local, ubicación de las calicatas (muestras de suelos), ubicación de la zona limitadas de suelos y vegetación, las áreas con infraestructuras de viviendas, volumen de la masa de suelos y el perfil de la zona en estudio.

#### **3.5.1.2 AutoCAD Civil 3D 2016**

Software que permitió descargar los puntos del levantamiento topográfico, la elaboración del plano topográfico de la urbanización bellavista y el perfil geográfico de la urbanización Bellavista.

#### **3.5.1.3 CRUTEM4 Google Earth**

Se tomó datos de precipitaciones pluviales de las estaciones meteorológicas de las zonas adyacentes a la provincia de Abancay para corroborar a los datos faltantes registrados por la estación meteorológica de Curahuasi lo más próximo a la urbanización Bellavista. CRUTEM4 Google Earth es conjunto de datos derivados de las temperaturas y las precipitaciones pluviales registrados en las estaciones meteorológicas de todos los continentes de la tierra (Jones *et al.*, 2012).

#### **3.5.1.4 Global Mapper 19**

Siendo una de las características únicas y definatorias del Global Mapper su amplio y variado soporte de formatos de datos, permitió la delimitación del área de estudio y la toma de puntos topográficos para procesarlos en el software del ArcMap 10.5 y elaborar los diferentes planos.

### **3.5.1.5 Google Earth Pro**

Dado las bondades de este software se tomó fotografía espacial para ubicar y delimitar la remoción en masa de suelos en la urbanización Bellavista, ubicado al noroeste de la ciudad de Abancay, permitió determinar el área de las zonas de suelos y vegetación y los puntos de la ubicación de las calicatas (M1, M2, M3).

### **3.5.1.6 Microsoft Office (Excel)**

Software que permitió exportar e importar puntos topográficos para elaborar las tablas y los diferentes planos en Autocad, ArcMap y Rocscience (Slides) y el procesamiento de datos para exportar al software JAMOVİ

### **3.5.1.7 Rocscience (Slides v6.00)**

Permite analizar el factor de seguridad en deslizamientos por diferentes métodos: Bishop simplified, Corps of Engineers #1, Corps of Engineers #2, GLE/Morgenstrn-Price, Janbu simplified, Janbu corrected, Lowe-Karafiath, Ordinary/Fellenius y Spencer.

El programa permitió analizar y determinar el factor de seguridad en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista.

### **3.5.1.8 JAMOVİ**

Jamovi es una herramienta de reciente aparición en el análisis de datos. Los análisis se ejecutan en tiempo real, y cualquier cambio en los datos tiene un efecto inmediato sobre los resultados. Se presenta como un software impulsado por la comunidad científica (community driven) en la cual se fomenta el desarrollo de funciones que se pondrán a disposición del usuario (Elosua y Egaña, 2020).

### **3.5.1.9 IMB SPSS**

Es una plataforma que ofrece un análisis estadístico avanzado, una amplia biblioteca de algoritmos de machine learning, análisis textual, extensibilidad de código abierto, integración con big data. Integrada para comprender datos y resolver problemas complejos empresariales y de investigación. No importa de

qué sector provenga puede revelar el significado que hay detrás de los datos (Sorokin, 2019).

### **3.5.2. Materiales y laboratorio**

#### **3.5.2.1 Equipos utilizados**

- Laptop marca Dell Vostro 14 3000 (CORE i)
- GPS navegador Garmin modelo GPSmap 76CSx
- Pala
- Pico
- Flexómetro

#### **3.5.2.2 Softwares utilizados**

- ArcMap 10.5
- AutoCAD Civil 3D 2016
- CRUTEM4 Google Earth
- Global Mapper 19 (64 – bit)
- Google Earth Pro
- Microsoft Office (Excel)
- Rocscience (Slide)
- jamovi
- IBM SPSS

#### **3.5.2.3 Laboratorio**

- Laboratorio de mecánica de suelos UNAMBA – GEOMECH.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### **4.1 Influencia de la infiltración de las precipitaciones pluviales en las rocas, en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay**

Se ha realizado un mapeo geológico local (Fig.7) de la zona de estudio y sus alrededores para ubicar cuerpos de rocas en las cuales se generarían las infiltraciones de las precipitaciones pluviales y como consecuencia de ello el movimiento en masa de suelos, no se ha encontrado afloramientos de rocas, sin embargo, en los cortes de talud en la construcción de la carretera de la vía de evitamiento (Foto 1) se puede visualizar pequeñas bolonerías con matriz de suelo limo arcilloso. Por consiguiente, no hay presencia de roca en forma significativa para determinar la influencia de la infiltración de las precipitaciones pluviales en las rocas, en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista. Sin embargo, los fragmentos de roca en la superficie del suelo pueden disminuir y aumentar la infiltración. Se ha demostrado que el tamaño de las rocas en la superficie está directamente relacionado con la infiltración, es decir rocas más pequeñas disminuyen y las rocas más grandes en la superficie aumentan la infiltración (Brakensiek y Rawls, 1994).

Una hipótesis nula es una afirmación que pensamos poner a prueba mediante la observación. Normalmente, la hipótesis nula es una afirmación neutra que estamos dispuestos a creer a menos que veamos pruebas convincentes de lo contrario (Fewster, 2013). Al tomar una decisión sobre las hipótesis complementarias, se comparan: la hipótesis nula (indicada con  $H_0$ ) representa la condición experimental actual o convencional y la hipótesis alternativa (indicada con  $H_1$ ) describe la condición que nos interesa evaluar (Angelini, 2018). Es habitual realizar experimentos en los que se afirma

un éxito cuando se descarta la hipótesis nula. Sin embargo, hay una categoría de experimentos que se ha convertido en importante en la que un éxito es cuando la hipótesis nula no se rechaza. El análisis adecuado de tales experimentos pone a prueba de la validez de la hipótesis nula, en lugar de limitarse a no encontrar pruebas en su contra (Lew, 2006).

La hipótesis nula es la proposición que implica que no hay efecto o no hay relación entre los fenómenos. Es una hipótesis que el investigador trata de refutar, rechazar o anular, mientras que la hipótesis alternativa es lo que el investigador cree realmente que es la causa de un fenómeno (Vital et al., 2013).

Teniendo en consideración lo indicado respecto a las hipótesis se tiene la siguiente conclusión:

- **Hipótesis específica 1**

Que enuncia: La infiltración de las precipitaciones pluviales en las rocas, influyen en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.

**a) Planteamiento de la hipótesis**

**Hipótesis nula  $H_0$**

**$H_0$ :** la infiltración de las precipitaciones pluviales en las rocas, no influyen en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.

**Hipótesis alternativa  $H_1$**

**$H_1$ :** la infiltración de las precipitaciones pluviales en las rocas, influyen en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.

Al realizar el reconocimiento del lugar de estudio y el mapeo geológico local no se descubrió evidencias de la existencia de cuerpos de roca. Los datos están lejos de los que se esperaba, por consiguiente, se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se rechaza la hipótesis alternativa.

**4.2 Influencia de la infiltración de las precipitaciones pluviales en el suelo, en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay**

El suelo en la urbanización Bellavista se compone del tipo limo – arcilla y vegetación que dispone el 34,55 ha (49,34 %) del área de estudio, donde la infiltración de las

precipitaciones pluviales es más susceptible e inducen al deslizamiento en masa, intervienen factores como las propiedades del suelo y la pendiente del terreno que juegan un papel preponderante en el movimiento en masa del tipo reptación en Bellavista.

#### 4.2.1 Cambio de ángulo de pendiente

Los cambios en el ángulo de pendiente de una zona pueden causar movimientos de masas de suelos, se diferencian los procesos lentos y repentinos que causan cambios en el ángulo de pendiente (Claessens *et al.*, 2013).

Se generó un mapa de pendiente a partir de las curvas de nivel, utilizando para tal efecto el sistema de información geográfica ArcGis, y el método de clasificación Cortes Naturales (Jenks) cuyos resultados se muestran en la figura 11. La pendiente varía desde 1,27 % (mínimo) en la parte baja, hasta 57,68 (máximo) en la parte superior de la urbanización Bellavista como se aprecia en la tabla 2.

Se ha realizado dos cortes longitudinales (Fig. 11) perfil 1 y perfil 2, para determinar el perfil geográfico, el ángulo promedio de reposo de la masa de suelo limo arcilloso es  $11^\circ$  (20,48%). La cota mínima de ambos perfiles es 2262,999 m.s.n.m. siendo el máximo 2520 para el perfil 1 y 2581 msnm para el perfil 2.

Tabla 2

##### *Estadística de pendiente*

<b>Descripción</b>	<b>Pendiente (%)</b>
Mínimo	1,27
Máximo	57,68
Media	20,48
Desviación típica	9,44

Fuente: Resultado de los datos procesados en ArcGIS.

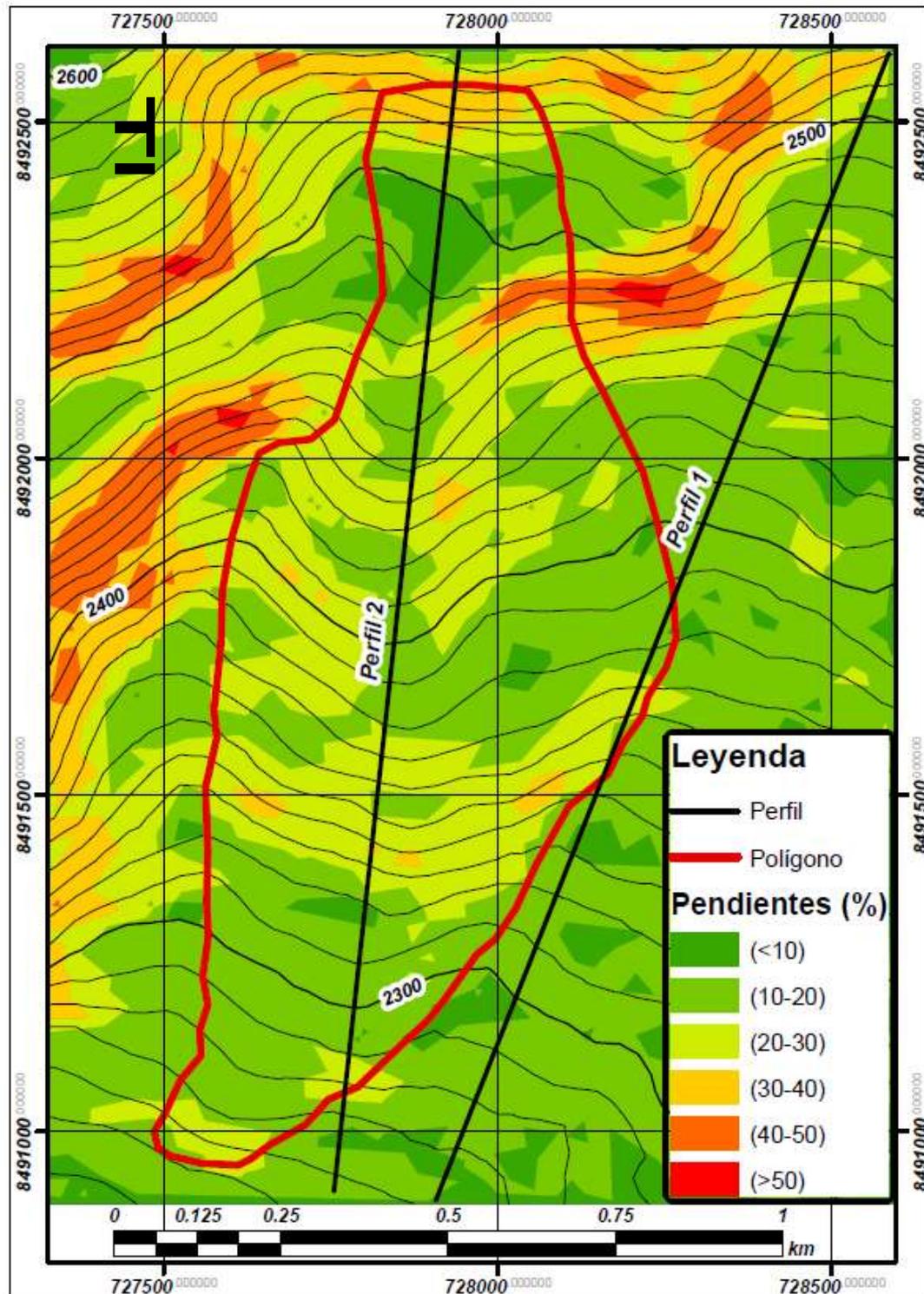


Figura 11. Cambio de ángulo de pendiente en porcentaje (%)

#### 4.2.2 Proceso de remoción en masa en la urbanización Bellavista

##### 4.2.2.1 Deslizamiento traslacional

Hacia el norte, en la cabecera de la zona en estudio (Fig. 11) la pendiente se eleva e inicia las faldas de la montaña del Ampay con una pendiente muy

pronunciada por lo que se deduce que inicialmente el movimiento en masa es del tipo traslacional debido a que la masa ha sido desprendida de su posición original que cubría las rocas que actualmente se visualiza. Los deslizamientos traslacionales suelen fallar a lo largo de discontinuidades geológicas como fallas, juntas, superficies de estratificación o el contacto entre la roca y el suelo. En la figura 12, se observa que el deslizamiento de tierra traslacional se movió hacia abajo, a lo largo de una superficie relativamente plana, hacia el sur (parte baja), en este proceso de remoción inicial, se observa en la zona norte (parte superior) la acumulación de la masa es delgada, en la parte del centro es más ancha y mayor volumen de masa, y termina en la zona sur una pequeña cola.

#### **4.2.2.2 Movimiento de reptación**

En el año 1995 se produjeron fallas considerables en las viviendas recién inauguradas del complejo habitacional de FONAVI, fecha en que se detecta el movimiento en masa, la ladera pudo estar desplazándose mucho antes y no fue detectado debido a que no existían obras sensibles que haga visible el movimiento en masa de suelos (INDECI, 2007). Flujo lento de materiales limo arcillosos, más dinámico en los meses de diciembre a marzo época de lluvias.

Una vez concluida el proceso de remoción de masa por deslizamiento traslacional, la masa de suelo de limo y arcilla se extiende y se desplaza lentamente sin formar necesariamente una superficie de ruptura reconocible, sobre la capa de grava y bolonería (suelo estable) que se ubica por debajo del nivel freático (Fig. 14) y presenta pendiente muy suave (Fig.15). Los deslizamientos poco profundos, que son uno de los tipos de deslizamientos de tierra más comunes en todas las zonas climáticas del mundo y se caracterizan por un espesor reducido (Melo *et al.*, 2020).

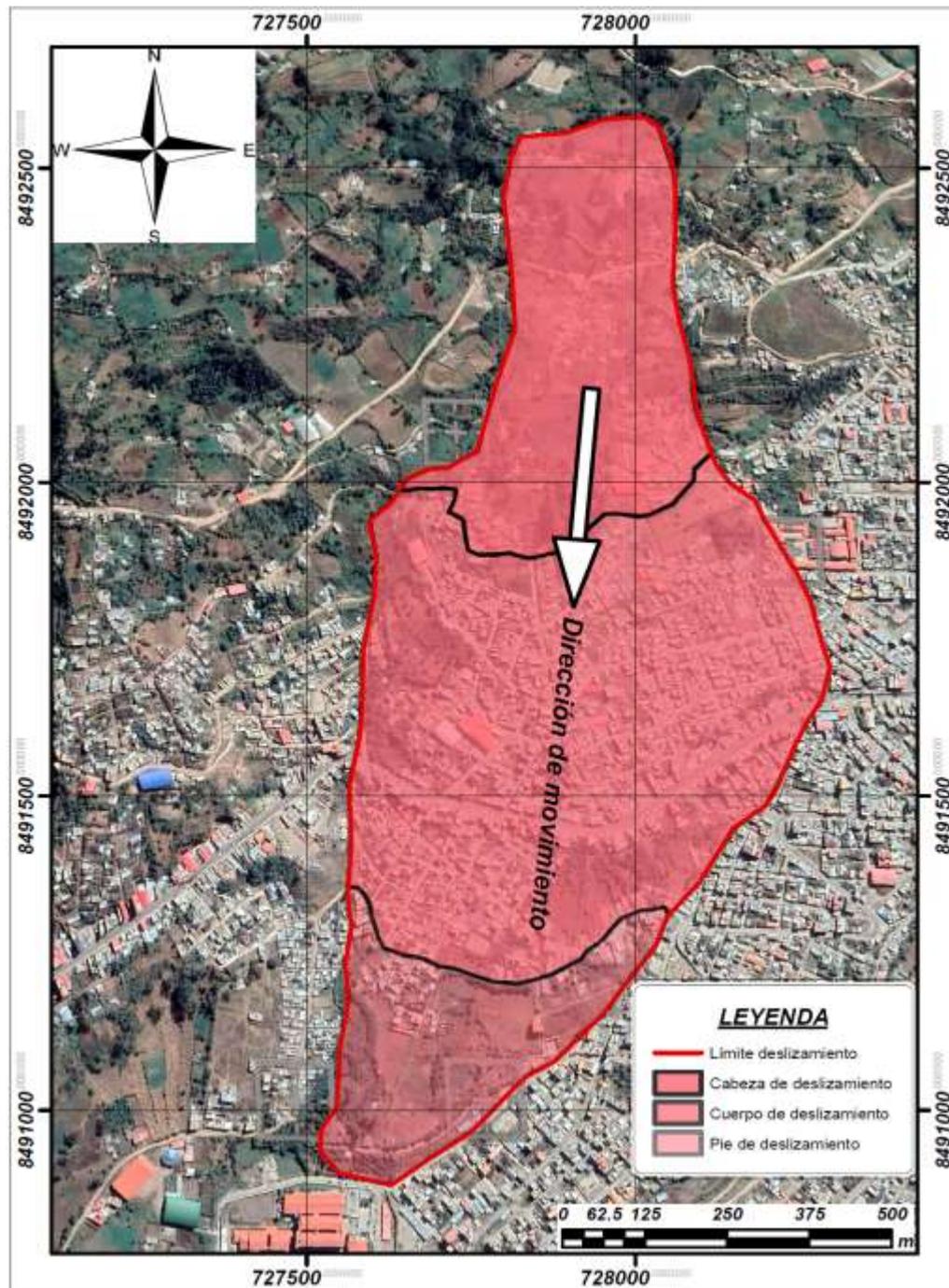


Figura 12. Proceso de remoción en masa en la urbanización Bellavista

Como consecuencia de la reptación de masa de suelos se generan grietas que se evidencian en viviendas de material noble y adobe (Fig.13), en la plataforma de la carretera Panamericana y en muro de contención (Foto 4 y foto 8).



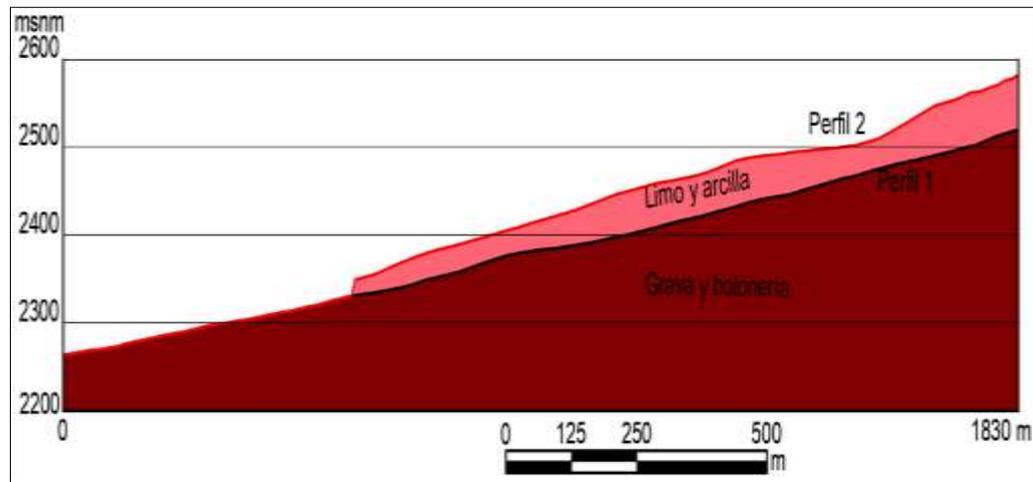
*Figura 13.* Fisuras generadas por reptación de suelo en la urbanización Bellavista



*Figura 14.* Presencia de aguas subterráneas (Nivel freático)

En la figura 15 se observa que el suelo limo y arcilla yace sobre la superficie de separación por debajo de la cual el suelo es grava y bolonería conformada por fragmentos de roca caliza de color superficial blanco pero negro en su interior. Los fragmentos de piedra grava y arena son duros y resistentes, los materiales

finos presentan cierto grado de cementación por la solución calcárea denominado caliche que circula entre las partículas.



*Figura 15.* Perfil geográfico de la urbanización Bellavista

Las propiedades del suelo se determinaron de tres muestras extraídas Muestra 1 (M1), Muestra 2 (M2) y Muestra 3 (M3), ubicadas en puntos estratégicos de tal manera que sea una muestra representativa de la zona de estudio, el perfil estratigráfico de las calicatas de muestreo se describe en las tablas 4, 5, 6 respectivamente. Las muestras fueron analizadas en laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA). Los resultados (Tabla 7) fueron utilizados para el procesamiento de datos en el software RocScience (Slide v6.00).

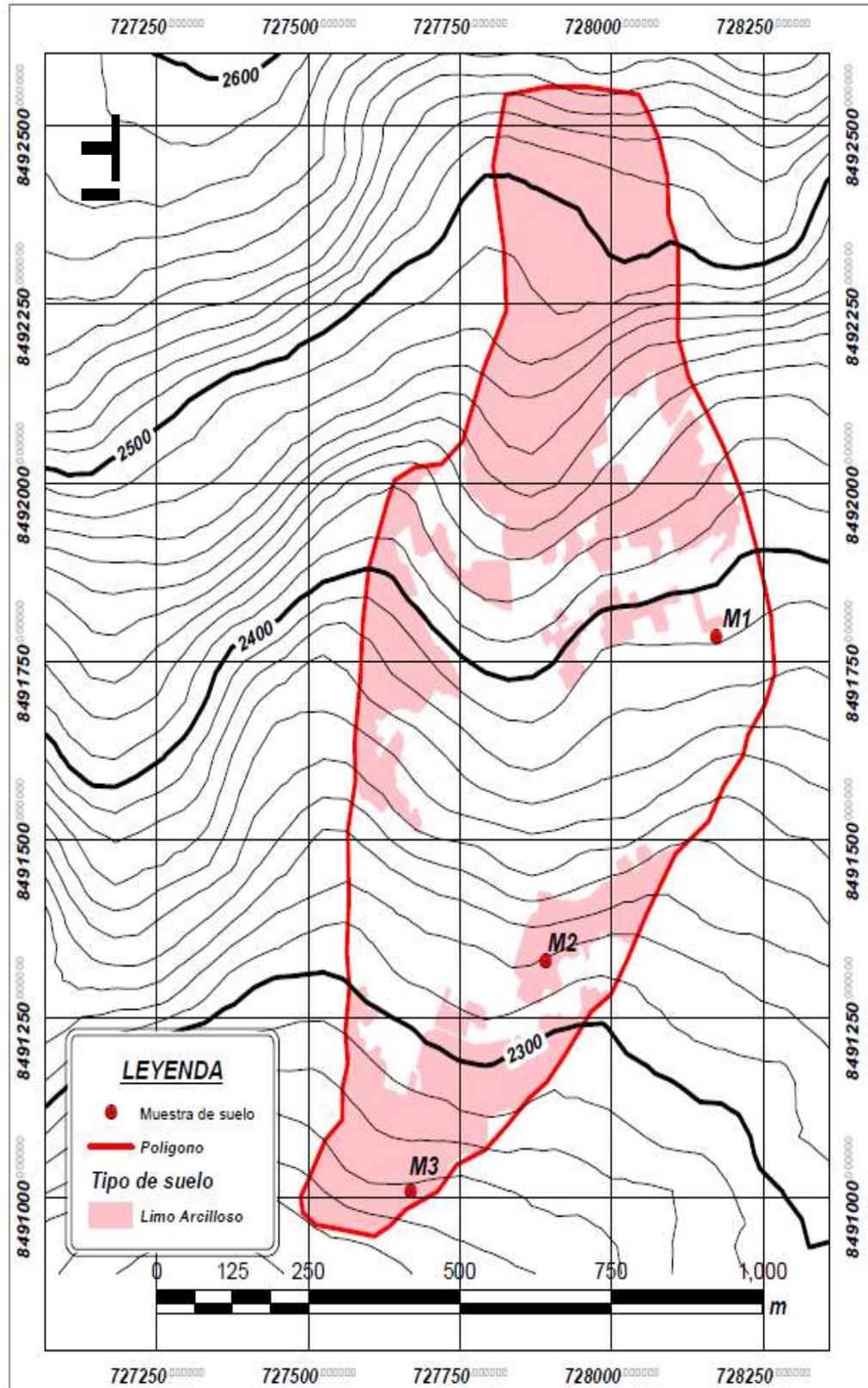


Figura 16. Ubicación de calicatas

Tabla 3

*Descripción de las calicatas de muestreo*

Muestra	Coordenadas	Descripción
M1	728173 E 8491784 N	Hasta 0,40 m suelo orgánico, con presencia de raíces Hasta 1,60 m estrato de grava de piedra angulosa de hasta 3 pulgadas de diámetro, de color beige oscuro de matriz de arcilloso. Hasta 2,40 m estrato uniforme, suelo limo arcilloso de color marrón oscuro.
M2	727891 E 8491329 N	Hasta 1,60 m estrato uniforme, suelo limo arcilloso con piedras angulosas de hasta 2 pulgadas de diámetro, de color marrón grisáceo, compacto poco húmedo. Hasta 2,00 estrato de grava de piedra angulosa de hasta 3 pulgadas de diámetro, de color beige oscuro de matriz de arcilloso heterogéneo. Hasta 2,80 m estrato uniforme, suelo limo arcilloso poco húmedo de color marrón oscuro. A 2,80 m presencia de agua subterránea
M3	727668 E 8491006 N	Hasta 0,60 m estrato suelo uniforme con presencia de raíces en la parte superior, de color marrón grisáceo oscuro. Hasta 2,20 m estrato de piedra subangular, caliza, hasta 8 pulgadas de diámetro, matriz gravo arenoso de color gris claro, compacto.

Tabla 4

*Perfil estratigráfico calicata 1 (M1)*

PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA 1 (M1)		
PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN DEL SUELO	IMAGEN
-0,20	Suelo orgánico, con presencia de raíces, de color marrón oscuro.	
-0,40		
-0,60	Estrato de grava de piedra angulosa de hasta 3 pulgadas de diámetro, de color beige oscuro de matriz de arcilloso.	
-0,80		
-1,00		
-1,20		
-1,40		
-1,60	Estrato uniforme, suelo limo arcilloso de color marrón oscuro.	
-1,80		
-2,00		
-2,20		
-2,40		

Tabla 5

*Perfil estratigráfico calicata 2 (M2)*

<b>PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA 2 (M2)</b>		
PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN DEL SUELO	IMAGEN
-0,20	Estrato uniforme, suelo limo arcilloso con piedras angulosas de hasta 2 pulgadas de diámetro, de color marrón grisáceo.	
-0,40		
-0,60		
-0,80		
-1,00		
-1,20		
-1,40		
-1,60	Estrato uniforme, suelo limo arcilloso de color marrón y color beige.	
-1,80		
-2,00	Estrato uniforme, suelo marrón oscuro poca presencia de piedras de 1 pulgada de diámetro.	
-2,20		
-2,40		
-2,60		
-2,80	Nivel freático (aguas subterráneas)	

Tabla 6

*Perfil estratigráfico calicata 3 (M3)*

<b>PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA 3 (M3)</b>		
PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN DEL SUELO	IMAGEN
-0,20	Estrato suelo uniforme con presencia de raíces, de color marrón grisáceo oscuro	
-0,40		
-0,60		
-0,80	Estrato de piedra subangular, caliza, hasta 8 pulgadas de diámetro, matriz gravo arenoso de color gris claro, compacto.	
-1,00		
-1,20		
-1,40		
-1,60		
-1,80		
-2,00		
-2,20		

Los trabajos en gabinete se realizaron en base a la información obtenida en campo que permitieron determinar los fenómenos geohidrológicos que influyen en el movimiento en masa en la urbanización Bellavista – Abancay.

Tabla 7

*Propiedades determinadas de las muestras de suelos*

Muestra	Coordenadas	Cohesión c (kN/m <sup>2</sup> )	Áng. fricción ø (°)	Densidad γ (kN/m <sup>3</sup> )	Tipo de suelo
M1	728173 E 8491784 N	96,105	36,5	17,162	Limo y arcilla
M2	727891 E 8491329 N	124,544	35,0	16,475	Limo y arcilla
M3	727668 E 8491006 N	153,964	21,50	18,829	Grava y bolonería

Fuente: Laboratorio de mecánica de suelos de la UNAMBA – GEOMECH

• **Suelo limo – arcilla**

Las muestras M1 y M2 son del mismo tipo de suelo, sin embargo, difieren en sus propiedades por lo que se ha determinado el promedio.

$$\text{Cohesión (c)} = 110,325 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Ángulo de fricción interna (ø)} = 35,75^\circ$$

$$\text{Densidad (γ)} = 16,819 \text{ kN/m}^3$$

• **Suelo grava – bolonería**

$$\text{Cohesión (c)} = 153,964 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Ángulo de fricción interna (ø)} = 21,5^\circ$$

$$\text{Densidad (γ)} = 18,829 \text{ kN/m}^3$$

**4.2.3 Volumen de masa de suelos potencialmente inestable**

El área de estudio está constituida por la urbanización Bellavista ubicado al lado oeste de la ciudad de Abancay, en un área de 699731 m<sup>2</sup> (70 ha), parte de la expansión urbana (Fig. 14), zona potencialmente peligrosa por amenaza de deslizamiento.

La textura, la estructura del suelo y la cantidad de materia orgánica en el suelo influyen en el movimiento del agua en el suelo (infiltración y percolación) y determinan la capacidad de retención del agua (Quiring *et al.*, 2015). Los suelos arcillosos se contraen y se hinchan en respuesta a los cambios en la humedad del suelo (Johnson *et al.*, 2020). Las condiciones de lluvia afectan el estado de saturación del agua del talud durante la infiltración del agua de lluvia y afectarán aún más las características de evolución del factor de seguridad a diferentes profundidades (Zhang *et al.*, 2020).

Para determinar la influencia de la infiltración de las aguas pluviales en el movimiento en masa de suelos, se ha considerado la precipitación promedio anual del año 2012 que fue de 1012,80 mm, históricamente la precipitación anual más alta de los últimos 50 años, que generó una infiltración de 230948,78 m<sup>3</sup> de agua con un peso equivalente a 2264833,89 kN, y causó movimiento complejo y deslizamiento, de peligro alto y vulnerabilidad muy alto. Debido al calentamiento global, se prevé para el futuro incremento de las precipitaciones pluviales respecto al año 2012 que provocaran eventos similares o más catastróficos.

Para determinar el volumen de la precipitación pluvial, se ha usado el software ArcMap versión 10.5 obteniéndose los siguientes resultados:

#### **Área y volumen total de la zona en estudio**

$$2D = 700000 \text{ m}^2$$

$$3D = 717973 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen} = 13868940,50 \text{ m}^3$$

#### **a) Peso del suelo limo y arcilla sin considerar la precipitación pluvial (P<sub>1</sub>):**

$$P_1 = V_1 * \gamma$$

**Ecuación 4.1**

Donde:

P<sub>1</sub>: peso del suelo limo y arcilla sin considerar la precipitación pluvial (t)

V<sub>1</sub>: volumen del suelo limo y arcilla (m<sup>3</sup>)

γ: peso específico suelo limo y arcilla (kN/m<sup>3</sup>)

$$P_1 = 13868940,50 \text{ m}^3 * 16,819 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 233261710,27 \text{ kN}$$

**b) Peso del suelo del área libre considerando la infiltración de precipitación pluvial (P<sub>2</sub>)**

Las áreas libres, expuestas a la infiltración de las precipitaciones están cubierto por superficies de cultivo y vegetación, en una extensión de 345500 m<sup>2</sup> (Fig.10). El volumen de agua infiltrada generó un peso de 2264833,89 kN (Anexo 2) con una carga distribuida de 6,56 kN/m<sup>2</sup> (Tabla 8), la misma que influye en el movimiento en masa de suelos.

Tabla 8

*Carga distribuida por áreas*

Zonas	Área (m <sup>2</sup> )	Precipitación promedio anual (mm)	Volumen de lluvia (m <sup>3</sup> )	Volumen de infiltrado (m <sup>3</sup> )	Peso del agua infiltrada (kgf)	Peso del agua infiltrada (kN)	Carga distribuida (kN/m <sup>2</sup> )
Área 1	71000	1012.80	71908.80	47459.81	47459808.00	465421.73	6.56
Área 2	2600	1012.80	2633.28	1737.96	1737964.80	17043.61	6.56
Área 3	22500	1012.80	22788.00	15040.08	15040080.00	147492.80	6.56
Área 4	44600	1012.80	45170.88	29812.78	29812780.80	292363.51	6.56
Área 5	3100	1012.80	3139.68	2072.19	2072188.80	20321.23	6.56
Área 6	5700	1012.80	5772.96	3810.15	3810153.60	37364.84	6.56
Área 7	1000	1012.80	1012.80	668.45	668448.00	6555.24	6.56
Área 8	195000	1012.80	197496.00	130347.36	130347360.00	1278270.94	6.56

#### 4.2.4 Análisis de factor de seguridad

El software Slide es una herramienta eficaz para el análisis y obtención del factor de seguridad en taludes y diseñar métodos de corrección de la estabilidad (Medina y Cartaya, 2018).

El desplazamiento de masas de suelos en la urbanización Bellavista es del tipo de reptación por consiguiente para el análisis del factor de seguridad se empleó las superficies de falla no circulares, que considera las siguientes características del modelo:

- Talud compuesto de varios materiales con una capa o estrato débil

- Presión de poros definida por la napa freática
- Carga externa uniformemente distribuida
- Búsqueda en bloque para superficies no circulares

La carga distribuida del peso de la infiltración de las aguas pluviales es  $6,56 \text{ kN/m}^2$  (Tabla 8). Por consiguiente, esta carga distribuida se utilizó para determinar el factor de seguridad. En el tipo de suelo el tipo de esfuerzo (Strength type) considerado es el de Mohr – Coulomb ya que es el más recomendado para el análisis de fallas en suelos. El método con la cual se ha determinado el análisis de factor de seguridad es el método de Janbu simplificado (Janbu simplified) por ser el más riguroso que otros métodos a considerar.

#### 4.2.4.1 Rotura no circular. Método simplificado de Janbu

Según Ortuño (2004) en los métodos de Fellenius y Bishop la condición fundamental a satisfacer es la de equilibrio de momentos. En ninguno de los dos casos se satisface el equilibrio de fuerzas horizontales. Por lo que se tiene que renunciar a una de las ecuaciones de equilibrio, dado que existen otras situaciones y mecanismos de rotura en los que, también intuitivamente, el equilibrio en la horizontal parece más relevante. Esto sería los deslizamientos marcadamente traslacionales. Para este tipo de situaciones, Janbu (1955) desarrolló un método de rebanadas, en el que la ecuación de equilibrio fundamental es precisamente la de fuerzas horizontales (no cumple el equilibrio de momentos). El procedimiento se puede emplear para cualquier forma de superficie de deslizamiento, que habitualmente hay que definir punto a punto a partir de consideraciones geológicas.

Resolviendo el equilibrio de las fuerzas horizontales, se obtiene la siguiente expresión para factor de seguridad:

$$F_f = \frac{\sum_1^n \left\{ [c'_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \phi'_i] \cdot \frac{1}{n \alpha_i} \right\}}{\sum_1^n W_i \cdot \tan \alpha_i} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde:

$c'_i$ : cohesión

$b_i$ : ancho de dovelas (rebanada)

$W_i$ : peso de cada dovela (rebanada)

$u_i$ : resultante de las presiones intersticiales que actúan en la base de la rebanada

$\phi'_i$ : ángulo de fricción

$\alpha_i$ : ángulo que forma la inclinación de la rebanada con la horizontal

$$n_\alpha = \cos^2 \alpha_i \cdot \left( 1 + \tan \alpha_i \cdot \frac{\tan \phi'_i}{F_f} \right)$$

**Ecuación 4.3**

Donde:

$F_f$ : dado que el coeficiente de seguridad se determina a partir del equilibrio de fuerzas, a los efectos de estas líneas se denominará  $F_f$ .

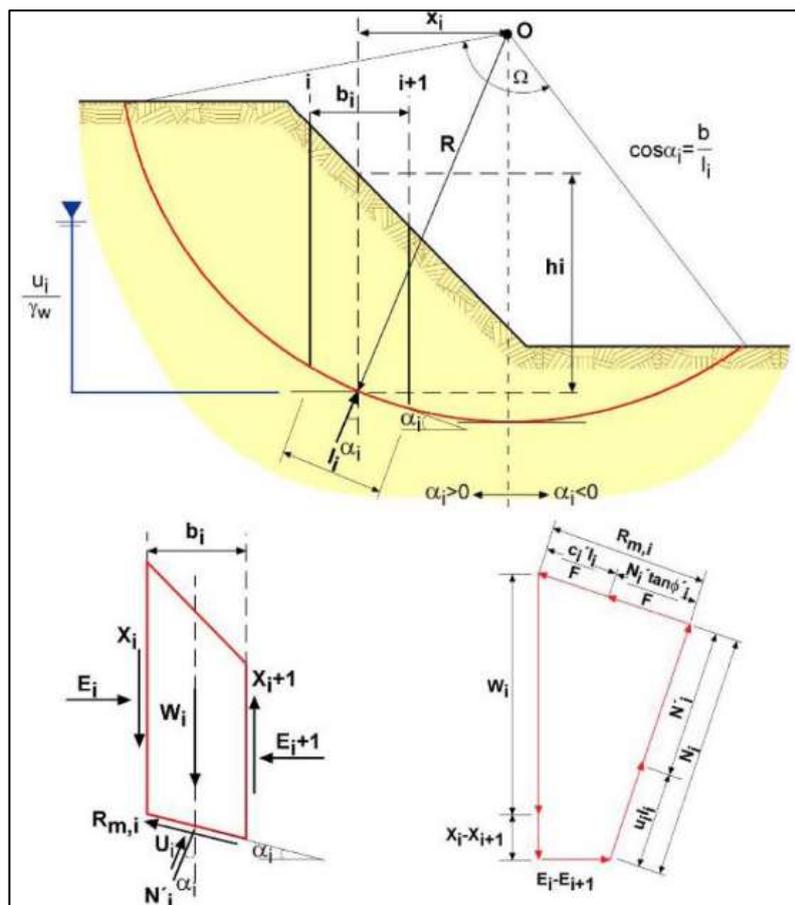


Figura 17. Geometría de una rebanada y fuerzas actuantes

Fuente: Abad *et al.* (2004)

Posteriormente, Janbu (1973) introdujo un factor empírico de corrección ( $f_0$ ) sobre el coeficiente de seguridad anterior con el fin de mejorar los resultados. Dicho factor, dependiente del tipo de suelo y de la geometría del deslizamiento.

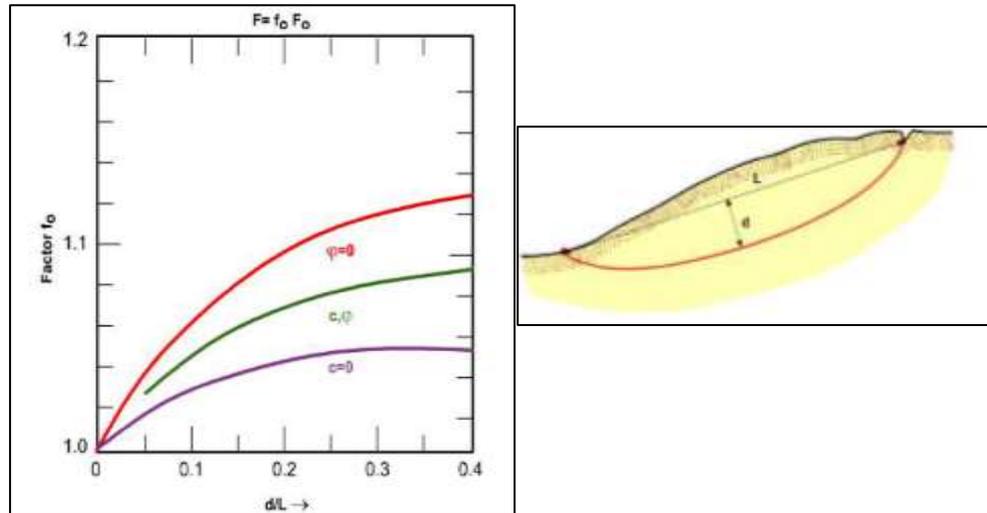


Figura 18. Factor de corrección  $f_0$  para el método de Janbu ( $F=f_0.F_r$ )

Fuente: Abad et al. (2004)

#### 4.2.4.2 Factor de seguridad por el método de Janbu simplificado

Para la configuración de opciones de superficie (Surface Options), en búsqueda en bloque el rango de los valores angulares: ángulo de proyección izquierdo (Left Projection Angle) y el ángulo de proyección derecha (Right Projection Angle), tanto como ángulo de inicio y ángulo final respectivamente, se ha tomado en cuenta el plano de contacto entre los tipos de suelo y posible plano de falla como se puede apreciar en la figura 19.

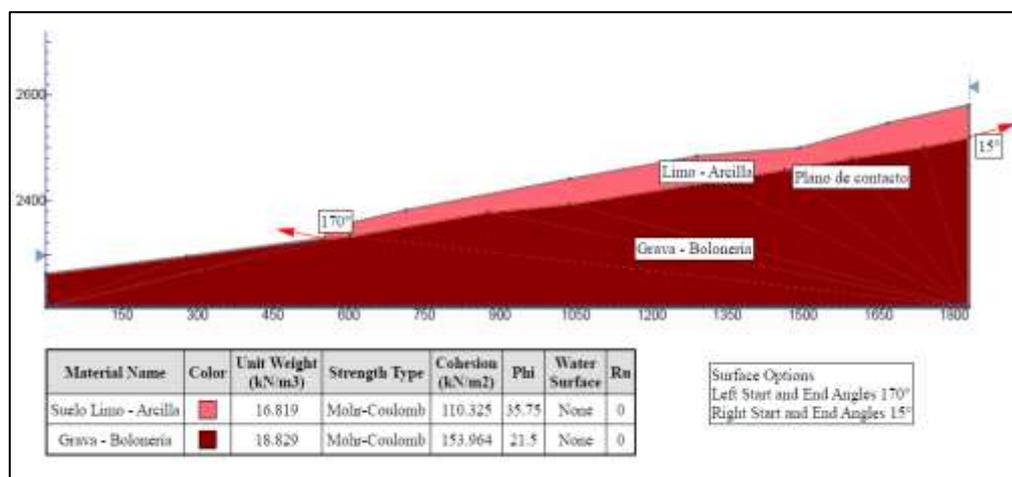


Figura 19. Configuración de las propiedades de suelos y los ángulos

### a) Búsqueda por bloque

En el caso de movimiento en masas de suelos en la urbanización Bellavista de acuerdo a las características que presentan los estratos de los suelos (Limo-arcilla y Grava-bolonería) se ha identificado como aquellas masas deslizantes no circulares limitado por el plano de contacto entre los dos tipos de suelos (Fig. 19). El tipo de suelo grava y bolonería es de formación geológica más estable anterior al tipo de suelo limo y arcilla que es de formación más reciente. La excavación en la calicata 2 (M2) confirma el nivel freático, por consiguiente, es necesario considerar la línea piezométrica (Fig.20) que establece la superficie de agua contenido en el suelo limo arcillosa. El análisis de factor de seguridad sin considerar la carga distribuida por efecto de la infiltración muestra 0,943 (Fig. 20) por debajo de 1, que predice una probabilidad de falla.

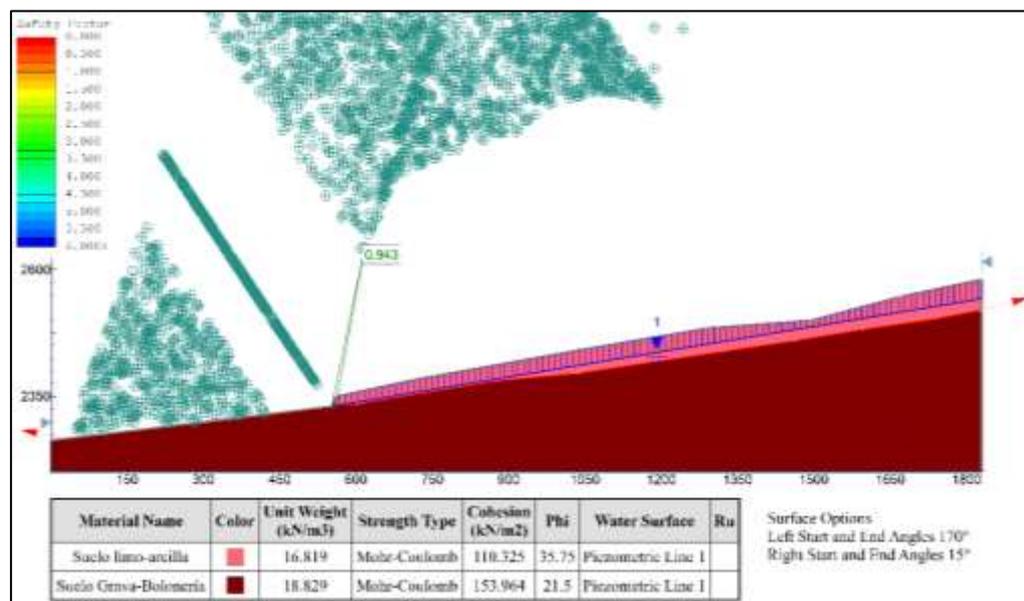


Figura 20. Factor de seguridad sin considerar la carga distribuida causada por la infiltración de las aguas pluviales.

Como consecuencia de la infiltración en áreas de cultivo y pastos naturales, se incluye una carga distribuida de 6,56 kN/m<sup>2</sup> que muestra un factor seguridad de 0,976. Según los resultados de los análisis realizados, el incremento del peso de la infiltración contribuye en el factor de seguridad, sin embargo, es menor que 1, por consiguiente, la zona en estudio es vulnerable al movimiento en masa de suelos.

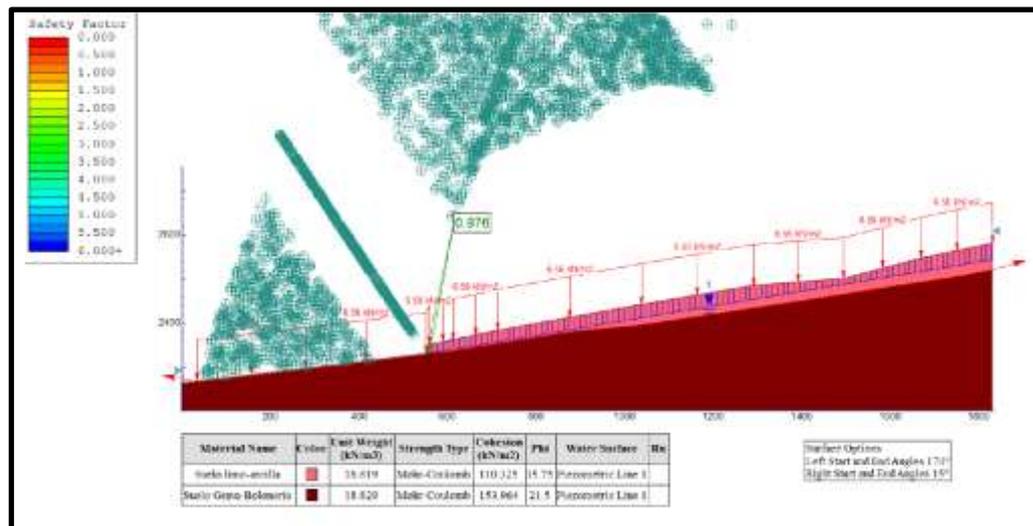


Figura 21. Factor de seguridad considerando la carga distribuida por la infiltración de las aguas pluviales.

#### 4.2.5 Amenaza por deslizamiento

Para fortalecer la hipótesis planteada de la influencia de la infiltración de las precipitaciones pluviales en el suelo, en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay, se ha determinado la amenaza de deslizamiento en la urbanización Bellavista empleando la metodología propuesta por Mora y Vahrson (1994), es un método preliminar y que posteriormente deben ser analizadas de forma más detallada y profundo. A la vez indican que la forma de combinar los valores (multiplicación y adición) representa de una manera relativamente fiel, la interacción de los procesos, según su propia experiencia.

La particularidad de la metodología se halla en la combinación de factores de susceptibilidad y detonantes; y los indicadores: índice de influencia de la pendiente, índice de influencia de la litología, índice de influencia de la cobertura vegetal, el índice de relieve relativo, índice de influencia de la precipitación pluvial y el índice de influencia de la actividad sísmica.

Los valores de ponderación (Tabla 9) para determinar la amenaza por deslizamiento como consecuencia de la precipitación pluvial en la urbanización Bellavista, se ha detallado para cada área, considerando el índice geomorfológico bajo (igual a 1) debido a que existen colinas medianas y zonas deprimidas, y excluyendo el índice de sismicidad, debido a que en la ciudad de Abancay la sismicidad está considerado por debajo del nivel V (bajo) en la escala de Mercalli modificado.

Tabla 9

*Clasificación de los factores de susceptibilidad y detonantes*

Factor	Indicador	Descripción	Ponderación	
			Cualitativo	Peso
Susceptibilidad	Pendiente	De 0 a 12%	Bajo	1
		De 13 a 40%	Medio	2
		≥ 41%	Alto	3
	Litológico	- Aluvión compacto permeable; rocas intrusivas ligeramente fisuradas, basalto.	Bajo	1
		- Alto grado de meteorización de las litologías mencionadas anteriormente.	Medio	2
		- Rocas extremadamente alteradas; suelos residuales, coluviales y aluviales con baja resistencia cortante; niveles freáticos poco profundos.	Alto	3
	Cobertura Vegetal	- Bosques maduros y secundarios (alta protección)	Bajo	1
		- Matorrales y ichu, cultivos anuales reforestación (baja protección)	Medio	2
		- Pastizales, suelos sin vegetación (sin protección)	Alto	3
	Geomorfológico	- Colinas medianas, zonas deprimidas	Bajo	1
- Vertientes convexas y cóncavas		Medio	2	
- Taludes de derrubios, relieves escarpados, valles encañonados		Alto	3	
Detonantes	Precipitación anual	< 200 mm	Bajo	1
		201 – 300 mm	Medio	2
		>300 mm	Alto	3
	Sismicidad (Mercalli Modificadas)	V	Bajo	1
		VII	Medio	2
		VIII	Alto	3

Fuente: Mora y Vahrson (1994).

**Amenaza de deslizamiento (AD)**

$$AD = FS \times FD$$

**Ecuación 4.4**

Donde:

FS: factor de susceptibilidad

FD: factor desencadenante

$$FS = f_P * f_G * f_{CV} * f_{GE}$$

**Ecuación 4.5**

$$FD = f_{Ll} + f_S$$

**Ecuación 4.6**

Donde:

$f_p$ : índice de pendiente

$f_G$ : índice de litología (geología)

$f_{cv}$ : índice de cobertura vegetal

$f_{GE}$ : índice de geomorfología

$f_{LI}$ : índice de lluvias

$f_s$ : índice de sismicidad

Procesado los datos (Anexo 8) para determinar la amenaza de deslizamiento se concluye que existen tres zonas (Fig. 22), zona sur nivel bajo, zona norte en mayor porcentaje nivel bajo y en menor porcentaje nivel muy bajo; y zona centro en porcentaje muy pequeño nivel moderado. Dado los resultados de la amenaza de deslizamiento, debe tomarse con más énfasis y con detalle el estudio del movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista y las zonas adyacentes ya que son zonas potencialmente inestables.

La topografía de la urbanización Bellavista, es irregular con una pendiente que varía desde 1,27 % (mínimo) hasta 57,68 % (máximo) (Tabla 2). El estudio geológico local deslinda que no hay presencia de cuerpos rocosos, sin embargo, precisa la existencia de suelo superficial de limo- arcilla y a profundidad suelo de grava y bolonería (Fig. 8 y 9). La expansión urbana en la ciudad de Abancay se ha expandido de forma desordenada sin planificación ocupando áreas potencialmente inestables como es el caso de la urbanización Bellavista. La población, que se encuentra en un proceso de constante crecimiento, trae consigo una expansión urbana en áreas susceptible a la ocurrencia de peligros geohidrológicos (Medina y Gonzales, 2018).

A partir de los estudios realizados se muestra que gran parte de la cuenca del río Mariño es altamente susceptible a los movimientos en masa. En este sentido, parece que los elementos determinantes para la ocurrencia de eventos geo-hidrológicos en el área son por un lado el agrietamiento particularmente denso que muestran los macizos estudiados, la presencia de depósitos de remoción antiguos asociados a la actividad glaciaria pre-

existente en la zona estudiada y la acción del agua tanto superficial en forma de escorrentía, como sub-superficial proveniente de la infiltración (Villacorta *et al.*, 2016).

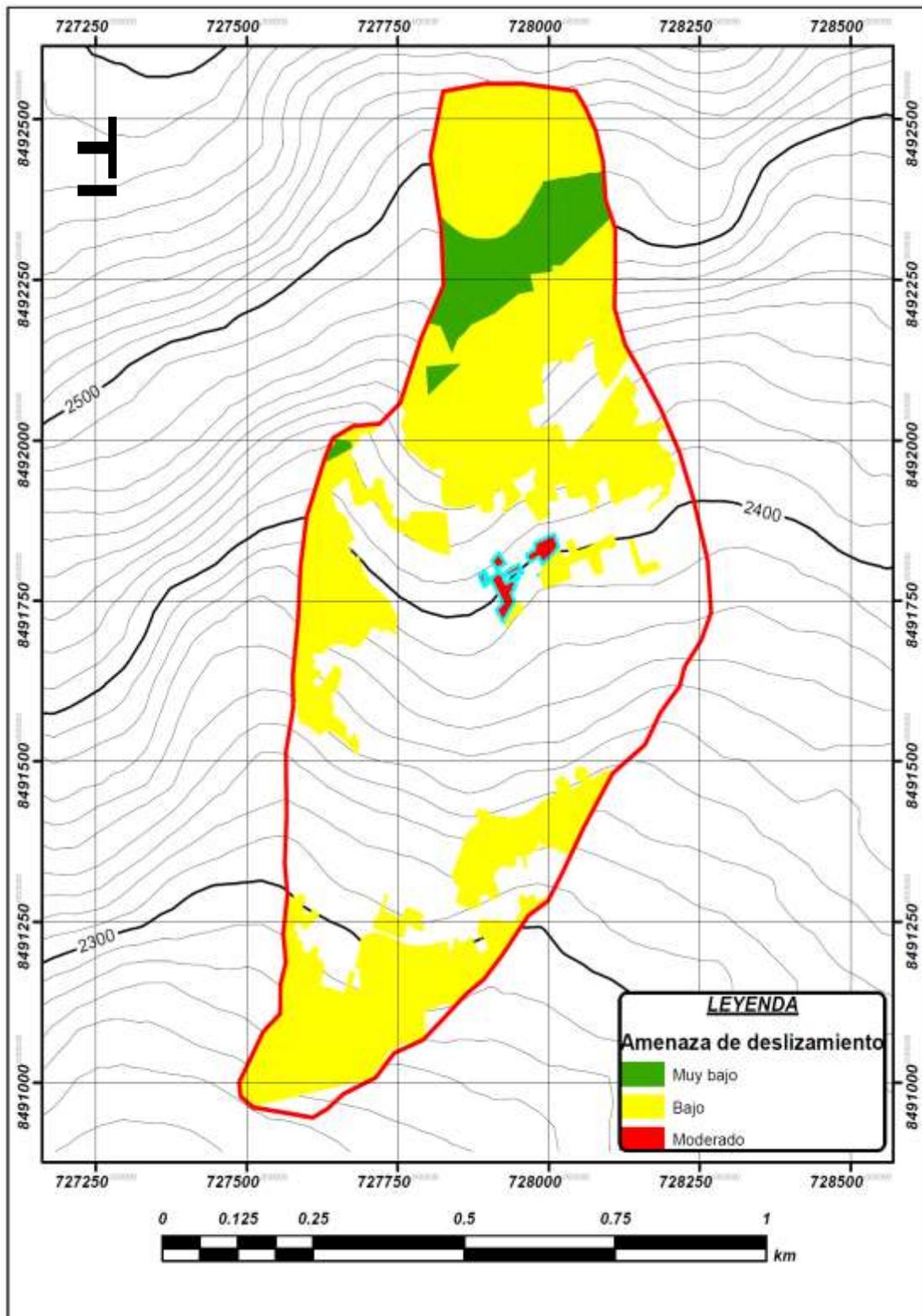


Figura 22. Amenaza de deslizamiento en la urbanización Bellavista

Se deduce que la remoción en masa de la urbanización Bellavista inicialmente fue deslizamiento traslacional, debido a que la masa ha sido desprendida de su posición original que cubría las rocas que actualmente se pueden visualizar su afloramiento en la parte norte de la ciudad de Abancay, en las faldas del santuario Ampay. Concluida este primer movimiento, el cuerpo del material desplazado se constituye de tres partes (Fig. 12) según la dirección de su desplazamiento: Cabeza de deslizamiento, cuerpo que muestra mayor volumen de material acumulado y pie de deslizamiento.

Actualmente el proceso de remoción en masa de suelos en la urbanización Bellavista es por movimiento de reptación, evento que no es muy notorio, puede estar desplazándose y como consecuencia de ello se estarían generando grietas en las viviendas de adobe, material noble (Fig. 13) y la plataforma de la carretera Panamericana (Foto 4).

La lluvia suele ser el principal factor desencadenante de la ocurrencia de deslizamientos de tierra, pero existen otros factores, como la actividad meteorológica previa, la topografía, las propiedades del suelo y la vegetación, que también juegan un papel clave (Rodríguez *et al.*, 2021). Se prevé que a partir del año 2050 se sucedan precipitaciones extremas con valores superiores a 323 mm en 24 horas, lo que incrementará el riesgo de catástrofe por remociones en masa (Sánchez, 2011).

La geología de superficie y la pendiente son las variables fundamentales para la generar amenazas a los procesos de remoción en masa por las precipitaciones, siendo las áreas más susceptibles a los procesos de remoción en masa, las cuencas altas y medias bajas (Marcano y Cartaya, 2013).

Según la geología regional (Fig.6) en la cuenca del río Mariño (Abancay) existen depósitos de la edad cuaternaria. Estos depósitos se encuentran en las laderas de los cerros y en el fondo de los valles. Se ha diferenciado por su origen los siguientes tipos: **Depósito Coluvial (Qh-co)** ha sido originado por efecto de la gravedad, vuelco y caída de rocas que se acumularon en las laderas como pedregales. Se encuentra en los flancos de los valles, especialmente en Limapata, Chuyllurpata, Kerapata, Peraspata, Pumaranra, Corralpata, etc. Estos depósitos están compuestos por bloques angulosos heterométricos y de naturaleza litológica casi homogénea. Los bloques más grandes se depositan en la base y los finos hacia la parte superior. Poseen matriz arcillo – limosa. **Depósito Aluvial (Qh-al)** este tipo de depósito se observa ampliamente en los sectores de San Gabriel, Pachachaca Alta, San Antonio y en la misma ciudad de Abancay. Está compuesto por

gravas de naturaleza variable en matriz areno – limosa, transportadas por los cursos hídricos y depositadas en terrazas y abanicos (INGEMMET, 2019).

Realizado el análisis descriptivo se procede a contrastar la hipótesis específica.

- **Hipótesis específica 2**

Que enuncia: La infiltración de las precipitaciones pluviales en el suelo, influyen en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.

**a) Planteamiento de la hipótesis**

**Hipótesis nula  $H_0$**

**$H_0$ :** La infiltración de las precipitaciones pluviales en el suelo, no influyen en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.

**Hipótesis alternativa  $H_2$**

**$H_2$ :** La infiltración de las precipitaciones pluviales en el suelo, influyen en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.

**b) Nivel de significancia.**

$$\alpha = 0,05 \text{ (5\%)}$$

**c) Prueba estadística.**

El modelo estadístico utilizado para evaluar el efecto de una variable sobre otra es decir la variable dependiente que es movimiento de masas de suelos en función de la variable independiente que es la infiltración de las aguas pluviales en el suelo es la regresión logística multinomial debido a que la variable respuesta o dependiente es una variable cualitativa. Para esta prueba se recurrió al software Jamovi.

**d) Cálculo de volúmenes**

López *et al.* (2016) propone los siguientes modelos matemáticos para las estimaciones anuales de volumen: precipitación pluvial, escurrimiento e infiltración.

- **Volumen de precipitación**

$$VP = P * AC$$

**Ecuación 4.7**

Donde:

VP: volumen anual de precipitación (m<sup>3</sup>)

P: precipitación media anual (m)

AC: área de la cuenca (m<sup>2</sup>)

• **Volumen de escurrimiento**

$$Es = AC * C * P$$

**Ecuación 4.8**

Donde:

Es: volumen promedio que puede escurrir (m<sup>3</sup>)

AC: área de cuenca (m<sup>2</sup>)

C: coeficiente de escurrimiento, adimensional, sus valores varían de 0,1 a 1

P: precipitación media anual en la cuenca (m)

Tabla 10

*Coefficiente de escorrentía método racional*

Cobertura Vegetal	Tipo de Suelo	Pendiente del terreno				
		Pronunciada >50%	Alta >20%	Media >5%	Suave >1%	Despreciable <1%
Sin vegetación	Impermeable	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
	Semipermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Permeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
Cultivos	Impermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Semipermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Permeable	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
	Semipermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Permeable	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15
Hierba, grama	Impermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Semipermeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
	Permeable	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10
Bosques, densa vegetación	Impermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Semipermeable	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
	Permeable	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05

Fuente: (Ministerio de Transporte y comunicaciones, 2012).

Se precisó el coeficiente de escorrentía (tabla 11) para cada área de la zona de estudio, teniendo como referencia las áreas delimitadas (Fig. 10) y sus pendientes respectivas (Fig. 11).

Tabla 11

*Determinación de coeficiente de escorrentía, para la zona de estudio*

Zona	Área (m <sup>2</sup> )	Pendiente	Cobertura vegetal	Tipo de suelo	Coef. de escorrentía
A1	71000	>5%	Cultivos	Permeable	0,30
A2	2600	>5%	Pastos, vegetación ligera	permeable	0,25
A3	22500	>5%	Cultivos	Permeable	0,30
A4	44600	>20%	Cultivos	Permeable	0,35
A5	3100	>20%	Hierba, grama	Semipermeable	0,45
A6	5700	>5%	Hierba, grama	Semipermeable	0,40
A7	1000	>5%	Hierba, grama	Semipermeable	0,40
A8	195000	>20%	cultivo	Permeable	0,35

El coeficiente de escorrentía por ponderación es **C=0,34**

• **volumen infiltrado anual**

$$I_t = (1 - C) * P * AC$$

**Ecuación 4.9**

Donde:

It: volumen total infiltrado (m<sup>3</sup>)

P: precipitación media anual (m)

AC: área de la cuenca (m<sup>2</sup>)

C: coeficiente de escurrimiento (adimensional)

En la presente investigación los antecedentes de la precipitación que generan la infiltración y este a su vez influyen en el evento de movimiento de masas, se ha considerado desde el año 1970 hasta el año 2019 (50 años), la misma se muestra en el Anexo 1.

La base de datos del Anexo 3 considera el peso del agua infiltrada, el periodo de los eventos ocurridos (movimiento en masa de suelos) en los años 1951, 1997, 2010,2011 y 2012, considerando el peligro y la vulnerabilidad que se puede generar (Tabla 1).

Por tratarse de valores cualitativos se utilizó la regresión logística multinomial para analizar la influencia de la infiltración de las aguas pluviales en el movimiento en masa de suelos. Los datos fueron procesados en el software estadístico jamovi.

De la tabla 12 el valor del modelo de ajuste según R<sup>2</sup> de Nagelkerke es 0,237 lo que indica que la relación del peso de la infiltración es débil, pero es significativo (Tabla 13) el peso de la infiltración y el evento de movimiento en masa de suelos tiene un p – value de 0,039

menor a 0,05 nivel de significancia porque es significativo, lo que implica que el peso de la infiltración de las aguas pluviales influye en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista.

Tabla 12

*Regresión logística multinomial**Medidas de ajuste del modelo*

Modelo	Desvianza	AIC	R <sup>2</sup> <sub>McF</sub>
1	35,7	51,7	0,237

Tabla 13

*Prueba Omnibus de razón de verosimilitud*

Predictor	X <sup>2</sup>	gl	p
Peso del agua infiltrada (kN)	10,1	4	0,039

El valor de  $p > 0.05$  no afirma que la  $H_0$  sea verdadera, ya que puede ocurrir que la diferencia sea real y el estudio no tenga potencia para detectarla,  $p$  solo indica la probabilidad de que la diferencia observada se deba al azar. La importancia la establece el investigador. Puede haber resultados con un valor  $p$  estadísticamente significativa que carezcan de relevancia, valores de  $p$  no significativos que pueden tener importancia (Molina, 2017).

De la tabla 14 el valor **20,82 (Z)** indica que el peso del agua infiltrada de la precipitación pluvial es fuertemente influyente a movimiento complejo y deslizamiento respecto a los demás eventos de movimiento en masa de suelos como son: Movimiento complejo, deslizamiento y flujo, y deslizamiento.

Los  $p$  – values respecto a la influencia del peso del agua infiltrada sobre movimiento complejo es **0,168** y deslizamiento y flujo **0,054**, estos valores indican que los eventos son ocasionales y no consecutivos, sin embargo, los eventos deslizamiento, y movimiento complejo y deslizamiento tienen valores menores ( $< 0,001$ ) a 0,05 valor que indica que el peso de la infiltración de las aguas pluviales es influyente en los eventos mencionados.

Tabla 14

*Coefficientes del modelo – Evento*

Evento	Predictor	Estimador	EE	Z	p
Movimiento complejo – Sin evento	Constante	-4,05	3,32e-13	-1,22e-13	<0,001
	Peso del agua infiltrada (kN)	6,85e-7	4,97e-7	1,38	<b>0,168</b>
Deslizamiento y flujo – Sin evento	Constante	-5,63	4,26e-13	-1,32e-13	<0,001
	Peso del agua infiltrada (kN)	1,29e-13	6,69e-7	1,92	<b>0,054</b>
Deslizamiento – Sin evento	constante	-9,56	3,19e-13	-3,00e-13	<0,001
	Peso del agua infiltrada (kN)	3,73e-6	5,71e-7	6,54	<b>&lt;0,001</b>
Movimiento complejo y deslizamiento – Sin evento	Constante	-28,70	2,85e-13	-1,01e-14	<0,001
	Peso del agua infiltrada (KN)	1,30e-5	6,24e-7	<b>20,82</b>	<b>&lt;0,001</b>

Fuente: software jamovi

### 4.3 Discusión

Habiendo sido el objetivo general de esta investigación determinar las características geohidrológicas que influyen en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay. Para lograr este objetivo el estudio cuantitativo se constituye desde un estudio de casos similares ocurridos en diversas zonas, acopiando información específicamente sobre movimiento en masa de suelos causados por infiltración de las precipitaciones pluviales.

Según Borga *et al.* (2014) los peligros geohidrológicos son aquellos procesos cuya ocurrencia está relacionado estrechamente a la lluvia, por consiguiente, está relacionado con la capacidad de recepción e infiltración en las rocas y los suelos, y estos a su vez dependen de sus propiedades, pueden ser permeables e impermeables.

El movimiento en masa es originado por las intensas precipitaciones pluviales como indica García *et al.* (2018), y Geertsema y Chiarle (2013). La infiltración de las aguas

pluviales cumple un papel importante en el proceso de los diferentes movimientos en masa que a su vez son influenciados por factores geomorfológicos, geológicos e hidrogeológicos.

Méndez *et al.* (2011) concluyen que los movimientos en masa son fenómenos muy destructivos, por lo que es obligatorio prevenir y mitigar estos desastres en el futuro, ya que los sucesos de movimientos en masa ocasionados por lluvia son una amenaza que cobra el mayor número de víctimas anuales en terrenos montañosos y ambientes tropicales según Aristizábal *et al.* (2019), y Jiménez y Aristizábal (2018).

Pilatasig *et al.* (2022) al evaluar el estado de la actividad de los movimientos en masa, incluyendo la tendencia o dirección de movimiento de los materiales. Concluyen que los movimientos en masa son catalogados como reactivados y toda la zona puede interpretarse como inestable. De manera análoga la urbanización Bellavista forma parte de una extensa área muy susceptible a la ocurrencia de movimiento en masa, siendo el tipo de reptación.

Abril González *et al.* (2016) mencionan que el fenómeno de La Niña de 2010 – 2011 produjo un incremento en las precipitaciones. Como consecuencia de las lluvias intensas producidas entre finales de abril y comienzos de mayo del 2011, se presentaron avenidas torrenciales y grandes deslizamientos, que forzaron la evacuación de alrededor de 200 grupos de familias. Por consiguiente, de producirse similar ocurrencia en la urbanización Bellavista generaría daños irreparables, que afectaría a la vida de sus habitantes y las infraestructuras existentes.

Las inestabilidades locales del suelo que causan movimientos en masa son temas desafiantes en la práctica común de ingeniería de infraestructura, así como en la planificación espacial urbana. Por lo tanto, la geomorfología de movimientos en masa es un tema vital que contribuye al desarrollo de estrategias sostenibles de adaptación al cambio climático (Günther, 2022).

En Perú según Villacorta *et al.* (2012) el 86% de movimientos en masa, se concentran en las categorías de alta a muy alta susceptibilidad en todo el territorio peruano, estos eventos son ocasionados por las precipitaciones pluviales cuando se manifiestan con mayor intensidad, generalmente en los meses de enero, febrero y marzo de cada año. En la región Apurímac se han registrado al 2012 un total de 849 peligros geológicos y 32 zonas críticas

(Villacorta *et al.*, 2013).

La región Apurímac visto en un escenario de riesgo por movimiento en masa presenta riesgo de alto a muy alto. La provincia de Abancay está considerada como zona de riesgo muy alto (Fig. 2), la exposición es variable a través del tiempo y de lugar, dado que la remoción en masa se origina en distintos lugares, sin embargo, en los años del 2010 al 2012 ha sido recurrente. Como menciona Villacorta *et al.* (2016) gran parte de la cuenca del río Mariño es altamente susceptible a la generación de movimientos en masa que son activados por la infiltración durante la época de lluvias y la mayoría de los problemas se presentan en la capa de los suelos por la infiltración de las lluvias (Luza *et al.* 2015).

Actualmente el crecimiento poblacional de la ciudad de Abancay es desordenado, las zonas como la urbanización Bellavista son ocupados para construcción de viviendas y cultivos. Las viviendas son construidas sin dirección y asesoramiento de profesionales, sin autorización de las instituciones involucradas como la municipalidad provincial de Abancay y el Instituto de Defensa Civil (INDECI).

La zona de Bellavista geológicamente está compuesta por dos tipos de suelos limo – arcilla y grava – bolonería. El suelo limo – arcilla reposa sobre grava – bolonería, además contiene el nivel freático, y que, incluido la acción de la infiltración de las lluvias, contribuye a la reptación en masa un volumen aproximado de 13868940,50 m<sup>3</sup>. La existencia de grietas en las infraestructuras evidencia el desplazamiento en masa, el proceso específico que genera esta inestabilidad deriva en parte de la infiltración del agua de lluvia (Villacorta *et al.*, 2016) que reduce la cohesión y fricción del suelo haciendo proclive a su desestabilización. La pendiente del terreno juega un rol importante en el desplazamiento, dependiendo de la magnitud, puede producir desprendimientos catastróficos (Guerra *et al.* 2017). La pendiente en Bellavista varía de 1,27 % hasta 57,68 %, los cambios en el ángulo de pendiente pueden causar movimientos en masa lentos y rápidos, este último ocasionaría daños irreparables si no se tiene monitoreo constante.

Es muy probable que en épocas de estío la velocidad de reptación sea mínimo en comparación a los meses de lluvias intensas (enero a marzo) ya que estas generan mayor infiltración.

No todo el volumen de agua precipitado se infiltra, parte de ella es escurrido por la superficie y el resto se infiltra. En Bellavista la infiltración genera una carga distribuida

de  $6,56 \text{ kN/m}^2$ , dato que se utilizó en el procesamiento en el software Slide, determinándose un factor de seguridad de 0,976, dato que indica la vulnerabilidad al movimiento en masa y probabilidad de falla.

El análisis de amenaza de deslizamiento por la infiltración de las aguas pluviales, revela tres niveles: Nivel muy bajo, Bajo y Moderado. En mayor extensión la amenaza es nivel bajo, seguido de nivel muy bajo y finalmente en pequeña proporción nivel moderado (Fig.22). En conclusión, la urbanización Bellavista no estaría libre de un deslizamiento que pudiera generarse en el futuro está sujeto a deslizamiento.

Desde el punto de vista geohidrológico, la investigación reveló que las aguas de las precipitaciones pluviales y la existencia de aguas subterráneas podrían generar los procesos de movimiento de masas de suelos.

Es evidente que el proceso de remoción de masa en un inicio se generó desde las faldas de la montaña del Ampay por deslizamiento traslacional y una vez concluida, la masa de suelo de limo – arcilla se extiende y se desplace lentamente (reptación) sin formar necesariamente una superficie de ruptura reconocible, sobre un suelo estable como es la grava y bolonería a lo largo de una superficie de pendiente que varía de 1,27 % a 57,68 %. Este movimiento de suelos es influenciado por el incremento del volumen de agua como consecuencia de la infiltración de las precipitaciones pluviales que es retenida y almacenada en las áreas cubiertas por suelos y vegetación, en algunos casos alcanzaría el nivel freático.

Los acontecimientos de los diferentes fenómenos de la remoción de masas de suelos que ocurren a nivel mundial en su mayoría es consecuencia de las intensas precipitaciones pluviales y el fenómeno de movimiento de masa por reptación en la urbanización Bellavista no es ajeno a ello. La ocurrencia del último proceso geohidrológico ocurrido el año 2012 en el cerro Chuyllurpata movilizó 3,6 millones de  $\text{m}^3$  de material que afectó a 173 viviendas, 265 damnificados y 4 fallecidos (Villacorta y Valderrama, 2012). Por consiguiente, un evento de movimiento en masa en la urbanización Bellavista en la actualidad sería de consecuencias muy lamentables, debido al desarrollo poblacional desordenado. Es por esto que esta investigación pone en autos a las autoridades locales y gubernamentales para que tomen las acciones correspondientes a fin de evitar la catástrofe que pudiese ocurrir.

#### 4.4 Aporte metodológico

La configuración física espacial de la ciudad de Abancay, se encuentra estrechamente vinculada al crecimiento poblacional y la urbanización de asentamientos humanos, mostrando en los últimos años la construcción de infraestructuras en zonas vulnerables a movimiento de masas de suelos como es el caso de la urbanización Bellavista, donde se percibe de manera recurrente durante los meses de enero a marzo cuando se manifiestan las precipitaciones pluviales con mayor intensidad respecto a otros meses de cada año.

Ante la falta de trabajo de investigación específicamente del movimiento en masas de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay, la investigación pretende contribuir a las investigaciones efectuadas en la ciudad de Abancay, e incluso a nivel de la región de Apurímac, sobre la caracterización de la geohidrología en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay, con el objetivo de prevenir desastres naturales con pérdidas de vidas humanas que pudiesen suceder, como es el caso de movimiento complejo ocurrido en Ccocha – Pumarana (1997) con daños a la vida humana, heridos y viviendas desaparecidas y varias hectáreas de terreno de cultivo destruidas.

Diversos son los aportes que la tecnología puede brindar para el tratamiento de la información en la actualidad. Dentro de esta investigación, se evidencia la metodología utilizada como son los softwares, para la selección de las fuentes de información, para el procesamiento de datos y para la visualización de las figuras. Arroja resultados precisos en la gestión de la investigación y permite tomar decisiones. Sin embargo, es necesario tener cuidado en la introducción de la información, para evitar resultados erróneos.

Para lograr los objetivos propuestos en esta investigación, se aprovechó la inteligencia artificial (IA) proporcionada esencialmente por los softwares Slide y ArcGis, que automatizaron los diferentes procesos y así obtener el resultado de factor de seguridad y la amenaza de deslizamiento, dichos resultados fueron interpretados de forma apropiada. La Inteligencia Artificial (IA) se define como la ciencia y la ingeniería de la fabricación de máquinas inteligentes, especialmente programas informáticos inteligentes. La IA hoy en día tiene objetivos mucho más concretos y aplicables en el corto plazo. Por ejemplo, se busca que un sistema sea capaz de adquirir información y tomar decisiones del modo más parecido posible a lo que haría un ser humano en tareas concretas (Becerra y Mendoza, 2021). La IA se manifiesta en algoritmos cuyo desempeño es difícil de predecir



o explicar. Actualmente se investiga la aplicación de IA a todos los campos del conocimiento (Temesio, 2022). Los computadores procesan información y toman decisiones. Hasta hace poco, las decisiones que tomaban no eran complejas, pero debido a los incesantes avances tecnológicos que se producen, los sistemas basados en inteligencia artificial están logrando niveles de competencia en la toma de decisiones que en muchos contextos igualan o superan a las personas ( Verdegay *et al.*, 2021).

Aprovechando el aporte de esta investigación en la que se usó la IA, se podrán realizar futuras investigaciones del movimiento en masa de la urbanización Bellavista, utilizando metodologías compatibles y softwares que permitan realizar una evaluación a detalle, ya que esta investigación ha confirmado que esta zona es potencialmente inestable y vulnerable al movimiento en masa, por lo que es necesario monitorear constantemente y así evitar futuros desastres que pudieran ocurrir.

## CONCLUSIONES

- Las infiltraciones de las precipitaciones pluviales que se intensifican en los meses de enero, febrero y marzo influyen en el movimiento en masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay. Debido a que los suelos son infiltrados por las precipitaciones pluviales las cuales saturan los poros e influyen en el movimiento en masa. Su particular comportamiento físico – mecánico a favor de una matriz compuesta por suelo limo y arcillas expansivas durante las precipitaciones intensas y una simultánea saturación, se expresa mediante un incremento de volumen y consiguiente desintegración de sus componentes y movilización por reptación bajo las condiciones de flujo denso.
- Se comprobó que la infiltración de la precipitación pluvial en las rocas no influye en el movimiento de masa de suelos en la urbanización Bellavista. Esto se concluye debido a que en la zona de estudio no hay presencia de roca, la que se confirma con el mapeo geológico local y la excavación de calicatas.
- La infiltración de la precipitación pluvial en el suelo influye en el movimiento de masa de suelos de la urbanización Bellavista. La zona constituye de depósitos cuaternarios bien definidos donde predomina el suelo limo – arcilloso (capa superior) y suelo de tipo grava – bolonería (capa inferior). El suelo limo – arcilloso es infiltrado por las precipitaciones pluviales que genera una carga distribuida de  $6,56 \text{ kN/m}^2$ , carga que influye en el movimiento de masas de suelos y por consiguiente en el factor de seguridad. Siendo este factor 0,976 calculado por el método de Janbu simplificado, menor que 1 por consiguiente hay una probabilidad de deslizamiento de la masa de suelos en la urbanización Bellavista – Abancay.

## RECOMENDACIONES

- En el deslizamiento por reptación de la urbanización Bellavista se recomienda la construcción de drenaje superficial en todas las vías de baja pendiente. Drenos verticales provistos de sistemas de bombeo permanente de agua.
- Monitoreo constante del desplazamiento de la urbanización Bellavista mediante una red de hitos de precisión y registrar constantemente las precipitaciones pluviales y determinar los umbrales.
- Hacer cumplir las normas que prohíben la construcción de viviendas en las zonas potencialmente inestables, demarcación física mediante hitos, muros, enmallados u otros elementos.
- Establecimiento de puntos de alarma para la detección del movimiento en masa en base a sistemas de comunicación inalámbrica.
- Hacer cumplir con los reglamentos de construcción para todos los habitantes que soliciten licencia de construcción por cuanto la gran mayoría de construcciones no cumplen con los reglamentos y las ordenanzas que emanan de las autoridades locales y regionales. Resaltar la importancia económica de adquirir un terreno en una zona de menor riesgo geodinámico.
- Debido a las intensas precipitaciones pluviales que causan movimientos en masas, las cuales significan altos costos económicos, es necesario emprender y fortalecer a nivel local nuevas investigaciones que permitan entender la lluvia como un factor detonante de movimiento en masa.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abril González, N. A., Amaya Reyes, E. G., & Fonseca Peralta, H. A. (2016). *Evaluación de amenazas por movimientos en masa causados en Jericó Boyacá, durante el periodo invernal de 2011 (Threat assessment caused by mass removal in Jericó (Boyacá), during the winter of 2011)*. Ingeniería Investigación y Desarrollo, 16(1), 6. <https://doi.org/10.19053/1900771x.5115>
- Angelini, C. (2018). *Hypothesis testing*. Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology: ABC of Bioinformatics, 1-3, 691-697. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20356-7>
- Aristizábal, E., López, S., Sánchez, O., Vásquez, M., Rincón, F., Ruiz Vásquez, D., Restrepo, S., & Valencia, J. S. (2019). *Evaluación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias para una región de los Andes colombianos estimando la probabilidad espacial, temporal, y magnitud*. Revista Boletín de Geología, 41(3), 85-105. <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n3-2019004>
- Ariyo, S. O., Folorunso, A. F., & Ajibade, O. M. (2011). *Geological and geophysical evaluation of the Ajana area's groundwater potential, Southwestern Nigeria*. Earth Sciences Research Journal, 15(1), 35-40. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-61902011000100005&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-61902011000100005&lng=en&tlng=es)
- Becerra Yoma, N., & Mendoza Inzunza, L. (2021). *Inteligencia artificial aplicada a la medicina respiratoria*. European Respiratory Journal, 58(3), 271-274. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/s0717-73482021000300271>
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., & Jakob, M. (2014). *Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows*. Journal of Hydrology, 518(PB), 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>
- Borgatti, L., & Soldati, M. (2013). *Hillslope Processes and Climate Change*. En Treatise on Geomorphology (Vol. 7). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00180-9>
- Brakensiek, D. L., & Rawls, W. J. (1994). *Soil containing rock fragments: effects on*

- infiltration*. *Catena*, 23(1-2), 99-110. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90056-6](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90056-6)
- Buol, S. W., Southard, R. ., Graham, R. C., & McDaniel, P. A. (2011). *Soil Genesis and Classification*. En I. Wiley John & Sons (Ed.), *Biology of Hevea Rubber* (Sixt Editi).
- Carlotto, V. (2007). *Deslizamiento traslacional de Huamancharpa*, Cusco. 386-404. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2834>
- Chen, Y., Withanage, K. R., Uchimura, T., Mao, W., & Nie, W. (2020). *Shear deformation and failure of unsaturated sandy soils in surface layers of slopes during rainwater infiltration*. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 149, 107001. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107001>
- Claessens, L., Temme, A., & Schoorl, J. (2013). *Mass-Movement Causes: Changes in Slope Angle*. *Earth Systems and Environmental Sciences*, 7, 212-216. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123747396001676?via%3Dihub>
- Condori, E., & Peña, F. (2016). *El Agua subterránea del Manantial Marcamarca - Abancay, Estado Actual y Propuesta de Mejora*. Sociedad Geológica del Perú. <http://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2812#files>
- Dikau, R. (2013). *Mass-Movement Causes: Water*. *Treatise on Geomorphology*, 7, 207-211. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00166-4>
- Elosua, P., & Egaña, M. (2020). *Psicometría aplicada: Guía para el análisis de datos y escalas con jamovi*. <https://web-argitalpena.adm.ehu.es/pdf/USPDF201508.pdf>
- Evans, S., Fidel, L., & Zegarra, J. (2007). *Los Movimientos en Masa de 1962 y 1970 en el Nevado de Huascarán, valle del río Santa, Cordillera Blanca, Perú*. 386-404. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2836>
- Fewster, R. M. (2013). *Null Hypothesis*. En *Brenner's Encyclopedia of Genetics: Second Edition* (Vol. 5). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374984-0.01079-2>
- Fidel, L. (2007). *Deslizamiento Traslacional - Flujo de Detritos de Mayunmarca, Perú*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2832>

- Galindo Serrano, J. A., & Alcántara Ayala, I. (2015). *Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: Análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México*. *Investigaciones Geograficas*, 2015(88), 122-145.  
<https://doi.org/10.14350/rig.43790>
- García, B., Aguilar, R., Huanca, J., & Albinez, L. (2018). *Evaluación Geológica-Geodinámica al Deslizamiento de Campanayocpata*.  
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/1247?locale=es>
- Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., & Marlats, R. M. (2007). *Relación precipitación-escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana*. *Revista de la Facultad de ...*, 39(1900), 21-28. [http://t.bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/1521/gaspariagrarias39-1.pdf](http://t.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/1521/gaspariagrarias39-1.pdf)
- Geertsema, M., & Chiarle, M. (2013). *Mass-Movement Causes: Glacier Thinning*. En *Treatise on Geomorphology (Vol. 7)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00168-8>
- GEMMA. (2007). *Movimientos en masa en la región Andina: una guía para la evaluación de amenazas*. SegemAr, 404.  
<https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/2792;jsessionid=A5DE971D194934FD55F00672798ACACA>
- Gobierno Regional de Apurímac (GRA). (2017). *Plan de prevención y reducción del riesgo de desastres al 2021*. <https://app.regionapurimac.gob.pe>
- González Díaz, E. F., & Folguera, A. (2009). *Los deslizamientos de la cordillera neuquina al sur de los 38° S: Su inducción*. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 64(4), 569-585. <http://www.scielo.org.ar/pdf/raga/v64n4/v64n4a02.pdf>
- Guerra, A. J. T., Fullen, M. A., Jotge, M. do C. O., Bezerra, J. F. R., & Shokr, M. S. (2017). *Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review*. *Pedosphere*, 27(1), 27-41. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60294-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60294-7)
- Günther, A. (2022). *Mass-Movement Geomorphology: An Introduction*. *Treatise on Geomorphology*, 5, 1-3. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818234-5.00207-8>
- Guthrie, R. H. (2013). *Mass-Movement Style , Activity State , and Distribution*. En

- Treatise on Geomorphology (Vol. 7). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00172-X>
- Hamui-Sutton, A. (2013). *Un acercamiento a los métodos mixtos de investigación en educación médica*. Investigación en Educación Médica, 2(8), 211-216. [https://doi.org/10.1016/s2007-5057\(13\)72714-5](https://doi.org/10.1016/s2007-5057(13)72714-5)
- Hashimoto, R., Tsuchida, T., Moriwaki, T., & Kano, S. (2020). *Hiroshima Prefecture geo-disasters due to Western Japan Torrential rainfall in July 2018*. Soils and Foundations, 60(1), 283-299. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.010>
- Hojat, A., Arosio, D., Ivanov, V. I., Longoni, L., Papini, M., Scaioni, M., Tresoldi, G., & Zanzi, L. (2019). *Goelectrical characterization and monitoring of slopes on a rainfall-triggered landslide simulator*. Journal of Applied Geophysics, 170, 103844. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103844>
- INDECI. (2007). *Ciudades Sostenibles: Mapa de Peligros de la Ciudad de Abancay Informe*.  
[http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios\\_CS/Region\\_Apurimac/abancay/abancay\\_mp.pdf](http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios_CS/Region_Apurimac/abancay/abancay_mp.pdf)
- INDECI. (2011). *Manual de estimación del riesgo ante movimientos en masa en laderas*. Manual De Estimación Del Riesgo Ante Movimientos En Masa En Laderas, 68-75. <http://www.cenepred.gob.pe/web/dgp/manual-de-evaluacion-de-riesgos-fenomenos-naturales-v2/>
- INGEMMET. (2019). *Evaluación Integral de la Cuenca del río Mariño (Abancay, Apurímac) para prevención de desastres de origen geológico y geo-hidrológico*. En Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica: Vol. Serie C N°. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2409>
- Jiménez, J. A., & Aristizábal, E. (2018). *Propuesta metodológica para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en proyectos lineales: Caso de estudio Tramo 2, vía Medellín - Turbo*. Boletín de Ciencias de la Tierra, 43, 14-23. <https://doi.org/10.15446/rbct.n43.64683>
- Johnson, T., Cameron, D., Moore, G., & Brien, C. (2020). *Ground movement in a moderately expansive soil subject to rainfall infiltration through pervious paving*.

- Ecological Engineering, 158(August), 106022.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106022>
- Jones, P. D., Lister, D. H., Osborn, T. J., Harphan, C., Salmon, M., & Morice, C. P. (2012). Jones et al. (2012)\_*Hemispheric and large-scale.pdf*. 2012(January).  
[https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/crutem4/CRUTEM4\\_accepted.pdf](https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/crutem4/CRUTEM4_accepted.pdf)
- Juarez Núñez, S., & Gómez Velásquez, D. (2019). *Flujos de detritus (Huaycos) del 21/12/2018. Originados en las quebradas de Sicre y Choquellohuanca*. Evaluación de Peligros Geológicos. 0-29. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1988>
- Lesser Illades, J. M., Sánchez Díaz, F., & González Posadas, D. (1990). *Aspectos geohidrológicos de la ciudad de México*. Ingeniería hidráulica en México, 1(5), 52-60. <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/644>
- Lew, M. J. (2006). *Principles: When there should be no difference - how to fail to reject the null hypothesis*. Trends in Pharmacological Sciences, 27(5), 274-278.  
<https://doi.org/10.1016/j.tips.2006.03.006>
- López Báez, W., Reynoso Santos, R., Castro Mendoza, I., Salinas Cruz, E., & Magdalena Sánchez, R. (2016). *Infiltration capacity of the river Cuxtepeques watershed, Chiapas*, . XXXVII(3), 103-112.  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382016000300008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382016000300008)
- López Filun, P. A. (2015). *Análisis de umbrales de precipitación de procesos de remoción en masa, en laderas urbanizadas de la costa de Chile centro-sur*. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 24(2), 93-112.  
<https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50212>
- Lucio Medina, J. G. (s. f.). *Peligros geohidrológicos que ocasionaron daños en la ciudad de Trujillo durante “ El Niño Costero ”*. 31-33.  
[https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/2588/1/Medina-Peligros\\_geohidrológicos\\_Trujillo.pdf](https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/2588/1/Medina-Peligros_geohidrológicos_Trujillo.pdf)
- Lugo-Hubp, J., Zamorano-Orozco, J. J., Capra, L., Inbar, M., & Alcántara-Ayala, I. (2005). *Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, Octubre de 1999: Causa y efectos*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 22(2), 212-228.

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742005000200212&script=sci\\_abstract](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742005000200212&script=sci_abstract)

- Luza Huillca, C. A., Villacorta Chambi, S., Peña, F., & Jaimes, F. (2015). *Caracterización geodinámica de la ciudad de Abancay para la prevención de desastres*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2245>
- Mana, S., Ruiz, P., & Gutiérrez, A. (2015). *The Critical Zone in Tropical Environments*. En *Developments in Earth Surface Processes* (Vol. 19). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63369-9.00015-X>
- Marcano, A., & Cartaya, S. (2013). *Zonificación de la amenaza por procesos de remoción en masa originados por las precipitaciones entre Camurí Chico y Punta Tigrillo, estado Vargas, Venezuela*. *Revista de investigación*, 37(80), 189-214. <https://www.redalyc.org/pdf/3761/376140395008.pdf>
- Martinović, K., Gavin, K., Reale, C., & Mangan, C. (2018). *Rainfall thresholds as a landslide indicator for engineered slopes on the Irish Rail network*. *Geomorphology*, 306, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.01.006>
- Medina, L., & Gonzales, J. (2018). *Peligros geohidrológicos que ocasionaron daños en la ciudad de Trujillo durante “ El Niño Costero ”*. Taller Internacional Fortalecimiento de capacidades para mitigar los impactos de huaicos en Perú, Lima y Arequipa, Perú, 15-19 octubre 2018: Libro de Resúmenes, 31-33. [https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/2588/1/Medina-Peligros\\_geohidrológicos\\_Trujillo.pdf](https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/2588/1/Medina-Peligros_geohidrológicos_Trujillo.pdf)
- Medina Zaldívar, Y., & Cartaya Pires, M. (2018). *Uso del software Slide para el análisis del comportamiento sísmico de taludes*. *Ciencia & Futuro*, 8(2), 1-17. [https://www.researchgate.net/publication/347240940\\_Uso\\_del\\_software\\_Slide\\_para\\_el\\_analisis\\_del\\_comportamiento\\_sismico\\_de\\_taludes](https://www.researchgate.net/publication/347240940_Uso_del_software_Slide_para_el_analisis_del_comportamiento_sismico_de_taludes)
- Melo, M. (2019). *Geohidrología de la planicie costera del Río de la Plata medio, partido de Magdalena*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/73324>
- Melo, R., Oliveira, S. C., & Zezere, J. L. (2020). *Mass-Movement Processes: Shallow Landslides*. ScienceDirect.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128182345000249>

Méndez Sánchez, A. F., Pérez Trejo, L., Sénchez Cruz, P., & Paniagua Mercado, A. M. (2011). *Determinación del esfuerzo de cedencia para suelos vulnerables a movimientos de remoción de masa originados por las lluvias*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 63(2), 345-352.

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222011000200015](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222011000200015)

Ministerio de Transporte y comunicaciones. (2012). *Manual de Hidrología y Drenaje*. 222. <http://transparencia.mtc.gob.pe>

Molina, M. (2017). *¿Qué significa realmente el valor de p?* Pediatría de Atención Primaria, 19(76), 377-381.

[http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1139-76322017000500014&lng=es&nrm=iso%3E](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1139-76322017000500014&lng=es&nrm=iso%3E). ISSN 1139-7632.

Mora C., S., & Vahrson, W. G. (1994). *Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination*. Environmental & Engineering Geoscience, xxxi(1), 49-58. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.xxxi.1.49>

Ocakoglu, F., Gokceoglu, C., & Ercanoglu, M. (2002). *Dynamics of a complex mass movement triggered by heavy rainfall: A case study from NW Turkey*. Geomorphology, 42(3-4), 329-341. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00094-0](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00094-0)

Orme, A. R. (2013). *Geomorphology for Future Societies*. Earth Systems and Environmental Sciences, 1, 377-410.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123747396000221?via%3Dihub>

Ortuño Abad, L. (2004). *Curso de geotecnia para infraestructuras*. 2003. [https://www.academia.edu/7642294/CURSO\\_DE\\_GEOTECNIA\\_PARA\\_INFRAESTRUCTURAS](https://www.academia.edu/7642294/CURSO_DE_GEOTECNIA_PARA_INFRAESTRUCTURAS)

Perdrial, J., Thompson, A., & Chorover, J. (2015). *Soil Geochemistry in the Critical Zone: Influence on Atmosphere, Surface- and Groundwater Composition*. En Developments in Earth Surface Processes (Vol. 19). Elsevier B.V.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63369-9.00006-9>

- Pilatasig, L., Bustillos, J., Jácome, F., & Mariño, D. (2022). *Evaluación de la Actividad de los Movimientos en Masa de Cachi Alto-Pujilí, Ecuador Mediante Monitoreo Instrumental de Bajo Costo*. *Revista Politécnica*, 49(1), 19-30. <https://doi.org/10.33333/rp.vol49n1.02>
- Quiring, S. M., Ford, T. W., & Yuan, S. (2015). *Climate of the Critical Zone*. En *Developments in Earth Surface Processes* (Vol. 19). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63369-9.00003-3>
- Ramos Aguilar, R., Rivera Domínguez, A., Mayorga Raposo, R., & Gonzales Guevara, J. (2003). *Aplicación de imágenes satelitales para determinar el clima y la radiación solar en el estado de Puebla y la geohidrología de su zona norte*. *Ciencia Ergo Sum*, 10(003), 283-394. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10410306>
- Ran, Q., Hong, Y., Li, W., & Gao, J. (2018). *A modelling study of rainfall-induced shallow landslide mechanisms under different rainfall characteristics*. *Journal of Hydrology*, 563, 790-801. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.040>
- Regmi et al. (2015). *A Review of Mass Movement Processes and Risk in the Critical Zone of Earth*. En *Principles and Dynamics of the Critical Zone* (Vol. 19). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63369-9.00011-2>
- Rodríguez-Morata, C., Villacorta, S., Stoffel, M., & Ballesteros-Cánovas, J. A. (2019). *Assessing strategies to mitigate debris-flow risk in Abancay province, south-central Peruvian Andes*. *Geomorphology*, 342, 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.06.012>
- Rodríguez, A., Tapia, A., & Albornoz, C. (2014). *Susceptibilidad de Movimientos en Masa en el Valle de Socoroma, Precordillera Andina de Arica y Parinacota*. [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0719-26812014000200004](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0719-26812014000200004)
- Rodriguez Caballero, E., Rodriguez Lozano, B., Segura Tejada, R., Blanco Sacristán, J., & Y., C. (2021). *Landslides on dry badlands: UAV images to identify the drivers controlling their unexpected occurrence on vegetated hillslopes*. *Journal of Arid Environments*, 187(July 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104434>

- Rojas Cairampoma, M. (2015). *Tipos de investigación científica: Una simplificación de la complicada incoherente nomenclatura y clasificación*. Revista Electronica de Veterinaria, 16(1), 21-24. <https://www.redalyc.org/pdf/636/63638739004.pdf>
- Sack, D., & Orme, A. R. (2013). *Introduction to the Foundations of Geomorphology*. En *Treatise on Geomorphology (Vol. 1)*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00001-4>
- Salinas Jasso, J. A., Salinas Jasso, R. A., Montalvo Arrieta, J. C., & Alva Niño, E. (2017). *Inventario de movimientos en masa en el sector sur de la Saliente de Monterrey. Caso de estudio: Cañón Santa Rosa, Nuevo León, noreste de México*. Revista Mexicana de Ciencias Geologicas, 34(3), 182-198. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.3.459>
- Sampaio de Almeida, W., Panachuki, E., Sanches de Oliveira, P., Menezes, R. da S., Alves, T., & Fonseca de Carvalho, D. (2018). *Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration*. Soil and Tillage Research, 175(June 2017), 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>
- Sánchez, G. (2011). *Precipitaciones extremas y sus implicaciones en procesos de remoción en masa en la planificación urbana de Tampico, México*. <https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/583>
- Schulz, C. J., & García, R. F. (2018). *Apuntes sobre Geohidrología Ambiental*. Fondo para la investigación Científica y Tecnología (FONCYT). [http://cohife.org/Geohidrologia\\_Ambiental.pdf](http://cohife.org/Geohidrologia_Ambiental.pdf)
- SENAMHI. (2021). *Tutorial para la descarga de datos desde la web de SENAMHI*. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos>
- Soncco, Y., & Manrique, N. (2018). *Peligro por Deslizamiento en el Sector Matarani*. INGEMMET, 0-27. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1929>
- Sorokin, A. C. (2019). *IBM SPSS Statistics: Time is Money*. 1-15. <https://www.ibm.com/pe-es/analytics/spss-statistics-software>
- Strozzi, T., Klimeš, J., Frey, H., Caduff, R., Huggel, C., Wegmüller, U., & Rapre, A. C. (2018). *Satellite SAR interferometry for the improved assessment of the state of*

- activity of landslides: A case study from the Cordilleras of Peru*. Remote Sensing of Environment, 217(August), 111-125. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.014>
- Temesio Vizoso, S. G. (2022). *Reflexiones sobre la inteligencia artificial y la bibliotecología*. Palabra Clave (La Plata), 11(2), e159. <https://doi.org/10.24215/18539912e159>
- Tinto Andares, J. A. (2013). *El análisis de contenido como herramienta de utilidad para la realización de una investigación descriptiva*. 29, 135-173. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=zbh&AN=97322690&lang=es&site=ehost-live%5Chttp://content.ebscohost.com/ContentServer.asp?T=P&P=AN&K=97322690&S=R&D=zbh&EbscoContent=dGJyMNLe80Sep7Y40dvuOLCmr0yepRBSrqa4TK+WxWXS&ContentCustomer=dGJyMOz>
- Trujillo Vela, M. germán, Ramos C., A. M., & Prada S., L. F. (2015). *Análisis descriptivos de procesos de remoción en masa en Bogotá*. Obras y proyectos, 18, 63-75. <https://doi.org/10.4067/s0718-28132015000200006>
- Valdivia Vera, W., & Latorre Borda, O. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización cuadrángulo de Abancay (28-q)* (Número 1975). <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2074>
- Verdegay, J. L., Lamata, M. . T., Pelta, D., & Cruz, C. (2021). *Inteligencia artificial y problemas de decisión: la necesidad de un contexto ético*. Suma de Negocios, 12(27), 104-114. <https://doi.org/10.14349/sumneg/2021.v12.n27.a2>
- Vilchez M., M. (2015). *Zonas Críticas por Peligros Geológicos en la Región Cusco*. Informe Técnico Geología Ambiental. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2026>
- Villacorta, S., Vasquez, E., Madueño, M., & Chumbes, R. (2013). *Análisis de peligros geológicos en la región Apurímac: Origen, características y tratamiento*. 2013, 1-7. <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/542>
- Villacorta, Sandra, Fidel, L., & Zavala, B. (2012). *Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa del Perú*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 69(3), 393-399. [http://oa.upm.es/43212/1/INVE\\_MEM\\_2012\\_141809.pdf](http://oa.upm.es/43212/1/INVE_MEM_2012_141809.pdf)

- Villacorta, Sandra, Peña, F., Jaimes, F., Rodríguez, C., Luza, C., & Pari, W. (2016). *Estudio Integral dirigido a la Evaluación de Eventos Geo-hidrológicos y Cambio Climáticos en la Ciudad de Abancay ( Perú )*. 1-6.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12544/2754>
- Villacorta, Sandra, Rodríguez, C., Peña, F., Jaimes, F., & Luza, C. (2016). *Caracterización geodinámica y dendrocronología como base para la evaluación de procesos geohidrológicos en la cuenca del río Mariño, Abancay (Perú)*. Serie Correlacion Geologica, 32(1-2), 25-42. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2310>
- Villacorta, Sandra, Rodríguez, C., Peña, F., Jaimes, F., & Luza, C. (2016). *Caracterización geodinámica y dendrocronología como base para la evaluación de procesos geohidrológicos en la cuenca del río Mariño, Abancay (Perú)*. Serie Correlación Geológica, 32, 25-42.  
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2310#files>
- Vital, R. W. F., Campos, M. J. S., & Fraga, M. R. (2013). *The null hypothesis*. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 144(4), 498-499.  
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2013.08.010>
- Whitney, J. (2000). *Descriptive designs: The case for case studies and case series in research*. Journal of WOCN, 27(2), 76-78. [https://doi.org/10.1016/s1071-5754\(00\)90072-x](https://doi.org/10.1016/s1071-5754(00)90072-x)
- Wohl, E. (2015). *Rivers in the Critical Zone*. En Developments in Earth Surface Processes (Vol. 19). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63369-9.00009-4>
- Young, K. R., & León, B. (2009). *Natural Hazards in Peru*. Causation and Vulnerability. Developments in Earth Surface Processes, 13(C), 165-180.  
[https://doi.org/10.1016/S0928-2025\(08\)10009-8](https://doi.org/10.1016/S0928-2025(08)10009-8)
- Zavala, B., Rosado, M., & Lu, S. (2012). *Susceptibilidad a los movimientos en masa en la región Cajamarca, norte de Perú y el deslizamiento de Rodeopampa del 22 de Febrero del 2010*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 69(3), 407-417.  
<http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/raga/article/viewFile/1271/1910>
- Zavala, B., Valderrama, P., Luque, G., & Barrantes, R. (2007). *Zonas Críticas por Peligros Geológicos y Geohidrológicos en la Región de Ancash*. INGEMMET.



<https://hdl.handle.net/20.500.12544/1929>

Zhang, J., Zhu, D., & Zhang, S. (2020). *Shallow slope stability evolution during rainwater infiltration considering soil cracking state*. Computers and Geotechnics, 117(July 2018), 103285. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103285>

Zhipeng, L., Donghao, M., Wei, H., & Xuelin, L. (2018). *Land use dependent variation of soil water infiltration characteristics and their scale-specific controls*. Soil and Tillage Research, 178(January), 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.01.001>

Zhu, P., Zhang, G., Wang, H., & Xing, S. (2020). *Soil infiltration properties affected by typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China*. Journal of Hydrology, 590(May), 125535. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125535>

## ANEXOS

### 1. Precipitación pluvial mensual en mm, periodo 1970 – 2019

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total promedio anual (mm)
1970	171,40	74,20	73,40	44,60	10,80	1,20	6,60	0,00	27,10	54,20	39,60	130,50	633,60
1971	92,40	145,70	80,60	76,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	38,00	84,80	58,20	579,70
1972	117,30	121,70	98,50	48,50	0,40	0,00	12,90	12,00	12,60	20,90	53,30	80,60	578,70
1973	88,00	75,35	129,30	44,10	3,05	0,00	3,90	3,00	21,10	23,65	90,60	36,05	518,10
1974	80,70	108,30	104,55	31,60	8,00	8,25	5,15	14,75	0,65	12,20	17,65	30,60	422,40
1975	27,05	42,70	59,90	31,15	4,95	2,20	1,30	5,15	9,65	20,90	4,65	197,10	406,70
1976	159,00	117,40	141,95	49,20	0,65	8,00	2,25	7,50	30,65	27,80	25,40	65,70	635,50
1977	75,35	121,40	107,30	12,00	5,30	0,00	3,85	0,00	10,85	31,80	128,5	108,70	605,05
1978	124,20	70,60	93,30	25,45	1,30	3,15	0,10	0,30	16,90	20,20	13,65	71,45	440,60
1979	42,75	106,00	96,80	36,10	4,60	0,00	1,35	5,80	11,85	13,40	105,8	116,50	540,95
1980	47,60	99,40	81,90	11,45	4,10	0,00	5,05	1,80	2,40	25,25	13,25	87,30	379,50
1981	114,90	122,80	64,40	46,80	0,00	6,05	1,30	18,45	24,70	53,20	146,4	103,40	702,40
1982	206,55	177,30	113,30	30,65	0,10	3,50	0,00	13,75	5,00	9,00	125,4	55,55	740,10
1983	138,75	87,80	68,00	45,85	4,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	53,90	94,00	493,10
1984	182,30	158,10	0,00	0,50	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	341,10
1985	21,50	121,50	80,30	93,50	36,25	11,15	2,85	0,30	7,55	33,65	78,50	99,95	587,00
1986	98,55	97,20	157,70	34,25	7,05	0,00	0,10	9,30	29,75	26,80	28,10	54,55	543,35
1987	150,55	82,05	27,10	54,25	11,85	0,05	8,00	0,05	7,60	41,40	43,25	64,15	490,30
1988	178,80	113,60	124,40	81,70	9,20	0,00	0,00	0,00	0,00	32,60	0,00	0,15	540,45
1989	115,40	74,00	85,10	19,50	0,35	0,00	0,00	0,00	3,15	0,00	0,00	0,00	297,50
1990	38,30	48,50	27,10	24,10	21,60	0,00	0,00	0,00	0,00	21,10	0,00	0,10	180,80
1991	24,90	81,25	25,00	12,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	61,30	0,00	205,05
1992	40,35	61,45	29,15	38,05	0,00	0,00	0,00	24,70	11,00	42,04	54,15	85,20	386,45
1993	164,70	113,40	119,55	84,00	6,50	0,00	5,10	38,80	0,00	40,10	134,2	164,65	871,00
1994	167,85	81,55	61,85	19,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	229,3	95,85	156,20	812,10
1995	129,15	90,00	139,70	34,55	6,80	0,00	0,00	0,00	5,90	4,40	106,0	119,35	635,85
1996	121,20	166,00	77,30	49,00	0,80	0,00	0,00	21,45	18,05	64,20	62,50	64,00	644,50
1997	171,55	136,80	115,25	21,40	18,40	0,00	0,00	19,25	4,80	14,30	91,40	129,55	<b>722,70</b>
1998	176,25	106,60	85,80	12,95	2,20	3,90	0,00	1,70	2,20	35,10	35,80	99,30	561,80
1999	182,30	171,10	119,80	60,00	8,10	3,80	2,00	0,00	27,70	64,90	65,10	107,00	811,80
2000	202,80	180,50	85,80	22,20	7,10	11,20	16,00	14,10	15,50	51,50	40,50	124,90	772,10
2001	197,20	68,50	127,90	23,30	13,50	0,00	12,60	23,10	4,00	48,50	81,10	69,30	669,00
2002	114,30	158,80	107,20	87,40	15,00	7,20	32,20	12,90	27,40	102,4	108,0	106,00	878,80
2003	168,20	239,40	198,10	43,30	6,30	2,00	0,40	14,40	18,60	33,00	112,0	145,20	980,90
2004	123,80	134,10	67,70	47,90	17,90	4,00	14,50	12,40	43,90	46,90	75,80	171,70	760,60
2005	77,70	97,90	102,00	28,70	2,70	0,00	11,20	2,10	8,70	31,50	66,90	141,40	570,80
2006	183,00	116,90	103,90	77,00	0,00	6,00	0,00	1,10	3,10	51,40	87,80	120,00	750,20
2007	75,60	109,10	151,60	19,10	7,00	0,00	7,80	1,50	1,00	47,40	84,10	174,50	678,70
2008	107,50	127,30	109,40	18,70	8,40	6,30	0,00	10,60	5,50	48,20	93,30	152,10	687,30
2009	84,20	185,30	86,50	47,10	13,00	0,00	4,60	5,80	13,50	36,50	119,4	95,00	690,90



2010	175,50	91,20	114,60	35,50	7,10	0,00	1,80	4,60	9,90	43,00	58,70	113,00	<b>654,90</b>
2011	145,90	185,70	152,40	52,20	5,40	1,50	6,80	18,60	33,40	37,20	90,40	102,80	<b>832,30</b>
2012	135,70	<b>240,10</b>	209,50	69,00	0,00	5,60	7,00	1,40	17,10	57,00	36,80	233,60	<b>1012,8</b>
2013	113,20	184,80	61,40	21,20	3,70	1,00	2,10	27,00	7,90	51,70	124,2	144,70	742,90
2014	182,00	121,40	134,90	60,40	5,00	0,00	0,00	0,00	9,90	21,70	5,20	55,40	595,90
2015	80,90	138,40	121,5	28,50	0,00	0,00	0,00	0,00	8,70	5,50	23,10	68,10	474,70
2016	51,50	147,20	102,00	45,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,00	23,00	9,90	77,00	466,60
2017	113,00	115,00	102,00	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,00	23,00	39,00	77,00	505,00
2018	84,20	185,30	86,50	47,10	13,00	0,00	4,60	5,80	13,50	36,50	119,4	95,00	690,90
2019	175,50	91,20	114,60	35,50	7,10	0,00	1,80	4,60	9,90	43,00	58,70	113,00	654,90

Fuente: CRUTEM en Google Earth y (SENAMHI, 2021).

## 2. Proceso de cálculo del peso de la infiltración de la precipitación pluvial.

Año	Precipitación promedio anual (mm)	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen de lluvia (m <sup>3</sup> )	Volumen de escurrentía (m <sup>3</sup> )	Volumen de infiltrado anual (m <sup>3</sup> )	Peso del agua infiltrada (kgf)	Peso del agua infiltrada (kN)
<b>1951</b>	<b>542.4</b>	<b>345500</b>	<b>187399.2</b>	<b>63715.728</b>	<b>123683.472</b>	<b>123683472.0</b>	<b>1212920.521</b>
1971	579.70	345500	200286.35	68097.36	132188.99	132188991.00	1296331.17
1972	578.70	345500	199940.85	67979.89	131960.96	131960961.00	1294094.96
1973	518.10	345500	179003.55	60861.21	118142.34	118142343.00	1158580.61
1974	422.40	345500	145939.20	49619.33	96319.87	96319872.00	944575.27
1975	406.70	345500	140514.85	47775.05	92739.80	92739801.00	909466.77
1976	635.50	345500	219565.25	74652.19	144913.07	144913065.00	1421111.71
1977	605.05	345500	209044.78	71075.22	137969.55	137969551.50	1353019.10
1978	440.60	345500	152227.30	51757.28	100470.02	100470018.00	985274.30
1979	540.95	345500	186898.23	63545.40	123352.83	123352828.50	1209678.02
1980	379.50	345500	131117.25	44579.87	86537.39	86537385.00	848641.85
1981	702.40	345500	242679.20	82510.93	160168.27	160168272.00	1570714.18
1982	740.10	345500	255704.55	86939.55	168765.00	168765003.00	1655019.32
1983	493.10	345500	170366.05	57924.46	112441.59	112441593.00	1102675.35
1984	341.10	345500	117850.05	40069.02	77781.03	77781033.00	762771.37
1985	587.00	345500	202808.50	68954.89	133853.61	133853610.00	1312655.50
1986	543.35	345500	187727.43	63827.32	123900.10	123900100.50	1215044.92
1987	490.30	345500	169398.65	57595.54	111803.11	111803109.00	1096413.96
1988	540.45	345500	186725.48	63486.66	123238.81	123238813.50	1208559.91
1989	297.50	345500	102786.25	34947.33	67838.93	67838925.00	665272.59
1990	180.80	345500	62466.40	21238.58	41227.82	41227824.00	404306.84
1991	205.05	345500	70844.78	24087.22	46757.55	46757551.50	458534.94
1992	386.45	345500	133518.48	45396.28	88122.19	88122193.50	864183.51
1993	871.00	345500	300930.50	102316.37	198614.13	198614130.00	1947739.26
1994	812.10	345500	280580.55	95397.39	185183.16	185183163.00	1816026.47
1995	635.85	345500	219686.18	74693.30	144992.88	144992875.50	1421894.38
1996	644.50	345500	222674.75	75709.42	146965.34	146965335.00	1441237.60
<b>1997</b>	<b>722.70</b>	<b>345500</b>	<b>249692.85</b>	<b>84895.57</b>	<b>164797.28</b>	<b>164797281.00</b>	<b>1616109.26</b>
1998	561.80	345500	194101.90	65994.65	128107.25	128107254.00	1256303.00
1999	811.80	345500	280476.90	95362.15	185114.75	185114754.00	1815355.60
2000	772.10	345500	266760.55	90698.59	176061.96	176061963.00	1726578.05
2001	669.00	345500	231139.50	78587.43	152552.07	152552070.00	1496024.76
2002	878.80	345500	303625.40	103232.64	200392.76	200392764.00	1965181.70
2003	980.90	345500	338900.95	115226.32	223674.63	223674627.00	2193498.78
2004	760.60	345500	262787.30	89347.68	173439.62	173439618.00	1700861.63
2005	570.80	345500	197211.40	67051.88	130159.52	130159524.00	1276428.90
2006	750.20	345500	259194.10	88125.99	171068.11	171068106.00	1677605.04
2007	678.70	345500	234490.85	79726.89	154763.96	154763961.00	1517716.00
2008	687.30	345500	237462.15	80737.13	156725.02	156725019.00	1536947.41
2009	690.90	345500	238705.95	81160.02	157545.93	157545927.00	1544997.77
<b>2010</b>	<b>654.90</b>	<b>345500</b>	<b>226267.95</b>	<b>76931.10</b>	<b>149336.85</b>	<b>149336847.00</b>	<b>1464494.19</b>



<b>2011</b>	<b>832.30</b>	<b>345500</b>	<b>287559.65</b>	<b>97770.28</b>	<b>189789.37</b>	<b>189789369.00</b>	<b>1861197.92</b>
<b>2012</b>	<b>1012.80</b>	<b>345500</b>	<b>349922.40</b>	<b>118973.62</b>	<b>230948.78</b>	<b>230948784.00</b>	<b>2264833.89</b>
2013	742.90	345500	256671.95	87268.46	169403.49	169403487.00	1661280.71
2014	595.90	345500	205883.45	70000.37	135883.08	135883077.00	1332557.78
2015	474.70	345500	164008.85	55763.01	108245.84	108245841.00	1061529.08
2016	466.60	345500	161210.30	54811.50	106398.80	106398798.00	1043415.77
2017	505.00	345500	174477.50	59322.35	115155.15	115155150.00	1129286.25
2018	690.90	345500	238705.95	81160.02	157545.93	157545927.00	1544997.77
2019	654.90	345500	226267.95	76931.10	149336.85	149336847.00	1464494.19

Fuente: Procesado en Excel.

### 3. Base de datos para el proceso estadístico.

Año	Peso del agua infiltrada (kN)	Evento	Peligro	Vulnerabilidad
<b>1951</b>	<b>1212920.521</b>	<b>Movimiento complejo</b>	<b>Peligro alto</b>	<b>Vulnerabilidad muy alto</b>
1971	1296331.169	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1972	1294094.958	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1973	1158580.608	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1974	944575.2727	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1975	909466.7695	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1976	1421111.709	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1977	1353019.102	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1978	985274.302	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1979	1209678.016	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1980	848641.8466	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1981	1570714.185	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1982	1655019.317	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1983	1102675.348	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1984	762771.3673	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1985	1312655.505	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1986	1215044.921	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1987	1096413.959	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1988	1208559.91	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1989	665272.5939	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1990	404306.8402	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1991	458534.9424	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1992	864183.5089	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1993	1947739.258	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1994	1816026.465	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1995	1421894.383	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1996	1441237.602	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
<b>1997</b>	<b>1616109.256</b>	<b>Movimiento complejo</b>	<b>Peligro muy alto</b>	<b>Vulnerabilidad muy alto</b>
1998	1256303.002	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
1999	1815355.602	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2000	1726578.049	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2001	1496024.757	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2002	1965181.699	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2003	2193498.781	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2004	1700861.63	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2005	1276428.896	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2006	1677605.042	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2007	1517715.998	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2008	1536947.408	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2009	1544997.765	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
<b>2010</b>	<b>1464494.191</b>	<b>Deslizamiento y flujo</b>	<b>Peligro alto</b>	<b>Vulnerabilidad alto</b>
<b>2011</b>	<b>1861197.916</b>	<b>Deslizamiento</b>	<b>Peligro alto</b>	<b>Vulnerabilidad alto</b>



<b>2012</b>	<b>2264833.893</b>	<b>Movimiento complejo y deslizamiento</b>	<b>Peligro alto</b>	<b>Vulnerabilidad muy alto</b>
2013	1661280.706	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2014	1332557.777	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2015	1061529.077	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2016	1043415.772	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2017	1129286.252	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2018	1544997.765	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable
2019	1464494.191	Sin evento	No hay peligro	No es vulnerable

## 4. Resultados del proceso estadístico (Jamovi)

### Resultados

#### Descriptivas

Descriptivas:

		Evento	N	Perdidos	Media	Mediana	DE	Mínimo	Máximo
Peso del agua infiltrada (kN)	Sin evento		45	0	1.32e+6	1.31e+6	386924	404307	2.19e+6
	Movimiento complejo		2	0	1.41e+6	1.41e+6	285097	1.21e+6	1.62e+6
	Deslizamiento y flujo		1	0	1.46e+6	1.46e+6	NaN	1.46e+6	1.46e+6
	Deslizamiento		1	0	1.86e+6	1.86e+6	NaN	1.86e+6	1.86e+6
	Movimiento complejo y deslizamiento		1	0	2.26e+6	2.26e+6	NaN	2.26e+6	2.26e+6

#### Regresión Logística Multinomial

Medidas de Ajuste del Modelo

Modelo	Desvianza	AIC	R <sup>2</sup> <sub>N</sub>
1	35.7	51.7	0.237

Prueba Omnibus de Razón de Verosimilitud

Predictor	$\chi^2$	gl	p
Peso del agua infiltrada (kN) (2)	10.1	4	0.039

[3]

Coefficientes del Modelo - Evento

Evento	Predictor	Estimador	EE	Z	p
Movimiento complejo - Sin evento	Constante	-4.05	3.32e-13	-1.22e-13	< .001
	Peso del agua infiltrada (kN) (2)	6.85e-7	4.97e -7	1.38	0.168
Deslizamiento y flujo - Sin evento	Constante	-5.63	4.26e-13	-1.32e-13	< .001
	Peso del agua infiltrada (kN) (2)	1.29e-6	6.69e -7	1.92	0.054
Deslizamiento - Sin evento	Constante	-9.56	3.19e-13	-3.00e-13	< .001
	Peso del agua infiltrada (kN) (2)	3.73e-6	5.71e -7	6.54	< .001
Movimiento complejo y deslizamiento - Sin evento	Constante	-28.70	2.85e-13	-1.01e-14	< .001
	Peso del agua infiltrada (kN) (2)	1.30e-5	6.24e -7	20.82	< .001

5. Base de datos para el procesamiento de amenaza por deslizamiento.

Áreas	Perímetro (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Descripción	Peso_ veg	Peso_ pend	NAME	HPI	CNA	Peso_ geol	Peso_ precip	Suscep	Detonan	Amenaz	Nivel_ amenaza
Área 1	2025.44	71000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 1	2025.44	71000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 1	2025.44	71000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 1	2025.44	71000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 1	2025.44	71000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 1	2025.44	71000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 1	2025.44	71000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 1	2025.44	71000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 1	2025.44	71000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 1	2025.44	71000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 1	2025.44	71000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 1	2025.44	71000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 2	310.00	2600	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 2	310.00	2600	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 3	1036.19	22500	Suelo de cultivo	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 3	1036.19	22500	Suelo de cultivo	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 3	1036.19	22500	Suelo de cultivo	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 3	1036.19	22500	Suelo de cultivo	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 3	1036.19	22500	Suelo de cultivo	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 3	1036.19	22500	Suelo de cultivo	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 3	1036.19	22500	Suelo de cultivo	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 3	1036.19	22500	Suelo de cultivo	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 3	1036.19	22500	Suelo de cultivo	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	1	12	1	12	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	1	12	1	12	Bajo

Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	1	6	1	6	Muy bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	1	12	1	12	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	3	12	3	36	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	3	12	3	36	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	3	6	3	18	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	3	6	3	18	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 4	2134.17	44600	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 5	499.33	3100	Suelo libre	3	2	Qh-al	0	3	3	3	18	3	54	Moderado
Área 5	499.33	3100	Suelo libre	3	2	Qh-al	0	3	3	3	18	3	54	Moderado
Área 5	499.33	3100	Suelo libre	3	1	Qh-al	0	3	3	3	9	3	27	Bajo
Área 6	551.17	5700	Suelo libre	3	2	Qh-al	0	3	3	3	18	3	54	Moderado
Área 6	551.17	5700	Suelo libre	3	1	Qh-al	0	3	3	3	9	3	27	Bajo
Área 6	551.17	5700	Suelo libre	3	1	Qh-al	0	3	3	2	9	2	18	Bajo
Área 6	551.17	5700	Suelo libre	3	1	Qh-al	0	3	3	2	9	2	18	Bajo
Área 7	186.40	1000	Suelo libre	3	1	Qh-al	0	3	3	2	9	2	18	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-co	9	0	2	1	8	1	8	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	1	6	1	6	Muy bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-co	9	0	2	1	4	1	4	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	1	6	1	6	Muy bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-co	9	0	2	1	4	1	4	Bajo

Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	1	12	1	12	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	1	12	1	12	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	1	6	1	6	Muy bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-co	9	0	2	1	4	1	4	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-co	9	0	2	1	4	1	4	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	3	Qh-al	0	3	3	2	18	2	36	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	1	12	1	12	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	1	6	1	6	Muy bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-co	9	0	2	1	4	1	4	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-co	9	0	2	1	4	1	4	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-co	9	0	2	1	4	1	4	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	1	6	1	6	Muy bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	3	12	3	36	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-co	9	0	2	1	8	1	8	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo

Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	1	12	1	12	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	3	12	3	36	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-al	0	3	3	2	12	2	24	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-co	9	0	2	1	8	1	8	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	2	Qh-co	9	0	2	1	8	1	8	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo
Área 8	3213.90	195000	Suelo de cultivo y vegetación	2	1	Qh-al	0	3	3	2	6	2	12	Bajo

Fuente: ArcGis



*Foto 1.* Corte de talud de carretera de evitamiento, muestra el tipo de suelo limo arcilloso (zona norte de Bellavista)



*Foto 2.* Corte artificial, talud de carretera que muestra el estrato del suelo



*Foto 3.* Suelo cubierto por vegetación en la parte superior del talud de carretera



*Foto 4.* Fisuras en la carpeta asfáltica de la carretera Panamericana (Urb. Bellavista)



*Foto 5.* Hundimiento de la plataforma de la carretera Panamericana (Urb. Bellavista)



*Foto 6.* Construcción de viviendas sobre suelos por encima del nivel freático



*Foto 7.* Presencia de aguas subterráneas en pie de talud superior de la carretera Panamericana (Urb. Bellavista).



*Foto 8.* Fisuras en muro de contención, talud inferior de la carretera Panamericana (Urb. Bellavista).



*Foto 9.* Laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA).



*Foto 10.* Preparación de muestras para el análisis en laboratorio  
- UNAMBA



*Foto 11.* Secado de muestra en el horno



*Foto 12.* Preparación de muestra para el pesaje