



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica

**Análisis comparativo de la susceptibilidad a movimientos
en masa mediante los métodos de regresión logística y
proceso de análisis jerárquico para seis valles de la
Cordillera Blanca, Áncash**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

AUTOR

Javier Raúl MENDOZA TIMOTEO

ASESOR

José Luis QUISPE VÍLCHEZ

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Mendoza, J. (2021). *Análisis comparativo de la susceptibilidad a movimientos en masa mediante los métodos de regresión logística y proceso de análisis jerárquico para seis valles de la Cordillera Blanca, Áncash*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Javier Raúl Mendoza Timoteo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	74814960
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-0346-2767
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Jose Luís Quispe Vilchez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08119070
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-2892-8420
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Dante Horacio Loayza Alatriza
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07564915
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Francisco Alejandro Alcántara Boza
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	27074721
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Antonio Sandoval Casas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08800785
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.2.4 Geodinámica externa e interna
Grupo de investigación	No aplica.

Agencia de financiamiento	Perú. CONCYTEC y el Banco Mundial a través de la unidad ejecutora FONDECYT. Fondo “Incorporación de Investigadores”. N.º 015 -2019-FONDECYT-BM-INC.INV
Ubicación geográfica de la investigación	Valles pertenecientes a la Cordillera Blanca: Valle de Parón en la provincia de Huaylas, Valle de Llanganuco en la provincia de Yungay, Valles de Ulta y Honda en la provincia de Carhuaz, Valles de Llaca y Cojup en la provincia de Huaraz Departamento de Ancash, Perú • Norte: Latitud sur -8.8529389 • Este: Longitud oeste -77.408775 • Sur: Latitud sur -9.6748333 • Oeste: Longitud oeste -77.572525
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2020- 2021
URL de disciplinas OCDE	Geociencias, Multidisciplinar https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01 Geología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06 Ciencias del medio ambiente https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO

Usando la plataforma virtual de Google Meet de la Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el día viernes 10 de diciembre del año 2021, siendo las 11:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Ing. DANTE HORACIO LOAYZA ALATRISTA	Presidente
Dr. FRANCISCO ALEJANDRO ALCÁNTARA BOZA	Miembro
Ing. JOSÉ ANTONIO SANDOVAL CASAS	Miembro

Reunidos en Acto Académico virtual Público de Sustentación de la Tesis titulada: **“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA MEDIANTE LOS MÉTODOS DE REGRESIÓN LOGÍSTICA Y PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO PARA SEIS VALLES DE LA CORDILLERA BLANCA, ÁNCASH”** Presentada por el Bachiller **JAVIER RAÚL MENDOZA TIMOTEO**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo.

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon al Bachiller las preguntas pertinentes, que fueron absueltas a:

SATISFACCIÓN

Concluida la sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue: **DIECISIETE (17), APROBADO CON MENCIÓN HONROSA**

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO, a Don JAVIER RAUL MENDOZA TIMOTEO.

Siendo las.....**12:15**..... horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Lima, 10 de diciembre del 2021

Ing. DANTE HORACIO LOAYZA ALATRISTA
PRESIDENTE

Dr. FRANCISCO ALEJANDRO ALCÁNTARA BOZA
MIEMBRO

Ing. JOSÉ ANTONIO SANDOVAL CASAS
MIEMBRO

Ing. JOSÉ LUIS QUISPE VÍLCHEZ
ASESOR DE TESIS

DEDICATORIA

A mi mamá, por confiar en mí siempre que más la necesité.

A mi papá, que con sus enseñanzas me motivo a seguir y luchar por mis sueños.

A mi mamita Teodomira Valentín y papito Demetrio Timoteo por cuidar de mí desde
pequeño, los amo mucho.

A mis hermanos, que son mi ejemplo para seguir cada día de mi vida.

A mis familiares y amigos que durante la universidad me ayudaron a seguir cada día en esta
hermosa carrera de Ingeniería Geográfica.

En memoria al Ing. Julio Gutiérrez Viera, quien inicialmente me ayudo y motivo en la
asesoría de la presente investigación.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. José Luis Quispe Vílchez, por sus correcciones en la asesoría de mi tesis. Sus enseñanzas y apoyo durante mi época universitaria me ayudaron en mi formación como profesional y como persona.

Al Dr. Damien Catchpole, muchas gracias por sus importantes apreciaciones y correcciones realizadas desde inicio de la presente investigación, gracias por la oportunidad y la confianza dada.

Al PhD. Steven Sevillano investigador asociado a Teyde Territorio y Desarrollo S.A.C, por sus enseñanzas en herramientas estadísticas que fueron vitales en la realización de mi tesis.

A la Ing. Emilia Bejar por sus enseñanzas y apoyo durante la realización de mi tesis, muchas gracias por la confianza y amistad dada durante todos estos años de formación.

A mis amigos y compañeros del proyecto ANP-Digital Huascarán por sus facilidades prestadas en la realización de mi tesis, por inculcarme la vena de la investigación en la temática de gestión de riesgos y peligros naturales, por enseñarme la importancia de la ciencia como medio para la solución de problemas.

Al proyecto “Herramienta tecnológica para la gestión del ecoturismo en áreas naturales protegidas por el estado, e implantación en el Parque Nacional de Huascarán (ANP-DIGITAL-HUASCARÁN)”, financiado por el Banco Mundial a través del FONDECYT por la financiación de mi trabajo de investigación.

A mis amigos de la universidad, en especial a Alondra, Ronny, Víctor, Luigi, Jesús, Mario, Sandra, Leysi, Joel, Jerson, Jose, Kevin, Jesus Tapia, Miller, Brolin y Miguel Farro que durante mi vida universitaria creyeron en mí, su amistad y apoyo han sido muy importantes durante mis cinco años de formación.

RESUMEN

Los movimientos en masa en la Cordillera Blanca, departamento de Ancash, Perú, provocan frecuentemente afectaciones en las carreteras, viviendas, infraestructuras y han cobrado la vida de varias personas. La identificación de los lugares más propensos a la ocurrencia de movimientos en masa es una base importante para la toma de decisiones en ámbitos del ordenamiento territorial y la gestión de riesgos naturales. Esta investigación tiene como objetivo principal comparar la susceptibilidad a movimientos en masa mediante dos metodologías: (1) la Regresión Logística (RL) y (2) el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) en seis subcuencas de la Cordillera Blanca: Parón, Llanganuco, Ulta, Honda, Llaca y Cojup.

A lo largo de las seis gradientes altitudinales, se realizó un inventario de 431 eventos de ocurrencia y 434 datos de no ocurrencia de movimientos en masa. Del mismo modo, se determinaron y recolectaron 11 posibles factores causales de los movimientos de masa de forma independiente, a una resolución espacial de 12.5m x 12.5m. La elección de los factores causales de los movimientos en masa para cada subcuenca se realizó siguiendo los principios dados por cada metodología.

Para la comparación entre las capas ráster de susceptibilidad generados mediante RL y el AHP, se determinó una mayor igualdad y similitud entre los modelos planteados para las seis subcuencas de estudio. Para determinar el método más adecuado, se utilizó el Área Bajo la Curva (AUC), resultando una buena precisión en ambos modelos, siendo la Regresión Logística ligeramente mejor que el Proceso de Análisis Jerárquico y obteniendo mayores ventajas. Siendo el método logístico el que se comporta mejor, también se determinó las principales variables predictoras para valles glaciares de la Cordillera Blanca mediante la técnica estadística de selección de variables *Backward Selection*. Finalmente se analizó el comportamiento de las principales variables susceptibles a movimientos en masa utilizando gráficas de función logística para las variables continuas y relación de frecuencia para las variables categóricas.

En conclusión, ambas metodologías proveen mapas con resultados confiables y similares, aunque la ventaja de la RL es que permite cuantificar el efecto de factores de forma precisa y estandarizada a partir de datos de inventario de movimientos en masa y no subjetiva como el AHP. Sin embargo, es importante mencionar que la elección del modelo está determinada por las necesidades y recursos disponibles; siendo ambos modelos igualmente importantes para la identificación de la probabilidad de ocurrencia a movimientos en masa.

Palabras claves: Movimientos en masa, susceptibilidad, regresión logística, proceso de análisis jerárquico.

SUMMARY

Landslides in the Cordillera Blanca, department of Ancash, Peru, frequently cause damage to roads, houses, infrastructure and have claimed the lives of several people. The identification of the places most prone to landslides is an important basis for decision making in land use planning and natural risk management. The main objective of this research is to compare landslide susceptibility using two methodologies: (1) Logistic Regression (LR) and (2) the Hierarchical Analysis Process (AHP) in six sub-basins of the Cordillera Blanca: Parón, Llanganuco, Ulta, Honda, Llaca and Cojup.

Along the six altitudinal gradients, an inventory of 431 landslide occurrence events and 434 non-occurrence data were inventoried. Similarly, 11 possible causal factors of mass movements were determined and collected independently, at a spatial resolution of 12.5m x 12.5m. The choice of landslide causal factors for each sub-basin was made following the principles given by each methodology.

For the comparison between the susceptibility raster layers generated by RL and AHP, a greater equality and similarity was determined between the models proposed for the six study sub-basins. To determine the most appropriate method, the Area Under the Curve (AUC) was used, resulting in good accuracy in both models, with Logistic Regression being slightly better than the Hierarchical Analysis Process and obtaining greater advantages. Being the logistic method the one that performs better, the main predictor variables for glacial valleys of the Cordillera Blanca were also determined by means of the statistical technique of Backward Selection of variables. Finally, the behavior of the main variables susceptible to landslides was analyzed using logistic function plots for continuous variables and frequency ratio for categorical variables.

In conclusion, both methodologies provide maps with reliable and similar results, although the advantage of the RL is that it allows quantifying the effect of factors in an accurate and standardized way from landslide inventory data and not subjective as the AHP. However, it is important to mention that the choice of model is determined by the needs and available resources; both models are equally important for the identification of the probability of landslide occurrence.

Keywords: Landslides, susceptibility, logistic regression, hierarchical analysis process.

Índice general

1	Introducción	12
1.1	Planteamiento del problema	12
1.2	Formulación del problema.....	13
1.2.1	Problema General.....	13
1.2.2	Problemas Específicos	13
1.3	Justificación de la investigación	13
1.4	Objetivos.....	14
1.4.1	Objetivo General.....	14
1.4.2	Objetivos Específicos.....	14
1.5	Hipótesis.....	14
1.5.1	Hipótesis General	14
1.5.2	Hipótesis Específicas	14
2	Marco teórico	15
2.1	Antecedentes de la investigación.....	15
2.2	Bases Teóricas	17
2.2.1	Susceptibilidad.....	17
2.2.2	Métodos de zonificación de peligros por movimientos en masa.....	19
2.2.3	Riesgos.....	24
2.2.4	Movimientos en masa	25
2.2.5	Curva ROC	28
2.2.6	Método estadístico de selección de variables-Backward Selection	29
3	Caracterización de la zona de estudio	30
3.1	Ubicación geográfica	30
3.2	Aspectos físicos.....	33
3.2.1	Geología	33
3.2.2	Fisiografía.....	37
3.2.3	Suelos.....	39
3.2.4	Clima	40
3.2.5	Hidrografía e hidrología	42
3.3	Aspectos biológicos	42
3.3.1	Zonas de vida	42
3.3.2	Flora	43
3.3.3	Fauna	44
3.4	Aspectos socioeconómicos.....	44

3.4.1	Características demográficas.....	44
3.4.2	Indicadores de Pobreza	45
3.4.3	Aspectos económicos	45
4	Metodología	47
4.1	Procedimiento general de la investigación	47
4.2	Obtención de datos.....	48
4.2.1	Inventario de movimientos en masa.....	48
4.2.2	Variables explicativas	53
4.3	Análisis de los datos	68
4.3.1	Creación de la base de datos	68
4.3.2	Correlación de las variables.....	68
4.4	Determinación de la susceptibilidad	70
4.4.1	Regresión logística (RL)	70
4.4.2	Proceso de análisis jerárquico (AHP).....	91
5	Discusión de los resultados.....	115
5.1	Comparación de los modelos de susceptibilidad a movimientos en masa	115
5.2	Validación del método más adecuado para determinar la susceptibilidad a movimientos en masa.....	118
5.3	Determinación de las principales variables predictoras para valles glaciares de la Cordillera Blanca	120
5.4	Comportamiento de los eventos de movimientos en masa en función de sus principales variables explicativas.....	121
6	Conclusiones	124
7	Recomendaciones.....	126
8	Bibliografía	128
9	Anexos.....	133
	Anexo 1: Eventos de movimientos en masa cartografiados en campo:	133
	Anexo 2: Código en “R” para la generación y validación del modelo de susceptibilidad a movimientos en masa mediante regresión logística.....	143
	Anexo 3: Código en “R” para la validación (área bajo la curva) de los modelos mediante proceso de análisis jerárquico.	150

Índice de figuras

Figura 2.1: Métodos más utilizados en la evaluación de la susceptibilidad.....	19
Figura 2.2: Función sigmoide empleada en el cálculo de regresión logística	20
Figura 2.3: Descripción general de los tipos de movimientos en masa.....	27
Figura 2.4: Representación de la curva ROC	29
Figura 2.5: Backward Selection.....	29
Figura 3.1: Ubicación del área de estudio	31
Figura 3.2: Formaciones geológicas presentes en el área de estudio	36
Figura 3.3: Unidades fisiográficas presentes en el área de estudio.....	38
Figura 3.4: Grandes grupos de suelos del área de estudio	39
Figura 3.5: Clasificación Climática del área de estudio	40
Figura 3.6: Climograma - Estación Recuay	41
Figura 3.7: Precipitación total anual - Estación Recuay.....	41
Figura 3.8: (A) Puya de Raimondi (<i>Puya raimondii</i>) (B) Bosques de Queñual (<i>Polylepis sp.</i>)	43
Figura 3.9: (A) Vizcacha (B), Condor andino.....	44
Figura 4.1: Proceso general para la realización de la investigación.	47
Figura 4.2: Principios a considerar para la recolección y construcción de la base de datos.....	48
Figura 4.3: Inventario de movimientos en masa	49
Figura 4.4: Modelo de ficha descriptiva de un evento de movimiento en masa	51
Figura 4.5: (A, C, D) Eventos de movimientos en masa históricos validados en campo, (B) Toma de fotos con drone y (E) Lagunas con riesgos de desembalse	52
Figura 4.6: Geomorfología de los valles de estudio.....	56
Figura 4.7: Cobertura vegetal de los valles de estudio	58
Figura 4.8: NDVI (época húmeda) de los valles de estudio	59
Figura 4.9: Modelo digital de elevación de los valles de estudio	60
Figura 4.10: Clases de pendientes de los valles de estudio	62
Figura 4.11: Orientación de laderas de los valles de estudio.....	63
Figura 4.12: Rugosidad del terreno de los valles de estudio	64
Figura 4.13: Curvatura tangencial	65
Figura 4.14: Curvatura tangencial de los valles de estudio.....	65
Figura 4.15: Curvatura de perfil.....	66
Figura 4.16: Curvatura de perfil de los valles de estudio	66
Figura 4.17: Precipitación media anual-WorldClim de los valles de estudio	67
Figura 4.18: Correlación de Pearson entre las variables explicativas.....	69
Figura 4.19: Metodología para el cálculo del modelo de Regresión Logística	70
Figura 4.20: Metodología para el cálculo del Proceso de Análisis Jerárquico	91
Figura 5.1: Mapa de coincidencia entre los modelos de RL y AHP.	116
Figura 5.2: Coincidencia entre los mapas de RL y AHP para cada subcuenca de estudio.....	117
Figura 5.3: AUC de las subcuencas: (A) Parón (B) Llanganuco (C) Ulta (D) Honda (E) Llaca (F) Cojup.....	119
Figura 5.4: Principales variables explicativas de la SMM en valles glaciares de la Cordillera Blanca.....	120
Figura 5.5: Comportamiento de los eventos de movimientos en masa en función de las variables: (A) Pendiente (B) Elevación (C) NDVI (D) Precipitación anual (E) Geología (F) Geomorfología (G) Cobertura vegetal.	122

Índice de tablas

Tabla 2.1: Factores condicionantes y desencadenantes utilizados por diversos autores....	18
Tabla 2.2: Escala de comparaciones de Saaty	21
Tabla 2.3: Valores Índice Aleatorio	23
Tabla 2.4: Clasificación de los eventos de movimientos en masa.....	25
Tabla 2.5: Comportamiento de un modelo de predicción.....	28
Tabla 3.1: Unidades geológicas del área de estudio.....	35
Tabla 3.2: Unidades fisiográficas del área de estudio.....	37
Tabla 3.3: Comunidades campesinas y número de personas asentadas en las subcuencas de estudio	45
Tabla 4.1: Unidades geomorfológicas	56
Tabla 4.2: Clases de pendiente	61
Tabla 4.3: Codificación de los parámetros susceptibles a movimientos en masa	68
Tabla 4.4: Variables con correlaciones más altas.....	69
Tabla 4.5: Área y densidad relativa por movimientos en masa calculada para los parámetros geología, geomorfología y cobertura vegetal de la subcuenca Parón.	72
Tabla 4.6: Número de variables (No.), residuales de desviación (RD) y Akaike Information Criterio (AIC) por modelo de susceptibilidad para la subcuenca Parón.	73
Tabla 4.7: Resumen de los valores de los pesos del modelo de regresión logística para la subcuenca Parón.	74
Tabla 4.8: Área y densidad relativa por movimientos en masa calculada para los parámetros geología, geomorfología y cobertura vegetal de la subcuenca Llanganuco.....	75
Tabla 4.9: Número de variables (No.), residuales de desviación (RD) y Akaike Information Criterio (AIC) por modelo de susceptibilidad para la subcuenca Llanganuco.	76
Tabla 4.10: Resumen de los valores de los pesos del modelo de regresión logística para la subcuenca Llanganuco.	77
Tabla 4.11: Área y densidad relativa por movimientos en masa calculada para los parámetros geología, geomorfología y cobertura vegetal de la subcuenca Ulta.....	78
Tabla 4.12: Número de variables (No.), residuales de desviación (RD) y Akaike Information Criterio (AIC) por modelo de susceptibilidad para la subcuenca Ulta.	79
Tabla 4.13: Resumen de los valores de los pesos del modelo de regresión logística para la subcuenca Ulta.	80
Tabla 4.14: Área y densidad relativa por movimientos en masa calculada para los parámetros geología, geomorfología y cobertura vegetal de la subcuenca Honda.	81
Tabla 4.15: Número de variables (No.), residuales de desviación (RD) y Akaike Information Criterio (AIC) por modelo de susceptibilidad para la subcuenca Honda.	82
Tabla 4.16: Resumen de los valores de los pesos del modelo de regresión logística para la subcuenca Honda.	83
Tabla 4.17: Área y densidad relativa por movimientos en masa calculada para los parámetros geología, geomorfología y cobertura vegetal de la subcuenca Llaca.	84
Tabla 4.18: Número de variables (No.), residuales de desviación (RD) y Akaike Information Criterio (AIC) por modelo de susceptibilidad para la subcuenca Llaca.	85
Tabla 4.19: Resumen de los valores de los pesos del modelo de regresión logística para la subcuenca Llaca.	86
Tabla 4.20: Área y densidad relativa por movimientos en masa calculada para los parámetros geología, geomorfología y cobertura vegetal de la subcuenca Cojup.....	87
Tabla 4.21: Número de variables (No.), residuales de desviación (RD) y Akaike Information Criterio (AIC) por modelo de susceptibilidad para la subcuenca Cojup.	88

Tabla 4.22: Resumen de los valores de los pesos del modelo de regresión logística para la subcuenca Cojup.	89
Tabla 4.23: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Pendiente para la subcuenca Parón.	93
Tabla 4.24: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases del NDVI para la subcuenca Parón.	93
Tabla 4.25: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geomorfología para la subcuenca Parón.	94
Tabla 4.26: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Precipitación anual para la subcuenca Parón.	95
Tabla 4.27: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de los parámetros susceptibles para la subcuenca Parón.	95
Tabla 4.28: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Pendiente para la subcuenca Llanganuco.	96
Tabla 4.29: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geología para la subcuenca Llanganuco.	96
Tabla 4.30: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geomorfología para la subcuenca Llanganuco.	97
Tabla 4.31: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases del NDVI para la subcuenca Llanganuco.	98
Tabla 4.32: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de Precipitación anual para la subcuenca Llanganuco.	98
Tabla 4.33: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos los parámetros susceptibles para la subcuenca Llanganuco.	99
Tabla 4.34: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Pendiente para la subcuenca Ulta.	100
Tabla 4.35: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geología para la subcuenca Ulta.	100
Tabla 4.36: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geomorfología para la subcuenca Ulta.	101
Tabla 4.37: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de NDVI para la subcuenca Ulta.	102
Tabla 4.38: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Precipitación anual para la subcuenca Ulta.	102
Tabla 4.39: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de los parámetros susceptibles para la subcuenca Ulta.	103
Tabla 4.40: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Pendiente para la subcuenca Honda.	104
Tabla 4.41: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases del NDVI para la subcuenca Honda.	104
Tabla 4.42: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geología para la subcuenca Honda.	105
Tabla 4.43: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geomorfología para la subcuenca Honda.	106
Tabla 4.44: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Precipitación anual para la subcuenca Honda.	107
Tabla 4.45: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos los parámetros susceptibles para la subcuenca Honda.	107
Tabla 4.46: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Pendiente para la subcuenca Llaca.	108

Tabla 4.47: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geología para la subcuenca Llaca.	108
Tabla 4.48: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases del NDVI para la subcuenca Llaca.	109
Tabla 4.49: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Precipitación anual para la subcuenca Llaca.	109
Tabla 4.50: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de los parámetros susceptibles para la subcuenca Llaca.	110
Tabla 4.51: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Pendiente para la subcuenca Cojup.	111
Tabla 4.52: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geología para la subcuenca Cojup.	111
Tabla 4.53: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geomorfología para la subcuenca Cojup.	112
Tabla 4.54: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Precipitación anual para la subcuenca Cojup.	113
Tabla 4.55: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de los parámetros susceptibles para la subcuenca Cojup.	113

1 Introducción

1.1 Planteamiento del problema

La ocurrencia de eventos de movimientos o remoción en masa en la zona del Parque Nacional Huascarán es un peligro recurrente y latente. Debido a la complejidad topográfica de la Cordillera Blanca, los eventos de remoción en masa como caída de rocas, vuelco, deslizamientos, flujos entre otros, son bastante comunes y han cobrado la vida de miles de personas durante los últimos siglos. Dentro de los valles pertenecientes a la Cordillera Blanca, han ocurrido eventos históricos que han afectado a las comunidades asentadas en el Callejón de Huaylas; como el ocurrido el 13 de diciembre de 1941, donde se produjo un aluvión que afectó la ciudad de Huaraz dejando 1800 víctimas mortales; actualmente la laguna Palcacocha que origino este aluvión, tiene más agua de la que tenía en 1941 (Carey, 2018). Otro evento importante, es el ocurrido en 1970 donde un alud sepultó a la ciudad de Yungay dejando alrededor de 28 000 fallecidos (DESINVENTAR, 2016). Este evento es reconocido como uno de los más devastadores ocurridos en el Perú y el mundo. En el año 2010, otro aluvión de menor magnitud se produjo en la ciudad de Carhuaz, volviendo afectar levemente a los poblados locales; a raíz de este evento se instaló el primer sistema de alerta temprana ante un aluvión en la laguna 513 perteneciente a la Cordillera Blanca.

La Cordillera Blanca, que representa gran parte del territorio glaciar nacional, ha presentado un fuerte desequilibrio ambiental durante las últimas décadas a causa del cambio climático; el cual se entiende como un proceso que se ha incrementado y tiene como factor determinante el aumento de los gases de efecto invernadero emitidos por los seres humanos. Los efectos del cambio climático en la Cordillera Blanca son evidentes en tres puntos: el retroceso glaciar, el incremento de espejos de agua y de eventos de movimientos en masa.

La investigación de los eventos de movimiento en masa es mundialmente importante y particularmente en el Perú, puesto que nuestro país se encuentra en una zona altamente sísmica y con fenómenos de precipitación fuertes (Fenómeno del Niño) que desencadenan ciertos eventos de peligro. En conjunto, estas características hacen del Perú, y especialmente de las zonas andinas, áreas con una fuerte necesidad de investigación en estos temas para proveer mejores maneras de prevenir y estar preparados ante peligros naturales en diferentes valles. Paso fundamental para la toma de decisiones para mitigar estos fenómenos.

Una línea de investigación prioritaria es la de evaluar diferentes metodologías para poder determinar la probabilidad de ocurrencia (susceptibilidad) de fenómenos de geodinámica externa. Estas investigaciones incluyen las desarrolladas por Ayalew & Yamagishi, 2005; Baeza & Corominas, 2001; Blanco, 2013; E. Bueechi et al., 2019; Garcia et al., 2007; Lamelas, 2007. En Perú, el CENEPRED (2015) hace uso del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), planteado por (Saaty, 1980) debido a su practicidad. Otra metodología usada en otros países, es la que usa la Regresión Logística (RL) como principal manera de análisis (Bornaetxea et al., 2018; E. Bueechi et al., 2019). Sin embargo, la aplicación de las diferentes metodologías para determinar la susceptibilidad al peligro va a depender de factores como la escala de trabajo, la morfología del terreno, así como la información física que se disponga del área de estudio. Estos factores son muy importantes al determinar la metodología a usar en la evaluación de peligros.

En este estudio, se plantea evaluar estas dos técnicas basadas en un enfoque heurístico y estadístico y a través de la comparación de mapas de susceptibilidad y sus ventajas para analizar factores determinantes. Con la comparación de las diferentes técnicas, se espera

identificar el mejor método para la determinación de la susceptibilidad en diferentes subcuencas de la Cordillera Blanca.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema General

- ¿Cómo comparar la susceptibilidad a movimientos en masa usando el método de Regresión Logística y Proceso de Análisis Jerárquico en valles glaciares de la Cordillera Blanca-Ancash?

1.2.2 Problemas Específicos

- ¿Cuál es el método más adecuado para calcular la susceptibilidad a movimientos en masa en valles glaciares de la Cordillera Blanca?
- ¿Cuáles son las principales variables explicativas de la susceptibilidad a movimientos en masa en diferentes valles glaciares de la Cordillera Blanca?
- ¿Cómo comprender el comportamiento de los eventos de movimientos en masa en función de sus principales variables explicativas?

1.3 Justificación de la investigación

Entre los peligros que ocurren en los valles de la Cordillera Blanca, se encuentran los deslizamientos, caídas, flujos y aluviones, generalmente causados por precipitaciones y sismos de gran intensidad, como lo ocurrido en 1970, y sepulto la ciudad de Yungay. Ante la ocurrencia de este tipo de eventos, surge la necesidad de investigación de susceptibilidad a movimientos en masa diversos valles de la Cordillera Blanca.

Para el mapeo de la susceptibilidad a movimiento en masa, en el Perú se utiliza el método de análisis jerárquico (CENEPRED, 2015), el cual es un primer paso considerable hacia la gestión de riesgos; sin embargo, en la actualidad existen diversos métodos de zonificación de peligros de movimiento en masa, como el método de distribución o de inventario (Guzzetti et al., 2002), heurísticos, estadísticos (Ayalew et al., 2005), determinísticos (Westen & Terlien, 1996). Estos métodos no están recomendados/mencionados en el manual para el país, a pesar de que se sabe que ciertos métodos han demostrado ser mejores en ciertas topografías (Ayalew & Yamagishi, 2005; García, 2008; Pineda et al., 2012).

Es necesario más investigaciones mediante estos métodos, puesto que existe evidencia que el comportamiento y la eficiencia de estas metodologías, depende de la escala espacial en la cual son aplicadas e información disponible (E. Bueechi et al., 2019; Corominas et al., 2014). Esta investigación busca determinar las diferencias y utilidad de los métodos de regresión logística y proceso de análisis jerárquico en valles glaciares de la Cordillera Blanca.

Los datos de detección remota combinados con sistemas de información geográfica (SIG) son importantes para generar, procesar información espacial y para asociar las variables intrínsecas a los movimientos en masa. Estas herramientas permiten generar mapas temáticos, calcular diferentes índices, asignar, integrar datos y generar los mapas de susceptibilidad.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Comparar la susceptibilidad a movimientos en masa usando el método de Regresión Logística y Proceso de Análisis Jerárquico en valles glaciares de la Cordillera Blanca-Ancash.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar el método más adecuado para calcular la susceptibilidad a movimientos en masa en valles glaciares de la Cordillera Blanca.
- Determinar las principales variables explicativas de la susceptibilidad a movimientos en masa en diferentes valles glaciares de la Cordillera Blanca.
- Analizar el comportamiento de los eventos de movimientos en masa en función de las principales variables predictoras.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis General

- La comparación de los métodos de susceptibilidad a movimientos en masa nos arroja una gran similitud y correlación entre los métodos de Regresión Logística y Proceso de Análisis Jerárquico en valles glaciares de la Cordillera Blanca-Ancash.

1.5.2 Hipótesis Específicas

- La regresión logística tiene una capacidad predictiva más precisa y exacta en comparación a la metodología AHP, evaluada por las líneas ROC y teniendo mayores ventajas sobre el proceso de análisis jerárquico.
- El uso de variables obtenidas a partir de métodos estadísticos de selección de variables explica de mejor manera la susceptibilidad a movimientos en masa en valles glaciares de la Cordillera Blanca.
- Los métodos logísticos tienen la capacidad de identificar el comportamiento o efecto de cada factor relevante identificado como predictor de la susceptibilidad a movimientos en masa.

2 Marco teórico

2.1 Antecedentes de la investigación

Estudios realizados en diversos países aplicando diversas metodologías

Los estudios de susceptibilidad de desplazamiento de masas se han venido desarrollando desde hace unos 50 años atrás. Los primeros estudios de la zonificación de movimientos de masas, basadas en enfoques cualitativos, se remontan a la década de 1970 (Brabb et al., 1972; Humbert, 1972), mientras que los métodos cuantitativos se desarrollaron a fines de la década de 1980 (Brand, 1988), y particularmente en los años 90 para la gestión de riesgos de pendientes individuales (Fuchu et al., 1999; Hardingham et al., 2020). Universalmente tenemos diversas metodologías para la evaluación acertada de riesgos asociados a peligros.

Corominas (2014), en su estudio *"Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk"* [Recomendaciones para el análisis cuantitativo de riesgo de deslizamiento], presenta las metodologías que más se recomiendan para el análisis cuantitativo del peligro, vulnerabilidad y riesgo a diferentes escalas de trabajo. También provee recomendaciones para la verificación y validación de sus resultados, dando importancia a estos factores (espaciales, temporales) para la elección de la metodología a usar. Dentro de las recomendaciones más importantes, es el uso de las curvas de características del receptor (ROC) para evaluar la calidad del método elegido.

Pardeshi (2013), en su estudio titulado *"Landslide hazard assessment: Recent trends and techniques"* [Evaluación del riesgo de desprendimiento de tierras: Tendencias y técnicas recientes], evalúa metodologías para la toma de decisiones y los explica en términos de enfoques heurísticos, semicuantitativos, cuantitativos, probabilísticos y multicriterio. En su estudio señala que, en la determinación de pesos de un parámetro dado, las técnicas heurísticas y semicuantitativas implican subjetividad en la asignación de pesos. Por lo tanto, no se puede evaluar la validez entre los mapas resultantes. Los métodos cuantitativos, por otro lado, proporcionan métodos objetivos para determinar los pesos para un parámetro dado en función de sus relaciones con la presencia de deslizamientos de tierra. También describe la importancia de las tecnologías geoespaciales en el mapeo, la detección y monitoreo de los eventos de movimientos en masa. Finalmente

Mărgărint & Grozavu (2013), en su estudio titulado *"Assessing the spatial variability of coefficients of landslide predictors in different regions of Romania using logistic regression"* [Evaluación de la variabilidad espacial de los coeficientes de predictores de deslizamientos de tierra en diferentes regiones de Rumanía mediante regresión logística]; modeló la susceptibilidad en cuatro sectores de Rumanía, a partir de una muestra de inventario de deslizamiento y capas temáticas. Su investigación tuvo como objetivo calcular la variabilidad espacial y variación de los coeficientes predictores en estas regiones de estudio. Entre los análisis más importantes, se tuvo el tratamiento de las capas temáticas y categóricas, mediante el cálculo de las densidades relativas de las clases de las variables predictoras mediante los datos de inventario de movimientos en masa. Este estudio muestra que los coeficientes asignados a los predictores de desprendimiento mediante regresión logística revelaron características importantes en la representación de los desprendimientos.

Ayalew (2005), en su estudio *"Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications"* [Deslizamientos de tierra en la isla de Sado (Japón): Parte II. Cartografía de susceptibilidad

basada en SIG con comparaciones de los resultados de dos métodos y verificaciones]. Compara metodologías basadas en criterios múltiples (proceso de análisis jerárquico) y criterios estadísticos (regresión logística), para la ponderación de las variables seleccionadas se realizó el cálculo previo de la densidad relativa de movimientos en masa a partir de los datos de inventario para la zona de estudio. Este autor plantea en su investigación que los estudios hechos con el modelo de regresión logística son más detallados, dando un mayor número de clases de susceptibilidad.

Estudios realizados en el Perú

Büechi Emanuel (2018), en su tesis titulada “*Modelling of Landslide Susceptibilities in the Cordillera Blanca (Perú)*” [Modelado de susceptibilidades de deslizamientos en la Cordillera Blanca (Perú)]; realizó un estudio a escala regional en la Cordillera Blanca usando la Regresión Logística en base a tres modelos digitales de elevación (DEM por sus siglas en inglés), el cual determinó que un DEM con resolución de 10 a 20 m da buenos resultados para estudios en la zona. Los resultados obtenidos fueron validados mediante el área bajo la curva de una curva ROC. En general, este estudio mostró que el modelado de susceptibilidad a deslizamientos a escala regional puede conducir a resultados adecuados incluso en regiones con datos de entrada de modelos escasos, pero los rendimientos de los diferentes DEM y modelos deben evaluarse cuidadosamente.

Valderrama Patricio (2016), en su investigación titulada “Peligros Geológicos por Procesos Glaciales, Cordillera Blanca - Río Santa”; realizó un estudio sobre la ocurrencia de peligros de origen geológicos en la Cordillera Blanca que afectan a las localidades de la zona. Presentó una detallada investigación de los valles glaciares de la cuenca del río Santa, con una cartografía del inventario de peligros por movimientos en masa históricos. También incluyó modelos de aluviones (flujos de detritos) que muestran mapas de alturas de flujo de las principales ciudades asentadas en las quebradas a lo largo del valle del río Santa.

Blanco Franklin (2013), en su tesis titulada “Evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa en la zona central de la cuenca del río Mantaro - Región Junín”; calculó la susceptibilidad a movimiento en masa mediante las metodologías de Proceso de Análisis Jerárquico y Análisis Discriminante (AD), mediante el Índice de Densidad Relativa (IDR) se comparan los ráster resultantes, el cual mide la relación entre el mapa de susceptibilidad y el inventario generado. La capa de susceptibilidad generada mediante proceso de análisis jerárquico se mostró ligeramente mejor en comparación al método de análisis discriminante.

Ferro Vladimir (2007), en su tesis titulada “La evaluación del riesgo de desastre en la planificación del desarrollo de la ciudad de Huaraz, Áncash”; realizó un estudio sobre evaluación de riesgo de desastre en la planificación del desarrollo de la ciudad de Huaraz, mediante el mapeo de zonas actuales de riesgo, donde reconoce el medio físico de la ciudad de Huaraz, identificando los escenarios de peligros mediante niveles. Así como esta tesis, existen varios estudios de Evaluaciones de Riesgos (EVAR), aplicados a diferentes centros poblados del Callejón de Huaylas, todos ellos utilizando la metodología de Proceso de Análisis Jerárquico a nivel local.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Susceptibilidad

Se define como la probabilidad de ocurrencia de un peligro en un área determinada (Fell et al., 2008), es una estimación cualitativa o cuantitativa de un área en la que ocurren o puede ocurrir peligro. En los años 70 apareció el concepto de susceptibilidad en los mapas del Servicio Geológico de EE. UU (USGS) (Brabb et al., 1972); la susceptibilidad se basa en la delimitación de la distribución espacial de factores relacionados con los procesos de inestabilidad, para obtener una zonación de áreas propensas a los movimientos de ladera, sin que se derive implicación temporal alguna (Chacon, 2008). La susceptibilidad de un terreno depende de ciertos parámetros como son los factores condicionantes y desencadenantes.

Factores condicionantes o “pasivos”

Son los parámetros que son propios del ámbito geográfico tales como la geología, geomorfología, fisiografía, hidrografía, DEM y sus derivados como pendiente, orientación, rugosidad, curvatura tangencial, curvatura de perfil entre otros.

Factores desencadenantes o “activos”

Son factores externos que actúan en el terreno, como consecuencia desencadenan las inestabilidades en el área de estudio. Por ejemplo: hidrometeorológicos (viento, humedad de aire, lluvias, temperaturas), geológicas (encuentro de placas tectónicas, zonas de actividad volcánica, desprendimiento de grandes bloques), provocadas por el ser humano (recursos explotados, construcción de infraestructura, actividades económicas, crecimiento demográfico, etc.).

A continuación, se muestra los factores condicionantes y desencadenantes a movimientos en masa usados en estudios previos por diversos autores (Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Factores condicionantes y desencadenantes utilizados por diversos autores

Autor/Parámetro	Elevación	Litología	Pendiente	Proximidad a carreteras	Orientación	Lineamientos	Relación roca-pendiente	Uso de suelo	Rugosidad	Estratigrafía	Hidrogeología	Antrópicos	Área de acumulación	Curvatura	Geomorfología	Cobertura vegetal	Precipitación
(Ayalew et al., 2005)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(Garcia et al., 2007)	✓	✓	✓	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓
(Lamelas, 2007)	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	-	-	-	-	-
(E. Bueechi et al., 2019)	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-
(Baeza & Corominas, 2001)	-	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	-	-
(Blanco, 2013)	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-
(Valderrama et al., 2016)	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-

Fuente: Elaboración propia.

En el área de la Cordillera Blanca han sido pocos los estudios realizados aplicando diferentes técnicas para la determinación de la susceptibilidad. A partir de lo dicho por Valderrama (2016) y la Tabla 2.1, donde se describen las principales investigaciones realizadas en diferentes partes del mundo y del Perú, los factores mayormente utilizados son : geología, cobertura vegetal, geomorfología, NDVI(Índice de vegetación de diferencia normalizada) , elevación, pendiente, rugosidad, orientación, curvatura de perfil, curvatura tangencial y precipitaciones.

2.2.2 Métodos de zonificación de peligros por movimientos en masa

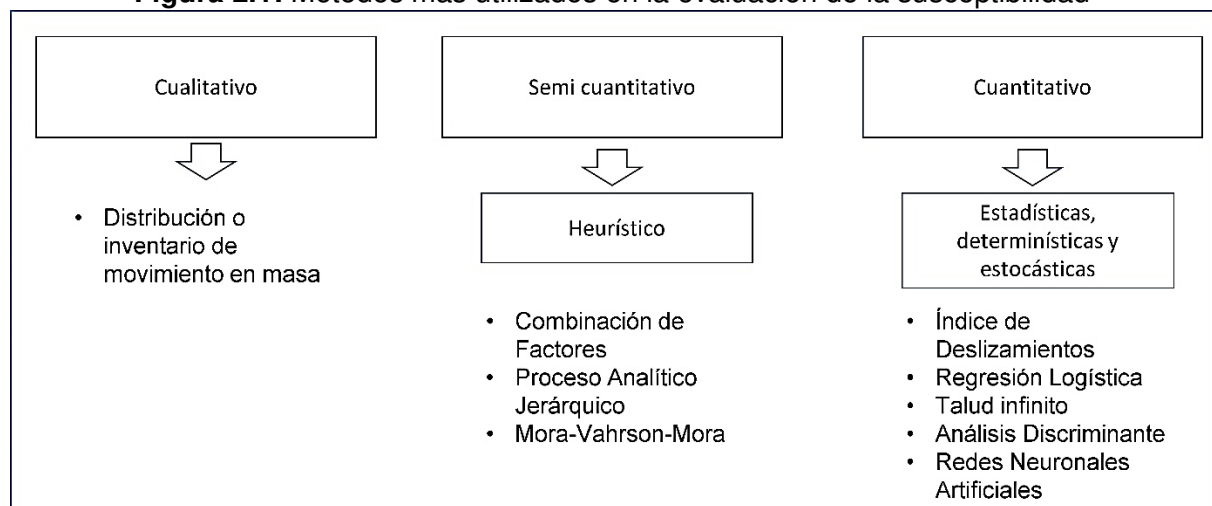
Para ponderar el grado de influencia de cada parámetro, se pueden usar diferentes metodologías para el cálculo de la susceptibilidad a movimientos en masa, mediante el uso de una serie de enfoques clasificados como: cualitativos, cuantitativos y semicuantitativos.

Los enfoques cualitativos son los métodos más simples que existen, carecen de análisis desarrollados ya que tienden a mostrar eventos acumulativos en un mismo espacio geográfico. La distribución de un inventario de peligros por movimiento en masa son técnicas que proporcionan datos de entrada para otros métodos cuantitativos (Pardeshi et al., 2013).

Los semicuantitativos obtienen los pesos de los valores de los parámetros a través de técnicas heurísticas. Mediante el análisis e interpretación del terreno dado por un investigador, se realizan comparaciones entre los parámetros intrínsecos con el objetivo de obtener un valor numérico (peso), lo cual le da un carácter subjetivo.

Los métodos cuantitativos utilizan técnicas estadísticas, determinísticas y estocásticas. A partir de valores de parámetros, se obtiene una función matemática que muestre el comportamiento de los movimientos en masa en el terreno. Para calcular dicha función se toma la información de zonas con presencia (mapa de inventario) y ausencia de inestabilidad y por medio de cálculos estadísticos se obtiene un valor que representa la influencia de los parámetros en la generación de movimientos en masa. En la Figura 2.1 se menciona las metodologías clasificadas según cada enfoque.

Figura 2.1: Métodos más utilizados en la evaluación de la susceptibilidad



Fuente: Basado en SGC (2013).

2.2.2.1 Regresión Logística (RL)

Modelo planteado por (Cox, 1958), útil para calcular la probabilidad de ocurrencia de un evento basado en datos de presencia = 1 o ausencia = 0, en función a variables predictoras continuas o categóricas. Ha sido muy aplicado en distintos campos, incluyendo el de la epidemiología, ecología, economía, ciencias sociales y medicina; pudiendo predecir la ausencia o presencia de, por ejemplo, un evento clínico en ciertas condiciones dadas (Christodoulou et al., 2019; Eftekhar et al., 2005; Warton & Hui, 2011).

Para nuestro caso, este modelo hace uso de una variable dependiente con dos posibles resultados, la presencia de un evento de movimientos en masa o la ausencia de este. Por lo tanto, es una variable dicotómica también llamada Logística Binaria. Este modelo también permite la inclusión de múltiples variables predictoras. En este caso, se la denomina Regresión Logística Multinomial. Finalmente, durante el análisis, se puede crear múltiples modelos con distintas variables predictoras y calcular el mejor modelo basado en Criterios de Información como el Criterio de Información de Akaike (*AIC*) (Emanuel Bueechi, 2018).

Cox (1958), desarrolla la relación cuantitativa entre las variable dependientes e independientes, esta relación puede ser expresado de la siguiente manera:

$$p(y) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (2.1)$$

Donde $p(y)$ es la susceptibilidad estimada de ocurrencia de movimientos en masa, que está en el rango de 0 y 1, y el valor de Z esta entre $-\infty$ y ∞ , planteado como la siguiente función lineal:

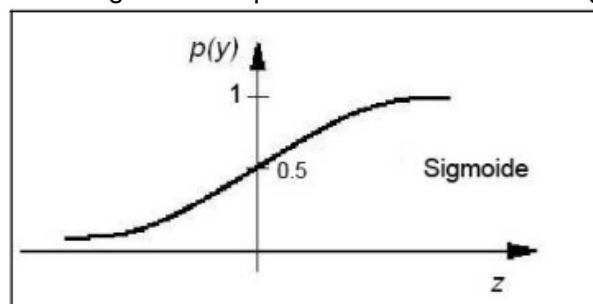
$$Z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_{i=n}x_{i=n} \quad (2.2)$$

Donde:

- b_0 y b_i ($i=0, 1, n$) son los coeficientes estimados para cada uno de los "n" factores o variables evaluadas.
- X_i ($i=0, 1, n$) son los "n" factores o variables independientes (por ejemplo, los parámetros relacionados con deslizamientos de tierra).

En la Figura 2.2 se representa la gráfica de la función sigmoide empleada en el cálculo de la regresión logística

Figura 2.2: Función sigmoide empleada en el cálculo de regresión logística



Fuente: (García, 2008)

Con una serie de transformaciones, *logit* es el logaritmo neperiano de la razón entre la probabilidad de que el evento ocurra y la probabilidad de no ocurrencia; y está relacionado linealmente con las variables de la forma siguiente:

$$Y = \text{Logit}(p) = \ln \left(\frac{p(Y=1)}{1 - p(Y=1)} \right) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_ix_i \quad (2.3)$$

La expresión $p(Y=1) / 1 - p(Y=1)$ en la ecuación se denomina razón de probabilidades o *odds ratio* en inglés.

Los *odds ratio* (razón de probabilidad) son ampliamente empleados estadísticamente para comparar la frecuencia de exposición de diferentes factores de riesgo. Matemáticamente un *odds ratio* corresponde a un cociente entre dos probabilidades, siendo un *odds* una forma alternativa de expresar la posibilidad de ocurrencia de un evento de interés o de presencia de una exposición (Cerdeira et al., 2013). Los coeficientes de regresión logística en el predictor lineal se estiman con el método de máxima verosimilitud.

Para la aplicación del modelo de RL para el cálculo de la susceptibilidad basado en SIG, se utiliza el píxel como unidad de mapeo. Este modelo intenta predecir la probabilidad de ocurrencia del evento de movimientos en masa, siendo muy adecuado para la evaluación de la inestabilidad de laderas, ya que los datos observados consisten en puntos (píxeles) con valor de alta probabilidad, se acercarán a 1, mientras los de baja probabilidad tenderán a 0.

2.2.2.2 Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)

El Proceso de Jerarquía Analítica (AHP, por sus siglas en inglés) es un proceso de medición de criterios múltiples para la toma de decisiones a través de comparaciones por pares y se basa en los juicios de los investigadores para obtener escalas de prioridad (Saaty, 2008). En el Perú, CENEPRED (2015) hace uso de esta metodología para realización de mapas de peligros y vulnerabilidad en el Perú. En Colombia, el Servicio Geológico Colombiano (2013), hace uso del proceso de análisis jerárquico para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por deslizamientos de tierra.

Esta metodología involucra la asignación de pesos a los diferentes n factores que están involucrados en un problema de decisión múltiple. Para ello se tiene que comparar cada criterio i con cada criterio j , obteniendo unos valores a_{ij} que es posible agrupar en una matriz cuadrada de orden n , la llamada matriz de comparaciones por pares, $A = [a_{ij}]$. (García, 2008).

En la Tabla 2.2, Saaty propone una escala de comparación entre pares para la estimación de los coeficientes:

Tabla 2.2: Escala de comparaciones de Saaty

Escala Numérica	Escala Verbal	Explicación
1	Igual o diferente a ...	No hay diferencia al comparar un elemento con otro.
5	Más importante o preferido que...	El primer elemento es considerado más importante que el segundo al compararlos.
3	Ligeramente más importante o preferido que ...	El primer elemento es considerado ligeramente más importante que el segundo al compararlos.
7	Mucho más importante o preferido que ...	Al comparar un elemento con otro el primero es considerado absolutamente más importante o preferido que el segundo.
9	Absolutamente o muchísimo más importante que ...	Al comparar un elemento con otro el primero es considerado absolutamente o muchísimo más importante que el segundo.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	

Fuente: Basado en Saaty (2008)

Finalmente, las escalas numéricas serán asignadas dentro de una matriz de comparaciones pareadas, el cual servirá para el análisis y cálculo de los pesos asignados a cada parámetro.

Matriz de Comparaciones pareadas

Sea A una matriz $n \times m$, la matriz recíproca de comparaciones pareadas, $A = [a_{ij}]$, es de la siguiente manera:

$$A = \begin{pmatrix} a_1/a_1 & a_1/a_2 & \dots & a_1/a_n \\ a_2/a_1 & a_2/a_2 & \dots & a_2/a_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n/a_1 & a_n/a_2 & \dots & a_n/a_n \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Al comparar un elemento con el mismo el valor de equivalencia es 1, que significa que cualquier criterio es igualmente importante que sí mismo, y por lo tanto los coeficientes a_{ij} de la matriz A (su principal diagonal) siempre tendrán valor 1. Además, la matriz A cumple las condiciones de reciprocidad y homogeneidad:

Reciprocidad

Cuando dos elementos de la matriz guardan relación entre sí. Si A es una matriz de comparaciones pareadas se cumple que $a_{ij} = 1/a_{ji}$, el evaluador solo necesita evaluar la parte superior de la matriz.

$$\text{Si, } a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad (2.5)$$

$$\text{Entonces } a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, \quad (2.6)$$

$$\text{Es decir } a_{ji} = \frac{w_j}{w_i} \quad (2.7)$$

De la matriz, se llena solo la mitad superior, siendo la parte inferior correspondiente a los valores inversos.

Homogeneidad

Cuando los elementos que se comparan entre si son del mismo orden de jerarquía. Los pesos de los elementos son iguales si los parámetros i y j son considerados de igual importancia.

$$w_i = w_j \quad (2.8)$$

Al comprar estos parámetros en la matriz "A", resultara:

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} = 1 \quad (2.9)$$

$$\text{Entonces } a_{ij} = a_{ji} = 1 \quad (2.10)$$

Luego de que se elabora la matriz de comparaciones pareadas se realiza el proceso de sinterización, donde podemos determinar cuál de los elementos es de mayor prioridad. El proceso matemático requiere el cálculo de valores y vectores característicos. Así mismo, para poder conocer la calidad de nuestros resultados, se determina la consistencia de las variables.

Consistencia

Se calcula el grado de consistencia del juicio del investigador para definir la calidad de la decisión final. La consistencia perfecta es muy difícil de lograr, por lo tanto, se debe esperar cierta inconsistencia, después de todo son juicios dados por el investigador.

La consistencia de los juicios del evaluador se calcula a partir del autovalor máximo (n_{max}), y se compara con el número de criterios que es n . Con relación a esto, Saaty proporciona tablas de consistencia para medirla. De esta manera, se define la razón de consistencia (RC), a partir del índice de consistencia (IC) y del índice de consistencia aleatorio (ICA):

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (2.11)$$

IA es el índice de consistencia aleatoria de una matriz de comparaciones pareadas generada de manera aleatoria. El índice de consistencia aleatoria depende del número de elementos que se comparan, y están en la siguiente tabla:

Tabla 2.3: Valores Índice Aleatorio

N	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484
N	9	10	11	12	13	14	15	16
IA	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

Fuente: (Moreno, 2001)

Saaty (1980) , sugiere la siguiente fórmula para IA

$$IA = \frac{1.98(n - 2)}{n} \quad (2.12)$$

Donde n es el número de criterios que se consideran.

El IC es el índice de consistencia de A y se calcula mediante la expresión planteada por (Saaty, 1980):

$$IC = \frac{n_{max} - n}{n - 1} \quad (2.13)$$

donde el valor de n_{max} se efectúa con la siguiente formula

$$A\bar{W} = n_{max}\bar{W} \quad (2.14)$$

Observando que la i -ésima ecuación es:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}\bar{W} = n_{max}\bar{W} \quad (2.15)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.16)$$

$$\text{Dado que } \sum_{i=1}^n \bar{W} = 1 \text{ obtenemos:} \quad (2.17)$$

$$\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n a_{ij}\bar{W} \right) = n_{max} \sum_{i=1}^n \bar{W}_{ij} \quad (2.18)$$

Se considera aceptable si IC es menor 0.1, caso contrario se debe volver a revisar los juicios. En la realización del trabajo esto puede llevar un largo proceso de correcciones.

A partir de este proceso, se realiza el cálculo del valor del peso de las clases contenida en cada parámetro, en base a estos valores se calcula la susceptibilidad de cada píxel del área de estudio. La susceptibilidad para el AHP se representa mediante la siguiente formula:

$$S = \sum_{i=1}^n E_i \times C_{ij} \quad (2.19)$$

Donde:

- S: Valor de la susceptibilidad de un píxel
- E_i : Peso del parámetro i
- C_{ij} : Peso de la clase j que forma parte del parámetro i

Cada valor de un píxel representa una sola clase; por ejemplo, las características de un píxel son: Depósito aluvial, con morrenas, pendiente de 50 ° y suelo desnudo. La aplicación del Proceso de Análisis Jerárquico es realizada mediante el análisis de los factores condicionantes y desencadenante del peligro.

2.2.3 Riesgos

Se define como probabilidad de que la población humana (elementos expuestos) sufran daños y pérdidas como resultado de la vulnerabilidad y el impacto del peligro (Ley N° 29664, 2011, p. 4). Es un procedimiento que permite caracterizar y definir los peligros, analizando las vulnerabilidades y finalmente calculando el riesgo, con la finalidad de tener una herramienta que nos permita una adecuada toma de decisiones en la Gestión de Riesgo de Desastres (GRD).

La Evaluación del Riesgo (conocido en la literatura inglesa como *Risk Assessment*), es el procedimiento que permite caracterizar los peligros, analizar las vulnerabilidades y finalmente determinar los niveles de riesgos asociados a una zona de estudio en una escala determinada (ITC, 2011).

Se define como la consecuencia de relacionar el peligro con la vulnerabilidad de los elementos expuesto (población, infraestructuras), para así evitar problemas ambientales, económicos y sociales relacionados a fenómenos peligrosos (CENEPRED, 2015).

Los conceptos de peligro (amenazas), vulnerabilidad y riesgos, están basadas en la ecuación adecuada en la Ley N 29664 ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgos de Desastres (SINAGERD), en el cual el riesgo se expresa en función del peligro y vulnerabilidad (Ley N° 29664, 2011). En la siguiente ecuación se explican los valores que determinan los riesgos:

$$R = f(P_i; V_i) \quad (2.20)$$

Donde

- R= riesgo de ocurrencia del peligro
- f = en función
- P= probabilidad de ocurrir un peligro de intensidad i
- V = vulnerabilidad para una intensidad i de un elemento expuesto

Peligros

Se define como probabilidad de ocurrencia de un fenómeno, potencialmente dañino, de origen natural, que se presenta en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un período de tiempo y frecuencia definidos (Ley N° 29664, 2011); estudios realizados en otros países hacen uso del término amenaza.

CENEPRED (2015), según su origen, considera que el peligro puede ser de dos clases: los inducidos por acción humana y los generados por fenómenos de origen natural. Este estudio se centra en los originados por fenómenos naturales, específicamente los generados por geodinámica externa.

Vulnerabilidad

Se define como la susceptibilidad a la población, la estructura física a las actividades socioeconómicas, de sufrir daños por acciones de un amenaza o peligros (Ley N° 29664, 2011). La vulnerabilidad está en función de tres factores: exposición, fragilidad y resiliencia.

La exposición, se entiende como las decisiones y prácticas que sitúan al ser humano y su entorno en la zona de impacto de un peligro. La fragilidad, se entiende como las condiciones de desventaja o debilidad relativa del ser humano y su entorno frente a un peligro. Finalmente, la resiliencia, está referida la capacidad de recuperación del ser humano y su entorno frente a la ocurrencia de un peligro. A mayor resiliencia, menor vulnerabilidad (CENEPRED, 2015).

2.2.4 Movimientos en masa

Son procesos de movilización de volumen de material que involucran suelo, rocas, tierra, detritos o escombros, que se desplazan por la ladera por acción de la gravedad (CENEPRED, 2015), generados por fenómenos de geodinámica externa.

La clasificación de los eventos de movimientos en masa, ha sido mejorada a lo largo de los años (Hutchinson, 1988; PMA-GCA, 2007; Varnes, 1958, 1978). Para la presente investigación se utilizó la clasificación hecha por Varnes y Hutchinson (1988; 1978). En la Tabla 2.4 se describe la clasificación para procesos de movimientos en masa hecha por Varnes y Hutchinson (1988; 1978).

Tabla 2.4: Clasificación de los eventos de movimientos en masa

Mecanismo de movimiento	Tipo de material involucrado		
	Roca	Derrubios	Suelo
Caída	Caída de rocas	Caída de derrubios	Caída de suelos
Vuelco	Vuelco de rocas	Vuelco de derrubio o escombros	Vuelco de suelos
Deslizamiento rotacional	Individual	Individual	Individual
	Múltiple	Múltiple	Múltiple
	Sucesivo	Sucesivo	Sucesivo
Deslizamiento Traslacional	Deslizamiento de roca en bloque	Deslizamiento de derrubios en bloque	Deslizamiento traslacional de suelo
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de derrubios	Coladas de barro
Flujos	Flujo de rocas	Corrientes de derrubios	Flujo de tierra, arena o suelo
Expansión lateral	Expansiones laterales de rocas	Expansiones laterales en derrubios	Expansiones laterales en suelo
Complejo	Ejemplo: Alud de rocas	Ejemplo: Flujo deslizante	Ejemplo: Rotación de flujo de tierras

Fuente: Basado en Varnes y Hutchinson (1988; 1978)

A continuación, se explicarán algunos de ellos.

Desprendimiento o caída

Son movimientos en caída libre de diversos materiales como rocas, detritos y suelos. Se produce por el desprendimiento de material de una superficie inclinada, el cual puede rodar, rebotar, deslizarse ladera abajo (Alcántara, 2000). Es definido de acuerdo con el material involucrado, por lo que se clasifican de manera general en caídas o desprendimiento de rocas, detritos y de suelos. Estos movimientos se caracterizan por sus altas velocidades y la separación de la masa de su fuente, ocurriendo en laderas inclinadas, de tipo natural y artificial.

Vuelco

Desplome de una masa de suelo, roca o detrito en torno a un eje definido por su centro de gravedad. El movimiento de un vuelco o desplome es hacia adelante o hacia la parte externa, por lo cual involucra inclinación o basculamiento, pero no implica colapso; ocurren mayormente en materiales que poseen discontinuidades como grietas de tensión, diaclasas o superficies columnares (Alcántara, 2000).

Deslizamiento rotacional

Estos tipos de deslizamiento se dan en superficies de ruptura de forma curva o cóncava. Están clasificados como individual, múltiple y sucesivo; clasificación que se aplica de acuerdo al tipo de material involucrado (Alcántara, 2000) .

Deslizamiento traslacional

Se entiende como movimientos de masa a lo largo de una superficie de ruptura, se forma ondulada o semi plana. Son divididos en deslizamientos de roca en bloque, derrubio en bloque y traslacionales de suelos (Alcántara, 2000) .

Deslizamiento planar

Se dan en superficies planas, se clasifican de acuerdo con el material involucrado, por lo tanto, los principales tipos son los deslizamientos de rocas, derrubios y las coladas de barro.

Flujos

Existe una gran variedad de flujos de lento a rápido y de seco a húmedo. Para una mejor diferenciación Varnes (1978) lo divide en flujos en lecho de roca, flujos en escombros y tierra. Los flujos de rocas requiere muchas fracturas de todos los tamaños para que las deformaciones puedan distribuirse un área más grande y no concentrarse en una sola fractura (Alcántara, 2000). Generalmente resulta en muy lento pero constante proceso, los flujos de escombros y los flujos de suelo son más fáciles de reconocer como flujo; sin embargo, distinguirlos entre ellos puede ser algo complicado.

Expansión lateral

Consecuencia de la expansión y fracturación de masas de rocas compactados o suelos, debido a la licuefacción del material adyacente, suceden cuando materiales gruesos, como fragmentos de rocas, grava, etc., están sumergidos en una matriz de material más fino o contienen arcillas (Alcántara, 2000).

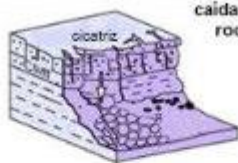
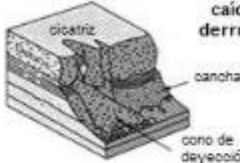
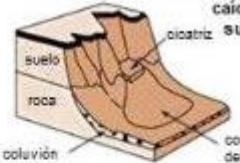
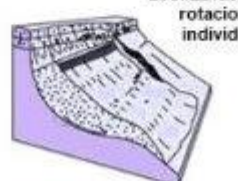
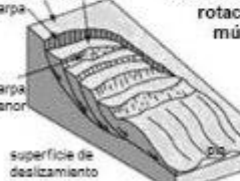
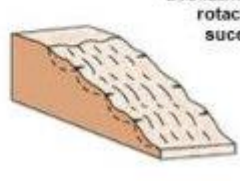
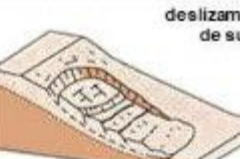
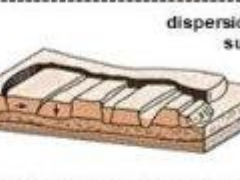
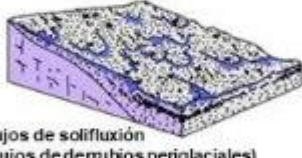
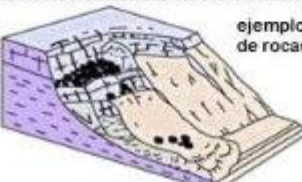
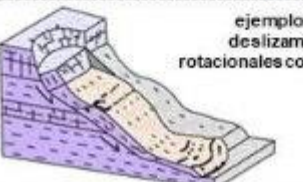
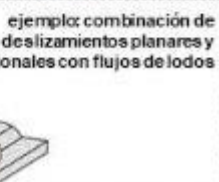
Complejo

Pertenecen a esta categoría, los movimientos en masa que no pueden asignarse a uno de los tipos de deslizamientos de tierras. Cuando el movimiento inicial se convierte en otro al ir trasladándose por la pendiente ocurren los movimientos complejos, los alud o avalanchas de

rocas y flujos destacan entre los más importantes (Alcántara, 2000). Esto puede deberse a la variedad de materiales incluidos o la combinación de diferentes tipos de movimiento.

En la Figura 2.3 se observa la representación gráfica de eventos de movimientos en masa de acuerdo a la clasificación hecha por Varnes (1978).

Figura 2.3: Descripción general de los tipos de movimientos en masa.

Material		Tipo de Movimiento		Rocas	Derrubios	Suelos
Caída						
				caída de rocas	caída de derrubios	caída de suelos
Vuelco						
				vuelco de rocas	vuelco de derrubios	vuelco de suelos
Deslizamiento		Rotacional				
		Planar				
Propagación						
				dispersión por cambios volumétricos	dispersión de suelos	
Flujo						
				flujos de solifluxión (flujos de derrubios periglaciales)	flujos de derrubios	flujos de lodos
Complejo						
				ejemplo: combinación de avalanchas de rocas y flujos de derrubios	ejemplo: combinación de deslizamientos planares y rotacionales con flujos de lodos	

Fuente: Revista Obras Urbanas.

2.2.5 Curva ROC

La curva ROC se entiende como la visualización grafica del análisis del rendimiento del clasificador y representa los pares (1-especificidad, sensibilidad) de cada uno de ellos (Carrara et al., 2008). En otras palabras, nos ayuda a evaluar cuan bueno son nuestros resultados teniendo en cuenta los errores estadísticos tipo 1 y tipo 2. En la Tabla 2.5 se describe completamente el comportamiento de un sistema de diagnóstico o de predicción con dos únicos posibles resultados (positivos o negativos).

Tabla 2.5: Comportamiento de un modelo de predicción

Resultado de la prueba	Estado real	
	Positivo	Negativo
Positivo	Verdadero Positivo (VP) a	Falso positivo (FP) Error tipo I b
Negativo	Falsos Negativos (FN) Error tipo II c	Verdaderos Negativos (VN) d
Total	a+c	b+d

Fuente: Basado en (García, 2008)

Sensibilidad

Es definida como la proporción de casos pronosticados como afirmativos, a partir del criterio de decisión establecida, en los que se comprueba que ciertamente sucede la situación que se pretende predecir (García, 2008).

Es la proporción de verdaderos positivos (VP), clasificados como positivos por nuestro punto de corte, entre todos los que efectivamente son:

$$\text{sensibilidad} = \frac{a}{a + c} = \frac{VP}{VP + FN} \quad (2.21)$$

Se incluyen aquí los falsos negativos (FN), definidos como aquellos descartados por nuestro punto de corte pero que efectivamente queremos detectar

Especificidad

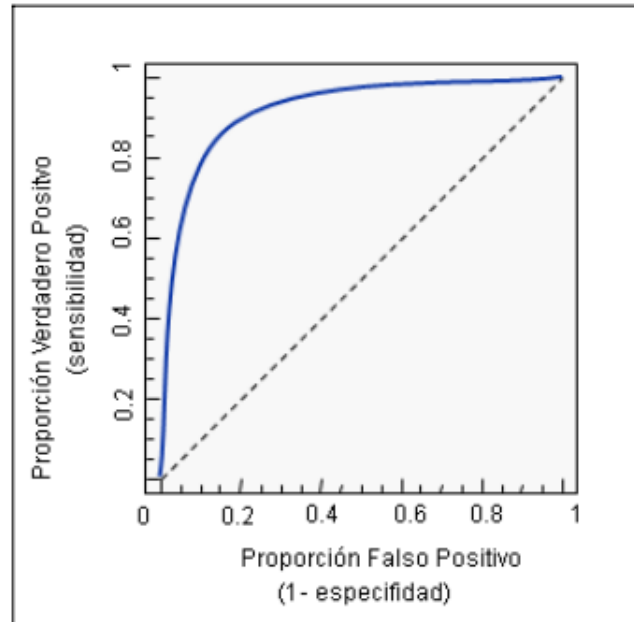
Se entiende como la proporción de casos pronosticados como negativos, a partir del criterio de decisión establecido, en los que se comprueba que ciertamente no sucede la situación que se pretende predecir (García, 2008).

Es la proporción de los verdaderos negativos (VN), es decir los descartados por el punto de corte, entre todos los realmente negativos, que incluirá a los negativos que no lo son (que son efectivamente positivos). Cuanto más bajo sea el punto de corte, menor es la especificidad.

$$\text{especificidad} = \frac{d}{b + d} = \frac{VN}{FP + VN} \quad (2.22)$$

El área bajo la curva (AUC) se entiende como un indicador de la capacidad predictiva del modelo, siendo utilizada para comparar diferentes modelos de predicción de susceptibilidad (Amorim et al., 2009). Es la medida de la eficacia de un modelo, independiente del punto de corte que se establezca. En la Figura 2.4 se explica el AUC de un modelo.

Figura 2.4: Representación de la curva ROC

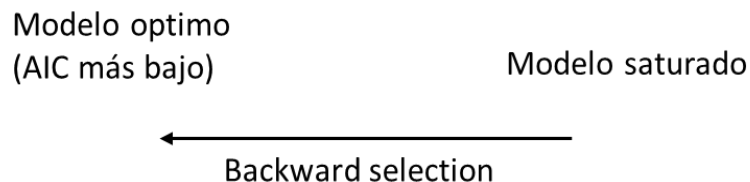


Fuente: (García, 2008)

2.2.6 Método estadístico de selección de variables-Backward Selection

El método de selección de variables *backward selection* es utilizado para la metodología de regresión logística con el objetivo de lograr una mayor parsimonia estadística (modelo más simple). A partir de un modelo en el que todas las variables se introducen en una ecuación (estadísticamente saturada) y luego se eliminan secuencialmente. Cuando se dispone de varias variables explicativas, se obtiene un subconjunto de posibles modelos, el problema radica en seleccionar el mejor de ellos. Para ello se utiliza el criterio de información de Akaike (AIC) que sirve para comparar modelos, donde dado un conjunto de varios modelos posibles, el modelo elegido es el que tiene el menor valor en el AIC. En la Figura 2.5 se grafica el método de selección hacia atrás desde un modelo saturado a un modelo óptimo.

Figura 2.5: Backward Selection



3 Caracterización de la zona de estudio

En este capítulo se realizará la descripción de las zonas de estudio, su ubicación geográfica, su componente físico como: la geología, el clima, fisiografía, hidrología, y una breve descripción de sus componentes biológicos como la flora, fauna y sus características socioeconómicas más importantes de urbes asentadas en la Cordillera Blanca. Finalmente, los aspectos económicos de los principales centros urbanos asentados en los valles de estudio.

3.1 Ubicación geográfica

El estudio fue desarrollado en seis valles ubicados en el Parque Nacional Huascarán (-8°51'10.58"S - 9°40'29.40"S Latitud sur; -77°34'21.09"-77°24'31.59"O Longitud oeste) la cual está protegida por el Parque Nacional Huascarán desde 1975 (Decreto Supremo N° 0622-75-AG). La Cordillera Blanca vierte sus aguas a dos cuencas principales, la del Río Santa, ubicada al oeste y conforma el Callejón de Huaylas y la cuenca del Río Marañón ubicada al este y conforma gran parte del callejón de los Conchucos. Debido a las restricciones de movilización producto de la pandemia que impidió cubrir el Callejón de los Conchucos, los seis valles estudiados se encuentran en el Callejón de Huaylas. Estos son Parón (9° 0'43.96"S Latitud sur -77°41'51.64"O Longitud oeste), Llanganuco (9° 4'46.89"S Latitud sur- 77°39'8.91"O Longitud oeste), Uta (9°10'2.35"S Latitud sur- 77°34'49.93"O Longitud oeste), Honda (9°19'21.45"S Latitud sur-77°28'30.14"O Longitud oeste), Llaca (9°27'49.30"S Latitud sur- 77°27'44.89"O Longitud oeste) y Cojup (9°27'1.10"S Latitud sur- 77°25'5.48"O Longitud oeste). Además de la accesibilidad, los criterios de selección fueron la ubicación frente a las poblaciones asentadas, la escala de trabajo local y regional en la cual se representan y la ocurrencia histórica de los eventos de movimiento en masa. En la Figura 3.1 se representan la ubicación de los seis valles seleccionados para la investigación.

Figura 3.1: Ubicación del área de estudio

3.2 Aspectos físicos

3.2.1 Geología

Las formaciones geológicas de acuerdo con el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET), presentes en las cuencas de estudio son las siguientes:

Unidades geológicas del área de estudio

Depósito Glaciar (D-gl)

Conforma la parte más alta de las subcuencas de estudio. Están conformados por acumulaciones de morrenas, conformados por bloques angulosos rellenos con arcillas, limos y arena; son pocos compactos, formando crestas y lomadas alargadas y se encuentran distribuidos en zonas de frente glacial a lo largo de la Cordillera Blanca rodeando lagunas. Actualmente se encuentran en procesos de deglaciación que provoca la desaparición de glaciares (INGEMMET, 2009).

Depósito fluvioglaciar (D-glf)

Conformados por materiales de morrenas que han sufrido re-movilización por acción fluvial o por gravedad, compuestas por gravas sub-redondeadas en matriz limoarenosa, de profundidad y permeabilidad variable, medianamente compactos. Rellenan los valles glaciares y montañas en forma de talud de detritos, formando las laderas de montañas en zonas glaciares. Tienen probabilidad de ocurrencia de derrumbes, erosión de laderas y deslizamientos por acción de la infiltración o aguas superficiales (INGEMMET, 1995).

Batolito de la Cordillera Blanca (B-cb)

La granodiorita/tonalita de grano grueso es el tipo predominante de roca, con foliación en algunos sectores (INGEMMET, 1995). De acuerdo con su tipo de litología, se da origen de escarpas presentes en los circos glaciares de los nevados. Los diaclasamientos son producto de la deglaciación intensa, originando desprendimientos de bloques y derrumbes sobre las lagunas y subcuencas de estudio (Valderrama et al., 2013).

Formación Yungay (F-yu)

Se encuentra formada por rocas piroclásticas asentadas en sectores del valle del río Santa en la zona de Yungay. Su grosor se estima en 150m aproximadamente; la litología que predomina son tobos blancos, pobremente estratificados, están compuestas por abundantes cristales de cuarzo y biotita (INGEMMET, 2003).

Formación Chicama (F-cc)

La Fm. Chicama, está formada por areniscas cuarzosas, lutitas oscuras pizarrosas y areniscas finas. Se extiende por debajo en discordancia paralela a la Fm. Oyón. El grosor en esta formación se estiman entre 800 a 100 m (Valderrama et al., 2013).

Formación Carhuaz (F-ch)

La litología general de la Fm. Carhuaz, consiste en areniscas y cuarcitas finas marrones, en capas delgadas, con abundantes intercalaciones de arcillitas. La litología consiste generalmente en areniscas y cuarcitas con abundantes intercalaciones de arcillita (Valderrama et al., 2013). Alcanza su mayor desarrollo en el Callejón de Huaylas, con un grosor aproximado de 1500 m.

Deposito aluvial (D-al)

Conformados por arcilla, arena, gravas y limo con diferente composición de clastos sub angulosos. Son depósitos cuaternarios, siendo los más importantes los fluvioglaciares que tienen su mayor desarrollo en los alrededores de la Cordillera Blanca; incluyen a los grupos de morrenas, extensos mantos de arenas y grava (Valderrama et al., 2013).

Formación Chimú (F-cm)

Se encuentra formada por centenares de metros de areniscas blancas, arcillitas y cuarcitas, con mantos de carbón (antracita), se extiende por encima de la Formación Oyón e infrayace a la Fm. Santa, con ligera discordancia (INGEMMET, 1995).

Formación Santa (F-sa)

Consiste en 100-380 m. de calizas y arcillitas calcáreas que se extienden por encima de la Fm. Chimú e por debajo de la Fm. Carhuaz; con discordancia paralela ambos contactos. La Fm. Santa está ubicada en el Callejón de Huaylas, donde llega a un mayor grosor, extendiéndose al SE, pero con un grosor restringido (Wilson, 1963).

Formación Pariahuanca, Chúlec y Pariatambo (F-pcp)

Formado por calizas macizas de unos 100m. de grosor, con sección ubicada cerca al pueblo con el mismo nombre, en el cuadrángulo de Carhuaz. Hacia el Norte del Callejón de Huaylas, cambia de facies a secuencias elásticas, denominándose Fm. Inca (Mollebamba). Esta formación, cambia al Este con aumento de arcillitas y margas, de tal manera que la unidad cambia lateralmente a la Fm. Chúlec (Wilson et al., 1967).

En la Tabla 3.1 se observa las unidades geológicas presentes en las subcuencas de estudio.

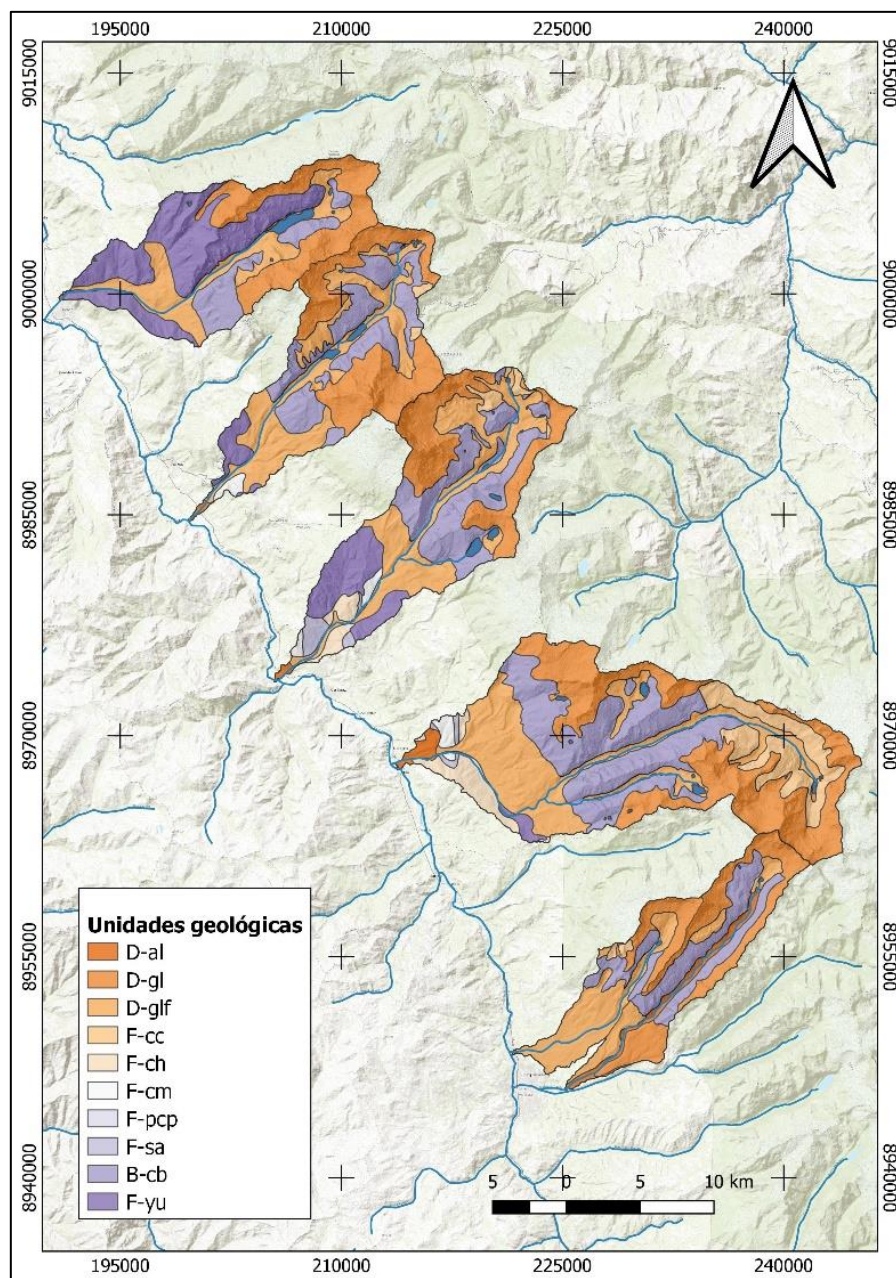
Tabla 3.1: Unidades geológicas del área de estudio

Era	Sistema	Serie	Unidades geológicas	Símbolo	Descripción
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósito aluvial	D-al	Acumulación de grava, arena, limo y arcilla.
		Pleistoceno	Depósito glaciar, fluvial	D-glf	Gravas, arenas en matriz limoarenosas. Arenas y materiales residuales no consolidados.
		Pleistoceno	Depósito glaciar	D-gl	Depósitos morrénicos, bloques angulosos rellenos con arcillas, limos y arenas.
	Neógeno	Plioceno	Batolito Cordillera Blanca	B-cb	Granodiorita, tonalita.
		Mioceno	Formación Yungay	F-yu	Tufo blanco o gris claro, fragmentos angulares de rocas sedimentarias.
Mesozoico	Cretácico	Inferior	Formación Pariahuanca, Chúlec, Pariatambo	F-pcp	Calizas masivas de tono azul. Calizas, margas, calizas y margas de olor fétido.
		Inferior	Formación Carhuaz	F-ch	Areniscas gris verdosas, lutitas negras y limolitas marrones.
		Inferior	Formación Santa	F-sa	Areniscas, cuarcitas, lutitas, niveles de carbón.
		Inferior	Formación Chimú	F-cm	Areniscas cuarzosas blancas, limo arcillitas grises y niveles de carbón.
		Superior	Formación Chicama	F-cc	Areniscas cuarzosas, lutitas oscuras pizarrosas.

Fuente: INGEMMET

En la Figura 3.2 se representa las unidades geológicas que abarcan las seis subcuencas de estudio.

Figura 3.2: Formaciones geológicas presentes en el área de estudio



3.2.2 Fisiografía

A partir de la capa generada por ONERN (Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales), el área de estudio cuenta con cinco unidades fisiográficas pertenecientes a los grandes paisajes de planicie (superficies planas o ligeramente inclinadas), colinas (relieves medianamente accidentados) y montañas (relieves con ondulaciones pronunciadas):

Gran paisaje de planicie

Son superficies generalmente planas a ligeramente inclinadas y disectadas, ubicadas en la parte baja de las quebradas de estudio. Su origen se puede dar por antiguos aplanamientos del terciario medio en la región andina, erosión y deposición del agua de los ríos, quebradas y otros cursos.

Gran paisaje de colinas

Son formas de relieve medianamente accidentado, con alturas menores a 300 metros sobre el nivel de base local entre las cimas y bases de las elevaciones. Son terrenos relativamente accidentados, las pendientes entre 25 y 50 % con sectores llanos y colinas escarpadas de metros.

Gran paisaje de montañas

El gran paisaje montañoso se ha formado por la acción combinada de movimientos orogénicos y epirogénicos de levantamiento y por la acción modeladora de la erosión pluvial, los que han formado importantes afloramientos de material lítico. Este gran paisaje se caracteriza por presentar actualmente superficies con ondulaciones pronunciadas que confieren un aspecto corrugado de intensidad variable. Está constituido en su mayor parte por materiales litológicos de origen metamórfico y sedimentario (areniscas y calizas).

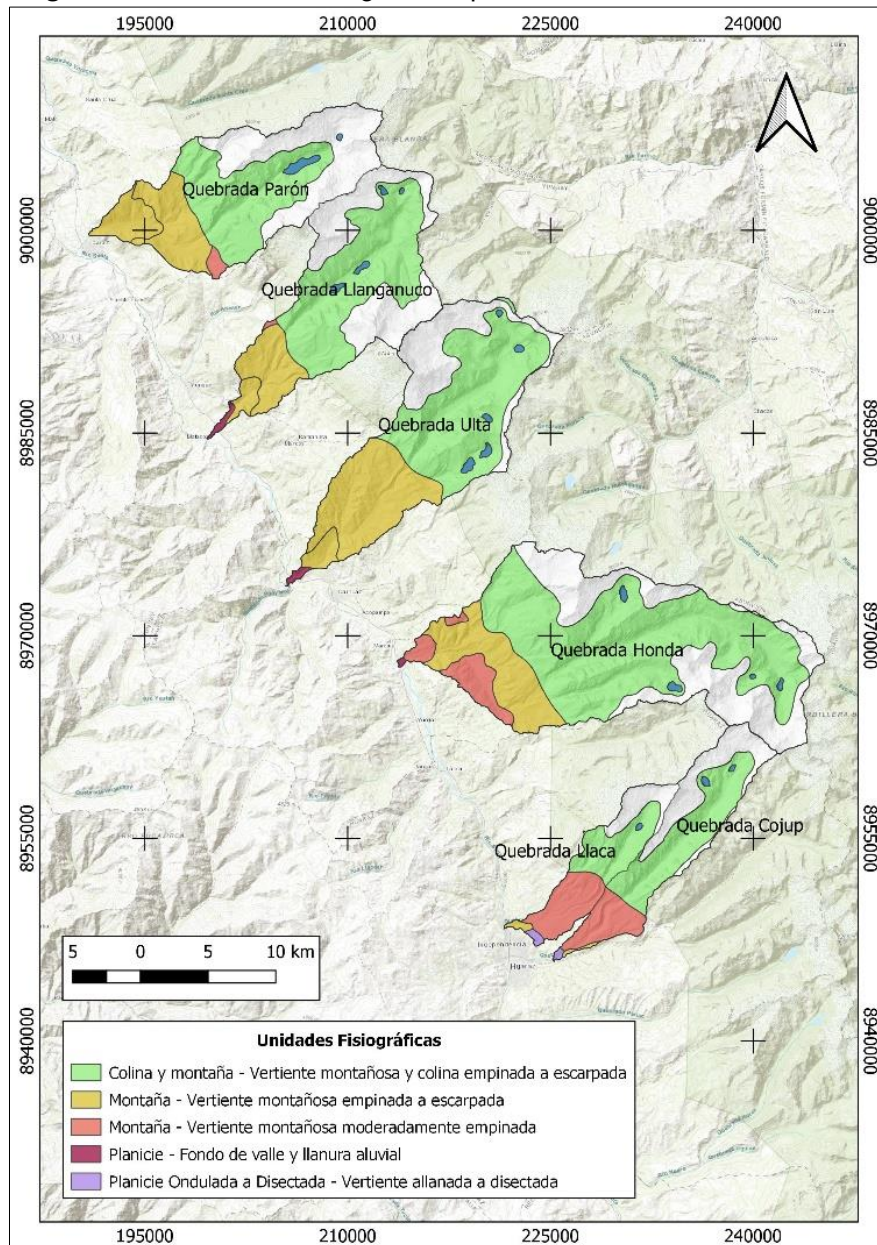
En la Tabla 3.2 se observa las unidades geológicas presentes en las subcuencas de estudio.

Tabla 3.2: Unidades fisiográficas del área de estudio

Unidad Climática	Gran paisaje	Paisaje	Sub paisaje	Usos
Clima semiseco	Planicie	Planicie	Fondo de valle y llanura aluvial	Zona urbana, turismo, cultivos agropecuarios
Clima lluvioso		Planicie ondulada a disectada	Vertiente allanada a disectada	Zona urbana, turismo, cultivos agropecuarios
Clima lluvioso	Colinas	Colinas y montaña	Vertiente montañosa y colina empinada a escarpada	Turismo, áreas de conservación, Investigación
Clima semiseco	Relieve Montañoso	Montaña	Vertiente montañosa empinada escarpada	Zona de producción agrícola, turismo comunitario, reforestación, investigación
Clima lluvioso		Montaña	Vertiente montañosa moderadamente empinada	Zona de producción agrícola, turismo comunitario, reforestación, investigación

En la Figura 3.3 se presentan las unidades fisiográficas pertenecientes a las seis subcuencas de estudio.

Figura 3.3: Unidades fisiográficas presentes en el área de estudio



3.2.3 Suelos

De acuerdo con la clasificación de suelos elaborada por ONERN para el país, se representan los suelos mediante la unidad cartográfica asociación de suelos, utilizando como unidades taxonómicas los Grandes Grupos de Suelos significativos. A continuación, se detallan los distintos tipos de suelos identificados en los valles de estudio:

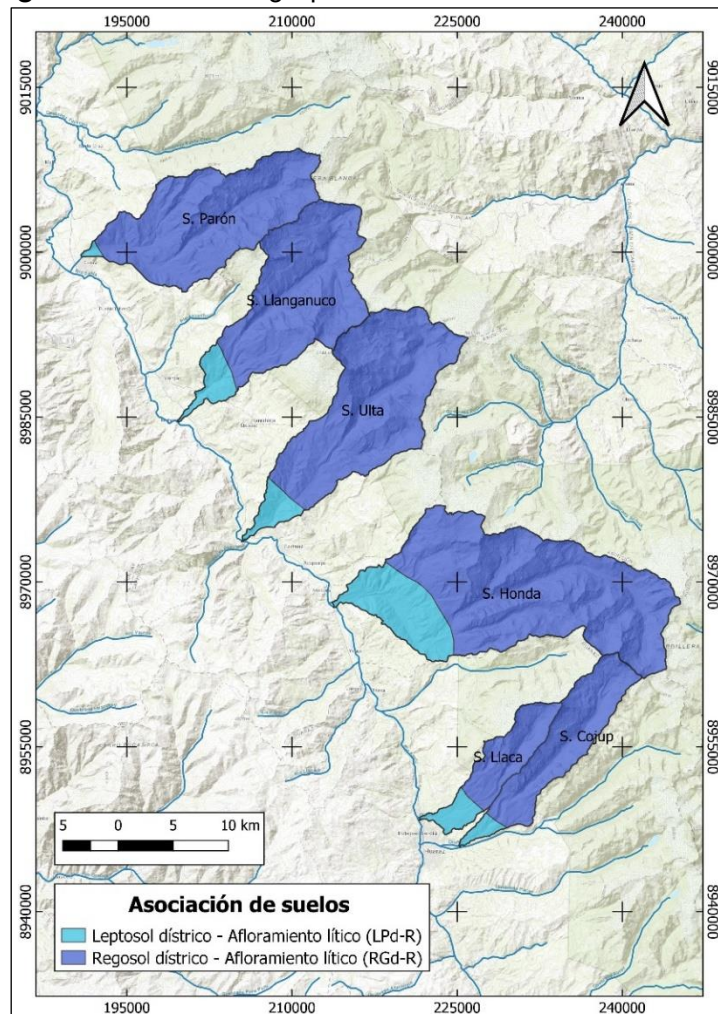
- **Regosol dístico-Afloramiento lítico (RGd-R)**

Son montañas de la cadena occidental de los andes, con pendientes de 25 a 75, tienen una saturación de bases menor del 50%, formadas por unidades de suelos regosoles dísticos y unidad miscelánea afloramiento lítico con una proporción aproximada de 60 % a 40 % se encuentra distribuida ampliamente en toda la Cordillera Blanca.

- **Leptosol dístico- Afloramiento lítico (LPd-R)**

Son estribaciones de la vertiente occidental de la cadena montañosa andina. El leptosol dístico tiene una saturación de bases menor del 50 %, con pendientes de 25 a 75. Formadas por unidades de suelos de tipo leptosoles dísticos y unidad miscelánea de afloramiento lítico con una proporción de 60 % a 40% aproximadamente.

Figura 3.4: Grandes grupos de suelos del área de estudio

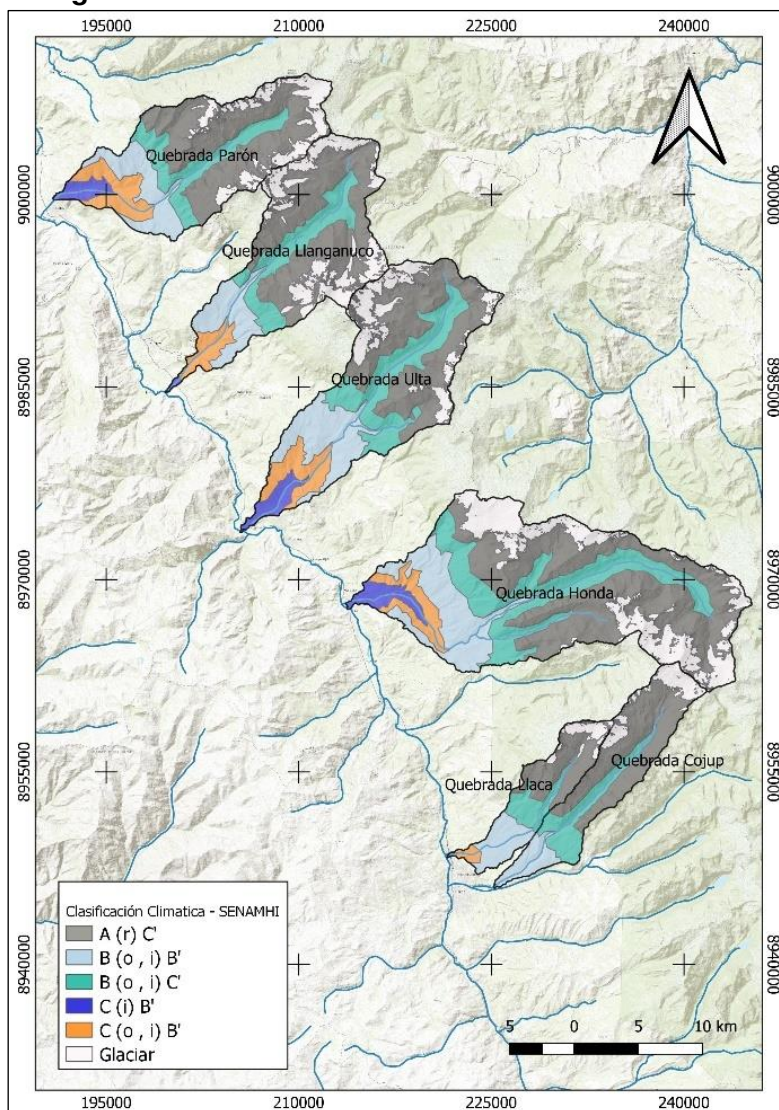


3.2.4 Clima

Según la clasificación climática de Thornthwaite brindada por SENAMHI (Figura 3.5), el área de estudio contiene seis tipos de climas de los 38 identificados para todo el Perú.

- **Clima muy lluvioso A (r) C'**: Con precipitación efectiva muy lluviosa, con valores de índice anual mayores de 128, vegetación característica de la selva, abundante humedad en todas las estaciones, temperatura eficiente fría.
- **Clima lluvioso B (o, i) B' - B (o, i) C**: Con precipitación efectiva lluviosa, con valores de índice anual entre 67-127, vegetación característica del bosque, con otoño e invierno seco con temperaturas eficiente templada y fría.
- **Clima semiseco C (i) B' - C (o, i) B'**: Con precipitación efectiva semiseca, con valores de índice anual entre 32-67, vegetación característica de pastizal, con invierno y otoño seco y temperatura eficiente templada.
- **Glaciar**: Pertenecientes a las zonas más altas de la Cordillera Blanca, áreas que llegan a altitudes por encima de los 5000 msnm.

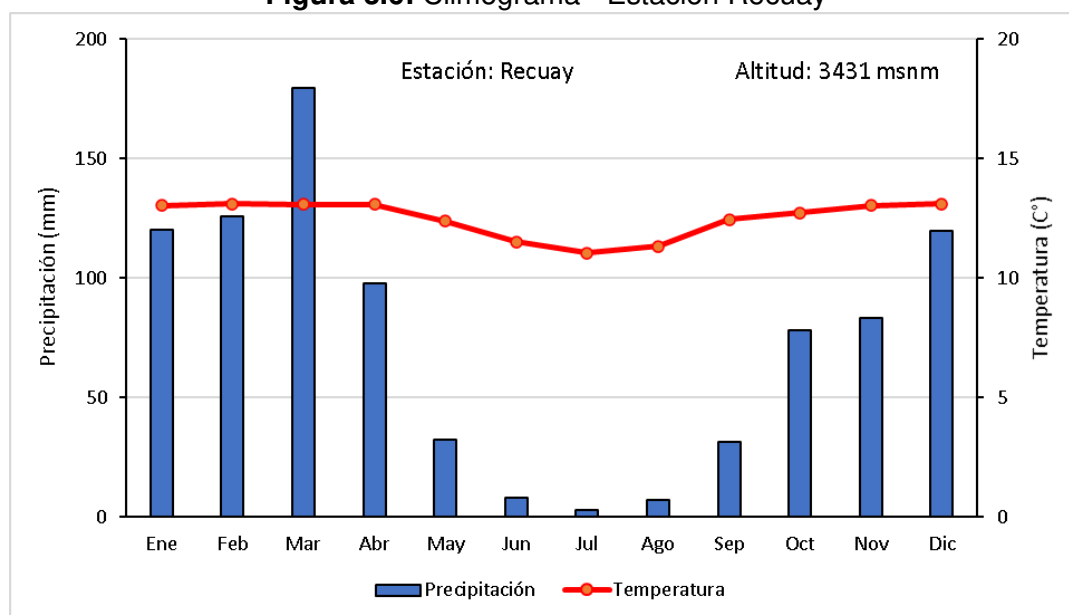
Figura 3.5: Clasificación Climática del área de estudio



Para la caracterización climática del lugar, del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) se recogieron datos de precipitación y temperatura, utilizando datos de la estación meteorológica Recuay (Latitud: 9 ° 43'45.31" S; Longitud: 77 ° 27'13.28" W, Elevación: 3.431 msnm.). Cabe señalar que la estación Recuay es la única estación meteorológica con datos disponibles para las zonas cercanas a los valles de estudio; sin embargo, para la representación de los datos ráster de precipitación en la generación de los modelos se utilizó los datos disponibles en la plataforma WorldClim.

Del climograma de precipitación y temperatura para la zona de estudio (Figura 3.6), existen dos estaciones bien marcadas durante todo el año: una lluviosa entre noviembre y abril, y otra seca entre mayo y septiembre. Los meses más secos (<10 mm), son junio, julio y agosto y en marzo las precipitaciones alcanzan su pico máximo con un promedio de 179.5 mm.

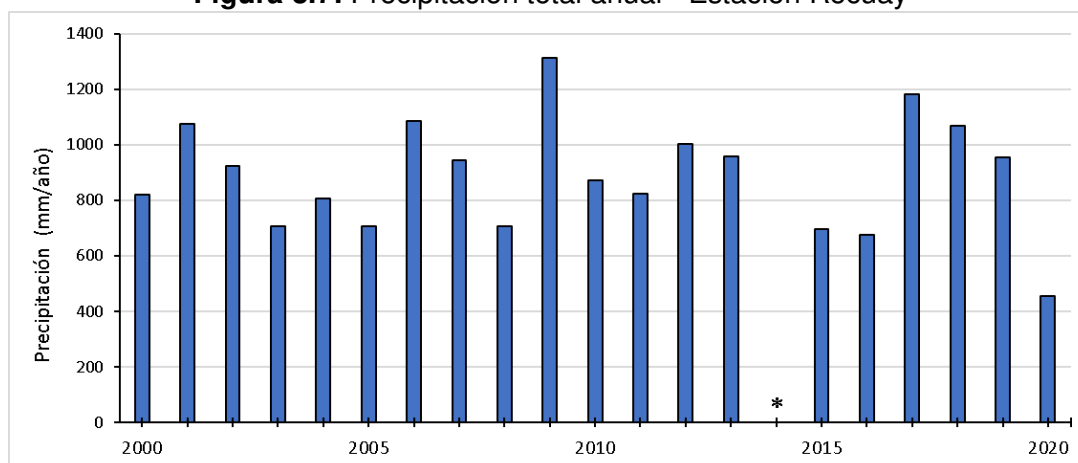
Figura 3.6: Climograma - Estación Recuay



Fuente: Elaboración propia basado en información proporcionada por SENAMHI.

También se calculó la precipitación total anual (Figura 3.7) para un periodo de dos décadas (2000-2020), excepto para el 2014 (*) donde no se recogió datos debido a fallas en los equipos meteorológicos.

Figura 3.7: Precipitación total anual - Estación Recuay



Fuente: Elaboración propia basado en información proporcionada por SENAMHI.

3.2.5 Hidrografía e hidrología

El área de estudio comprende seis subcuencas descritas a continuación:

- **Subcuenca Parón:** Ubicada al este y en las inmediaciones de la ciudad de Caraz, formado por valles glaciares, en la subcuenca se encuentra la laguna Parón, está ubicada a una altura de 4200 metros dentro del Parque Nacional Huascarán, siendo la más grande de todas las lagunas asentadas en la Cordillera Blanca.
- **Subcuenca Llanganuco:** Comprende una altura que va desde los 2500 metros en la parte baja de la subcuenca está asentada las localidades de Yungay y Ranrahirca. En la parte más alta de la subcuenca se encuentran las lagunas Chinancocha (3800 msnm) y Orconcocha (3800 msnm), la cual es uno de los más importantes focos turísticos del parque nacional.
- **Subcuenca Ulta:** Abarca las localidades de Shilla, Armapampa, Amashca, Tinco. A lo largo de toda la subcuenca cruza una carretera afirmada que llega hasta las localidades de Huallin, Pampash entre otras.
- **Subcuenca Honda:** Está localizada al este del centro poblado de Marcará y Atipayán. El valle glaciar de la quebrada Honda es el más largo de toda la Cordillera Blanca (aproximadamente 24 Km), teniendo una curvatura que va hacia el sur. Valderrama (2016) menciona la presencia de minería informal en esta zona, siendo restringido el acceso en algunas zonas de la subcuenca.
- **Subcuenca Llaca:** Se encuentra al lado de la quebrada Cojup, se encuentra cerca de la ciudad de Huaraz, dentro del distrito de Independencia. Dentro de este valle se encuentra la laguna Llaca (4474 msnm), el cual se considera una laguna con riesgo medio alto de generar una inundación por desborde violento del lago glaciar.
- **Subcuenca Cojup:** Se encuentra localizada al este de la ciudad de Huaraz. En la naciente se encuentra la laguna Palcacocha (4566 msnm) la cual ha sido origen de aluviones que han afectado a la ciudad de Huaraz.

3.3 Aspectos biológicos

3.3.1 Zonas de vida

Las zonas de vida se define como las principales unidades de clasificación ecológica, se basa en las relaciones entre la 'biotemperatura' (la media de la temperatura anual entre 0 ° y 30 ° C), la precipitación media anual total y la tasa de evapotranspiración potencial (Holdridge, 1967). De acuerdo con la biotemperatura, relación de evapotranspiración potencial y precipitación promedio anual en las subcuencas de estudio se identificaron seis zonas de vida según su sistema de clasificación:

- Bosque húmedo-Montano Tropical (Bh-MT)
- Bosque seco-Montano Bajo Tropical (Bs-MBT)
- Estepa espinoso-Montano Bajo Tropical (Ee-MBT)
- Estepa-Montano Tropical (E-MT)
- Matorral desértico- Montano Bajo Tropical (Md-MBT)
- Nival tropical (Nt)
- Paramo pluvial- Subalpino Tropical (Pp-ST)
- Tundra pluvial- Alpino Tropical (Tp-AT)

3.3.2 Flora

Según datos del Parque Nacional Huascarán, son 823 especies de plantas registradas en el Parque Nacional Huascarán, pertenecientes a 430 géneros de 104 familias. La Puya Raymondi (*Puya raimondii*), el Queñual (*Polylepis sp.*), el Quishuar (*Buddleja incana*), la Cantuta (*Cantua buxifolia*) y la Rima-Rima (*Laccopetalum giganteum*) son algunas especies identificadas.

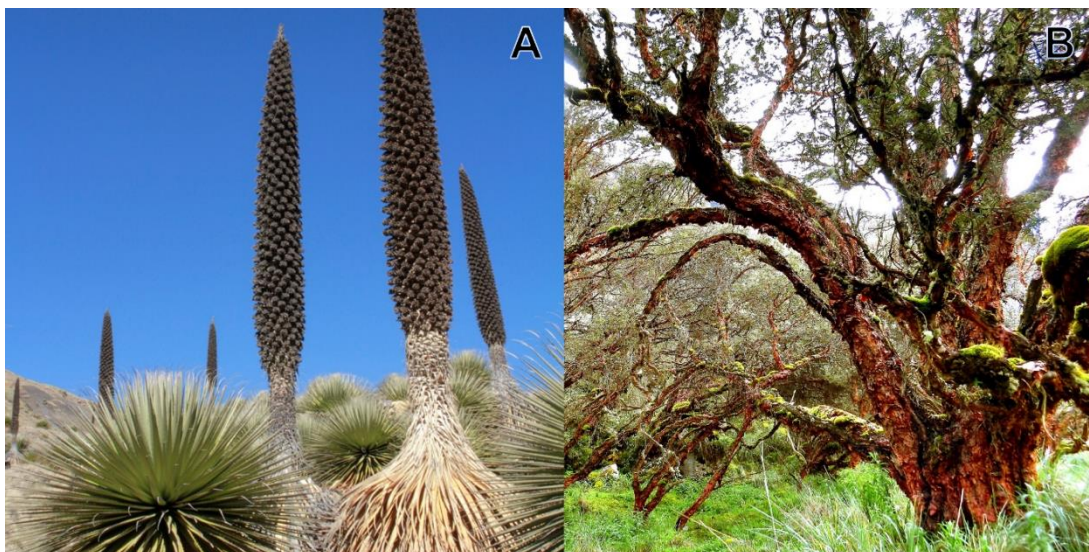
Los pajonales de Puna son dominados por los géneros *Calamagrostis*, *Festuca*, *Stipa* y *Poa*, así como asociaciones de plantas de porte almohadillado como *Pycnophyllum*, *Azorella*, *Paranephelys* y *Aciachne*. Las turberas u oconcales dominados por *Distichia* también son comunes y de gran utilidad para el ecosistema.

Dentro de la gran variedad de vegetal, la Puya Raimondi, cunco, santón o ckara (*Puya raimondii*) es la especie de flora más representativa del PNH y crece entre los 3800 y 4500 msnm del parque nacional. Esta especie puede alcanzar hasta 11 metros de altura. La planta vive entre 40 y 100 años, cada ejemplar puede producir más de 20 000 flores, las cuales portan espigas con cerca de 40 flores cada uno.

Los rodales de puya constituyen un ecosistema importante que agrupa a varias especies de aves representativas de la puna, como el colibrí gigante (*Patagonas gigas*), Pichisanka (*Zonotrichia capensis*), el canastero (*Asthenes Spp.*), el pitajo rojizo (*Ochtoeca oenantoides*) y el halcón perdiguero (*Falco peregrinus*).

Los bosques de Queñual (*Polylepis sp.*) forman un importante hábitat para muchas especies de flora y fauna dentro del PNH. Esta especie crece hasta los 4700 msnm, formando densos bosques relictos que ayudan a fijar el suelo de las pendientes, reteniendo gran cantidad de humedad que filtran los depósitos del subsuelo. Estas especies se encuentran seriamente amenazadas en la región andina, siendo explotadas desde épocas de la colonia, en el PNH son prioridad de conservación y se pueden encontrar dentro del parque grandes extensiones de estas especies.

Figura 3.8: (A) Puya de Raimondi (*Puya raimondii*) (B) Bosques de Queñual (*Polylepis sp.*)



3.3.3 Fauna

Las quebradas del PNH son el hábitat de muchas especies de fauna altoandina, algunas endémicas, amenazadas o en peligro de extinción. Se han registrado en el interior del PNH 12 especies de mamíferos y 240 especies de aves, siendo el cóndor andino (*Vultur gryphus*), ojos de anteojos, vizcacha (*Lagidium peruvianum*), la Taruka (*Hippocamelis antisensis*), el gato andino (*Oreailurus jacobita*) y el zorro andino (*Pseudalopex culpaes*) las especies andinas más representativas.

Muchas especies se encuentran amenazadas dentro del Parque Nacional Huascarán, debido a la fragmentación y degradación de los bosques nativos, el sobrepastoreo, la quema de pastizales y la introducción de especies como el pino y eucalipto en áreas agrícolas asentadas del parque nacional (SERNANP, 2017).

Las especies de aves endémicas están representadas por el búho de Koepcke (*Megascops Koepckeae*), el tapaculo de Áncash (*Scytalopus affinis*), Cotinga de cachetes blancos (*Zaratornis stresemanni*), entre otras especies asociadas a los bosques de queñuales. El cóndor andino es el ave voladora más grande del mundo y habita las montañas altas de la Cordillera Blanca.

Figura 3.9: (A) Viscacha (B), Condor andino



3.4 Aspectos socioeconómicos

Para la descripción de la característica social del área de estudio, se identificó las provincias a las que pertenecen las subcuencas, tales como Huaylas, Yungay, Carhuaz, Huaraz. Así mismo, se utilizaron datos del Censo Nacional de Población y Vivienda del año 2017 para la información de población, datos del informe sobre Desarrollo Humano de las Naciones Unidas.

3.4.1 Características demográficas

De acuerdo con los datos del Censo Nacional de Población y Vivienda del año 2017, para los seis valles de estudio, la subcuenca Honda posee la mayor cantidad de habitantes con 7286, seguido por la subcuenca Ulta con 7152 habitantes pertenecientes a la provincia de Carhuaz, asentadas en la parte baja de las subcuencas de estudio. Cabe resaltar que la población dentro de los límites del Parque Nacional Huascarán es mínima, siendo la zona de amortiguamiento asentada en el Callejón de Huaylas donde están asentadas la mayoría de los centros poblados.

De todas las comunidades campesinas ubicadas en los valles de la Cordillera Blanca, las más vulnerables son las asentadas en la parte baja de los valles de estudio, en zonas con pendiente alta, ya que se encuentran expuestas a la llegada de aluviones por desembalse de lagunas glaciares. En la Tabla 3.3 se presenta las comunidades campesinas reconocidas por el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) y el número de población asentadas en las subcuencas de estudio.

Tabla 3.3: Comunidades campesinas y número de personas asentadas en las subcuencas de estudio

Comunidades campesinas	Población (Censo 2017)	Distrito	Provincia	Subcuenca
Cruz De Mayo	2814	Caraz	Huaylas	Parón
Ancash	1985	Yungay	Yungay	Parón
Jose Carlos Mariátegui	34	Yungay	Yungay	Llanganuco
Los vencedores	494	Yungay	Yungay	Llanganuco
Tahuantinsuyo	758	Tinco	Carhuaz	Uta
José Carlos Mariátegui	240	Amashca	Carhuaz	Uta
Atusparia	914	Mancos	Yungay	Uta
Fuerza y poder	811	Shilla	Yungay	Uta
Mitimaes	254	Amashca	Carhuaz	Uta
Vicos	3721	San Miguel de Aco	Carhuaz	Honda
Shumay	935	Marcará	Carhuaz	Honda
Siete Imperios	1842	Marcará	Carhuaz	Honda
Recuayhuanca	385	Marcará	Carhuaz	Honda
Tupac Yupanqui	3834	Tarica	Huaraz	Honda
Luis M. Sanchez Cerro	99	Independencia	Huaraz	Llaca
Cahuide	137	Independencia	Huaraz	Cojup
Cuatro Estrellas	250	Independencia	Huaraz	Cojup

3.4.2 Indicadores de Pobreza

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2019), para este año el índice de Desarrollo Humano (IDH) para la provincia de Huaraz (0.56) es mayor que las provincias Carhuaz (0.41), Huaylas (0.41) y Yungay (0.34). La provincia de Huaraz está por encima del promedio regional y por debajo del promedio nacional teniendo el ingreso familiar per cápita mucho mayor que las otras tres provincias.

3.4.3 Aspectos económicos

Los indicadores de empleo, niveles de ingreso (pobreza y pobreza extremas), cobertura de salud y desarrollo humano describe una situación precaria para la mayoría de la población del PNH y su zona de amortiguamiento, que principalmente se dedica a la actividad agropecuaria. Entre las principales actividades económicas que se realizan en las subcuencas de estudio son:

- **Minería:** Esta actividad no está autorizada por ley; no obstante, desde antes de la creación del Parque Nacional Huascarán, se otorgaron concesiones mineras que

tienen derecho de explotación, pero respetando las normas ambientales. Actualmente según el Plan Maestro 2017-2021 dentro del PNH vienen operando seis concesiones mineras, algunas de las empresas mineras como Antamina y Barrick se encuentran localizadas en la zona de transición de la Reserva de Biosfera del Huascarán, lo cual hace ver que una creciente presión hacia el parque por reactivar algunas minas.

- **Hidroenergía y actividad agropecuaria:** Las familias, empresas privadas y gubernamentales (usuarios del recurso hídrico) constituye un conjunto de unidades económicas, siendo Chavimochic, Chinecas y Entidades Prestadoras de Servicio (EPS) los mayores demandantes de este recurso.
- **Turismo:** El ordenamiento turístico del Parque Nacional Huascarán, está contemplado en el Plan de Uso Turístico y Recreativo del Parque Nacional Huascarán, donde se contempla diferentes modalidades de turismo como: convencional, circuitos de trekking, escalada y rural comunitario. Para el turismo convencional se identificó 9 destinos, dentro de las principales están Quebrada Llanganuco, Laguna Parón, Laguna Purhuay, Rodales de Puya. Para la modalidad de trekking, 24 circuitos. Para la modalidad de escalada, 102 destinos. Para el rural comunitario se desarrollan diversas experiencias como en la Comunidad Unidos Venceremos-Humacchuco, que opera la ruta Llanganuco-Santa Cruz; la Comunidad Campesina de Cordillera Blanca-Canrey Chico, que opera el Llamatrek a Chavín y la comunidad de Acopalca que ofrece servicios de turismo en la ruta de Purhuay.

4 Metodología

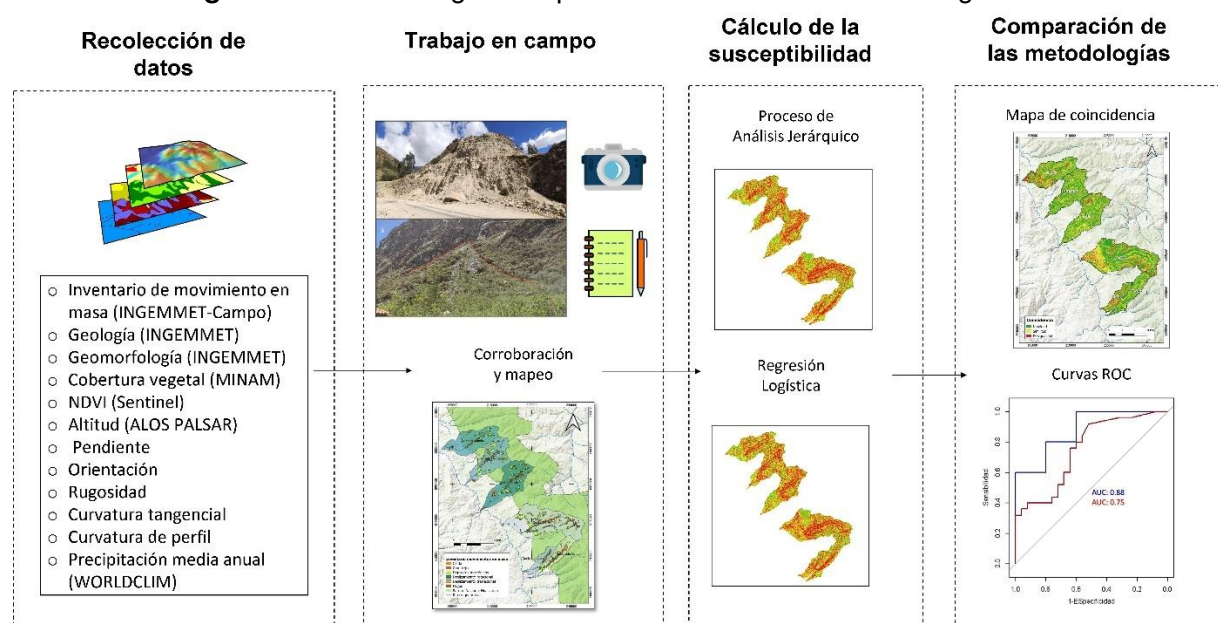
4.1 Procedimiento general de la investigación

Primeramente, la obtención de los datos de las variables explicativas e inventario de peligros por movimientos en masa se realizó a partir de información secundaria (geoportales, estudios previos y EVAR) y la generada a partir de las visitas realizadas en campo. Para cada método se identificó las variables temáticas a tomar en cuenta como la geología, geomorfología, cobertura vegetal, NDVI en época húmeda, precipitación media anual, las capas derivadas del DEM e inventario de movimiento en masa. Obtenidos los datos y posterior al viaje de campo realizado, se hizo el análisis de datos para su posterior generación de la base de datos en Excel para la generación de los modelos logísticos.

Cada modelo de susceptibilidad generado estuvo basado en las propuestas para cada subcuenca de estudio. La primera metodología fue la de regresión logística (RL) seguida por el proceso de análisis jerárquico (AHP). Finalmente, para la obtención de los objetivos planteados en la presente investigación, se realizó la comparación entre las dos metodologías, validación de los métodos y determinación de las principales variables explicativas para cada valle glaciar y su posterior análisis.

La Figura 4.1 se muestra el proceso general para la realización de la investigación.

Figura 4.1: Proceso general para la realización de la investigación.

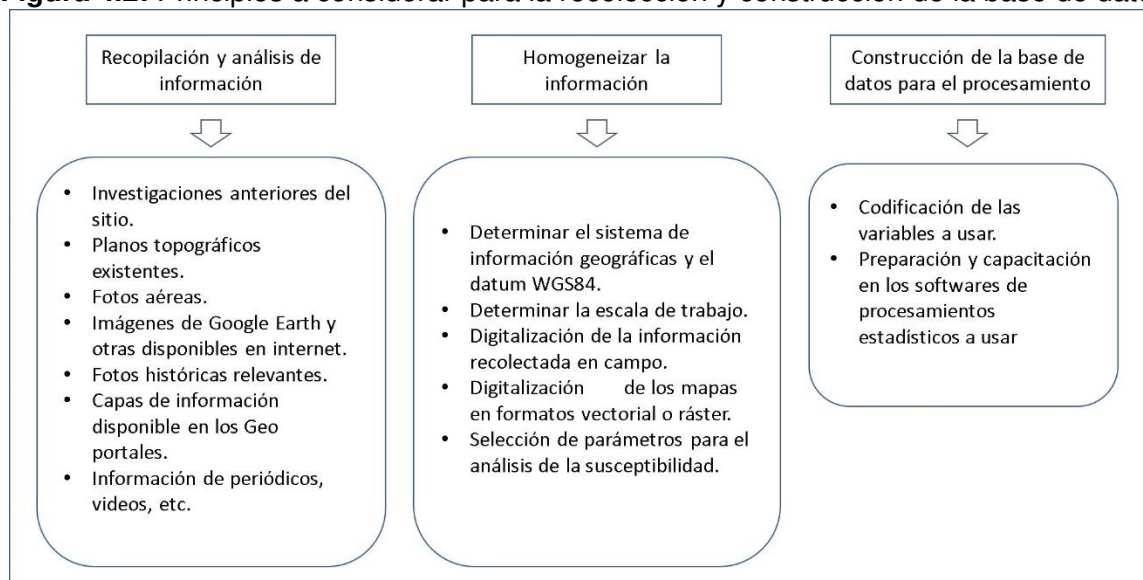


Fuente: Elaboración propia.

4.2 Obtención de datos

Para la construcción de los modelos, debemos tener en cuenta ciertos principios para la recopilación, homogeneización y construcción de la base de datos para el procesamiento. En la Figura 4.2 se explica los principios a tener en cuenta:

Figura 4.2: Principios a considerar para la recolección y construcción de la base de datos



Fuente: Elaboración propia.

Parte de las actividades realizadas para la obtención de los datos fueron el cartografiado de un inventario de movimientos en masa (IMM) y la obtención de las capas ráster de las variables predictoras de la susceptibilidad.

4.2.1 Inventario de movimientos en masa

Una de las principales dificultades en estudios de susceptibilidad a peligros por remoción en masa (*landslide*) radica en la necesidad de disponer de un buen inventario de peligros por movimientos en masa, que sea adecuado y completo para el análisis a realizar, algo que no siempre es fácil o accesible (García, 2008). Un inventario de movimientos en masa debe contener la distribución espacial de los datos, sus características más resaltantes y pueden ser representados por polígonos o puntos que señalan el deslizamiento de tierras.

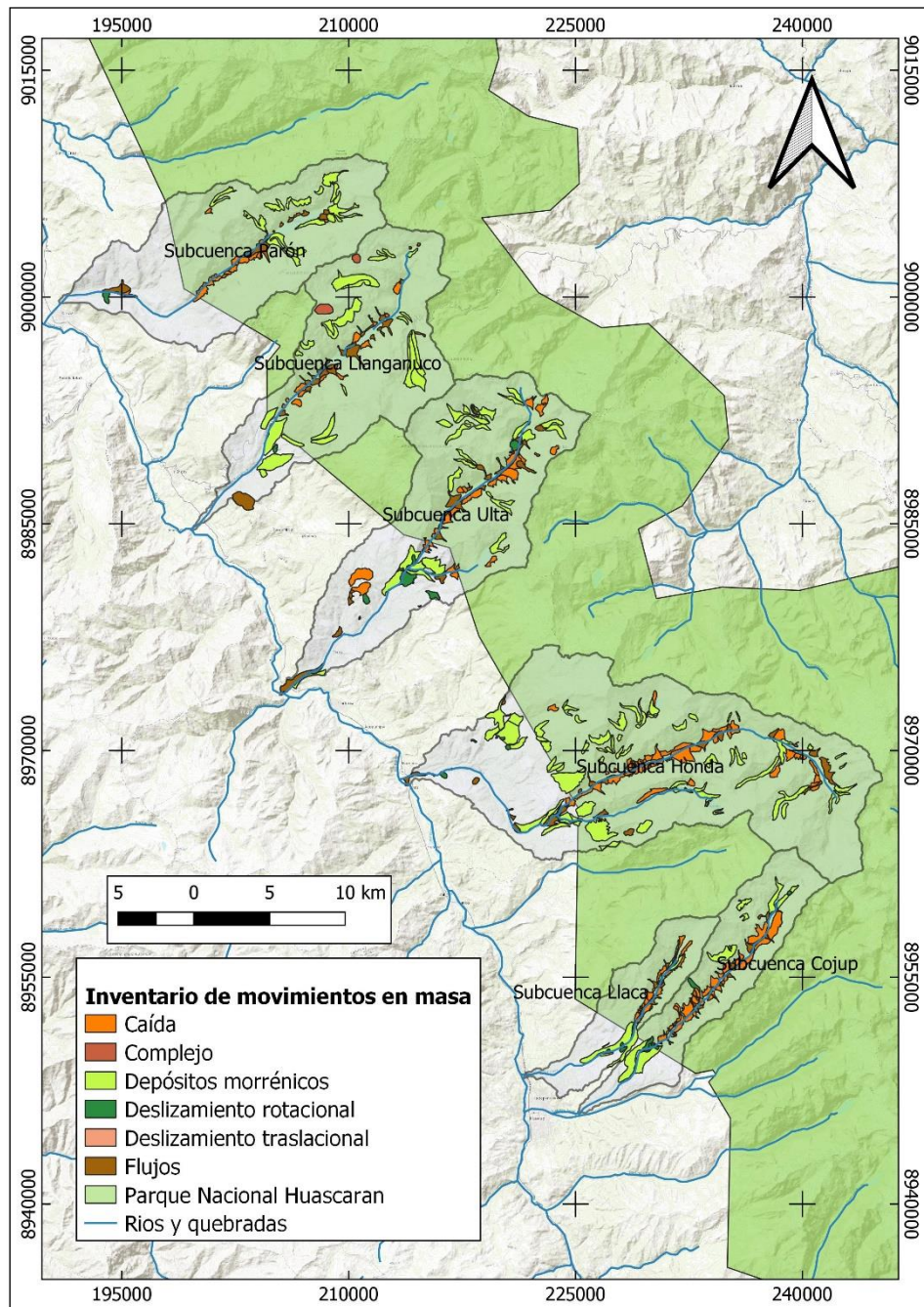
4.2.1.1 Trabajo de gabinete

Para obtener un inventario de movimientos en masa, se utilizó el estudio hecho en el año 2009, por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) llamado “Inventario de peligros geológicos en Perú”, esta información junto con otros estudios secundarios fue utilizado para realizar el inventario de deslizamientos de tierra.

Otro estudio secundario utilizado, fue el llevado a cabo por Valderrama (2016); en este trabajo se realizó un cartografiado de los peligros geológicos (movimientos en masa) con recursos como mapas del IGN a escala de 1:25 000; fotografías históricas, fotos aéreas e imágenes satelitales Spot 5 a escala de 1:25 000. Estos estudios, sumado al uso de herramientas como: Google Earth, ortofotos históricas, nos permitió generar un inventario preliminar de movimientos en masa que posteriormente fue validado en campo.

En la Figura 4.3 se representa las áreas de inventario de movimientos en masa en las zonas de estudio.

Figura 4.3: Inventario de movimientos en masa



Fuente: Elaboración propia

En la elaboración de ráster de probabilidad de movimientos en masa, la susceptibilidad se expresa en ocurrencia y no ocurrencia de estos eventos (1 y 0 respectivamente), para esta investigación, también se elaboró una muestra de puntos de no ocurrencia de movimientos en masa para cada subcuenca, siendo esta de igual número a los eventos de inventario de movimientos en masa (ocurrencia); tomando como criterio las zonas menos posibles de ocurrencia de eventos de remoción de masa.

En total, los datos tomados fueron 865 puntos, el número de puntos fue proporcional al tamaño de cada subcuenca, donde para la subcuenca Parón el número de puntos colectados fue 100 puntos (Inventario=50, ausencia=50), Llanganuco 126 (Inventario=63, ausencia=63), Uta 158 (Inventario=79, ausencia=79), Honda 284 (Inventario=142, ausencia=142), Llaca 68 (Inventario=34, ausencia=34) y Cojup 129 (Inventario=63, ausencia=66). Para la posterior creación de la base de datos, los eventos de presencia y ausencia fueron validados en campo.

4.2.1.2 Trabajo de campo

Como parte de los objetivos de la investigación, se realizó el llenado de la ficha de inventario de peligros por movimientos en masa y validación de los eventos generados en gabinete. El llenado de esta ficha descriptiva se llevó a cabo durante los meses de octubre y noviembre del 2020, en un recorrido de campo realizado a los seis valles de estudio.

Partiendo del cartografiado del inventario preliminar de los eventos de movimientos en masa realizado en gabinete, se recorrió los valles glaciares con la finalidad de recolectar información referida al tipo de evento. Utilizando la clasificación de eventos movimientos en masa dada por Varnes (1978), se registraron las características más resaltantes de los eventos como: tipo de peligro, coordenadas de ubicación, elevación, estado o actividad, nivel de peligro y vulnerabilidad, etc. En la Figura 4.4 se muestra el modelo de ficha descriptiva de un evento de movimiento en masa.

Figura 4.4: Modelo de ficha descriptiva de un evento de movimiento en masa

Ficha de Inventario de procesos de movimientos en masa								
Subcuenca	Zona	Muestra	Código:	Fecha:	N	E	Elevación	Código de foto
Referencia								
Tipo de peligro /Tamaño del clasto	Caída	Vuelco o desplome	Deslizamiento rotacional	Deslizamiento traslacional	Deslizamiento planar	Flujos	Expansión lateral	Complejo
Rocas								
Derrubio o detritos								
Tierra								
Causa (Factor detonante)								
Lluvias		Sismo		Deshielo		Desglaciación		Antrópico
Nivel de peligro								
Muy bajo		Bajo		Medio		Alto		Muy Alto
Estado de actividad	Activo	Reactivado	Suspendido	Inactivo	Dormido	Abandonado	Estabilizado	Relicto
Descripción de movimiento en masa:								
Observaciones/recomendaciones:								

Fuente: Elaboración propia.

Luego de completar correctamente el inventario de movimientos en masa, con ayuda de las fotografías de los eventos se analizó la información temática de los parámetros susceptibles. El registro de los datos de inventario de campo se puede encontrar en el Anexo 1 del presente documento. En la Figura 4.5 se observa algunos eventos históricos y actividades realizadas (toma de fotos con drone y visitas a zonas con alto riesgo de desprendimiento de bloques de hielo) en las subcuencas de estudio.

Figura 4.5: (A, C, D) Eventos de movimientos en masa históricos validados en campo, (B) Toma de fotos con drone y (E) Lagunas con riesgos de desembalse



4.2.2 Variables explicativas

Se entiende como los factores condicionantes y desencadenantes para la ocurrencia de fenómenos de movimientos en masa. De acuerdo con el tipo de variables, pueden ser de tipo categóricas (capas ráster reclasificadas) y variables continuas o también llamadas cuantitativas (capas ráster no reclasificadas).

Partiendo de los parámetros intrínsecos (variables explicativas de la susceptibilidad) para realizar el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de peligros por movimientos en masa recolectados a partir de estudios preliminares y bibliografía revisada (Tabla 2.1), se recolectó la información de las 11 variables explicativas:

4.2.2.1 Geología

Para realizar las evaluaciones de peligrosidad y riesgo, es fundamental conocer la geología de la región de estudio. En el Perú, la información geológica es proporcionada por INGEMMET, que dispone para el área de estudio una capa a escala de 1:100 000, esta capa contiene información de fallas, composición geotécnica, litología entre otras capas. Los valles que se estudiaron están comprendidos entre las cartas Corongo (18-h), Carhuaz (19-h) que abarcan el área de estudio del Parque Nacional de Huascarán.

La cartografía geológica tiene una escala regional (1:100 000), por lo que los estudios que se realicen a partir de ella son válidos para adquirir una visión global de la problemática, que en el caso de esta tesis se refiere a la susceptibilidad a movimiento en masa. Con la ayuda de las herramientas SIG que permitió tener control de las capas geológicas, para poder realizar revisiones y validaciones a partir de las visitas realizadas al área de estudio. Las unidades geológicas identificadas en el área de estudio son las siguientes:

- Batolito Cordillera Blanca (B-cb): Granodiorita, tonalita
- Depósito aluvial (D-al): Acumulación de grava, arena, limo y arcilla con clastos subangulosos a angulosos de diferente composición.
- Depósito glaciar (Q-gl): Depósitos morrénicos, bloques con ángulos rellenos con arcillas, limos y arenas.
- Depósito glaciar, fluvial (Q-glf): Graveros, arenas en matriz limo-arenosas. Arenas y materiales residuales no consolidados.
- Formación Carhuaz (F-ch): Areniscas gris verdosas, lutitas negras y limolitas marrones.
- Formación Chicama (F-cc): Areniscas cuarzosas, lutitas oscuras pizarrosas.
- Formación Chimú (F-cm): Areniscas cuarzosas blancas, limo-arcillitas grises y niveles de carbón.
- Formación Pariahuanca, Chúlec, Pariatambo (F-pcp): Calizas masivas de tono azul. calizas y margas color crema, calizas y margas de olor fétido
- Formación Santa (F-sa): Areniscas, cuarcitas, lutitas, niveles de carbón
- Formación Yungay (F-yu): Tufo blanco o gris claro, fragmentos angulares de rocas sedimentarias.

4.2.2.2 Geomorfología

Estudia el reconocimiento, clasificación y explicación de las distintas configuraciones de la superficie de la tierra (Muñoz, 1995). Investiga su origen, desarrollo y evolución de los caracteres geomorfológicos. Para este estudio se utilizó la geomorfología realizada por el INGEMMET, el cual forma parte del proyecto “Mapas Geomorfológicos por regiones”, el cual tiene como objetivo establecer una leyenda y una nomenclatura estándar, partiendo de las

clasificaciones que manejan los principales servicios geológicos a nivel mundial. Las unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio son:

Montaña

Montaña en roca volcánica (M-rv)

Son geoformas con superficies de pendiente de media a moderada, con presencia de frentes escarpados a abruptos, litológicamente están formadas por rocas volcánicas. Estas subunidades geomorfológicas se encuentran principalmente en la subcuenca Honda, abarcando aproximadamente 3184.27 ha de las subcuencas identificadas.

Montañas en roca intrusiva (M-ri)

Son afloramientos de rocas intrusivas, se distribuye en un mayor porcentaje en la subcuenca Cojup. Se dispone como batolitos de formas irregulares alargadas, por su naturaleza litológica se originan geoformas con laderas subredondeadas a cóncavas. Tienen una extensión de aproximadamente 21944.26 ha de las subcuencas identificadas en la investigación.

Montañas con cobertura glaciar (M-cg)

Son geoformas que abarcan las zonas más altas de las subcuencas de estudio, cubiertas con una gran masa de hielo y de nieve granulada. Se encuentran distribuidas en todas las cabeceras de las subcuencas de la cordillera blanca, sobre cotas por encima de los 5000 m. La extensión que ocupa es aproximadamente de 14550.12 ha de los valles de estudio.

Montañas en rocas sedimentaria (M-rs)

Esta geoforma, litológicamente está formada por rocas sedimentarias de tipo areniscas y limo arcillitas, corresponde a la Formación Yungay, Formación Carhuaz y al Batolito de la Cordillera Blanca. Esta formación se encuentra a lo largo de todas las subcuencas de estudio, teniendo una extensión de 6861.13 ha aproximadamente.

Montaña estructural en roca intrusiva (Me-ri)

Esta subunidad, litológicamente está formada por depósitos morrénicos, bloques angulosos y rellenados con arcilla. Abarca pequeñas zonas de la subcuenca Cojup y Llanganuco, teniendo estas una extensión de 276.25 ha.

Colinas y lomadas

Morrenas (Mo)

Zonas adyacentes a un nevado de depósito glaciar en forma de lomas alargadas individuales o en grupos en las vertientes superiores, se encuentran por encima de los 4000 msnm. Son susceptibles a generar eventos de movimientos en masa. Las principales áreas de morrenas se encuentran en toda la Cordillera Blanca, teniendo una extensión de 1910.27 ha de las subcuencas identificadas en la investigación.

Piedemonte

Abanico de piedemonte (A-p)

Depósitos con ligera pendiente hacia el valle en la desembocadura de subcuencas o ríos que drenan a los ríos que forman el valle. Está asociada a la descarga de sedimentos de un curso de aguas (río o subcuenca). Esta subunidad la encontramos en las 6 subcuencas de estudio, con una extensión de 3887.87 ha aproximadamente.

Vertiente glacial o de gelifracción (V-gg)

La vertiente presenta rocas con rotura (efecto palanca), a consecuencia que soporta al congelarse el agua contenida en sus diaclasas. Son zonas propensas a derrumbes y flujos de detritos. Abarca aproximadamente 12132.61 ha aproximadamente en todas las subcuencas estudiadas.

Vertiente coluvial de detritos (V-cd)

Estos tipos de depósitos se encuentran al pie de las montañas o colinas, en forma de talud de detritos. El material generalmente es acarreado por gravedad (coluvial), litológicamente están formados depósitos glaciares. Ocupan aproximadamente 605. 24 ha de todas las subcuencas estudiadas

Vertiente glacio-fluvial (V-gf)

Son sedimentos glacio-fluviales que bordean zonas montañosas de litología sedimentaria y volcánica, se han formado por procesos de deglaciación durante el Pleistoceno. Su distribución en la región está restringida a altitudes superiores a los 3000 msnm, abarcando una extensión de 11716 Ha.

Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial (Vp-cd)

Su composición litológica es homogénea, depósitos de corto recorrido relacionados a laderas superiores adyacente. Son acumulaciones de ladera que se origina por peligros de movimientos en masa de tipo deslizamientos, derrumbes, avalanchas de rocas entre otros movimientos. Tiene una extensión de 656 ha de toda el área de estudio.

Planicies y depresiones

Llanura o planicie inundable (Lp-i)

Son superficies bajas, se encuentran adyacente a subcuencas y en el mismo curso fluvial. Morfológicamente son terrenos planos, son áreas inundables, ocupan poca extensión dentro del área de estudio, siendo aproximadamente 119 ha de las subcuencas estudiadas.

Valle glacial con laguna (Vg)

Valles glaciares formados por lagunas alineadas de diferentes dimensiones en la cabecera de los valles principales, que involucran el substrato rocoso y depósitos glaciares. Abarcan zonas con una extensión de 3542.16 ha aproximadamente. Se pueden presentar derrumbes, deslizamientos o avalancha de detritos.

Terraza aluvial (T-a)

Se pueden producir derrumbes en los bordes de las terrazas, planicies adyacentes a zonas donde se producen eventos de inundación fluvial. Sobre estas zonas, se extienden zonas de cultivos. Dentro del área de estudio abarcan una extensión de 718.21 ha aproximadamente.

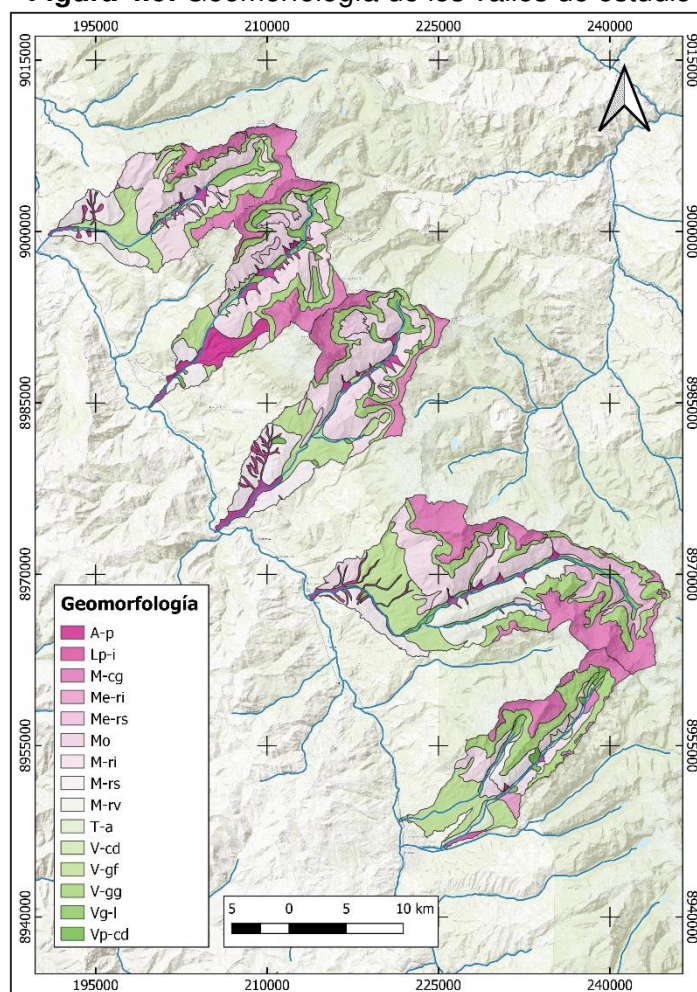
Tabla 4.1: Unidades geomorfológicas

Unidad Geomorfológica	Subunidad	Símbolo
Montañas	Montaña con cobertura glaciár	M-cg
	Montaña en roca volcánica	M-rv
	Montaña en roca sedimentaria	M-rs
	Montaña estructural en roca intrusiva	Me-ri
	Montaña estructural en roca sedimentaria	Me-rs
	Montaña en roca intrusiva	M-ri
Colinas y lomadas	Morrenas	Mo
Piedemontes	Abanico de piedemonte	A-p
	Vertiente glacial o de gelifracción	V-gg
	Vertiente coluvial de detritos	V-cd
	Vertiente glacio-fluvial	V-gf
	Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial	Vp-cd
Planicies y depresiones	Llanura o planicie inundable	Lp-i
	Valle glaciár con laguna	Vg
	Terraza aluvial	T-al

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.6 se representa las unidades geomorfológicas de las seis subcuencas de estudio.

Figura 4.6: Geomorfología de los valles de estudio



4.2.2.3 Cobertura Vegetal

Indica el porcentaje de vegetación presente y que se desarrolla en un área determinada. La cobertura vegetal es importante debido a que influye en las propiedades mecánicas e hidrológicas del suelos (Dai & Lee, 2002).

Para este estudio se utilizó la cobertura vegetal realizada por el MINAM (2015) elaborado a una escala de 1:100 000. Las unidades de cobertura vegetal identificadas en los seis valles de estudio son:

Pajonal (P-a)

Esta unidad de cobertura se compone principalmente de pastizales ubicadas entre aproximadamente 3.800 y 4.800 m en los andes. Se desarrolla sobre terreno con valles casi planos a empinados o empinados y fondos de valles glaciares de las tierras altas. Ocupa alrededor de 14 787 hectáreas (MINAM, 2015).

Área altoandina con escasa y sin vegetación (Aa-v/sv)

Clasificado como otras coberturas, incluidas aquellas áreas sin cubierta vegetal, como glaciares, áreas periféricas, desiertos costeros, riberas, arena, humedales costeros, albufera, centros mineros, lagos, lagunas, ríos, estuarios, infraestructura, represas y pueblos. Tiene un extensión aproximada de 27 974 ha aproximadamente (MINAM, 2015).

Glaciar (Gla)

Comprenden aquellas áreas sin cobertura vegetal como son los glaciares, áreas periglaciares, abarcando las zonas más altas de la Cordillera Blanca. Dentro del área de estudio abarca una superficie de 19829 ha de las subcuencas identificadas (MINAM, 2015).

Agricultura costera y andina (Ac-a)

El área de cobertura que corresponde a todas las áreas donde actualmente se realizan actividades agrícolas activas y en reposo, ubicado en los valles que ascienden a las laderas de los andes occidentales, hasta el pajonal andino. Abarcan cultivos de riego y en secano, tanto anuales como permanentes (MINAM, 2015).

Matorral arbustivo (M-a)

Esta cobertura vegetal se encuentra distribuida en los andes hasta una altitud aproximadamente de 3800 msnm en la zona centro del país, hasta el límite de los pajonales naturales. Ocupa una superficie de 4676 ha de las subcuencas estudiadas (MINAM, 2015).

Bosque relictos altoandinos (B-ra)

Este bosque se distribuye en pequeños parches en la región alta de los Andes. En montañas con pendientes empinadas y escarpadas es muy poco accesible, forma parte también de la vegetación ribereña de ciertos ríos y subcuencas entre 3500 y 4900 msnm. Abarca aproximadamente una extensión de 1595 ha aproximadamente de las subcuencas de estudio (MINAM, 2015).

Plantación forestal (P-f)

Son áreas reforestadas correspondientes a tierras con aptitud forestal en la región andina. La altitud va desde 3000 a 3800 msnm. Se desarrolla en climas desde subhúmedo hasta húmedo (por encima de los 500mm/año). Tiene una extensión de 409.61 ha aproximadamente (MINAM, 2015).

Bofedal (Bof)

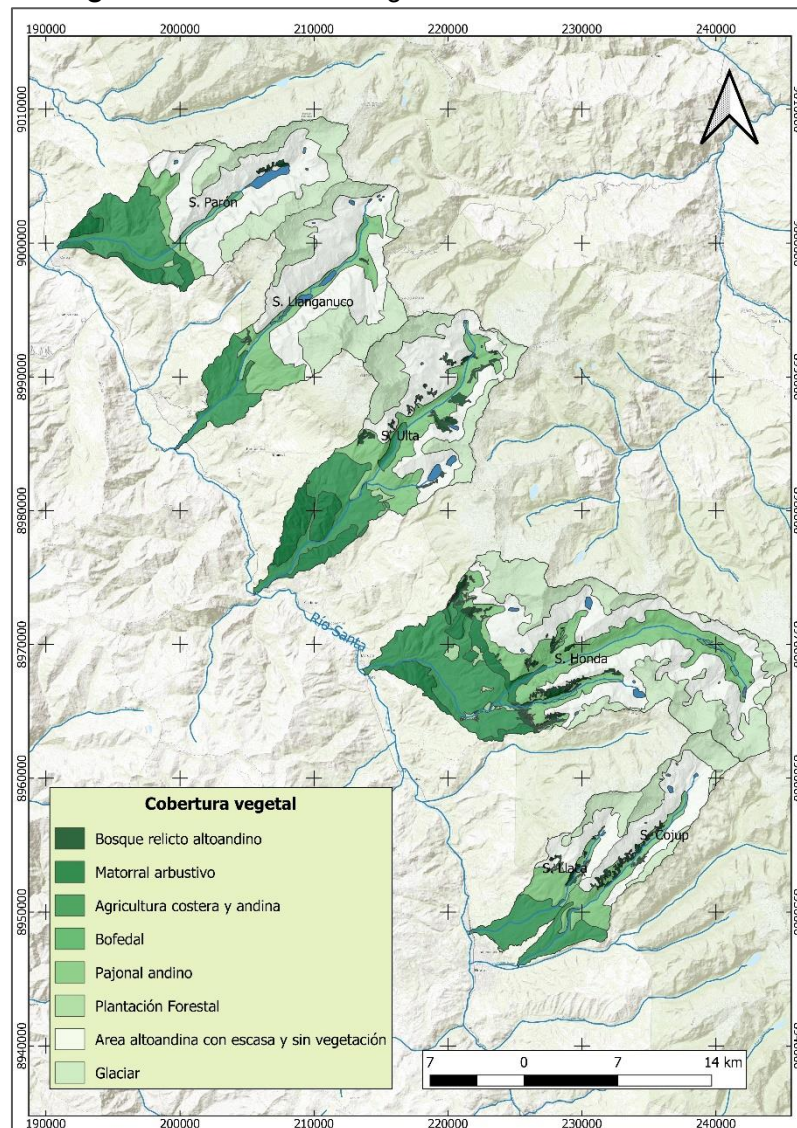
También es llamado “oconal” o “turbera” (mojado en quechua), a partir de los 3800 msnm. Estos humedales altoandinos se encuentran ubicados en valles fluvio-glaciares. Se alimentan del agua provenientes del deshielo de los glaciares, del afloramiento de agua subterránea y de la precipitación pluvial. En el área de estudio abarca aproximadamente 309.61 ha (MINAM, 2015).

Lagos, lagunas y cochas (Lag)

Esta unidad es clasificada como otras coberturas, están incluidos lagos, lagunas, ríos, estuarios, Infraestructura, represas. Tiene una extensión aproximada de 643 ha aproximadamente.(MINAM, 2015)

En la Figura 4.7 se representa las unidades de cobertura vegetal utilizadas en las seis subcuencas de estudio.

Figura 4.7: Cobertura vegetal de los valles de estudio

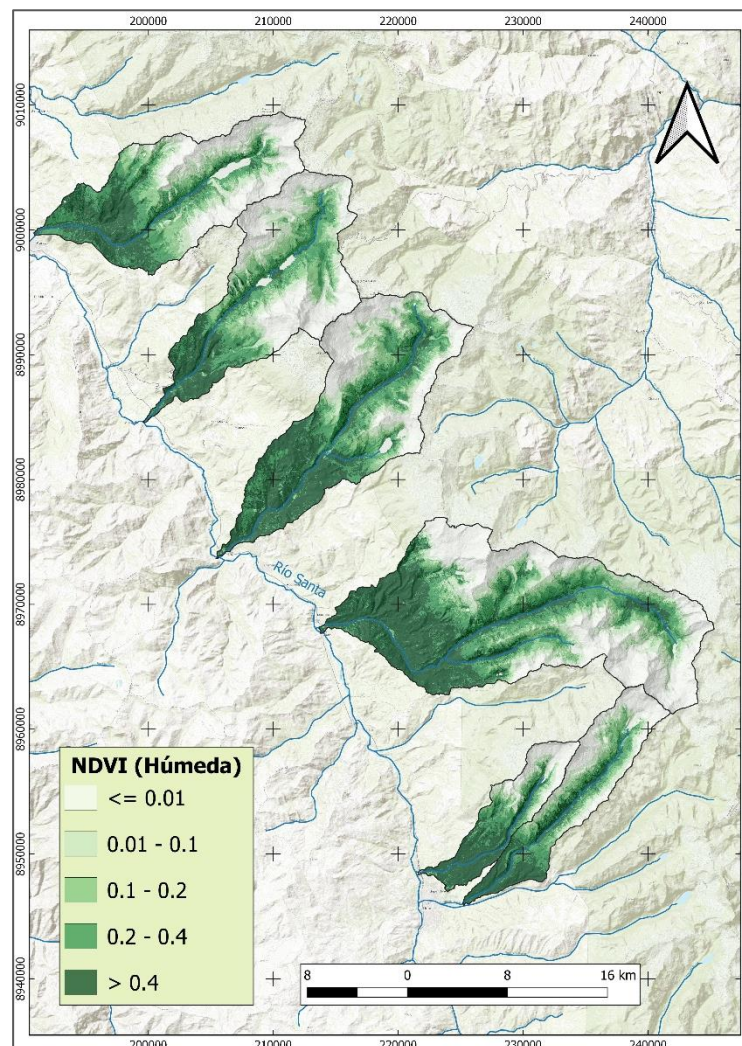


4.2.2.4 Índice de vegetación de diferencia normalizada (época húmeda)

Se realizó el cálculo del Índice de Vegetación de diferencia normalizada para la época húmeda, con apoyo de la plataforma Google Earth Engine. El producto realizado fue el promedio de las imágenes para la época húmeda de los años 2017, 2018, 2019 y 2020.

El resultado del cálculo del NDVI varía de -0.56 a 0.82. Los valores de NDVI de las subcuencas se agruparon utilizando los valores propuestos por Merg et al. (2011). Las superficies con agua, estructuras artificiales, rocas, nubes y nieve tienen valores negativos (<0.01), el suelo desnudo sin vegetación generalmente está entre 0.01 y 0.1, la vegetación ligera está entre 0.1-0.2 y la vegetación mediana puede estar en el rango de 0.2 a 0.4 y la vegetación alta está por encima de 0.4. En la Figura 4.8 se representa el índice de vegetación de diferencia normalizada de las seis subcuencas de estudio.

Figura 4.8: NDVI (época húmeda) de los valles de estudio



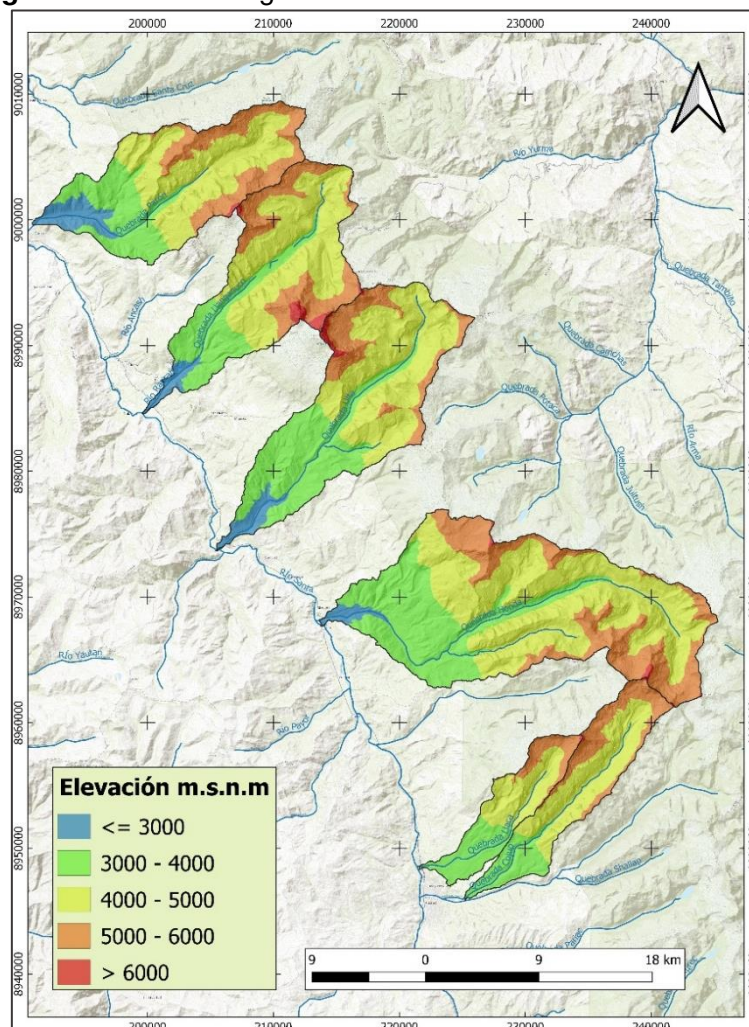
4.2.2.5 Modelo digital de elevación

La altitud tiene un impacto significativo en la susceptibilidad a movimientos en masa, ya que los peligros geológicos provienen de picos de montañas o pendientes pronunciadas. Es importante tener un modelo que represente cada punto de altura del terreno (coordenada z) y permitir conocer los puntos máximos y mínimos del área a estudiar.

Para el tratamiento de estos datos de tipo ráster, se utilizó un DEM Alos Palsar con una resolución espacial de 12.5 metros descargada del portal *Alaska Satellite Facility*, el cual se deriva de la tecnología SAR. La elección de la resolución más adecuada, fue a partir del estudio planteado por Bueechi (2019), donde concluyó que los mejores resultados para el cálculo de la susceptibilidad son derivados de un DEM con resolución de 10 a 20 m. Los DEM descargados de manera independiente fueron combinados, reproyectados, recortados y corregidos en el software QGIS. En las subcuencas de estudio, la altitud va desde 2344 msnm hasta 6764 msnm.

En la Figura 4.9 se representan el intervalo de altitudes correspondientes a las seis subcuencas de estudio.

Figura 4.9: Modelo digital de elevación de los valles de estudio



4.2.2.6 Pendiente

La pendiente presenta una relación directa con la capacidad de generación de movimientos en masa debido a que, a mayor pendiente, mayor la capacidad del agua en transportar partículas por acción de la gravedad provocando una rotura del material.

Para el cálculo e integración en un SIG, se partió del DEM Alos Palsar (resolución de 12,5), corregido y disponible en el portal *Alaska Satellite Facility*. Los mapas de pendientes se clasificaron en 5 clases (0-10°, 10-25°, 25-40°, 40°-55°, >55°) hasta la clase final que incluye todas las áreas con ángulos de pendiente >55°.

La pendiente en el área de estudio varía de 0° a 82, para la presente investigación se clasifica en 5 tipos (Tabla 4.2), las cuales están clasificadas de la siguiente manera:

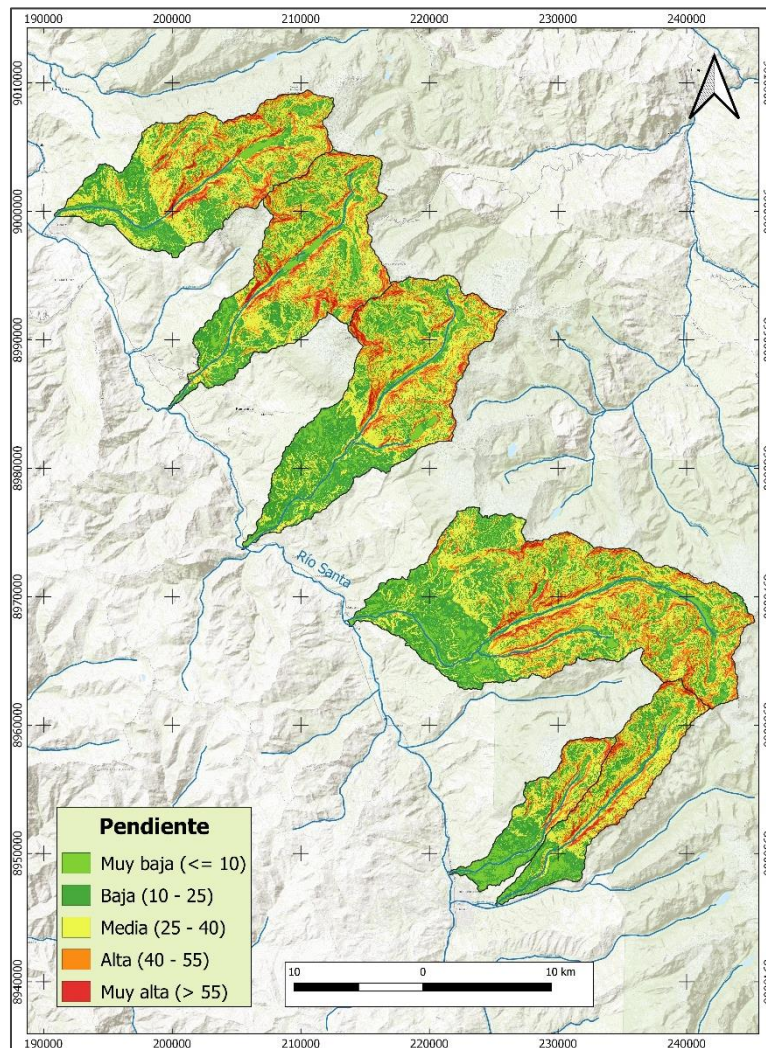
Tabla 4.2: Clases de pendiente

Clase de pendiente	Intervalo de valores	Características de la clase de pendiente
Muy Baja	0°-10°	Los lagos y lagunas abarcan este tipo de pendiente. Es muy baja la probabilidad de formar peligros geológicos.
Baja	10°-25°	Aumenta la erosión, presentando condiciones para la formación de deslizamientos de tierra. Los materiales tienden a movilizarse como flujos de rocas o detritos.
Media	25°-40°	Una mayor erosión y aumenta la probabilidad de generar movimientos en masa.
Alta	40°-55°	La erosión por acción de la gravedad es casi máxima, con ocurrencia de caída de rocas y detritos debido a acción de las precipitaciones.
Muy alta	>55	Estas pendientes son caracterizadas por formar parte de zonas más altas de la cordillera. Su capacidad de erosión llega a ser máxima, al igual que la susceptibilidad a desprendimiento de clastos.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.10 se representa el intervalo de pendientes representadas en grados que abarcan las seis subcuencas de estudio.

Figura 4.10: Clases de pendientes de los valles de estudio



4.2.2.7 Orientación

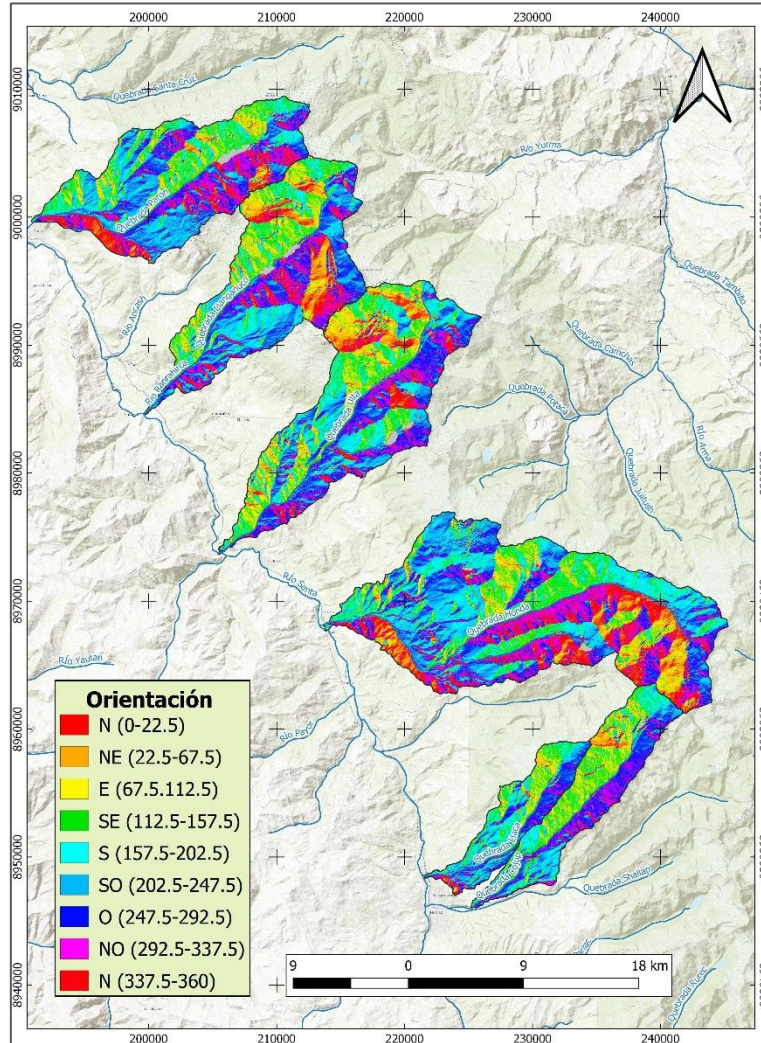
La orientación o aspecto se calculó con el método de Horn (1981). La orientación influye en eventos de movimientos en masa, se relaciona con la cobertura vegetal y la humedad en esta. Utilizando los gradientes norte-sur y este-oeste se determina el valor de la orientación (θ) como se expresa en la siguiente ecuación (García, 2008):

$$\theta = \arctg \left(\frac{dz/dx}{dz/dy} \right) = \frac{\delta_{EO}}{\beta_{NS}} \quad (4.1)$$

La ecuación anterior refleja el valor de la dirección (en grados), dentro del rango entre 0° y 360° , donde 0° representa un píxel sin inclinación y el valor entre 1° y 360° se basa en la dirección del reloj, la unidad de grado indica el norte del acimut. El norte representa 1, el este representa 90 grados, el sur representa 180 grados, y así sucesivamente. Opcionalmente, se puede dividir el resultado entre 22, 5° para convertirlo en un valor entero y obtener el rango de acimut solar generalizado de 1 a 9.

En la Figura 4.11 se representa la orientación de laderas que indica la dirección a la que apunta la pendiente de la ceda.

Figura 4.11: Orientación de laderas de los valles de estudio



4.2.2.8 Rugosidad

Es la ondulación del relieve o superficie topográfica. La variación de la rugosidad involucra escala como: grano (resolución de la imagen) y textura. El grano se entiende como la mayor longitud de onda significativa de una superficie terrestre, mientras que textura se entiende como la longitud de onda más corta (García, 2008). Está relacionada con la accidentalidad e irregularidad del terreno

La función de rugosidad está basada en la dispersión del vector perpendicular a la superficie. El vector unitario perpendicular a la superficie en el punto i es un vector R cuyas coordenadas vienen dadas por las siguientes expresiones (Upton & Fingleton, 1985):

$$x_i = \sin y_i \cdot \cos \phi_i \quad (4.2)$$

$$y_i = \sin y_i \cdot \cos \phi_i \quad (4.3)$$

$$z_i = \cos y_i \quad (4.4)$$

Donde y_i y ϕ_i representan la pendiente y la orientación en el punto i .

El modelo R definido como la raíz cuadrada de la suma cuadrática de las coordenadas de los vectores para los puntos vecinos del punto i (ventana 3x3) es dada por:

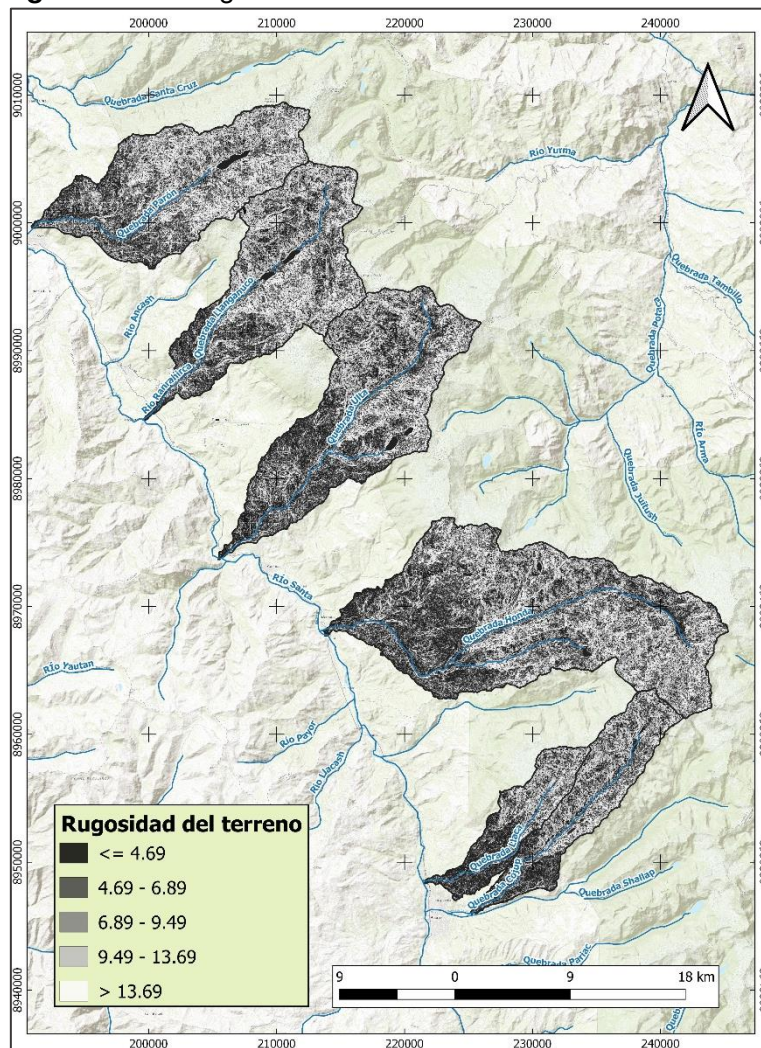
$$R = \sqrt{\left(\sum x_i\right)^2 + \left(\sum y_i\right)^2 + \left(\sum z_i\right)^2} \quad (4.5)$$

El módulo promedio es complemento de la rugosidad (w), donde n es el tamaño de la muestra. En este caso $n=9$, puesto que se elige una ventana de 3×3 .

$$w = 1 - \frac{R}{9} \quad (4.6)$$

Los valores del mapa de rugosidad normalizados, variando entre 0 (máxima dispersión) y 99.9 (mínima dispersión) niveles. En la Figura 4.12 se representa la rugosidad del terreno que abarca las seis subcuencas de estudio.

Figura 4.12: Rugosidad del terreno de los valles de estudio

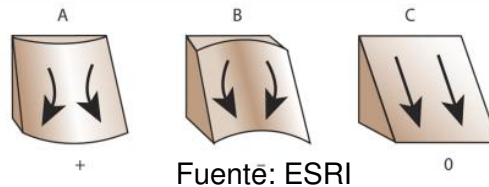


4.2.2.9 Curvatura tangencial o del plano

La curvatura del plano es perpendicular a la dirección de la pendiente máxima (ESRI, n.d.). Es positiva para los píxeles con contornos cóncavos y negativos para los píxeles con contornos convexos. La curvatura del plano se puede utilizar para diferenciar entre crestas y valles (Peckham, 2011).

La curvatura tangencial se expresa de la siguiente manera:

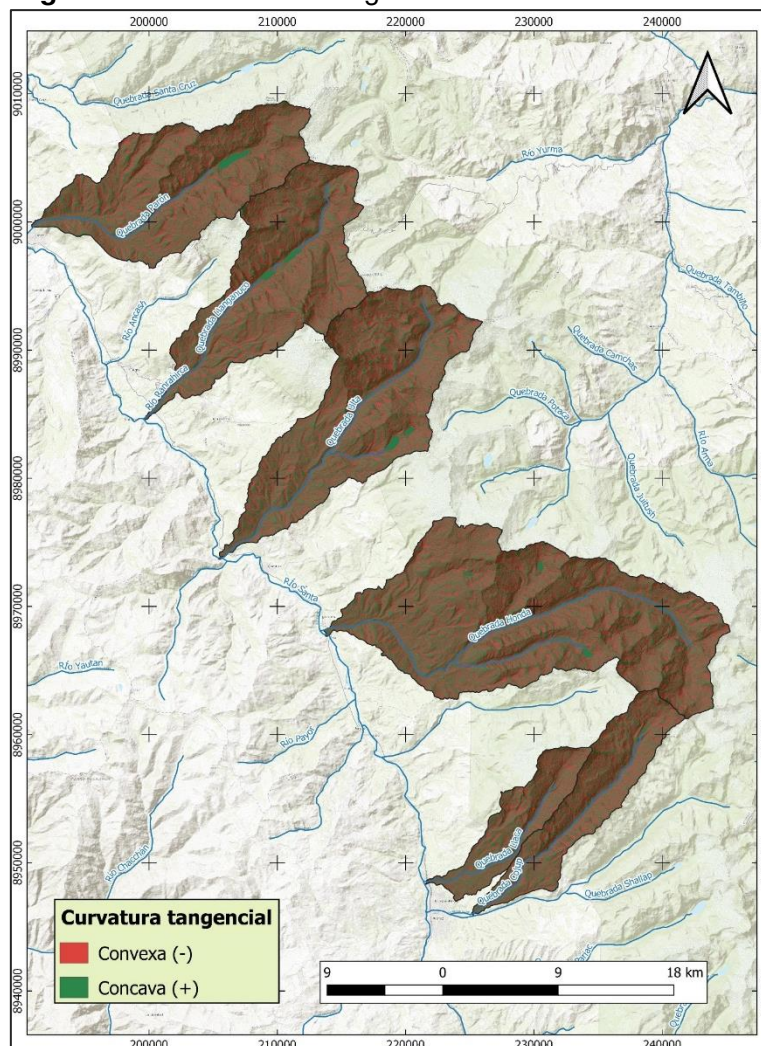
Figura 4.13: Curvatura tangencial



A: Superficie lateralmente convexa a esa celda, B: Superficie es lateralmente cóncava a esa celda, C: Superficie lineal

En la Figura 4.14 se representan las superficies cóncavas y convexas que abarcan las seis subcuencas de estudio.

Figura 4.14: Curvatura tangencial de los valles de estudio

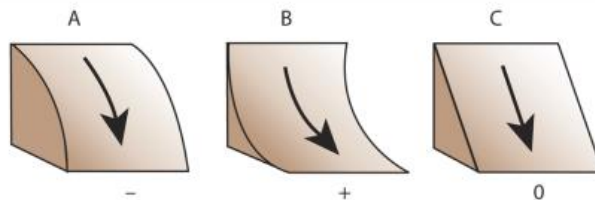


4.2.2.10 Curvatura de perfil

Es la dirección de la pendiente más pronunciada. Es negativa para superficies convexas, valor positivo para superficies cóncavas y cero corresponde a superficies llanas. La curvatura de perfil afecta la velocidad de flujo de agua que drena la superficie e influye en la erosión y deposición. Es usada para estudios de transportes y de sedimentación de materiales por flujo de agua (Peckham, 2011).

La curvatura de perfil se expresa de la siguiente manera (Figura 4.15):

Figura 4.15: Curvatura de perfil

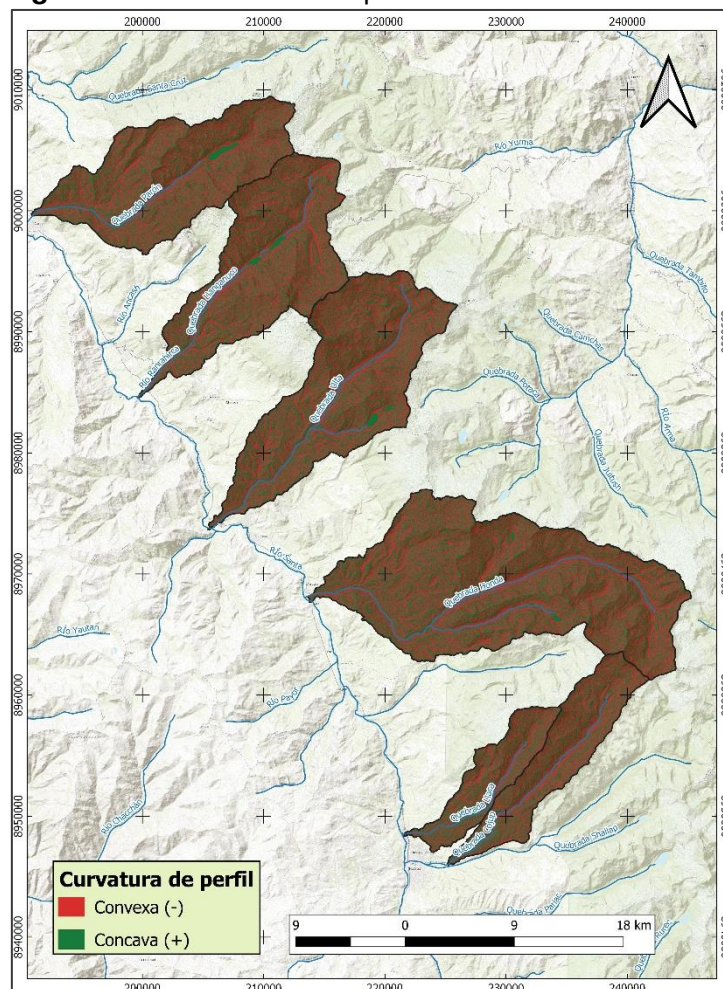


Fuente: ESRI

A: Convexa B: Cóncava C: Lineal

En la Figura 4.16 se representan las superficies convexas y cóncavas de la curvatura de perfil de las seis quebradas de estudio.

Figura 4.16: Curvatura de perfil de los valles de estudio



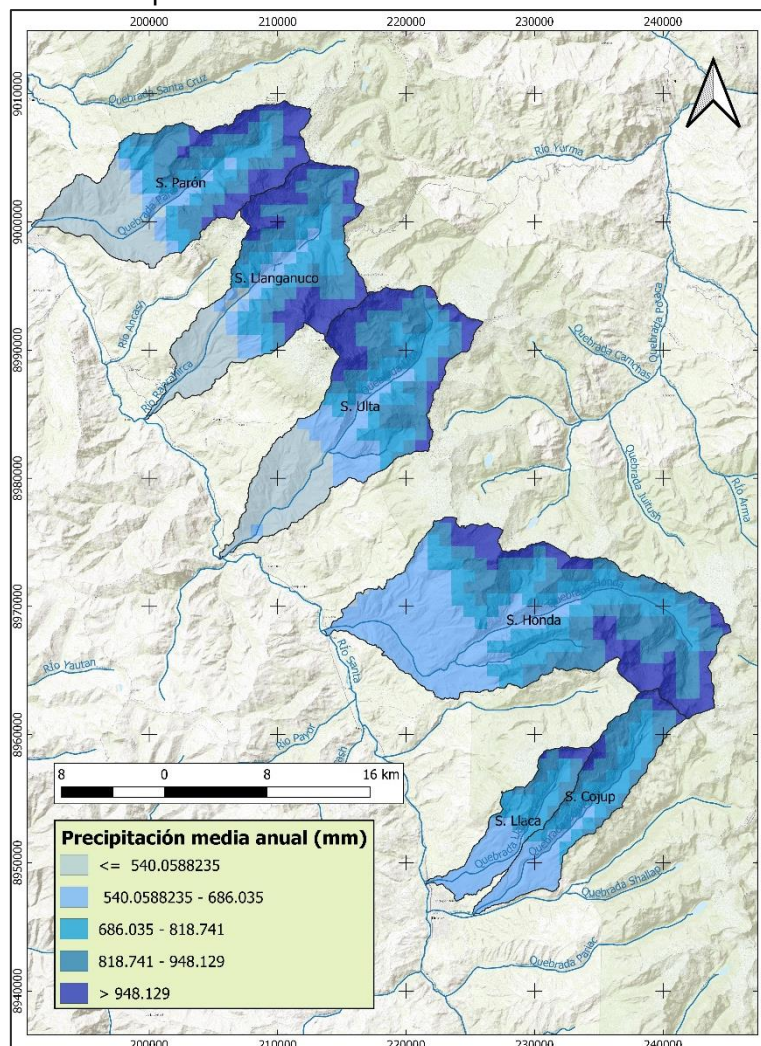
4.2.2.11 Precipitación media anual

Para la generación de la precipitación media anual de la zonas de estudio, se utilizaron los datos disponibles en la plataforma WorldClim 2 estudio realizado por Fick & Hijmans (2017). Estos ráster son un conjunto de datos climáticos mensuales interpolados espacialmente para áreas terrestres con topografías variadas, con resolución espacial de 30s (1Km²).

Estos datos climáticos fueron tratados con el software QGIS, los datos ráster se presentan con una temporalidad de 30 años (1970-2000). Con estos datos se generó el mapa de precipitación media anual para la zona de estudio, el ráster de la variable bioclimática fue recortada para la zona de estudio.

En la Figura 4.17 se representan los valores de precipitación que van de 290-1187 mm abarcando las seis subcuencas de estudio.

Figura 4.17: Precipitación media anual-WorldClim de los valles de estudio



4.3 Análisis de los datos

4.3.1 Creación de la base de datos

La base de datos para la generación del modelo de susceptibilidad fue creada a partir del inventario de eventos de movimientos en masa (presencia), datos de no eventos de movimientos en masa (ausencia) y las 11 covariables explicativas (Tabla 4.3). Se utilizó la herramienta *Estadística de zona* (QGIS Development Team, 2021) para la extracción de los valores de las variables explicativas para cada evento/no evento de movimientos en masa.

La base de datos fue sistematizada y organizada en Excel, el nombre de cada dato de los parámetros susceptibles a movimientos en masa fue codificado para su posterior uso en el software RStudio. La Tabla 4.3 muestra la codificación de cada parámetro usado en la generación de la base de datos.

Tabla 4.3: Codificación de los parámetros susceptibles a movimientos en masa

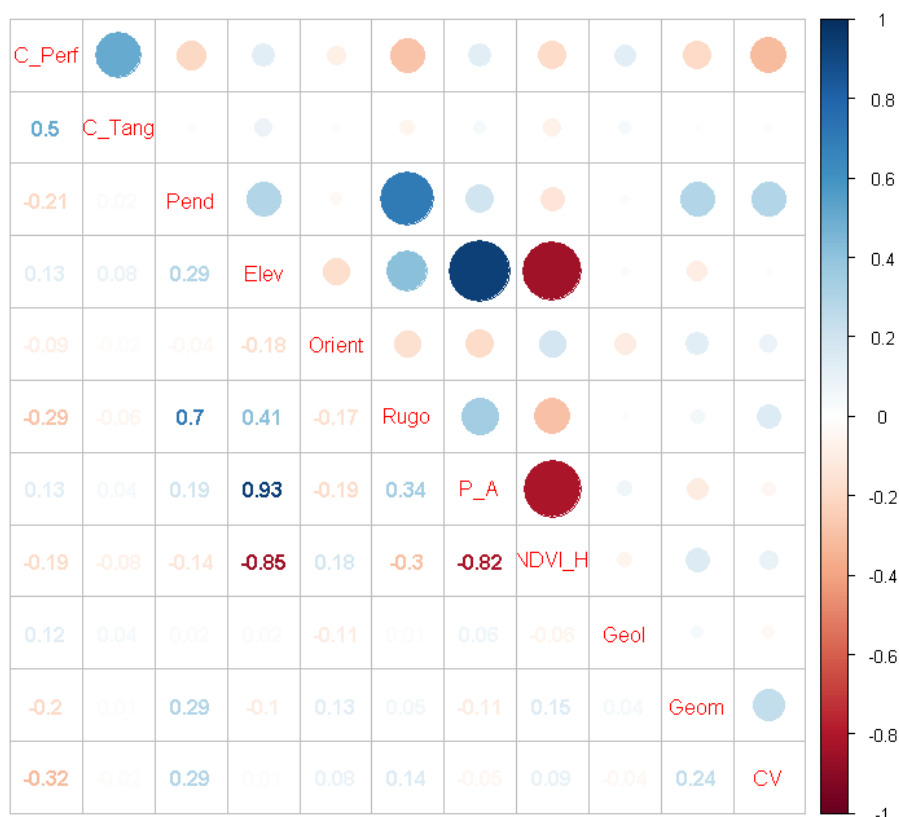
Parámetro	Código	Fuente
Elevación	Elev	Alos Palsar (12.5 x 12.5 m)
Pendiente	Pend	Alos Palsar (12.5 x 12.5 m)
NDVI (húmeda)	NDVI_H	Sentinel 2A
Orientación	Orient	Alos Palsar (12.5 x 12.5 m)
Rugosidad	Rugo	Alos Palsar (12.5 x 12.5 m)
Curvatura tangencial	C_Tang	Alos Palsar (12.5 x 12.5 m)
Curvatura de perfil	C_Perf	Alos Palsar (12.5 x 12.5 m)
Precipitación anual	P_A	WorldClim
Geología	Geol	INGEMMET
Geomorfología	Geom	INGEMMET
Cobertura vegetal	CV	MINAM

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 Correlación de las variables

Un paso preliminar para generar modelos de susceptibilidad es hacer un análisis de correlaciones (correlación de Pearson), con el propósito de intuir variables redundantes (altamente correlacionadas) de la base de datos. En la Figura 4.18 se da un alcance de la interrelación de las variables de entrada, para el cual se generó un gráfico de correlograma de las variables explicativas.

Figura 4.18: Correlación de Pearson entre las variables explicativas



Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 4.18, existen variables que presentan altas correlaciones. En la Tabla 4.4 se presenta el coeficiente de Pearson entre las variables más correlacionadas que pueden ser redundantes en el análisis de las variables.

Tabla 4.4: Variables con correlaciones más altas

Variables	Correlación
C_tang - C_Perf	0.5
Rugo - Pend	0.7
P_A - Elev	0.93
NDVI_H - Elev	-0.85
NDVI_H - P_A	-0.82

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la base de datos fue importada del software RStudio para el modelo de susceptibilidad mediante regresión logística.

4.4 Determinación de la susceptibilidad

4.4.1 Regresión logística (RL)

Para la generación de los modelos logísticos se partió de las muestras de ocurrencia (1) y no ocurrencia (0) de eventos de movimientos en masa, los cuales fueron validados en campo en noviembre del 2020. El cálculo de la susceptibilidad mediante regresión logística se realizó para cada subcuenca y es expresada de la siguiente manera:

$$p(y) = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad ; \quad z = b_0 + b_1 \times Cov_1 + b_2 \times Cov_2 + \dots + b_{i=n} \times Cov_{i=n}$$

Donde $p(y)$ mide la probabilidad de ocurrencia de los movimientos en masa en función a distintos posibles factores $Cov_1 \dots Cov_n$, que en nuestro caso son cada una de las variables incluidas.

Para cada subcuenca, se inició con el tratamiento de las variables categóricas (geología, geomorfología y cobertura vegetal) mediante el cálculo de la densidad relativa, seguido de la selección de las principales variables para obtener un modelo no saturado mediante el método de *Backward Selection*; el cual, a partir de un modelo completo que incluye a las 11 variables (modelo saturado), descarta en subsecuentes pasos aquellos factores de menor importancia hasta conseguir el modelo final de mayor parsimonia estadística (menor AIC). Una vez identificado el modelo final con las variables principales para cada subcuenca, estas variables se usaron para generar el mapa de susceptibilidad para cada una de las subcuencas, los cuales serán validados mediante las curvas ROC en cuanto a su precisión y exactitud (Ver capítulo 5.2). En la Figura 4.19 se presenta el diagrama de flujo de la metodología para el cálculo del modelo de regresión logística.

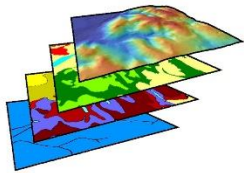
Figura 4.19: Metodología para el cálculo del modelo de Regresión Logística

Análisis de datos

Inventario de movimientos en masa



Variables explicativas



Base de datos (entrenamiento)

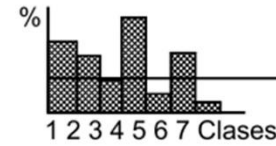
Evento	Elev	Pend	Otros
1	-2.28	-0.37	0.87
2	-2.24	-1.31	0.98
3	-0.91	1.66	0.90
n	-0.94	3.04	1.48

Base de datos (validación)

Evento	Elev	Pend	Otros
1	-0.88	2.80	-3.73
2	-1.39	0.95	0.02
3	1.47	-0.76	0.19
n	1.55	0.14	0.25

Regresión logística

Densidad relativa



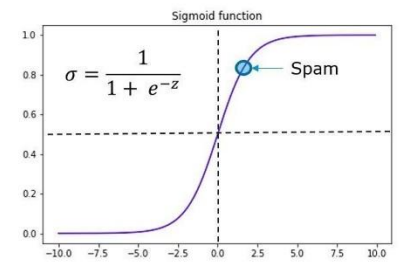
Selección de variables

Modelo optimo
(AIC más bajo)

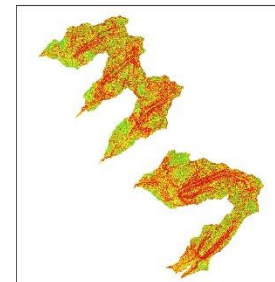
Modelo saturado

Backward selection

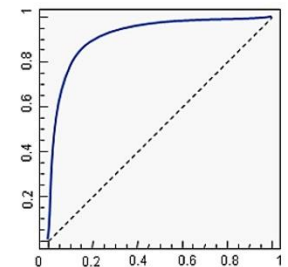
Generación del modelo



Susceptibilidad a
movimientos en masa (RL)



Evaluación del modelo-Base de datos
(validación)



4.4.1.1 Sub cuenca Parón

La base de datos de la subcuenca Parón fue dividida en una muestra de 90 datos de entrenamiento (90 % de los datos registrados) para la generación del modelo y 10 datos para su validación (10 % de los datos registrados), división similar a estudios realizados mediante este método estadístico (Bai et al., 2010a; E. Bueechi et al., 2019). Se inició con el tratamiento de las variables categóricas (geología, geomorfología y cobertura vegetal).

Tratamiento de las variables categóricas

Dentro de la bibliografía se pueden encontrar diferentes maneras como tratar las variables explicativas para generar un modelo de RL. Uno de los problemas principales al tratar datos categóricos es la creación de variables *dummy* (variables internas o indicadoras), que genera la creación de tantas variables dicotómicas como número de clases tenga dicha variable. Por esta razón, se calculó la densidad relativa o relación de frecuencias por categorías a partir del IMM para cambiar la variable categórica en numérica (Ayalew & Yamagishi, 2005; Bai et al., 2010b; Grozavu et al., 2013). Siguiendo lo indicado por Ayalew (2005), se aplica la siguiente formula:

$$LD_i = \frac{LA_i/A_i}{\sum_{i=1}^N (LA_i/A_i)} \times 100 \quad (4.7)$$

Donde LD_i es la densidad relativa de movimientos en masa para cada clase i , LA_i y A_i son el área de movimientos en masa en la clase i y el área total de la clase i , respectivamente; y N es número total de clases en un parámetro.

La Tabla 4.5 presenta las densidades relativas calculadas para las variables categóricas de la subcuenca Parón. Para la variable geología; la clase que representa deposito glaciar, fluvial tienen la mayor densidad de deslizamientos de tierra (67.5 %); para las clases de geomorfología, las morrenas (29.9 %) y de la cobertura vegetal, pajonal andino (38.8 %).

Tabla 4.5: Área y densidad relativa por movimientos en masa calculada para los parámetros geología, geomorfología y cobertura vegetal de la subcuenca Parón.

Variable	Código	Área (Ha)	Densidad relativa (%)
<u>Geología</u>			
Formación Yungay	F-yu	5596.198	11.8
Depósito glaciar	D-gl	3815.631	5.6
Depósito glaciar, fluvial	D-glf	2928.241	67.5
Batolito Cordillera Blanca	B-cb	1699.581	15
Depósito aluvial	D-al	8.723	0
Laguna	Lag	214.220	0
<u>Geomorfología</u>			
Montaña en roca intrusiva	M-ri	4999.15	3.74
Montaña con cobertura glaciar	M-cg	2494.80	0.03
Vertiente glacio-fluvial	V-gf	2310.10	8.69
Montaña en roca sedimentaria	M-rs	1796.39	0.62
Vertiente glacial o de gelifracción	V-gg	1503.01	3.69
Abanico de piedemonte	A-p	421.25	16.80
Valle glaciar	Vg	408.78	21.34
Vertiente coluvial de detritos	V-cd	201.01	15.13

Morrenas	Mo	116.44	29.96
Montaña estructural en roca intrusiva	Me-ri	11.67	0.00
<u>Cobertura vegetal</u>			
Área altoandina con escasa y sin vegetación	Aa-v/sv	5513.43	32.86
Glaciar	Gla	3552.09	1.20
Agricultura costera y andina	Ac-a	2873.76	8.77
Pajonal andino	P-a	1154.27	38.81
Matorral arbustivo	M-a	872.93	0.00
Bosque relictos altoandinos	B-ra	60.94	18.37
Plantación Forestal	P-f	26.16	0.00
Lagunas, lagos y cochas	Lag	209.01	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Las capas de geología, geomorfología y cobertura vegetal pertenecientes a la subcuenca Parón fueron rasterizadas a partir de los valores de densidad relativa por cada clase. Seguido a esto, se procedió a seleccionar las principales variables.

Selección de las principales variables

Se utilizó el software RStudio (R Core Team, 2020) para la selección de las principales parámetros independientes; se utilizó la metodología *Backward selection*, esta metodología está basada en la eliminación de variables hacia atrás de un modelo saturado (Fernández Pierna et al., 2009). El modelo óptimo para la subcuenca Parón es el que finalmente todas las variables son significativas.

A partir del modelo saturado se combinaron los parámetros independientes mediante la función stepAIC (Venables & Ripley, 2001) hasta encontrar el AIC (*Akaike Information Criterio*) más bajo con todas sus variables significantes ($\alpha \leq 0.1$) el cual se considera el mejor modelo (Hilbe, 2011).

Tabla 4.6: Número de variables (No.), residuales de desviación (RD) y Akaike Information Criterio (AIC) por modelo de susceptibilidad para la subcuenca Parón.

Modelo	No.	Parámetros del modelo	RD	AIC
Modelo saturado	11	C_Perf + C_Tang + Pend + Elev + Orient + Rugo + P_A + NDVI_H + Geol + Geom + CV	45.094	69.09
	10	C_Perf + Pend + Elev + Orient + Rugo + P_A + NDVI_H + Geol + Geom + CV	45.172	67.17
Backward-Stepwise	9	C_Perf + Pend + Elev + Rugo + P_A + NDVI_H + Geol + Geom + CV	45.525	65.53
	8	Pend + Elev + Rugo + P_A + NDVI_H + Geol + Geom + CV	46.358	64.36
	7	Pend + Elev + P_A + NDVI_H + Geol + Geom + CV	47.565	63.57
	6	Pend + Elev* + P_A + NDVI_H + Geom + CV*	49.472	63.47
Modelo final	5	Pend + P_A + NDVI_H + Geom	55.596	65.59

“*” = variables no significantes

Fuente: Elaboración propia.

De las variables cuantitativas, se seleccionó las variables más significativas, la pendiente, NDVI en época húmeda, geomorfología y precipitación media anual. A partir de estas variables, se generó el modelo logístico.

Generación del modelo de regresión logística

A partir de la selección de las principales variables para la subcuenca Parón (Tabla 4.6), se generó el modelo de regresión logística para esta subcuenca mediante el software estadístico R Studio, el cual nos devuelve los coeficientes que se usaron para el cálculo de la ecuación de regresión logística, así como los valores de desviación estándar y su significancia.

De la Tabla 4.7 se observa los coeficientes que se introdujeron en la Calculadora ráster del software QGIS para generar el ráster de susceptibilidad. También se realizó las pruebas de significancia del modelo, donde se puede inferir que el NDVI_H y la Geom son los parámetros más determinantes en la generación del modelo de susceptibilidad a movimientos en masa.

Tabla 4.7: Resumen de los valores de los pesos del modelo de regresión logística para la subcuenca Parón.

Parámetro	Coef	Des.Est.	Pr(> z)
Constante	-19.8	5.084	0
Pend	0.148	0.058	0.011*
P_A	0.014	0.005	0.007**
NDVI_H	13.755	4.853	0.005**
Geom	0.338	0.114	0.003**
Códigos de significancia: ^ = <0.001; *** = 0.001; ** = 0.01; * = 0.05.			

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del ráster de susceptibilidad

Con los coeficientes de los parámetros mediante la RL, se procedió a modelar la susceptibilidad a movimientos en masa con la herramienta Calculadora ráster (QGIS Development Team, 2021). La ecuación del modelo para la subcuenca Parón que resulta es la siguiente:

$$p(y)=1/(1+e^{-(19.81+0.148 \times \text{Pend}+0.014 \times \text{P_A}+13.755 \times \text{NDVI_H} +0.338 \times \text{Geom})})$$

4.4.1.2 Sub cuenca Llanganuco

La base de datos de la subcuenca Llanganuco fue dividida en una muestra de 114 datos de entrenamiento (90 % de los datos registrados) para la generación del modelo y 12 datos para su validación (10 % de los datos registrados).

Tratamiento de las variables categóricas

De los 11 parámetros relacionados a movimientos en masa para iniciar la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa (Tabla 4.3), 9 parámetros son cuantitativos ráster y tres son parámetros nominales (geología, geomorfología y cobertura vegetal), estos últimos fueron transformados en parámetros numéricos a través del cálculo de la densidad relativa de movimientos de masa (Ecuación 4.7).

La Tabla 4.8 presenta las densidades relativas calculadas para las variables categóricas. Para clases de geología; la clase que representa depósito glaciar, fluvial tienen la mayor densidad de deslizamientos de tierra (40.90 %); para las clases de geomorfología, las morrenas (27.48 %) y de la cobertura vegetal, bofedales (37.39 %).

Tabla 4.8: Área y densidad relativa por movimientos en masa calculada para los parámetros geología, geomorfología y cobertura vegetal de la subcuenca Llanganuco.

Variable	Código	Área (Ha)	Densidad relativa (%)
<u>Geología</u>			
Depósito glaciar	D-gl	4856.31	5.9
Depósito glaciar, fluvial	D-glf	4498.81	40.9
Batolito Cordillera Blanca	B-cb	3905.76	8.0
Formación Yungay	F-yu	592.04	2
Formación Chimú	F-cm	184.09	40
Formación Chicama	F-cc	148.75	3
Depósito aluvial	D-al	66.48	0
Laguna	Lag	147.96	0
<u>Geomorfología</u>			
Montaña en roca intrusiva	M-ri	4924.07	4.03
Montaña con cobertura glaciar	M-cg	2138.70	0.86
Vertiente glaciar o de gelifracción	V-gg	1887.80	1.67
Abanico de piedemonte	A-p	1628.32	18.32
Vertiente glacio-fluvial	V-gf	1010.76	4.48
Valle glaciar con laguna	Vg-l	984.92	15.96
Montaña en roca sedimentaria	M-rs	752.07	4.43
Morrenas	Mo	595.11	27.48
Vertiente coluvial de detritos	V-cd	275.04	12.78
Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial	Vp-cd	174.77	9.98
Montaña estructural en roca intrusiva	Me-ri	28.41	0.00
Llanura o planicie inundable	Lp-i	0.22	0.00
<u>Cobertura vegetal</u>			
Área altoandina con escasa y sin vegetación	Aa-v/sv	5727.67	12.18
Glaciar	Gla	4171.34	3.89
Pajonal andino	P-a	2392.83	23.51

Agricultura costera y andina	Ac-a	1915.01	9.76
Lagunas, lagos y cochas	Lag	128.05	0.01
Bosque relicto altoandino	B-ra	32.75	13.27
Bofedal	Bof	32.47	37.39
Matorral arbustivo	M-a	0.07	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Las capas de geología, geomorfología y cobertura vegetal pertenecientes a la subcuenca Llanganuco fueron rasterizadas a partir de los valores de densidad relativa por cada clase. Seguido a esto, se procedió a seleccionar las principales variables.

Selección de las principales variables

Se usó la metodología *Backward selection* (Fernández Pierna et al., 2009) para elegir el modelo final, a partir del modelo saturado se combinaron los parámetros independientes mediante la función stepAIC (Venables & Ripley, 2001) hasta encontrar el AIC (*Akaike Information Criterio*) más bajo con todas sus variables significantes (Tabla 4.9) el cual se considera el mejor modelo (Hilbe, 2011).

Tabla 4.9: Número de variables (No.), residuales de desviación (RD) y Akaike Information Criterio (AIC) por modelo de susceptibilidad para la subcuenca Llanganuco.

Modelo	No.	Parámetros del modelo	RD	AIC
Modelo saturado	11	C_Perf + C_Tang + Pend + Elev + P_A + Orient + Rugo + NDVI_H + Geol + Geom + CV	72.74	96.74
	10	C_Perf + Pend + Elev + P_A + Orient + Rugo + NDVI_H + Geol + Geom + CV	72.74	94.74
Backward-Stepwise	9	Pend + Elev + P_A + Orient + Rugo + NDVI_H + Geol + Geom + CV	72.82	92.82
	8	Pend + Elev + P_A + Orient + NDVI_H + Geol + Geom + CV	73.20	91.20
	7	Pend + Elev + P_A + Orient + NDVI_H + Geol + Geom	73.88	89.89
	6	Pend + Elev* + P_A + NDVI_H + Geol + Geom	75.81	89.82
Modelo final	5	Pend + P_A + NDVI_H + Geol + Geom	78.56	90.56

“*” = variables no significantes

Fuente: Elaboración propia.

De las variables cuantitativas, se seleccionó las variables más significativas, la pendiente, NDVI en época húmeda, geomorfología, geología y precipitación media anual. A partir de estas variables, se generó el modelo logístico.

Generación del modelo de regresión logística

A partir de la selección de variables para la subcuenca Llanganuco (Tabla 4.9), el modelo logístico fue generado con el software estadístico R Studio, el cual nos devuelve los coeficientes que se usaron para el cálculo de la ecuación de regresión logística para la subcuenca Llanganuco, así como los valores de desviación estándar y su significancia.

De la Tabla 4.10 se observa los coeficientes que se introdujeron en la Calculadora ráster del software QGIS para generar el ráster de susceptibilidad. También se realizó las pruebas de significancia del modelo, donde se puede inferir que la pendiente es el parámetro más determinante en la generación del modelo de susceptibilidad a movimientos en masa.

Tabla 4.10: Resumen de los valores de los pesos del modelo de regresión logística para la subcuenca Llanganuco.

Parámetro	Coef	Des.Est.	Pr(> z)
Constante	0.53	2.67	0
Pend	0.2396	0.0457	0 [^]
P_A	-0.0103	0.00347	0.003 ^{**}
NDVI_H	-9.49	3.26	0.004 ^{**}
Geol	0.0738	0.0246	0.003 ^{**}
Geom	0.1412	0.0429	0.001 [^]
Códigos de significancia: [^] = <0.001; ^{***} = 0.001; ^{**} = 0.01; [*] = 0.05.			

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del ráster de susceptibilidad

Con los coeficientes de los parámetros mediante la RL, se procedió a modelar la susceptibilidad a movimientos en masa para la subcuenca Llanganuco con la herramienta Calculadora ráster (QGIS Development Team, 2021). La ecuación del modelo que resulta es la siguiente:

$$p(y)=1/(1+e^{-(0.53+0.2396\times\text{Pend}-0.0103\times\text{P_A}-9.49\times\text{NDVI_H}+0.0738\times\text{Geol}+0.1412\times\text{Geom})})$$

4.4.1.3 Sub cuenca Ulta

La base de datos de la subcuenca Ulta fue dividida en una muestra de 142 datos de entrenamiento (90 % de los datos registrados) para la generación del modelo y 16 datos para su validación (10 % de los datos registrados).

Tratamiento de las variables categóricas

De los 11 parámetros relacionados a movimientos en masa (Tabla 4.3), la geología, geomorfología y cobertura vegetal (variables categóricas), fueron transformados en parámetros numéricos a través del cálculo de la densidad relativa de movimientos de masa (Ecuación 4.7).

La Tabla 4.29 presenta las densidades relativas calculadas para las variables categóricas. Para clases de geología; la clase que representa depósito aluvial tienen la mayor densidad de deslizamientos de tierra (50.66 %); para las clases de geomorfología, Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial (22.65 %) y de la cobertura vegetal, bosque relicto altoandino (29.61 %).

Tabla 4.11: Área y densidad relativa por movimientos en masa calculada para los parámetros geología, geomorfología y cobertura vegetal de la subcuenca Ulta.

Variable	Código	Área (Ha)	Densidad relativa (%)
<u>Geología</u>			
Depósito glaciar, fluvial	D-glf	4550.36	17.50
Batolito Cordillera Blanca	B-cb	4259.61	6.89
Depósito glaciar	D-gl	3942.44	1.97
Formación Yungay	F-yu	2125.12	5.38
Formación Carhuaz	F-ch	572.65	3.42
Formación Santa	F-sa	428.39	0.25
Formación Chicama	F-cc	380.72	7.29
Formación Chimú	F-cm	242.52	6.65
Depósito aluvial	D-al	72.54	50.66
Laguna	Lag	183.25	0.00
<u>Geomorfología</u>			
Montaña en roca intrusiva	M-ri	5402.97	8.61
Montaña en roca sedimentaria	M-rs	2556.26	2.58
Vertiente glacio-fluvial	V-gf	2368.88	9.35
Montaña con cobertura glaciar	M-cg	2269.65	0.12
Vertiente glacial o de gelifracción	V-gg	1771.92	1.98
Abanico de piedemonte	A-p	1025.45	17.16
Morrenas	Mo	675.20	21.28
Valle glaciar con laguna	Vg-l	483.00	16.27
Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial	Vp-cd	203.00	22.65
Llanura o planicie inundable	Lp-i	1.28	0.00
<u>Cobertura vegetal</u>			
Área altoandina con escasa y sin vegetación	Aa-v/sv	4674.48	13.46
Glaciar	Gla	3328.67	0.91
Pajonal andino	P-a	3324.65	28.91

Agricultura costera y andina	Ac-a	2728.99	17.07
Matorral arbustivo	M-a	2026.76	5.67
Bosque relicto altoandino	B-ra	461.09	29.61
Plantación Forestal	P-f	74.76	4.38
Río	R	0.33	0.00
Lagunas, lagos y cochas	Lag	137.86	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Las capas de geología, geomorfología y cobertura vegetal pertenecientes a la subcuenca Ulta fueron rasterizadas a partir de los valores de densidad relativa por cada clase. Seguido a esto, se procedió a seleccionar las principales variables.

Selección de las principales variables

La selección de variables se realizó mediante la metodología *Backward selection*, esta metodología se basa en la eliminación hacia atrás de variables de un modelo saturado (Fernández Pierna et al., 2009). El modelo final para la subcuenca Ulta es el que finalmente tiene el AIC (*Akaike Information Criterio*) más bajo y sus variables son significantes (Tabla 4.12), el cual se considera el mejor modelo.

Tabla 4.12: Número de variables (No.), residuales de desviación (RD) y Akaike Information Criterio (AIC) por modelo de susceptibilidad para la subcuenca Ulta.

Modelo	No.	Parámetros del modelo	RD	AIC
Modelo saturado	11	C_Perf + C_Tang + Pend + Elev + P_A + Orient + Rugo + NDVI_H + Geol + Geom + CV	106.04	130.04
	10	C_Perf + Pend + Elev + P_A + Orient + Rugo + NDVI_H + Geol + Geom + CV	106.04	128.04
Backward-Stepwise	9	Pend + Elev + P_A + Orient + Rugo + NDVI_H + Geol + Geom + CV	106.06	126.07
	8	Pend + Elev + P_A + Orient + NDVI_H + Geol + Geom + CV	106.2	124.2
	7	Pend + Elev + P_A + NDVI_H + Geol + Geom + CV	107.38	123.38
	6	Pend + P_A + NDVI_H + Geol + Geom + CV	108.46	122.46
Modelo final	5	Pend + NDVI_H + Geol + Geom + CV	108.93	120.93

Fuente: Elaboración propia.

De las variables cuantitativas significativas (modelo final), la pendiente, NDVI en época húmeda, geomorfología, geología y cobertura vegetal se utilizaron para generar el modelo logístico.

Generación del modelo de regresión logística

A partir de la selección de variables para la subcuenca Ulta (Tabla 4.12), la generación del modelo de regresión logística se realizó con el software estadístico R Studio, el cual nos devuelve los coeficientes que se usaron para el cálculo de la ecuación de regresión logística para la subcuenca Ulta, así como los valores de desviación estándar y su significancia.

De la Tabla 4.13, se observa los coeficientes que se introdujeron en la Calculadora ráster del software QGIS para generar el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa. También se realizó las pruebas de significancia del modelo, donde se puede inferir que la pendiente es el

parámetro más determinante en la generación del modelo de susceptibilidad a movimientos en masa.

Tabla 4.13: Resumen de los valores de los pesos del modelo de regresión logística para la subcuenca Uta.

Parámetro	Coef	Des.Est.	Pr(> z)
Constante	-11.80	2.060	0
Pend	0.287	0.054	0 [^]
NDVI_H	5.820	1.750	0.003 ^{**}
Geol	0.083	0.043	0.004 ^{**}
Geom	0.156	0.048	0.003 ^{**}
CV	0.074	0.039	0.001 ^{***}
Códigos de significancia: [^] = <0.001; ^{***} = 0.001; ^{**} = 0.01; [*] = 0.05.			

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del ráster de susceptibilidad

Con los coeficientes de los parámetros mediante la RL, se procedió a modelar la susceptibilidad a movimientos en masa para la subcuenca Uta con la herramienta Calculadora ráster (QGIS Development Team, 2021). La ecuación del modelo que resulta es la siguiente:

$$p(y)=1/(1+e^{-(-11.80 + 0.287 \times \text{Pend} + 5.82 \times \text{NDVI_H} + 0.083 \times \text{Geol} + 0.156 \times \text{Geom} + 0.074 \times \text{CV})})$$

4.4.1.4 Sub cuenca Honda

La base de datos de la subcuenca Honda fue dividida en una muestra de 226 datos de entrenamiento (80 % de los datos registrados) para la generación del modelo y 58 datos para su validación (20 % de los datos registrados).

Tratamiento de las variables categóricas

De los 11 parámetros susceptibles a movimientos en masa (Tabla 4.3), 9 parámetros son cuantitativos ráster y tres parámetros nominales (geología, geomorfología y cobertura vegetal), estos últimos fueron transformados en parámetros numéricos a través del cálculo de la densidad relativa de movimientos de masa (Ecuación 4.7).

La Tabla 4.14 presenta las densidades relativas calculadas para las variables categóricas. Para clases de geología; la clase que representa deposito glaciar, fluvial tienen la mayor densidad de deslizamientos de tierra (32.59 %); para las clases de geomorfología, valle glaciar (17.60 %) y de la cobertura vegetal, pajonal andino (22.74 %).

Tabla 4.14: Área y densidad relativa por movimientos en masa calculada para los parámetros geología, geomorfología y cobertura vegetal de la subcuenca Honda.

Variable	Código	Área (Ha)	Densidad relativa (%)
<u>Geología</u>			
Depósito glaciar	D-gl	8190.72	3.33
Batolito Cordillera Blanca	B-cb	7351.74	20.67
Depósito glaciar, fluvial	D-glf	6399.11	32.59
Formación Chicama	F-cc	2882.37	13.27
Formación Carhuaz	F-ch	1120.29	3.55
Depósito aluvial	D-al	333.09	11.93
Formación Chimú	F-cm	280.24	0.09
Formación Yungay	F-yu	258.35	14.54
Laguna	Lag	153.41	0.00
Formación Santa	F-sa	144.19	0.04
Formación Pariahuanca, Chúlec, Pariatambo	F-pcp	0.39	0.00
<u>Geomorfología</u>			
Montaña con cobertura glaciar	M-cg	5765.00	0.47
Montaña en roca intrusiva	M-ri	4565.64	6.77
Vertiente glacial o de gelifracción	V-gg	4100.86	3.15
Vertiente glacio-fluvial	V-gf	3555.09	8.07
Montaña en roca volcánica	M-rv	3179.48	10.32
Montaña estructural en roca sedimentaria	Me-rs	2202.51	8.82
Valle glaciar con laguna	Vg-l	1277.85	17.60
Montaña en roca sedimentaria	M-rs	1131.97	1.08
Abanico de piedemonte	A-p	777.95	13.06
Morrenas	Mo	523.62	16.92
Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial	Vp-cd	30.90	13.74
Llanura o planicie inundable	Lp-i	2.98	0.00
Terraza aluvial	T-a	0.03	0.00

<u>Cobertura vegetal</u>			
Área altoandina con escasa y sin vegetación	Aa-v/sv	7864.62	7.16
Glaciar	Gla	6298.06	0.42
Pajonal andino	P-a	5484.24	22.74
Agricultura costera y andina	Ac-a	4303.30	7.91
Matorral arbustivo	M-a	1777.20	18.88
Bosque relicto altoandino	B-ra	679.91	10.66
Plantación Forestal	P-f	298.42	17.52
Bofedal	Bof	277.15	14.71
Lagunas, lagos y cochas	Lag	130.84	0.00
Río	R	0.154387	0

Fuente: Elaboración propia.

Las capas de geología, geomorfología y cobertura vegetal pertenecientes a la subcuenca Honda fueron rasterizadas a partir de los valores de densidad relativa por cada clase. Seguido a esto, se procedió a seleccionar las principales variables.

Selección de las principales variables

La selección de variables se realizó mediante la metodología *Backward selection*, esta metodología se basa en la eliminación de variables hacia atrás de un modelo saturado (Fernández Pierna et al., 2009). El modelo óptimo para la subcuenca Honda es el que finalmente tiene el AIC (*Akaike Information Criterio*) más bajo y sus variables son significantes (Tabla 4.15) con un $\alpha \leq 0.1$, el cual se considera el mejor modelo.

Tabla 4.15: Número de variables (No.), residuales de desviación (RD) y Akaike Information Criterio (AIC) por modelo de susceptibilidad para la subcuenca Honda.

Modelo	No.	Parámetros del modelo	RD	AIC
Modelo saturado	11	C_Perf + C_Tang + Pend + Elev + P_A + Orient + Rugo + NDVI_H + Geol + Geom + CV	245.59	269.60
	10	C_Perf + C_Tang + Pend + Elev + Orient + Rugo + NDVI_H + Geol + Geom + CV	245.68	267.68
	9	C_Perf + C_Tang + Pend + Elev + Orient + Rugo + NDVI_H + Geol + Geom	245.74	265.74
Backward-Stepwise	8	C_Perf + C_Tang + Pend + Elev + Orient + Rugo + Geol + Geom	245.88	263.88
	7	C_Perf + C_Tang + Pend + Elev + Rugo + Geol + Geom	247.49	263.49
	6	C_Tang + Pend + Elev + Rugo + Geol + Geom	249.17	263.17
	5	Pend + Elev + Rugo* + Geol + Geom	249.74	261.73
Modelo final	4	Pend + Elev + Geol + Geom	251.79	261.79

“*” = variables no significantes

Fuente: Elaboración propia.

De las variables cuantitativas, se seleccionó las variables más significativas, la pendiente, elevación, geología y geomorfología. A partir de estas variables, se generó el modelo logístico.

Generación del modelo de regresión logística

A partir de la selección de variables para la subcuenca Honda (Tabla 4.15), la generación del modelo de regresión logística se realizó con el software estadístico R Studio, el cual nos devuelve los coeficientes que se usaron para el cálculo de la ecuación de regresión logística para la subcuenca Honda, así como los valores de desviación estándar y su significancia.

De la Tabla 4.16, se observa los coeficientes que se introdujeron en la Calculadora ráster del software QGIS para generar el ráster de susceptibilidad. También se realizó las pruebas de significancia del modelo, donde se puede inferir que la pendiente es el parámetro más determinante en la generación del modelo de susceptibilidad a movimientos en masa.

Tabla 4.16: Resumen de los valores de los pesos del modelo de regresión logística para la subcuenca Honda.

Parámetro	Coef	Des.Est.	Pr(> z)
Constante	-0.467	1.316	0.722
Pend	0.076	0.018	0***
Elev	-0.001	0.000	0.016*
Geol	0.034	0.017	0.046*
Geom	0.110	0.038	0.004**
Códigos de significancia: ^ = <0.001; *** = 0.001; ** = 0.01; * = 0.05.			

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del ráster de susceptibilidad

Con los coeficientes de los parámetros mediante la RL, se procedió a modelar la susceptibilidad a movimientos en masa para la subcuenca Honda con la herramienta Calculadora ráster (QGIS Development Team, 2021). La ecuación del modelo que resulta es la siguiente:

$$p(y)=1/(1+e^{-(-0.467 + 0.076 \times \text{Pend} - 0.001 \times \text{Elev} + 0.034 \times \text{Geol} + 0.110 \times \text{Geom})})$$

4.4.1.5 Sub cuenca Llaca

La base de datos de la subcuenca Llaca fue dividida en una muestra de 60 datos de entrenamiento (90 % de los datos registrados) para la generación del modelo y 8 datos para su validación (10 % de los datos registrados).

Tratamiento de las variables categóricas

Para la subcuenca Llaca, de los 11 parámetros susceptibles a movimientos en masa (Tabla 4.3), 9 parámetros son cuantitativos ráster y tres parámetros nominales (geología, geomorfología y cobertura vegetal), estos últimos fueron transformados en parámetros numéricos a través del cálculo de la densidad relativa de movimientos de masa (Ecuación 4.7).

La Tabla 4.17 presenta las densidades relativas calculadas para las variables categóricas. Para clases de geología; la clase que representa depósito glaciar, fluvial tienen la mayor densidad de deslizamientos de tierra (74.17 %); para las clases de geomorfología, valle glaciar (60.55 %) y de la cobertura vegetal, bosque relicto altoandino (50.5 %).

Tabla 4.17: Área y densidad relativa por movimientos en masa calculada para los parámetros geología, geomorfología y cobertura vegetal de la subcuenca Llaca.

Variable	Código	Área (Ha)	Densidad relativa (%)
<u>Geología</u>			
Depósito glaciar, fluvial	D-glf	2613.58	74.17
Depósito glaciar	D-gl	1046.61	0.20
Batolito Cordillera Blanca	B-cb	760.71	25.63
Formación Chicama	F-cc	126.22	0.00
Laguna	Lag	7.78	0.00
Depósito aluvial	D-al	7.07	0.00
<u>Geomorfología</u>			
Vertiente glacio-fluvial	V-gf	1703.74	11.17
Vertiente glaciar o de gelifracción	V-gg	930.72	1.08
Montaña en roca intrusiva	M-ri	902.90	19.48
Montaña con cobertura glaciar	M-cg	555.28	0.00
Valle glaciar con laguna	Vg-l	265.12	60.55
Montaña en roca sedimentaria	M-rs	177.11	7.72
Terraza aluvial	T-a	22.32	0.00
Montaña en roca volcánica	M-rv	4.79	0.00
<u>Cobertura vegetal</u>			
Área altoandina con escasa y sin vegetación	Aa-v/sv	1387.51	9.24
Agricultura costera y andina	Ac-a	1280.73	11.50
Pajonal andino	P-a	927.36	28.73
Glaciar	Gla	809.15	0.04
Bosque relicto altoandino	B-ra	141.53	50.50
Plantación Forestal	P-f	10.27	0.00
Lagunas, lagos y cochas	Lag	5.42	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Las capas de geología, geomorfología y cobertura vegetal pertenecientes a la subcuenca Llaca fueron rasterizadas a partir de los valores de densidad relativa por cada clase. Seguido a esto, se procedió a seleccionar las principales variables.

Selección de las principales variables

La selección de variables se realizó mediante la metodología *Backward selection*, esta metodología se basa en la eliminación de variables hacia atrás de un modelo saturado (Fernández Pierna et al., 2009). El modelo óptimo para la subcuenca Llaca es el que finalmente tiene el AIC (*Akaike Information Criterio*) más bajo y sus variables son significantes (Tabla 4.18) con un $\alpha \leq 0.1$, el cual se considera el mejor modelo.

Tabla 4.18: Número de variables (No.), residuales de desviación (RD) y Akaike Information Criterio (AIC) por modelo de susceptibilidad para la subcuenca Llaca.

Modelo	No.	Parámetros del modelo	RD	AIC
Modelo saturado	11	C_Perf + C_Tang + Pend + Elev + P_A + Orient + Rugo + NDVI_H + Geol + Geom + CV	17.542	41.540
	10	C_Perf + C_Tang + Pend + Elev + P_A + Orient + NDVI_H + Geol + Geom + CV	17.549	39.549
	9	C_Perf + Pend + Elev + P_A + Orient + NDVI_H + Geol + Geom + CV	17.643	37.640
Backward-Stepwise	8	C_Perf + Pend + Elev + Orient + NDVI_H + Geol + Geom + CV	17.929	35.929
	7	C_Perf + Pend + Elev + Orient + NDVI_H + Geol + Geom	18.151	34.151
	6	C_Perf* + Pend + Elev* + Orient* + NDVI_H + Geol*	18.439	32.439
Modelo final	2	Pend + NDVI_H	30.90	36.90

“*” = variables no significantes

Fuente: Elaboración propia.

De las variables cuantitativas, se seleccionó las variables más significativas, la pendiente, elevación, geología y geomorfología. A partir de estas variables, se generó el modelo logístico.

Generación del modelo de regresión logística

A partir de la selección de variables para la subcuenca Llaca (Tabla 4.18), la generación del modelo de regresión logística se realizó con el software estadístico R Studio, el cual nos devuelve los coeficientes que se usaron para el cálculo de la ecuación de regresión logística para la subcuenca Llaca, así como los valores de desviación estándar y su significancia.

De la Tabla 4.19, se observa los coeficientes que se introdujeron en la Calculadora ráster del software QGIS para generar el ráster de susceptibilidad. También se realizó las pruebas de significancia del modelo, donde se puede inferir que la pendiente es el parámetro más determinante en la generación del modelo de susceptibilidad a movimientos en masa.

Tabla 4.19: Resumen de los valores de los pesos del modelo de regresión logística para la subcuenca Llaca.

Parámetro	Coef	Des.Est.	Pr(> z)
Constante	-10.254	3.1374	0.002**
Pend	0.358	0.1041	0.001***
NDVI_H	8.947	3.7626	0.017*
Códigos de significancia: ^ = <0.001; *** = 0.001; ** = 0.01; * = 0.05.			

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del ráster de susceptibilidad

Con los coeficientes de los parámetros mediante la RL, se procedió a modelar la susceptibilidad a movimientos en masa para la subcuenca Llaca con la herramienta Calculadora ráster (QGIS Development Team, 2021). La ecuación del modelo que resulta es la siguiente:

$$p(y)=1/(1+e^{-(-10.254 + 0.358 \times \text{Pend} + 8.947 \times \text{NDVI_H})})$$

4.4.1.6 Sub cuenca Cojup

La base de datos de la subcuenca Cojup fue dividida en una muestra de 114 datos de entrenamiento (90 % de los datos registrados) para la generación del modelo y 15 datos para su validación (10 % de los datos registrados).

Tratamiento de las variables categóricas

Para la subcuenca Cojup, de los 11 parámetros susceptibles a movimientos en masa (Tabla 4.3), 9 parámetros son cuantitativos ráster y tres parámetros nominales (geología, geomorfología y cobertura vegetal), estos últimos fueron transformados en parámetros numéricos a través del cálculo de la densidad relativa de movimientos de masa (Ecuación 4.7).

La Tabla 4.20 presenta las densidades relativas calculadas para las variables categóricas. Para clases de geología; la clase que representa depósito aluvial tienen la mayor densidad de deslizamientos de tierra (44.49 %); para las clases de geomorfología, vertiente coluvial de detritos (20.85 %) y de la cobertura vegetal, bosque relicto altoandino (43.56 %).

Tabla 4.20: Área y densidad relativa por movimientos en masa calculada para los parámetros geología, geomorfología y cobertura vegetal de la subcuenca Cojup.

Variable	Código	Área (Ha)	Densidad relativa (%)
<u>Geología</u>			
Depósito glaciar	D-gl	2983.803	3.77
Batolito Cordillera Blanca	B-cb	2356.618	18.26
Depósito glaciar, fluvial	D-glf	1017.659	33.48
Depósito aluvial	D-al	844.4865	44.49
Laguna	Lag	10.46476	0.00
<u>Geomorfología</u>			
Vertiente glacial o de gelifracción	V-gg	1938.30	2.30
Montaña con cobertura glaciar	M-cg	1328.61	1.55
Montaña en roca intrusiva	M-ri	1149.54	6.65
Vertiente glacio-fluvial	V-gf	767.46	5.85
Terraza aluvial	T-a	695.86	9.58
Montaña en roca sedimentaria	M-rs	447.33	8.72
Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial	Vp-cd	247.86	7.21
Montaña estructural en roca intrusiva	Me-ri	236.17	1.35
Vertiente coluvial de detritos	V-cd	129.18	20.85
Valle glaciar con laguna	Vg-l	122.49	19.26
Llanura o planicie inundable	Lp-i	115.31	0.00
Abanico de piedemonte	A-p	34.91	16.69
<u>Cobertura vegetal</u>			
Área altoandina con escasa y sin vegetación	Aa-v/sv	2806.73	14.06
Glaciar	Gla	1672.03	0.64
Pajonal andino	P-a	1504.55	34.38
Agricultura costera y andina	Ac-a	978.06	7.35

Bosque relicto altoandino	B-ra	219.53	43.56
Lagunas, lagos y cochas	Lag	32.13	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Las capas de geología, geomorfología y cobertura vegetal pertenecientes a la subcuenca Cojup fueron rasterizadas a partir de los valores de densidad relativa por cada clase. Seguido a esto, se procedió a seleccionar las principales variables.

Selección de las principales variables

La selección de variables se realizó mediante la metodología *Backward selection*, esta metodología se basa en la eliminación de variables hacia atrás de un modelo saturado (Fernández Pierna et al., 2009). El modelo óptimo para la subcuenca Cojup es el que finalmente tiene el AIC (*Akaike Information Criterio*) más bajo y sus variables son significantes (Tabla 4.21), el cual se considera el mejor modelo.

Tabla 4.21: Número de variables (No.), residuales de desviación (RD) y Akaike Information Criterio (AIC) por modelo de susceptibilidad para la subcuenca Cojup.

Modelo	No.	Parámetros del modelo	RD	AIC
Modelo saturado	11	C_Perf + C_Tang + Pend + Elev + P_A + Orient + Rugo + NDVI_H + Geol + Geom + CV	39.495	63.495
	10	C_Perf + C_Tang + Pend + Elev + P_A + Orient + NDVI_H + Geol + Geom + CV	39.568	61.568
Backward-Stepwise	9	C_Perf + Pend + Elev + P_A + Orient + NDVI_H + Geol + Geom + CV	39.667	59.667
	8	C_Perf + Pend + Elev + P_A + Orient + NDVI_H + Geom + CV	39.828	57.828
	7	C_Perf + Pend + Elev + P_A + Orient + Geom + CV	40.003	56.003
	6	C_Perf + Pend + Elev + P_A + Geom + CV	40.907	54.907
Modelo final	5	Pend + Elev + P_A + Geom + CV	41.746	53.746
*** = variables no significantes				

Fuente: Elaboración propia.

De las variables cuantitativas, se seleccionó las variables más significativas, la pendiente, elevación, geología, geomorfología y precipitación. A partir de estas variables, se generó el modelo logístico.

Generación del modelo de regresión logística

A partir de la selección de variables para la subcuenca Cojup (Tabla 4.21), la generación del modelo de regresión logística se realizó con el software estadístico R Studio, el cual nos devuelve los coeficientes que se usaron para el cálculo de la ecuación de regresión logística para la subcuenca Cojup, así como los valores de desviación estándar y su significancia.

De la Tabla 4.22, se observa los coeficientes que se introdujeron en la Calculadora ráster del software QGIS para generar el ráster de susceptibilidad. También se realizó las pruebas de significancia del modelo, donde se puede inferir que la pendiente es el parámetro más determinante en la generación del modelo de susceptibilidad a movimientos en masa.

Tabla 4.22: Resumen de los valores de los pesos del modelo de regresión logística para la subcuenca Cojup.

Parámetro	Coef	Des.Est.	Pr(> z)
Constante	-8.97	6.545	0.001***
Pend	0.476	0.112	0^
Elev	-0.010	0.004	0.004**
P_A	0.053	0.021	0.011*
Geom	0.178	0.095	0.062
CV	0.140	0.059	0.017*

Códigos de significancia: ^ = <0.001; *** = 0.001; ** = 0.01; * = 0.05.

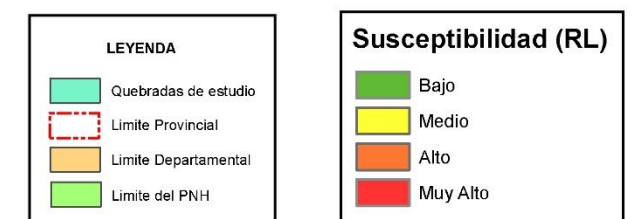
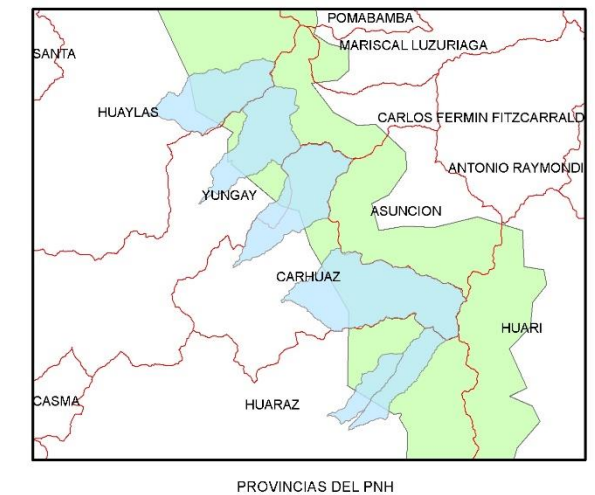
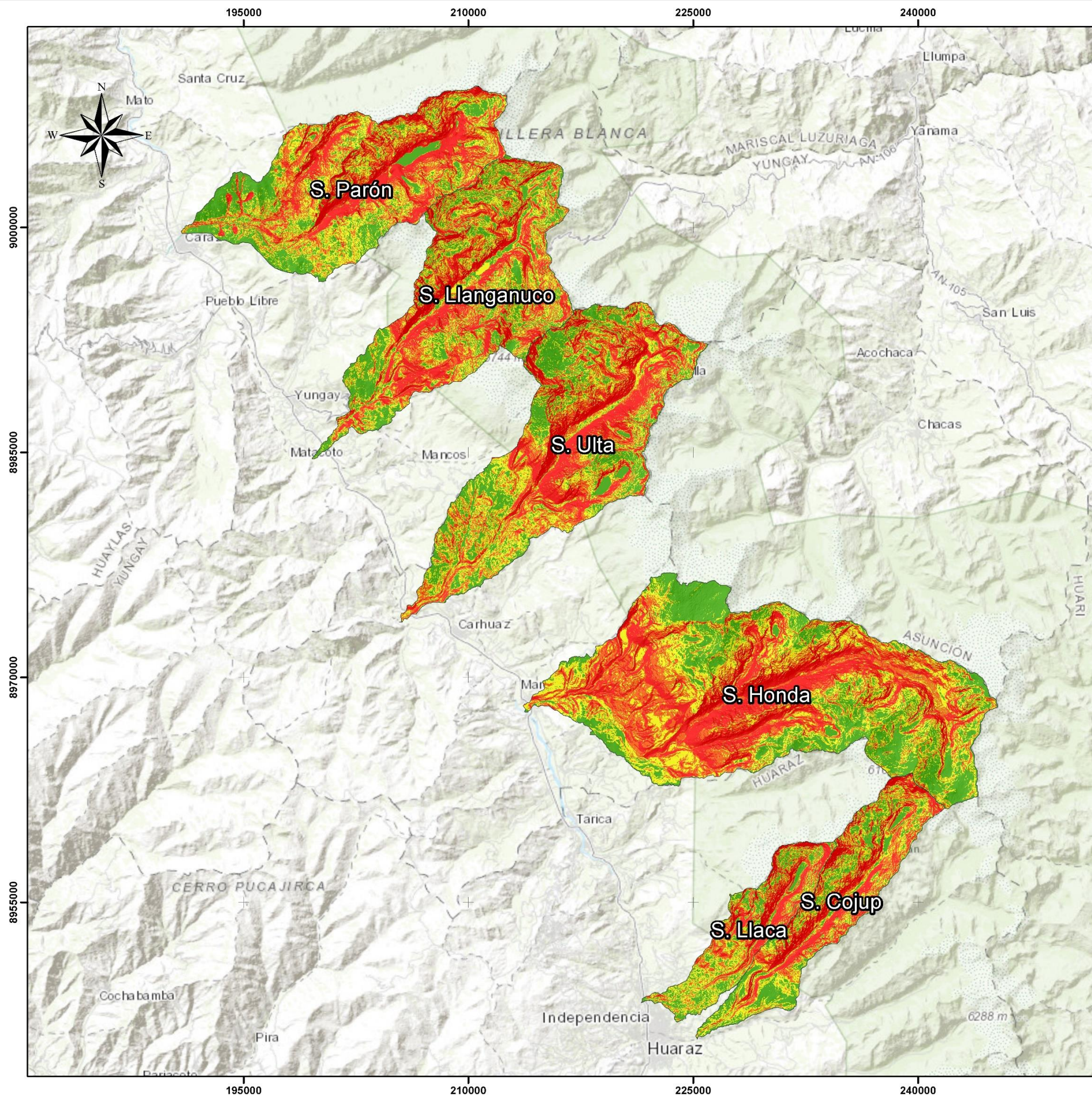
Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del ráster de susceptibilidad

Con los coeficientes de los parámetros mediante la RL, se procedió a modelar la susceptibilidad a movimientos en masa para la subcuenca Cojup con la herramienta Calculadora ráster (QGIS Development Team, 2021). La ecuación del modelo que resulta es la siguiente:

$$p(y)=1/(1+e^{-(-8.97 + 0.476 \times \text{Pend} - 0.010 \times \text{Elev} + 0.053 \times \text{P_A} + 0.178 \times \text{Geom} + 0.1405 \times \text{CV})})$$

A partir de los modelos logísticos calculados para cada subcuenca de estudio, se generó el ráster de susceptibilidad mediante el método de RL, la capa de susceptibilidad se dividió en cuatro clases (CENEPRED, 2015) reclasificada mediante cuantiles (Baeza et al., 2016). El mapa de susceptibilidad a movimientos en masa se adjunta en el Mapa 02.



 UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA E.P. INGENIERÍA GEOGRÁFICA 		
Tesis: "COMPARACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA MEDIANTE REGRESIÓN LOGÍSTICA Y PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO EN SEIS VALLES DE LA CORDILLERA BLANCA, ANCASH"		
Tema: SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA (RL)		
Elaborado: Bach. Javier Mendoza Timoteo	Escala: 1:250,000	Mapa N°: 02
Fuente: Elaboración propia	Fecha: Julio 2021	

4.4.2 Proceso de análisis jerárquico (AHP)

Para la generación del proceso de análisis jerárquico para cada subcuenca de estudio, la susceptibilidad es expresada de la siguiente manera:

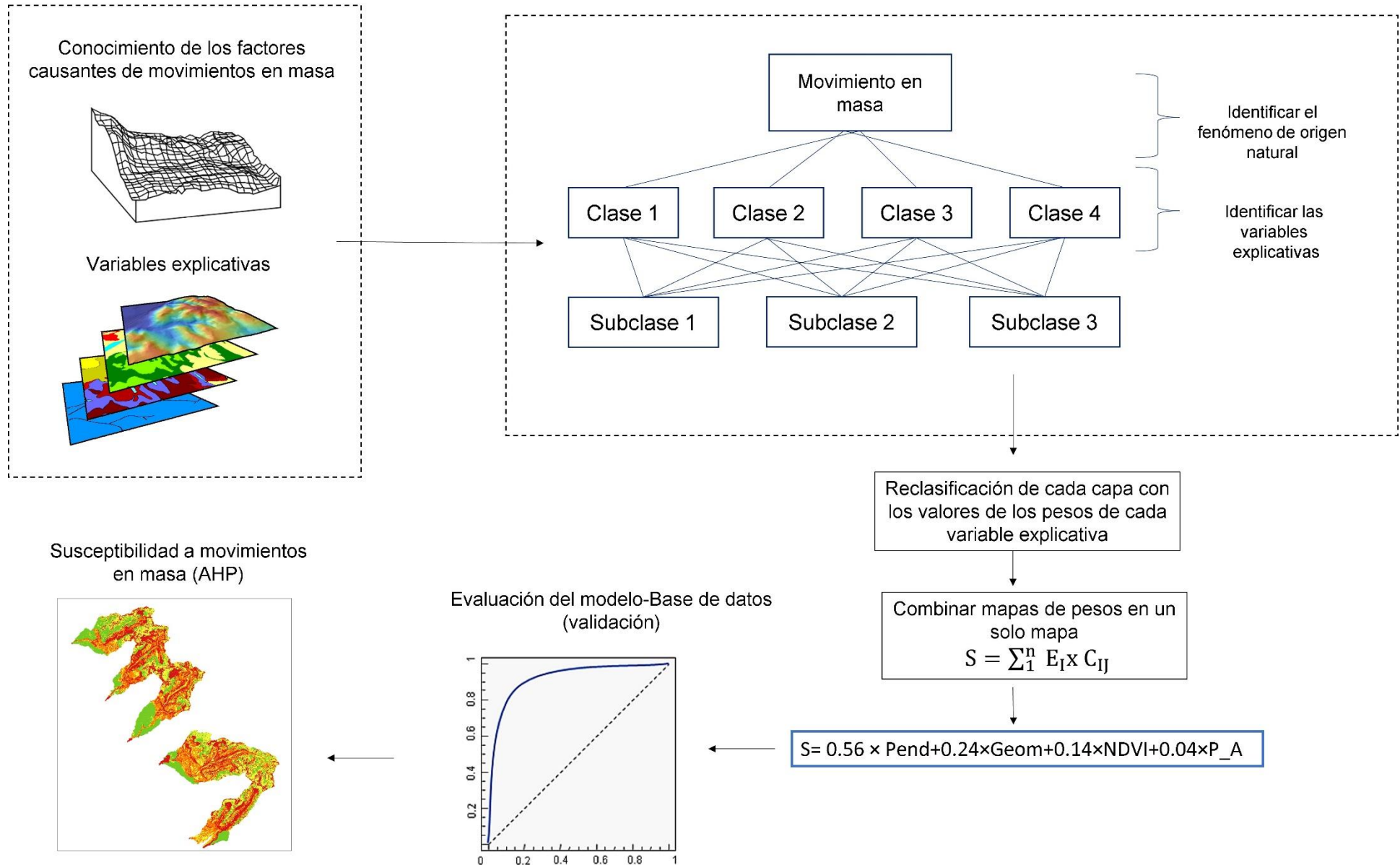
$$S = \sum_{j=1}^n E_i \times C_{ij}$$

Donde S mide la susceptibilidad de los movimientos en masa, E_i es el peso del parámetro i y C_{ij} es el peso de la clase j que forma parte del parámetro i .

Se realizó el AHP mediante la metodología planteada por (Saaty, 2008). Para la elección de los parámetros identificadas para cada subcuenca, de acuerdo a Saaty (2008) estas variables son elegidas según el criterio del evaluador y las visitas en campo durante los meses de octubre y noviembre del 2020. Se construyó las matrices de comparación por pares, pesos de clases y la relación de consistencia (RC) de cada parámetro susceptible a movimientos en masa para cada valle de estudio. Una vez identificado la ecuación de la susceptibilidad, se le usará para generar el mapa de susceptibilidad para cada una de las subcuencas, los cuales serán validados mediante las curvas ROC en cuanto a su precisión y exactitud (Ver capítulo 5.2). En la Figura 4.20 se presenta el diagrama de flujo de la metodología para el cálculo del Proceso de Análisis Jerárquico para cada subcuenca de estudio.

Figura 4.20: Metodología para el cálculo del Proceso de Análisis Jerárquico

Proceso de análisis jerárquico



4.4.2.1 Sub cuenca Parón

Para la subcuenca Parón, se identificó cuatro parámetros relacionados a movimientos en masa: pendiente; NDVI; geomorfología; y precipitación media anual. Mediante las matrices de comparaciones pareadas, se obtuvo los pesos de las clases de pendiente (Tabla 4.23), geomorfología (Tabla 4.25), NDVI (Tabla 4.24), precipitación media anual (Tabla 4.26) y de los parámetros susceptibles a movimientos en masa.

Parámetro: Pendiente

Para la subcuenca Parón, se observa que las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia del peligro son las zonas con pendientes muy alta y alta. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.23 se observa las comparaciones por pares de la pendiente, también se presenta la relación consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menor en función a su importancia.

Tabla 4.23: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Pendiente para la subcuenca Parón.

Pend	>55°	40-55°	25-40°	10-25°	0-10°	RC	Pesos
>55°	1	3	5	6	8		0.490
40-55°		1	3	5	6		0.259
25-40°			1	3	5	0.066	0.140
10-25°				1	3		0.073
0-10°					1		0.038

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: NDVI

En la subcuenca Parón, las zonas con poca escasa vegetación (0.01-0.1), son las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.24, se observa las comparaciones por pares para el parámetro NDVI, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase.

Tabla 4.24: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases del NDVI para la subcuenca Parón.

NDVI	0.01-0.1	0.1-0.2	0.2-0.4	> 0.4	=<0.01	RC	Pesos
0.01-0.1	1	3	3	5	6		0.458
0.1-0.2		1	2	2	5		0.218
0.2-0.4			1	2	5	0.047	0.169
> 0.4				1	4		0.111
=<0.01					1		0.044

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Geomorfología

En la subcuenca Parón, según INGEMMET se identifican 10 unidades geomorfológicas. Las unidades geomorfológicas más susceptibles a movimientos en masa las morrenas y valle glaciar. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.25, se observa las comparaciones por pares, la consistencia y los pesos para el parámetro geomorfología que corresponden a cada clase.

Tabla 4.25: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geomorfología para la subcuenca Parón.

Geom	Mo	Vg	A-p	V-cd	V-gf	M-ri	V-gg	M-rs	M-cgl	Me-ri	RC	Pesos
Mo	1	2	2	2	3	3	4	4	6	6		0.231
Vg		1	2	2	2	3	3	4	4	6		0.181
A-p			1	2	2	2	3	3	4	4		0.142
V-cd				1	2	2	2	3	3	4		0.116
V-gf					1	2	2	2	3	3		0.090
M-ri						1	2	2	2	3	0.021	0.073
V-gg							1	2	2	2		0.057
M-rs								1	2	2		0.046
M-cgl									1	2		0.036
Me-ri										1		0.028

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Precipitación anual

En la subcuenca Parón, los eventos de movimientos en masa se producen en su mayoría en la temporada de lluvias, se tomó como indicador la precipitación anual (P_A). A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.26, se observa las comparaciones por pares para el parámetro precipitación media anual, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase.

Tabla 4.26: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Precipitación anual para la subcuenca Parón.

P_A	>=969	812-969	655-812	498-655	<=498	RC	Pesos
>=969	1	3	4	7	9		0.489
812-969		1	3	5	7		0.267
655-812			1	3	5	0.050	0.142
498-655				1	3		0.068
<=498					1		0.035

Fuente: Elaboración propia.

Parámetros susceptibles a movimientos en masa

Se desarrolló las comparaciones pareadas entre los parámetros susceptibles a movimientos en masa. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), la experiencia y referencia de investigaciones en las zonas de estudio, en la Tabla 4.27 se presenta las comparaciones entre pares de los parámetros susceptibles, la consistencia y pesos que corresponden a cada parámetro ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.27: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de los parámetros susceptibles para la subcuenca Parón

Parámetros	Pend	Geom	NDVI	P_A	RC	Pesos
Pend	1	3	5	9		0.568
Geom		1	2	7	0.047	0.245
NDVI			1	5		0.145
P_A				1		0.042

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del ráster de susceptibilidad a movimientos en masa

De acuerdo con los pesos de cada parámetro se efectúa el cálculo de la susceptibilidad para la subcuenca Parón. La ecuación se presenta a continuación

$$S = 0.568 \times \text{Pend} + 0.245 \times \text{Geom} + 0.145 \times \text{NDVI} + 0.042 \times \text{P_A}$$

4.4.2.2 Sub cuenca Llanganuco

Parámetro: Pendiente

Para la subcuenca Llanganuco, las zonas con mayor probabilidad a la ocurrencia de fenómenos de movimientos en masa son las zonas con pendientes muy alta y alta. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.28 se observa las comparaciones por pares de la pendiente, también se presenta la razón de consistencia (RC) y pesos relativos que corresponden a cada.

Tabla 4.28: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Pendiente para la subcuenca Llanganuco.

Pend	>55°	40-55°	25-40°	10-25°	0-10°	RC	Pesos
>55°	1	3	5	6	8		0.490
40-55°		1	3	5	6		0.259
25-40°			1	3	5	0.066	0.140
10-25°				1	3		0.073
0-10°					1		0.038

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Geología

Para la subcuenca Llanganuco, según INGEMMET se identifican 7 unidades geológicas. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), de la Tabla 4.29, se observa las comparaciones por pares, donde se observa que las unidades geológicas más susceptibles a movimientos en masa son los depósitos glaciar-fluvial, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.29: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geología para la subcuenca Llanganuco.

Geol	D-glf	F-cm	B-cb	D-gl	F-cc	F-yu	D-al	RC	Pesos
D-glf	1	2	6	6	7	9	9		0.397
F-cm		1	4	6	7	7	9		0.293
B-cb			1	2	3	4	5		0.112
D-gl				1	2	3	6	0.047	0.086
F-cc					1	2	3		0.053
F-yu						1	2		0.035
D-al							1		0.024

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Geomorfología

Según INGEMMET en la subcuenca Llanganuco se identifican 12 clases de geomorfología. Las unidades geomorfológicas más susceptibles a movimientos en masa las morrenas y abanico de piedemonte. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.30, se observa las comparaciones por pares, la consistencia y los pesos para el parámetro geomorfología que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menor en función a su importancia.

Tabla 4.30: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geomorfología para la subcuenca Llanganuco.

Geom	Mo	A-p	Vg-l	V-cd	Vp-cd	V-gf	M-rs	M-ri	V-gg	M-cg	Me-ri	Lp-i	RC	Pesos
Mo	1	2	3	3	4	4	5	5	7	7	7	9		0.233
A-p		1	2	3	3	4	4	5	5	7	7	7		0.180
Vg-l			1	2	3	3	4	4	5	5	7	7		0.140
V-cd				1	2	3	3	4	4	5	5	7		0.110
Vp-cd					1	2	3	3	4	4	5	5		0.085
V-gf						1	2	3	3	4	4	5	0.051	0.068
M-rs							1	2	3	3	4	4		0.053
M-ri								1	2	3	3	4		0.042
V-gg									1	2	3	3		0.032
M-cg										1	2	3		0.025
Me-ri											1	2		0.019
Lp-i												1		0.015

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: NDVI

En la subcuenca Llanganuco, las zonas con poca escasa vegetación (0.01-0.1), son las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.31 se observa las comparaciones por pares para el parámetro NDVI, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase.

Tabla 4.31: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases del NDVI para la subcuenca Llanganuco.

NDVI	0.01-0.1	0.1-0.2	0.2-0.4	> 0.4	=<0.01	RC	Pesos
0.01-0.1	1	3	3	5	6	0.047	0.458
0.1-0.2		1	2	2	5		0.218
0.2-0.4			1	2	5		0.169
> 0.4				1	4		0.111
=<0.01					1		0.044

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Precipitación anual

Para la subcuenca Llanganuco, los eventos de movimientos en masa se producen en su mayoría en la temporada de lluvias, se tomó como indicador la precipitación anual (P_A). A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.32 se observa las comparaciones por pares para el parámetro precipitación media anual, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.32: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de Precipitación anual para la subcuenca Llanganuco.

P_A	>=1005.6	852.6-1005.6	699.4-852.6	546.2-699.4	<=546.2	RC	Pesos
>=1005.6	1	3	4	7	9	0.050	0.489
852.6-1005.6		1	3	5	7		0.267
699.4-852.6			1	3	5		0.142
546.2-699.4				1	3		0.068
<=546.2					1		0.035

Fuente: Elaboración propia.

Parámetros susceptibles a movimientos en masa

Se desarrolló las comparaciones pareadas entre los parámetros susceptibles a movimientos en masa. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), la experiencia y referencia de investigaciones en las zonas de estudio, en la Tabla 4.33 se presenta las comparaciones entre pares de los parámetros susceptibles, la consistencia y pesos que corresponden a cada parámetro ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.33: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos los parámetros susceptibles para la subcuenca Llanganuco.

Parámetros	Pend	Geom	Geol	NDVI	P_A	RC	Pesos
Pend	1	3	5	5	9		0.511
Geom		1	3	3	5		0.241
Geol			1	1	3	0.020	0.103
NDVI				1	3		0.103
P_A					1		0.043

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa

De acuerdo con los pesos de cada parámetro se efectúa el cálculo de la susceptibilidad para la subcuenca Llanganuco. La ecuación se presenta a continuación:

$$S = 0.511 \times \text{Pend} + 0.241 \times \text{Geom} + 0.103 \times \text{Geol} + 0.103 \times \text{NDVI} + 0.043 \times \text{P_A}$$

4.4.2.3 Sub cuenca Ulta

Parámetro: Pendiente

Para la subcuenca Ulta, las zonas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de fenómenos de movimientos en masa son las zonas con pendientes muy alta y alta. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la (Tabla 4.34) se observa las comparaciones por pares de la pendiente, también se presenta la razón consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menor en función a su importancia.

Tabla 4.34: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Pendiente para la subcuenca Ulta.

Pend	>55°	40-55°	25-40°	10-25°	0-10°	RC	Pesos
>55°	1	2	5	7	9		0.487
40-55°		1	2	5	7		0.272
25-40°			1	2	5	0.019	0.137
10-25°				1	2		0.066
0-10°					1		0.038

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Geología

Para la subcuenca Ulta, según INGEMMET se identifican 9 unidades geológicas. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), de la Tabla 4.35, se observa las comparaciones por pares, donde se observa que las unidades geológicas más susceptibles a movimientos en masa son los depósitos aluviales y depósitos glaciar - fluvial, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.35: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geología para la subcuenca Ulta.

Geol	D-al	D-glf	F-cc	B-cb	F-cm	F-yu	F-ch	D-gl	F-sa	RC	Pesos
D-al	1	3	4	4	6	6	7	9	9		0.319
D-glf		1	3	4	4	6	6	7	9		0.216
F-cc			1	3	4	4	6	6	7		0.150
B-cb				1	3	4	4	6	6		0.108
F-cm					1	3	4	4	6	0.094	0.076
F-yu						1	3	4	4		0.053
F-ch							1	3	4		0.038
D-gl								1	3		0.025
F-sa									1		0.016

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Geomorfología

Según INGEMMET se identifican 10 unidades geomorfológicas que pertenecen a la subcuenca Ulta. Las unidades más susceptibles a movimientos en masa son las morrenas y abanico de piedemonte. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.36, se observa las comparaciones por pares, la consistencia y los pesos para el parámetro geomorfología que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menor en función a su importancia.

Tabla 4.36: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geomorfología para la subcuenca Ulta.

Geom	Vp-cd	Mo	A-p	Vg-l	V-gf	M-ri	M-rs	V-gg	M-cg	Lp-i	RC	Pesos
Vp-cd	1	2	3	3	4	4	5	5	7	7		0.259
Mo		1	2	3	3	4	4	5	5	7		0.195
A-p			1	2	3	3	4	4	5	5		0.145
Vg-l				1	2	3	3	4	4	5		0.113
V-gf					1	2	3	3	4	4		0.085
M-ri						1	2	3	3	4	0.046	0.066
M-rs							1	2	3	3		0.049
V-gg								1	2	3		0.038
M-cg									1	2		0.027
Lp-i										1		0.021

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: NDVI

En la subcuenca Ulta, las zonas con poca escasa vegetación (0.01-0.1), son las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.37 se observa las comparaciones por pares para el parámetro NDVI, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase.

Tabla 4.37: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de NDVI para la subcuenca Ulta.

NDVI	0.01-0.1	0.1-0.2	0.2-0.4	> 0.4	=<0.01	RC	Pesos
0.01-0.1	1	3	3	5	6	0.047	0.458
0.1-0.2		1	2	2	5		0.218
0.2-0.4			1	2	5		0.169
> 0.4				1	4		0.111
=<0.01					1		0.044

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Precipitación anual

Para la subcuenca Ulta, los eventos de movimientos en masa se producen en su mayoría en la temporada de lluvias, se tomó como indicador la precipitación anual (P_A). A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.38 se observa las comparaciones por pares para el parámetro precipitación media anual, ordenados de mayor a menor en función a su importancia se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase.

Tabla 4.38: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Precipitación anual para la subcuenca Ulta.

P_A	>=1040	893-1040	746-893	599-746	<=599	RC	Pesos
>=1040	1	3	4	7	9	0.050	0.489
893-1040		1	3	5	7		0.267
746-893			1	3	5		0.142
599-746				1	3		0.068
<=599					1		0.035

Fuente: Elaboración propia.

Parámetros susceptibles a movimientos en masa

Se desarrolló las comparaciones pareadas entre los parámetros susceptibles a movimientos en masa. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), la experiencia y referencia de investigaciones en las zonas de estudio, en la Tabla 4.39 se presenta las comparaciones entre pares de los parámetros susceptibles, la consistencia y pesos que corresponden a cada parámetro fueron ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.39: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de los parámetros susceptibles para la subcuenca Ulta.

Parámetros	Pend	Geom	Geol	NDVI	P_A	RC	Pesos
Pend	1	4	5	7	9		0.535
Geom		1	2	5	7		0.232
Geol			1	2	5	0.040	0.131
NDVI				1	2		0.065
P_A					1		0.037

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa

De acuerdo con los pesos de cada parámetro se efectúa el cálculo de la susceptibilidad para la subcuenca Ulta. La ecuación se presenta a continuación:

$$S = 0.535 \times \text{Pend} + 0.232 \times \text{Geom} + 0.131 \times \text{Geol} + 0.065 \times \text{NDVI} + 0.037 \times \text{P_A}$$

4.4.2.4 Sub cuenca Honda

Parámetro: Pendiente

Para la subcuenca Honda, las zonas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de fenómenos de movimientos en masa son las zonas con pendientes muy alta y alta. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.40 se observa las comparaciones por pares de la pendiente, también se presenta la razón consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menor en función a su importancia.

Tabla 4.40: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Pendiente para la subcuenca Honda.

Pend	>55°	40-55°	25-40°	10-25°	0-10°	RC	Pesos
>55°	1	2	3	5	7		0.437
40-55°		1	3	3	5		0.282
25-40°			1	2	3	0.016	0.142
10-25°				1	2		0.088
0-10°					1		0.052

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: NDVI

En la subcuenca Honda, las zonas con poca escasa vegetación (0.01-0.1), son las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.41 se observa las comparaciones por pares para el parámetro NDVI, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.41: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases del NDVI para la subcuenca Honda.

NDVI	0.01-0.1	0.1-0.2	0.2-0.4	> 0.4	=<0.01	RC	Pesos
0.01-0.1	1	3	3	5	6		0.458
0.1-0.2		1	2	2	5		0.218
0.2-0.4			1	2	5	0.047	0.169
> 0.4				1	4		0.111
=<0.01					1		0.044

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Geología

Para la subcuenca Honda, según INGEMMET se identifican 10 unidades geológicas. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), de la Tabla 4.42, se observa las comparaciones por pares, donde se observa que las unidades geológicas más susceptibles a movimientos en masa son los depósitos glacial - fluvial, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.42: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geología para la subcuenca Honda.

Geol	D-glf	B-cb	F-yu	F-cc	D-al	F-ch	D-gl	F-cm	F-sa	F-pcp	RC	Pesos
D-glf	1	2	3	3	4	6	7	8	8	9		0.277
B-cb		1	2	3	3	4	6	7	8	8		0.204
F-yu			1	2	3	3	4	6	7	8		0.150
F-cc				1	2	3	3	4	6	7		0.110
D-al					1	4	4	4	4	6	0.042	0.095
F-ch						1	2	3	3	4		0.054
D-gl							1	2	3	3		0.040
F-cm								1	2	3		0.030
F-sa									1	2		0.022
F-pcp										1		0.017

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Geomorfología

En la subcuenca Honda, según INGEMMET se identifican 13 clases geomorfológicas. La unidad geomorfológica más susceptibles a movimientos en masa son las morrenas. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.43, se presenta la matriz de comparaciones pareadas, la consistencia y los pesos para el parámetro geomorfología que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menor en función a su importancia.

Tabla 4.43: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geomorfología para la subcuenca Honda.

Geom	Mo	Vp-cd	A-p	M-rv	Me-rs	Vg-l	V-gf	M-ri	V-gg	M-rs	M-cg	Lp-i	T-a	RC	Pesos
Mo	1	2	2	2	2	2	4	4	6	6	7	9	9		0.200
Vp-cd		1	2	2	2	2	2	4	4	6	6	7	9		0.161
A-p			1	2	2	2	2	2	4	4	6	6	7		0.129
M-rv				1	2	2	2	2	2	4	4	6	6		0.106
Me-rs					1	2	2	2	2	2	4	4	6		0.088
Vg-l						1	2	2	2	2	2	4	4		0.073
V-gf							1	2	2	2	2	2	4	0.022	0.059
M-ri								1	2	2	2	2	2		0.047
V-gg									1	2	2	2	2		0.039
M-rs										1	2	2	2		0.032
M-cg											1	2	2		0.027
Lp-i												1	2		0.021
T-a													1		0.017

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Precipitación anual

Para la subcuenca Honda, los eventos de movimientos en masa se producen en su mayoría en la temporada de lluvias, se tomó como indicador la precipitación anual (P_A). A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.44 se observa las comparaciones por pares para el parámetro precipitación media anual, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.44: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Precipitación anual para la subcuenca Honda.

P_A	>=1002	886-1002	770-886	654-770	<=654	RC	Pesos
>=1002	1	3	4	7	9		0.489
886-1002		1	3	5	7		0.267
770-886			1	3	5	0.050	0.142
654-770				1	3		0.068
<=654					1		0.035

Fuente: Elaboración propia.

Parámetros susceptibles a movimientos en masa

Se desarrolló las comparaciones pareadas entre los parámetros susceptibles a movimientos en masa. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), la experiencia y referencia de investigaciones en las zonas de estudio, en la Tabla 4.45 se presenta las comparaciones entre pares de los parámetros susceptibles, la consistencia y pesos que corresponden a cada parámetro ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.45: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos los parámetros susceptibles para la subcuenca Honda.

Parámetros	Pend	Geom	Geol	NDVI	P_A	RC	Pesos
Pend	1	2	3	7	9		0.462
Geom		1	2	3	7		0.261
Geol			1	3	3	0.026	0.155
NDVI				1	3		0.080
P_A					1		0.041

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa

De acuerdo con los pesos de cada parámetro se efectúa el cálculo de la susceptibilidad para la subcuenca Honda La ecuación se presenta a continuación:

$$S = 0.462 \times \text{Pend} + 0.261 \times \text{Geom} + 0.155 \times \text{Geol} + 0.080 \times \text{NDVI} + 0.041 \times \text{P_A}$$

4.4.2.5 Sub cuenca Llaca

Parámetro: Pendiente

Para la subcuenca Llaca, se observa que las zonas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de fenómenos de movimientos en masa son las zonas con pendientes muy alta y alta. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.40 se observa las comparaciones por pares de la pendiente, también se presenta la razón consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menor en función a su importancia.

Tabla 4.46: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Pendiente para la subcuenca Llaca.

Pend	>55°	40-55°	25-40°	10-25°	0-10°	RC	Pesos
>55°	1	2	3	7	9		0.470
40-55°		1	2	3	7		0.265
25-40°			1	2	3	0.007	0.143
10-25°				1	2		0.078
0-10°					1		0.044

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Geología

Para la subcuenca Llaca, según INGEMMET se identifican 5 unidades geológicas. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), de la Tabla 4.47, se presenta la matriz de comparaciones pareadas, donde se observa que las unidad geológica más susceptibles a movimientos en masa son los depósitos glaciar - fluvial, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase.

Tabla 4.47: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geología para la subcuenca Llaca.

Geol	D-glf	B-cb	D-gl	D-al	F-cc	RC	Pesos
D-glf	1	2	2	3	5		0.385
B-cb		1	2	2	3		0.246
D-gl			1	2	2	0.017	0.174
D-al				1	2		0.120
F-cc					1		0.075

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: NDVI

En la subcuenca Llaca, las zonas con poca escasa vegetación (0.01-0.1), son las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.48 se observa las comparaciones por pares para el parámetro NDVI, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.48: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases del NDVI para la subcuenca Llaca.

NDVI	0.01-0.1	0.1-0.2	0.2-0.4	> 0.4	=<0.01	RC	Pesos
0.01-0.1	1	3	3	5	6	0.047	0.458
0.1-0.2		1	2	2	5		0.218
0.2-0.4			1	2	5		0.169
> 0.4				1	4		0.111
=<0.01					1		0.044

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Precipitación anual

Para la subcuenca Llaca, los eventos de movimientos en masa se producen en su mayoría en la temporada de lluvias, se tomó como indicador la precipitación anual (P_A). A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.49 se observa las comparaciones por pares para el parámetro precipitación media anual, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.49: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Precipitación anual para la subcuenca Llaca.

P_A	>=954.8	882.6-954.8	770.4-882.6	678.2-770.4	<=678.2	RC	Pesos
>=954.8	1	3	4	7	9	0.050	0.489
882.6-954.8		1	3	5	7		0.267
770.4-882.6			1	3	5		0.142
678.2-770.4				1	3		0.068
<=678.2					1		0.035

Fuente: Elaboración propia.

Parámetros susceptibles a movimientos en masa

Se desarrolló las comparaciones pareadas entre los parámetros susceptibles a movimientos en masa. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), la experiencia y referencia de investigaciones en las zonas de estudio, en la Tabla 4.50 se presenta las comparaciones entre pares de los parámetros susceptibles, la consistencia y pesos que corresponden a cada parámetro ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.50: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de los parámetros susceptibles para la subcuenca Llaca.

Parámetros	Pend	NDVI	Geol	P_A	RC	Pesos
Pend	1	5	7	9	0.088	0.643
NDVI		1	2	5		0.183
Geol			1	5		0.130
P_A				1		0.044

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa

De acuerdo con los pesos de cada parámetro se efectúa el cálculo de la susceptibilidad para la subcuenca Llaca. La ecuación se presenta a continuación:

$$S = 0.643 \times \text{Pend} + 0.183 \times \text{NDVI} + 0.130 \times \text{Geol} + 0.044 \times \text{P_A}$$

4.4.2.6 Sub cuenca Cojup

Parámetro: Pendiente

Para la subcuenca Cojup, se observa que las zonas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de fenómenos de movimientos en masa son las zonas con pendientes muy alta y alta. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.51 se observa las comparaciones por pares de la pendiente, también se presenta la razón consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menor en función a su importancia.

Tabla 4.51: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Pendiente para la subcuenca Cojup.

Pend	>55°	40-55°	25-40°	10-25°	0-10°	RC	Pesos
>55°	1	2	3	5	7		0.437
40-55°		1	3	3	5		0.282
25-40°			1	2	3	0.016	0.142
10-25°				1	2		0.088
0-10°					1		0.052

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Geología

Según INGEMMET se identifican 4 unidades geológicas que pertenecen a la subcuenca Cojup. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), de la Tabla 4.52, se presenta la matriz de comparaciones pareadas, donde se observa que las unidades geológicas más susceptibles a movimientos en masa son los depósitos aluviales, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase.

Tabla 4.52: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geología para la subcuenca Cojup.

Geol	D-al	D-glf	B-cb	D-gl	RC	Pesos
D-al	1	2	3	4		0.466
D-glf		1	2	3	0.012	0.277
B-cb			1	2		0.161
D-gl				1		0.096

Fuente: Elaboración propia.

Parámetro: Geomorfología

Según INGEMMET se identifican 12 unidades geomorfológicas pertenecientes a la subcuenca Cojup. La unidad geomorfológica más susceptibles a movimientos en masa son la vertiente coluvial de detritos. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.43, se observa las comparaciones por pares , la consistencia y los pesos para el parámetro geomorfología que corresponden a cada clase.

Tabla 4.53: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Geomorfología para la subcuenca Cojup.

Geom	V-cd	Vg-l	A-p	T-a	M-rs	Vp-cd	M-ri	V-gf	V-gg	M-cg	Me-ri	Lp-i	RC	Pesos
V-cd	1	2	2	2	2	2	4	4	6	6	7	9		0.207
Vg-l		1	2	2	2	2	2	4	4	6	6	7		0.163
A-p			1	2	2	2	2	2	4	4	6	6		0.132
T-a				1	2	2	2	2	2	4	4	6		0.108
M-rs					1	2	2	2	2	2	4	4		0.088
Vp-cd						1	2	2	2	2	2	4	0.023	0.075
M-ri							1	2	2	2	2	2		0.059
V-gf								1	2	2	2	2		0.049
V-gg									1	2	2	2		0.040
M-cg										1	2	2		0.033
Me-ri											1	2		0.026
Lp-i												1		0.020

Fuente: Elaboración propia

Parámetro: Precipitación anual

Para la subcuenca Cojup, los eventos de movimientos en masa se producen en su mayoría en la temporada de lluvias, se tomó como indicador la precipitación anual (P_A). A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), en la Tabla 4.54 se observa las comparaciones por pares para el parámetro precipitación media anual, también se presenta la consistencia y pesos relativos que corresponden a cada clase ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.54: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de las clases de la Precipitación anual para la subcuenca Cojup.

P_A	>=999.2	900.4-999.2	801.6-900.4	702.8-801.6	<=702.8	RC	Pesos
>=999.2	1	3	4	7	9		0.489
900.4-999.2		1	3	5	7		0.267
801.6-900.4			1	3	5	0.050	0.142
702.8-801.6				1	3		0.068
<=702.8					1		0.035

Fuente: Elaboración propia.

Parámetros susceptibles a movimientos en masa

Se desarrolló las comparaciones pareadas entre los parámetros susceptibles a movimientos en masa. A partir de la metodología descrita por Saaty (2008), la experiencia y referencia de investigaciones en las zonas de estudio, en la Tabla 4.55 se presenta las comparaciones entre pares de los parámetros susceptibles, la consistencia y pesos que corresponden a cada parámetro ordenados de mayor a menos en función a su importancia.

Tabla 4.55: Tabla de comparación por pares, razón de consistencia y pesos de los parámetros susceptibles para la subcuenca Cojup.

Parámetros	Pend	Geom	Geol	P_A	RC	Pesos
Pend	1	3	7	9		0.596
Geom		1	3	7	0.024	0.266
Geol			1	2		0.089
P_A				1		0.050

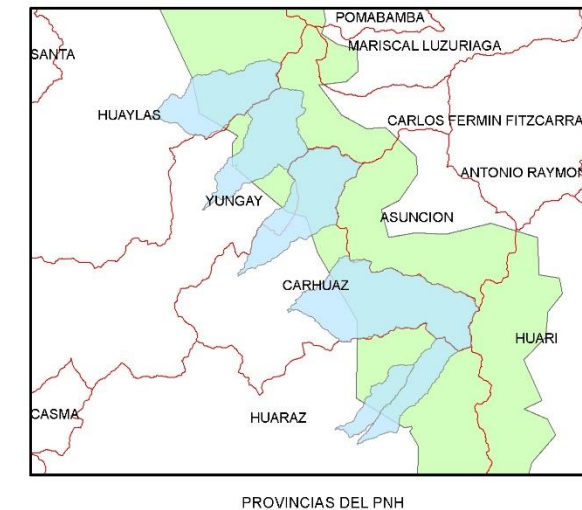
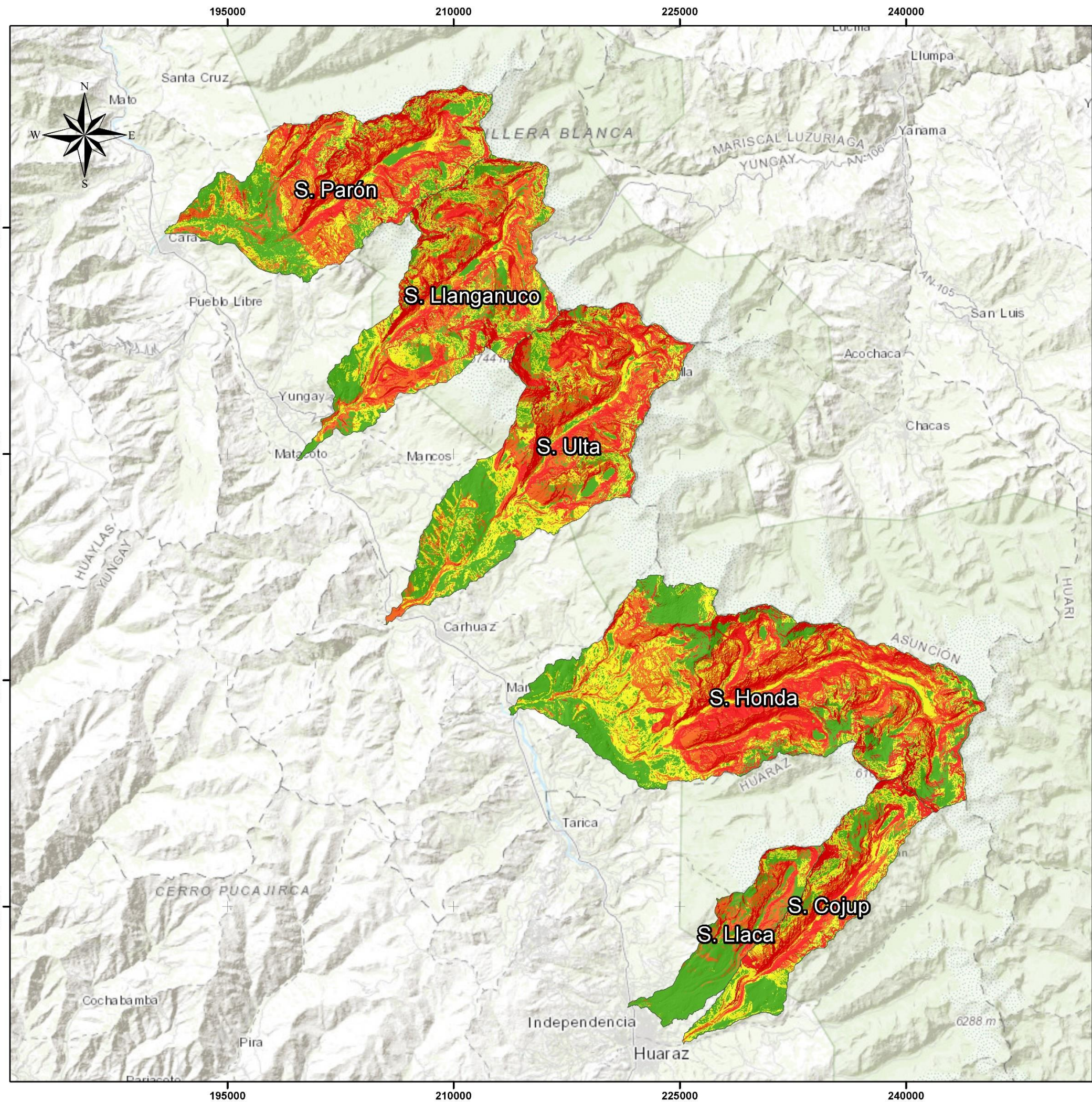
Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa

De acuerdo con los pesos de cada parámetro se efectúa el cálculo de la susceptibilidad para la subcuenca Cojup. La ecuación se presenta a continuación:

$$S = 0.596 \times \text{Pend} + 0.266 \times \text{Geom} + 0.089 \times \text{Geol} + 0.05 \times \text{P_A}$$

A partir del método de análisis jerárquico calculado para cada subcuenca de estudio, se generó el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, la capa de susceptibilidad se dividió en cuatro clases (CENEPRED, 2015) reclasificada mediante cuantiles (Baeza et al., 2016). El mapa de susceptibilidad a movimientos en masa se adjunta en el Mapa 03.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS		
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA		
E.P. INGENIERÍA GEOGRÁFICA		
Tesis: "COMPARACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA MEDIANTE REGRESIÓN LOGÍSTICA Y PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO EN SEIS VALLES DE LA CORDILLERA BLANCA, ANCASH"		
Tema: SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA (AHP)		
Elaborado: Bach. Javier Mendoza Timoteo	Escala: 1:250,000	Mapa N°: 03
Fuente: Elaboración propia	Fecha: Julio 2021	

5 Discusión de los resultados

Se presentan los resultados producto de la aplicación de las metodologías de RL y AHP a partir de cada objetivo propuesto, también se presenta los procedimientos estadísticos aplicados y la forma como se prueban las hipótesis planteadas en la investigación. Los resultados se presentan mediante gráficos estadísticos, mapas entre otros; con su explicación, discusión y comparación con investigaciones pasadas.

5.1 Comparación de los modelos de susceptibilidad a movimientos en masa

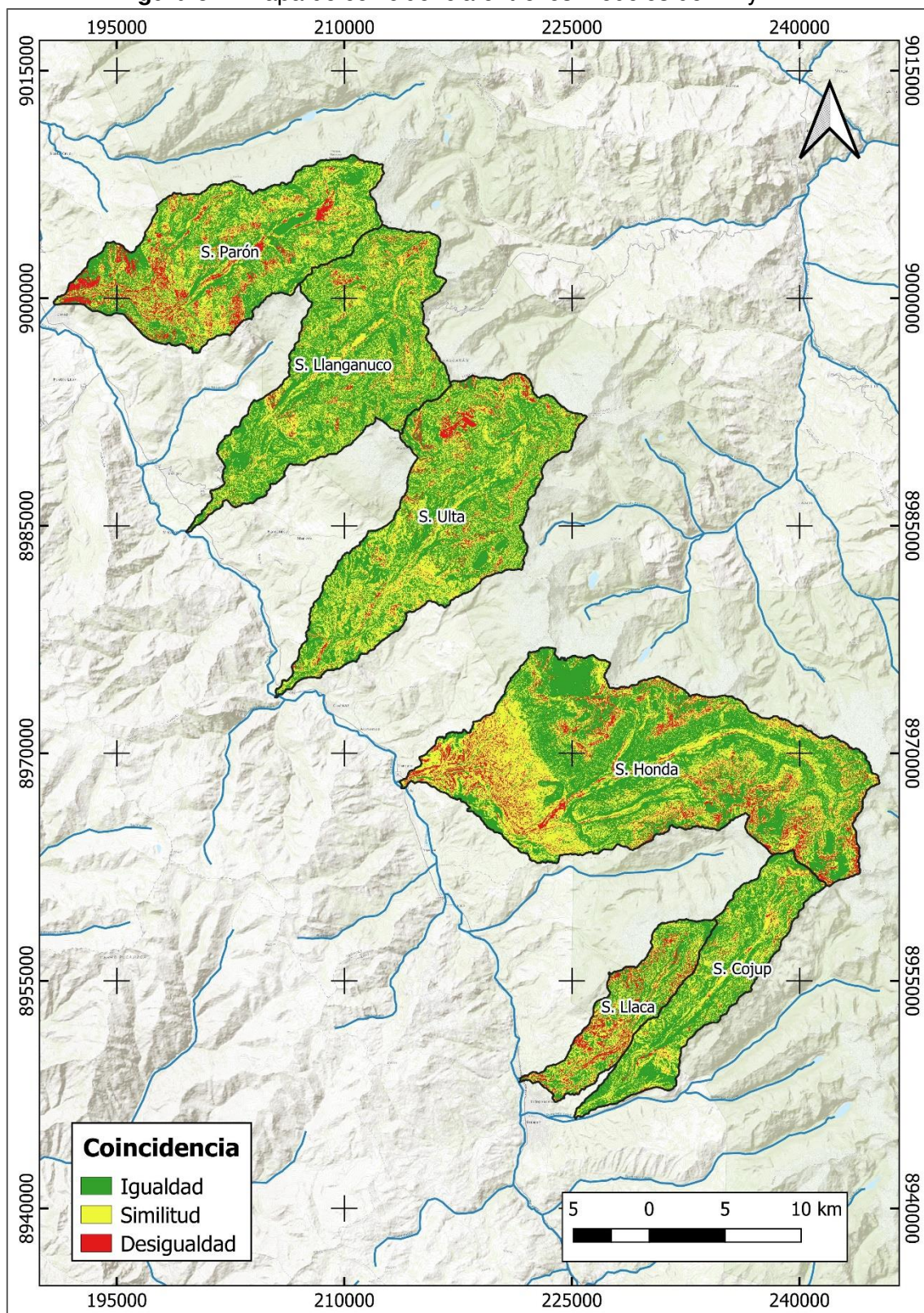
Hipótesis general: La comparación de los métodos de susceptibilidad a movimientos en masa nos arroja una gran similitud y correlación entre los métodos de Regresión Logística y Proceso de Análisis Jerárquico en valles glaciares de la Cordillera Blanca-Ancash.

Para la comparación de los modelos, a partir de los mapas de susceptibilidad reclasificados mediante cuantiles (Mapa 02 y Mapa 03); se realizó el cruce entre los mapas de susceptibilidad reclasificados para calcular la coincidencia entre los mapas de RL y AHP (Felicísimo et al., 2012). De las capas reclasificadas, para las seis subcuencas de estudio se obtuvo una igualdad de 46.5%, 57.6%, 51.7%, 46.9%, 42.5%, 59.3% para las subcuencas Parón, Llanganuco, Ulta, Honda, Llaca y Cojup respectivamente. Una similitud (± 1 nivel de susceptibilidad) de 39.6%, 38.3%, 41.8%, 41.4%, 40%, 37.4% para las subcuencas Parón, Llanganuco, Ulta, Honda, Llaca y Cojup respectivamente y una menor desigualdad (≥ 2 nivel de susceptibilidad) de 13.8%, 4.2%, 6.5%, 11.7%, 17.5%, 3.3% para las subcuencas Parón, Llanganuco, Ulta, Honda, Llaca y Cojup respectivamente; siendo la clase de susceptibilidad muy alta (875 486 píxeles iguales) seguida de la clase baja (868 578 píxeles iguales) las clases que presentaron mayor coincidencia (Figura 7). En la Figura 5.1 se muestra el mapa de coincidencia entre los ráster reclasificados.

A partir de los datos, las zonas de igualdad y similitud muestran las mayores extensiones para cada subcuenca, a pesar del uso de diferentes variables en algunas subcuencas de estudio, demostrando una gran similitud entre los dos modelos planteados en esta investigación. Se prevé que para otras comparaciones entre diferentes métodos utilizando las mismas variables para cada subcuenca, las desigualdades serán menores y por correlación las igualdades y similitudes.

Las diferencias existentes entre los mapas de susceptibilidad se deben a las diferentes variables seleccionadas para el cálculo de la susceptibilidad a movimientos en masa (SMM) en cada subcuenca, el método de regresión logística permite el uso de variables continuas y categóricas para el cálculo de la susceptibilidad, mientras que el proceso de análisis jerárquico solamente hace uso de variables categóricas. Para la RL se utilizó el método de selección de variables *Backward Selection* para el cálculo de la susceptibilidad para cada subcuenca, siendo estos netamente estadísticos, mientras que para el proceso de análisis jerárquico se basa en la experiencia en campo y juicios de valor obtenidos durante la investigación.

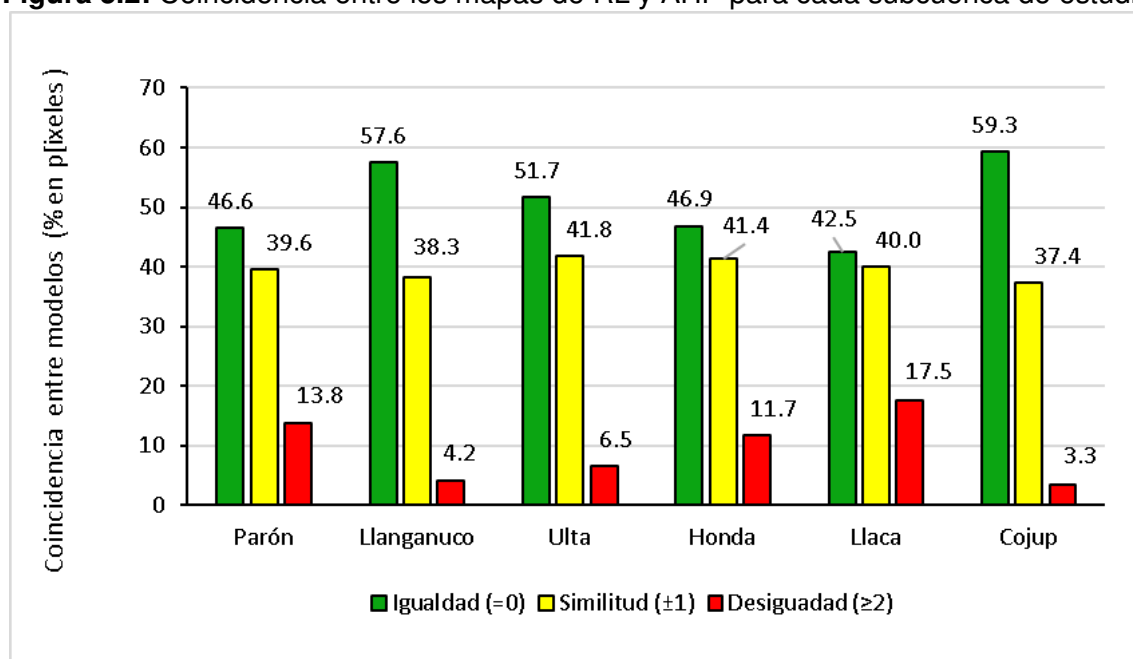
Figura 5.1: Mapa de coincidencia entre los modelos de RL y AHP.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.2 se muestra la igualdad, similitud y desigualdad para cada subcuenca de estudio, donde se puede observar un mayor porcentaje de igualdad y similitud para las subcuencas Parón, Llanganuco, Ulta, Honda, Llaca y Cojup. Por lo que se comprueba la hipótesis general planteada que los métodos de Regresión Logística y Proceso de Análisis Jerárquico arrojan resultados iguales y similares en valles glaciares de la Cordillera Blanca.

Figura 5.2: Coincidencia entre los mapas de RL y AHP para cada subcuenca de estudio



Fuente: Elaboración propia.

5.2 Validación del método más adecuado para determinar la susceptibilidad a movimientos en masa

Hipótesis específica: La regresión logística tiene una capacidad predictiva más precisa y exacta en comparación a la metodología AHP, evaluada por las líneas ROC y teniendo mayores ventajas sobre el proceso de análisis jerárquico.

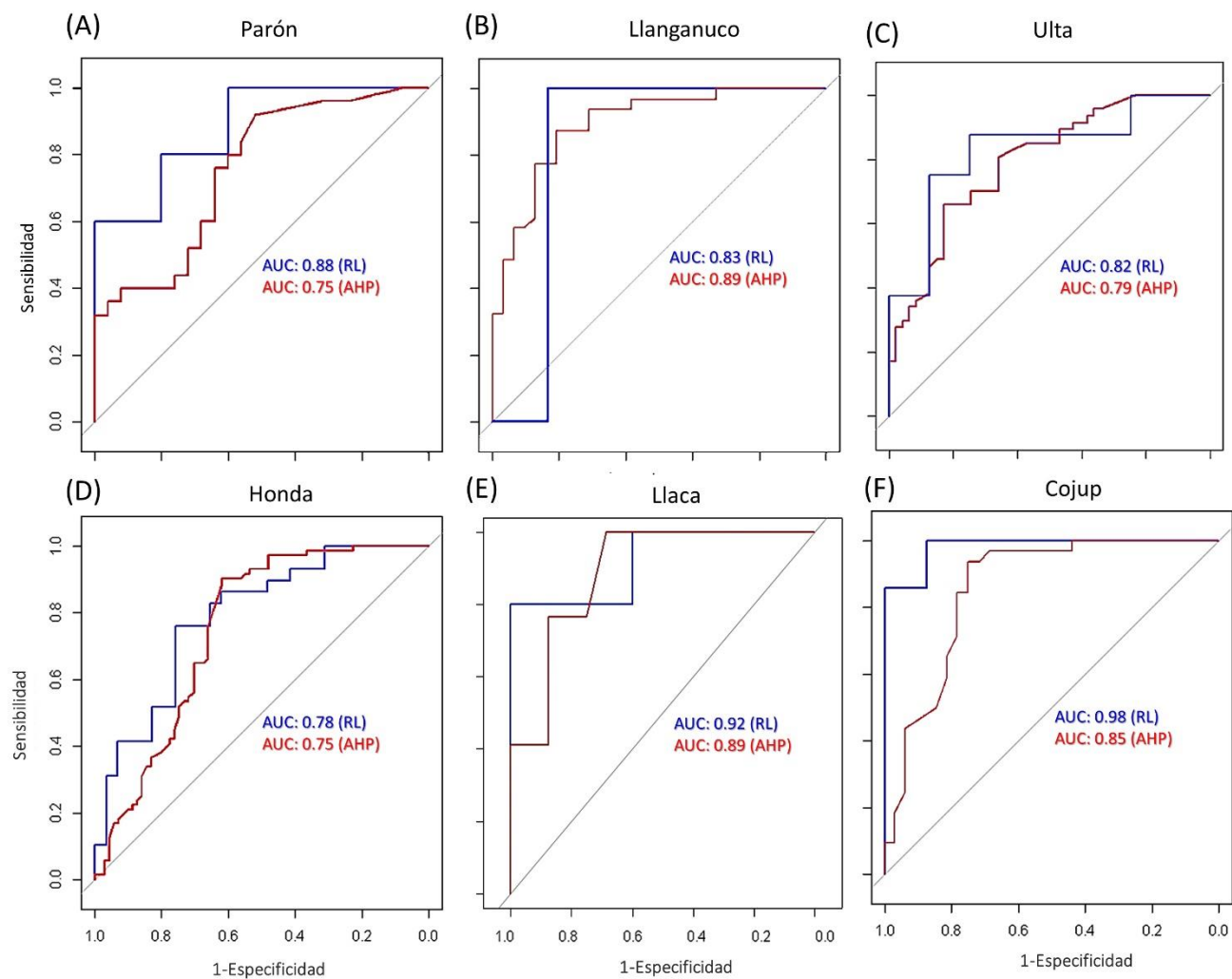
Para la validación de los modelos por cada subcuenca se obtuvo el área bajo la curva (AUC), que nos da la probabilidad de identificar correctamente un píxel cuando este píxel pertenece a la clase de interés y la probabilidad de identificar un píxel cuando efectivamente no pertenece a la clase de interés respectivamente (García, 2008). A partir de una muestra de validación se comparó los modelos de regresión logística y proceso de análisis jerárquico para cada subcuenca de estudio, determinando el método más adecuado para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa en valles glaciares de la Cordillera Blanca.

En la subcuenca Parón, para el modelo de RL se obtuvo un valor de AUC de 0.88, frente al obtenido por el modelo AHP de 0.75 (Figura 5.3A), lo que significa que la precisión del modelo logístico fue mayor para identificar elementos de deslizamientos y no deslizamientos con un 88 % de aciertos. Para la subcuenca Llanganuco, el modelo de RL obtuvo un valor de AUC de 0.83, frente al obtenido por el modelo AHP de 0.89 (Figura 5.3B), lo que significa un 89 % de precisión para identificar deslizamientos y no deslizamientos. En la subcuenca Ulta, el modelo de RL obtuvo un valor de AUC de 0.82 frente al obtenido por el modelo AHP de 0.79 (Figura 5.3 C), lo que significa que la precisión del modelo de análisis jerárquico fue mayor para identificar elementos de deslizamientos y no deslizamientos con un 82 % de aciertos. Para el estudio de la subcuenca Honda, el AUC para el método logístico fue mayor al obtenido mediante AHP, teniendo el modelo de RL un 78 % de aciertos para identificar deslizamientos y no deslizamientos. En la subcuenca Llaca, para el modelo de RL se obtuvo un valor de AUC de 0.92, frente al obtenido por el modelo AHP de 0.89 (Figura 5.3 E), lo que significa que la precisión del modelo de regresión logística fue mayor para identificar elementos de deslizamientos y no deslizamientos con un 92 % de aciertos. Finalmente, en la subcuenca Cojup, el AUC para el método logístico fue mayor al obtenido mediante AHP, teniendo el modelo de RL un 98 % de aciertos para identificar deslizamientos y no deslizamientos.

Para las seis subcuencas de estudio, los dos modelos dieron valores aceptables para el AUC, siendo la regresión logística ligeramente mejor que el modelo de análisis jerárquico. La RL presentó valores mayores en cuatro de las seis subcuencas estudiadas, lo que demuestra la hipótesis planteada que el modelo basado en RL identifica ligeramente mejor los movimientos en masa frente al modelo de análisis jerárquico.

Para el análisis mediante curvas ROC, se debe tomar en cuenta la cantidad de eventos con lo que se validó cada modelo; para el modelado mediante RL es importante la cantidad de eventos cartografiados y validados en campo, para este caso se utilizó entre el 10% y 20 % de las muestras de inventario para cada subcuenca, este valor es menor en comparación a la validación para la metodología AHP en la que al ser una metodología que no depende de una muestra de inventario, se pudo utilizar una muestra mayor para su validación (50 % y 60 % de los eventos de inventario).

Figura 5.3: AUC de las subcuencas: (A) Parón (B) Llanganuco (C) Ulta (D) Honda (E) Llaca (F) Cojup.



Fuente: Elaboración propia.

5.3 Determinación de las principales variables predictoras para valles glaciares de la Cordillera Blanca

Hipótesis específica: El uso de variables obtenidas a partir de métodos estadísticos de selección de variables explica de mejor manera la susceptibilidad a movimientos en masa en valles glaciares de la Cordillera Blanca.

Siendo cada subcuenca elegida como muestra de los valles glaciares pertenecientes a la Cordillera Blanca, se determinó las principales variables predictoras para valles glaciares de la Cordillera Blanca a partir de las ecuaciones de RL para cada valle. En la Figura 5.4 se muestra la pendiente, geomorfología, geología, NDVI en época húmeda y precipitación anual como las principales variables predictoras de la susceptibilidad a movimientos en masa (SMM) en valles glaciares pertenecientes al Parque Nacional Huascarán.

Figura 5.4: Principales variables explicativas de la SMM en valles glaciares de la Cordillera Blanca

Parámetros	Parón	Llanganuco	Uta	Honda	Llaca	Cojup	Σ
Elevación	● 0	● 0	● 0	● 1	● 0	● 1	2
Pendiente	● 1	● 1	● 1	● 1	● 1	● 1	6
NDVI H	● 1	● 1	● 1	● 0	● 1	● 0	4
Orientación	● 0	● 0	● 0	● 0	● 0	● 0	0
Rugosidad	● 0	● 0	● 0	● 0	● 0	● 0	0
C. Tangencial	● 0	● 0	● 0	● 0	● 0	● 0	0
C. de Perfil	● 0	● 0	● 0	● 0	● 0	● 0	0
Precipitación anual	● 1	● 1	● 0	● 0	● 0	● 1	3
Geología	● 0	● 1	● 1	● 1	● 0	● 0	3
Geomorfología	● 1	● 1	● 1	● 1	● 0	● 1	5
Cobertura vegetal	● 0	● 0	● 1	● 0	● 0	● 1	2
1=Parámetros SMM, 0=Parámetros no SMM							

Fuente: Elaboración propia.

La aplicación de los métodos de selección de variables (*Backward selection*) son útiles y explican de mejor manera la susceptibilidad a movimientos en masa (hipótesis específica planteada en esta investigación). Estas variables seleccionadas guardan relación con el estudio hecho por Bueechi (2018), donde realizó el modelamiento solo con variables cuantitativas; este autor propone mejorar el estudio de la susceptibilidad a movimientos en masa con variables físicas (geología, geomorfología entre otras), lo cual en esta investigación se realizó, mostrando una mejora en la capacidad predictiva del modelo logístico.

Las variables predictoras seleccionadas en esta investigación guardan relación con las variables propuestas por Valderrama (2016), donde se identificó como principales variables predictoras la geología, pendiente, geomorfología y cobertura vegetal para valles de la Cordillera Blanca, siendo estas variables las seleccionadas por el método estadístico *Backward selection* en esta tesis.

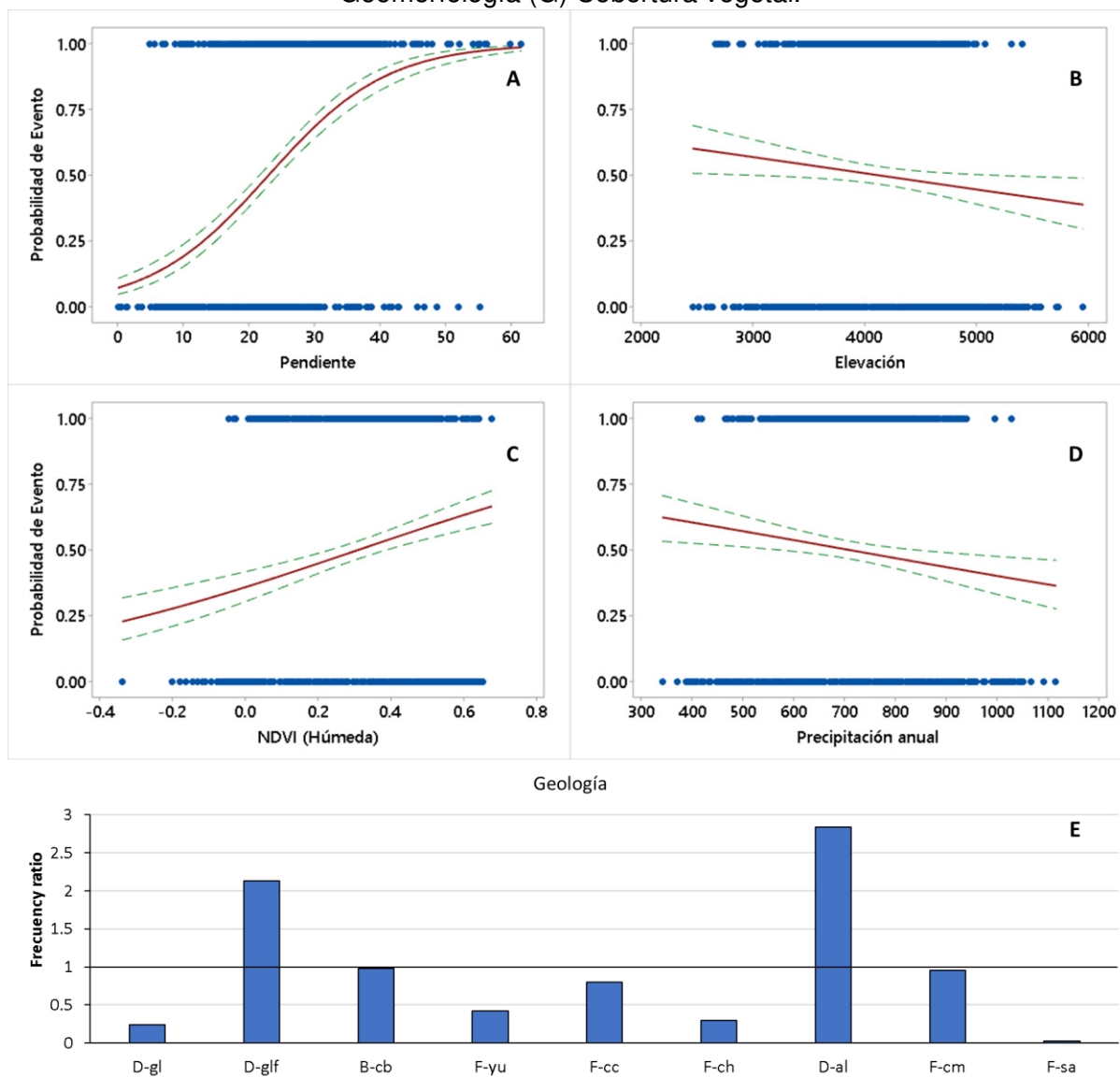
5.4 Comportamiento de los eventos de movimientos en masa en función de sus principales variables explicativas

Hipótesis específica: Los métodos logísticos tienen la capacidad de identificar el comportamiento o efecto de cada factor relevante identificado como predictor de la susceptibilidad a movimientos en masa.

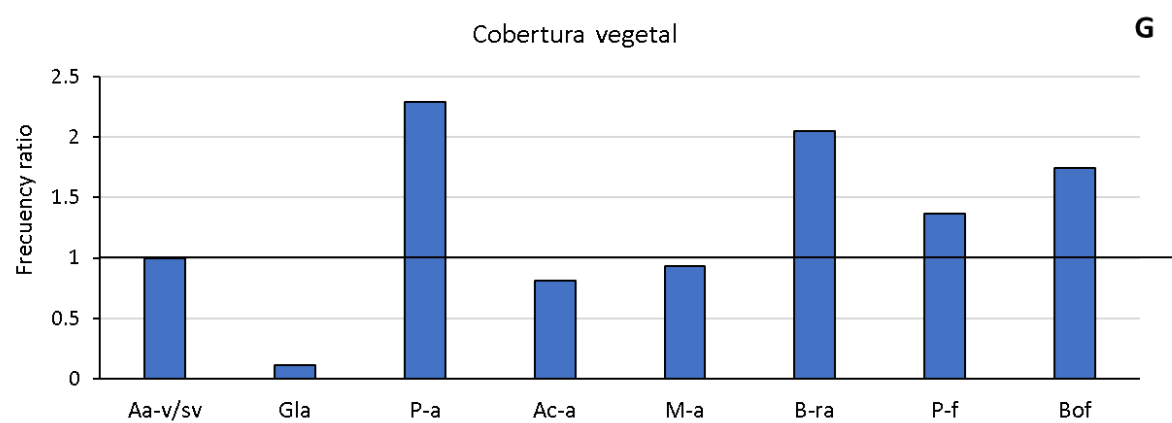
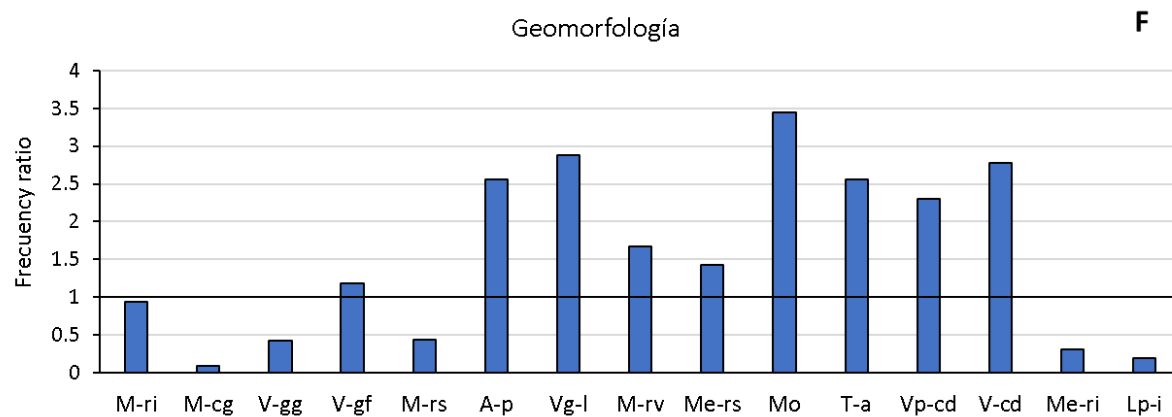
Para el análisis del comportamiento de las principales variables predictoras; de acuerdo con la hipótesis planteada, se comprobó que los métodos logísticos tienen la capacidad de identificar el comportamiento o efecto de cada factor relevante identificado como predictor de la susceptibilidad. Las variables continuas se ajustaron a una gráfica de función logística, que muestra la mayor probabilidad de ocurrencia del predictor (> 0.5) y para los datos categóricos, se calculó la relación de frecuencia (*frequency ratio*), el cual nos arroja las clases más relacionadas a movimientos en masa; si el valor es >1 , significa que existe una mayor ocurrencia de movimientos en masa (Akgun et al., 2008). En la Figura 5.5 se presenta el comportamiento de los eventos de movimientos en masa en función de sus principales variables predictoras.

Para la pendiente (Figura 5.5.A), la ocurrencia de movimientos en masa aumenta desde los $> 25^\circ$, con valores atípicos mayores a 50° distribuidos en todas las subcuencas de estudio. A lo largo de la elevación (Figura 5.5.B), los eventos de movimientos en masa tienen mayor de ocurrencia alrededor de los 2500-4000 msnm, con eventos por encima de los 5000 msnm identificados en su mayoría como complejos (alud o avalanchas). El índice de vegetación de diferencia normalizada (Figura 5.5.C) tiene una relación negativa con la elevación, siendo menor en zonas con altitudes mayor a los 4000 msnm y con eventos de movimientos en masa asentados históricamente en zonas con NDVI entre 0.25-0.45 que corresponden a zonas con eventos de tipo relictos. La precipitación (Figura 5.5.D) como factor desencadenante del movimiento en masa aumenta en función de la elevación, en donde los eventos de deslizamientos tienen mayor probabilidad de ocurrencia en zonas con precipitaciones entre los 300-700 mm. De las clases de geología (Figura 5.5.E) identificadas en el área de estudio, las unidades depósito aluvial y depósito glaciar, fluvial resultaron ser las clases con mayor ocurrencia de movimientos en masa (2.8 y 2.1 respectivamente). El análisis para la cobertura vegetal (Figura 5.5.G) muestra que los eventos están asentados en zonas con pajonal andino (2.29) y bosque relictos altoandinos (2.05). Los eventos de movimientos en masa de acuerdo con su geomorfología (Figura 5.5.F) tienen una mayor ocurrencia de movimientos en masa en morrenas (Mo), valle glaciar (Vg-I) y vertiente coluvial de detritos (V-cd).

Figura 5.5: Comportamiento de los eventos de movimientos en masa en función de las variables: (A) Pendiente (B) Elevación (C) NDVI (D) Precipitación anual (E) Geología (F) Geomorfología (G) Cobertura vegetal.



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

6 Conclusiones

A continuación, se plantea la conclusión general y conclusiones específicas en base a los objetivos planteados en esta investigación:

Objetivo general: Comparar la susceptibilidad a movimientos en masa usando el método de Regresión Logística y Proceso de Análisis Jerárquico en valles glaciares de la Cordillera Blanca-Ancash.

Siendo ambos modelos con un alto grado de igualdad y similitud, se puede concluir que ambos métodos resultan óptimos y similares; lógicamente con ciertas diferencias (la regresión logística permite utilizar datos ráster reclasificados y no reclasificados a diferencia del AHP que solo acepta datos ráster reclasificados). La similitud entre ambos modelos permite también concluir que, si se hubiese utilizado las mismas variables para cada modelo investigado, estos resultarían más similares, obteniéndose menores desigualdades y por correlación mayores igualdades y similitudes. La aplicación de cada uno de estos métodos de susceptibilidad es igualmente importante y muchas veces son determinados por las herramientas y recursos disponibles del investigador.

Objetivo específico 1: Determinar el método más adecuado para calcular la susceptibilidad a movimientos en masa en valles glaciares de la Cordillera Blanca.

De la validación de las metodologías planteadas en esta investigación mediante curvas ROC, se concluye que el método de regresión logística se comporta ligeramente mejor que el generado con AHP en valles glaciares de la Cordillera Blanca (0.78 a 0.98 para la RL siendo estos valores mayores a los generados mediante AHP para cada uno de los diferentes valles estudiados), identificando mejor las zonas con susceptibilidad a movimientos en masa. Los modelos logísticos, presentan ventajas sobre el proceso de análisis jerárquico, principalmente en la asignación de los pesos para cada parámetro; es importante el esfuerzo en la generación de una buena base de datos (eventos/no eventos de movimientos en masa), el esfuerzo en la calidad de los registros de eventos validados en campo hace más confiable el modelo.

Objetivo específico 2: Determinar las principales variables explicativas de la susceptibilidad a movimientos en masa en diferentes valles glaciares de la Cordillera Blanca.

Siendo la regresión logística el modelo más adecuado para el cálculo de la susceptibilidad a movimientos en masa (SMM), se concluye que para los valles glaciares de la Cordillera Blanca el método estadístico de selección de variables *Backward Selection* permite obtener modelos de calidad y no saturados en variables explicativas (parsimonia estadística), lo cual es favorable en la calidad del modelo final. La pendiente, geomorfología, geología, NDVI en época húmeda y precipitación anual son las principales variables explicativas de la susceptibilidad a movimientos en masa en valles glaciares de la Cordillera Blanca.

Objetivo específico 3: Analizar el comportamiento de los eventos de movimientos en masa en función de sus principales variables explicativas.

El comportamiento de las principales variables explicativas es explicada usando la densidad relativa para las variables cualitativas o categóricas (geomorfología, geología y cobertura vegetal) y los gráficos de la función logística para variables cuantitativas (pendiente, NDVI, elevación, precipitación media anual), estos métodos logísticos nos permiten identificar el comportamiento permitiendo tener un análisis de causa y consecuencia de los eventos de

movimientos en masa; permitiendo identificar zonas de origen de movimientos en masa y zonas donde estos eventos se han asentado a lo largo del tiempo (eventos de movimientos en masa de tipo relictos).

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, siendo ambos modelos comparados con grandes áreas de igualdad y similitud, es importante concluir que el modelo a elegir está determinado por las necesidades y recursos disponibles; tanto el modelo de regresión logística como el proceso de análisis jerárquico son igualmente importantes para la identificación de la probabilidad a movimientos en masa.

7 Recomendaciones

Terminada la presente investigación, es importante presentar los temas no abordados, líneas de investigación actuales y recomendaciones que permitirán generar mayor conocimiento en la temática de gestión de riesgo, así como en el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa en valles glaciares. Las recomendaciones son explicadas a continuación:

Recomendaciones practicas sobre el uso de las metodologías RL y AHP:

- Generar el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa para toda la Cordillera Blanca a escala regional usando la regresión logística (extrapolar para valles glaciares de la Cordillera Blanca o del país); con las principales variables explicativas propuestas en la presente investigación (pendiente, geomorfología, geología, NDVI en época húmeda y precipitación anual) y generar un inventario más completo de movimientos en masa para valles glaciares de la Cordillera Blanca.
- Para dar más sustento a los métodos de validación y asunción de un método de susceptibilidad, es importante y recomendable la realización de más visitas a campo para validar in situ diferentes zonas de susceptibilidad clasificadas; algunos métodos de correlación podrían ayudar en dar más sustento a los mapas de susceptibilidad generados en diferentes investigaciones.
- Mejorar la cantidad de eventos de inventario de peligros por movimientos en masa cartografiados para otros valles de la Cordillera Blanca; para la calidad del modelo de susceptibilidad es necesario tener una base de datos bien revisada y de calidad (base de datos robusta), siendo necesario un inventario de movimientos en masa considerando la mayor cantidad de quebradas pertenecientes a la Cordillera Blanca.
- Usar un equipo multidisciplinario de especialistas para los juicios de valor dados en el modelo de análisis jerárquico; estos juicios dados por expertos en cada temática ayudaran en la mejora de los modelos y de la consistencia.
- Mejorar la calidad de datos ráster y shapefiles de las variables descriptivas recolectadas en gabinete; para esta investigación se utilizó datos DEM a una resolución de 12.5 m, para futuros estudios referidos a esta temática, se recomienda ahondar en el uso de otras capas DEM a otras resoluciones y verificar la calidad en los modelos resultantes.
- Ahondar en otros tipos de metodologías estadísticas para la detección de zonas con mayor probabilidad de movimientos en masa; en la bibliografía existe una amplia cantidad de metodologías, ahondar en el uso de estas técnicas permitirían el conocimiento a profundidad en esta temática.
- Ambas metodologías otorgan resultados confiables; sin embargo, la ventaja de la RL es que permite cuantificar el efecto de factores de forma precisa a partir de datos de inventario de movimientos en masa y no subjetiva como el AHP. La elección del modelo de susceptibilidad está determinada por las necesidades y recursos; siendo ambos modelos igualmente importantes para la identificación de la probabilidad de ocurrencia a movimientos en masa.

Recomendaciones para la gestión del Parque Nacional Huascarán:

- Implementar nuevas técnicas de monitoreo de peligros naturales, casos como el Sistema de Alerta Temprana instalado (SAT) en la laguna 513 y el Sistema de Alerta Temprana para la laguna Palcacocha son mecanismos de previsión, control y atención a posibles eventos destructivos.
- Implementar planes de contingencia a nivel local tomando en cuenta eventos sísmicos y fenómenos de deglaciación en los cuales se identifique las zonas con alta probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa y desembalse de lagunas; así como obras estructurales para el control y estabilización de la erosión en zonas de alta pendiente.
- Capacitación y preparación por parte de entidades como INDECI e INAIGEN a las comunidades a lo largo del río Santa; con la finalidad de alertar y preparar a la población en caso ocurra un movimiento en masa potencialmente peligroso.

8 Bibliografía

- Akgun, A., Dag, S., & Bulut, F. (2008). Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology*, 54(6), 1127–1143. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0882-8>
- Alcántara, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, 41, 1–25.
- Amorim, S., Corominas, J., Lantada, N., Baeza Adell, C., Portilla, M., & Angulo Bahón, C. (2009). Análisis comparativo de técnicas estadísticas y de aprendizaje para evaluar la susceptibilidad del terreno a los deslizamientos superficiales en el pirineo catalán. *Simposio Nacional Sobre Taludes y Laderas Inestables*. “VII Simposio Nacional Sobre Taludes y Laderas Inestables.” <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/6732>
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1–2), 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H., & Kanno, T. (2005). Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*, 81(4), 432–445. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.08.004>
- Baeza, C., & Corominas, J. (2001). Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(12), 1251–1263. <https://doi.org/10.1002/esp.263>
- Baeza, C., Lantada, N., & Amorim, S. (2016). Statistical and spatial analysis of landslide susceptibility maps with different classification systems. *Environmental Earth Sciences*, 75(19), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6124-1>
- Bai, S. B., Wang, J., Lü, G. N., Zhou, P. G., Hou, S. S., & Xu, S. N. (2010a). GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China. *Geomorphology*, 115(1–2), 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.025>
- Bai, S. B., Wang, J., Lü, G. N., Zhou, P. G., Hou, S. S., & Xu, S. N. (2010b). GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China. *Geomorphology*, 115(1–2), 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.025>
- Blanco, F. (2013). *Evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa en la zona central de la cuenca del río Mantaro - Región Junín* [Universidad Nacional de Ingeniería]. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_0ea0af4160c3a210491f96bc14923a4a
- Bornaetxea, T., Antigüedad, I., & Ormaetxea, O. (2018). Mapas de susceptibilidad de deslizamientos a partir del modelo de regresión logística en la cuenca del río Oria (Gipuzkoa). Estrategias de tratamiento de variables. *Cuaternalio y Geomorfología*, 32(1–2), 7–29.
- Brabb, E. E., Pampeyan, E. H., & Bonilla, M. G. (1972). Landslide susceptibility in San Mateo County, California. In *Miscellaneous Field Studies Map*. <https://doi.org/10.3133/mf360>
- Brand, E. . (1988). Special lecture: landslide risk assessment in Hong Kong. *International Symposium on Landslides*, 1059–1074.

- Bueechi, E., Klimeš, J., Frey, H., Huggel, C., Strozzi, T., & Cochachin, A. (2019). Regional-scale landslide susceptibility modelling in the Cordillera Blanca, Peru—a comparison of different approaches. *Landslides*, 16(2), 395–407. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1090-1>
- Bueechi, Emanuel. (2018). *Modelling of Landslide Susceptibilities in the Cordillera Blanca (Peru)*. University of Zurich.
- Carey, M. (2018). Desglaciación, avalanchas y deslizamiento de tierras – dimensiones sociales. *Ciencia y Sociedad: “Desastres Naturales”; Investigación Científica y Marco Institucional de Acción*, 1–8.
- Carrara, A., Crosta, G., & Frattini, P. (2008). Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology*, 94(3–4), 353–378. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.033>
- CENEPRED. (2015). Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales. In *CENEPRED* (2nd ed.). http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA_PUBLICAR/CENEPRED/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf
- Cerda, J., Vera, C., & Rada, G. (2013). Odds ratio: Aspectos teóricos y prácticos. *Revista Medica de Chile*, 141(10), 1329–1335. <https://doi.org/10.4067/S0034-98872013001000014>
- Chacon, J. (2008). *Los conceptos actuales de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo, en la prevención de movimientos de ladera, con ejemplos de aplicaciones prácticas*. https://www.researchgate.net/publication/258856593_Los_conceptos_actuales_de_susceptibilidad_peligrosidad_y_riesgo_en_la_prevenccion_de_movimientos_de_ladera_con_ejemplos_de_aplicaciones_practicas
- Christodoulou, E., Ma, J., Collins, G. S., Steyerberg, E. W., Verbakel, J. Y., & Van Calster, B. (2019). A systematic review shows no performance benefit of machine learning over logistic regression for clinical prediction models. *Journal of Clinical Epidemiology*, 110, 12–22. <https://doi.org/10.1016/J.JCLINEPI.2019.02.004>
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209–263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Cox, D. R. (1958). The Regression Analysis of Binary Sequences. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 20(2), 215–232. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1958.tb00292.x>
- Dai, F. C., & Lee, C. F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3–4), 213–228. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00087-3)
- DESINVENTAR. (2016). *Inventario histórico de desastres- Perú*. Sistema de Inventario de Efectos de Desastres. https://online.desinventar.org/desinventar/#PER-1250695241-peru_inventario_historico_de_desastres
- Eftekhari, B., Mohammad, K., Ardebili, H. E., Ghodsi, M., & Ketabchi, E. (2005). Comparison of artificial neural network and logistic regression models for prediction of mortality in head trauma based on initial clinical data. *BMC Medical Informatics and Decision Making* 2005 5:1, 5(1), 1–8. <https://doi.org/10.1186/1472-6947-5-3>
- ESRI. (n.d.). *ArcGIS for Desktop*. Retrieved August 27, 2020, from

<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>

- Feliciísimo, Á. M., Cuartero, A., Remondo, J., & Quirós, E. (2012). Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study. *Landslides*, 10(2), 175–189. <https://doi.org/10.1007/S10346-012-0320-1>
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3–4), 85–98. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2008.03.022>
- Fernández Pierna, J. A., Abbas, O., Baeten, V., & Dardenne, P. (2009). A Backward Variable Selection method for PLS regression (BVSPS). *Analytica Chimica Acta*, 642(1–2), 89–93. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.12.002>
- Ferro, V. (2007). La evaluación del riesgo de desastre en la planificación del desarrollo de la ciudad de Huaraz, Áncash. In *Análisis del riesgo en procesos de desarrollo e inversión*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fuchu, D., Lee, C. F., & Sijing, W. (1999). Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Engineering Geology*, 51(4), 279–290. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00047-7)
- García, M. (2008). *Metodologías para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos*. Universidad de Alcalá.
- García, M., Benito, B., Malpica, J., & Morillo, M. (2007). Evaluación de la peligrosidad a los deslizamientos en un sig empleando técnicas de Regresión Logística. *Asociación Española de Ingeniería Sísmica*, 15.
- Grozavu, A., Pleşcan, S., Patriche, C. V., Mărgărint, M. C., & Roşca, B. (2013). Landslide susceptibility assessment: GIS application to a complex mountainous environment. In *Environmental Science and Engineering (Subseries: Environmental Science)* (Issue 9783642127243, pp. 31–44). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12725-0_4
- Hardingham, A., Ho, K., Smallwood, A. &, & Ditchfield, C. (2020). *Quantitative Risk Assessment of Landslides-A Case History from Hong Kong*.
- Hilbe, J. M. (2011). *Logistic Regression*.
- Holdridge, L. R. (1967). Life zone ecology. In *Life zone ecology*. (Issue (rev. ed.)). Tropical Science Center.
- Horn, B. K. P. (1981). Hill Shading and the Reflectance Map. *Proceedings of the IEEE*, 69(1), 14–47. <https://doi.org/10.1109/PROC.1981.11918>
- Humbert, M. (1972). *LES MOUVEMENTS DE TERRAINS. PRINCIPES DE REALISATION D'UNE CARTE PREVISIONNELLE DANS LES ALPES*.
- Hutchinson, J. N. (1988). General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *Landslides. Proc. 5th Symposium, Lausanne, 1988. Vol. 1*, 3–35. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)90310-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)90310-0)
- INGEMMET. (1995). *Geología de los cuadrángulos de Pallasca, Tayabamba, Corongo, Pomabamba, Carhuaz y Huari* (INGEMMET).

- INGEMMET. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Carhuaz (19-h)*.
- INGEMMET. (2009). *Riesgos geológicos en la región Ancash - Boletín N° 38 Serie C*.
- Lamelas, M. (2007). Análisis y cartografía mediante sig de la susceptibilidad a la formación de dolinas en el entorno de Zaragoza. *GEOGRAPHICALIA*, 52, 79–111.
- Mărgărint, M. C., Grozavu, A., & Patriche, C. V. (2013). Assessing the spatial variability of coefficients of landslide predictors in different regions of Romania using logistic regression. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(12), 3339–3355. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-3339-2013>
- Merg, C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Fernández, M., Schmidt, F., Montalva, R., Guzmán, L., Rodríguez, K., Blanco, F., & Selzer, F. (2011). Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. *Revista Pilquen, Sección Agronomía*, 1–11.
- MINAM. (2015). *Mapa de Cobertura Vegetal-Memoria descriptiva* (Ministerio).
- Moreno, J. (2001). El proceso analítico jerárquico (AHP) fundamentos, metodología y aplicaciones. *Dpto. Métodos Estadísticos*.
- Muñoz, J. (1995). *Geomorfología General*.
- Pardeshi, S. D., Autade, S. E., & Pardeshi, S. S. (2013). Landslide hazard assessment: Recent trends and techniques. In *SpringerPlus* (Vol. 2, Issue 1). SpringerOpen. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-523>
- Ley N° 29664, Diario Oficial El Peruano 1 (2011). <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/ley-que-crea-el-sistema-nacional-de-gestion-del-riesgo-de-de-ley-n-29664-605077-1/>
- Peckham, S. D. (2011). Profile, Plan and Streamline Curvature: A Simple Derivation and Applications. In *Geomorphometry*.
- PMA-GCA. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas* (Vol. 4). Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional. https://www.researchgate.net/publication/320310478_Movimientos_en_Masa_en_la_Region_Andina_Una_Guia_para_la_Evaluacion_de_Amenazas
- PNUD. (2019). *El Reto de la Igualdad: Una lectura a las dinámicas territoriales en el Perú*. <https://www.pe.undp.org/content/peru/es/home/library/poverty/el-reto-de-la-igualdad.html>
- QGIS Development Team. (2021). *QGIS Geographic Information System* (Desktop Version 3.18.1-Zürich).
- R Core Team. (2020). R: A Language and Environment for Statistical Computing. In *R Foundation for Statistical Computing*. <http://www.r-project.org>
- Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation. In *Priority Setting. Resource Allocation*, MacGraw-Hill, New York International Book Company.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, 1(1), 83–98.
- SERNANP. (2017). *Plan Maestro del Parque Nacional Huascarán periodo 2017-2021* (p. 129).

- SGC. (2013). *Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por Movimientos en masa escala 1:100.000*. Servicio Geológico Colombiano.
- Upton, G., & Fingleton, B. (1985). Spatial data analysis by example. Volume 1: Point pattern and quantitative data. *Spatial Data Analysis by Example. Volume 1: Point Pattern and Quantitative Data*.
- Valderrama, P., Pari, W., Silva, C., & Fídel, L. (2013). *Laguna Palcacocha y su influencia en la ciudad de Huaraz-Cordillera Blanca*.
- Valderrama, P., Silva, C., Dueñas, S., & Araujo, G. (2016). Peligros Geológicos por Procesos Glaciales, Cordillera Blanca - Río Santa. In *Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica* (Vol. 63).
- Varnes, D. (1958). Landslide types and processes. *Highway Research Board Special Report*, 29.
- Varnes, D. (1978). Slope Movement Types and Processes. In *Landslides: Analysis and Control* (p. 22).
- Venables, W. N., & Ripley, B. D. (2001). *Modern Applied Statistics with S*. Springer-Verlag New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21706-2>
- Warton, D. I., & Hui, F. K. C. (2011). The arcsine is asinine: the analysis of proportions in ecology. *Ecology*, 92(1), 3–10. <https://doi.org/10.1890/10-0340.1>
- Wilson, J., Reyes, L., & Garayar, J. (1967). *Geología de los cuadrángulos de Mollebamba, Tayabamba, Huaylas, Pomabamba, Carguaz y Huari*.

9 Anexos

Anexo 1: Eventos de movimientos en masa cartografiados en campo:

Subcuenca	Código de evento	Este	Norte	Peligro	Área (Ha)
Parón	Q1_Z1_1	193971.487	9000006.007	Des. Rotacional	25.079
Parón	Q1_Z1_2	194825.476	9000532.718	Flujos	61.687
Parón	Q1_Z1_3	200272.569	9000220.415	Caída	34.421
Parón	Q1_Z1_4	200036.518	9000323.073	Caída	4.244
Parón	Q1_Z1_5	195364.485	9000183.315	Caída	19.82
Parón	Q1_Z2_6	201575.432	9006636.188	Complejo	55.813
Parón	Q1_Z2_7	203997.407	9004977.349	Complejo	60.389
Parón	Q1_Z2_8	204238.662	9003105.245	Flujos	63.774
Parón	Q1_Z2_9	201999.643	9001594.946	Caída	7.958
Parón	Q1_Z2_10	203075.748	9002448.492	Caída	22.08
Parón	Q1_Z2_11	200749.414	9005670.104	Caída	9.561
Parón	Q1_Z2_12	200850.6	9000908.288	Caída	12.187
Parón	Q1_Z2_13	201289.3	9001208.645	Caída	12.035
Parón	Q1_Z2_14	201007.026	9001332.001	Caída	3.293
Parón	Q1_Z2_15	202384.26	9001856.827	Caída	15.609
Parón	Q1_Z2_16	202478.715	9002387.363	Caída	17.643
Parón	Q1_Z2_17	203620.33	9003062.771	Caída	1.634
Parón	Q1_Z2_18	204099.884	9002751.013	Caída	11.601
Parón	Q1_Z2_19	204210.806	9003650.182	Caída	6.586
Parón	Q1_Z2_20	203697.551	9002677.279	Caída	15.206
Parón	Q1_Z2_21	202612.027	9002222.285	Caída	3.605
Parón	Q1_Z2_22	200242.076	9000596.547	Caída	3.868
Parón	Q1_Z2_23	200451.703	9000832.635	Caída	4.665
Parón	Q1_Z2_24	200838.46	9001182.429	Caída	4.336
Parón	Q1_Z2_25	201219.469	9001407.106	Caída	4.515
Parón	Q1_Z2_26	201792.639	9001391.505	Caída	6.475
Parón	Q1_Z2_27	203974.868	9003413.235	Caída	2.94
Parón	Q1_Z2_28	204523.085	9003882.002	Caída	6.557
Parón	Q1_Z2_29	202916.739	9002680.06	Caída	2.303
Parón	Q1_Z2_30	203155.881	9002757.396	Caída	3.574
Parón	Q1_Z2_31	203405.423	9002881.19	Caída	4.137
Parón	Q1_Z2_32	205016.871	9004371.256	Caída	0.873
Parón	Q1_Z3_33	205842.659	9003299.675	Complejo	130.614
Parón	Q1_Z3_34	207620.793	9004883.212	Complejo	46.02
Parón	Q1_Z3_35	208838.722	9005217.568	Complejo	22.038
Parón	Q1_Z3_36	209306.477	9005179.163	Complejo	9.47
Parón	Q1_Z3_37	208105.157	9007020.998	Complejo	15.096
Parón	Q1_Z3_38	209248.526	9006488.178	Complejo	18.934

Parón	Q1_Z3_39	209069.861	9006948.83	Complejo	27.85
Parón	Q1_Z3_40	208325.357	9005298.582	Flujos	17.146
Parón	Q1_Z3_41	208559.098	9005597.581	Flujos	10.69
Parón	Q1_Z3_42	207113.705	9005554.081	Flujos	11.545
Parón	Q1_Z3_43	206107.457	9005155.36	Flujos	7.241
Parón	Q1_Z3_44	208520.117	9005041.552	Caída	4.189
Parón	Q1_Z3_45	205523.925	9004804.262	Caída	4.042
Parón	Q1_Z3_46	206572.468	9005459.693	Caída	6.03
Parón	Q1_Z3_47	206686.224	9006276.437	Complejo	58.032
Parón	Q1_Z3_48	205152.371	9006006.01	Complejo	48.49
Parón	Q1_Z3_49	208826.738	9007847.627	Complejo	70.87
Parón	Q1_Z3_50	209528.494	9005688.175	Complejo	81.412
Llanganuco	Q2_Z1_51	205105.594	8989105.024	Complejo	155.919
Llanganuco	Q2_Z1_52	205038.268	8990851.317	Complejo	160.627
Llanganuco	Q2_Z1_53	206270.5	8990456.236	Complejo	36.092
Llanganuco	Q2_Z1_54	208524.568	8991195.784	Complejo	66.826
Llanganuco	Q2_Z1_55	208433.111	8990535.364	Complejo	48.12
Llanganuco	Q2_Z1_56	204682.311	8991978.059	Complejo	60.923
Llanganuco	Q2_Z1_57	204342.778	8988354.496	Complejo	17.741
Llanganuco	Q2_Z1_58	205143.474	8989966.929	Des. Rotacional	11.518
Llanganuco	Q2_Z1_59	203074.186	8986533.167	Flujos	115.725
Llanganuco	Q2_Z1_60	205703.718	8992773.419	Caída	4.852
Llanganuco	Q2_Z1_61	205948.604	8993176.502	Caída	4.744
Llanganuco	Q2_Z1_62	205650.557	8992292.354	Flujos	12.342
Llanganuco	Q2_Z2_63	207269.437	8996824.143	Complejo	30.054
Llanganuco	Q2_Z2_64	206682.72	8996266.249	Complejo	11.499
Llanganuco	Q2_Z2_65	209594.778	8996413.507	Flujos	13.346
Llanganuco	Q2_Z2_66	210330.971	8996328.745	Flujos	58.419
Llanganuco	Q2_Z2_67	209701.966	8993872.056	Complejo	9.593
Llanganuco	Q2_Z2_68	207330.783	8993920.661	Flujos	10.931
Llanganuco	Q2_Z2_69	207811.971	8994367.556	Flujos	17.581
Llanganuco	Q2_Z2_70	206805.291	8994004.469	Caída	22.782
Llanganuco	Q2_Z2_71	206908.194	8993630.349	Caída	12.78
Llanganuco	Q2_Z2_72	208275.346	8994631.935	Caída	9.414
Llanganuco	Q2_Z2_73	209492.295	8994744.731	Caída	12.101
Llanganuco	Q2_Z2_74	208387.236	8995005.224	Flujos	19.432
Llanganuco	Q2_Z2_75	210118.997	8996763.516	Flujos	11.78
Llanganuco	Q2_Z2_76	208923.163	8995219.657	Flujos	34.95
Llanganuco	Q2_Z2_77	207993.917	8995117.768	Flujos	5.575
Llanganuco	Q2_Z2_78	207608.338	8994737.032	Flujos	7.365
Llanganuco	Q2_Z2_79	208311.438	8995379.892	Flujos	7.373
Llanganuco	Q2_Z2_80	208601.397	8995779.317	Flujos	5.711
Llanganuco	Q2_Z2_81	207224.273	8994400.597	Flujos	10.592
Llanganuco	Q2_Z2_82	208723.2	8998082.549	Complejo	31.245

Llanganuco	Q2_Z2_83	206592.702	8993011.268	Caída	21.231
Llanganuco	Q2_Z2_84	208371.933	8999185.172	Complejo	64.53
Llanganuco	Q2_Z3_85	209732.895	8998595.658	Complejo	177.027
Llanganuco	Q2_Z3_86	210643.152	9000853.611	Complejo	42.827
Llanganuco	Q2_Z3_87	212639.448	9002872.401	Complejo	16.881
Llanganuco	Q2_Z3_88	211577.379	8997335.334	Flujos	6.34
Llanganuco	Q2_Z3_89	212127.894	8997746.894	Flujos	8.622
Llanganuco	Q2_Z3_90	212558.407	8998167.458	Flujos	31.285
Llanganuco	Q2_Z3_91	210866.665	8997673.518	Flujos	9.206
Llanganuco	Q2_Z3_92	212146.231	8998726.289	Flujos	15.274
Llanganuco	Q2_Z3_93	211125.024	8996844.085	Caída	19.423
Llanganuco	Q2_Z3_94	210484.728	8997321.426	Caída	24.187
Llanganuco	Q2_Z3_95	211399.878	8997978.651	Caída	5.556
Llanganuco	Q2_Z3_96	211618.669	8998371.911	Caída	10.129
Llanganuco	Q2_Z3_97	212516.649	8998790.146	Caída	5.497
Llanganuco	Q2_Z3_98	214580.762	8994552.761	Complejo	82.117
Llanganuco	Q2_Z3_99	214178.921	9002890.36	Complejo	15.406
Llanganuco	Q2_Z3_100	213609.492	8998511.542	Complejo	14.256
Llanganuco	Q2_Z3_101	213787.591	8998761.528	Complejo	12.751
Llanganuco	Q2_Z3_102	214619.865	9003461.993	Flujos	3.517
Llanganuco	Q2_Z3_103	214057.19	9003266.768	Flujos	2.27
Llanganuco	Q2_Z3_104	213513.998	9001024.865	Flujos	5.667
Llanganuco	Q2_Z3_105	213224.87	9000586.932	Caída	27.9
Llanganuco	Q2_Z3_106	214239.089	8995484.78	Complejo	148.72
Llanganuco	Q2_Z3_107	214465.025	8996554.141	Complejo	53.318
Llanganuco	Q2_Z3_108	210263.781	9001065.815	Complejo	172.598
Llanganuco	Q2_Z3_109	211930.726	9002560.73	Complejo	26.939
Llanganuco	Q2_Z3_110	212128.904	9002872.851	Complejo	9.563
Llanganuco	Q2_Z3_111	213978.524	8996440.429	Complejo	33.132
Llanganuco	Q2_Z3_112	214717.636	8997555.751	Flujos	7.637
Llanganuco	Q2_Z3_113	210512.517	9002547.474	Complejo	25.382
Uta	Q3_Z1_114	206638.451	8974706.393	Flujos	101.958
Uta	Q3_Z1_115	209311.231	8977787.289	Flujos	19.557
Uta	Q3_Z1_116	210214.147	8980527.766	Flujos	4.626
Uta	Q3_Z1_117	216113.775	8981388.603	Flujos	22.908
Uta	Q3_Z1_118	215591.558	8980284.747	Des. Rotacional	29.111
Uta	Q3_Z1_119	213901.051	8981340.741	Des. Rotacional	65.427
Uta	Q3_Z1_120	214300.132	8982599.115	Des. Rotacional	12.782
Uta	Q3_Z1_121	210811.269	8981579.893	Caída	100.69
Uta	Q3_Z1_122	210909.149	8980726.474	Caída	57.159
Uta	Q3_Z1_123	215161.677	8983316.29	Caída	14.415
Uta	Q3_Z1_124	207421.776	8974849.236	Complejo	36.39
Uta	Q3_Z1_125	213453.673	8981879.739	Complejo	170.806
Uta	Q3_Z1_126	214750.191	8981672.051	Complejo	39.192

Uta	Q3_Z1_127	215344.367	8982200.587	Complejo	150.874
Uta	Q3_Z1_128	210093.143	8979876.37	Flujos	10.544
Uta	Q3_Z1_129	210134.944	8980244.106	Flujos	6.663
Uta	Q3_Z1_130	213409.229	8981968.77	Des. Rotacional	5.507
Uta	Q3_Z1_131	211146.732	8980017.577	Des. Rotacional	20.499
Uta	Q3_Z1_132	210724.176	8978766.918	Des. Rotacional	1.765
Uta	Q3_Z1_133	214694.482	8979549.522	Des. Traslacional	0.828
Uta	Q3_Z1_134	215095.848	8983690.235	Caída	13.188
Uta	Q3_Z2_135	216128.024	8984788.73	Flujos	8.664
Uta	Q3_Z2_136	216311.925	8985506.614	Flujos	18.166
Uta	Q3_Z2_137	217312.237	8986195.066	Flujos	19.714
Uta	Q3_Z2_138	215718.335	8984393.506	Caída	14.524
Uta	Q3_Z2_139	216924.148	8985801.362	Caída	20.358
Uta	Q3_Z2_140	216944.585	8987950.484	Complejo	56.762
Uta	Q3_Z2_141	217781.375	8989005.672	Complejo	26.607
Uta	Q3_Z2_142	215991.547	8984140.194	Flujos	18.133
Uta	Q3_Z2_143	218837.294	8987420.742	Flujos	10.883
Uta	Q3_Z2_144	218784.657	8988542.026	Flujos	35.111
Uta	Q3_Z2_145	217969.485	8987356.346	Flujos	6.754
Uta	Q3_Z2_146	217031.834	8981602.108	Caída	15.751
Uta	Q3_Z2_147	216777.328	8981962.38	Caída	19.484
Uta	Q3_Z2_148	215455.498	8983624.189	Caída	8.945
Uta	Q3_Z2_149	219446.969	8982517.745	Caída	20.363
Uta	Q3_Z2_150	217185.526	8982109.797	Caída	5.138
Uta	Q3_Z2_151	218208.08	8986835.741	Caída	47.083
Uta	Q3_Z2_152	217377.029	8987215.815	Caída	12.836
Uta	Q3_Z2_153	219526.924	8987697.798	Caída	18.331
Uta	Q3_Z2_154	219935.409	8983584.956	Complejo	62.882
Uta	Q3_Z2_155	220197.201	8986261.548	Complejo	50.277
Uta	Q3_Z2_156	219286.482	8986946.348	Complejo	7.808
Uta	Q3_Z2_157	217753.158	8989442.579	Complejo	27.391
Uta	Q3_Z2_158	217675.121	8987267.82	Caída	9.097
Uta	Q3_Z2_159	216899.039	8986552.82	Flujos	47.759
Uta	Q3_Z2_160	216502.072	8985298.967	Caída	25.346
Uta	Q3_Z3_161	217719.249	8991182.939	Complejo	87.718
Uta	Q3_Z3_162	218229.271	8991904.583	Complejo	48.908
Uta	Q3_Z3_163	216365.599	8991636.566	Complejo	29.362
Uta	Q3_Z3_164	221597.176	8988777.65	Flujos	29.922
Uta	Q3_Z3_165	221461.337	8990117.471	Flujos	21.591
Uta	Q3_Z3_166	221227.435	8990540.134	Flujos	12.569
Uta	Q3_Z3_167	222666.17	8991315.211	Flujos	17.523
Uta	Q3_Z3_168	220953.306	8990191.008	Des. Rotacional	29.585
Uta	Q3_Z3_169	220725.521	8988291.239	Caída	58.128
Uta	Q3_Z3_170	222995.866	8993182.475	Caída	15.602

Uta	Q3_Z3_171	220763.047	8989354.182	Caída	34.031
Uta	Q3_Z3_172	221473.604	8989271.051	Caída	13.152
Uta	Q3_Z3_173	222686.948	8992596.978	Caída	28.878
Uta	Q3_Z3_174	221991.878	8993014.871	Caída	27.006
Uta	Q3_Z3_175	221825.225	8990819.835	Complejo	45.335
Uta	Q3_Z3_176	221330.311	8991214.028	Complejo	40.076
Uta	Q3_Z3_177	223752.73	8991178.85	Complejo	45.471
Uta	Q3_Z3_178	221036.405	8993558.252	Complejo	36.222
Uta	Q3_Z3_179	220883.302	8993199.268	Complejo	28.533
Uta	Q3_Z3_180	220181.47	8987994.902	Caída	22.346
Uta	Q3_Z3_181	220014.522	8988966.959	Flujos	7.802
Uta	Q3_Z3_182	220459.864	8988797.022	Flujos	24.264
Uta	Q3_Z3_183	217033.496	8992271.335	Complejo	42.451
Uta	Q3_Z3_184	217783.878	8992537.523	Complejo	14.931
Uta	Q3_Z3_185	218409.29	8992275.739	Complejo	14.016
Uta	Q3_Z3_186	219175.555	8992343.567	Complejo	46.501
Uta	Q3_Z3_187	218973.864	8991990.49	Complejo	7.127
Uta	Q3_Z3_188	218399.274	8992505.779	Complejo	13.614
Uta	Q3_Z3_189	223412.346	8991636.559	Complejo	40.071
Uta	Q3_Z3_190	221024.167	8988993.708	Caída	30.227
Uta	Q3_Z3_191	223580.095	8989866.339	Caída	20.692
Uta	Q3_Z3_192	222460.76	8989564.859	Caída	4.173
Honda	Q4_Z1_193	219447.536	8971126.575	Complejo	45.135
Honda	Q4_Z1_194	226590.977	8964699.355	Complejo	180.086
Honda	Q4_Z1_195	223342.757	8965839.088	Complejo	43.931
Honda	Q4_Z1_196	223604.763	8964878.997	Complejo	42.575
Honda	Q4_Z1_197	224688.121	8965252.121	Complejo	24.049
Honda	Q4_Z1_198	225656.918	8966128.913	Complejo	81.468
Honda	Q4_Z1_199	224580.825	8968048.648	Complejo	201.073
Honda	Q4_Z1_200	220649.666	8971144.642	Complejo	150.142
Honda	Q4_Z1_201	221234.388	8970435.705	Complejo	37.374
Honda	Q4_Z1_202	224471.51	8966636.454	Caída	12.37
Honda	Q4_Z1_203	224751.51	8966525.809	Caída	15.576
Honda	Q4_Z1_204	221086.823	8964830.309	Flujos	17.999
Honda	Q4_Z1_205	220827.471	8965603.517	Flujos	7.02
Honda	Q4_Z1_206	223510.046	8965324.818	Flujos	26.883
Honda	Q4_Z1_207	223188.03	8965385.152	Flujos	15.607
Honda	Q4_Z1_208	224192.445	8966095.528	Flujos	14.775
Honda	Q4_Z1_209	223818.817	8965867.885	Flujos	6.193
Honda	Q4_Z1_210	220251.854	8973215.887	Flujos	5.868
Honda	Q4_Z1_211	214343.58	8968274.558	Flujos	35.167
Honda	Q4_Z1_212	223932.222	8965810.21	Des. Rotacional	1.969
Honda	Q4_Z1_213	220536.699	8970213.216	Des. Rotacional	8.496
Honda	Q4_Z1_214	220179.243	8970786.277	Des. Rotacional	4.405

Honda	Q4_Z1_215	219813.762	8970903.484	Des. Rotacional	2.234
Honda	Q4_Z1_216	218273.994	8970640.47	Des. Rotacional	3.702
Honda	Q4_Z1_217	216272.554	8968384.4	Des. Rotacional	14.262
Honda	Q4_Z1_218	220647.296	8966080.085	Des. Rotacional	2.861
Honda	Q4_Z1_219	219880.985	8972256.989	Complejo	95.464
Honda	Q4_Z1_220	221034.745	8972071.387	Complejo	49.048
Honda	Q4_Z1_221	223399.649	8969094.125	Complejo	22.013
Honda	Q4_Z1_222	223685.177	8968895.974	Complejo	23.83
Honda	Q4_Z1_223	224975.735	8965485.871	Complejo	17.555
Honda	Q4_Z1_224	224368.075	8965570.278	Complejo	36.153
Honda	Q4_Z1_225	221989.818	8965073.587	Complejo	72.175
Honda	Q4_Z1_226	223746.392	8966030.645	Complejo	7.74
Honda	Q4_Z1_227	216816.171	8968777.282	Flujos	0.259
Honda	Q4_Z1_228	218401.447	8967992.635	Flujos	13.932
Honda	Q4_Z2_229	227310.961	8963742.19	Complejo	26.422
Honda	Q4_Z2_230	229515.448	8964990.235	Complejo	53.092
Honda	Q4_Z2_231	233634.72	8967057.1	Complejo	39.184
Honda	Q4_Z2_232	233751.975	8966657.624	Complejo	9.136
Honda	Q4_Z2_233	231791.844	8967783.452	Complejo	21.711
Honda	Q4_Z2_234	231880.377	8967375.261	Complejo	21.641
Honda	Q4_Z2_235	233925.17	8969337.382	Complejo	37.818
Honda	Q4_Z2_236	232789.12	8972209.559	Complejo	16.773
Honda	Q4_Z2_237	231948.276	8971584.006	Complejo	27.725
Honda	Q4_Z2_238	228365.151	8969955.177	Complejo	17.538
Honda	Q4_Z2_239	227896.628	8969834.113	Complejo	15.127
Honda	Q4_Z2_240	227463.412	8970419.748	Complejo	17.477
Honda	Q4_Z2_241	227209.72	8970035.624	Complejo	10.019
Honda	Q4_Z2_242	226728.344	8970029.805	Complejo	8.083
Honda	Q4_Z2_243	224002.002	8968841.42	Complejo	12.356
Honda	Q4_Z2_244	222739.672	8970757.705	Complejo	15.163
Honda	Q4_Z2_245	223077.484	8970290.158	Complejo	32.858
Honda	Q4_Z2_246	226681.384	8970761.506	Complejo	59.525
Honda	Q4_Z2_247	224483.09	8972514.449	Complejo	8.938
Honda	Q4_Z2_248	225186.489	8972047.765	Complejo	14.435
Honda	Q4_Z2_249	227969.674	8971865.163	Complejo	62.208
Honda	Q4_Z2_250	228837.204	8972558.603	Complejo	39.37
Honda	Q4_Z2_251	229370.895	8972226.812	Complejo	32.497
Honda	Q4_Z2_252	230068.033	8972285.029	Complejo	8.867
Honda	Q4_Z2_253	227909.509	8970858.695	Complejo	8.963
Honda	Q4_Z2_254	225643.497	8970202.595	Complejo	17.316
Honda	Q4_Z2_255	226707.008	8969382.271	Complejo	9.144
Honda	Q4_Z2_256	234390.049	8965918.314	Complejo	11.427
Honda	Q4_Z2_257	230029.934	8967147.583	Caída	51.129
Honda	Q4_Z2_258	232649.907	8967855.503	Caída	15.124

Honda	Q4_Z2_259	225555.689	8967150.799	Caída	24.428
Honda	Q4_Z2_260	225291.221	8967335.521	Caída	3.521
Honda	Q4_Z2_261	227651.635	8968702.385	Caída	4.543
Honda	Q4_Z2_262	227076.219	8968529.635	Caída	3.785
Honda	Q4_Z2_263	228496.506	8968491.771	Caída	9.854
Honda	Q4_Z2_264	229298.814	8968743.448	Caída	9.763
Honda	Q4_Z2_265	229039.829	8969125.241	Caída	4.944
Honda	Q4_Z2_266	229783.429	8968968.566	Caída	10.954
Honda	Q4_Z2_267	229559.904	8969309.237	Caída	3.993
Honda	Q4_Z2_268	230567.854	8969203.272	Caída	9.402
Honda	Q4_Z2_269	231619.648	8970109.577	Caída	49.546
Honda	Q4_Z2_270	231187.328	8969419.687	Caída	4.589
Honda	Q4_Z2_271	232891.971	8970136.473	Caída	29.053
Honda	Q4_Z2_272	230221.965	8973493.563	Caída	16.972
Honda	Q4_Z2_273	223516.746	8972798.778	Caída	18.565
Honda	Q4_Z2_274	226456.247	8967569.545	Caída	27.452
Honda	Q4_Z2_275	227624.603	8968152.778	Caída	43.05
Honda	Q4_Z2_276	228972.798	8968646.979	Caída	11.411
Honda	Q4_Z2_277	228556.44	8969056.901	Caída	22.42
Honda	Q4_Z2_278	228889.357	8969090.316	Caída	7.051
Honda	Q4_Z2_279	229247.036	8969171.431	Caída	9.18
Honda	Q4_Z2_280	229532.713	8968769.92	Caída	5.719
Honda	Q4_Z2_281	230161.246	8969092.511	Caída	9.268
Honda	Q4_Z2_282	230385.261	8969708.417	Caída	33.549
Honda	Q4_Z2_283	232099.844	8969695.709	Caída	103.954
Honda	Q4_Z2_284	228563.787	8964592.94	Flujos	20.381
Honda	Q4_Z2_285	226699.946	8965759.918	Flujos	21.839
Honda	Q4_Z2_286	226037.713	8967901.535	Flujos	13.054
Honda	Q4_Z2_287	226992.914	8967984.644	Flujos	12.043
Honda	Q4_Z2_288	228625.186	8968371.475	Flujos	3.034
Honda	Q4_Z2_289	233392.125	8970403.305	Flujos	26.141
Honda	Q4_Z2_290	228756.326	8969058.442	Des. Rotacional	4.86
Honda	Q4_Z2_291	229820.333	8969519.48	Caída	15.565
Honda	Q4_Z2_292	229378.102	8969283.31	Caída	3.283
Honda	Q4_Z2_293	222677.241	8971408.634	Complejo	45.104
Honda	Q4_Z2_294	224308.921	8973071.362	Complejo	6.737
Honda	Q4_Z2_295	224616.532	8972790.05	Complejo	18.715
Honda	Q4_Z2_296	230094.266	8972735.988	Complejo	39.665
Honda	Q4_Z2_297	233244.371	8967473.419	Complejo	16.825
Honda	Q4_Z3_298	237157.698	8968445.274	Complejo	71.859
Honda	Q4_Z3_299	238934.509	8966705.455	Complejo	102.33
Honda	Q4_Z3_300	238800.708	8966032.065	Complejo	25.346
Honda	Q4_Z3_301	242617.166	8967147.432	Complejo	12.574
Honda	Q4_Z3_302	242706.149	8967469.188	Complejo	30.498

Honda	Q4_Z3_303	242466.915	8969642.106	Complejo	8.139
Honda	Q4_Z3_304	242659.476	8968958.568	Complejo	4.903
Honda	Q4_Z3_305	238652.208	8970152.513	Complejo	69.048
Honda	Q4_Z3_306	235794.323	8969533.864	Complejo	27.586
Honda	Q4_Z3_307	236151.328	8969636.675	Complejo	9.384
Honda	Q4_Z3_308	235369.004	8969653.526	Complejo	19.34
Honda	Q4_Z3_309	235168.633	8972205.6	Complejo	6.14
Honda	Q4_Z3_310	235761.79	8972253.809	Complejo	5.15
Honda	Q4_Z3_311	240521.879	8970205.746	Complejo	8.781
Honda	Q4_Z3_312	234250.379	8970765.113	Caída	14.404
Honda	Q4_Z3_313	234588.074	8971396.955	Caída	21.196
Honda	Q4_Z3_314	235181.689	8971083.63	Caída	10.568
Honda	Q4_Z3_315	238234.076	8968607.107	Caída	32.247
Honda	Q4_Z3_316	240135.852	8969538.139	Caída	5.039
Honda	Q4_Z3_317	240966.707	8968113.533	Caída	14.762
Honda	Q4_Z3_318	233737.444	8970985.162	Caída	49.309
Honda	Q4_Z3_319	238515.511	8971010.831	Caída	39.042
Honda	Q4_Z3_320	239174.353	8969727.746	Caída	30.47
Honda	Q4_Z3_321	240774.764	8968856.616	Caída	18.732
Honda	Q4_Z3_322	240773.456	8967767.008	Caída	10.18
Honda	Q4_Z3_323	240836.623	8967515.244	Caída	12.34
Honda	Q4_Z3_324	234567.926	8971004.368	Flujos	22.583
Honda	Q4_Z3_325	238080.05	8971106.228	Flujos	16.834
Honda	Q4_Z3_326	239580.313	8970356.653	Flujos	4.149
Honda	Q4_Z3_327	240776.518	8969841.345	Flujos	22.168
Honda	Q4_Z3_328	241656.064	8968684.212	Flujos	75.484
Honda	Q4_Z3_329	240668.854	8967582.43	Flujos	16.129
Honda	Q4_Z3_330	235501.843	8971476.254	Caída	34.753
Honda	Q4_Z3_331	235152.786	8971513.248	Flujos	8.541
Honda	Q4_Z3_332	239671.037	8969639.2	Caída	11.761
Honda	Q4_Z3_333	239943.77	8969604.315	Caída	4.02
Honda	Q4_Z3_334	242046.769	8966708.065	Complejo	36.862
Llaca	Q5_Z1_335	228496.43	8950538.026	Complejo	93.881
Llaca	Q5_Z1_336	227453.406	8950560.269	Complejo	150.511
Llaca	Q5_Z1_337	227022.43	8949905.034	Complejo	9.99
Llaca	Q5_Z1_338	226999.633	8950507.013	Complejo	1.6
Llaca	Q5_Z1_339	229257.531	8952274.198	Caída	11.385
Llaca	Q5_Z1_340	229052.741	8952428.074	Caída	11.153
Llaca	Q5_Z1_341	227163.048	8950148.753	Des. Rotacional	3.041
Llaca	Q5_Z1_342	228063.02	8950558.679	Des. Rotacional	3.601
Llaca	Q5_Z1_343	228147.987	8950247.665	Des. Rotacional	9.586
Llaca	Q5_Z1_344	229676.739	8952895.975	Caída	26.158
Llaca	Q5_Z2_345	229406.379	8953051.197	Caída	7.165
Llaca	Q5_Z2_346	230139.775	8953569.379	Caída	2.274

Llaca	Q5_Z2_347	230519.571	8954058.469	Caída	14.924
Llaca	Q5_Z2_348	230169.698	8954171.488	Caída	2.787
Llaca	Q5_Z2_349	230338.102	8953703.954	Caída	6.883
Llaca	Q5_Z2_350	229678.351	8953408.5	Caída	10.206
Llaca	Q5_Z2_351	229182.952	8952758.335	Caída	2.085
Llaca	Q5_Z2_352	229331.606	8953008.963	Caída	1.784
Llaca	Q5_Z2_353	230728.561	8954483.141	Flujos	6.248
Llaca	Q5_Z2_354	230249.332	8954546.507	Flujos	13.255
Llaca	Q5_Z2_355	230096.386	8953338.626	Flujos	9.754
Llaca	Q5_Z2_356	229848.509	8953828.931	Caída	25.18
Llaca	Q5_Z2_357	230771.815	8954709.08	Flujos	1.804
Llaca	Q5_Z3_358	231679.981	8955919.24	Complejo	22.61
Llaca	Q5_Z3_359	230701.437	8954791.102	Complejo	9.991
Llaca	Q5_Z3_360	230574.238	8954912.013	Complejo	7.741
Llaca	Q5_Z3_361	231537.202	8956478.243	Complejo	17.986
Llaca	Q5_Z3_362	230684.551	8955322.801	Caída	21.139
Llaca	Q5_Z3_363	231678.436	8955756.012	Caída	24.495
Llaca	Q5_Z3_364	232289.589	8956924.228	Caída	21.328
Llaca	Q5_Z3_365	231886.608	8957135.112	Caída	23.536
Llaca	Q5_Z3_366	231094.012	8955550.923	Flujos	1.602
Llaca	Q5_Z3_367	230903.093	8955094.051	Flujos	1.698
Llaca	Q5_Z3_368	231042.254	8955842.369	Flujos	6.693
Cojup	Q6_Z1_369	228692.07	8949406.216	Complejo	147.093
Cojup	Q6_Z1_370	229611.459	8949623.868	Complejo	121.634
Cojup	Q6_Z1_371	229990.652	8950457.2	Des. Rotacional	9.99
Cojup	Q6_Z1_372	230341.584	8950354.999	Des. Rotacional	4.804
Cojup	Q6_Z1_373	229788.689	8950540.948	Des. Rotacional	26.111
Cojup	Q6_Z1_374	230732.013	8950974.624	Caída	21.997
Cojup	Q6_Z1_375	230573.551	8950633.676	Flujos	0.431
Cojup	Q6_Z1_376	230672.07	8950662.336	Flujos	0.553
Cojup	Q6_Z1_377	230256.968	8950569.215	Flujos	0.741
Cojup	Q6_Z2_378	231404.54	8951156.191	Caída	5.404
Cojup	Q6_Z2_379	232897.88	8952546.201	Caída	7.38
Cojup	Q6_Z2_380	231079.291	8951352.94	Caída	3.493
Cojup	Q6_Z2_381	231321.892	8951688.396	Caída	6.079
Cojup	Q6_Z2_382	231574.68	8951943.067	Caída	2.99
Cojup	Q6_Z2_383	232407.819	8952880.402	Caída	47.604
Cojup	Q6_Z2_384	232890.619	8953490.16	Caída	15.098
Cojup	Q6_Z2_385	232889.371	8953911.149	Caída	6.757
Cojup	Q6_Z2_386	233660.201	8954055.83	Caída	21.872
Cojup	Q6_Z2_387	234172.388	8954691.676	Caída	29.588
Cojup	Q6_Z2_388	233924.949	8953661.817	Caída	8.169
Cojup	Q6_Z2_389	234116.015	8953896.069	Caída	6.489
Cojup	Q6_Z2_390	235220.713	8955092.602	Flujos	7.54

Cojup	Q6_Z2_391	231881.096	8952446.829	Caída	25.831
Cojup	Q6_Z2_392	233361.343	8953288.213	Caída	6.559
Cojup	Q6_Z2_393	233141.96	8953826.723	Caída	18.578
Cojup	Q6_Z2_394	231216.627	8950741.885	Flujos	3.75
Cojup	Q6_Z2_395	231191.506	8951525.706	Flujos	1.763
Cojup	Q6_Z2_396	231483.662	8951824.238	Flujos	1.28
Cojup	Q6_Z2_397	233050.335	8952785.751	Flujos	4.907
Cojup	Q6_Z2_398	233240.55	8953058.746	Flujos	8.285
Cojup	Q6_Z2_399	232777.244	8953311.083	Flujos	6.312
Cojup	Q6_Z2_400	232972.103	8953662.408	Flujos	4.462
Cojup	Q6_Z2_401	234081.765	8953747.766	Flujos	3.186
Cojup	Q6_Z2_402	232797.829	8954522.991	Des. Rotacional	25.606
Cojup	Q6_Z2_403	234744.176	8954661.381	Caída	4.598
Cojup	Q6_Z2_404	234462.691	8954257.043	Caída	11.009
Cojup	Q6_Z2_405	235938.847	8956398.697	Caída	9.769
Cojup	Q6_Z2_406	234559.003	8955159.083	Caída	10.39
Cojup	Q6_Z2_407	231750.647	8952580.749	Caída	15.827
Cojup	Q6_Z2_408	235353.74	8955786.77	Flujos	13.201
Cojup	Q6_Z2_409	234959.439	8955644.87	Caída	25.763
Cojup	Q6_Z2_410	235659.142	8956031.88	Caída	13.995
Cojup	Q6_Z2_411	234927.201	8954915.609	Caída	6.569
Cojup	Q6_Z2_412	234632.173	8954526.348	Flujos	3.683
Cojup	Q6_Z2_413	232501.151	8952314.143	Caída	16.137
Cojup	Q6_Z2_414	231773.322	8951656.576	Caída	20.248
Cojup	Q6_Z2_415	231461.84	8951316.657	Flujos	3.6
Cojup	Q6_Z3_416	238174.212	8960264.499	Complejo	68.281
Cojup	Q6_Z3_417	236091.611	8959863.815	Complejo	32.921
Cojup	Q6_Z3_418	239422.239	8960850.26	Complejo	12.361
Cojup	Q6_Z3_419	238635.158	8960043.179	Complejo	28.132
Cojup	Q6_Z3_420	236226.32	8959006.074	Complejo	12.814
Cojup	Q6_Z3_421	234813.302	8956524.275	Complejo	101.001
Cojup	Q6_Z3_422	238198.276	8958437.642	Caída	94.675
Cojup	Q6_Z3_423	237098.893	8957864.709	Caída	77.379
Cojup	Q6_Z3_424	237514.779	8959040.454	Flujos	14.499
Cojup	Q6_Z3_425	239136.84	8960583.879	Des. Rotacional	5.73
Cojup	Q6_Z3_426	236706.236	8956750.59	Caída	4.028
Cojup	Q6_Z3_427	238426.845	8959394.96	Flujos	2.316
Cojup	Q6_Z3_428	237354.195	8957282.079	Caída	30.734
Cojup	Q6_Z3_429	237732.132	8957611.05	Flujos	5.583
Cojup	Q6_Z3_430	236503.933	8956989.28	Flujos	19.337
Cojup	Q6_Z3_431	236218.207	8955986.238	Caída	49.829

Anexo 2: Código en “R” para la generación y validación del modelo de susceptibilidad a movimientos en masa mediante regresión logística.

#Regresión logística Parón

```
names(Entrenamiento_Paron)

# Método de selección hacia atrás (Backward), creamos el modelo saturado

RLOG<- glm(formula = Var_depen~X_Curv_Perf+X_C_Tangenc+X_Pendiente+X_Elevacion
+X_Orientaci+X_Rugosidad+X_B12mean+X_NDVI_Hume+X_Litomajor+X_Geomorfol+X_Cobe_veg
e, Entrenamiento_Paron,family = binomial(link = "logit"))

summary(RLOG)

#Instalar y cargar la siguiente libreria

library(MASS)

# Emplear la función stepAIC, para el método de selección hacia atrás

modelo <- stepAIC(RLOG, trace=TRUE, direction="backward")

summary(modelo)

#Como las variables "X_Cobe_vege" y "X_Elevacion", no son significativas, se puede refinar el modelo

# modelo , retirando "X_Cobe_vege" y "X_Elevacion"

modelo <- update(modelo, ~. -X_Cobe_vege-X_Elevacion )

summary(modelo)

RLOG2<- glm(formula = Var_depen~X_Pendiente+X_B12mean+X_NDVI_Hume+X_Geomorfol,
Entrenamiento_Paron,family = binomial(link = "logit"))

summary(RLOG2)

#VALIDACIÓN

#La predicción con respecto al modelo mas optimo

Predict <- predict(RLOG2, Validacion_Paron)

#Estos valores no estan en el intervalo de 0 a 1 , por lo tanto se convierte

Pre<-plogis(Predict)

#Comparación de las predicciones con las observaciones

library(InformationValue)

#Punto de corte que maximo (threshold )

Puntodecorte<- optimalCutoff(Validacion_Paron$Var_depen,Pre,optimiseFor = "Both")

Puntodecorte

#Observaciones correctas

ObsCorrectas<-1-misClassError(Validacion_Paron$Var_depen,Pre,threshold=Puntodecorte)

ObsCorrectas

#Matriz de confusion
```

```

confusionMatrix(Validacion_Paron$Var_depen,Pre,threshold=Puntodecorte)

#View(Pre)

#Instalar y cargar la siguiente libreria
#install.packages("pROC")

library("pROC")

rocobj<- plot.roc(Validacion_Paron$Var_depen,Pre,smooth=FALSE,print.auc=T,
                  col="blue",xlab="1-ESpecificidad",ylab="Sensibilidad")

#Regresión logística Llanganuco

names(Entrenamienti_Llanganuco)

# Método de selección hacia atrás (Backward), creamos el modelo saturado
RLOG<- glm(formula = Var_depen~C_Perf+C_Tang+Pend+Elev
            +P_A+Orient+Rugo+NDVI_H+Geol+Geom+CV,      Entrenamienti_Llanganuco,family      =
            binomial(link = "logit"))

summary(RLOG)

#Instalar y cargar la siguiente libreria
library(MASS)

# Emplear la función stepAIC, para el método de selección hacia atrás
modelo <- stepAIC(RLOG, trace=TRUE, direction="backward")

summary(modelo)

#Como las variables "X_Cobe_vege" y "X_Elevacion", no son significativas, se puede refinar el modelo
# modelo , retirando "X_Cobe_vege" y "X_Elevacion"
modelo <- update(modelo, ~. -Elev )

summary(modelo)

RLOG2<- glm(formula = Var_depen~Pend + P_A + NDVI_H + Geol + Geom,
            Entrenamienti_Llanganuco,family = binomial(link = "logit"))

summary(RLOG2)

#VALIDACIÓN

#La prediccion con respecto al modelo mas optimo
Predict <- predict(RLOG2, Validacion_Llanganuco)

#Estos valores no estan en el intervalo de 0 a 1 , por lo tanto se convierte
Pre<-plogis(Predict)

#Comparación de las predicciones con las observaciones
library(InformationValue)

#Punto de corte que maximo (threshold )

Puntodecorte<- optimalCutoff(Validacion_Llanganuco$Var_depen,Pre,optimiseFor = "Both")

```

```

Puntodecorte
#Observaciones correctas
ObsCorrectas<-1-misClassError(Validacion_Llanganuco$Var_depen,Pre,threshold=Puntodecorte)
ObsCorrectas
#Matriz de confusion
confusionMatrix(Validacion_Llanganuco$Var_depen,Pre,threshold=Puntodecorte)
#View(Pre)
#Instalar y cargar la siguiente libreria
#install.packages("pROC")
library("pROC")
rocobj<- plot.roc(Validacion_Llanganuco$Var_depen,Pre,smooth=TRUE,print.auc=T,
                  col="blue",xlab="1-ESpecificidad",ylab="Sensibilidad")

#Regresión logística Ulta
names(Entrenamiento_Ulta)
# Método de selección hacia atrás (Backward), creamos el modelo saturado
RLOG<- glm(formula = Var_depen~C_Perf+C_Tang+Pend+Elev
            +P_A+Orient+Rugo+NDVI_H+Geol+Geom+CV, Entrenamiento_Ulta,family = binomial(link =
"logit"))
summary(RLOG)
#Instalar y cargar la siguiente libreria
library(MASS)
# Emplear la función stepAIC, para el método de selección hacia atrás
modelo <- stepAIC(RLOG, trace=TRUE, direction="backward")
summary(modelo)
RLOG2<- glm(formula = Var_depen~Pend + NDVI_H + Geol + Geom + CV, Entrenamiento_Ulta,family
= binomial(link = "logit"))
summary(RLOG2)

#VALIDACIÓN
#La prediccion con respecto al modelo mas optimo
Predict <- predict(RLOG2, Validacion_Ulta)
#Estos valores no estan en el intervalo de 0 a 1 , por lo tanto se convierte
Pre<-plogis(Predict)
#Comparación de las predicciones con las observaciones
library(InformationValue)
#Punto de corte que maximo (threshold )

```

```

Puntodecorte<- optimalCutoff(Validacion_Ulta$Var_depen,Pre,optimiseFor = "Both")

Puntodecorte

#Observaciones correctas

ObsCorrectas<- 1-misClassError(Validacion_Ulta$Var_depen,Pre,threshold=Puntodecorte)

ObsCorrectas

#Matriz de confusion

confusionMatrix(Validacion_Ulta$Var_depen,Pre,threshold=Puntodecorte)

#View(Pre)

#Instalar y cargar la siguiente libreria

#install.packages("pROC")

library("pROC")

rocobj<- plot.roc(Validacion_Ulta$Var_depen,Pre,smooth=FALSE,print.auc=T,
                 col="blue",xlab="1-ESpecificidad",ylab="Sensibilidad")

#Regresión logística Honda

names(Entrenamiento_Honda)

# Método de selección hacia atrás (Backward), creamos el modelo saturado

RLOG<- glm(formula = Var_depen~C_Perf+C_Tang+Pend+Elev
           +P_A+Orient+Rugo+NDVI_H+Geol+Geom+CV, Entrenamiento_Honda,family = binomial(link =
"logit"))

summary(RLOG)

#Instalar y cargar la siguiente libreria

library(MASS)

# Emplear la función stepAIC, para el método de selección hacia atrás

modelo <- stepAIC(RLOG, trace=TRUE, direction="backward")

summary(modelo)

#Como las variables Rugo, no son significativas, se puede refinar el modelo

# modelo , retirando Rugo

modelo <- update(modelo, ~. -Rugo )

summary(modelo)

RLOG2<- glm(formula = Var_depen~Pend + Elev + Geol + Geom, Entrenamiento_Honda,family =
binomial(link = "logit"))

summary(RLOG2)

#VALIDACIÓN

#La prediccion con respecto al modelo mas optimo

Predict <- predict(RLOG2, Validacion_Honda)

```

```

#Estos valores no estan en el intervalo de 0 a 1 , por lo tanto se convierte
Pre<-plogis(Predict)
#Comparación de las predicciones con las observaciones
library(InformationValue)
#Punto de corte que maximo (threshold )
Puntodecorte<- optimalCutoff(Validacion_Honda$Var_depen,Pre,optimiseFor = "Both")
Puntodecorte
#Observaciones correctas
ObsCorrectas<- 1-misClassError(Validacion_Honda$Var_depen,Pre,threshold=Puntodecorte)
ObsCorrectas
#Matriz de confusion
confusionMatrix(Validacion_Honda$Var_depen,Pre,threshold=Puntodecorte)
#View(Pre)
#Instalar y cargar la siguiente libreria
#install.packages("pROC")
library("pROC")
rocobj<- plot.roc(Validacion_Honda$Var_depen,Pre,smooth=FALSE,print.auc=T,
                 col="blue",xlab="1-Especificidad",ylab="Sensibilidad")

```

#Regresión logística Llaca

```

names(Entrenamiento_Llaca)
# Método de selección hacia atrás (Backward), creamos el modelo saturado
RLOG<- glm(formula = Var_depen~C_Perf+C_Tang+Pend+Elev
            +P_A+Orient+Rugo+NDVI_H+Geol+Geom+CV, Entrenamiento_Llaca,family = binomial(link =
"logit"))
summary(RLOG)
library(MASS)
# Emplear la función stepAIC, para el método de selección hacia atrás
modelo <- stepAIC(RLOG, trace=TRUE, direction="backward")
summary(modelo)
#Como las variables "X_Cobe_vege" y "X_Elevacion", no son significativas, se puede refinar el modelo
# modelo , retirando "X_Cobe_vege" y "X_Elevacion"
modelo <- update(modelo, ~. -Orient-Elev-C_Perf-Geol )
summary(modelo)
RLOG2<- glm(formula = Var_depen~Pend + NDVI_H, Entrenamiento_Llaca,family = binomial(link =
"logit"))

```

```

summary(RLOG2)
#VALIDACIÓN
#La prediccion con respecto al modelo mas optimo
Predict <- predict(RLOG2, Validacion_Llaca)
#Estos valores no estan en el intervalo de 0 a 1 , por lo tanto se convierte
Pre<-plogis(Predict)
#Comparación de las predicciones con las observaciones
library(InformationValue)
#Punto de corte que maximo (threshold )
Puntodecorte<- optimalCutoff(Validacion_Llaca$Var_depen,Pre,optmiseFor = "Both")
Puntodecorte
#Observaciones correctas
ObsCorrectas<- 1-misClassError(Validacion_Llaca$Var_depen,Pre,threshold=Puntodecorte)
ObsCorrectas
#Matriz de confusion
confusionMatrix(Validacion_Llaca$Var_depen,Pre,threshold=Puntodecorte)
#View(Pre)
#Instalar y cargar la siguiente libreria
#install.packages("pROC")
library("pROC")
rocobj<- plot.roc(Validacion_Llaca$Var_depen,Pre,smooth=FALSE,print.auc=T,
                 col="blue",xlab="1-Especificidad",ylab="Sensibilidad")
#Regresión logística Cojup
names(Entrenamiento_Cojup)
# Método de selección hacia atrás (Backward), creamos el modelo saturado
RLOG<- glm(formula = Var_depen~C_Perf+C_Tang+Pend+Elev
            +P_A+Orient+Rugo+NDVI_H+Geol+Geom+CV, Entrenamiento_Cojup,family = binomial(link =
"logit"))
summary(RLOG)
#Instalar y cargar la siguiente libreria
library(MASS)
# Emplear la función stepAIC, para el método de selección hacia atrás
modelo <- stepAIC(RLOG, trace=TRUE, direction="backward")
summary(modelo)

```

```

RLOG2<- glm(formula = Var_depen~Pend + Elev + P_A + Geom + CV, Entrenamiento_Cojup,family =
binomial(link = "logit"))

summary(RLOG2)

#VALIDACIÓN

#La predicción con respecto al modelo más óptimo

Predict <- predict(RLOG2,Validacion_Cojup )

#Estos valores no están en el intervalo de 0 a 1 , por lo tanto se convierte

Pre<-plogis(Predict)

#Comparación de las predicciones con las observaciones

library(InformationValue)

#Punto de corte que máximo (threshold )

Puntodecorte<- optimalCutoff(Validacion_Cojup$Var_depen,Pre,optimizeFor = "Both")

Puntodecorte

#Observaciones correctas

ObsCorrectas<- 1-misClassError(Validacion_Cojup$Var_depen,Pre,threshold=Puntodecorte)

ObsCorrectas

#Matriz de confusión

confusionMatrix(Validacion_Cojup$Var_depen,Pre,threshold=Puntodecorte)

#View(Pre)

#Instalar y cargar la siguiente librería

#install.packages("pROC")

library("pROC")

rocobj<- plot.roc(Validacion_Cojup$Var_depen,Pre,smooth=FALSE,print.auc=T,
col="blue",xlab="1 -Especificidad",ylab="Sensibilidad")

```

Anexo 3: Código en “R” para la validación (área bajo la curva) de los modelos mediante proceso de análisis jerárquico.

#Validación ROC_Parón (AHP)

```
names(Validacion_ROC_AHP_Paron)
Datos <- data.frame(Validacion_ROC_AHP_Paron)
#filter(Datos, Queb_cod == Q1)
#Q1 <-subset(Datos, Queb_cod == "Q1")
#View(Q1)
#VALIDACIÓN
#La prediccion con respecto al modelo mas optimo
Predict_Q1<-
0.57*Datos$X_Pendmajority+0.25*Datos$X_GEOM_AHPmajority+0.14*Datos$X_NDVI_AHPmajority
+0.04*Datos$X_BIO12_AHPmajority
summary(Predict_Q1)
#View(Predict_Q1)
Pre_Q1<-plogis(Predict_Q1)
#View(Pre_Q1)
#Comparación de las predicciones con las observaciones
library(InformationValue)
#Punto de corte que maximo (threshold )
Puntodecorte_Q1<- optimalCutoff(Datos$Var_depen,Pre_Q1,optimizeFor = "Both")
Puntodecorte_Q1
#Observaciones correctas
ObsCorrectas_Q1<-1-misClassError(Datos$Var_depen,Pre_Q1,threshold=Puntodecorte_Q1)
ObsCorrectas_Q1
#Instalar y cargar la siguiente libreria
#install.packages("pROC")
library("pROC")
rocobj_Q1<- plot.roc(Datos$Var_depen,Pre_Q1,smooth=FALSE,print.auc=T,
                     col="blue",xlab="1-ESpecificidad",ylab="Sensibilidad")
```

#Validación ROC_Llanganuco(AHP)

```
names(Validacion_ROC_AHP_Llang)
Datos <- data.frame(Validacion_ROC_AHP_Llang)
#VALIDACIÓN
#La predicción con respecto al modelo más optimo
```

```

Predict_Q1<-
0.511*Datos$X_Pendmajority+0.241*Datos$X_GEOM_AHPmajority+0.103*Datos$X_Geol_AHPmajority+0.103*Datos$X_NDVI_AHPmajority+0.043*Datos$X_BIO12_AHPmajority

summary(Predict_Q1)

#View(Predict_Q1)

Pre_Q1<-plogis(Predict_Q1)

#View(Pre_Q1)

#Comparación de las predicciones con las observaciones

library(InformationValue)

#Punto de corte que maximo (threshold )

Puntodecorte_Q1<- optimalCutoff(Datos$Var_depen,Pre_Q1,optimiseFor = "Both")

Puntodecorte_Q1

#Observaciones correctas

ObsCorrectas_Q1<-1-misClassError(Datos$Var_depen,Pre_Q1,threshold=Puntodecorte_Q1)

ObsCorrectas_Q1

#Instalar y cargar la siguiente libreria

#install.packages("pROC")

library("pROC")

rocobj_Q1<- plot.roc(Datos$Var_depen,Pre_Q1,smooth=FALSE,print.auc=T,
                     col="blue",xlab="1-ESpecificidad",ylab="Sensibilidad")

#Validación ROC_Ulta(AHP)

names(Validacion_ROC_AHP_Ulta)

Datos <- data.frame(Validacion_ROC_AHP_Ulta)

#VALIDACIÓN

#La prediccion con respecto al modelo mas optimo

Predict_Q1<-
0.535*Datos$X_Pendmajority+0.232*Datos$X_GEOM_AHPmajority+0.131*Datos$X_Geol_AHPmajority+0.065*Datos$X_NDVI_AHPmajority+0.037*Datos$X_BIO12_AHPmajority

summary(Predict_Q1)

#View(Predict_Q1)

Pre_Q1<-plogis(Predict_Q1)

View(Pre_Q1)

#Comparación de las predicciones con las observaciones

library(InformationValue)

#Punto de corte que maximo (threshold )

Puntodecorte_Q1<- optimalCutoff(Datos$Var_depen,Pre_Q1,optimiseFor = "Both")

```

```

Puntodecorte_Q1
#Observaciones correctas
ObsCorrectas_Q1<-1-misClassError(Datos$Var_depen,Pre_Q1,threshold=Puntodecorte_Q1)
ObsCorrectas_Q1
#Instalar y cargar la siguiente libreria
#install.packages("pROC")
library("pROC")
rocobj_Q1<- plot.roc(Datos$Var_depen,Pre_Q1,smooth=FALSE,print.auc=T,
                     col="blue",xlab="1-ESpecificidad",ylab="Sensibilidad")

#Validación ROC_Honda(AHP)
names(Validacion_ROC_AHP_Honda)
Datos <- data.frame(Validacion_ROC_AHP_Honda)
#VALIDACIÓN
#La prediccion con respecto al modelo mas optimo
Predict_Q1<-
0.462*Datos$X_Pendmajority+0.261*Datos$X_GEOM_AHPmajority+0.155*Datos$X_Geol_AHPmajority+0.080*Datos$X_NDVI_AHPmajority+0.041*Datos$X_BIO12_AHPmajority
summary(Predict_Q1)
View(Predict_Q1)
Pre_Q1<-plogis(Predict_Q1)
View(Pre_Q1)
#Comparación de las predicciones con las observaciones
library(InformationValue)
#Punto de corte que maximo (threshold )
Puntodecorte_Q1<- optimalCutoff(Datos$Var_depen,Pre_Q1,optimizeFor = "Both")
Puntodecorte_Q1
#Observaciones correctas
ObsCorrectas_Q1<-1-misClassError(Datos$Var_depen,Pre_Q1,threshold=Puntodecorte_Q1)
ObsCorrectas_Q1
#Instalar y cargar la siguiente libreria
#install.packages("pROC")
library("pROC")
rocobj_Q1<- plot.roc(Datos$Var_depen,Pre_Q1,smooth=FALSE,print.auc=T,
                     col="blue",xlab="1-ESpecificidad",ylab="Sensibilidad")

#Validación ROC_Llaca(AHP)

```

```

Datos <- data.frame(Validacion_ROC_AHP_Llaca)
#VALIDACIÓN
#La prediccion con respecto al modelo mas optimo
Predict_Q1<-
0.643*Datos$X_Pendmajority+0.183*Datos$X_NDVI_AHPmajority+0.130*Datos$X_Geol_AHPmajority+0.044*Datos$X_BIO12_AHPmajority
summary(Predict_Q1)
View(Predict_Q1)
Pre_Q1<-plogis(Predict_Q1)
View(Pre_Q1)
#Comparación de las predicciones con las observaciones
library(InformationValue)
#Punto de corte que maximo (threshold )
Puntodecorte_Q1<- optimalCutoff(Datos$Var_depen,Pre_Q1,optimizeFor = "Both")
Puntodecorte_Q1
#Observaciones correctas
ObsCorrectas_Q1<-1-misClassError(Datos$Var_depen,Pre_Q1,threshold=Puntodecorte_Q1)
ObsCorrectas_Q1
#Instalar y cargar la siguiente libreria
#install.packages("pROC")
library("pROC")
rocobj_Q1<- plot.roc(Datos$Var_depen,Pre_Q1,smooth=FALSE,print.auc=T,
                     col="blue",xlab="1-ESpecificidad",ylab="Sensibilidad")

```

#Validación ROC_Cojupe(AHP)

```

Datos <- data.frame(Validacion_ROC_AHP_Cojupe)
#VALIDACIÓN
#La prediccion con respecto al modelo mas optimo
Predict_Q1<-
0.596*Datos$X_Pendmajority+0.266*Datos$X_Geom_AHPmajority+0.089*Datos$X_Geol_AHPmajority+0.050*Datos$X_BIO12_AHPmajority
summary(Predict_Q1)
View(Predict_Q1)
Pre_Q1<-plogis(Predict_Q1)
View(Pre_Q1)
#Comparación de las predicciones con las observaciones
library(InformationValue)

```

```
#Punto de corte que maximo (threshold )
Puntodecorte_Q1<- optimalCutoff(Datos$Var_depen,Pre_Q1,optimiseFor = "Both")
Puntodecorte_Q1
#Observaciones correctas
ObsCorrectas_Q1<-1-misClassError(Datos$Var_depen,Pre_Q1,threshold=Puntodecorte_Q1)
ObsCorrectas_Q1
#Instalar y cargar la siguiente libreria
#install.packages("pROC")
library("pROC")
rocobj_Q1<- plot.roc(Datos$Var_depen,Pre_Q1,smooth=FALSE,print.auc=T,
                     col="blue",xlab="1-ESpecificidad",ylab="Sensibilidad")
```