

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS
HIDROGRÁFICAS**



**“IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RIESGO POR
DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA
SATURACIÓN DE SUELOS EN LA MICROCUENCA MARIÑO,
ABANCAY”**

Presentada por:

ANGEL MALDONADO MENDIVIL

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS
HIDROGRÁFICAS**

Lima - Perú

2021

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS
HIDROGRÁFICAS**

**“IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RIESGO POR
DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA
SATURACIÓN DE SUELOS EN LA MICROCUENCA MARIÑO,
ABANCAY”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

ANGEL MALDONADO MENDIVIL

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Abel Mejía Marcacuzco
PRESIDENTE

Mg.Sc. Guillermo Clemente Aguilar Giraldo
ASESOR

Mg.Sc. Ricardo Apacla Nalvarte
MIEMBRO

Dr. Néstor Montalvo Archiñigo
MIEMBRO

DEDICATORIA

A mis queridos padres Ángel Maldonado Pimentel y Delia Mercedes Mendivil Ramírez por su cariño, por su apoyo incondicional y su sacrificio de sacar a sus hijos adelante y sus sabias enseñanzas que con ejemplo de lucha constante y de superación representan la inspiración para sus hijos y nietos.

A mi abuelo Daniel Mendivil Pozo por el afecto y generosidad con sus nietos y que ahora nos guía desde el cielo.

A mis hermanos Silvia y José Carlos por su apoyo moral, cariño y desprendimiento incondicional hacia mi persona.

A Rosmery Bravo Donaíres mi esposa y compañera de toda la vida por su comprensión y su apoyo incondicional.

A mis hijos Angelia y Ángel Luis que representan el impulso para seguir mejorando cada día.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial, al Mg.Sc. Guillermo Clemente Aguilar Giraldo patrocinador de mi tesis por su apoyo y la oportunidad de compartir sus conocimientos conmigo, por su paciencia, comprensión y soporte para el desarrollo y finalización de esta Tesis.

A los miembros del jurado del presente trabajo de investigación en especial al Dr. Abel Jesús Mejía Marcacuzco, Dr. Néstor Montalvo Arquñigo y Mg.Sc. Ricardo Apallca Nalvarte, por la revisión y sus valiosos aportes para la conclusión de la tesis.

Al Gobierno Regional de Apurímac y a la Municipalidad Provincial de Abancay por darme la oportunidad de ser parte de dichas instituciones y desarrollarme como profesional al servicio de mi tierra y pueblo Apurimeño.

Finalmente, agradecer a todos aquellos que me han ayudado de diferentes maneras y cuya lista de nombres no me atrevo a escribir por riesgo a olvidarme de alguien, aunque cada una de ellas, sabe de mi agradecimiento personalmente.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	2
1.2.1	Objetivo general.....	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1	ANTECEDENTES.....	3
2.2	ESTABILIDAD DE LADERAS E INDICE DE HUMEDAD.....	9
2.2.1	Factor de seguridad.....	9
2.2.2	Métodos de cálculo.....	10
2.2.3	Análisis de estabilidad de laderas.....	11
2.2.4	Método del análisis de estabilidad de laderas en SINMAP.....	13
2.2.5	Índice de humedad topográfica.....	18
2.3	ÍNDICE DE ESTABILIDAD EN LADERAS.....	20
2.4	MÉTODOS DEL MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL.....	32
2.4.1	Modelos de elevación digital.....	32
2.4.2	Correcciones de llenado de vacíos.....	32
2.4.3	Pendientes y direcciones de flujo.....	33
2.4.4	Área de la cuenca específica o área de contribución.....	35
2.4.5	Índice de estabilidad y humedad del índice de estabilidad en el entorno SIG.....	36
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
3.1	UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	38
3.1.1	Ubicación del ámbito de estudio.....	38
3.1.2	Geomorfología.....	40
3.1.3	Geología.....	46
3.1.4	Hidrogeología.....	56

3.1.5 Climatología.....	65
3.1.6 Hidrografía.....	74
3.1.7 Hidrología.....	77
3.2 MATERIALES Y EQUIPOS.....	92
3.2.1 Materiales.....	92
3.2.2 Métodos.....	92
3.2.3 Datos de Entrada.....	95
3.2.4 Modelo de elevación digital.....	95
3.2.5 Inventario de deslizamientos.....	96
3.2.6 Análisis del deslizamiento del 17 de marzo del 2012.....	99
3.2.7 Parámetros geotécnicos y geohidráulicos.....	103
3.2.8 Análisis del Modelo.....	108
3.2.9 Modelo SINMAP.....	108
3.2.10 Metodología para la calibración del modelo.....	111
3.2.11 Datos geotécnicos.....	113
3.2.12 Consideraciones para el modelo.....	116
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	117
4.1 RESULTADOS.....	117
4.1.1 Calibración del modelo utilizado.....	123
4.1.2 Mapa de susceptibilidad.....	127
V. CONCLUSIONES.....	130
VI. RECOMENDACIONES.....	132
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133
ANEXOS.....	141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Definiciones de clase de estabilidad	17
Tabla 2: Unidades Fisiográficas.....	40
Tabla 3: Valores estimados de la Porosidad (%).	59
Tabla 4: Valores estimados de Porosidad (%) y permeabilidad basado en pruebas y mediciones de campo en la microcuenca Mariño.....	60
Tabla 5: Valores de la conductividad hidráulica (m/día).....	63
Tabla 6: Clasificación climática de la microcuenca del río Mariño.....	67
Tabla 7: Orden de talweg según Horton	75
Tabla 8: Precipitación total mensual generado para la microcuenca Mariño (1981-2016).....	86
Tabla 9: Porcentaje anual de precipitación total mensual generado para la microcuenca Mariño.....	87
Tabla 10: Precipitación máxima de 24 horas en la estación Abancay para diferentes tiempos de retorno según la distribución Log-Gumbel.....	90
Tabla 11: Inventario de deslizamientos por cada región de calibración y pendiente.....	98
Tabla 12: Precipitación del mes de febrero del 2012 respecto a la precipitación media mensual para el mes de febrero en la estación Abancay.....	100
Tabla 13: Balance hídrico durante meses previos al deslizamiento del cerro Chuyllurpata	102
Tabla 14: Parámetros hidráulicos asumidos para el modelo.	104
Tabla 15: Parámetros geomecánicos asumidos para el modelo.	106
Tabla 16: Parámetros geomecánicos y geohidráulicos asumidos para el modelo.....	107
Tabla 17: Definición de clases del índice de estabilidad (SI)	110
Tabla 18: Frecuencia de deslizamientos obtenidos a partir del inventario por rango de pendientes y región.	118
Tabla 19: Frecuencia de deslizamientos obtenidos a partir del pronóstico del modelo SINMAP por rango de pendientes y región.	119
Tabla 20: Inventario de deslizamientos integrados al modelo SINMAP para la calibración en las ocho regiones de la microcuenca Mariño.	120
Tabla 21: Clasificación de áreas estables e inestables de acuerdo al mapa de susceptibilidad en la microcuenca del río Mariño.	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama que ilustra los parámetros involucrados en la ecuación del factor de seguridad.....	11
Figura 2: Ilustración del concepto de factor de cohesión adimensional.....	13
Figura 3: Área de la cuenca específica de recolección.....	19
Figura 4: Índice de estabilidad definido en el espacio Área-Pendiente.	22
Figura 5: Definición de regiones para distribuciones derivadas	24
Figura 6: Evaluación de CDF para producto de variables aleatorias uniformes	27
Figura 7: Gráfico de clases del índice de estabilidad y zonas de saturación.....	31
Figura 8: Gráfico de área de pendiente de deslizamientos de tierra conocidos (rojo) y puntos de posibles deslizamientos (negro) vs. clases de índice de estabilidad.....	31
Figura 9: Dirección del flujo definida como la pendiente descendente más pronunciada en las facetas triangulares planas en una cuadrícula centrada en bloques.....	34
Figura 10: Codificación de la dirección de flujo.....	35
Figura 11: Descripción general del código de dirección D8 ESRI	36
Figura 12: Diagrama conceptual de la pendiente del método de talud infinito.....	37
Figura 13: Ubicación hidrográfica de la unidad hidrográfica del río Mariño	38
Figura 14: Mapa de Ubicación de la cuenca del río Mariño.	39
Figura 15: Vista panorámica de la geomorfología de la microcuenca del río Mariño	40
Figura 18: Vertientes de montaña empinada con pendientes predominantes de 25 a 80%.....	45
Figura 19: Afloramiento de rocas de Grupo Copacabana superior.	46
Figura 20: Corte Geológico Norte-Sur de la microcuenca Mariño.....	48
Figura 21: Imagen Satelital del corte geológico Norte-Sur de la microcuenca Mariño.....	48
Figura 22: Imagen del ortogneis de la zona de estudio, este se encuentra altamente fracturado	49
Figura 23: Granodioritas de la zona fuertemente alteradas.....	53
Figura 24: Depósitos coluviales sobre el Grupo Copacabana.....	55
Figura 25: Margas fuertemente fracturadas del Grupo Copacabana.....	57
Figura 26: Clima Árido Cálido, parte baja del área de estudio (Rio Pachachaca).	65
Figura 27: Clima cálido de la ciudad de Abancay	66

Figura 28: Clima Árido Cálido, parte baja del área de estudio (río Pachachaca).	67
Figura 29: Clima Árido Semicálido, en los sectores de Pachachaca Alta hasta San Valentín.....	68
Figura 30: Clima Árido Semicálido, en los centros poblados de Abancay y Tamburco.....	69
Figura 31: Clima Semiárido Templado, sectores de Huayllabamba y Moyocorral.	70
Figura 32: Clima Subhúmedo Semifrio, centro poblado de Ccanabamba y Ccoya.	71
Figura 33: Clima Subhúmedo Frio, sector Rontoccocha.	72
Figura 34: Clima Húmedo Frio, parte baja del nevado Ampay.	72
Figura 35: Clima Húmedo Semifrígido, Nevado del Ampay.....	73
Figura 36: Sub Cuencas Tributarias del río Mariño.....	74
Figura 37: Orden de los ríos del sistema de drenaje.	76
Figura 38: Laguna de la red hídrica del sistema Rontoccocha.....	76
Figura 39: Distribución del promedio mensual de la temperatura media (2015-2019)	77
Figura 40: Distribución del promedio mensual de la temperatura máxima (2015-2019)	78
Figura 41: Distribución del promedio mensual de la temperatura mínima (2015-2019)	78
Figura 42: Distribución del promedio mensual de la evaporación (2015-2019).....	80
Figura 43: Distribución del promedio mensual de la humedad relativa (2015-2019).....	80
Figura 44: Distribución del promedio mensual de la velocidad del viento (2015-2019).....	81
Figura 45: Distribución del promedio mensual de la dirección del viento (2015-2019).....	81
Figura 46: Distribución del promedio mensual de la precipitación (1981-2016)	84
Figura 47: Distribución del promedio mensual de la precipitación acumulada (2015-2019)	84
Figura 48: Distribución del promedio anual de la precipitación acumulada (1981-2016).....	85
Figura 49: Distribución espacial de lluvia acumulada promedio mensual.....	85
Figura 50: Anomalías anuales de precipitación (1981-2016) Estación Abancay.	87
Figura 51: Variación estacional de las precipitaciones en la estación Abancay	88
Figura 52: Balance hídrico en la microcuenca del río Mariño	88
Figura 53: Distribución Gumbel para la Pmax24 Estación Abancay.....	89
Figura 54: Distribución Log-Gumbel para la Pmax24 Estación Abancay.....	90
Figura 55: Cuantiles de la Pmáx 24 horas en la estación Abancay.....	91

Figura 56: Diagrama de flujo de metodología generalizada que adopta diferentes enfoques de calibración basados en SINMAP (Estabilidad INdex MAPping) modelo.	94
Figura 57: Deslizamientos de tierra en el sector Chullurpata y Marcamarca.	96
Figura 58: Mapa de inventario de deslizamientos de tierra en los últimos 60 años.	97
Figura 59: Frecuencia de deslizamientos de tierra inventariados en cada rango de ángulos de pendiente en la microcuenca del río Mariño	98
Figura 60: Deslizamiento del 17 de marzo del 2012 en el sector de Chullurpata Tamburco.....	99
Figura 61: Gráfico de la precipitación del mes de febrero del 2012 respecto a la precipitación media mensual para el mes de febrero en la estación Abancay.	100
Figura 62: Anomalía porcentual de las precipitaciones para el mes de febrero del 2012 en la estación Abancay.	101
Figura 63: Nivel de saturación con la base de datos PISCO para los meses de noviembre del año 2011 y los meses de enero a abril del año 2012.....	101
Figura 64: Metodología para la obtención del mapa de índice de susceptibilidad.....	108
Figura 65: Matriz de confusión para determinar la curva ROC.....	112
Figura 66: Mapa de regiones de calibración.	114
Figura 67: Valores asumidos para simulaciones en SINMAP con ocho regiones de calibración.....	115
Figura 68: Frecuencia de deslizamientos según inventario.....	118
Figura 69: Frecuencia de deslizamientos según predicción de SINMAP	119
Figura 70: Frecuencia de deslizamientos de tierra según inventario por rango de pendientes.	121
Figura 71: Precisión de la predicción del modelo SINMAP con 08 regiones de calibración	121
Figura 72: Numero de deslizamientos de la predicción del modelo SINMAP para las 08 regiones de calibración con sus respectivos rangos de pendientes del terreno.	123
Figura 73: Curva ROC derivadas de simulaciones SINMAP con todas las regiones de calibración (verde). Área bajo la curva: 0.967 95% CI: (0.9252-1.000).	123
Figura 74: Verificación de las zonas de predicción con los puntos del inventario realizado. (La zona roja indica zona inestable según el modelo y el punto celeste indica un derrumbe inventariado).	124
Figura 75: Verificación de las zonas de predicción con los puntos del inventario realizado. (La zona de color marrón claro indica zona inestable según el modelo y el punto celeste indica un derrumbe inventariado).	125
Figura 76: Verificación de las zonas de predicción con los puntos del inventario realizado. (La zona verde indica zona estable según el modelo y el punto celeste indica un derrumbe inventariado).	125

Figura 77: Zona del deslizamiento del 16 marzo del 2012	126
Figura 78: Precisión de la predicción del modelo SINMAP con 08 regiones de calibración	127
Figura 79: Gráfico de área de pendiente de deslizamientos de tierra inventariados (colores) y puntos de posibles deslizamientos (negro) vs. clases de índice de estabilidad.	128
Figura 80: Mapa de susceptibilidad obtenida de acuerdo a la calibración del modelo	129

RESUMEN

El presente trabajo ha sido desarrollado para identificar las zonas de riesgo por deslizamientos de laderas debido a la saturación del suelo generadas por las precipitaciones pluviales en la microcuenca del río Mariño, ubicado en la provincia de Abancay y departamento de Apurímac, en donde se analiza e identifica el problema de los movimientos de masa a través de un enfoque integrador entre las condiciones de saturación y los deslizamientos de tierra, evaluándose la estabilidad de taludes por el modelo de estabilidad de la pendiente infinita utilizando el programa SINMAP (Mapeo del Índice de Estabilidad), siendo este la aplicación de un método determinístico y probabilístico en el entorno de un sistema de información geográfica, para lo cual se recopiló los datos geotécnicos y geohidráulicos disponibles para el área de estudio con el fin de crear un mapa de susceptibilidad al peligro de deslizamientos de tierra. El análisis se realizó a escala regional a través de un sistema de información geográfica obteniendo información detallada a través de imágenes satelitales para obtener las características geotécnicas e hidrológicas con una evaluación de campo. Para la validación de presente estudio, el modelo de SINMAP fue calibrado en base a la literatura de los valores obtenidos y un inventario detallado de deslizamientos de tierra superficial ocurridos durante los últimos 60 años, siendo el escenario simulado con ocho regiones de calibración o usos del suelo, la simulación tuvo bastante éxito describiendo los deslizamiento de tierra por falla de taludes en la zona de estudio, identificando al 70,69% de los deslizamientos de tierra, de un total de 58 deslizamientos inventariados en áreas clasificadas como inestables. La fiabilidad de la simulación fue evaluada mediante un modelo de clasificación mediante el análisis de la curva ROC con un 96,7% de precisión global.

Palabras claves: Saturación de suelos; pendiente infinita; propiedades geomecánicas; índice de estabilidad.

SUMMARY

This research has been developed to identify the risk areas due to landslides due to the saturation of the soil generated by rainfall in the Mariño river micro-basin, located in the province of Abancay and the department of Apurímac, where it is analyzed and identifies the problem of mass movements through an integrative approach between saturation conditions and landslides, evaluating slope stability by the infinite slope stability model using SINMAP (Stability Index Mapping) program, this being the application of a deterministic and probabilistic method in the environment of a geographic information system, for which the geotechnical and geohydraulic data available for the study area was collected in order to create a susceptibility map to the danger of landslides. The analysis was carried out on a regional scale through a geographic information system, obtaining detailed information through satellite images to obtain the geological, hydrological, and geomorphological characteristics and complementing it with a field evaluation. For the validation of this study, the SINMAP model was calibrated based on the literature of the values obtained and a detailed inventory of surface landslides that occurred during the last 60 years, being the simulated scenario with eight calibration regions or land uses, the simulation was quite successful describing the landslides due to slope failure in the study area, identifying 70.69% of the landslides, out of a total of 58 inventoried landslides in areas classified as unstable. The reliability of the simulation was evaluated using a classification model by analyzing the ROC curve with 96.7% global precision.

Keywords: Soil saturation; infinite slope; geomechanical properties; stability index.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

La presente investigación es un aporte al pleno conocimiento de la problemática del comportamiento de los fenómenos naturales y antrópicos, que debido a la constante actividad de la geodinámica externa del suelo en la microcuenca del río Mariño, viene generándose diversas dificultades en el crecimiento demográfico, del cual este estudio es un aporte a la planificación del crecimiento urbano en concordancia y armonía con el entorno rural, para el manejo racional de los recursos naturales y del desarrollo sostenible en la microcuenca de estudio.

Lo que se pretende también es reorientar la tendencia del cambio del uso del suelo y al crecimiento caótico de las ciudades de Abancay y Tamburco; peligrosa para sus habitantes, actuando sobre la seguridad física (para reducir el riesgo) con la finalidad de que sea una ciudad sostenible y competitiva a largo plazo.

El modelo de análisis utilizados para lograr el objetivo es conocido mundialmente, y su aplicabilidad tiene mucho que ver con las condiciones de topografía, geológica, condiciones geotécnicas y por la magnitud de análisis a nivel regional, se utilizó mapas cartográficos georreferenciados e imágenes satelitales en un entorno de sistemas de información geográfica.

La identificación de los probables derrumbes y deslizamientos de flujos de barro, nos permite conocer los espacios de riesgo, vulnerabilidad y peligrosidad generados por la presencia de la humedad como consecuencia de las precipitaciones acumuladas como agente desencadenante y desestabilizador de estos derrumbes y que una vez identificadas las zonas de riesgo nos permite establecer los niveles de peligrosidad en un mapa de susceptibilidad que nos va a permitir desarrollar los planes de desarrollo urbano y planes de ordenamiento territorial, con alternativas que brinden soluciones para prevenir, conservar y mitigar daños que generen pérdidas económicas y sociales en el ámbito de influencia de la microcuenca

Mariño, donde se desarrollan las ciudades de Abancay y Tamburco con un crecimiento de la población de manera exponencial en las últimas décadas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Identificar las zonas de riesgo por deslizamientos de laderas debido a la saturación del suelo generadas por las precipitaciones pluviales en la microcuenca del río Mariño, ubicado en la provincia de Abancay y departamento de Apurímac.

1.2.2 Objetivos específicos

Identificar y recopilar las variables hidrológicas que intervienen en la saturación de suelos.

Identificar y recopilar las variables geotécnicas que intervienen en la susceptibilidad a los deslizamientos de laderas.

Recopilar y procesar información cartográfica temática.

Integrar a través de un SIG las variables hidrológicas y geotécnicas para determinar el índice de estabilidad de taludes o laderas.

Elaborar el mapa de identificación de deslizamientos producidos por saturación de suelos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

En las últimas décadas el avance de la informática y computación ha desarrollado significativos avances en el análisis de la estabilidad de taludes por lo que muchos autores como Macari (2004) presenta el desarrollo de una nueva metodología numérica que integra modelos hidrológicos, topográficos y geotécnicos dentro de un marco geográfico para establecer factores de seguridad contra fallas de pendientes o taludes naturales. Dado un evento de precipitación, los modelos hidrológicos proporcionan la información sobre cantidades de evapo-transpiración, de interceptación, de infiltración y de escape del agua producida por la lluvia. Las cantidades de infiltración son de suma importancia para poder establecer los niveles de saturación del suelo, que son un componente crucial para el cómputo del estado físico de los depósitos de suelo. El trabajo se centra en la integración de los resultados de estos modelos y el análisis dentro de un sistema de información geográfico (SIG). El aporte es el desarrollo de la metodología y se presenta un ejemplo ilustrativo para la zona occidental de Puerto Rico. Como resultado de su investigación se ha presentado la integración del análisis tradicional de la estabilidad de taludes con modelos hidrológicos dentro de un marco de Sistemas de Información Geográfica. Como un estudio de cómo se analizó en detalle, el cuadrante de Rincón en Puerto Rico. Los resultados indican varias áreas con un potencial para un derrumbe, en los que el factor de seguridad sobrepasa la unidad.

Gutiérrez (2015) en su tesis doctoral desarrollo su investigación en Marbella provincia de Málaga España, una metodología para el análisis de estabilidad de taludes en el que considera a la infiltración del agua de la lluvia como agente desestabilizador de taludes. La metodología propuesta fue de tipo técnico geoespacial tomando como base las características geomorfológicas del suelo y el grado de saturación del suelo como producto de las precipitaciones, en dicha metodología se determinó un mapa temático de susceptibilidad a los deslizamientos a través de un sistema de información geográfica (ArcGis 10.2). El estudio

considero también un análisis geomecánicos de una serie de taludes al sur de la Península Ibérica, de donde se ha producido frecuentes deslizamientos de ladera. Para el análisis se determinó el factor de seguridad donde se utilizaron métodos de equilibrio límite para la estabilización de taludes como el de Spencer y talud Infinito, el primero para pruebas localizadas de pequeña magnitud y el segundo para determinar el mapa de peligrosidad a mayor escala.

Graciano (2015) en su trabajo de investigación realizado en las microcuencas de los corregimientos de Villa Restrepo y Juntas de la cuenca de Combeima Ibagué Tolima Colombia, desarrollo una metodología para elaboro mapas de susceptibilidad y peligrosidad de deslizamientos considerando como detonantes de estos eventos la precipitación o lluvia, para ello se utilizó un método probabilístico bayesiano el cual se basó en un inventario de eventos ocurridos en la región y su relación entre la lluvia acumulada y las propiedades geomorfológicas de la zona. El estudio no considero algunas variables como la geología, humedad inicial del suelo, los que pudieran influir en el resultado de los atributos topográficos del terreno. En sus conclusiones se estableció que las correlaciones de la lluvia acumulada respecto a las características topográficas no se encontró una correspondencia entre las variables analizadas debido al efecto que produce la resolución del modelo de elevación digital, el cual no le permitió ver la relación que existe.

Moral (2014) desarrolló un estudio en el Municipio de Lorca en la región de Murcia España, sobre la susceptibilidad del terreno a sufrir deslizamientos de laderas usando como herramienta fundamental un sistema de información geográfica, en el que permite analizar las variables que intervienen en la susceptibilidad (pluviometría, características geotécnicas del suelo, altitud, pendiente, etc.) cuyo resultado de estos análisis se compararon con los deslizamientos de ladera desencadenados por el terremoto de Lorca en el 2011.

Jiménez (2005) en su estudio de investigación analizo la susceptibilidad del terreno a los movimientos de ladera mediante un sistema de información geográfica para ver el grado de afección que puede sufrir el embalse de Rules Granada España. Para ello se desarrolló un inventario de eventos producidos, así como una serie de datos como tipología, litología, etc. Los resultados del estudio calculadas mediante matriz, es mayoritariamente baja. No obstante

hay un 15% de la zona con una susceptibilidad moderada a muy alta los movimientos en masa de laderas.

Hidalgo y Vega (2014) en su estudio de investigación presentaron una estimación de la amenaza por deslizamientos detonados por sismos y lluvia en el Valle de Aburra Colombia, en donde utilizan un sistema de información geográfica desarrollando un modelo pseudoestático de Newmark con un enfoque probabilístico. Considera también las características geotécnicas, topográficas, geotécnicas e hidrológicas, cuyo resultado es el cálculo de la probabilidad de que ocurra un evento de remoción en masa dado que se presente un sismo considerando las características geomorfológicas del sismo y saturación del suelo.

Peña (2014) en su tesis doctoral estudia los deslizamientos o remoción de masa en laderas considerando un modelo hidrológico HSB analiza un problema de estabilidad de taludes, utilizando un modelo físico basado en ecuaciones diferenciales parciales denominado HSB (Hillslope-Storage Boussinesq); que se utilizó para evaluar deslizamientos superficiales, con información de los parámetros geotécnicos, perfil longitudinal de la ladera y datos de precipitación. La ecuación utilizada se resolvió utilizando métodos de diferencias finitas, Como aplicación se analizó en una zona teórica y se determinó el factor de seguridad, considerando varios periodos continuos de lluvia; datos fueron obtenidos de los registros de la estación EMAS de la ciudad de Manizales. El resultado que se obtiene son las observaciones a la estabilidad de la ladera a través del factor de seguridad, influenciado en periodos de 30 minutos, lográndose determinar mediante un monitoreo la amenaza de deslizamientos de taludes en suelos superficiales por el factor de precipitación.

Arévalo (2018) presenta un algoritmo de simulación de remoción en masa para la susceptibilidad de suelos en el que utiliza el programa Matlab, para ello determina el factor de seguridad considerando métodos de equilibrio límite para la estabilidad de taludes como es el talud infinito, asumiendo las principales características y propiedades de los factores determinantes del suelo como la cohesión, saturación del suelo, esfuerzos efectivos etc. El autor a través del programa muestra la factibilidad que, con los resultados obtenidos se pueden realizar mapas de susceptibilidad, validando dicho algoritmo de programación en dos lugares de Villavicencio – Bogotá de muestreo obteniendo aceptables resultados.

El IGP (2018) a raíz de los eventos de deslizamientos en el sector de Fonavi –Moyocorral se Realizó una evaluación geológica, geodinámica y geotécnica del sector Fonavi –Abancay, en el que se indica que la ciudad de Abancay se encuentra en una unidad geomorfológica de llanura aluvial, específicamente el sector de Limapata se asienta sobre el piedemonte aluvial con materiales no consolidados. El sustrato rocoso en el sector Fonavi está conformado por areniscas, calizas y niveles volcánicos del grupo Mitu, debido a la ubicación geomorfológica, litológica y buzamiento inclinado a favor de la pendiente se verifico un deslizamiento del tipo rotacional debido a la saturación de los materiales aluviales de porosidad alta. Dicho estudio concluye que los niveles de peligro por movimientos de masa, en la ladera en el que se asienta el sector de Fonavi son muy altos debido a la geodinámica de la zona, mientras que en zonas donde se reconocieron las grietas y escarpes el peligro es de muy alto a alto.

Diaz (2014) en el informe final de susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa en la microcuenca de Sahuanay distrito de Tamburco, provincia de Abancay, región Apurímac, estudio realizado para el centro de estudios y prevención de desastres PREDES, en el que se desarrolla un modelo de integración de susceptibilidad a movimientos en masa en la cuenca Sahuanay considerando las características fisiográficas, geodinámicas, hidrogeológicas, uso del suelo, pendientes y peligros potenciales y relacionándose estas en un mapa a partir de la ponderación de los mapas temáticos superponiéndose entre ellos, de esta manera se obtiene el mapa de susceptibilidad con lo que se estable los niveles de peligrosidad y a su vez establecer el mapa de zonificación del nivel de peligrosidad.

INDECI (2007) dentro del programa de ciudades sostenibles, bajo el convenio INDECI-PNUD-PER/02/051 se presentó el informe final del estudio “Mapas de Peligros de la Ciudad de Abancay”, en el que se realizó un análisis de los diferentes peligros y vulnerabilidades en el ámbito de la microcuenca del río Mariño con estudios cartográficos, geológicos, hidrológicos y geotécnicos con los que se elaboró mapas de peligros múltiples de acuerdo al grado de peligro y se elaboró también mapas de crecimiento poblacional y expansión urbana.

Cuchillo (2014) realiza en su investigación una aplicación del proceso de análisis jerárquico para determinar las zonas susceptibles de deslizamiento de taludes y laderas de acuerdo a las recomendaciones para la evaluación de riesgos y desastres del CENEPREP. Aplicada a la cuenca del rio Chinchichaca en el que se considera la litología, geomorfología, pendiente,

cobertura vegetal y uso del suelo obteniendo un mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, siendo este un método heurístico que resulta de la combinación de varios factores con la ayuda de un sistema de información geográfica Arcgis 10.2 y su función de álgebra de mapas de imágenes raster (Spatial Analyst), de igual modo que en los anteriores autores este también se elaboró mapas de estratificación de niveles de susceptibilidad a movimientos en masa.

Gómez (1998) en un estudio realizado para el Instituto Geofísico del Perú, presenta el informe peligro geológico en Tamburco, provincia de Abancay, departamento de Apurímac en el que describe los eventos geológicos de los deslizamientos de Ccocha Pumaranra, Pucaorcco, derrumbes en la carretera Abancay – Cusco, reptación de los suelos de Moyocorral y eventos geológicos menores como el puente Chinchichaca, quebrada Ñacchero y sectores de Limapata – San Luis. Análisis también la Sismicidad Local y estima la velocidad de los movimientos en masa, para ello se realizó estudios geotécnicos localizados, cuyo resultado fue la determinación de los factores de susceptibilidad obteniéndose además mapas de vulnerabilidad de los centros poblados en la microcuenca de río Mariño.

Apaza (1997) realizó un estudio para el plan director de la ciudad de Abancay en el analiza y describe las zonas de alta actividad geodinámica como la quebrada Sahuanay Chinchichaca, el deslizamiento de Fonavi-Bellavista, el tramo del río Condebamba sector el Riñón, la zona del polvorín carretera Abancay-Cusco y el deslizamiento Ccocha Pumaranra, identificando las zona de riesgo y se realiza las recomendaciones para su implementación en la elaboración del plan director de Abancay para la prevención y mitigación de los desastres que se pudieran producir y efectuar una zona de riesgo geodinámico, que permita establecer y delimitar las situaciones de riesgo o zonas críticas, que puedan afectar la seguridad física y material de la población de Abancay, permitiendo formular una política de ocupación y ordenación del territorio dentro del contexto de cuencas. Y también establecer los lineamientos y criterios de intervención en la prevención, mitigación y control de los fenómenos de la geodinámica externa, existentes en la microcuenca del río Mariño.

INDECI (1998) bajo el contrato de Estudio N°024-98 se presentó el informe final del “Estudio definitivo para reducir la vulnerabilidad al deslizamiento en el distrito de Abancay, provincia de Abancay departamento de Apurímac”, a cargo de la consultora “Cárdenas y

Bautista”, en el que se realizó la evaluación de las áreas vulnerables como la zonas críticas de Fonavi y Ccocha Pumaránra, considerándose para ello estudios de geología y geotecnia, geología local, estudios de mecánica de suelos y estudios de hidrología y drenaje y otros aspectos como evaluación del impacto ambiental y estudios socioeconómicos del valle del Mariño, y lo más resaltante se realizó un planteamiento de las obras civiles a ejecutar con sus respectivos presupuestos, metrados, cronogramas de desembolso y fórmula polinómica para poder mitigar algunos aspectos de la geodinámica externa, sobre todo en el sector del deslizamiento de Fonavi.

Amézquita y Ñaupas (1996) publicaron el informe científico “Reconocimiento Geomorfológico, Geológico, Geográfico de Abancay y su Hinterland”, en él se describe las características geológicas y geomorfológicas de Abancay; ello implica también el análisis de los fenómenos de la geodinámica interna (sismos en Apurímac) y externa (reptación, lavas torrenciales, aluviones, alud-aluviones y deslizamientos), que representan la vulnerabilidad de Abancay y el riesgo de desastres naturales en él se concluye con una serie de recomendaciones para prevenir y mitigar los desastres naturales como consecuencia de los movimientos en masa identificados en el informe científico.

2.2 ESTABILIDAD DE LADERAS E ÍNDICE DE HUMEDAD

Para Oliva (1999) las fallas más comunes de los deslizamientos de masas de rocas y tierras se deben a la inestabilidad de laderas, la fuerza principal que produce la falla es el peso de la masa del terreno incrementado por el peso del agua contenido en él, siendo este el detonante de la falla, donde la causa principal es la disminución de la resistencia al esfuerzo cortante del terreno como producto de la reducción de la cohesión entre partículas de la masa del terreno debido a la variación de la presión en los poros.

Muchos de los problemas de inestabilidad que se presentan en las laderas se deben a aspectos naturales de su formación geológica adquiriendo diversos materiales involucrados originados por movimientos geológicos, climatológicos, hidrogeológicos, etc., y que recientemente el aspecto antropogénico ha dado origen a la generación de la inestabilidad por las condiciones que ejerce sobre las laderas como la deforestación, uso del suelo, construcción de obras hidráulicas, carreteras, edificaciones y asentamientos humanos (Oliva 1999).

Para los estudios de riesgo de origen geológico es importante conocer y analizar las condiciones de la estabilidad de laderas y que fuera de la influencia humana los deslizamientos de terrenos o derrumbes están asociadas a las características del relieve, a la cantidad e intensidad de la lluvia y a las características litológicas muy sensibles a los movimientos sísmicos (Alonso 2005).

2.2.1 Factor de seguridad

El análisis de la inestabilidad de laderas es muy amplio y complejo sin embargo uno de los parámetros de determinación del grado de estabilidad o inestabilidad es el factor de seguridad y que diversos autores han desarrollado métodos cuantitativos y que todos ellos utilizan el factor de seguridad para determinar si una ladera es estable o inestable.

$$F_s = \frac{\textit{Resistencia al corte del terreno}}{\textit{Esfuerzo cortante requerido para el equilibrio}} \quad (1)$$

El valor referencial es la unidad, donde se considera que para valores menores a uno se considera inestable y que para valores mayores a uno se considera estable. En el análisis de laderas se suele considerar entre 1.2 y 1.5 o mayor, bajo condiciones y aceptabilidad de que la información para el análisis de los datos geotécnicos sea confiable.

2.2.2 Métodos de cálculo

Existen diversos métodos para determinar la estabilidad de laderas y taludes siendo los más simples los métodos elásticos que consiste en verificar la máxima tensión cortante y de tensión cortante admisible. Dentro de los más usados son los modelos de equilibrio límite los cuales se fundamentan en los principios estáticos para determinar el estado de equilibrio de una masa de tierra potencialmente inestable. Las limitaciones de este método es la consideración que la resistencia del terreno se desplaza de manera total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte sin considerar las condiciones de las tensiones ni tampoco el valor de la cuantía de las deformaciones.

Para determinar la estabilidad se establecen mecanismos cinemáticos de falla, extraído naturalmente de las observaciones, en base a dichas observaciones se analizan las fuerzas que tienden a producir movimiento como son las fuerzas de gravitatorias, efectos de infiltración, reducción de la presión intersticial de agua y otras. Que se constituyen como fuerzas motoras, las que se ha de comparar por algún mecanismo procedimental con las fuerzas capaces de generarse tendiendo a que la falla no se produzca en la resistencia del terreno, raíces y otras fuerzas resistentes. Por lo que la estabilidad se conoce como la seguridad de la masa de tierra contra el inicio del movimiento o la falla. De esta manera la mayoría de métodos están ligados a un mecanismo cinemático de falla específica, y que su aplicabilidad será a los problemas de estabilidad en que la falla sea del tipo que se considera (Juárez *et al.* 1973).

Con el desarrollo tecnológico de la computación e informática, también se ha tenido un gran avance en el análisis de la estabilidad de laderas y taludes utilizándose los métodos de las curvas de deslizamiento (Métodos de equilibrio limite). La potencia de los equipos de cómputo y la gran diversidad de software informáticos, nos permiten realizar estudios mucho más complejos orientados al cálculo del factor de seguridad bajo gran la cantidad de información de las condiciones geotécnicas e hidrológicas.

Los problemas de laderas o taludes se pueden analizar dependiendo de la naturaleza del fenómeno tal es el caso que para estudios puntuales de estabilización de taludes para vías de comunicación y edificaciones se puede analizar con los métodos de equilibrio limite como el método de Bishop, método de Fellenius, etc., sin embargo al considerar estudios de laderas

este cumplen con las condiciones del método del talud infinito el cual debido a que el estudio de investigación es de carácter regional utilizamos este método para la determinación de los factor de seguridad en todo el ámbito de estudio.

2.2.3 Análisis de estabilidad de laderas

El factor de seguridad del modelo de estabilidad de pendiente infinita (relación de fuerzas estabilizadoras a desestabilizadoras) viene dado por (simplificado para la densidad húmeda y seca, de Hammond *et al.* (1992)

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2\theta[\rho_s g(D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g)D_w]. \tan\phi}{D\rho_s g. \sin\theta. \cos\theta} \quad (2)$$

Donde C_r es la cohesión de las raíces [N/m^2], C_s es la cohesión del suelo [N/m^2], θ es el Angulo de la pendiente, ρ_s es la densidad del suelo húmedo [kg/m^3], ρ_w es la densidad del agua [kg/m^3], g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2), D es la profundidad vertical del suelo [m], D_w es la altura vertical de la capa freática dentro de la capa de suelo [m], y ϕ es El ángulo de fricción interna del suelo [$^\circ$]. La pendiente del ángulo θ es el arco tangente de la pendiente S , expresada como un decimal redondeado por la unidad de longitud horizontal. Figura 1 muestra la geometría asumida en la ecuación (1).

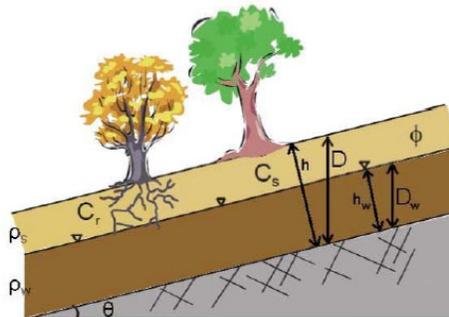


Figura 1: Diagrama que ilustra los parámetros involucrados en la ecuación del factor de seguridad.

Fuente: Hammond *et al.* (1992) y Mabee *et al.* (2013).

La aproximación con el modelo hidrológico es interpretar el grosor del suelo como se especifica perpendicular a la pendiente, en lugar de la profundidad del suelo medida verticalmente. El espesor del suelo, h [m] y la profundidad se relacionan de la siguiente manera.

$$h = D \cos \theta \quad (3)$$

Considerado la ecuación (2) FS se reduce a:

$$FS = \frac{C + \cos \theta [1 - wr] \cdot \tan \phi}{\sin \theta} \quad (4)$$

Donde:

$$w = \frac{D_w}{D} = \frac{h_w}{h} \quad (5)$$

es la humedad relativa, así también tenemos que:

$$C = \frac{(C_r + C_s)}{h \rho_s g} \quad (6)$$

Es la cohesión combinada hecha adimensional en relación con el grosor perpendicular del suelo y

$$r = \frac{\rho_w}{\rho_s} \quad (7)$$

es la relación de densidad de agua y el suelo.

La ecuación (4) es la forma adimensional del modelo de estabilidad de pendiente infinita que utilizamos. Esto es conveniente porque la cohesión (debido a las propiedades del suelo y las raíces del suelo) se combina con la densidad y el grosor del suelo en un factor de cohesión adimensional C (ecuación 6). Esto puede considerarse como la relación de la resistencia cohesiva con respecto al peso del suelo, o la contribución relativa a la estabilidad de la pendiente de las fuerzas cohesivas. La Figura 2 ilustra este concepto. El segundo término en el numerador de la ecuación (4) cuantifica la contribución a la estabilidad debido a la fricción interna del suelo (como se cuantifica por el ángulo de fricción, ϕ o el coeficiente de fricción, $\tan \phi$).

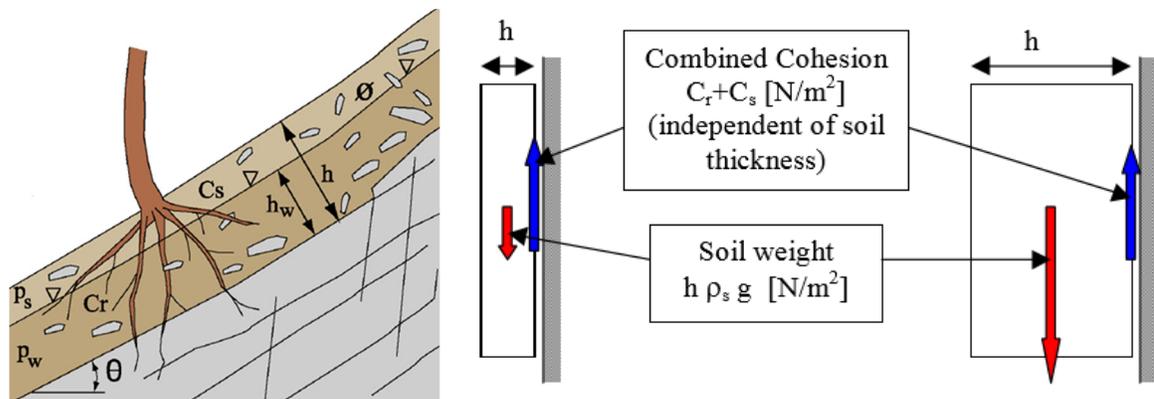


Figura 2: Ilustración del concepto de factor de cohesión adimensional

Fuente: Pack *et al.* (1999)

Esto se reduce a medida que aumenta la humedad debido al aumento de las presiones de poro y las consecuentes reducciones en la fuerza normal transportada por la matriz del suelo. La sensibilidad a este efecto está controlada por la relación de densidad r (ecuación 7).

La cohesión adimensional es la fuerza de restauración cohesiva relativa al peso del suelo [$C = (C_r + C_s) / (h \cdot \rho_s \cdot g)$], ilustrada aquí en una cara vertical para eliminar el efecto de las fuerzas normales y de fricción.

Prácticamente, el modelo funciona calculando la pendiente y la humedad en cada punto de la cuadrícula, pero suponiendo que otros parámetros son constantes (o tienen distribuciones de probabilidad constantes) en áreas más grandes. Con la ecuación (4), esto supone suponer implícitamente que el grosor del suelo (perpendicular a la pendiente) es constante.

2.2.4 Método del análisis de estabilidad de laderas en SINMAP

El SINMAP es uno de los modelos de análisis de estabilidad de laderas y taludes y que su denominación deriva de las palabras (Stability INDEX MAPPING) el cual se basa en el modelo de estabilidad de pendiente infinita propuesto por Hammond *et al.* (1992); Montgomery y Dietrich (1994) que equilibra los componentes desestabilizadores de la gravedad y los componentes restauradores de la fricción y cohesión en un plano de falla paralelo a la superficie del suelo con efectos de borde sin tratamiento.

El método de análisis de estabilidad de taludes que aplicamos en el presente estudio es el SINMAP (Pack *et al.* 1999), un programa de cómputo que predice el potencial de estabilidad

de deslizamientos de tierra. SINMAP (Pack *et al.* 1999) el cual analiza la estabilidad de laderas con un modelo numérico. Este modelo utiliza la ecuación para el factor de seguridad y la ley de Darcy para el flujo saturado dentro del suelo para estimar la distribución espacial de las presiones intersticiales. El flujo saturado se refiere al flujo a través de material poroso como el suelo donde los poros están completamente llenos de agua (Doménico y Schwartz 1998). El cálculo del factor de seguridad (FS) en SINMAP se basa en la forma de pendiente infinita de la ley de falla de Mohr-Coulomb expresada por la relación entre las fuerzas estabilizadoras (resistencia al corte) y las fuerzas desestabilizadoras (esfuerzo cortante) en un plano de falla paralelo a la superficie del suelo (Hammond *et al.* 1992):

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2\theta[\rho_s g(D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g)D_w]. \tan\phi}{D\rho_s g. \sin\theta. \cos\theta} \quad (8)$$

Donde C_r y C_s son la fuerza de la raíz y la cohesión del suelo, respectivamente, D es el espesor vertical de la profundidad del suelo, D_w es el espesor vertical de la capa freática, $\rho_s g$, $\rho_w g$ es el peso unitario del suelo (s) y el agua (w). Los ángulos θ y ϕ son los ángulos de pendiente y fricción (Figura 1).

El espesor vertical de la capa freática D_w se estima en SINMAP por la ley de Darcy:

$$Q = -\frac{TL}{A} \cdot i \quad (9)$$

Donde Q es descarga, T es transmisividad, L es la longitud del flujo, A es el área de la sección transversal, i es el gradiente de carga hidráulica para un flujo saturado con el supuesto de que el flujo subsuperficial lateral poco profundo sigue la pendiente topográfica, y la descarga lateral es igual a la recarga, R , (en la mayoría de los casos la recarga es igual a la tasa de lluvia). El supuesto de que el flujo subsuperficial lateral poco profundo sigue gradientes topográficos implica que el área que contribuye al flujo en cualquier punto está dada por el área a , de la cuenca de captación específica. Esta área se define por la relación entre el área que drena en la celda de la cuadrícula y la longitud del contorno a través de la celda de la cuadrícula. Para un flujo saturado constante, el flujo subsuperficial lateral puede expresarse por la transmisividad (T) a lo largo de la pendiente (Pack *et al.* 1999):

$$T \sin\alpha \cdot b = K_s D_w \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot b \quad (10a)$$

Donde, se supone que T es constante con la profundidad, b es la longitud del flujo y K_s es la conductividad hidráulica saturada. La capacidad de flujo lateral subterráneo se define por el producto de la recarga y el área de contribución:

$$Ra = K_s D \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha \cdot b \quad (10b)$$

Donde, D es el espesor vertical del suelo. La combinación de 10a y 10b produce una expresión para el grosor del nivel freático:

$$D_w = D \cdot \frac{R}{T} \frac{a}{b \cdot \sin\alpha} \quad (11)$$

Las propiedades del suelo, como la cohesión y la transmisividad, tienden a variar en un rango que puede ser de uno o dos órdenes de magnitud. Por esta razón, SINMAP utiliza una distribución de probabilidad uniforme para definir el rango de valores de la lluvia, la transmisividad, el ángulo interno de fricción y cohesión del suelo delimitado por un límite inferior y superior.

De acuerdo a las investigaciones realizadas por Pack *et al.* 1999 indican que las presiones de poro debido a la humedad del suelo se reduce el esfuerzo normal efectivo, y que a través del ángulo de fricción está relacionado con la resistencia al corte. La presión de agua del poro se calcula asumiendo un estado hidrológico estable con una profundidad de suelo saturado calculada suficiente para mantener una descarga lateral proporcional al área de captación específica (el área de pendiente ascendente por unidad de longitud de contorno). SINMAP deriva su clasificación de estabilidad del terreno a partir de entradas de pendiente topográfica y área de captación específica y de parámetros que cuantifican las propiedades del material (como la resistencia) y el clima (principalmente un parámetro de humedad hidrológica). Cada uno de estos parámetros está delineado en una cuadrícula numérica sobre el área de estudio. Las variables topográficas se calculan automáticamente a partir de los datos del modelo de elevación digital (DEM).

El resultado principal de este enfoque de modelado es un índice de estabilidad, cuyo valor numérico se utiliza para clasificar o clasificar la estabilidad del terreno en cada ubicación de la cuadrícula en el área de estudio.

Los resultados de los cálculos del factor de seguridad se expresan mediante un índice de estabilidad basado en valores de FS que van de 0 a $> 1,5$. El índice de estabilidad (SI) se define como la probabilidad de que una ubicación sea estable asumiendo una distribución uniforme de los parámetros del suelo en su rango de valores. La clasificación se divide en 6 clases. Las clases 1-3 son para regiones que, según el modelo, no deberían fallar con los parámetros más conservadores en el rango especificado. Estas áreas tienen $SI > 1.5$ y $FS > 1.0$. Para las clases 4-5, el FS calculado es < 1.0 , sin embargo, la probabilidad de falla es menor y mayor que 50%, respectivamente. Estas dos clases definen un límite inferior y superior para fallas a tierra y tienen valores SI de 1.0-1.5 y 0-1.0, respectivamente. La clase 6 es incondicionalmente inestable, lo que significa que la probabilidad de falla dentro del rango especificado de parámetros es mayor (se supone que es $> 90\%$ de probabilidad). En este caso, $FS < 1.0$ y $SI = 0$ (Tabla 1).

Se reconoce que los otros parámetros de entrada son inciertos, por lo que se especifican a SINMAP en términos de límites superior e inferior en los rangos que pueden tomar. El índice de estabilidad (SI) se define como la probabilidad de que una ubicación sea estable, suponiendo distribuciones uniformes de los parámetros en estos rangos de incertidumbre. Este valor oscila entre 0 (más inestable) y 1 (menos inestable). Donde el conjunto de parámetros más conservador (desestabilizador) en el modelo todavía da como resultado la estabilidad, el índice de estabilidad se define como el factor de seguridad (relación de fuerzas estabilizadoras a desestabilizadoras) en esta ubicación bajo el conjunto de parámetros más conservador, esto produce un valor mayor que 1.

La práctica del mapeo de la estabilidad del terreno, requiere que se identifiquen y mapeen amplias clases de estabilidad, basadas en información relativamente aproximada, para identificar rápidamente las regiones donde se justifican evaluaciones más detalladas. SINMAP está destinado a este propósito. La Tabla 1 da un ejemplo de cómo se pueden definir las clases de estabilidad amplias en términos del índice de estabilidad (SI). La selección de puntos de interrupción (1.50, 1.25, 1.00, 0.50, 0.00) es subjetiva, requiere juicio e interpretación en términos de las definiciones de clase. En el ejemplo dado, usamos los términos "estable", "moderadamente estable" y "cuasi-estable" para clasificar regiones que

de acuerdo con el modelo no deberían fallar con los parámetros más conservadores en los rangos de parámetros especificados.

Tabla 1: Definiciones de clase de estabilidad

Condición	Clase	Estado Predictor	Rango de Parámetros	Posible Influencia de Factores no Modelados
$SI > 1.50$	1	Zona de pendiente estable	El rango no puede modelar la inestabilidad	Se requieren factores desestabilizadores significativos para la inestabilidad
$1.5 > SI > 1.25$	2	Zona estable moderada	El rango no puede modelar la inestabilidad	Se requieren factores desestabilizadores moderados para la inestabilidad
$1.25 > SI > 1.0$	3	Zona de pendiente Quasi-estable	El rango no puede modelar la inestabilidad	Un factor desestabilizador menor podría conducir a la inestabilidad
$1.0 > SI > 0.5$	4	Zona de pendiente del umbral inferior	Medio pesimista del rango requerido para la inestabilidad	Los factores desestabilizadores no son necesarios para la inestabilidad.
$0.5 > SI > 0.0$	5	Zona de pendiente del umbral superior	Optimista del rango requerido para la inestabilidad	El factor estabilizador puede ser responsable de la estabilidad.
$0.0 > SI$	6	Zona de pendiente protegida	El rango no puede modelar la inestabilidad	Se requieren factores de estabilización para la estabilidad

Fuente: Pack *et al.* (1999)

2.2.5 Índice de humedad topográfica

La aparición del área de la “cuenca específica” o “área de contribución” del parámetro “a”, definida como área de pendiente ascendente por unidad de longitud de contorno [m^2 / m] (Figura 3) ha sido uno de los desarrollos más importantes en la hidrología reciente debido a Beven y Kirkby (1979) está estrechamente relacionado con los modelos hidrológicos recientes que representan la generación de escorrentía por el mecanismo de saturación desde abajo según el modelo TOPMODEL y otros modelos (Beven y Kirkby 1979; O'Loughlin 1986; Moore *et al.* 1988; Moore y Grayson 1991; Grayson *et al.* 1992a; y Grayson *et al.* 1992b) modelos que siguen las observaciones de campo en el que una mayor humedad del suelo o áreas de saturación superficial tienden a ocurrir en áreas huecas convergentes. También se ha informado que los deslizamientos de tierra se originan comúnmente en áreas de convergencia topográfica (Montgomery y Dietrich 1994).

Siguiendo el modelo matemático TOPMODEL (y otros modelos similares de índices de humedad basados en topografía) hacemos los siguientes supuestos:

- (1) El flujo superficial bajo el subsuelo sigue los gradientes topográficos. Esto implica que el área que contribuye al flujo en cualquier punto está dada por el área de cuenca específica definida a partir de la topografía de la superficie (Figura 3).
- (2) La descarga lateral en cada punto está en equilibrio con una recarga de estado estable R [m / hr].
- (3) La capacidad de flujo lateral en cada punto es $T \sin\theta$, donde T es la transmisividad del suelo [m^2 / h], es decir, la conductividad hidráulica [m / h], espesor del suelo, h [m]. Los supuestos (1) y (2) juntos implican que la descarga lateral q , profundidad integrada por unidad de longitud de contorno [m^2 / h], es:

$$q = Ra \quad (12)$$

La suposición (3) difiere de una suposición común de TOPMODEL (Beven y Kirkby 1979) en que no hemos asumido que la conductividad hidráulica disminuya con la profundidad.

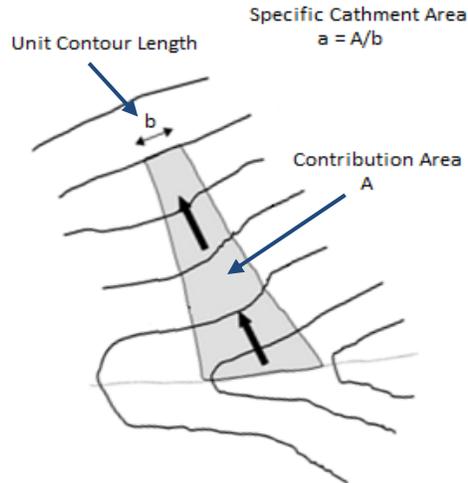


Figura 3: Área de la cuenca específica de recolección

Fuente: Adaptado de Cereceda (2006).

En su lugar, asumimos la conductividad hidráulica uniforme de un manto de suelo sobre una roca madre relativamente impermeable. Además, usamos $\sin(\theta)$ en lugar de $\tan(\theta)$. Esto es más correcto porque la distancia de flujo está realmente a lo largo de la pendiente. La diferencia entre la tangente y el seno es insignificante para ángulos pequeños, esto es importante para las pendientes pronunciadas que dan lugar a deslizamientos de tierra. Ahora con la suposición (3) la humedad relativa es:

$$w = \text{Min}\left(\frac{Ra}{T\sin\theta}, 1\right) \quad (13)$$

La humedad relativa tiene un límite superior de 1 con cualquier exceso que se supone que forma un flujo de lodo como se ilustra en la Figura 1, la humedad relativa define la profundidad relativa de la capa freática dentro de la capa de suelo. La relación R/T en (13), que tiene unidades de $[m^{-1}]$, cuantifica la humedad relativa en términos de recarga de estado estacionario relativa a la capacidad del suelo para el drenaje lateral del agua. Aunque el término "estado estable" se usa con el flujo lateral aproximado utilizando la ecuación (12), la cantidad R no es un promedio de recarga a largo plazo (por ejemplo, anual). Más bien es la recarga efectiva para un periodo crítico de clima húmedo que puede provocar deslizamientos de tierra. La relación R/T , que tratamos como un parámetro único, combina factores climáticos e hidrogeológicos. La cantidad $T/R \sin(\theta)$ $[m]$ puede considerarse como la

longitud de la ladera (plana, no convergente) requerida para desarrollar la saturación en el periodo húmedo crítico que se está considerando. Este concepto puede ser útil para establecer estimaciones de campo de R/T a través de la identificación de campo de los límites de saturación de la superficie.

2.3 ÍNDICE DE ESTABILIDAD EN LADERAS

El índice de estabilidad SI (Stability Index), para estos casos es el factor de seguridad nos da una medida de la magnitud de los factores desestabilizadores (por ejemplo, aumento de la humedad debido al drenaje del cauce, carga local o aumento local de las presiones de los poros debido a los efectos de tubificación del suelo), necesarios para la inestabilidad. Utilizamos los términos ‘umbral inferior’ y ‘umbral superior’ para caracterizar regiones donde, según los rangos de incertidumbre de parámetros cuantificados por el modelo, la probabilidad de inestabilidad es menor o mayor que 50% respectivamente. No se requieren factores externos para inducir inestabilidad en estas regiones. La inestabilidad puede surgir simplemente debido a una combinación de valores de parámetros dentro de los límites con los que se puede cuantificar la incertidumbre y la variabilidad. Usamos el término "pendiente defendida" para caracterizar regiones donde, según el modelo, la pendiente debe ser inestable para cualquier parámetro dentro de los rangos de parámetros especificados. Cuando tales pendientes ocurren en el campo, se mantienen en su lugar por fuerzas no representadas en el modelo, o el modelo es inapropiado, como en el caso de afloramientos de roca madre.

2.4.1 Determinación del índice de estabilidad

Para definir el índice de estabilidad, el índice de humedad de la ecuación (13) se incorpora al factor adimensional de seguridad, ecuación (3), que se convierte en

$$FS = \frac{C + \cos\theta \left[1 - \text{Min} \left(\frac{R}{T} \cdot \frac{a}{\sin\theta}, 1 \right) \cdot r \right] \tan\phi}{\sin\theta} \quad (14)$$

Las variables a y θ son obtenidos de la topografía con los parámetros C , $\tan\phi$, r y R/T . Tratamos la relación de densidad r como esencialmente constante (con un valor de 0.5) pero permitimos incertidumbre en las otras tres cantidades a través de la especificación de los límites inferior y superior. Formalmente, estos límites definen distribuciones de probabilidad

uniformes sobre las cuales se supone que estas cantidades varían al azar, donde $R/T = x$, $\tan \emptyset = t$, y las distribuciones uniformes con límites inferior y superior como:

$$\begin{aligned} C &\sim U(C_1, C_2) \\ x &\sim U(x_1, x_2) \\ t &\sim U(t_1, t_2) \end{aligned} \quad (15)$$

Con los valores de C y t más pequeñas (es decir, C_1 y t_1) junto con la x más grande (es decir, x_2) define el peor de los casos (más conservador) bajo esta supuesta incertidumbre (variabilidad) en los parámetros, las áreas en las que, en este el peor de los casos, FS es mayor que 1 son en términos de este modelo, incondicionalmente estables y definimos como:

$$SI = FS_{min} = \frac{(C_1 + \cos\theta[1 - \text{Min}\left(x_2 \frac{a}{\sin\theta}, 1\right) \cdot r]t_1)}{\sin\theta} \quad (16)$$

Para las áreas donde el factor mínimo de seguridad es menor que 1, existe la posibilidad (probabilidad) de falla, esta es una probabilidad espacial debido a la incertidumbre (variabilidad espacial) en C , $\tan\emptyset$ y T . Esta probabilidad tiene un elemento temporal en el que R caracteriza una humedad que puede variar con el tiempo. Por lo tanto, la incertidumbre en x combina las probabilidades espaciales y temporales.

En estas regiones (con $FS_{min} < 1$) definimos:

$$SI = \text{Prob}(FS > 1) \quad (17)$$

sobre las distribuciones de C , x y t (Ecuaciones, 15). El mejor de los casos es cuando $C = C_2$, $x = x_1$ y $t = t_2$, lo que lleva a que:

$$SI = FS_{max} = \frac{(C_2 + \cos\theta[1 - \text{Min}\left(x_1 \frac{a}{\sin\theta}, 1\right) \cdot r]t_2)}{\sin\theta} \quad (18)$$

En el caso que $FS_{max} > 1$ luego:

$$SI = \text{Prob}(FS > 1) = 0 \quad (19)$$

Las regiones con $SI > 1$ ($FS_{min} > 1$), $0 < SI < 1$ y $SI = 0$ ($FS_{max} < 1$) se ilustran en la Figura 4 en un espacio definido en términos de pendiente ($\tan\theta$) y el área de la cuenca específica. Esto proporciona un medio de visualización útil para comprender este enfoque. En los anexos se deriva las ecuaciones para calcular estas probabilidades y dibujar las líneas en la Figura 4.

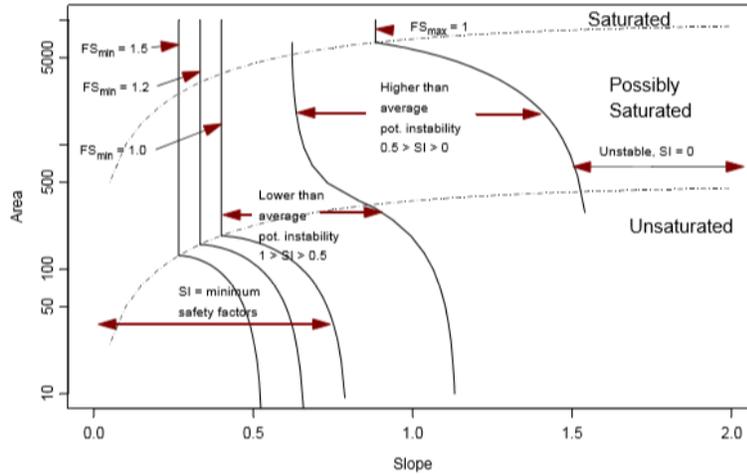


Figura 4: Índice de estabilidad definido en el espacio Área-Pendiente.

Fuente: Pack *et al.* (1999)

Debido a la expresión *Min* en la ecuación (18), debemos considerar específicamente los límites de la saturación y el uso consecuente de $w = 1$, en lugar de $w = x.a / \sin\theta$ en la expresión *Min*. La saturación ocurre cuando (en la ecuación 8)

$$\frac{R}{T} \cdot \frac{a}{\sin\theta} = 1 \quad \text{ó} \quad a = \frac{\sin\theta}{R/T} = \frac{\sin\theta}{x} \quad (20)$$

Esto evaluado para $x = x_1$ define la línea discontinua superior en la Figura 4, entre saturado y posiblemente saturado. Esto, evaluado para $x = x_2$, define la línea discontinua inferior en la Figura 4 entre insaturados y posiblemente saturados.

Las líneas verticales rectas en la Figura 4 son las pendientes que dan un factor de seguridad particular en condiciones saturadas. Cuando $w = 1$, FS es independiente del área de la cuenca específica y se obtiene resolviendo (21) para θ .

$$FS = \frac{(C + \cos\theta[1 - \text{Min}\left(x \frac{a}{\sin\theta}, 1\right) \cdot r]t_1)}{\sin\theta} = \frac{C + \cos\theta \cdot [1 - wr]t}{\sin\theta} \quad (21)$$

Una solución general a (21) para θ al cuadrado, reconociendo que $\sin^2\theta = 1 - \cos^2\theta$, y resolviendo la ecuación cuadrática resultante siguiente:

$$\cos\theta = \frac{-C(1 - rw)t + \sqrt{FS^2(FS^2 + (1 - rw)^2t^2 - C^2)}}{FS^2 + (1 - rw)^2t^2} \quad (22)$$

Esto se usa para definir la función

$$csw(t, C, r, w, FS) = \cos^{-1} = \frac{-C(1 - rw)t + \sqrt{FS^2(FS^2 + (1 - rw)^2t^2 - C^2)}}{FS^2 + (1 - rw)^2t^2} \quad (23)$$

Por lo tanto, las líneas verticales están en valores de pendiente ($\tan.\theta$) correspondientes a la evaluación de esta función con argumentos apropiados, a saber

$$\begin{aligned} FS_{min} &= 1.5, \quad \theta = csw(t_1, C_1, r, 1, 1.5) \\ FS_{min} &= 1.0, \quad \theta = csw(t_1, C_1, r, 1, 1.0) \\ FS_{max} &= 1.0, \quad \theta = csw(t_2, C_2, r, 1, 1.0) \end{aligned} \quad (24)$$

Las curvas que definen un factor de seguridad específico en condiciones insaturadas se obtienen resolviendo (21) para “a” para el caso en que:

$$w = \frac{R}{T} \cdot \frac{a}{\sin\theta} = x \frac{a}{\sin\theta} < 1 \quad (25)$$

En la expresión Min, la solución es:

$$a = \frac{\sin\theta}{x \cdot r} \left(1 - \frac{FS \cdot \sin\theta - C}{t \cdot \cos\theta} \right) \quad (26)$$

Esta ecuación es usada para definir la función:

$$af(\theta, C, t, x, r, FS) = \frac{\sin\theta}{x \cdot r} \left(1 - \frac{FS \cdot \sin\theta - C}{t \cdot \cos\theta} \right) \quad (27)$$

que con argumentos apropiados se dan las líneas correspondientes al FS fijo en condiciones insaturadas, para ángulos de pendiente θ que varían entre el límite inferior definido por la

ecuación (24) y el límite superior definido evaluando (25) con $w = 0$. Las ecuaciones dadas hasta ahora son suficientes para calcular SI para la región donde $SI > 1$, y para definir las regiones incondicionalmente estables e incondicionalmente inestables. La región intermedia donde el SI se define probabilísticamente requiere distribuciones derivadas en el FS dado por la ecuación (21).

Esto es diferente dependiendo de si w (el término mínimo) es 1 (saturado) o no, lo que requiere un tratamiento separado de las 3 regiones de probabilidad definidas en la Figura 5.

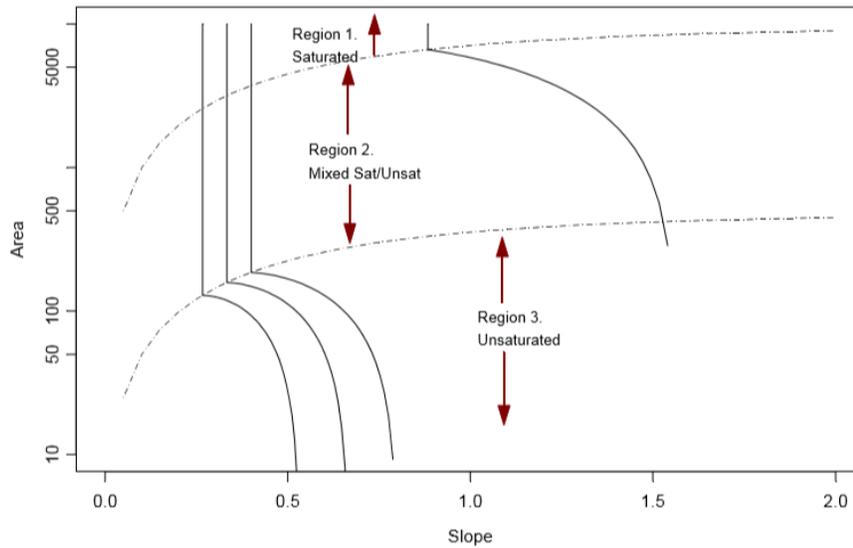


Figura 5: Definición de regiones para distribuciones derivadas

Fuente: Pack *et al.* (1999)

En la región 1, siempre saturada, FS viene dado por:

$$FS = \frac{C + \cos\theta(1 - r)t}{\sin\theta} \quad (28)$$

suponiendo que C y t son variables aleatorias distribuidas uniformemente (ecuación 15), por lo tanto, la combinación es una suma de la forma genérica

$$Z = X + Y \quad (29)$$

Para $X \sim U(x_1, x_2)$ y $Y \sim U(y_1, y_2)$ La función de distribución acumulada de Z viene dada por:

Si $z < x_1 + y_1$

$$F(z) = Prob(Z < z) = 0 \quad (30)$$

Si $x_1 + y_1 < z < \min(x_1 + y_2, x_2 + y_1)$

$$F(z) = \frac{(z - y_1 - x_1)^2}{2(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \quad (31)$$

Si $\min(x_1 + y_2, x_2 + y_1) < z < \text{m\u00e1s}(x_1 + y_2, x_2 + y_1)$

Siendo que: $d = z - x - y_1$

$$d_1 = \min(x_2 + x_1, y_2 + y_1)$$

y $d_2 = \text{m\u00e1x.}(x_2 + x_1, y_2 + y_1)$

$$F(z) = \frac{d - \frac{d_1}{2}}{d_2} \quad (32)$$

Si $\text{m\u00e1x}(x_1 + y_2, x_2 + y_1) < z < x_2 + y_2$

$$F(z) = 1 - \frac{(z - y_2 - x_2)^2}{2(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \quad (33)$$

Si $z > x_2 + y_2$

$$F(z) = 1 \quad (34)$$

Esto define una funci\u00f3n gen\u00e9rica, que con par\u00e1metros se denota de la siguiente forma:

$$F_{2s}(x_1, x_2, y_1, y_2; z) = Prob(Z < z) \quad (35)$$

En la regi\u00f3n 1, SI se obtiene evaluando esto con los argumentos apropiados, a saber

$$SI = 1 - F_{2s}\left(\frac{C_1}{\sin\theta}, \frac{C_2}{\sin\theta}, \frac{\cos\theta(1-r)t_1}{\sin\theta}, \frac{\cos\theta(1-r)t_1}{\sin\theta}; 1\right) \quad (36)$$

En la regi\u00f3n 3, nunca saturada, el FS viene dado por:

$$FS = \frac{C + \cos\theta(1-wr)t}{\sin\theta} \quad (37)$$

Se supone que C y t son variables aleatorias distribuidas uniformemente (ecuación 10). también

$$w = x \frac{a}{\sin\theta} \quad (38)$$

que con $x \sim U(x_1, x_2)$ (ecuación 10) también es una variable aleatoria distribuida uniformemente.

$$w \sim U\left(x_1 \frac{a}{\sin\theta}, x_2 \frac{a}{\sin\theta}\right) \quad (39)$$

Por lo tanto, la combinación es de forma genérica.

$$Z = X + YB \quad (40)$$

Esto requiere la combinación del producto.

$$A = YB \quad (41)$$

Con la suma de:

$$Z = X + A \quad (42)$$

donde X, Y y B están distribuidos uniformemente

$$\begin{aligned} X &\sim U(x_1, x_2) \\ Y &\sim U(y_1, y_2) \\ B &\sim U(b_1, b_2) \end{aligned} \quad (43)$$

La función de distribución acumulada de A se obtiene para un "a" particular mediante la evaluación del área debajo de la hipérbola definida por $a = yb$ que está dentro del cuadro (Figura A-2) que define el dominio $(b_1, b_2), (y_1, y_2)$ en relación con el área total de la caja. Las declaraciones condicionales se usan dependiendo de qué lados se cruza la hipérbola.

La simetría se invoca cuando la hipérbola que cruza los bordes izquierdo y derecho, que solo es posible cuando $y_1b_2 < y_2b_1$, es equivalente a la hipérbola que interseca los bordes inferiores de los bordes superior e inferior cuando $y_1b_2 > y_2b_1$, si y i b se intercambian. Elegimos trabajar

con el caso $y_1 b_2 < y_2 b_1$. Antes de la evaluación de $F(a)$, si $y_1 b_2 > y_2 b_1$, b y y se intercambian. Entonces $F(a)$ viene dado por:

Si $a < y_1 b_1$

$$F(a) = \text{Prob}(A < a) = 0 \quad (44)$$

Si $y_1 b_1 < a < y_1 b_2$

$$F(a) = \frac{a \ln\left(\frac{a}{y_1 b_1}\right) - a - y_1 b_1}{(y_2 - y_1)(b_2 - b_1)} \quad (45)$$

Si $y_1 b_2 < a < y_2 b_1$

$$F(a) = \frac{a \ln\left(\frac{b_2}{b_1}\right) - (b_2 - b_1)}{(y_2 - y_1)(b_2 - b_1)} \quad (46)$$

Si $y_2 b_1 < a < y_2 b_2$

$$F(a) = \frac{a \ln\left(\frac{y_2 b_2}{a}\right) + a + y_1 b_1 - y_2 b_1 - y_1 b_2}{(y_2 - y_1)(b_2 - b_1)} \quad (47)$$

Si $a > y_2 b_2$

$$F(a) = 1$$

Esto define una función genérica, que con dichos parámetros se denota como:

$$F_A(y_1, y_2, b_1, b_2; a) = \text{Prob}(A < a) \quad (48)$$

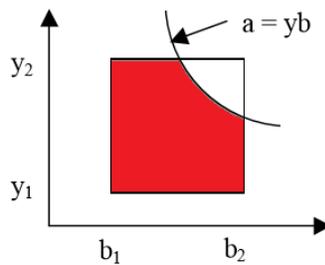


Figura 6: Evaluación de CDF para producto de variables aleatorias uniformes

Fuente: Pack *et al.* (1999)

Ahora la combinación dada por ($Z=X+A$) tiene función de densidad, la convolución de las funciones de densidad de A y X, a saber

$$f_z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_A(a) \cdot f_x(z-a) \partial a \quad (49)$$

Desde $X \sim U(x_1, x_2)$ esto puede ser escrito como:

$$f_z(z) = \int_{z-x_2}^{z-x_1} \frac{f_A(a)}{x_2-x_1} \partial a = \frac{F_A(z-x_1) - F_A(z-x_2)}{x_2-x_1} \quad (50)$$

Para obtener la función de distribución acumulada de Z necesitamos la integral de $F_A(a)$, que se denominará $F_{AI}(a)$. Entonces

$$F_z(z) = \frac{F_{AI}(z-x_1) - F_{AI}(z-x_2)}{x_2-x_1} \quad (51)$$

Integrando $F_A(a)$, las expresiones entre las ecuaciones (43) y (48) obtenemos

Si $a < y_1 b_1 = a_1$

$$F_{AI}(a) = C_1 = F_{AI1}(a) + C_1 \quad (52)$$

Si $y_1 b_1 = a_2 < a < y_1 b_2 = a_3$

$$F_{AI}(a) = \frac{\frac{a^2}{2} \ln\left(\frac{a}{y_1 b_1}\right) - \frac{3a^2}{4} + y_1 b_1 a}{(y_2 - y_1)(b_2 - b_1)} + C_2 = F_{AI}(a) + C_2 \quad (53)$$

Si $y_1 b_2 = a_3 < a < y_2 b_1 = a_4$

$$F_{AI}(a) = \frac{\frac{a^2}{2} \ln\left(\frac{b_2}{b_1}\right) - (b_2 - b_1)y_1 a}{(y_2 - y_1)(b_2 - b_1)} + C_3 = F_{AI3}(a) + C_3 \quad (54)$$

Si $y_2 b_1 = a_4 < a < y_2 b_2 = a_5$

$$F_{AI}(a) = \frac{\frac{a^2}{2} \ln\left(\frac{b_2 y_2}{a}\right) + \frac{3a^2}{4} (b_1 y_1 - b_1 y_2 - b_2 y_1) a}{(y_2 - y_1)(b_2 - b_1)} + C_4 = F_{AI4}(a) + C_4 \quad (55)$$

Si $a > y_2 b_2 = a_5$

$$F_{AI}(a) = a + C_5 = F_{AI5}(a) + C_5 \quad (56)$$

De lo anterior, el argumento "a" son los valores que definen el dominio se definen junto con expresiones genéricas sobre cada segmento de dominio. Las constantes de integración deben especificarse para que FAI sea continua (porque es la integral de una función acotada). La primera constante es arbitraria porque el uso de FAI está en una expresión de diferencia (ecuación A-29). Por lo tanto, define:

$$C_1 = 0$$

$$C_i = -F_{AIi}(a_{i-1}) + C_{i-1} + F_{AIi-1}(a_{i-1}) \quad \text{for } i = 2 \dots 5 \quad (57)$$

para asegurar esta continuidad. Es posible (cuando y_1 o b_1 es igual a 0) que algunos de los intervalos entre a secuenciales se reduzcan a una longitud de 0. En estos casos, se debe entender que el subíndice (i-1) hace referencia al intervalo anterior distinto de cero, para evitar errores en el cálculo de FAI(a). Esto define una función genérica, que con parámetros se denota:

$$F_{AI}(y_1, y_2, b_1, b_2; a) = \int F_A(y_1, y_2, b_1, b_2; a) \partial a \quad (58)$$

La función de distribución acumulada general para la forma de ecuación de producto de suma genérica (40) es de (51).

$$F_{S3}(x_1, x_2, y_1, y_2, b_1, b_2; z) = \frac{1}{x_2 + x_1} [F_{AI}(y_1, y_2, b_1, b_2; z - x_1) - F_{AI}(y_1, y_2, b_1, b_2; z - x_2)] \quad (59)$$

Esta expresión solo funciona cuando los tres intervalos (x_1, x_2) , (y_1, y_2) , (b_1, b_2) tienen una longitud distinta de cero. En el caso de que el intervalo x tenga una longitud 0, esto se reduce a la función general del producto (ecuación, 48). En el caso de que los intervalos y o b tengan longitud cero, se reduce a la suma genérica de dos variables (ecuación 30).

En la región 3, el SI se obtiene evaluando esto con los argumentos apropiados, a saber

$$x_1, x_2 \Leftrightarrow \frac{C_1}{\sin\theta}, \frac{C_2}{\sin\theta} \quad (60)$$

$$y_1, y_2 \Leftrightarrow \frac{\cos\theta}{\sin\theta} \left(1 - x_2 \frac{a}{\sin\theta}\right), \frac{\cos\theta}{\sin\theta} \left(1 - x_1 \frac{a}{\sin\theta}\right) \quad (61)$$

$$b_1, b_2 \Leftrightarrow t_1, t_2 \quad (62)$$

$$SI = Prob(FS > 1) = 1 - F_{S3}(x_1, x_2, y_1, y_2, b_1, b_2; 1) \quad (63)$$

En la región 2, zona posiblemente saturada, el FS es dado por:

$$FS = \frac{C + \cos\theta(1 - wr)t}{\sin\theta} \quad (64)$$

que es lo mismo que para la región 3. Sin embargo, w viene dado por:

$$w = \text{Min} \left(x \frac{a}{\sin\theta}, 1 \right) \quad (65)$$

Desde $X \sim U(x_1, x_2)$ y $x_2 \cdot \frac{a}{\sin\theta} > 1$ Por lo tanto, w es 1 con probabilidad

$$\frac{x_2 \frac{a}{\sin\theta} - 1}{x_2 \frac{a}{\sin\theta} - x_1 \frac{a}{\sin\theta}} \quad (66)$$

y uniformemente distribuido en el rango $x_1 \cdot \frac{a}{\sin\theta}, 1$ con probabilidad

$$\frac{1 - x_1 \frac{a}{\sin\theta}}{x_2 \frac{a}{\sin\theta} - x_1 \frac{a}{\sin\theta}} \quad (67)$$

En el primer caso, la función de distribución acumulativa de FS es como para la región 1, y en el segundo caso como para la región 3. Por lo tanto, la función de distribución acumulativa resultante para el factor de seguridad en la región 2, es:

$$\begin{aligned} F(z) &= Prob(FS < z) \\ &= \frac{x_2 \frac{a}{\sin\theta} - 1}{x_2 \frac{a}{\sin\theta} - x_1 \frac{a}{\sin\theta}} F_{2s} \left(\frac{C_1}{\sin\theta}, \frac{C_2}{\sin\theta}, \frac{\cos\theta(1-r)t_1}{\sin\theta}, \frac{\cos\theta(1-r)t_1}{\sin\theta}, z \right) \\ &+ \frac{1 - x_1 \frac{a}{\sin\theta}}{x_2 \frac{a}{\sin\theta} - x_1 \frac{a}{\sin\theta}} F_{3s} \left(\frac{C_1}{\sin\theta}, \frac{C_2}{\sin\theta}, \frac{\cos\theta}{\sin\theta} \left(1 - x_2 \frac{a}{\sin\theta}\right), \frac{\cos\theta}{\sin\theta} \left(1 - x_1 \frac{a}{\sin\theta}\right), t_1, t_2; z \right) \end{aligned} \quad (68)$$

Y por lo tanto SI.

$$SI = Prob(FS > z) = 1 - F(z = 1)$$

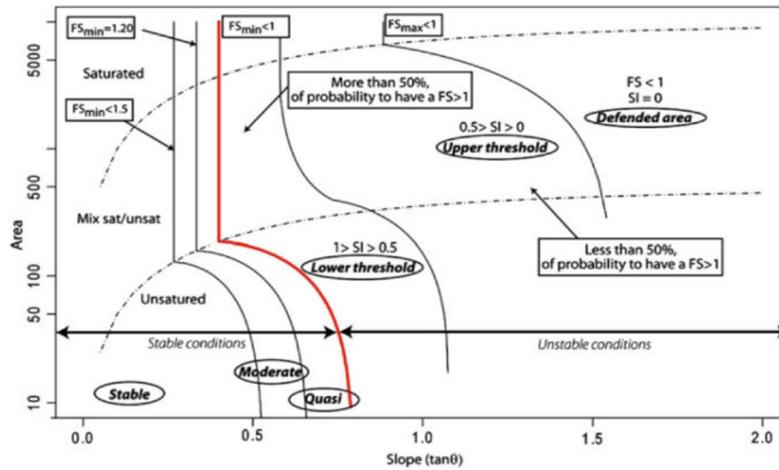


Figura 7: Gráfico de clases del índice de estabilidad y zonas de saturación.

Fuente: Pack *et al.* (1999)

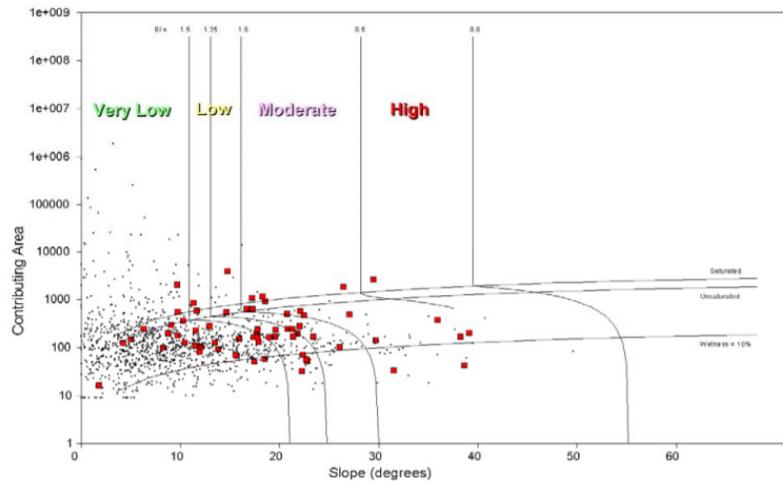


Figura 8: Gráfico de área de pendiente de deslizamientos de tierra conocidos (rojo) y puntos de posibles deslizamientos (negro) vs. clases de índice de estabilidad

Fuente: Mabee y Duncan (2013)

2.4 MÉTODOS DEL MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

2.4.1 Modelos de elevación digital

Las estructuras de almacenamiento de datos disponibles para codificar digitalmente la topografía comprenden: (1) modelos de elevación digital de cuadrícula (DEM); (2) Redes Irregulares Trianguladas (TIN); y (3) estructuras de almacenamiento basadas en contornos. Los DEM de cuadrícula consisten en una estructura de datos de matriz con la elevación topográfica de cada píxel almacenado en un nodo de matriz. Los TIN almacenan la ubicación X-Y, así como la elevación en nodos espaciados irregularmente. Las estructuras de datos basadas en el contorno almacenan datos vectoriales a lo largo de las líneas de contorno. La pendiente y el área de la cuenca específica se pueden calcular en cada uno de estos marcos y, por lo tanto, la teoría descrita anteriormente podría implementarse en cualquiera de estos marcos. Dentro de SINMAP, los DEM de cuadrícula se seleccionaron para su uso principalmente debido a su simplicidad y compatibilidad con la funcionalidad del sistema de información geográfica, así como a la disponibilidad de datos y la experiencia previa con su uso. Las rutinas de procesamiento DEM de cuadrícula utilizadas se basan en los métodos descritos por O'Callaghan y Mark (1984) citado por Giménez (2008) y Tarboton (1989), Tarboton (1997). Hay 4 pasos involucrados: (1) Correcciones de llenado de vacíos, (2) Cálculo de pendientes y direcciones de flujo; (3) Cálculo del área de captación específica o área de contribución y (4) Cálculo del índice de estabilidad.

2.4.2 Correcciones de llenado de vacíos

Los vacíos en los datos de elevación digital se definen como elementos de cuadrícula o conjuntos de elementos de cuadrícula rodeados por un terreno más alto que, en términos del DEM, no drenan. Estos son raros en la topografía natural y generalmente se supone que son problemas que surgen debido a la naturaleza discreta y los errores de datos en la preparación del DEM. Aquí se eliminan mediante un enfoque de "inundación". Esto eleva la elevación de cada celda de la cuadrícula del pozo dentro del DEM a la elevación del punto de fluidez más bajo en el perímetro del pozo (Jenson y Domingue 1988).

2.4.3 Pendientes y direcciones de flujo

El método más antiguo y simple para especificar direcciones de flujo es asignar el flujo desde cada celda de la cuadrícula a uno de sus ocho vecinos, ya sea adyacente o en diagonal, en la dirección con la pendiente descendente más pronunciada O'Callaghan y Mark (1984) citado por Giménez (2008) indica en su tesis doctoral que introdujeron este método para determinar la pendiente, designado D8 (8 direcciones de flujo), y se ha utilizado ampliamente. El enfoque D8 y que tiene desventajas derivadas de la discretización del flujo en solo una de las ocho direcciones posibles, separadas por 45° (Tarboton 1997) y que este método ha motivado el desarrollo de otros métodos que comprenden métodos de dirección de flujo múltiple (Quinn *et al.* 1991; Tarboton 1997), métodos de dirección aleatoria (Fairfield y Leymarie 1991) y métodos de tubo de flujo de rejilla (Costa-Cabral y Burges 1994; Tarboton 1997) discute los méritos relativos de estos en el que SINMAP utiliza el *método D8* que es el método de dirección de flujo múltiple.

Tarboton (1997) nos indica además que, en este método el ángulo de dirección del flujo medido en sentido antihorario desde el este se representa como una cantidad continua entre 0 y 2π . Este ángulo se determina como la dirección de la pendiente descendente más pronunciada en las ocho facetas triangulares formadas en una ventana de celda de cuadrícula de 3×3 centrada en la celda de cuadrícula de interés como se ilustra en la Figura 5. Se utiliza una representación centrada en bloque con cada valor de elevación tomado para representar la elevación del centro de la celda de cuadrícula correspondiente. Se forman ocho facetas triangulares planas entre cada celda de la cuadrícula y sus ocho vecinos. Cada uno de estos tiene un vector de pendiente descendente que cuando se dibuja hacia afuera desde el centro puede estar en un ángulo que se encuentra dentro o fuera del rango de ángulo de 45° ($\pi/4$ radianes) de la faceta en el punto central. Si el ángulo del vector de pendiente está dentro del ángulo de la faceta, representa la dirección de flujo más pronunciada en esa faceta. Si el ángulo del vector de pendiente está fuera de una faceta, la dirección de flujo más pronunciada asociada con esa faceta se toma a lo largo del borde más inclinado. La pendiente y la dirección del flujo asociadas con la celda de la cuadrícula se toman como la magnitud y la dirección del vector más inclinado hacia abajo de las ocho facetas. Esto se implementa utilizando las ecuaciones dadas en Tarboton (1997).

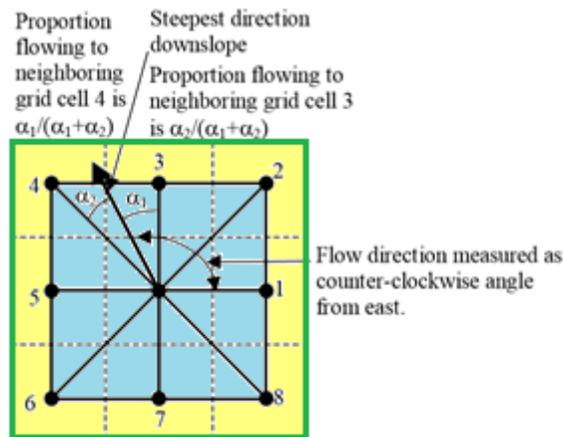


Figura 9: Dirección del flujo definida como la pendiente descendente más pronunciada en las facetas triangulares planas en una cuadrícula centrada en bloques

Fuente: Tarboton (1997).

Una de las claves de la derivación de características hidrológicas de una superficie es la capacidad de determinar la dirección de flujo desde cada celda en el ráster. Esto se lleva a cabo con la herramienta “*Dirección de flujo*”.

Esta herramienta toma una superficie como entrada y proporciona como salida un ráster que muestra la dirección del flujo que sale de cada celda. Si se elige la opción *Ráster de eliminación de salida*, se creará un ráster de salida con un radio del cambio máximo de elevación desde cada celda a lo largo de la dirección de flujo hasta la longitud de la ruta entre los centros de las celdas y se expresa en porcentajes. Si se elige la opción *Forzar* todas las celdas de eje para que se desplacen hacia fuera, todas las celdas en el eje del ráster de superficie se desplazan hacia fuera desde el ráster de superficie.

Existen ocho direcciones de salida válidas que se relacionan con las ocho celdas adyacentes hacia donde puede ir el flujo. Este enfoque comúnmente se denomina el modelo de flujo de ocho direcciones (D8) y sigue un acercamiento presentado en Park et al. (2013).

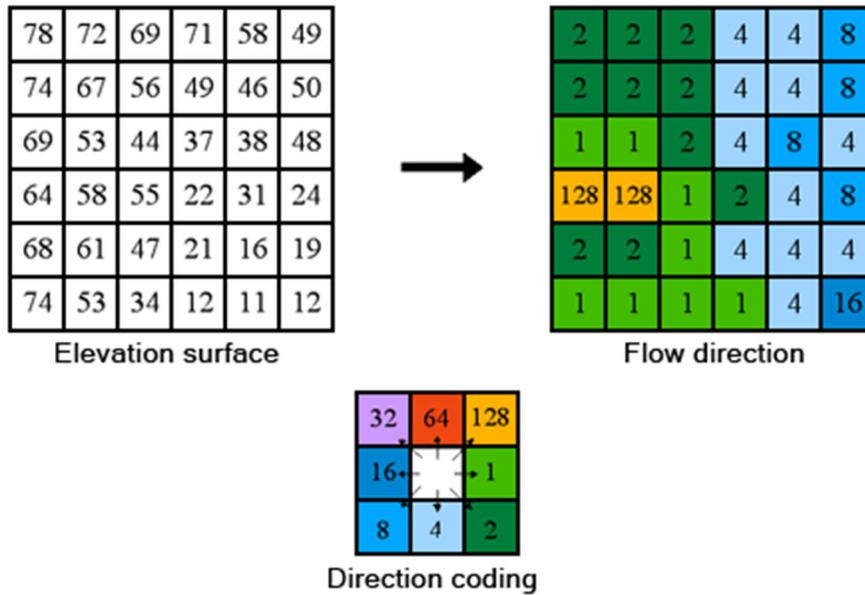


Figura 10: Codificación de la dirección de flujo

Fuente: Garbechet y Martz (1997)

Para la codificación de la dirección de flujo (Figura 10), en el caso de que los vectores de pendiente no sean positivos (pendiente descendente), la dirección del flujo se establece utilizando el método de Garbechet y Martz (1997) para determinar el flujo a través de áreas planas, esto hace que las áreas planas se drenen lejos del terreno alto y hacia terreno bajo. Estos procedimientos tienen un impacto mínimo cuando se usan, porque las áreas planas siempre son incondicionalmente estables, pero se incluyen para completar y compatibilidad con otros usos hidrológicos, y para evitar lagunas de datos en los mapas producidos.

2.4.4 Área de la cuenca específica o área de contribución

El área ascendente (contada en términos del número de celdas de la cuadrícula) se calcula utilizando un procedimiento recursivo que es una extensión del algoritmo recursivo muy eficiente para direcciones individuales (Mark 1988). El área de la pendiente ascendente de cada celda de la cuadrícula se toma como su propia área (una) más el área de los vecinos de la pendiente ascendente que tienen una fracción de drenaje. El flujo de cada celda se drena a un vecino, si el ángulo cae a lo largo de un cardinal (0 , $\pi/2$, π , $3\pi/2$) o diagonal ($\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$, $7\pi/4$), o está en un ángulo que cae entre el ángulo directo a dos vecinos adyacentes. En el último caso, el flujo se dosifica entre estos dos píxeles vecinos de acuerdo con la

proximidad del ángulo de dirección del flujo con el ángulo directo de esos píxeles, como se ilustra en la Figura 5. El área de la cuenca específica “a”, es el área de pendiente ascendente por unidad de longitud de contorno, tomado aquí como el número de celdas multiplicado por el tamaño de celda de la cuadrícula (área de celda dividida por el tamaño de celda). Esto supone que el tamaño de celda de la cuadrícula es la longitud efectiva del contorno, b, en la definición del área de la cuenca específica (Figura 3) y no distingue ninguna diferencia en la longitud del contorno que dependa de la dirección del flujo.

2.4.5 Índice de estabilidad y humedad del índice de estabilidad en el entorno SIG.

El índice de estabilidad del modelo SINMAP, es simplemente una evaluación de la celda de una cuadrícula con las ecuaciones de marco teórico. La humedad calculada a partir de la ecuación (8) también se devuelve como un subproducto de los cálculos del índice de estabilidad.

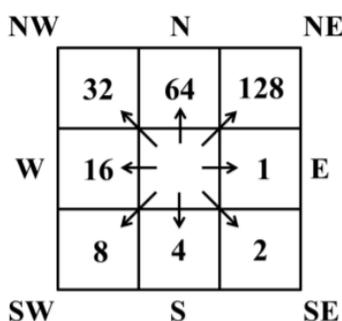


Figura 11: Descripción general del código de dirección D8 ESRI

Fuente: Park *et al.* (2013).

El índice de estabilidad se obtiene con el método de talud infinito de Tarboton (1997), quien asume que el agua fluye por uno o dos celdas dividiendo el flujo entre las dos celdas más cercanas a la pendiente más empinada dirección, la figura 7 ilustra el cálculo de direcciones de flujo. La única dirección de flujo está determinada por la pendiente descendente más pronunciada entre las ocho facetas triangulares, esta dirección se calcula distribuyendo el flujo entre dos píxeles de pendiente descendente según a qué tan cerca está la dirección del flujo del ángulo directo al píxel de pendiente descendente. En otras palabras, el procedimiento se basa en representar la dirección del flujo como un solo ángulo tomado como

la pendiente descendente más empinada entre las ocho facetas triangulares. Park *et al.* (2013) indican que el método de dirección de flujo múltiple, genera cierta dispersión al proporcionar flujo entre celdas de pendiente descendente, pero esto se minimiza ya que el flujo nunca se desvía a más de dos celdas cuesta abajo, en comparación con otros modelos el método de talud infinito es recomendado por muchos autores porque físicamente es más realista.

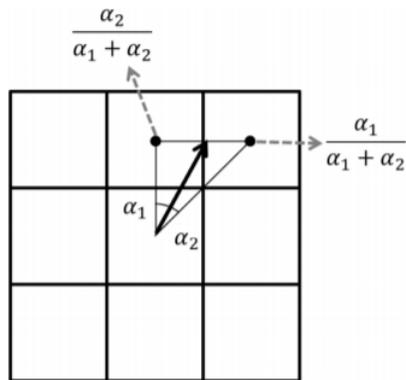


Figura 12: Diagrama conceptual de la pendiente del método de talud infinito.

Fuente: Park *et al.* (2013)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1.1 Ubicación del ámbito de estudio

El ámbito de estudio corresponde a la unidad hidrográfica del río Mariño, que este a su vez se ubica en la unidad hidrográfica del río Pachachaca, siendo esta unidad hidrográfica parte de la intercuenca del Alto Apurímac en el área central y oriental del territorio peruano y que conforma la red principal de drenaje de la unidad hidrográfica del río Amazonas, así mismo la cuenca del río Mariño cuenta con un área de 222.5 Km² y un perímetro de 71.5 Km.

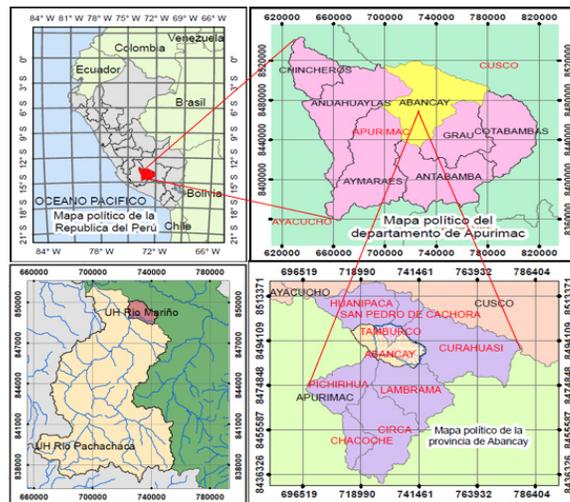


Figura 13: Ubicación hidrográfica de la unidad hidrográfica del río Mariño

Fuente: Elaboración propia.

Políticamente, comprende en los distritos de Abancay y Tamburco, y cuyos límites distritales está conformado por el norte con los distritos de Huanipaca y San Pedro de Cachora, por el este con el distrito de Curahuasi, por el sur con los distritos de Lambrama y Pichirhua, y por el oeste con el distrito de Huancarama este último pertenece a la provincia de Andahuaylas y los demás distritos mencionados pertenecen a la provincia de Abancay ubicado en el norte de la región Apurímac.

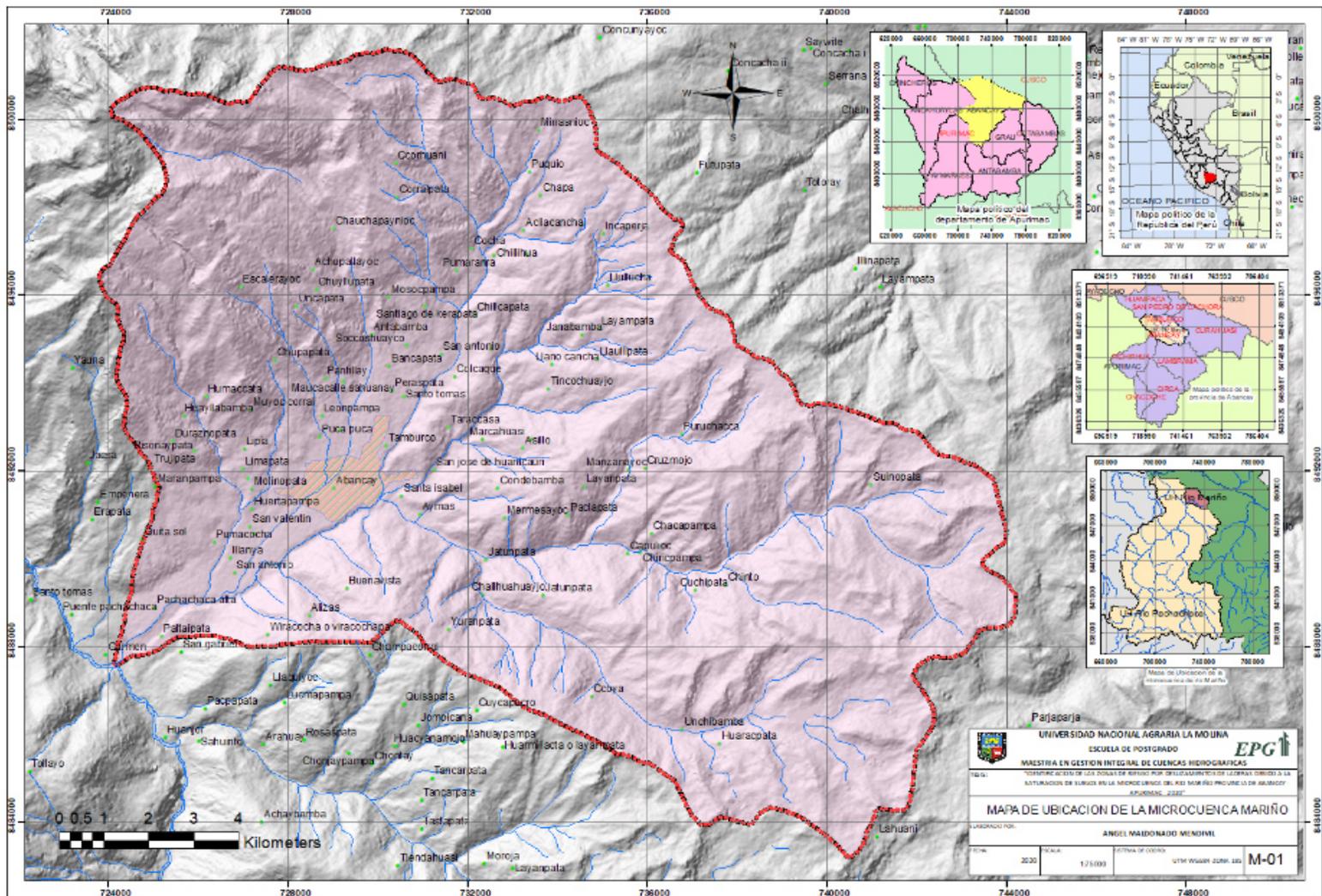


Figura 14: Mapa de Ubicación de la cuenca del río Mariño.
 Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Geomorfología

Uno de los factores condicionantes para la ocurrencia de deslizamientos por saturación de suelos es la geomorfología predominante, y que en el ámbito de la microcuenca la característica principal es el relieve contrastante cuyo factor fundamental para su conformación es la interacción de la estructura-litológica, es decir la presencia de fallas locales y regionales han dado lugar a la conformación de las quebradas, zonas altas y bajas; esta es complementada por la litología de las formaciones.

El contraste de relieve por el cambio de pendiente entre los depósitos cuaternarios y las vertientes de montañas, constituyen una franja con orientación Este-Oeste y Noreste-Suroeste provocadas por la deflexión de Abancay, en la que la Cordillera Oriental cambia su dirección abruptamente de Noroeste-Sueste a Este-Oeste.



Figura 15: Vista panorámica de la geomorfología de la microcuenca del río Mariño

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2: Unidades Fisiográficas

PAISAJE	DESCRIPCION
ALTIPLANICIE	Altiplanicie allanada
	Altiplanicie ondulada
	Altiplanicie disectada
	Fondos de valle glacial y aluvial
MONTAÑOSO	Pie de Montaña
	Vertientes de montaña disectada
	Vertientes de montaña empinada

Fuente: Apaza (1997)

a. Altiplanicies

Se considera a extensas zonas de territorio más o menos plano y que generalmente son superficies estables con poca erosión y/o sedimentación, se clasifican de la siguiente manera:

Altiplanicies Allanadas.

Están constituidas por sectores de peniplanicies con pendientes predominantes de 0 a 25%, se ubican en las partes altas, sobre los 3 800 y los 4 500 m.s.n.m. En general, están compuestas por formas de tierra excavadas por las glaciaciones cuaternarias, principalmente conformadas por algunos depósitos morrénicos, eluviales de los intrusivos, coluviales de la formación Copacabana fundamentalmente. La forma del relieve de esta unidad se debe principalmente a procesos de erosión y deposición de las antiguas glaciaciones que han dejado superficies llanas. Estas geoformas se ubican al Este y Noreste de la microcuenca.

Estas geoformas, se constituyen en zonas estratégicas para el establecimiento de zonas de recarga artificial de los acuíferos, ya sea a través de represas, amunas, diques y zanjas de infiltración.

Altiplanicies Onduladas.

Constituyen sectores de peniplanicies de erosión y deposición con pendientes predominantes de 5 - 15 %, que se ubican en la parte alta Este y Noreste de la microcuenca Mariño, generalmente sobre los 3 800 y los 4 500 m.s.n.m.

Sus estructuras son debidas a la presencia de bancos o capas de rocas duras (intrusivos y calizas de la formación Copacabana, volcánico Sañaica, entre otros) de estructuras horizontales o sub-horizontales, que han subsistido como relieves estructurales protegiendo capas de rocas subyacentes, por ejemplo, ciertas calizas, suelos morrénicos bien cohesionados que también dan las formas onduladas.

Altiplanicies Disectadas.

Son superficies caracterizadas por presentar topografías ligeramente llanas 15-25 % diseccionadas, ubicadas entre los 3 800 y 4 800 m.s.n.m.

Su origen es variado, algunas originados a partir de superficies rocosas duras de estructura tabular, donde la erosión fluvial ha diseccionado diversas estructuras de suelo y de roca.

La mayor parte de estas superficies han sido afectadas por glaciaciones cuaternarias, que dejaron sobre ella un tapiz morrénico discontinuo; algunas no han sido cubiertas por los hielos y solo presentan cubiertas aluviales y lacustres; otras exponen abundante afloramiento llano del substrato rocoso. Esto es visible en la zona norte de la microcuenca.

Fondos de Valle Glaciar y aluvial.

Son suelos de reciente formación (cuaternario), caracterizadas por tener una pendiente moderada a fuertemente inclinada (4-25 %), ubicado por encima de los 3300 msnm. Su origen está ligado, en todos los casos, a los cursos fluviales que han modelado diversos terrenos; no obstante, alguno de ellos ha sido modelado por el avance de masas de hielo de las fases glaciales cuaternarias.



Figura 16: Laguna Uspaycocha a 3840 msnm, emplazada en un depósito morrénico.
Fuente: Elaboración propia.

Las huellas de glaciaciones antiguas alcanzan hasta los 3300 m de altitud ubicadas mayormente en las cabeceras de cuenca distrito de Tamburco, zona norte de la microcuenca. En estos valles los depósitos glaciares (morrenas) representan los acuíferos colgados importantes que son alimentados por lo nevados y los acuíferos de la formación Copacabana.

La presencia de algunas áreas hidromórficas conocidas como “oconales” o “bofedales” se debe a que éstas formas de valle del tipo morrénico, donde el coeficiente de evaporación es relativamente bajo y presencia de suelos arcillosos.

b. Montañas

En forma general, las montañas se consideran como las culminaciones altitudinales del sistema cordillerano andino o áreas de mayor levantamiento orogénico, con vertientes moderadamente empinadas a escarpadas (15 a+50 %) y alturas que superan los 1000 m de la base del río a la parte más alta del relieve.



Figura 17: Laguna Angascocha a 3250 msnm, rodeada de matorrales montañosas.

Fuente: Elaboración propia.

La evolución de la cadena de los andes, transformados hoy en montañas, data desde periodos terciarios hasta el cuaternario, periodos en los que el levantamiento orogénico fue modelando y diseccionando por efectos de las glaciaciones pliocuaternarias, con mayor frecuencia en sentido estructural NW-SE dirección que mantiene hasta ahora, formando valles profundos y maduros como es el valle del Pachachaca y el Apurímac.

La configuración de las Montañas en la región Apurímac, producto de la deflexión de Abancay, tiene un cambio estructural, climático y geológico progresivo, empezando por las montañas más altas que alcanzan los 5300 msnm. (Nevado del Ampay), con temperaturas por debajo -10°C .

Esta conformación geológico estructural ha sido la causante fundamental de la existencia de acuíferos altamente fisurados que tienen buenos niveles de infiltración y transmisividad; pero que tienen como desventaja la no existencia de substratos inferiores impermeables que

permitan el entrapamiento subterráneo de las aguas subterráneas y la surgencia de volúmenes importantes de agua en las partes medias y altas de la microcuenca.

El paisaje montañoso se puede subdividir en diversas geoformas de acuerdo a su grado de inclinación y disección, por lo que se tiene:

Vertientes de montañas allanadas

Son estructuras fisiográficas moderadamente empinadas menores a 25 % dando una forma de relieve allanada producto de la sedimentación y erosión glaciofluvial.

Estas unidades se encuentran distribuidas al norte, lo que corresponde al santuario del Ampay, ya que su pendiente y altura no son tan considerables.

Vertientes de montañas Disectada

Son estructuras fisiográficas moderadamente empinadas de altitudes que superan los 300 metros de la base del río a la cima.

Se caracteriza por tener fuertes disecciones producto de la erosión formando un drenaje avanzado. Estas unidades se encuentran distribuidas en la zona sur y Oeste de la microcuenca, ya que su pendiente y altura es básicamente de zonas de erosión bien avanzada.

Vertientes de Montaña Empinada

Estas formas de tierra poseen una topografía accidentada, con pendientes predominantes de 25 a 80%, se distribuyen de manera considerable y dispersa en toda la microcuenca de estudio, principalmente en la cabecera de cuenca. Están conformadas también por vertientes montañosas de más de 1000 m de altura entre la cima y el nivel de base. Se encuentran en sectores donde la excavación cuaternaria de los glaciares y los movimientos tectónicos afectaron principalmente a volúmenes rocosos poco resistentes, permitiendo el desarrollo de vertientes empinadas. Este es el caso de la zona norte de la ciudad de Abancay que además está controlada por una falla Noroeste -Sureste.

Este sistema es el límite de afluencia de las aguas subterráneas que desembocan por debajo de los materiales cuaternarios (coluvio aluviales) y se pierden por debajo de los materiales de deslizamiento y glaciáricos en los que se emplaza la ciudad de Abancay.



Figura 18: Vertientes de montaña empinada con pendientes predominantes de 25 a 80%

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Geología.

a. Grupo Copacabana.

Grupo Copacabana Inferior (Co-I):

Aflora al Norte y Noroeste de la microcuenca Mariño, en los sectores de Juan Velasco Alvarado y el Santuario Ampay, está constituida por calizas, de color gris claro, oscuro y estratos negros, fuertemente plegados, fracturados y fisurados, los estratos buzcan en promedio hacia el Suroeste, Este y Sur, producto de la tectónica andina compresiva.

Esta unidad desde el punto de vista hidrogeológico, tiene un rol fundamental en la infiltración de las aguas de precipitación pluvial y el posterior flujo de las aguas infiltradas hacia las partes bajas de la microcuenca del Mariño, en dirección Norte-Sur y Noreste-Suroeste. Se constituye en uno de los acuíferos más importantes de la zona norte de la microcuenca del Mariño,

Grupo Copacabana Superior (Co-Su):

Aflora al Norte y Noroeste de la microcuenca Mariño, está compuesta por margas negras, calizas alistonadas, lutitas negras fuertemente fracturadas, fisuradas. Presenta tendencia casi generalizada de buzamiento de estos estratos hacia el Este y Sur de la microcuenca, cuyos planos de estratificación son visibles y son las causantes de los grandes deslizamientos que han conformado la ladera donde se emplaza la ciudad de Abancay.



Figura 19: Afloramiento de rocas de Grupo Copacabana superior.

Fuente: Elaboración propia.

Los sistemas de fallas antiguos de dirección Noroeste-Sureste y Norte-Sur, que coinciden con el sistema de fracturas S1 (N162, 75N) y S2 (N50, 60N) son los que permiten el flujo de aguas subterráneas, las mismas que afloran en los sistemas de falla Noreste-Suroeste y Este-Oeste que son fallas que coinciden con el cambio de dirección de la cordillera oriental en la deflexión de Abancay.

Esta unidad junto al Copacabana Inferior, desde el punto de vista hidrogeológico, tienen un rol fundamental en la infiltración de las aguas de precipitaciones pluviales y posterior transmisión de las aguas infiltradas hacia las partes bajas de la microcuenca del Mariño, así como el aprovechamiento de los deshielos del nevado de Ampay. La cantidad de reservas de aguas subterráneas existentes en estos 2 grupos, superan enormemente las que existen en los nevados del Ampay.

b. Grupo Mitu (MI)

Esta unidad, se encuentra más al sur de los grupos Copacabana inferior y superior, aunque secuencialmente esta debería estar encima de las anteriores, su posición actual obedece a los procesos de tectonismo andino en sus fases compresivas, que ha hecho repetir al grupo Copacabana superior con el Mitu en la zona Noreste de la microcuenca, debido al cabalgamiento del grupo Copacabana sobre el Mitu.

El Mitu, en esta parte del país, debido al fuerte tectonismo al que ha sido sometido, las fases finas detríticas y volcánico sedimentarios, se encuentran fuertemente fracturadas y fisuradas, situación que le da condiciones de un acuífero importante, con algunas limitantes en las fases finas, que localmente le dan características semi permeables.

La disposición del Mitu, por debajo del grupo Copacabana, es altamente ventajosa para la microcuenca, desde el punto de vista hidrogeológico, puesto que el grupo Copacabana, teniendo mejor porosidad primaria y secundaria y transmisividad, permite captar la mayor cantidad de las aguas de precipitación.

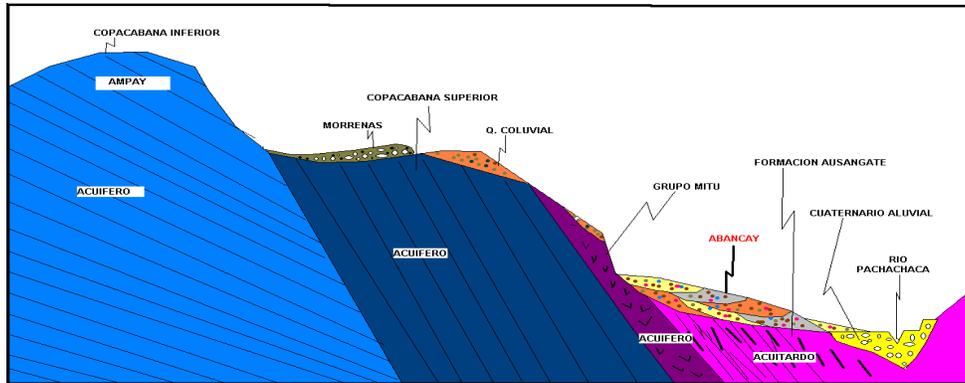


Figura 20: Corte Geológico Norte-Sur de la microcuenca Mariño.
 Fuente: INDECI (2012)

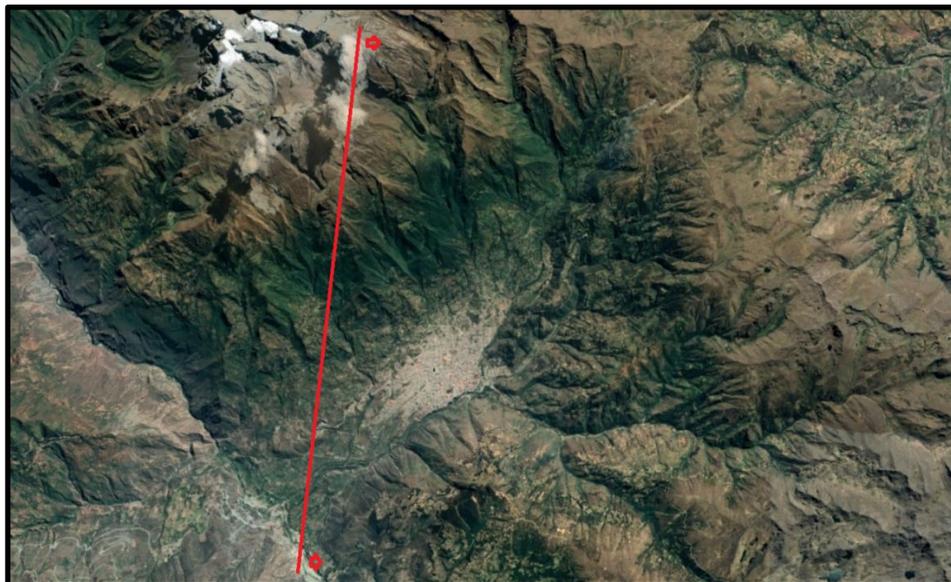


Figura 21: Imagen Satelital del corte geológico Norte-Sur de la microcuenca Mariño.
 Fuente: Imagen Satelital Google Earth (2019).

c. Ortogneis Abancay – (OGN)

Estos afloramientos se ubican en casi toda la zona Sureste de la microcuenca Mariño, está compuesto por un ortogneis cuarzo-diorítico, presenta diaclasas de distensión producidas por el metamorfismo de alta presión y perpendicular a ella hay hasta dos sistemas de fracturamiento producidas por el intenso tectonismo al que fuera sometido.



Figura 22: Imagen del ortogneis de la zona de estudio, este se encuentra altamente fracturado
Fuente: Elaboración propia.

El intrusivo de Abancay en la zona de estudio tiene dos tipos de intrusivos gneisicos bien marcados, uno de ellos es el que está ubicado, en los sectores de Cuicapuquio, Aymas Baja y Alta, Quisapata, Alfapata, San Gabriel, Rosas Pata, Pacpapata, Arahuay y Ccoya. Donde este afloramiento se encuentra con diaclasamiento concordante al flujo de los minerales biotíticos y cuarzosos, además de un fracturamiento y fisuramiento transversal, que en conjunto permiten la infiltración de las aguas pluviales y su transmisividad interna. Este es otro de los acuíferos importantes de la microcuenca que produce importantes caudales de agua. Lastimosamente su ubicación en las partes bajas no permite contar con los caudales que produce en las zonas más propicias para el riego.

El otro tipo de intrusivo gneisico, con menor nivel de fracturamiento y fisuramiento, más masivo, se ubica en las zonas de Chacapampa, Chalhuhayco, Asillo, Tancarpata, Runtuccocha, Ayaorcco, los mismos que no tienen el mismo nivel de permeabilidad, siendo

este limitado solo a niveles superficiales, los que permiten la formación de manantes con caudales muy pequeños y de importancia para la micro y pequeña agricultura de sobrevivencia.

d. Formación Socosani (SO).

De menor importancia que las anteriores unidades, por el tamaño reducido de su afloramiento, por su ubicación (límite de la cuenca Noroeste de la microcuenca Mariño). Está constituida por calizas grises en los niveles inferiores, luego limoarcillitas y areniscas grises. Hacia el tope, se presenta bancos de pelitas negras y niveles de calizas fosilíferas.

Aflora en los sectores de Ccanabamba, Socclaccasa, Maranpata, son acuíferos de muy buena calidad, con presencia de dolinas, estructuras útiles para establecer sistemas de recarga artificial a través de zanjas de derivación y trasvase.

e. Grupo Yura (YU)

En su conjunto este grupo, es un acuífero de importancia local, que permite el afloramiento de manantes de pequeña dimensión, por ubicarse en la cabecera de la cuenca hidrogeológica en el sector de Socclaccasa, aun considerando que el área de afloramiento no es muy grande, pero si contribuye una oferta hídrica importante para la pequeña agricultura.

f. Formación Puente (YU/pu)

Constituida por areniscas de grano media a fino intercaladas con niveles de pelitas negras a grises a veces laminadas y niveles de caliza con abundantes fósiles. La coloración de las areniscas va desde gris, verde y parda fuertemente alterada.

Aflora al Noreste de la microcuenca Mariño, en la zona de Socclaccasa, divortium aquarum de la microcuenca, son acuíferos de muy buena calidad, fuertemente fracturados, relativamente extensas, alimenta manantes de caudales más a menos importantes

g. Formación Cachios (YU/ca).

Constituida por limoarcillitas negras y grises, rara vez carbonosas, intercalados con algunos niveles delgados de areniscas grises o areniscas ferruginosas.

Aflora al Noreste de la microcuenca del Mariño en Socllaccasa, está fuertemente fracturada y fisurada, tiene buenas condiciones para permitir la infiltración de las aguas de precipitación y para hacerlas circular, gracias a ello alimenta a pequeños manantes sobre los 3800 msnm.

h. Formación Labra (YU/la)

Esta unidad, litológicamente presenta una variación en su constitución. En sus niveles basales se encuentra formada por areniscas cuarzo-feldespáticas, de color blanco, marrón amarillento o gris; con intercalaciones milimétricas de arenisca de grano fino a medio o con limoarenitas, limoarcillitas y lutitas negras con presencia de fósiles. A veces la intercalación se da con niveles de calizas o areniscas calcáreas.

Afloran al Noreste de la microcuenca del Mariño en socllaccasa, está fuertemente fracturada y fisurada, tiene buenas condiciones para permitir la infiltración de las aguas de precipitación.

i. Formación Gramadal (YU/gr)

Tiene diversas facies de sedimentación. Hacia la parte inferior se presenta una intercalación de sedimentos pelíticos, lutitas o limoarcillitas de coloración variable que pueden ser negros, grises o verduscos, con areniscas grises oscuras en el nivel inferior afloran calizas gris azuladas, con presencia de fósiles. Hacia el tope, hay una secuencia intercalada de lutitas y areniscas con niveles carbonatados.

En la microcuenca esta formación aflora NE, es un acuífero de buena calidad.

j. Formación Hualhuani (YU/hu)

Es parte superior del grupo Yura, está compuesta por sedimentos de areniscas cuarzosas blancas y grises de grano fino, masivas y con laminaciones, se presentan intercaladas con niveles de pelitas negras carbonosas.

Afloran al noreste de la microcuenca del Mariño, es fácil de identificarlos, debido a que forman pequeñas colinas, igualmente están fuertemente fracturadas, constituyéndose en parte importante del acuífero del Grupo Yura.

k. Formación Murco (Ki-mu)

Esta formación se encuentra en una pequeña franja al límite de la zona Noreste de la microcuenca del Mariño, se caracteriza por la intercalación de areniscas de color rojo de grano fino con laminaciones oblicuas de bajo ángulo, horizontales con limo areniscas y lutitas rojas y verdes. Hacia la parte media, presenta estratos anisométricos de areniscas cuarzosas y feldespáticas blancas; y hacia el tope presenta intercalaciones de areniscas, conglomerados con limos arcillosos y limos arenosos rojos y violáceos con capas delgadas de yeso y calizas.

Su contribución al comportamiento hidrogeológico de la microcuenca es insignificante.

l. Formación Arcurquina (Kis-ar)

Aflora al Noreste de la microcuenca del Mariño, en el límite con Curahuasi, está caracterizada por la presencia de calizas micríticas de estratos anisométricos de aspecto masivo con concreciones calcáreas, de color gris oscuro, intercalados. La secuencia media, consta de calizas de color gris con estratos anisométricos bien estratificados, intercalados con niveles pelíticos (limolitas arcillosas) y estratos de caliza micríticas centimétrica. La secuencia superior está formada por calizas micríticas de color gris a negras en estratos métricos con una grosera estratificación, abundantes fósiles mal conservados y nódulos de chert.

m. Formación Ausangate (KsPp-au)

Se ubica al Suroeste de la microcuenca del Mariño, específicamente en el sector de Molinopata, está conformada por limolitas, limoarenitas y lodolitas color rojo ladrillo intercalados con areniscas de grano medio de color rojo y pardo de espesor media a grueso con laminación paralela y niveles de yesos. Aflora en capas delgadas y alargadas.

n. Intrusivo Cotabambas Curahuasi (Cot-cu/gd y PN-cot-cu/gb)

Las granodioritas son de grano medio a grueso y los gabros tiene aspecto granular de color negro a verde. Estos cuerpos intrusivos afloran en grandes extensiones al Noreste de la microcuenca Mariño, en los sectores de Ayaorcco y Manzanayoc.



Figura 23: Granodioritas de la zona fuertemente alteradas

Fuente: Elaboración propia.

Estos afloramientos se encuentran hacia la superficie (aproximadamente un promedio de 20 cm de espesor) fuertemente alterados, transformados superficialmente en arcillas, lateritas, montmorillonitas, caolinitas, formando grandes depósitos eluviales, que tienen comportamiento casi impermeable, los mismos que son más impermeables todavía cuando estos depósitos están cubiertos por suelos con alto contenido de materia orgánica.

El macizo rocoso está poco fracturado hacia las profundidades, lo que en general le da una característica de Acuífugo.

o. Intrusivo Lambrama Marjune

Este plutón aflora al este de la microcuenca Mariño, son intrusivos de grano grueso, con diámetros de granos de 1 mm hasta 5mm de forma uniforme, está compuesto por cuarzo, biotita, feldespatos potásicos, plagioclasas; y como accesorios mica moscovita, cordierita, anfíbol, etc. Están regularmente fracturados y fisurados, los que le adjudican un nivel de permeabilidad superficial y en el contacto con las fallas, mayor permeabilidad.

En cuanto a su importancia para incrementar la oferta de agua a la microcuenca es bastante limitada.

p. Sub Volcánico Sañayca

Está constituido por Andesitas, Dacitas, Latita Andesítica, se encuentra bastante fracturada aflora en los sectores de soellaccasa y Llañucancha, en la carretera Abancay – Cusco.

Es un acuífero local importante en la alimentación de pequeños manantes que afloran sobre los 3,600 msnm.

q. Depósitos Cuaternarios.

Depósitos Morrénicos:

Están caracterizados por sedimentos depositados en: el fondo, partes laterales y frontales de los valles. Están constituidas por bloques de rocas de tamaño anisométrico aglomerados en matriz gravosa, arenosa y arcillosa, dispuestos en forma caótica.

Afloran en las partes altas, sobre los 3,300 msnm. al Norte, E y Sur de la microcuenca, por los materiales que la conforman, localmente son acuíferos con permeabilidad regular, acuícludes y/o acuitardos.

Depósitos Fluvioglaciares

Está caracterizado por una trama de fragmentos grandes de roca angulosa envueltos en una matriz limo arcillosa con clastos subredondeados polimicticos, debido a los arrastres extensos de masas de suelo producto de la desglaciación. Presentan en algunos casos estratificación debido a los eventos de avalanchas continuas.

Estos depósitos, son semipermeables, tienden a saturarse y sobresaturarse (acuiclude) permitiendo la generación de deslizamientos y por tanto la afluencia de agua en cantidades mínimas, generando humedales.

Depósitos Coluviales.

Son depósitos producidos por los afloramientos rocosos y que son depositados en las laderas, pie de montes, se caracterizan por contener elementos líticos angulosos con una matriz areno-arcillosa.

Una vez depositados estos sedimentos, son redepositados en zona más bajas por procesos erosivos posteriores y/o por movilizaciones en grandes masas a manera de reptación de

suelos, masas, deslizamientos, derrumbes y huaycos, cuyos factores dinamizadores son el agua, la pendiente.



Figura 24: Depósitos coluviales sobre el Grupo Copacabana

Fuente: Elaboración propia.

Depósitos Eluviales

Son depósitos generados in-situ, fundamentalmente por el proceso de meteorismo químico, biológico y físico, ocupa gran parte de la superficie de la microcuenca, sobre todo en los afloramientos plutónicos y metamórficos (zona sureste y noreste de la microcuenca), los que tienen una función determinante en el comportamiento de la escorrentía superficial y la infiltración de las aguas pluviales. Por ejemplo en lo Orto Gneis, han formado una capa que alcanza hasta los 20 m. que limita la capacidad de infiltración de las aguas superficiales, debido a que la descomposición de las plagioclasas, micas, feldspatos han producido capas de arcillas, que sellan las fisuras y micro fisuras y los espacios intergranulares obstaculizando la circulación del agua, convirtiéndose en capas impermeables, que facilitan el sobre saturamiento y por tanto la producción de deslizamientos y/o flujos de lodo.

Depósitos Aluviales

Son depósitos que se encuentran en las redes de ríos y riachuelos de la microcuenca del Mariño. Conformando geoformas de terrazas aluviales mauras y recientes.

Están compuestas por conglomerados con elementos líticos de distintos tamaños con matriz fundamentalmente arenosa y gravosa, son altamente permeables.

3.1.4 Hidrogeología.

Comprende el estudio de la hidrología subterránea de las unidades geológicas de la microcuenca del Mariño para lo cual indicamos las siguientes características.

a. Características Hídricas

Se ha establecido las características hídricas de las diferentes formaciones de la microcuenca del río Mariño, como resultado del estudio geológico - hidrogeológico y evaluación de las formaciones más importantes en el campo, ensayos de infiltración directa.

Después de haber estudiado la naturaleza litológica se ha podido clasificar las unidades entre las categorías siguientes:

Compacto

Se refiere al afloramiento de la zona Este y Noreste del ortogneis, intrusivo gneisico, con menor nivel de fracturamiento y fisuramiento, más masivo, se ubica en las zonas de Chacapampa, Chalhuahuayco, Asillo, Tancarpata, Runtuccocha, Ayaorcco, los mismos que no tienen el mismo nivel de permeabilidad, siendo este limitado solo a niveles superficiales; el Intrusivo de Cotabambas Curahuasi, compuesta por granodioritas y gabros, fuertemente alterados, transformados superficialmente en arcillas, lateritas, montmorillonitas, caolinitas, formando grandes depósitos eluviales, que tienen comportamiento casi impermeable, los mismos que son más impermeables todavía cuando estos depósitos están cubiertos por suelos con alto contenido de materia orgánica.

Coherente y Poroso (porosidad primaria y secundaria)

Se considera a las rocas metamórficas ortogneis ubicada en los sectores de Cuicapuquio, Aymas Baja y Alta, Quisapata, Alfapata, San Gabriel, Rosas Pata, Pacpapata, Arahua y Ccoya. Se ha podido verificar que existe una porosidad primaria producto de los espacios intergranulares de cuarzo, biotitas y feldespatos, y secundaria generada por las diaclasas de flujo y el fracturamiento y/o fisuramiento transversal. Asimismo, los depósitos cuaternarios

El grupo Mitu, con las fases sedimentarias y volcánico sedimentarias, muestran una porosidad primaria y secundaria y buena transmisividad, permitiendo captar la mayor cantidad de las aguas de precipitación.

La formación Murco, con facies detríticas, tiene porosidad primaria en las areniscas cuarzosas y feldespáticas blancas; así como en el tope presenta intercalaciones de areniscas, conglomerados con limos arcillosos y limos arenosos rojos, la porosidad secundaria es fuerte debido al fracturamiento y fisuramiento.

La formación Ausangate en la zona de Molino, tiene porosidad primaria y secundaria.

Finalmente, el sub-volcánico Sañaica, en las zonas alteradas, en los microconglomerados y las mineralizaciones de feldespatos y plagioclasas, muestra una evidente porosidad primaria, estos afloramiento se encuentran totalmente fracturados y fisurados.

Poroso (Porosidad Secundaria)

En este grupo se encuentran fundamentalmente las formaciones con contenido de carbonatos, así podemos identificar a las calizas, de color gris claro, oscuro y estratos negros, fuertemente plegados, fracturados y fisurados, del Copacabana inferior y a las margas negras, calizas alistonadas, lutitas negras fuertemente fracturadas, fisuradas del Copacabana superior, que gracias a esa porosidad secundaria se constituyen en los acuíferos más importantes de la microcuenca del Mariño, asimismo por su alta permeabilidad y por su extensión, ocupando casi toda la zona norte de la microcuenca.



Figura 25: Margas fuertemente fracturadas del Grupo Copacabana.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se tiene el grupo Yura con la Formación Puente, constituida por areniscas de grano media a fino intercaladas con niveles de pelitas negras a grises a veces laminadas y niveles de caliza. La Formación Cachios, constituida por limoarcillitas negras y grises, rara vez carbonosas, intercalados con algunos niveles delgados de areniscas grises o areniscas ferruginosas. La formación Labra, formada por areniscas cuarzo-feldespáticas, de color blanco, marrón amarillento o gris; con intercalaciones milimétricas de arenisca de grano fino a medio o con limoarenitas, limoarcillitas y lutitas negras. La Formación Gramadal, con intercalación de sedimentos pelíticos, lutitas o limoarcillitas de coloración variable que pueden ser negros, grises o verduscos, con areniscas grises oscuras en el nivel inferior con niveles de gris azuladas, y la formación Hualhuani, compuesta por sedimentos de areniscas cuarzosas blancas y grises de grano fino, masivas y con laminaciones, se presentan intercaladas con niveles de pelitas negras carbonosas. Tienen porosidad primaria, aunque con ciertas limitaciones por la recristalización producida por el metasomatismo de contacto con los intrusivos,

Asimismo, también la formación Arcurquina, es fundamentalmente de porosidad secundaria.

Suelto y Poroso

Dentro de este grupo se encuentra las formaciones del cuaternario como son las morrenas, los depósitos eluviales, coluviales y aluviales. Absolutamente todos estos materiales son sueltos o ligeramente compactados como las morrenas.

b. Características Hidráulicas

Permeabilidad y Porosidad en Acuíferos.

Porosidad

Como consecuencia de la textura y estructura de las rocas y suelos tenemos su porosidad, es decir su sistema de espacios vacíos o poros. Los poros en el suelo se distinguen en: macroscópicos y microscópicos. Los primeros son de notables dimensiones, y están generalmente llenos de aire, en efecto, el agua los atraviesa rápidamente, impulsada por la fuerza de la gravedad. Los segundos en cambio están ocupados en gran parte por agua retenida por las fuerzas capilares.

Los terrenos arenosos son ricos en macro-poros, permitiendo un rápido pasaje del agua, pero tienen una muy baja capacidad de retener el agua, mientras que los suelos arcillosos son ricos en micro-poros, y pueden manifestar una escasa aeración, pero tienen una elevada capacidad de retención del agua.

Los acuíferos se pueden clasificar en función del tipo de materiales que los constituyen o según sus circunstancias hidráulicas y estructurales. En el primer caso los acuíferos de forma general pueden ser:

Acuíferos porosos son aquellas formaciones geológicas cuya permeabilidad es debida a su porosidad inter-granular (espacio entre granos) y se encuentran entre ellos: las gravas, arenas, arcosas, etc., y en general, todos los materiales detríticos, este tipo de porosidad es también denominada como porosidad primaria.

Acuíferos cársticos y fisurados son aquellos acuíferos cuya permeabilidad es debida a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de disolución. Entre ellos se encuentran las calizas, dolomías, granitos, basaltos, etc., siendo los dos primeros los tipos más importantes, este tipo de porosidad es también denominada como porosidad secundaria.

Dado la heterogeneidad de la litografía la porosidad varía de acuerdo a la tabla.

Tabla 3: Valores estimados de la Porosidad (%).

Tipo de Suelo	Total	Eficaz
Arcilla	40 a 50	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
Arenas Finas Arenas Limosas	20 a 50	10 a 28
Arenas Gruesas clasificadas	21 a 50	10 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Lutita intacta	1 a 10	0.5 a 5
Lutita fracturada/alterada	30 a 50	
Areniscas	5 a 35	0.5 a 10
Calizas, dolomías No carstificadas.	0.1 a 25	0.1 a 5
Calizas, dolomías carstificadas	5 a 50	5 a 40
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0.01 a 1	0.0005
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1 a 10	0.00005 a 0.01

Fuente: Sender (1998)

Tabla 4: Valores estimados de Porosidad (%) y permeabilidad basado en pruebas y mediciones de campo en la microcuenca Mariño.

Descripcion geologica	Porosidad Total %	Porosidad Eficaz %	Permeabilidad m/dia
Ortogneis zona Norte y NE	1	0.1	< 1
Intrusivo de Cotabambas - Curahuasi	1	0.1	< 1
Ortogneis (Alfapata, San Gabriel, etc.)	8	6.5	10 - 100
Grupos Mitu	6	3.5	5 - 22
f. Murco	12	8	10 - 26
f.Ausangate	12	10	11 - 26
Volcánico Sañaica	6	4	15 - 40
Grupo Copacabana inferior y superior	12	10	10 - 100
Grupos Yura	14	8	13 - 58
Morrenas	18	14	2 - 17
Aluviales	20	15	12 - 25
Coluviales	18	10	3 - 15
Eluviales	20	8	1 - 10

Fuente: Gobierno Regional de Apurímac (2013)

Permeabilidad

Como bien sabemos la permeabilidad es la capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado; e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable. Para ser permeable, un material debe ser poroso, es decir, debe contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido. A su vez, tales espacios deben estar interconectados para que el fluido disponga de caminos para pasar a través del material.

Factores que Afectan la Porosidad y la Permeabilidad

Existen una serie de factores que afectan la porosidad de las rocas y los suelos. La porosidad es un asunto crucial en la búsqueda de agua subterránea. Las características, origen y cambios de la porosidad de la arenisca son más simples de entender y de definir que las de otros tipos de rocas. Sin embargo, aún en el caso de las areniscas hay varios factores que afectan la porosidad. Estos factores incluyen la naturaleza y las características de la arena y otros sedimentos que se acumulan para que, con el tiempo (después de su enterramiento y hundimiento), se conviertan en una roca de depósito de agua. El tamaño de las partículas de las de arena no es determinante para la porosidad, pero la uniformidad o separación de los granos de arena tendrán un gran efecto en la porosidad. La uniformidad o buena separación de la arena tenderá a ser muy porosa que la arena con poca separación. Los granos pequeños de limo o arcilla dentro de la arena son particularmente dañinos, pues rellenan los espacios vacíos o poros.

La génesis o etapa de formación de las rocas también tiene mucha influencia en la propiedad porosa de las rocas. Durante los procesos de sedimentación y acumulación de los estratos, el peso del sedimento superior (y posteriormente de rocas) tiene una alta probabilidad de cambiar la acumulación y disposición de las arenas. Al principio, estos cambios son generalmente una pérdida de porosidad debido a la compactación y posteriormente, una pérdida adicional debido a la mineralización o cementación dada generalmente por sílices, carbonatos de calcio u otros minerales.

Otro factor importante en el análisis de la porosidad y la permeabilidad, principalmente la secundaria, es el estado en que se encuentran las fracturas o fisuras; estas pueden estar cerradas o abiertas, con o sin mineralización, con o sin relleno de materiales finos como los limos y las arcillas, asimismo el espacio entre ellas; estos factores deben de ser evaluados minuciosamente durante un análisis puntual o cuando se haga un estudio detallado, especialmente para el análisis de la recarga artificial de acuíferos y/o explotación de los mismos.

Conductividad Hidráulica.

Es el factor de proporcionalidad de la ley de Darcy, que trata del flujo viscoso de agua en el suelo, es decir el flujo de agua por unidad de gradiente del potencial hidráulico, en el sistema de unidades de longitud, tiempo y masa. Es también el flujo de agua por unidad de gradiente de carga hidráulica cuando se usa el sistema de unidades de longitud, tiempo y peso. (Forsythe 1985).

La ley de Darcy dice que la velocidad del flujo del agua a través de una columna de suelo saturado, es directamente proporcional a la diferencia en carga hidráulica e inversamente proporcional a la longitud de la columna (Forsythe 1985).

Los valores de la bibliografía recopiladas aparecen en distintas unidades: cm/seg, m/seg ó m/día, de modo que fueron convertidos y redondeados. A pesar del redondeo, el cambio de unidades es la causa de que aparezcan valores excesivamente precisos, como $3 \cdot 10^{-5}$ (cuando en un cuadro de órdenes de magnitud deberían aparecer como 10^{-5} o 10^{-4}). (Tabla 5) donde Sanders (1998) hace una síntesis de los otros autores expresados de las tablas anteriores.

Tasa de infiltración

En un estudio de investigación de Gómez *et al.* (2014) se evaluó y determinó el uso del suelo con una tasa alta de infiltración en la subcuenca del río Shullcas en Huancayo mediante un método correlacional de diferentes muestras en toda la cuenca.

Dichos estudios fueron para terrenos superficiales lo cual se ajusta a las condiciones del proyecto de investigación ya que el modelo a utilizar considera un suelo totalmente saturado y que la inestabilidad de los terrenos se dan hasta 1.5 metros de profundidad y que los usos de la tierra fueron identificadas, según la normativa vigente de clasificación de tierras por su

capacidad de uso mayor; seleccionando 31 puntos de muestreo aleatoriamente, en los que se hicieron ensayo de infiltración para ello se utilizó infiltrómetros de doble anillo, registrando diferentes tipos de cobertura vegetal obteniendo muestras del suelo para determinar sus características físicas y geotécnicas donde los resultados de las tasas de infiltración obtenidos en promedio, según el tipo de uso de suelos, fueron: 14,04 cm /h para las tierras forestales; 12.42 cm /h para las tierras agrícolas y 2.07 cm /h para las tierras de pastoreo.

Tabla 5: Valores de la conductividad hidráulica (m/día)

		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Grava	25 a 2500	100 a 10 ⁵	100 a 10 ⁶	10 a 1000	
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0,1 a 500	0,01 a 1000	1 a 1000	1 a 100	1 a 100
	Arena media	0,1 a 50				
	Arena fina	0,02 a 20				
	Arena arcillosa			0,01 a 100	0,001 a 0,1	0,01 a 1
	Silt, loess	10 ⁻⁴ a 2	10 ⁻⁴ a 1	10 ⁻⁴ a 1	0,001 a 0,1	10 ⁻⁴ a 1
	Arcilla	10 ⁻⁶ a 4*10 ⁻⁴	10 ⁻⁷ a 10 ⁻³		10 ⁻⁶ a 10 ⁻³	10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
Arcilla marina inalterada	10 ⁻⁷ a 2*10 ⁻⁴		10 ⁻¹¹ a 10 ⁻⁷			
Rocas Sedimentarias	Calizas carstificadas	0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10 ⁷
	Calizas, dolomias	10 ⁻⁴ a 0,5	0,001 a 0,5	10 ⁻⁴ a 1		10 ⁻⁴ a 1
	Areniscas	3*10 ⁻⁵ a 0,5	10 ⁻⁵ a 1	10 ⁻⁵ a 1		
	Argilitas (siltstone)	10 ⁻⁶ a 0,001				
	Pizarras sedimentarias (Shale) intactas	10 ⁻⁸ a 2*10 ⁻⁴	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸		10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸
	Pizarras sed.(Shale) fracturadas/alteradas		10 ⁻⁴ a 1			
Rocas cristalinas	Basalto inalterado, sin fracturar		10 ⁻⁶ a 10 ⁻³			10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
	Basalto fracturado/vesicular cuaternario		10 a 1000			0,1 a 10 ⁶
	Escorias basálticas		0,001 a 1000			
	Basalto permeable	0,03 a 2000		0,02 a 1000		
	Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵		10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵
	Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	0,001 a 25	10 ⁻⁵ a 1	0,0005 a 20		10 ⁻⁵ a 1
	Granito alterado	0,3 a 5				
Gabro alterado	0,05 a 0,3					

Fuente: Sanders (1998)

c. Características hidráulicas de los acuíferos en la microcuenca

Para la caracterización de los acuíferos de la microcuenca Mariño se ha considerado las observaciones y pruebas de infiltración realizadas en campo, asimismo se ha considerado los datos de aforos realizados con anterioridad. Los valores de caudales de producción presentados en el presente informe y que están relacionados con los puntos de afloramiento sobre ciertas formaciones rocosas no implica que dicha formación sea el principal acuífero sino que en muchos casos corresponden acuíferos emplazados en las partes altas de la microcuenca, como es el caso de la formación Copacabana quien es un buen receptor, almacenador y transmisor de las aguas subterráneas pero que no posee suficientes estructuras que faciliten el afloramiento de estas aguas hacia la superficie.

3.1.5 Climatología.

La determinación de las condiciones climáticas en el ámbito de estudio permite identificar, describir y caracterizar los diferentes tipos de clima existentes, aspecto esencial que determina el establecimiento de la cobertura vegetal y el manejo de los recursos naturales en general.

Las condiciones climáticas se analizaron con información meteorológica proveniente de varias estaciones, determinando el comportamiento climático de la microcuenca, los análisis se basaron en los datos meteorológicos de varios años de las estaciones geográficamente más cercanas, contando con información referencial, válida para el análisis climático. La identificación y clasificación de los climas existentes se realizó con base en el sistema de clasificación climatológica propuesta por Thornthwaite (1933) y a la propuesta de clasificación del Mapa Climático del Perú (1988), el análisis se completó con la utilización del Mapa Ecológico del Perú ONERN (1976).



Figura 26: Clima Árido Cálido, parte baja del área de estudio (Río Pachachaca).

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento térmico en el ámbito de estudio es variable y está influenciado principalmente por la altitud, la fisiografía y la dirección de los vientos. El régimen térmico es de gélido a cálido y el régimen de precipitaciones de semiárido a muy lluvioso.

El sistema de clasificación propuesto por Thornthwaite (1943) define tipos climáticos de acuerdo a los valores calculados de la precipitación efectiva, la efectividad térmica, el grado de humedad y de la temperatura ambiental para el desarrollo de las plantas. Se calcula mediante dos ecuaciones: para la humedad y temperatura respectivamente, las expresiones resultantes, provienen de claves de valores de diferentes niveles y/o jerarquías de humedad y temperatura, agrupados en tablas estándar.



Figura 27: Clima cálido de la ciudad de Abancay

Fuente: Elaboración propia.

Se han identificado ocho tipos climáticos delimitados en espacios territoriales con características climáticas homogéneas (Mapa N° 03).

La clasificación se ha realizado a nivel macro climático, debido a que las variaciones de temperatura y precipitación, aunadas a las diferencias altitudinales, topográficas y de exposición, determinan la presencia de “climas locales” o microclimas, cuya delimitación y representación son muchas más complejas de precisar y cuyo nivel de análisis nos sugiere mayor utilidad para los propósitos del estudio.

A continuación, se presenta un cuadro de clasificación de tipos de climáticos, seguido de la descripción correspondiente.

Tabla 6: Clasificación climática de la microcuenca del río Mariño

Definición	Símbolo	T(°C)	Pmedia (mm/año)	Rango de Altitud	Superficie (Km ²)	Porcentaje (%)
ARIDO CALIDO	E(i)A'	24.51 - 23.62	151.00 - 278.16	1650 - 1800	0.07	0.03
ARIDO SEMICALIDO	E(i)B'4	23.62 - 20.96	278.16 - 490.90	1800 - 2250	6.29	2.83
SEMIARIDO SEMICALIDO	D(i)B'4	20.96 - 18.59	490.90 - 621.75	2250 - 2650	17.84	8.02
SEMIARIDO TEMPLADO	D(i)B'3	18.59 - 15.34	621.75 - 765.90	2650 - 3250	42.00	18.88
SUBHUMEDO SEMIFRIO	C1(i)C'2	15.34 - 11.49	765.90 - 907.25	3250 - 3850	52.42	23.56
SUBHUMEDO FRIO	C1(i)C'1	11.49 - 7.06	907.63 - 1046.87	3850 - 4600	97.89	44.00
HUMEDO FRIO	B1(i)C'1	7.06 - 5.58	1046 - 1089.44	4600 - 4850	3.61	1.62
HUMEDO SEMIFRIGIDO	B1(i)D	5.58 - 3.51	1089.44 - 1146.38	4850 - 5200	2.37	1.07
Total					222.50	100.00

Fuente: Elaboración propia. – GRA (2013)

a. Árido Cálido E'(i)A'

Se extiende sobre una superficie de 3.24 Km², que representa el 1.14% de la zona de estudio, se ubica en el “piso de valle del río Pachachaca” en el sector denominado el Carmen. Altitudinalmente se encuentra de 1650 a 1800 m de altitud.

La precipitación se distribuye entre 151.0 y 278.16 mm, estacionalmente la temporada de lluvias abarca de diciembre a marzo y el de secas de mayo a agosto. La temperatura media anual es de 24.0 °C.



Figura 28: Clima Árido Cálido, parte baja del área de estudio (río Pachachaca).

Fuente: Gobierno Regional de Apurímac (2013)

b. Árido Semicálido E(i)B'1

Este tipo de clima se presenta en una superficie de 17.54km², que representa 6.18% de la zona de estudio.

Geográficamente comprende los sectores de Pachachaca Alta, san Gabriel, San Antonio, Illanya, Pumacocha, Uchibambilla y San Valentin.

Altitudinalmente abarca un rango de 1 800 a 2 250 m.s.n.m.

La precipitación se distribuye en un rango de 278.16 a 490.99 mm, la temporada lluviosa comprende de diciembre a marzo y el periodo de secas de mayo a agosto. La temperatura media anual es de 22.29 °C.



Figura 29: Clima Árido Semicálido, en los sectores de Pachachaca Alta hasta San Valentín
Fuente: Gobierno Regional de Apurímac (2013)

c. Semiárido Semicálido D(i)B'1

El clima semiárido semicálido cubre una superficie de 28.21 Km², que representa 9.94% del área en estudio. Geográficamente comprende los centros poblados de Abancay, Tamburco, Santa Isabel, Aymas, Hatumpata, San José de Huanacauri, Marahuasi, Santo Tomas, Leon Pampa, Puca Puca, Maucacalle, Lipia, Limapata, Tierra Nueva, Molinopata, Huertapampa y la parte media del cerro Quisapata.

Altitudinalmente se encuentra de los 2 250 a 2 650 m.s.n.m. La precipitación se distribuye en un rango de 490.99 a 621.75 mm el periodo de lluvias abarca de diciembre a marzo y el periodo de secas de mayo a agosto. La temperatura media anual es de 20.0 °C.



Figura 30: Clima Árido Semicálido, en los centros poblados de Abancay y Tamburco
Fuente: Elaboración propia.

d. Semiárido Templado D(i)B'2

Este tipo de clima se distribuye en una superficie 52.95 Km², que representa el 18.65% del ámbito de estudio. Geográficamente comprende los sectores de Wiracocha, Chiracpata, Asillo Ayaorco, Ccanabamba Baja, Kerapata, Ccocha, San Antonio, Bancapata, Pantallay, y las partes baja de Moyocorral y Huayllabamba.

Altitudinalmente se extiende de 2 650 a 3 200 m.s.n.m.

La precipitación se distribuye en un rango de 621.75 a 765.93 mm, con precipitaciones intensas de diciembre a marzo, y lluvias dispersas de menor intensidad el resto de meses. carece de una estación seca bien definida.

La temperatura media anual es de 25.5 °C.



Figura 31: Clima Semiárido Templado, sectores de Huayllabamba y Moyocorral.

Fuente: Elaboración propia.

e. Subhúmedo Semifrío C(i)B'3

Este tipo de clima se presenta en una superficie de 75.08 Km², que representa el 26.45% del área de estudio. Altitudinalmente se extiende de 3 200 a 3 825 m.s.n.m.

Geográficamente comprende los sectores de Yuranpata, Ccoya, Hatunpata Alta, Cuchipata, Chinto, Chacapampa, Puruchaca, Janabamba, Layanpata, Ccanabamba Alta, Puquio y Chuyllupata.

La precipitación total anual se distribuye en un rango de 765.93 a 907.25 mm, el periodo seco se muestra de mayo a setiembre y el de precipitaciones de diciembre a marzo. La temperatura media anual es de 13.40 °C.



Figura 32: Clima Subhúmedo Semifrio, centro poblado de Ccanabamba y Ccoya.

Fuente: Elaboración propia.

f. Subhúmedo Frio C(i) C'

Este tipo de clima se presenta en una superficie de 102.86 Km², que representa el 36.24% del área de estudio. Altitudinalmente se extiende de 3 850 a 4 600 m.s.n.m. Geográficamente comprende las partes del ámbito de estudio cubiertos de pastizales, en este tipo de clima es en donde se ubican las lagunas de Runtococha, Yanacocha, Yauricocha, Chiuchilla, Alfalla, Jejeraycocha y Uspaycocha

La precipitación total anual se distribuye en un rango de 907.25 a 1 046.87 mm, el periodo seco se muestra de mayo agosto y el de precipitaciones de diciembre a marzo. La temperatura media anual es de 9.30 °C.



Figura 33: Clima Subhúmedo Frio, sector Rontoccocha.

Fuente: Elaboración propia.

g. Húmedo Frio B(i) C'

Cubre una superficie de 2.67 Km², que representa el 0.94% del ámbito de estudio. Se extiende en el ámbito superior de la cuenca. Altitudinalmente abarca altitudes de 4 400 a 5 000 m.s.n.m, presenta una precipitación total anual de 1,046.00 a 1,089.00mm, El periodo seco se presenta de mayo a agosto y la temporada lluviosa se muestra de diciembre a marzo. La temperatura media anual es de 6.32 °C. La distribución de este tipo climático al interior de la cuenca se muestra en la foto siguiente.



Figura 34: Clima Húmedo Frio, parte baja del nevado Ampay.

Fuente: Elaboración propia.

h. Húmedo Semifrígido (de tundra). B1(i) D'

Tipo climático en la región andina, se extiende entre 3 500 y 6 000 m.s.n.m. tiene temperaturas medias anuales de 7°C.

Abarca una superficie de 1.30 Km², que representa el 0.46% del ámbito de estudio, comprende áreas de influencia nival principalmente temporal y permanente hasta la base y cumbre de algunas montañas de nieves perpetuas como el nevado del Ampay. Altitudinalmente se ubica entre los 4 850 a 5 200 m.s.n.m, muestra una precipitación de total anual de 1 089.44 a 1 146.38 mm, la época de lluvia se muestra de diciembre a marzo y el periodo seco de mayo a julio, el comportamiento térmico determina una temperatura media anual de 4.5 °C.



Figura 35: Clima Húmedo Semifrígido, Nevado del Ampay.

Fuente: Elaboración propia.

Como el comportamiento térmico de la zona de estudio es bastante variado, por la altitud y la fisiografía que presenta, razón por la cual sea considerado realizar el estudio a nivel de microcuencas.

3.1.6 Hidrografía

a. Ríos y Riachuelos

La unidad hidrográfica del río Mariño cuenta con un área aproximada de 222.9 km² y se ubica entre las coordenadas UTM: Norte: 8502000- 8484000; Este: 721000 – 745000, contando con 06 sub cuencas tributarias las mismas que son Ñacchero con 22.11 km², Chinchichaca con 33.64 km², Colcaqui con 33.70 km², Marcahuasi con 23.80 km², Hatumpata con 97.35 km², Anishuayco – Alízar con 12.33 km², siendo en total una superficie de 222.96 km².

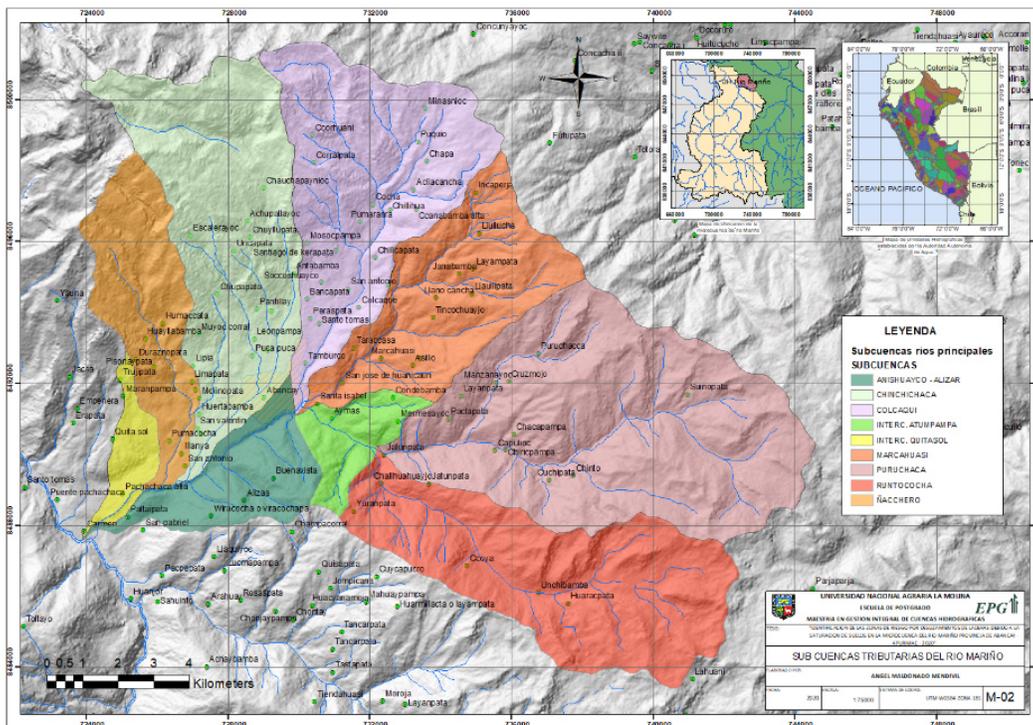


Figura 36: Sub Cuencas Tributarias del río Mariño.

Fuente: Elaboración propia.

El colector principal de la subcuenca es el río Mariño, que atraviesa en forma longitudinal por la parte sur este de la ciudad de Abancay. Este río se origina desde los manantiales de los sectores de Runtococha, Hatumpata y Marcahuasi, uniéndose así a los afluentes de los ríos Colcaque, Chinchichaca, Ñacchero y otros afluentes que incrementa notablemente el caudal

del río Mariño para finalmente entregar sus aguas al río Pachachaca que es uno de los afluentes principales del río Apurímac.

La característica del río es de presentar una pendiente moderada, con un talweg bien definido por la forma que presenta la sección del río en forma de V, teniendo una longitud de 7.28 Km. En la dirección de Este al Sur Oeste hasta llegar al río Pachachaca

Para la clasificación de los sistemas de drenaje se utilizó el método de clasificación de Horton. Este autor tuvo el mérito de precisar la noción de “red hidrográfica”, por medio de índices numéricos, donde el escurrimiento de primer orden es aquel que carece de tributarios; el primer orden corresponde, pues, al talweg elemental el cual es la base de la iniciación del escurrimiento concentrado. Un talweg es de segundo orden si él recibe al menos uno, o varios tributarios de primer orden.

Horton llama talweg de tercer orden, al curso de agua que le confluyen uno o varios afluentes de segundo orden, pero él puede recibir directamente afluentes de primer orden y así sucesivamente hasta la corriente principal de la cuenca considerada que posee, pues, el orden más elevado.

En la microcuenca se obtuvo el siguiente número de corrientes por orden dado:

Tabla 7: Orden de talweg según Horton

Nº ORDEN	NÚMERO DE TALWENG
1er Orden	48
2do Orden	22
3er Orden	4
4to Orden	3

Fuente: Elaboración propia.

b. Lagunas y Lagunillas

El recurso hídrico de la cuenca está dado por las, lagunas y acuíferos. En la margen derecha y parte alta y baja, que constituyen verdaderos reservorios de almacenaje hídrico en la época de lluvias y de alimentación de la escorrentía base del Río Mariño en el periodo de estiaje, destacando las de: Marcahuasi, Hatumpata y Colcaque.

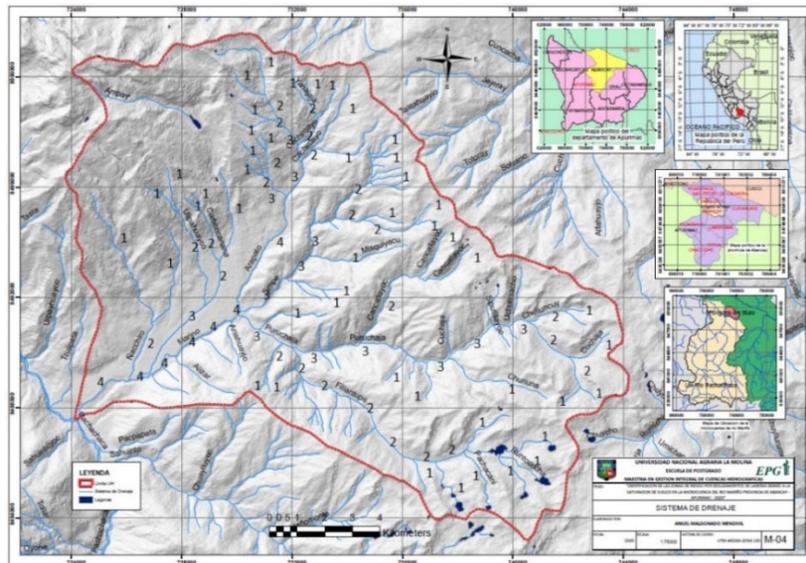


Figura 37: Orden de los ríos del sistema de drenaje.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 38: Laguna de la red hídrica del sistema Rontoccocha

Fuente: Elaboración propia.

3.1.7 Hidrología.

Es el comportamiento de los parámetros de temperatura, precipitación, etc., obtenidas durante años en una estimación meteorológica mediante un conjunto de observaciones, en la que se obtiene una vasta serie de datos por lo que es indispensable resumir y coordinar esta similitud de cifras con algunos elementos lo más pequeños posibles, pero, sin embargo, suficiente para caracterizar la estación.

Datos Meteorológicos.

Las estaciones meteorológicas definen una cota de altitud y su respectiva ubicación georreferenciada donde los valores registrados de humedad relativa, precipitación total mensual, precipitación máxima diaria, temperatura máxima mensual, temperatura mínima mensual, etc.

La información meteorológica se obtiene del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI a través de su portal reportadas por la estación San Antonio de Abancay de donde se obtuvieron los datos históricos de temperaturas entre mayo del 2015 a diciembre del 2019, los mismos que resumimos en los siguientes gráficos

a. Temperatura.

Temperatura media (T_{media}): Se refiere a la temperatura media presentada durante el transcurso de un mes.

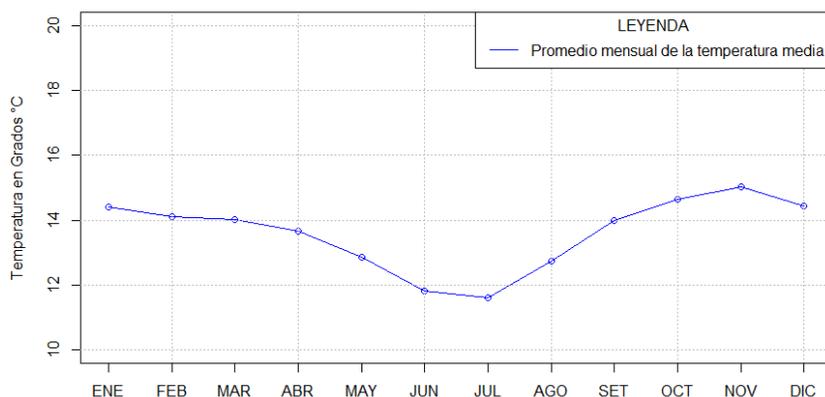


Figura 39: Distribución del promedio mensual de la temperatura media (2015-2019)

Fuente: Aybar *et al.* (2017).

Temperatura media máxima mensual del año: Esta variable se obtiene a partir del promedio de los registros diarios de temperatura máxima durante un mes en un periodo de varios años.

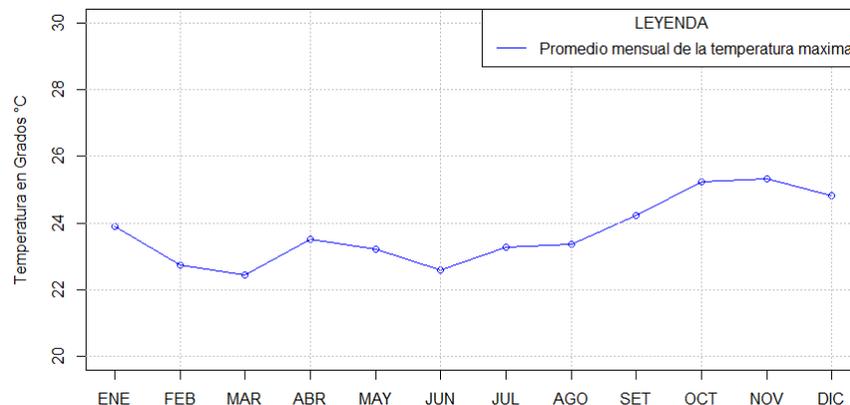


Figura 40: Distribución del promedio mensual de la temperatura máxima (2015-2019)

Fuente: Aybar *et al.* (2017).

Temperatura media mínima mensual del año: Esta variable se obtiene a partir del promedio de los registros diarios de temperatura mínima durante un mes en un periodo de varios años.

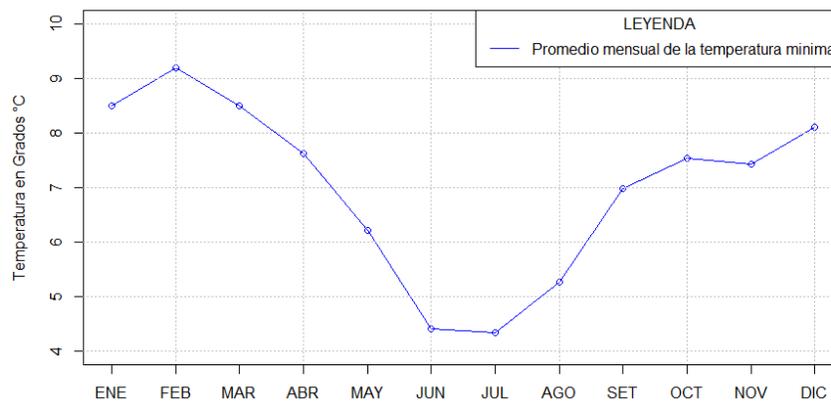


Figura 41: Distribución del promedio mensual de la temperatura mínima (2015-2019)

Fuente: Aybar *et al.* (2017).

Distribución espacial de la temperatura

De los análisis realizados la microcuenca del río Mariño, presenta en general un régimen de temperatura que varía de un clima cálido a semicálido en la zona baja, así como también templado a frío en la zona intermedia y frío en la zona alta influido principalmente por la altitud. Existen además factores locales como la orografía, vientos, dirección etc., que originan diferentes zonas con diversas características climáticas particulares, cuya caracterización resulta muy difícil, debido a la falta de información meteorológica por lo que los resultados de dicha caracterización se presentan de forma general.

En la microcuenca la temperatura media anual es de 13.82 °C (para la altura media de la cuenca de 3455 m.s.n.m) con muy poca variación de la temperatura media en el año (enero a diciembre). Sin embargo, debido a la geomorfología de la microcuenca, la distribución espacial de la temperatura es muy variable, así se tiene que las zonas más cálidas se ubica en el sector del río Pachachaca en donde se registra una temperatura media de 23.27 °C (1800 m.s.n.m), mientras que en la zona intermedia de la microcuenca, ciudad de Abancay 19.82 °C (2300 m.s.n.m) y en la zona de Tamburco una media de 18.72 °C y en las zonas más frías que se ubican en las alturas de los nevados más altos y sus alrededores se presentan temperaturas medias de 3.65 °C (5100 m.s.n.m).

La distribución espacial de la temperatura en la microcuenca se muestra en el Mapa N° 1: (Mapa de Isotermas)

b. Evaporación.

Es un fenómeno físico se manifiesta como un cambio en el estado físico del agua; de líquido a vapor a la temperatura ambiente. Según Martínez (1990) la evaporación es el agua perdida en forma de vapor por el terreno adyacente a las plantas, por la superficie del agua o por la superficie de las hojas de las plantas.

Evapotranspiración.

La evapotranspiración, es la cantidad de agua utilizada por las plantas para realizar sus funciones de transpiración, más el agua que se evapora de la superficie del suelo en la cual desarrolla un indicador importante en la agricultura es la demanda evapotranspiración, a que

proporciona un indicador de la demanda de riego para una determinada región o área (Thornthwaite 1943).

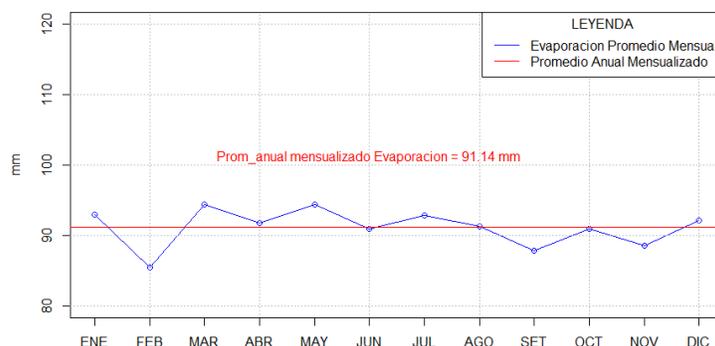


Figura 42: Distribución del promedio mensual de la evaporación (2015-2019)

Fuente: Aybar *et al.* (2017).

c. Humedad Relativa.

Según la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica), la Humedad Relativa, o HR, se define como "una relación, expresada en porcentaje, de la cantidad de humedad atmosférica presente relativa a la cantidad que estaría presente si el aire estuviera saturado. Como la última cantidad depende de la temperatura, la humedad relativa es una función tanto del contenido de humedad como de la temperatura. La humedad relativa se deriva de la temperatura y el punto de rocío asociados para la hora indicada"

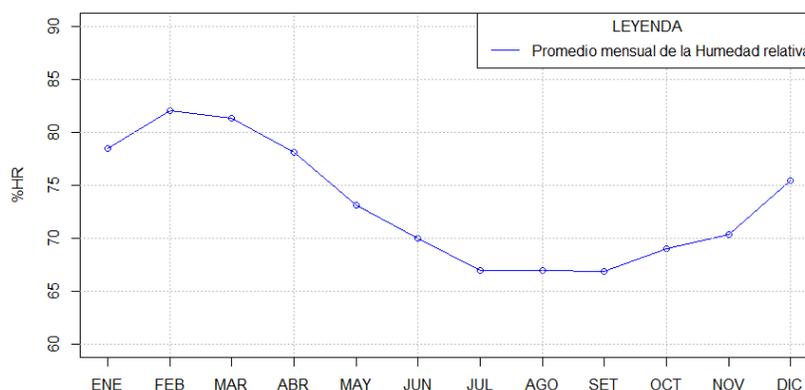


Figura 43: Distribución del promedio mensual de la humedad relativa (2015-2019)

Fuente: Aybar *et al.* (2017).

d. Velocidad del viento.

Esta variable se obtiene a partir del promedio de los registros diarios de velocidad mensual durante un mes en promedio en un periodo de varios años y que en la zona hay una predominancia del viento en los meses de julio y agosto llegando a alcanzar una velocidad de 3.00 m/seg. a una altura de 2700 msnm

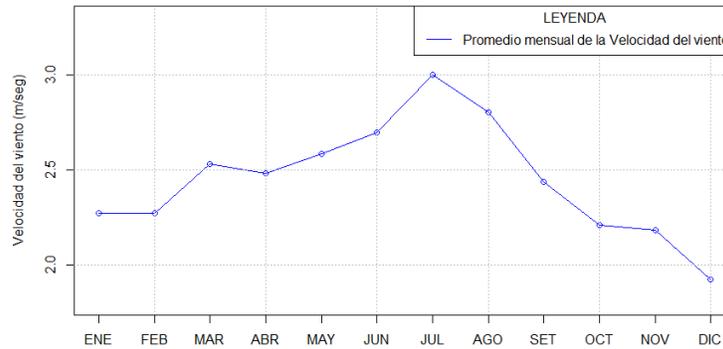


Figura 44: Distribución del promedio mensual de la velocidad del viento (2015-2019)

Fuente: Aybar *et al.* (2017).

e. Dirección del viento.

Esta variable se obtiene a partir del promedio de los registros diarios de la dirección del viento mensual durante un mes en promedio en un periodo de varios años y que en la microcuenca del río Mariño hay una predominancia de la dirección del viento de 240 grados en promedio anual.

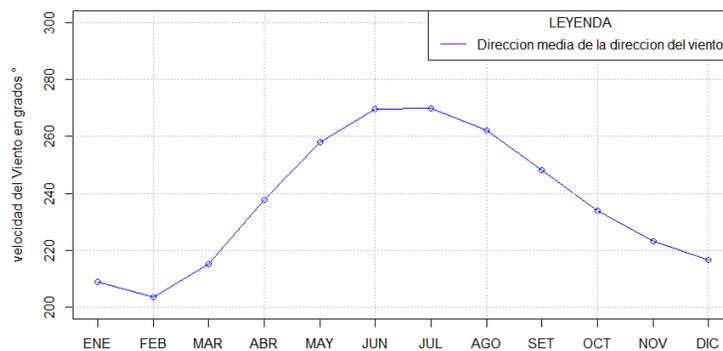


Figura 45: Distribución del promedio mensual de la dirección del viento (2015-2019)

Fuente: Aybar *et al.* (2017).

f. Precipitación.

Aparicio (1999) afirma que la precipitación representa el producto de circunstancias naturales y puede considerarse entre la clase de datos que son los más “limpios” usados por los hidrólogos, además una variedad de métodos y análisis estadísticos pueden aplicarse con seguridad y se necesitan pocas o unas cuantas correcciones arbitrarias. La precipitación se mide en altura o lámina de agua expresada en milímetros; por ejemplo, una precipitación de 12 mm quiere decir que ha caído una cantidad de agua tal que, si permaneciera sobre el suelo, se formaría una capa de agua de 12 mm de espesor o altura.

Para la estimación de la precipitación para la microcuenca Mariño, se estimó que mediante la extrapolación de la precipitación mensual de la estación Abancay, se utilizó esta estación debido a que presenta una altitud semejante a la microcuenca. En la Tabla 10 se observa las precipitaciones mensuales de la microcuenca Mariño, donde la mayor cantidad de precipitación se da entre los meses de diciembre a marzo (Figura 22), el cual representa el 90% de la precipitación anual.

La microcuenca del río Mariño cuenta con una Estación Meteorológica que pertenece a la red administrada por el SENAMHI, existiendo además una serie de datos históricos de precipitación de estaciones que ha dejado de operar en diversas ubicaciones de la cuenca, las mismas que sirven para generar la serie de tiempo que nos permite analizar y caracterizar la climatología en la zona.

Se cuenta con información meteorológica desde el año 1964 a la fecha con diversos periodos de información faltante y que SENAMHI ha desarrollado para fines de estudios e investigaciones una información de alcance nacional denominada PISCO, que brinda información meteorológica del periodo de 1981 al 2016 con la que se hizo el análisis respectivo para la caracterización climática del ámbito de estudio.

Distribución espacial de la precipitación

Para el estudio de la microcuenca se utilizó la información meteorológica disponible generada por SENAMHI (2017) en la base de datos PISCO disponible actualmente por dicha institución por lo que la distribución espacial de la precipitación en la microcuenca se muestra en el Mapa N° 2 (Mapa de Isohietas).

El análisis de isohietas muestra el efecto orográfico sobre la precipitación local. Para la cuantificación del efecto topográfico, la distribución de las alturas pluviométricas se realizó linealmente con la altitud de la estación, haciendo una correlación con las estaciones vecinas de la zona del estudio se han generado la variabilidad de la lluvia en función de la altura generándose puntos areales de precipitación para generar un mapa de isoyetas. Las isoclinas de altitud se dibujaron en el área de estudio con una variación de 100 m con la ayuda de la herramienta contour de ArcGIS. Con la ayuda de la forma de la cuenca, luego transformamos las líneas en polígonos usando la herramienta de entidad a polígono de ArcGIS. Las áreas se calcularon en la tabla de atributos de la forma de los polígonos también en ArcGIS. Con las altitudes promedio, la altura pluviométrica fue linealmente proporcional a los valores registrados en las estaciones vecinas del área de estudio y la altitud de estas estaciones. Con los valores pluviométricos proporcionales calculados, el área de la cuenca se multiplicó por la lluvia proporcional, los resultados se agregaron para cada polígono y luego se dividieron entre el área total de la cuenca.

Precipitación Mensual

La precipitación en la microcuenca tiene en promedio de 788.12 mm el cual es una cantidad de lluvia similar a una cuenca típica, sin embargo la variabilidad topográfica de la zona, hacen que se presenten zonas consideradas secas y otras muy húmedas, pudiéndose determinar tres zonas con condiciones de precipitación diferente; la primera ubicada entre las partes altas de la microcuenca (Nevado del Ampay con cota 5200 m.s.n.m), hasta Aymas (3042 m.s.n.m) donde se registran precipitaciones que varían desde los 440 mm hasta los 1050mm al año, estos valores muestran una zona seca con un clima predominantemente frío, y las bajas precipitaciones se deben a que la zona está rodeada de cumbres altas que actúan como barrera frente al paso de masas de nubes.

Existe información proporcionada por SENAMHI en la base de datos PISCO, con la que se obtuvo la siguiente distribución de precipitación para la cuenca del río Mariño obteniendo el promedio mensual multianual del periodo 1981-2016.

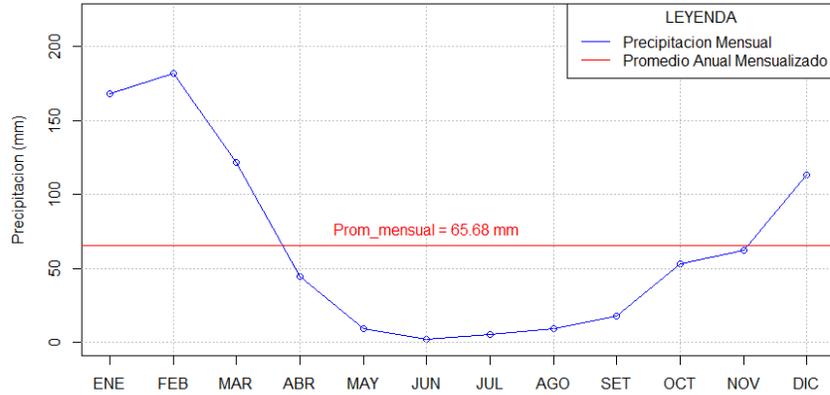


Figura 46: Distribución del promedio mensual de la precipitación (1981-2016)

Fuente: Aybar *et al.* (2017).

Sin embargo, también se cuenta con la disponibilidad de datos en la página oficial de SENAMHI información de datos históricos del periodo 2015-2019 que del análisis de dicha información obtenemos el promedio multianual de la precipitación para dicho periodo.

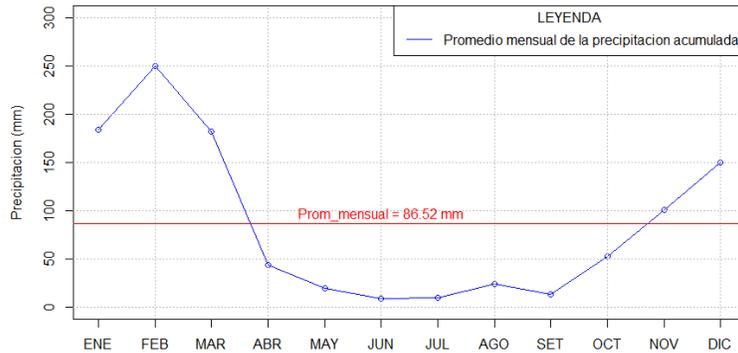


Figura 47: Distribución del promedio mensual de la precipitación acumulada (2015-2019)

Fuente: SENAMHI (2020)

Del análisis de los datos anteriores en el promedio mensual multianual se observa una diferencia a la que podemos observar un incremento de la precipitación en los últimos 5 años, como se observa en el siguiente cuadro de precipitación acumulada anual del periodo 1981-2016 con la información de la base de datos PISCO.

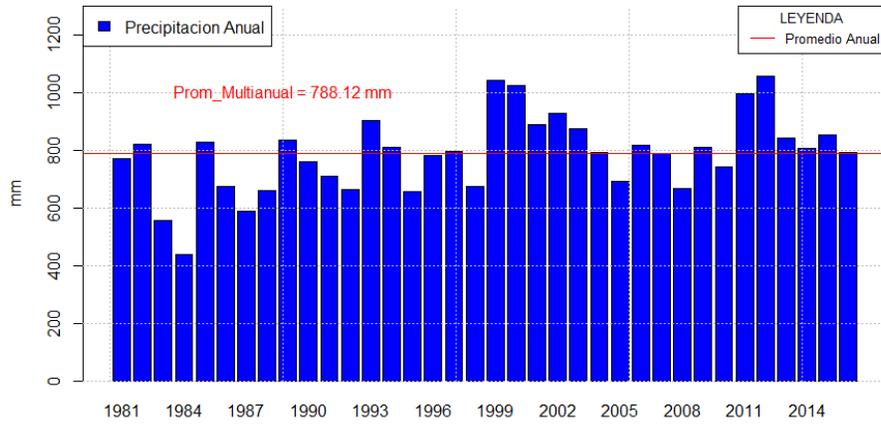


Figura 48: Distribución del promedio anual de la precipitación acumulada (1981-2016)

Fuente: Aybar *et al.* (2017).

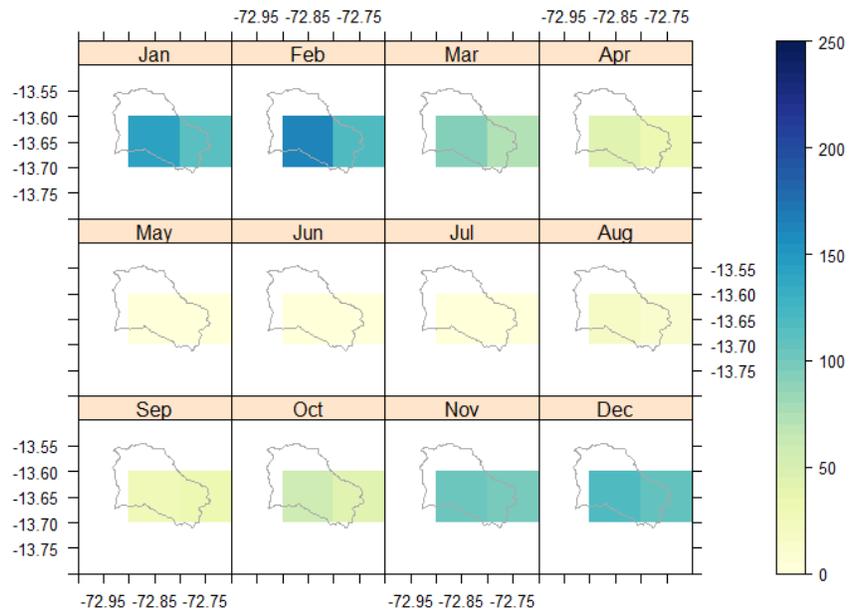


Figura 49: Distribución espacial de lluvia acumulada promedio mensual

Fuente: Aybar *et al.* (2017)

Tabla 8: Precipitación total mensual generado para la microcuenca Mariño (1981-2016)

AÑO HIDROLOGICO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	TOTAL	
1981	1982	33.29	57.16	100.90	118.54	141.35	164.39	91.39	40.98	0.52	3.36	2.08	16.49	770.44
1982	1983	10.47	15.38	99.96	58.36	215.68	241.98	125.73	35.27	0.46	2.24	0.95	13.98	820.46
1983	1984	1.69	0.91	33.33	109.85	157.15	112.12	85.06	48.06	7.44	0.00	0.54	0.34	556.51
1984	1985	1.57	1.73	1.86	1.32	207.58	218.93	2.25	2.28	1.12	0.39	0.67	0.51	440.20
1985	1986	15.41	42.21	61.79	118.96	136.65	180.21	127.15	83.57	49.82	8.41	5.37	0.54	830.12
1986	1987	40.87	33.27	28.29	67.44	118.61	145.40	185.22	36.15	9.82	0.00	0.41	10.35	675.82
1987	1988	14.12	50.18	42.08	71.66	176.85	116.69	38.82	52.14	17.33	0.00	8.21	0.24	588.32
1988	1989	1.75	43.31	1.17	2.49	208.34	165.82	140.89	81.92	15.01	0.00	0.13	0.15	660.98
1989	1990	23.46	50.05	54.84	91.45	209.08	203.82	146.44	36.65	12.73	0.14	0.30	8.16	837.12
1990	1991	20.56	63.08	73.70	85.60	160.52	172.24	128.31	34.34	12.80	0.28	0.16	7.83	759.42
1991	1992	19.93	56.59	64.88	82.72	118.13	197.68	124.58	32.34	13.62	0.13	0.43	0.16	711.19
1992	1993	10.67	56.16	87.66	80.69	117.21	157.19	108.01	33.33	0.44	1.02	0.31	9.98	662.65
1993	1994	1.70	54.49	92.48	186.49	196.78	140.17	134.42	49.26	9.75	0.00	4.96	34.46	904.97
1994	1995	1.91	193.55	68.14	128.11	194.52	117.71	80.73	24.06	0.55	0.00	0.13	0.12	809.52
1995	1996	13.11	8.24	78.47	106.71	144.12	120.88	139.74	36.88	6.77	0.00	1.52	0.50	656.94
1996	1997	23.36	62.19	57.42	90.70	183.05	190.73	108.29	47.40	1.61	0.00	0.36	16.02	781.14
1997	1998	9.95	26.14	79.53	106.12	177.77	197.51	125.38	38.62	14.06	0.00	0.37	22.55	797.99
1998	1999	4.19	68.19	47.49	93.57	175.52	113.51	144.63	21.93	1.86	2.41	0.15	1.33	674.78
1999	2000	55.57	67.09	65.83	127.16	199.41	275.37	166.62	68.21	9.67	4.23	3.54	0.20	1042.90
2000	2001	18.41	82.89	32.44	175.67	208.17	299.28	117.86	40.63	7.57	11.01	14.23	18.76	1026.91
2001	2002	11.22	41.33	52.47	94.77	249.13	177.54	174.09	35.29	14.01	0.14	20.20	20.30	890.48
2002	2003	40.01	78.65	81.22	124.54	127.76	196.23	129.09	74.04	18.02	6.03	38.79	12.69	927.08
2003	2004	28.26	37.99	34.15	136.05	180.08	204.24	198.21	25.45	7.27	0.05	1.49	23.04	876.28
2004	2005	37.51	31.94	50.72	141.66	140.52	209.16	83.79	46.97	8.43	3.44	25.00	14.97	794.11
2005	2006	21.20	68.00	61.45	132.57	85.93	141.39	115.60	44.37	5.04	0.00	12.42	4.19	692.17
2006	2007	6.96	61.66	110.93	129.17	212.28	150.80	93.42	46.72	0.32	6.07	0.25	0.64	819.23
2007	2008	2.53	65.75	51.21	186.65	132.64	131.70	170.52	19.36	13.12	0.00	11.10	3.51	788.06
2008	2009	10.31	38.76	64.29	123.25	162.16	115.67	101.93	26.71	13.84	3.85	0.26	7.95	668.99
2009	2010	0.71	45.46	129.00	83.22	147.37	201.73	121.00	62.80	6.11	0.00	5.18	8.72	811.30
2010	2011	10.17	50.38	41.74	135.11	180.13	163.72	103.89	40.23	7.65	0.00	2.79	7.36	743.19
2011	2012	40.87	52.24	87.87	94.34	210.52	241.88	174.02	63.08	11.03	1.40	7.08	13.22	997.57
2012	2013	25.28	62.13	32.23	240.38	160.29	284.33	167.41	66.37	0.48	7.81	5.98	3.53	1056.22
2013	2014	11.90	69.88	80.55	160.51	132.86	205.90	115.97	26.83	5.77	1.48	2.82	29.06	843.52
2014	2015	28.24	62.05	40.70	133.05	217.77	146.10	119.67	46.39	8.46	0.00	2.52	1.65	806.59
2015	2016	15.44	38.40	68.26	121.64	197.73	177.91	142.07	59.51	15.19	0.54	1.71	16.73	855.14
2016	2017	20.65	70.87	68.75	133.18	74.74	270.83	50.58	80.18	2.80	5.11	6.56	9.79	794.05
PROMEDIO		17.59	53.01	61.88	113.16	168.29	181.97	121.74	44.68	9.18	1.93	5.25	9.44	788.12
MAXIMA		55.57	193.55	129.00	240.38	249.13	299.28	198.21	83.57	49.82	11.01	38.79	34.46	1056.22
MINIMA		0.71	0.91	1.17	1.32	74.74	112.12	2.25	2.28	0.32	0.00	0.13	0.12	440.20

Fuente: Aybar *et al.* (2017).

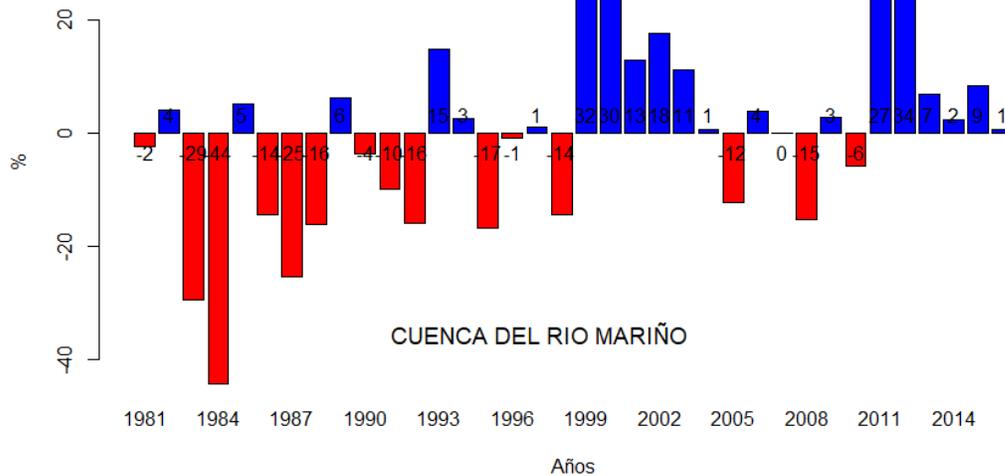


Figura 50: Anomalías anuales de precipitación (1981-2016) Estación Abancay.
 Fuente: Aybar *et al.* (2017).

Tabla 9: Porcentaje anual de precipitación total mensual generado para la microcuenca Mariño

MES	PRECIPITACION			
	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO	ANUAL (%)
SETIEMBRE	17.59	55.57	0.71	2.27
OCTUBRE	53.01	193.55	0.91	6.84
NOVIEMBRE	61.88	129.00	1.17	7.98
DICIEMBRE	113.16	240.38	1.32	14.59
ENERO	169.06	249.13	74.74	21.80
FEBRERO	182.47	299.28	112.12	23.53
MARZO	122.61	198.21	2.25	15.81
ABRIL	44.78	83.57	2.28	5.78
MAYO	9.43	49.82	0.32	1.22
JUNIO	1.89	11.01	0.00	0.24
JULIO	5.34	38.79	0.13	0.69
AGOSTO	9.24	34.46	0.12	1.19

Fuente: Aybar *et al.* (2017).

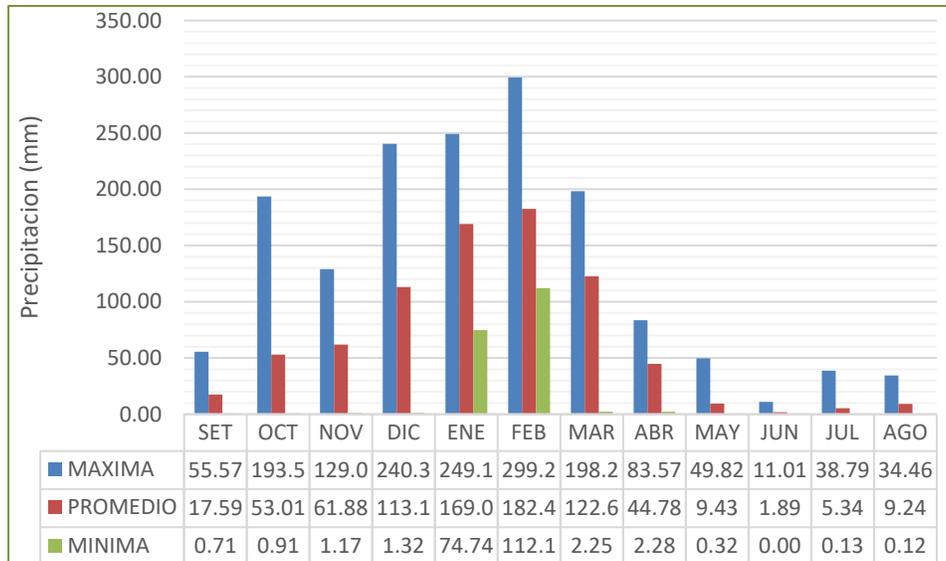


Figura 51: Variación estacional de las precipitaciones en la estación Abancay
Fuente: Aybar *et al.* (2017).

Balance hídrico

Podemos conocer el estado del contenido de humedad en el suelo en la cuenca el cual es el resultado del aporte de precipitación recibida en determinado tiempo y restando las pérdidas que se dan en los factores hidrológicos como son la infiltración, evaporación, conociendo dichos factores podemos estar en la condición de clasificar el tipo de año (húmedo, normal o seco).

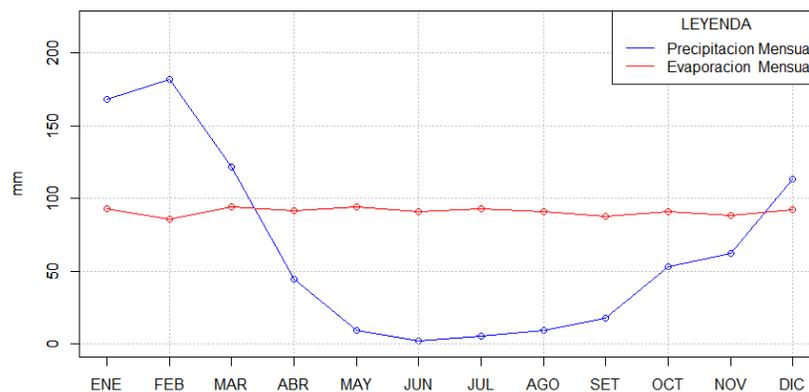


Figura 52: Balance hídrico en la microcuenca del río Mariño
Fuente: Aybar *et al.* (2017).

Precipitación máxima en 24 horas

La precipitación máxima 24 horas se obtuvo de la estación Abancay (Granja San Antonio) ubicada en el distrito de Tamburco en la latitud sur $13^{\circ}36'17.7''$ y longitud $72^{\circ}51'24.9''$ a una altura de 2780 msnm de donde se recopiló información para el periodo de 2015 – 2019 (<https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>) y para años anteriores se obtuvo de los reportes del SENAMHI en los diferentes proyectos del Gobierno Regional de Apurímac y otras instituciones gubernamentales y no gubernamentales, con los que se realizó el análisis de distribución de frecuencias de los datos de precipitación máxima en 24 horas y fue ajustada a dos modelos probabilísticos, como son la distribución Gumbel y la distribución Log-Gumbel.

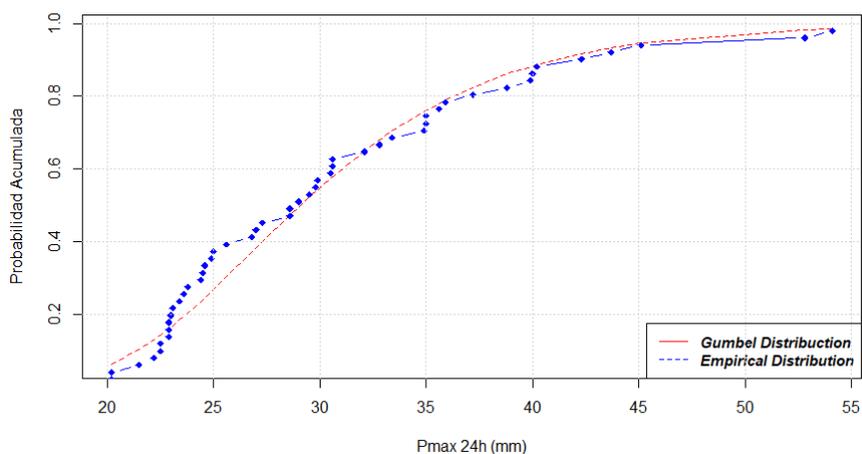


Figura 53: Distribución Gumbel para la Pmax24 Estación Abancay

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los datos de precipitación máxima de 24 horas para la estación de Abancay con la distribución Gumbel, se obtuvo una curva empírica como se muestra en la (Figura 53) que realizado la prueba de verificación de Kolmogorv-Smirnov se obtiene que el delta calculado (0.1043148) es menor al delta teórico (0.192333) el cual podemos inferir que la distribución empírica de Gumbel se ajusta a la curva de teórica.

De igual manera se analizó los datos de precipitación máxima de 24 horas para la estación de Abancay con la distribución Log-Gumbel, del cual se obtuvo una curva empírica como se muestra en la Figura 54 y que realizado la prueba de verificación de Kolmogorv-Smirnov se

obtiene que el delta calculado (0.1009071) es menor al delta teórico (0.192333) el cual también podemos inferir que la distribución empírica de Log-Gumbel se ajusta a la curva teórica.

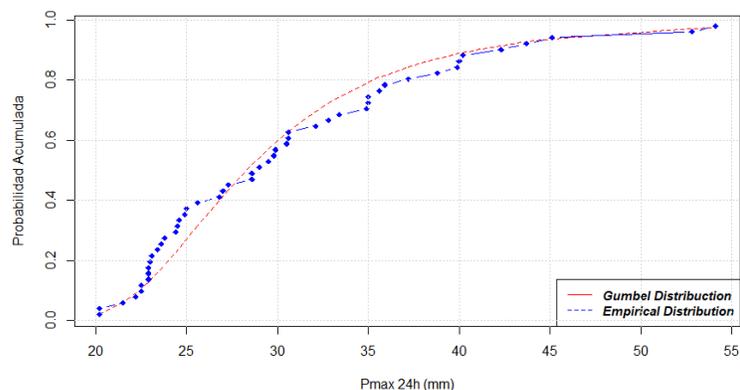


Figura 54: Distribución Log-Gumbel para la Pmax24 Estación Abancay

Fuente: Elaboración propia.

De las pruebas realizadas podemos indicar que el que muestra un mejor ajuste es la distribución de Log-Gumbel ya que muestra un menor delta calculado (0.1009071) con el cual adoptamos dicha distribución para la precipitación máxima en la zona de estudio para periodos de retorno de 2 a 1000 años se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 10: Precipitación máxima de 24 horas en la estación Abancay para diferentes tiempos de retorno según la distribución Log-Gumbel.

Tr	p	Pmax24h (mm)
2	0.5000	28.27349
5	0.8000	35.26226
10	0.9000	40.81546
15	0.9333	44.32605
20	0.9500	46.9623
25	0.9600	49.09932
50	0.9800	56.31318
100	0.9900	64.52158
200	0.9950	73.88978
250	0.9960	77.1815
500	0.9980	88.36179
1000	0.9990	101.15174

Fuente: Elaboración propia.

Con la tabla anterior graficamos la relación tiempo de retorno versus la precipitación máxima en 24 horas para la estación Abancay, de cual podemos obtener que para un tiempo de retorno de 100 años obtenemos una precipitación máxima de 24 horas de 64.52 mm de lluvia, la misma que se utilizó para el presente estudio.

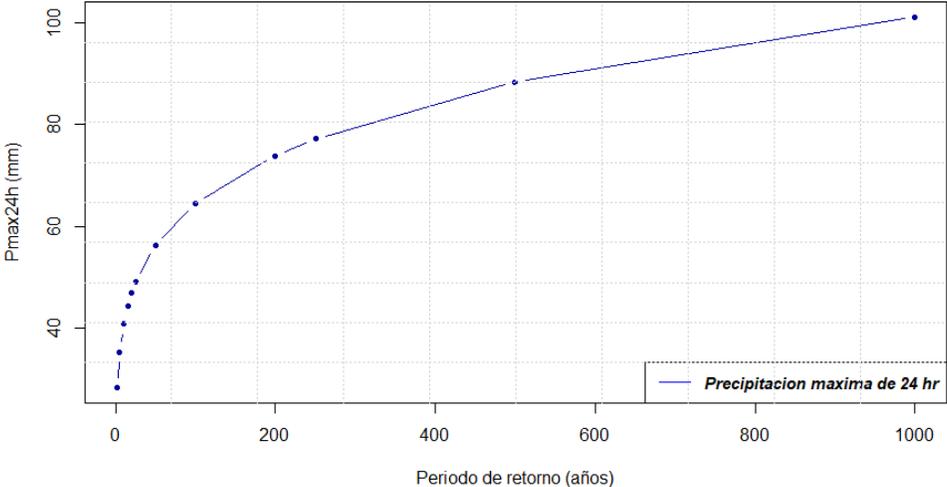


Figura 55: Cuantiles de la P_{máx} 24 horas en la estación Abancay

Fuente: Elaboración propia.

3.2 MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1 Materiales.

Los materiales y equipos utilizado para el estudio fueron:

- Modelo de Elevación Digital de la imagen satelital ALOS PALSAR, cuyas imágenes con resolución de los pixeles de 12.5m obtenido a partir de la base de datos de la Alaska Satellite Facility (ASF-NASA).
- Mapa Geológico del Perú a la escala de 1:100 000.
- La hoja 28-p de Abancay forma parte de la Carta Nacional, elaborada por el I.G.N.
- SINMAP V.1 para ArcView v.3.0 y V.2 para ArcGIS v9.x
- ArcGIS v9.2 y v10.4.1
- Microsoft Office 2016.
- Windows 10
- Lap Top con Procesador Intel Core i7 de 8Gb de Memoria RAM
- Cámara fotográfica digital CANNON

3.2.2 Métodos

a. Metodología

El presente estudio, se corresponde a una investigación aplicada y exploratoria, debido a que en la zona de estudio se quiere establecer una metodología para la predicción y localización de futuros deslizamientos a partir de la combinación de otras metodologías ya conocidas. El área a trabajar es la cuenca del río Mariño, el cual es una zona donde se han hecho estudios poco detallados de estabilidad de taludes, y los estudios donde se han obtenido mapas de susceptibilidad se realizó por métodos heurísticos que resulta de la combinación de varios factores físicos ponderados de la cuenca con la ayuda de un sistema de información geográfica SIG y la función de algebra de mapas con imágenes vectoriales y raster (Spatial

Analist), para elaborar mapas de estratificación de niveles de susceptibilidad a movimientos en masa.

Para el presente estudio se trabajó con una combinación de cálculos estadísticos y determinísticos, los cuales se constituyen metodologías estadísticas (probabilística), sustentadas en los parámetros físicos y climáticos (Determinística) y se usan para lograr áreas de mayor susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos calculando el índice de estabilidad, mediante la evaluación de factores causantes de dichos eventos, todo esto compilado y procesado todo los datos utilizando un sistema de información geográfica (Cereceda 2006).

El modelo de susceptibilidad se hace combinando distintas coberturas de cartografía temática, mediante la aplicación de la función de probabilidad llamada factor de seguridad, y con dicho parámetro se obtiene el mapa de estabilidad de taludes o laderas, el cual se generó a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT), empleando el software SINMAP por su nombre en inglés: Stability Index Mapping (Pack *et al.* 2005). Una vez obtenido los índices de estabilidad de taludes o laderas se realizó una inspección comparada con el inventario de deslizamientos en la cuenca el cual nos sirve para calibrar el mapa de susceptibilidad y por consiguiente su validación para poder obtener el mapa de predicción de deslizamientos.

Luego de calibrar los índices de estabilidad de taludes, se integró este producto a un análisis de ocurrencia de deslizamiento con las lluvias extraordinarias del año 2012, fecha que ocurrió el mayor deslizamiento de los últimos 10 años.

b. Diseño de la investigación

Se parte de una documentación de tipo bibliográfica y de campo, en la cual se sustenten los procedimientos a seguir según las metodologías preexistentes (estadísticas y determinísticas) ajustadas a la realidad y disponibilidad de información del área, los pasos o etapas metodológicas necesarias para llevar a cabo la siguiente investigación son (Figura 56).

La Figura 54 muestra la metodología generalizada. adoptado en este estudio. La prueba del análisis fue llevada en SINMAP 2.0 que usa ArcView y su actualización en ArcGIS versión 9.x o superior. Que establece el índice de estabilidad para identificar las zonas de mayor y menor susceptibilidad a deslizamientos de derrumbes provocado por saturación de suelos.

El índice de estabilidad (SI) se mapeó en base a seis clases: estable, moderadamente estable, casi estable, umbral inferior de estabilidad, umbral superior de estabilidad y defensa. De acuerdo con Pack *et al.* (2005) "umbral inferior" y "umbral superior" caracterizar regiones donde, de acuerdo con los rangos de incertidumbre de parámetros cuantificados por el modelo, la probabilidad de inestabilidad es menor o superior al 50% respectivamente.

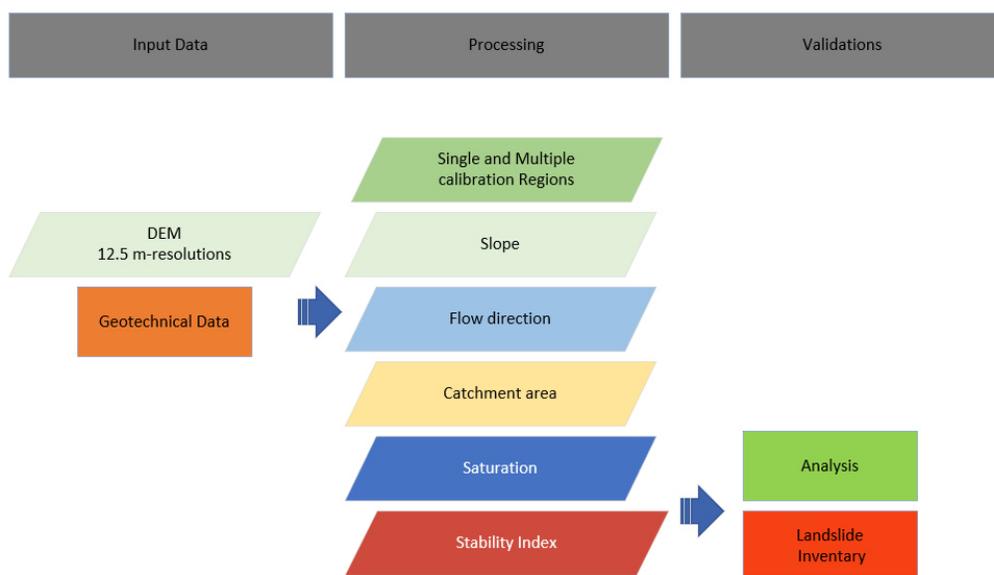


Figura 56: Diagrama de flujo de metodología generalizada que adopta diferentes enfoques de calibración basados en SINMAP (Estabilidad INdex MAPping) modelo.

Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento de calibración ha sido realizado en función al mapa inventario de deslizamientos para cuantificar la discrepancia espacial entre los deslizamientos de tierra y los resultados del modelo, para lo cual se evaluó la fiabilidad de la calibración. con la característica de funcionamiento del receptor (ROC). Y cuyos datos analizados eran lo suficientemente uniforme para un análisis posterior. El procedimiento de calibración consistió en un ajuste de los parámetros observados y evaluado para minimizar las diferencias entre observaciones y resultados de simulaciones.

El estudio presenta un modelo (con un enfoque de calibración) que mostró un buen rendimiento predictivo.

3.2.3 Datos de Entrada

La gran cantidad de datos disponibles sobre el área de estudio fue recopilada y/o publicada por varios autores e instituciones públicas y privadas, así como también se recopiló información de otros estudios similares los mismo que sirvieron para el procesamiento de los datos de entrada.

A continuación, se presenta cómo se usaron estos datos y qué tratamientos se necesitaron para hacer factibles las aplicaciones modelo.

3.2.4 Modelo de elevación digital

El Modelo de Elevación Digital del proyecto fue obtenida a partir de la base de datos de la Alaska Satellite Facility (ASF-NASA), el cual es una instalación de procesamiento de datos y cuenta una estación terrestre de rastreo satelital dentro del Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska, del cual se obtuvo la imagen satelital ALOS PALSAR, cuyas imágenes tiene una resolución de pixeles de 12.5m, cuyas imágenes son de tipo ráster el cual brinda datos característicos de altitud que puede ser procesadas en imágenes geomorfológicas del área de estudio generando y obteniendo el Modelo Digital del Terreno .

Para el procesamiento de datos de las imágenes satelitales se desarrolló en la plataforma del ArcGIS donde se obtuvo el MDE realizando las correcciones por defectos en las imágenes satelitales, eliminándose los sumideros, utilizando para ello la herramienta de relleno del módulo “Hidrología” de ArcGis, y que también posee la misma función el modelo SINMAP.

Tomando como referencia el estudio de Pack *et al.* (2005), el estudio utilizó una resolución digital de 12.5 m modelo de elevación (DEM) obtenido de la imagen Satélital ALOS PALSAR, desde el cual la entrada necesaria se obtuvo información (pendiente, dirección del flujo, área de captación específica y saturación) los pixeles sin información o “huecos” del DEM fueron eliminados mediante el comando “rellenar” del Arc Gis corrigiendo los datos de elevación de cada pozo celda de cuadrícula dentro del DEM a la elevación del punto de fluidez más bajo en el perímetro del pozo

3.2.5 Inventario de deslizamientos

El inventario de deslizamiento de tierra relacionados con eventos lluviosos como el de marzo del 2012, fueron mapeados con la ayuda de fotografías aéreas en la escala de 1: 20,000 y visitas de campo georreferenciándose e inventariándose en un mapa de deslizamientos. Muchas de estas cicatrices están relacionadas con deslizamientos de tierra poco profundos y flujo de escombros y avalanchas, y ocurrieron en el límite entre el suelo y las capas de roca. El cual se registraron 58 cicatrices de deslizamientos de tierra en la cuenca de estudio (anexos).

El inventario de deslizamientos de tierra para el área de estudio se recopiló utilizando imágenes de satélite provistos en Google Earth y visita de campo dentro del área de estudio para el cual se reconocieron un total de 58 cicatrices frescas ocurridos en los últimos 60 años.

El área afectada por deslizamientos de tierra es de 4.2 km², siendo el deslizamiento más grande, el del cerro Chuyllurpata en el año 2012 con 0.98 km² es decir, en total 0.45% del área total de la cuenca del río Mariño.



Figura 57: Deslizamientos de tierra en el sector Chuyllurpata y Marcamarca.

Fuente: Elaboración propia.

La longitud y el ancho promedio de los deslizamientos de tierra fueron de 35.6 m (con un rango de 15 a 720 m) la altitud de las pendientes inestables es de entre 2700 y 3800 m. y que muchos de estos deslizamientos de tierra se ubicaron en áreas de bosque nativo.

El mapa de deslizamientos de tierra tiene la forma de un punto, formato utilizado por SINMAP. Para adaptarse a los requisitos del programa, la forma de los polígonos de los

deslizamientos se transformó en una forma de puntos utilizando la herramienta característica tipo punto en el programa ArcGis.

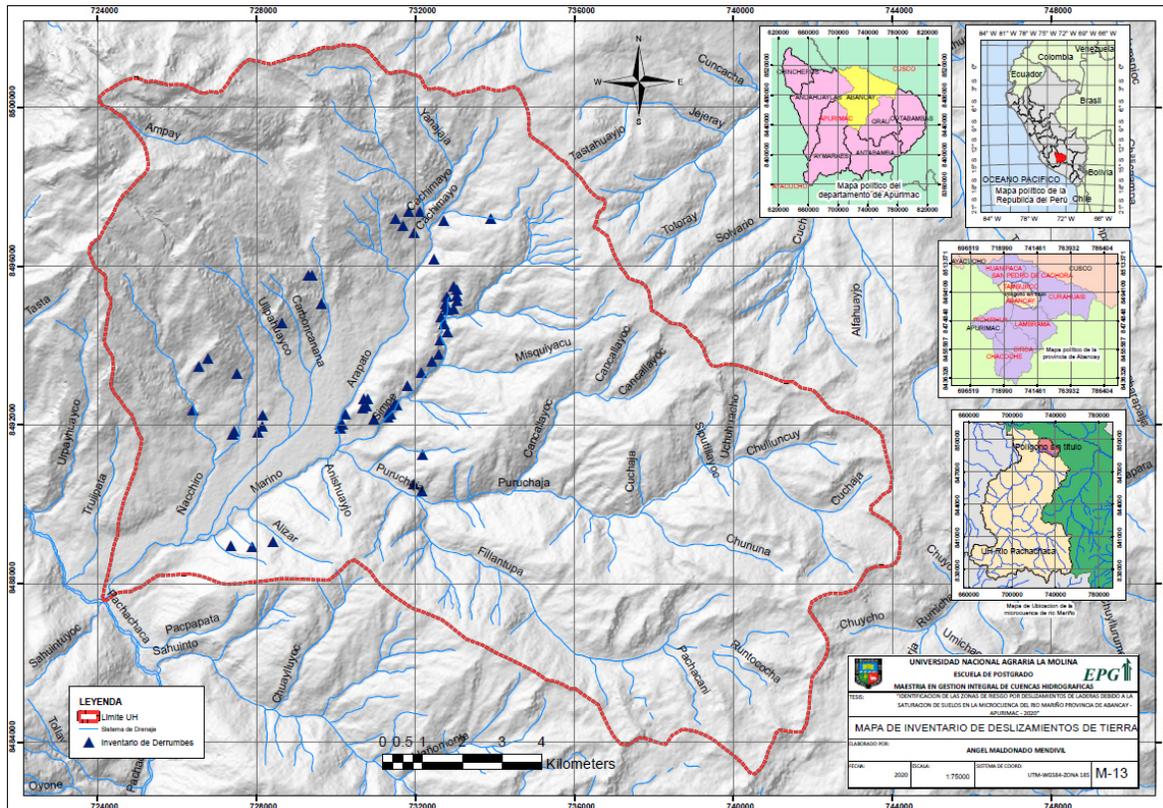


Figura 58: Mapa de inventario de deslizamientos de tierra en los últimos 60 años.

Fuente: Elaboración propia.

Así también según la clasificación de Cruden & Varnes (1996), los deslizamientos de tierra se clasificaron como poco profundos "flujo de escombros", y "escombros". Se observaron deslizamientos de tierra en una pendiente. rango de 10 grados a 70 grados. La mayor frecuencia de deslizamientos fue identificada en ángulos de pendiente entre 20 grados y 40 grados (Tabla 11).

En consecuencia, este mapa de inventario de deslizamiento se utilizó para cuantificar la discrepancia espacial entre los deslizamientos de tierra y los resultados del modelo. Se evaluó la fiabilidad de cada calibración con la curva ROC (Receiver Operating Characteristic) el cual es una representación gráfica que ilustra la relación entre la sensibilidad y la especificidad de un sistema clasificador para diferentes puntos de corte.

Tabla 11: Inventario de deslizamientos por cada región de calibración y pendiente

INVENTARIO	PENDIENTES (°)							Total
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60 a mas	
Región 1	0	0	1	0	1	1	0	3
Región 2	0	0	0	1	0	0	0	1
Región 3	0	0	0	0	0	0	0	0
Región 4	0	0	0	0	0	0	0	0
Región 5	1	1	1	0	0	0	0	3
Región 6	0	1	1	5	0	0	0	7
Región 7	1	1	6	6	1	1	0	16
Región 8	0	5	8	7	4	3	1	28
Frecuencia de Deslizamientos	2	8	17	19	6	5	1	58
Frecuencia de Deslizamientos (%)	3.45	13.79	29.31	32.76	10.34	8.62	1.72	

Fuente: Elaboración propia.

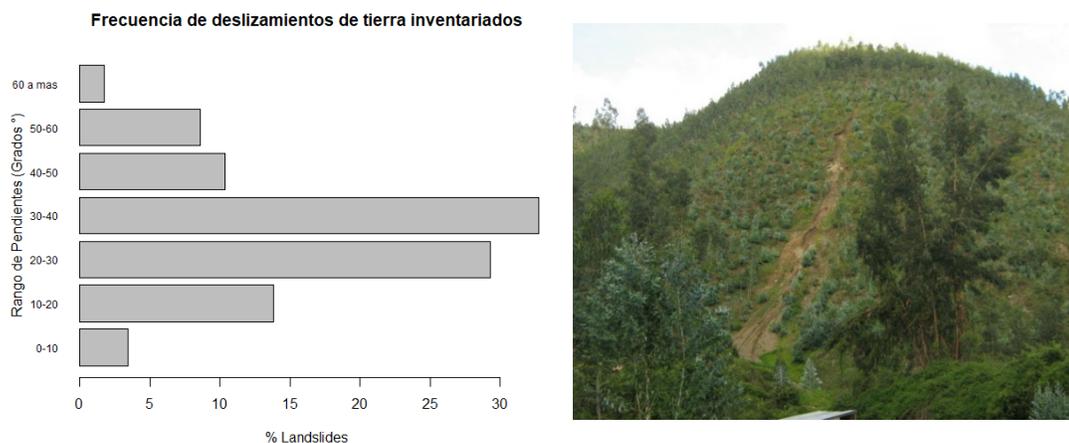


Figura 59: Frecuencia de deslizamientos de tierra inventariados en cada rango de ángulos de pendiente en la microcuenca del río Mariño

Fuente: Elaboración propia.

3.2.6 Análisis del deslizamiento del 17 de marzo del 2012

La estación más cercana al área de estudio con datos disponibles para el periodo es la estación de Abancay, ubicado en el sector de San Antonio, estación que pertenece a la red nacional de SENAMHI, dicha estación está ubicada dentro del área de estudio, y que al ser un área altoandina donde la influencia de la topografía es usualmente significativa en la variación altitudinal de la distribución de la lluvia, es de imaginar que la lluvia que ocurrió en el área de estudio fue mayor que la registrada en la estación Abancay. Por esta razón, se realizó un estudio para verificar la influencia de la topografía en la lluvia en la zona del derrumbe ocurrido el 17 de marzo del 2012.

Según SENAMHI (2012), el monitoreo del comportamiento de la precipitación durante el mes de febrero del 2012, se caracterizó por los excesos de este parámetro en la mayoría de las estaciones (Figura 60), como consecuencia de lluvias frecuentes e intensas. De las estaciones que reportaron mayores precipitaciones en el mes de febrero del 2012, fue la estación de Abancay que se registró un acumulado de lluvia de 308.2 mm (Tabla 12 y Figura 59), observándose que, con respecto al promedio mensual histórico se tuvo un exceso de 167.1 lt/m^2 como se reportó en la estación Abancay y que las condiciones climáticas continuó en el mes marzo del año 2012 haciendo que el suelo en diversos puntos de la cuenca se genere una sobresaturación producto de las lluvias y la recarga interna del suelo.



Figura 60: Deslizamiento del 17 de marzo del 2012 en el sector de Chullurpata Tamburco

Fuente: Elaboración propia.

El nivel de saturación para el mes de febrero se encontraba por encima de los 250 mm y para el mes de marzo 150 mm (Figura 61) según los registros de la base de datos PISCO SENAMHI (2016) el cual se corrobora con los datos observados en la estación Abancay.

Tabla 12: Precipitación del mes de febrero del 2012 respecto a la precipitación media mensual para el mes de febrero en la estación Abancay.

Estación Meteorológica	Altitud (m)	Días con precipitación	Acumulado mensual (mm)	Normal mensual (mm)	Anomalía absoluta (mm) mensual	Anomalía porcentual (%) mensual
Yauri	3927	23	256.6	173.7	82.9	47.7
Santo Tomas	3253	24	285.8	157.0	128.8	82.0
Chalhuanca	3358	25	278.5	178.7	99.8	55.8
Andahuaylas	2866	19	246.0	112.4	133.6	118.8
Abancay	2750	27	308.2	141.1	167.1	118.4

Fuente: SENAMHI (2012)

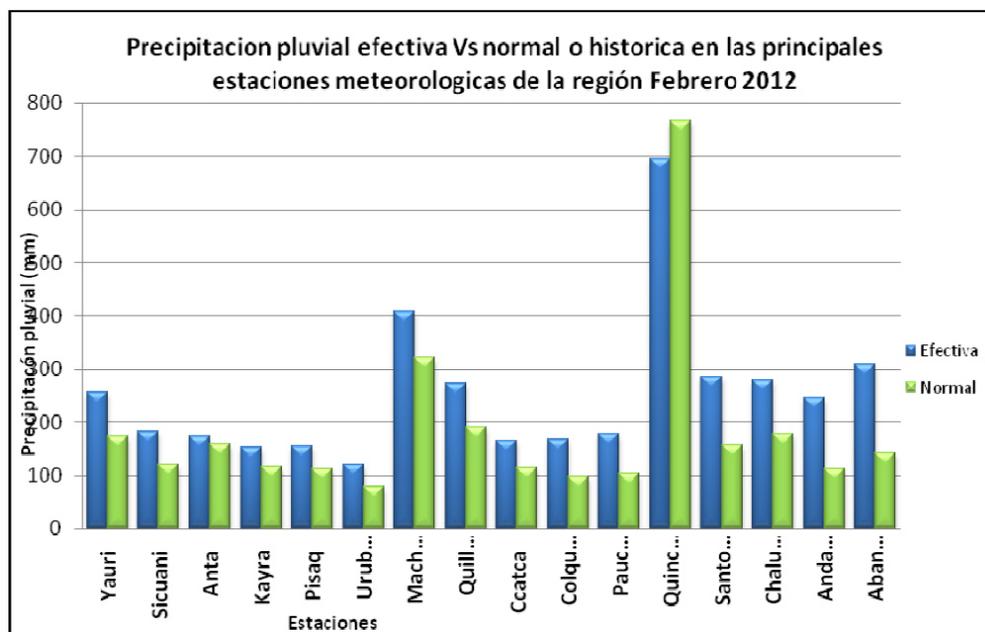


Figura 61: Gráfico de la precipitación del mes de febrero del 2012 respecto a la precipitación media mensual para el mes de febrero en la estación Abancay.

Fuente: SENAMHI (2012)

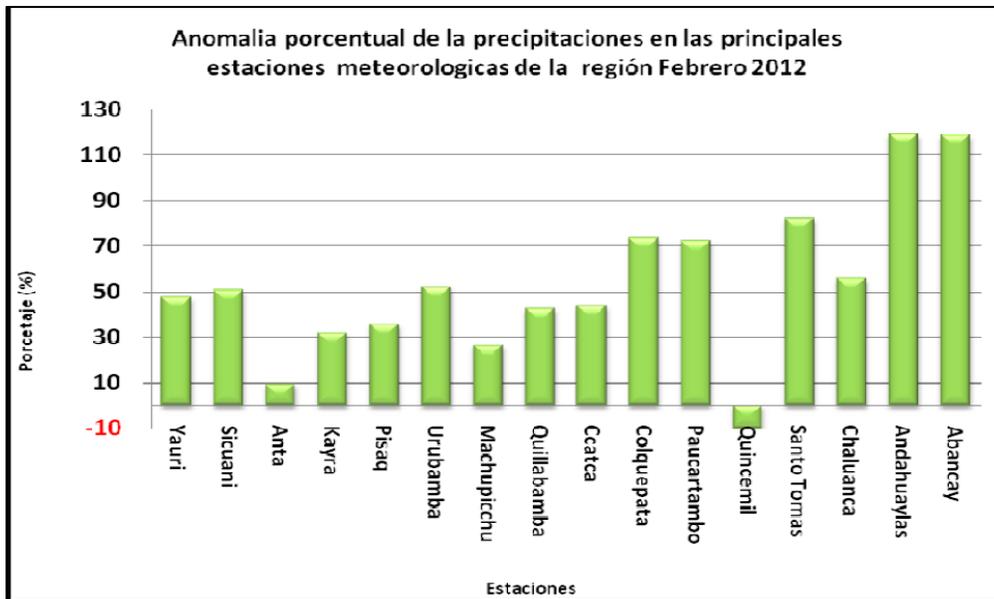


Figura 62: Anomalia porcentual de las precipitaciones para el mes de febrero del 2012 en la estación Abancay.

Fuente: SENAMHI (2012)

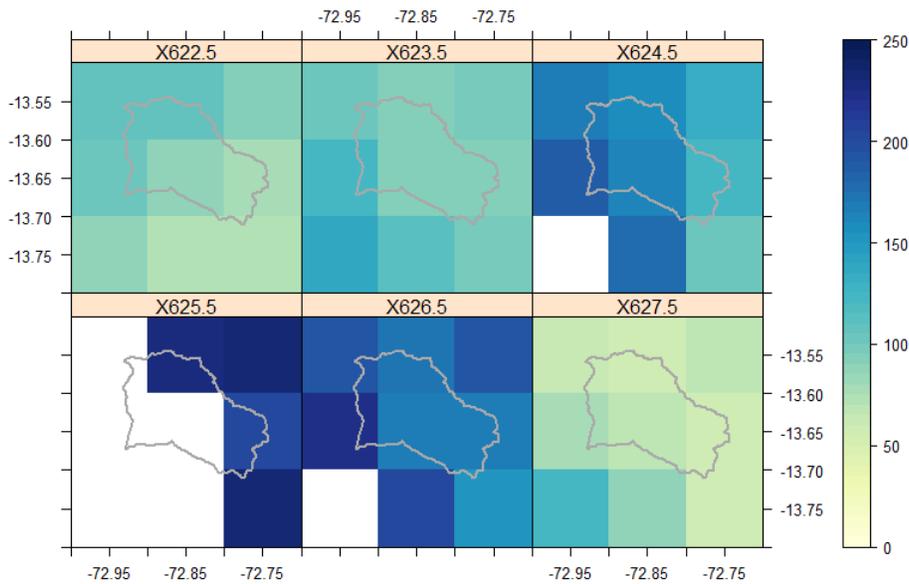


Figura 63: Nivel de saturación con la base de datos PISCO para los meses de noviembre del año 2011 y los meses de enero a abril del año 2012.

Fuente: Elaboración propia.

Con el análisis de los datos observados se puede decir que, en el momento del evento ocurrido el sector Chuyllurpata, el suelo en la zona del deslizamiento ya se encontraba en un estado de saturación debido a la recarga de flujo subsuperficial en toda la zona de estudio y que por las condiciones geotécnicas e hidráulicas en el sector de Chuyllurpata se desencadenó un deslizamiento de mayores proporciones generando cuantiosas pérdidas económicas y sociales llegando a afectar parte de las ciudades de Abancay y Tamburco

Para cuantificar el grado de saturación se ha elaborado un balance hídrico para los meses de setiembre a diciembre del 2011 y enero, febrero y marzo hasta el día 17 de del 2012 (fecha del deslizamiento) en la zona de estudio a escala mensual obteniendo como resultado de que en los meses de febrero y marzo existe un alto grado de saturación y una recarga hídrica del suelo elevando la napa freática y que el balance hídrico se puede observar en la Tabla 13 donde se indica la cantidad de humedad generada por las precipitaciones.

Tabla 13: Balance hídrico durante meses previos al deslizamiento del cerro Chuyllurpata

	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	AL 17 MARZO	TOTAL
PRECIPITACION (mm/mes)	40.90	75.70	106.20	98.30	129.10	337.90	186.00	523.90
ESCORRENTIA (mm/mes)	12.27	22.71	31.86	29.49	38.73	101.37	55.80	157.17
P. EFECTIVA (mm/mes)	28.63	52.99	74.34	68.81	90.37	236.53	130.20	366.73
EVAPORACION (mm/mes)	87.86	90.98	88.61	92.17	92.93	85.54	48.72	134.26
BALANCE HIDRICO (mm/mes)	-59.23	-37.99	-14.27	-23.36	-2.56	150.99	81.48	232.47

Fuente: Elaboración propia.

Y que al momento del deslizamiento del cerro Chuyllurpata se puede estimar que el contenido de la humedad en la zona era de 232.47 mm siendo un alto grado de saturación, en el que podemos inferir que la cantidad de humedad en el suelo y las características geomecánicas del suelo generaron condiciones propicias para producirse el deslizamiento de tierra y remoción de masa de suelo por saturación del suelo.

3.2.7 Parámetros geotécnicos y geohidráulicos

Para el análisis en SINMAP, los valores de los parámetros se adoptaron como se describe en la Tabla 15. Se consideró el suelo saturado como una condición inicial ya que el modelo requiere esta definición. Una vez que consideramos que el suelo está saturado, sin embargo la cohesión adoptada tendría un valor igual a cero, sin tener en cuenta el efecto de las raíces, se asumió valores de la cohesión de 0.00 a 0.28 Kpa, Para la conductividad hidráulica saturada, se atribuye el valor de 2.0 a 3.1 cm/h, siendo estos valores el promedio de un suelo de clasificación intermedia como son arenas y grava de origen aluvial con arenas mal graduadas con grava con pocos finos y sin finos, que son los suelos con más probabilidad de falla por la excesiva saturación por las tasas de infiltración que presentan (Geotechdata.info 2013), el espesor del suelo se consideró 1.5 m en promedio ya que los deslizamientos en promedio empiezan con alturas de 0.5 a 3.0 m por lo establecimos dicho valor, el valor de la transmisividad se determinó como el producto del coeficiente de permeabilidad por el espesor considerado donde el flujo subterráneo en condiciones saturadas se da en ese espesor bajo la condiciones de laderas con pendientes infinita, debido a que el modelo de elevación digital tiene una resolución de 12.5 m el área de cada pixel es de 156.25 m² y que para ingresar el caudal aportante en el modelo hemos considerado el ingreso de dicho aporte de flujo de Darcy, donde la acumulación de flujo (del análisis DEM), la recarga dentro del pixel (Q_{in} en m/s). Según Chalkias *et al.* (2016) el flujo o caudal en celdas del flujo acumulado de un mapa ráster para un SIG se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Q_{in} = \frac{q_R \times Flow. \text{acumulation} \times cell. \text{size}^2}{t_R}$$

donde q_R es la cantidad de lluvia (en metros) y t_R es la duración de la lluvia (en segundos). Si la lluvia proviene de una sola estación meteorológica, R es en número que representa la cantidad de lluvia a lo largo de la duración del evento en el tamaño de la celda.

Sin embargo, para una celda (Flow accumulation = 1) tendríamos la siguiente ecuación:

$$Q_{in} = \frac{q_R \times cell. \text{size}^2}{t_R}$$

Considerando el mismo criterio por analogía a la ecuación de la transmisividad que es la capacidad de transmitir el flujo en acuíferos, tendríamos:

$$T = K_a \times D \times \text{Cell.size}^2$$

Donde K_a es el coeficiente de permeabilidad en m/día, D es el espesor del suelo en metros y cell.size sería el factor de escala que depende de la resolución del DEM, por lo que para determinar la transmisividad en el presente estudio se consideró dicho factor de escala que está determinada por el tamaño del pixel (12.5m), así obtendremos el nuevo valor de la transmisividad en el pixel (imagen ráster), con un valor correspondiente a toda su área y nos permite obtener la relación T/R dividiendo a la recarga R (precipitación en m/día), obteniéndose valores de esta relación que están considerados por Park *et al.* (2013) y Thiebes *et al.* (2016), al momento de calibrar el modelo SINMAP. También es importante indicar que los valores se encuentran entre 2000 y 3000 que corresponderían a una precipitación real para la cuenca de entre 50 y 30 mm/día. Lan *et al.* (2004), sin embargo, el rango determinado para el estudio es de 1750 a 2650, valores conservadores ya que el programa SINMAP puede simular con valores de la relación T/R desde un rango de 1 a 30,000.00 para intensidades de precipitación promedio de 20 a 100 mm/h. (Morrisey *et al.* 2016), y además podemos indicar respecto a la relación T/R , que este valor es muy sensible a la variación de los coeficientes de permeabilidad y se debe tener cuidado en la obtención de este valor ya que requiere de mucha experticia la interpretación de dichos valores para obtener una modelación adecuada y real.

Tabla 14: Parámetros hidráulicos asumidos para el modelo.

PARAMETROS HIDRAULICOS	Unidad	MIN	MAX	Fuente
Clasificación de Suelos		Arena y Grava de origen aluvial (GM)	Arena mal gradada, arenas con grava con pocos o sin finos (SP)	Geotechdata.info, 2013
Conductividad K_s	K_s (m/h)	2.0×10^{-2}	3.0×10^{-2}	Geotechdata.info, 2013
Transmisividad	T (m ² /día)	0.73	1.11	
Factor de escala (Resolución 12.5x12.5)		156.25	156.25	Chalkias et al, 2016
Transmisividad en cada pixel (cell size)	T (m ² /día)	114.17	173.44	
Recarga hídrica (lluvia en 24 horas)	R (mm/día)	64.52	64.52	Senamhi - Elaboración Propia
Espesor promedio del suelo (Profundidad)	D_h (m)	1.5	1.5	Observación en campo
Relación entre la transmisividad del suelo y la recarga	T/R	1750	2650	

Fuente: Elaboración propia.

El valor de R (Recarga hidráulica) fue un parámetro muy difícil de calcular según Biswajeet y Manfred (2012), por lo que para este estudio se asumió que la precipitación efectiva para 24 horas de lluvia y para un periodo de retorno de 100 años, asumiendo que el contenido de humedad se encuentra a nivel de saturación. El parámetro T (Transmisividad), fue obtenido como resultado de la conductividad hidráulica (máxima y mínima) y que debido a poca información litológica se ha optado considerar el mismo rango a las ocho regiones de calibración. Estos valores han sido ordenados para una máxima extensión de zona potencialmente inestables sin embargo al tener poca información de permeabilidad se ha considerado un valor medio de 5.5×10^{-4} a 8.3×10^{-4} cm/s en las ocho regiones de simulación, para esto también se tomó en cuenta el estudio realizado en la cuenca del río Shullcas realizado por Gómez *et al.* (2014) considerando valores aproximados de 2.07 cm/h (5.5×10^{-4}) de tasa de infiltración y que están dentro del rango asumido de la permeabilidad. La profundidad del suelo se ha establecido en 1.5m, considerándose a dicho parámetro como el valor promedio en las 8 regiones de calibración, asumiendo para al modelo que las condiciones iniciales del suelo se encuentran en estado de saturación. Los valores de la permeabilidad asumidas en el presente estudio de acuerdo a Gómez *et al.* (2014) que realizó un estudio en una cuenca altoandina similar a la cuenca de estudio, se indica que las tasas de infiltración promedio en zonal altoandinas, según el tipo de uso de tierras, fueron 14,04 cm/h para las tierras forestales; 12,42 cm/h para las tierras agrícolas y 2,07 cm/h para las tierras de pastoreo; además, solo el 12,63 % de la subcuenca del río Shullcas tiene infiltración mayor a 0,2 cm/h.

Los parámetros geomecánicos introducidos en el modelo principalmente fue obtenido de la literatura Thiebes *et al.* (2016) y Morrissey *et al.* (2001) y de análisis puntual in situ en la zona del estudio. Se considero para el ángulo de fricción un rango de 15 a 45 grados en 8 regiones de acuerdo a las características del suelo, los datos fueron corroborados con estudios de mecánica de suelos de diversos proyectos, como el proyecto de la construcción de la vía de evitamiento, proyectos de instalación de antenas para telecomunicaciones y otros estudios particulares, los cuales indican que los valores del ángulo de fricción fluctúan en esos valores teniendo como promedio 30 grados en la cuenca del río Mariño. Se constato también con estudios realizados de los derrumbes de Ccocha Pumarranra (Apaza 1997) y de cerro Chuyllurpata (Luza *et al.* 2015). La densidad de suelo fue considerada de acuerdo a las tablas

presentadas por Mabee y Duncan (2013), donde hacen una recopilación derrumbes en el estado Massachussets obteniendo los valores de la densidad del suelo (kg/m³), que se muestran en la tabla 16 y que también fueron corroborados en los estudios del proyecto de la vía de evitamiento para la ciudad de Abancay. La validez del rango de valores de los parámetros del suelo obtenidos de la correlación empírica fue verificada con valores estándar aceptados en textos de ingeniería geotécnica.

Tabla 15: Parámetros geomecánicos asumidos para el modelo.

Region	Descripcion	Fuerza Cohesiva, C [kPa]		Angulo de friccion Interna, ϕ [deg]		Fuerza de compresion no confinada [Kpa]		Peso unitario [kN/m ³]		Conductividad Hidraulica, [cm/h]	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Depositos Aluviales Heterogeneos	0.00	25.00	20.00	30.00	0.00	40.00	13.80	21.00	2.0	3.0
2	Residuos Morrenicos Heterogeneo	0.00	21.00	28.00	36.00	0.00	100.00	14.10	20.40	2.0	3.0
3	Depositos de grano fino y arcillas	5.00	40.00	15.00	30.00	100.00	170.00	18.80	20.40	2.0	3.0
4	Afloramiento rocoso	50.00	200.00	34.00	45.00	45.00	190.00	18.80	22.00	2.0	3.0
5	Depositos Aluviales suelo franco arenoso	0.00	25.00	20.00	30.00	0.00	40.00	13.80	21.00	2.0	3.0
6	Depositos Aluviales Heterogeneos con poca vegetacion	0.00	25.00	20.00	30.00	0.00	40.00	13.80	21.00	2.0	3.0
7	Depositos Aluviales Heterogeneos con vegetacion densa	0.00	25.00	20.00	30.00	0.00	40.00	13.80	21.00	2.0	3.0
8	Depositos Aluviales Heterogeneos con areas de cultivo	0.00	25.00	20.00	30.00	0.00	40.00	13.80	21.00	2.0	3.0

Fuente: Mabee y Duncan (2013).

El rango de valores geotécnicos se desarrolló utilizando registros con un enfoque en correlacionar los valores de pruebas de penetración estándar (datos SPT) realizados en la zona de estudio, con descripciones de unidades de mapa, mapas personalizados creados en ArcMap utilizando los parámetros de suelos digitales disponibles en la literatura disponible (límites de Atterberg y granulometría), y comparando otros valores publicados que correlacionan los tipos de suelos similares con parámetros. Se realizaron correlaciones empíricas con los valores N restantes y las propiedades del suelo siguiendo las recomendaciones de Pack *et al.* (1974).

La validez del rango de valores de los parámetros del suelo obtenidos de la correlación empírica fue verificada con valores estándar aceptados en textos de ingeniería geotécnica.

Luego se calcularon los parámetros del modelo SINMAP a partir de estas propiedades del suelo (Tabla 16). La fricción interna del suelo es una de las propiedades que se obtuvo de la literatura disponible, ensayos y estudios realizados en la zona del proyecto. El rango de la cohesión de parámetros se derivó de la cohesión del suelo y el peso unitario, con los valores mínimos y máximos de la cohesión de las raíces extraídos de estudios publicados. Finalmente, el parámetro de la relación transmisividad / tasa de recarga (T/R) se calculó a partir de la conductividad hidráulica del suelo mencionada anteriormente y una tasa de lluvia de 64.52 mm en 24 horas correspondiente a una intensidad de lluvia de 100 años de tiempo de retorno en la estación Abancay (Tabla 10).

Debido a que las propiedades del suelo están asociadas con polígonos cartografiables ya sea de los mapas geológicos o los datos de suelos digitales, los parámetros del rango podrían calcularse por separado para cada unidad de mapa (Mabee y Duncan 2013) y (Luza *et al.* 2015).

Tabla 16: Parámetros geomecánicos y geohidráulicos asumidos para el modelo.

Region	Descripcion	T/R[m]		Densidad del Suelo [kg/m3]		Cohesion [Adim]		Angulo de friccion Interna, ϕ [deg]	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Depositos Aluviales Heterogeneos	1750.00	2650.00	1406.70	2140.70	0.12	0.28	20.00	30.00
2	Residuos Morrenicos Heterogeneo	1750.00	2650.00	1437.30	2079.50	0.15	0.47	25.00	35.00
3	Depositos de grano fino y arcillas	1750.00	2650.00	1916.40	2079.50	0.00	0.42	15.00	30.00
4	Afloramiento rocoso	1750.00	2650.00	1916.40	2242.60	0.00	0.25	30.00	35.00
5	Depositos Aluviales franco arenoso	1750.00	2650.00	1406.70	2140.70	0.12	0.28	20.00	30.00
6	Depositos Aluviales Heterogeneos con poca vegetacion	1750.00	2650.00	1406.70	2140.70	0.12	0.28	20.00	30.00
7	Depositos Aluviales Heterogeneos con vegetacion densa	1750.00	2650.00	1406.70	2140.70	0.12	0.28	20.00	30.00
8	Depositos Aluviales Heterogeneos con areas de cultivo	1750.00	2650.00	1406.70	2140.70	0.12	0.28	20.00	30.00

Supuestos utilizados en la ejecución del modelo calibrado:

R = Tasa de lluvia = 0.002688 m/h (64.52 mm en 24 horas que corresponde a un periodo de retorno de 100 años)

Espesor del suelo = 1.5 m

Gravedad = 9.81 m / s²

Cr = cohesión de la raíz = 0 kPa (min) y 5 kPa (max)

Fuente: Mabee y Duncan (2013), INDECI (2007), Apaza (1997)

3.2.8 Análisis del Modelo

Para el área de estudio se utilizó el modelo SINMAP, utilizándose los valores de los parámetros disponibles en la bibliografía y observaciones de campo, para definir los parámetros de entrada.

Así mismo como condición inicial se consideró que el suelo se encuentra completamente saturado siguiendo de acuerdo al siguiente proceso que requiere el programa para determinar el índice de estabilidad.



Figura 64: Metodología para la obtención del mapa de índice de susceptibilidad

Fuente: Elaboración propia.

3.2.9 Modelo SINMAP

SINMAP utiliza una malla topográfica y, en caso de disponibilidad de datos, mallas que definen los parámetros geotécnicos y geohidráulicos para producir un mapa que defina el potencial de inestabilidad del terreno. Se generan mapas auxiliares, como el mapa de pendientes, la dirección del flujo, el área de contribución y la saturación. (Peck *et al.* 2005)

Para el uso del modelo, se debe utilizar un ráster con datos de elevación (DEM) y un archivo de puntos del tipo *shapefile* o cobertura, identificando la distribución geográfica de los deslizamientos de tierra. El inventario de deslizamientos de tierra se generó a partir del mapa generado en ArcGIS con datos de campo y fotografías aéreas, Debido a que es un mapa de polígonos, el inventario de deslizamientos originales fue adaptado para un mapa de deslizamientos de tierra representado por puntos vectoriales, para esto, se usó la herramienta del programa ArcGIS para convertir polígonos en puntos.

Continuando con la metodología es definir en el programa los valores predeterminados para la gravedad (9.8 m/s^2), la densidad del agua (1000 kg/m^3) y los parámetros que se consideran constantes en todo el proceso. El siguiente paso es proporcionar el valor de la densidad del suelo, así como los límites máximos y mínimos de la velocidad entre transmisividad y recarga (T/R), cohesión adimensional y ángulo de fricción. La transmisividad se calcula por el producto entre el espesor del suelo y la conductividad hidráulica saturada. Para fines de comparación entre los modelos, los valores mínimos y máximos adoptados fueron los mismos, de modo que no hubo variación espacial de los parámetros. Los valores adoptados están de acuerdo con la Tabla 15. El modelo de elevación digital se trabaja para eliminar sumideros y planos. Luego, los modelos digitales de pendiente y dirección del flujo y el área de contribución se calculan de acuerdo con el modelo digital de elevación del área de estudio. SINMAP realiza todos estos análisis en el menú de procesamiento de malla. El último paso es el cálculo de los valores del índice de estabilidad y saturación. Con los datos proporcionados anteriormente, el modelo calcula los valores de los índices de estabilidad y la saturación por celda de la malla. La Tabla 17 representa las seis clases estándar de índice de estabilidad adoptadas por el modelo. Los valores mínimos de estabilidad menores que 1, indican áreas inestables y los valores de estabilidad iguales o superiores a 1 indican cierto grado de estabilidad.

Tabla 17: Definición de clases del índice de estabilidad (SI)

CONDICION	CLASES	ESTADO PREDICHO	RANGO DE PARAMETROS	POSIBLE INFLUENCIA DE LOS FACTORES NO MODELADOS
$SI > 1.5$	1	Zona de pendiente estable	No se puede modelar inestabilidad	Importantes factores de desestabilización son necesarios para inestabilizar
$1.5 > SI > 1.25$	2	Zona moderadamente estable	No se puede modelar inestabilidad	Factores de moderada desestabilización son necesarios para inestabilizar
$1.25 > SI > 1$	3	Zona de pendiente cuasi estable	No se puede modelar inestabilidad	Factores de mínima desestabilización son necesarios para inestabilizar
$1 > SI > 0.5$	4	Zona de pendiente límite inferior	Rango medio pesimista requerido para la estabilidad	Factores de desestabilización son necesarios para inestabilizar
$0.5 > SI > 0$	5	Zona de pendiente límite superior	Rango medio optimista requerido para la estabilidad	Factores de estabilización pueden ser responsables de la inestabilidad
$0 > SI$	6	Zona de pendiente límite prohibitiva	No se puede modelar inestabilidad	Los factores de estabilización son necesarios para estabilizar

Fuente: Pack *et al.* (2005)

El mapa de saturación indica el grado de saturación de cada celda en la malla del área de estudio. Pack *et al.* (2005) explican que es posible encontrar 3 situaciones con respecto al análisis de la saturación del suelo. El primero indica que el área está saturada para cualquier valor de los parámetros de entrada entre los límites mínimo y máximo. Las celdas que presentan esta situación tienen un valor de 3. Hay algunas otras celdas en la malla que representan el área de estudio que pueden o no estar saturadas dependiendo de los valores de los parámetros utilizados en el análisis. Estas celdas se identifican con el número 2. También hay un tercer tipo de celda en términos de análisis de saturación: celdas que no muestran saturación independientemente de los valores de los parámetros utilizados dentro del límite propuesto por el usuario. Los valores entre 0 y 1 representan estas celdas. Las celdas que tienen valores superiores al umbral de humedad y menos de 1 se denominan parcialmente húmedas, mientras que aquellas con valores inferiores al umbral de humedad se designan como baja humedad.

La zona de estudio tiene una altitud predominantemente alta y un clima altoandino con una temperatura promedio de 23.37 °C. y que actualmente se encuentra altamente fragmentada y muy degradado, especialmente alrededor de las zonas urbanas y periurbanas,

La época lluviosa en la zona se da en los meses de diciembre a marzo con un 74.3% de la lluvia anual y que el 20.3% de la lluvia cae en febrero motivo por el cual la mayoría de deslizamientos se dan en los meses de febrero y marzo (Figura 51).

En esta zona, los fondos del valle son estrechas y se desarrollan a lo largo de tectónica con persistentes fracturas en las que solo los ríos pueden generar depósitos fluviales donde la mayoría de la población se ubica adyacente a estos valles, escarpes con afloramientos rocosos y pendientes pronunciadas (más de 37 grados) que son muy comunes.

3.2.10 Metodología para la calibración del modelo

Swets (1996) menciona que “En la teoría de detección de señales la curva ROC (Receiver Operating Characteristic, o Característica Operativa del Receptor) es una representación gráfica de la sensibilidad frente a la especificidad para un sistema clasificador binario según se varía el umbral de discriminación”.

Fawcett (2006) interpreta que el gráfico del ROC es la representación de la proporción de verdaderos positivos (VP) frente proporción de falsos positivos (FP) según varíe el umbral de discriminación (a partir de un valor del cual se decide que un caso es positivo). La curva ROC significa también Característica Operativa Relativa en inglés (Relative Operating Characteristic) debido a que se compara dos características operativas (VP y FP) según se modifica el umbral de la decisión.

Swets (1996) indica que al inicio de la utilización del test de la curva ROC, este se desarrolló por ingenieros eléctricos utilizándose para probar la eficacia en la detección de objetos enemigos en los campos de batalla mediante pantallas de radar, a partir de lo cual se desarrolló la Teoría de Detección de Señales (TDS). Y posteriormente el análisis ROC se aplicó a diversas áreas como la medicina, radiología, psicología y otras especialidades durante varias décadas, recientemente con el avance de la informática y el internet se ha podido encontrar muchas aplicaciones como el aprendizaje automático (machine learning), y minería de datos (data mining).

Para el trabajo de investigación el test de la curva ROC se desarrolló de la siguiente manera:

Al clasificar una cuadrícula de la inestabilidad mapa, se determinó cuatro resultados posibles como se indica a continuación:

- 1) Si una celda calculada como inestable está dentro de lo observado área de deslizamiento de tierra, se cuenta como verdadero positivo (VP);
- 2) Si está fuera del área de deslizamiento observada, se cuenta como falso positivo (FP);
- 3) Si una celda calculada como estable corresponde a una célula de deslizamiento observada, se cuenta como falso negativo (FN) de lo contrario,
- 4) Se clasifica como verdadero negativo (VN).

Con estos conceptos, dos cantidades se calcularon: sensibilidad (tasa positiva verdadera), definido como la relación entre (VP) y la suma de (VP) y (FN) y, especificidad (tasa de falsos positivos), definido como la relación entre (VN) y la suma de (VN) y (VF). Una alta sensibilidad indica un alto número de predicciones correctas, mientras que un alto valor de la especificidad indica un bajo número de falsos positivos (Zizioli *et al.* 2013).

		Predicción	
		Positivos	Negativos
Observación	Positivos	Verdaderos Positivos (VP)	Falsos Negativos (FN)
	Negativos	Falsos Positivos (FP)	Verdaderos Negativos (VN)

Figura 65: Matriz de confusión para determinar la curva ROC
Fuente: Begueria (2006)

El área bajo la curva ROC puede servir como precisión global del modelo. Esta estadística oscila entre 0.5 (predicción aleatoria, representada por una línea recta diagonal) a 1 (perfecta predicción) y puede usarse para modelos de comparación (Begueria 2006 y Cervi *et al.* 2010).

3.2.11 Datos geotécnicos

Debido a que el presente estudio es de carácter regional y que la recolección de muestras de suelo in situ y las pruebas de laboratorio estaban fuera del alcance para definir algunos parámetros de la geología, vegetación y otros, estos fueron obtenidos de la literatura valores de diferentes autores que trabajaron en proyectos similares y se utilizaron bajo el siguiente enfoque.

Se utilizó múltiples regiones de calibración, el área de estudio fue dividida en ocho regiones de acuerdo con las unidades litológicas del mapa y características de uso del suelo (Figura 07). En todas las simulaciones probadas, una aceleración gravitacional valor igual a $9,81 \text{ m/s}^2$ y una densidad del suelo húmedo igual a $2000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ fueron usados. Adicionalmente, teniendo en cuenta los valores sugeridos por Cardozo (2018) y Marques *et al.* (2017), un valor promedio de la profundidad del suelo paralelo al nivel freático y que se supuso en 1.50 m para el mismo que es el espesor del suelo en toda el área de estudio.

Las distribuciones uniformes de la probabilidad se asumieron con los límites superiores e inferiores de los parámetros que representan cierta incertidumbre (Pack *et al.* 1999). La ecuación utilizada para determinar el valor adimensional de la cohesión combina a la cohesión de la raíz y el suelo (Ecuación 5).

Teóricamente, esta es la relación de la fuerza cohesiva de las raíces y el suelo en relación con el peso de un espesor saturado de suelo (Pack *et al.* 2005).

$$C = \frac{(C_r + C_s)}{h\rho_s g} \quad (69)$$

donde C es cohesión; C_r es la cohesión de la raíz [N/m^2]; C_s es cohesión del suelo [N/m^2]; h es el espesor del suelo [metro]; ρ_s es la densidad del suelo húmedo [kg/m^3]; g es aceleración gravitacional [m/s^2]

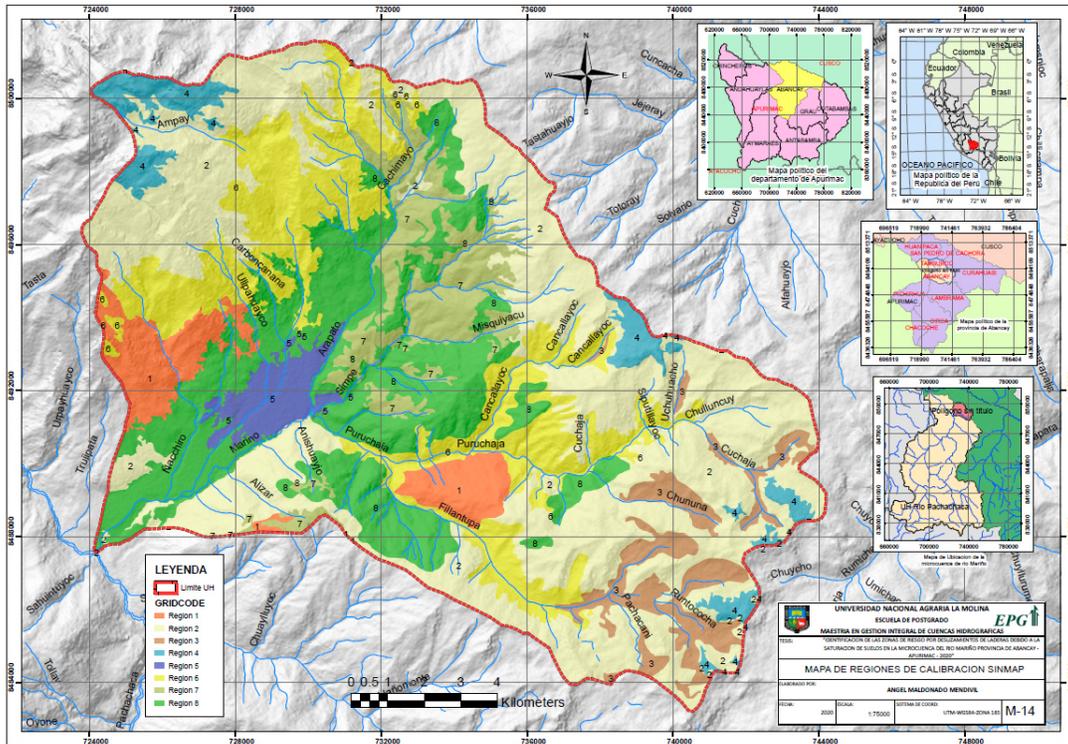


Figura 66: Mapa de regiones de calibración.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 15 muestra los valores asumidos para simulaciones SINMAP con ocho regiones de calibración donde los valores de cohesión fueron tomados de los valores citados por O'Loughlin y Ziemer (1982), Hammond *et al.* (1992); Herrera *et al.* (2015) y Sanhueza *et al.* (2012), en general la raíz de los árboles contribuyen a la resistencia del suelo al proporcionar un componente de cohesión adicional de la vegetación en el área está representada principalmente por bosque con sistemas de raíces que varían ampliamente en tiempo y espacio. Hammond *et al.* (1992) donde indica que existen áreas forestales representados por una sucesión ecológica secundaria de plantas con raíces poco profundas y en diferentes estados de degradación.

Debido a la dificultad de encontrar un parámetro específico de cohesión de la raíz para el área de estudio, un se asumió los valores de 0.1 a 20 Kpa (Sanhueza *et al.* 2012).

Los valores de cohesión del material (Tabla 15) se presentan muy bajos, ubicándose desde 0, hasta 0.47 kg/cm², para los depósitos aluviales heterogéneos.

La cohesión, asumida para el programa fue considerada por Hammond *et al.* (1992), donde la Cohesión de raíces, C_r (N/m^2) fue de 0 a 0,5 con una distribución estadística constante, mientras que la cohesión intergranular se consideró de Escobar (2003) el valor de C_s (N/m^2) de 0.0 para suelos no cohesivos y de 0 a 0,5 para suelo cohesivos con una distribución estadística también uniforme con las que se obtuvo la cohesión adimensional

Value	Count	Region	T/Rmin	T/Rmax	Cmin	Cmax	PHImin	PHImax
1	73046	Region 1	1750.0000	2650.0000	0.12000	0.28000	20.0000	30.0000
2	547635	Region 2	1750.0000	2650.0000	0.15000	0.47000	25.0000	35.0000
3	72106	Region 3	1750.0000	2650.0000	0.00000	0.42000	15.0000	30.0000
4	54145	Region 4	1750.0000	2650.0000	0.00000	0.25000	30.0000	35.0000
5	34570	Region 5	1750.0000	2650.0000	0.12000	0.28000	20.0000	30.0000
6	252083	Region 6	1750.0000	2650.0000	0.12000	0.28000	20.0000	30.0000
7	107428	Region 7	1750.0000	2650.0000	0.12000	0.28000	20.0000	30.0000
8	282988	Region 8	1750.0000	2650.0000	0.12000	0.28000	20.0000	30.0000

Figura 67: Valores asumidos para simulaciones en SINMAP con ocho regiones de calibración.

Fuente: Elaboración propia.

El ángulo interno de fricción es una medida de la resistencia al corte del suelo debido a la fricción determinado en el laboratorio mediante la prueba corte directo de fuerza o esfuerzo triaxial. Para la región de calibración de la fricción media del ángulo interno los valores fueron tomados de los valores de Escobar (2003) y Terzaghi y Peck (1948).

La relación T/R combina el clima y factores hidrogeológicos y cuantifica la humedad relativa en términos de estado estacionario supuesto recarga en relación con la capacidad del suelo para drenaje lateral de agua (Pack *et al.* 2005).

Para el enfoque de región de calibración única, el parámetro T/R se asumió de acuerdo con (Pack *et al.* 2005) donde los valores recomendados para el programa son de 2000 (T/R_lower bound) y 3000 (T/R_upper bound) y que corresponderían a una precipitación real para la cuenca de entre 50 y 30 mm/día planteado por Lan *et al.* (2004) mencionado por Batista (2015).

La transmisividad T representa el agua que fluye dentro del suelo y se deriva de la conductividad hidráulica (mínima y máxima) medida en el campo. Para las ocho regiones de calibración, la transmisividad se calculó considerando los valores de conductividad hidráulica.

El parámetro R (velocidad de recarga en estado estable) es difícil de medir y evaluar la cantidad de agua subterránea infiltrada de la cantidad de lluvia total. Sin embargo, R es influenciado por factores como la intensidad de la lluvia y duración se asumió que la recarga principal era la precipitación efectiva y el suelo saturado. Significa que lluvia menos la evapotranspiración e infiltración de la roca madre.

Los datos sugieren que la lluvia durante el 16 de marzo del 2012 en el sector Churllurpata fue espacial y no uniforme, pero debido a la escasa información en la zona se consideró los mismos valores de lluvia para cada región, los datos de evapotranspiración y el mapa de uso del suelo no permitieron aproximar la capacidad de retención de agua necesario para el cálculo de la evapotranspiración. La cantidad de infiltración depende del ángulo de inclinación de la ladera, por lo que se supuso que solo una parte del agua se infiltra en el sustrato (Tabla 13).

3.2.12 Consideraciones para el modelo

Se asumió un nivel constante del nivel freático a una profundidad promedio de 1.5m de profundidad en las ocho regiones a analizar para el área de estudio teniendo en cuenta la misma intensidad de la lluvia y las propiedades hidráulicas de los materiales del suelo de cada región. Por lo tanto, en este estudio, la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra se determinó utilizando el modelo acoplado de pendiente infinita con el modelo hidrológico.

Para el análisis de las propiedades geomecánicas e hidráulicas de los materiales de la pendiente y la intensidad de la lluvia se obtuvieron a partir de las observaciones e investigaciones en la literatura disponible y visitas de reconocimiento en el campo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS

Para el presente trabajo los datos topográficos han representado el ingreso de datos más importante para el modelo y que los resultados sugieren que una resolución de 12.5 m para el DEM obtenido, ya que fue muy útil para el procedimiento del cálculo de la estabilidad de laderas y taludes basados en modelos físicos y comprobar su validez a través de la calibración en el área de estudio.

El modelo utilizado en el estudio, se basa principalmente en el planteamiento matemático que se sustenta en la física de los fenómenos que intervienen en la estabilidad de laderas tanto geotécnicos e hidrológicos, para ello se consideró la teoría de la pendiente infinita para establecer los factores de seguridad siendo así, un modelo determinístico, sin embargo para su resolución matemática de las ecuaciones planteadas, el modelo SINMAP utiliza un rango de valores para la determinación del índice de estabilidad a través de un modelo probabilístico. Por lo que podemos indicar que el SINMAP es un modelo determinístico y probabilístico a la vez.

Debido a que el estudio de investigación es de carácter regional, la existencia de incertidumbres en la determinación de los parámetros geotécnicos e hidrológicos a nivel de toda la cuenca de río Mariño es muy variada aun en una pequeña área, parcela o región de análisis, los valores oscilan en un cierto rango de valores de aproximación, y que la aplicación del modelo de simulación del programa SINMAP se adapta a dicha incertidumbre ya que el modelo matemático asume una distribución estadística uniforme de los parámetros asignados para determinar el valor del índice de estabilidad a través de un modelo probabilístico.

Uno de las limitaciones más importantes para proceder con el modelo fue dado por la selección de parámetros geotécnicos que involucraron parámetros con muchas incertidumbres como es el factor T/R no podría fácilmente ser determinado y que probablemente ha introducido cierta incertidumbre, Sin embargo, Thiebes *et al.* (2016)

reportaron que la modificación de este factor hidrológico en la calibración los procedimientos solo producen pequeños cambios de clasificación de susceptibilidad. Los resultados parecen mostrar que el aumento en el rango de valores de los ángulos de fricción resultó en una disminución en la fracción de las zonas más inestables. Cardozo *et al.* (2019) citan a Zaitchik *et al.* (2003) indicando que los hallazgos están de acuerdo que la conductividad hidráulica, ángulo de fricción fueron los más parámetros sensibles durante la calibración.

El modelo requiere también un inventario de deslizamientos de tierra en el área de estudio para lo cual se recopiló la información de las costras y rezagos de deslizamientos, así como de la literatura local especializada e imágenes de satélite provistos en Google Earth y visita de campo dentro del área de estudio para el cual se identificaron un total de 58 cicatrices frescas ocurridos en los últimos 60 años de diferente magnitud que pudieran ser reconocidos por el programa siendo mucho mejor los deslizamientos mayores a 156.25 m² de área debido a la resolución del DEM.

Tabla 18: Frecuencia de deslizamientos obtenidos a partir del inventario por rango de pendientes y región.

INVENTARIO	PENDIENTES (°)							Total
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60 a mas	
Region 1	0	0	1	0	1	1	0	3
Region 2	0	0	0	1	0	0	0	1
Region 3	0	0	0	0	0	0	0	0
Region 4	0	0	0	0	0	0	0	0
Region 5	1	1	1	0	0	0	0	3
Region 6	0	1	1	5	0	0	0	7
Region 7	1	1	6	6	1	1	0	16
Region 8	0	5	8	7	4	3	1	28
Frecuencia de Deslizamientos	2	8	17	19	6	5	1	58
Frecuencia de Deslizamientos %	3.45%	13.79%	29.31%	32.76%	10.34%	8.62%	1.72%	

Fuente: Elaboración propia

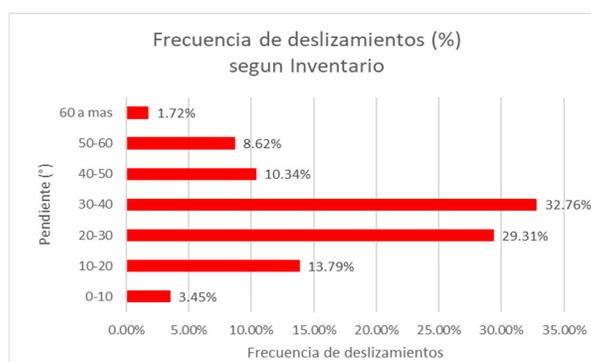


Figura 68: Frecuencia de deslizamientos según inventario

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19: Frecuencia de deslizamientos obtenidos a partir del pronóstico del modelo SINMAP por rango de pendientes y región.

PREDICCIÓN	PENDIENTES (°)							Total
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60 a mas	
Region 1	1	8	18	22	3	0	0	52
Region 2	34	85	99	58	27	4	0	307
Region 3	26	18	5	6	0	0	0	55
Region 4	3	4	9	5	1	0	1	23
Region 5	17	11	1	1	0	0	0	30
Region 6	5	33	52	45	23	1	0	159
Region 7	3	19	38	14	4	0	0	78
Region 8	35	47	49	33	8	2	0	174
Frecuencia de Deslizamientos	124	225	271	184	66	7	1	878
Frecuencia de Deslizamientos %	14.12%	25.63%	30.87%	20.96%	7.52%	0.80%	0.11%	

Fuente: Elaboración propia

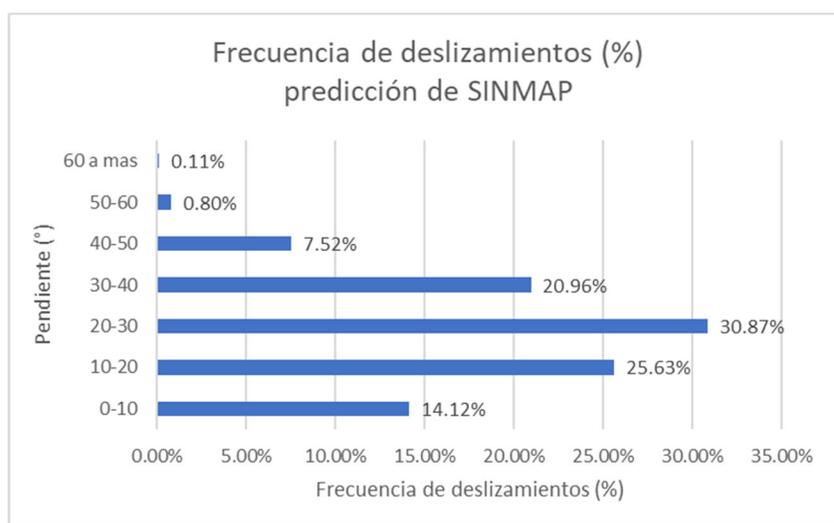


Figura 69: Frecuencia de deslizamientos según predicción de SINMAP

Fuente: Elaboración propia.

El resultado de los deslizamientos pronosticados por el modelo SINMAP, podemos presentar a través de la frecuencia de deslizamientos por cada rango de pendientes y región en la Tabla 18, que con respecto a la frecuencia de deslizamientos inventariados Tabla 17 podemos indicar que la mayor cantidad de deslizamientos se produce entre los 10 a 60° de pendiente, sin embargo en la predicción del SINMAP indica también que existe la probabilidad de deslizamiento en zonas con pendiente menores a 10° situación que requiere un mayor análisis localizado ya que la incertidumbre del modelo puede generar falsas predicciones.

La fiabilidad de cada simulación también fue evaluada mediante análisis ROC de acuerdo a Chung y Fabbri (2003), donde indican que es importante llevar a cabo la validación de

modelos de predicción ya que, sin algún tipo de validación, el modelo las capacidades predictivas serían desconocidas y serían de poco valor científico.

Por lo que la simulación tuvo bastante éxito en describir la modelación de las fallas de laderas de pendiente infinita en la microcuenca del río Mariño, identificando el 70.69% de 58 deslizamientos de tierra inventariados.

De acuerdo a la simulación del modelo, el 70.69% de los deslizamientos de tierra observados fueron identificados correctamente (32.76% en la clase de umbral inferior de inestabilidad, 25.86% en la clase de umbral superior de inestabilidad y 12.07% en la clase limite muy inestable). Por otro lado, el 29.31% fue clasificado como terreno estable (8.62% estable, 5.17% moderadamente estable y 15.52% cuasi estable).

Tabla 20: Inventario de deslizamientos integrados al modelo SINMAP para la calibración en las ocho regiones de la microcuenca Mariño.

Total	Stable	Moderately Stable	Quasi-Stable	Lower Threshold	Upper Threshold	Defended	Total
Area (Km ²)	55.6	20.1	31.2	59.9	23	6.8	196.6
% de Region	28.28	10.22	15.87	30.47	11.70	3.46	100
#Landslides	5	3	9	19	15	7	58
% of Slides	8.62	5.17	15.52	32.76	25.86	12.07	100
LS Densidad(#/Km ²)	0.09	0.15	0.29	0.32	0.65	1.03	0.30

Fuente: Elaboración propia.

La mayor densidad de deslizamientos fue determinada en el umbral inferior (Tabla 20) que representa el 32.76% del territorio. Las áreas predichas propensas a los deslizamientos de tierra se caracterizaron por ángulos de pendiente entre 10 grados y 60 grados y áreas de acumulación por debajo de 1000 m².

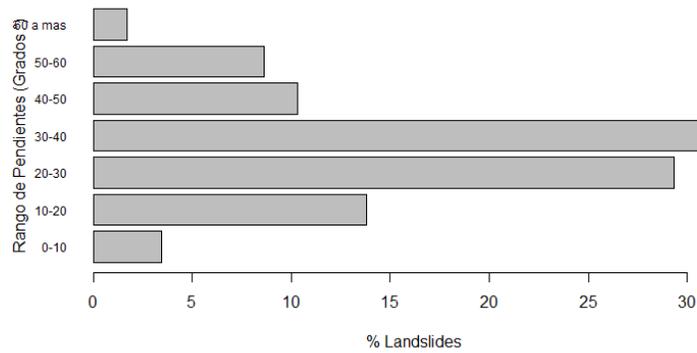


Figura 70: Frecuencia de deslizamientos de tierra según inventario por rango de pendientes.
Fuente: Elaboración propia.

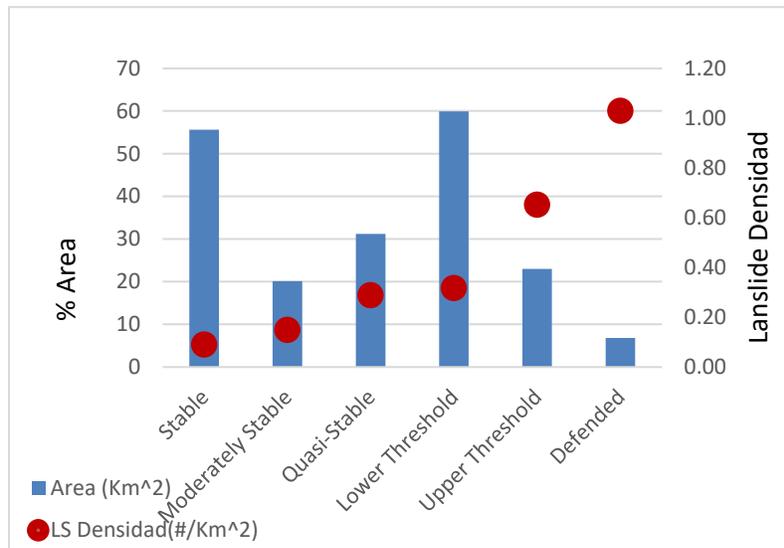


Figura 71: Precisión de la predicción del modelo SINMAP con 08 regiones de calibración
Fuente: Elaboración propia.

Las áreas predichas para fallar durante el evento de marzo de 2012 incluyeron áreas con ángulo de inclinación entre 10 grados y 60 grados (factor de seguridad por debajo de 1) y áreas de captación por debajo de 1000 m². Estos resultados están de acuerdo con Villacorta y Valderrama (2012), quienes señalan que la geomorfología del área del deslizamiento de marzo del 2012, se caracteriza por presentar fuertes pendientes (entre 30° a 45°) y que la zona montañosa, donde tuvo origen el deslizamiento de Chuyllurpata, se caracteriza por pendientes fuertes, superiores a los 30° dominadas por farallones rocosos que condicionan favorablemente la presencia de movimientos en masa.

Según el modelo de análisis para las ocho regiones de calibración individual, contribuyeron hasta el resultado final de diferentes maneras. La región 1 (Figura 72) ha contribuido con el 5.2% de los deslizamientos de tierra el cual se predijeron correctamente dentro de esta zona. La región 2 ha contribuido con el 1.7% de los deslizamientos de tierra. La región 3 y 4 no han contribuido debido a que dichas áreas son en su mayor parte planicies altoandinas y que las pendientes son mínimas para generar deslizamientos de tierra. La región 5 ha contribuido con el 1.6% de los deslizamientos de tierra, siendo esta región la zona urbana ha tenido problemas de reptación y deslizamiento de tierras en el sector de FONAVI. La región 6 contribuido más del 10.3% de los deslizamientos de tierra que se predijeron correctamente dentro de esta zona, La región 7 también ha contribuido más del 20.7% de los deslizamientos de tierra y que la mayoría de datos inventariados se predijeron correctamente dentro de esta zona y La región 8 contribuido más del 31.0% de los deslizamientos de tierra que la mayoría de deslizamientos inventariados se predijeron dentro de esta zona.

Cabe resaltar que las regiones 3, 4 y 5 (Figura 72) mostraron que un bajo proporción de las áreas afectadas por deslizamientos ya se ubican en áreas con baja susceptibilidad modelada probablemente se deban a las limitaciones en la disponibilidad de insumos de mayor cantidad de datos inventariados, otro aspecto también en particular es la falta de verificación de los parámetros geotécnicos en las regiones 2 y 3.

De la predicción del modelo podemos destacar que en la región de calibración 2 (Figura 72) se presenta una alta probabilidad de deslizamientos por saturación del suelo, llegando a identificar de hasta 99 potenciales deslizamientos entre los 20 a 30 grados de pendiente del terreno y en mayor proporción la región 2 es la más inestable y las zonas 4 y 5 serían las más estables debido a la poca pendiente en las partes altas y algunas zonas del valle .

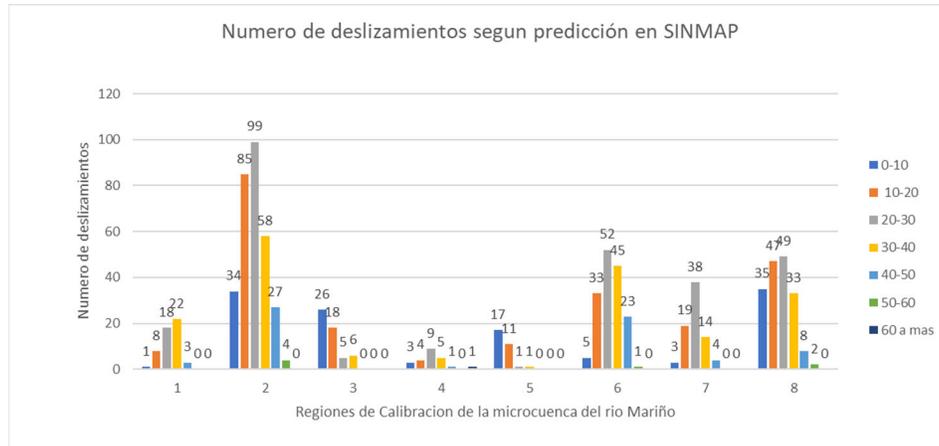


Figura 72: Numero de deslizamientos de la prediccion del modelo SINMAP para las 08 regiones de calibración con sus respectivos rangos de pendientes del terreno.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1 Calibración del modelo utilizado

Los resultados del proceso de SINMAP (Figura 73) dando diferentes predicciones según el índice de estabilidad que se genera en dicho modelo, en el presente estudio de investigación se ha obtenido que un cierto número de ubicaciones de deslizamientos cayó dentro de la zona inestable ($SI > 1$). De manera que se confirma la prediccion con el inventario siendo este punto verdadero positivo (V_p) lo que nos sirve para calibrar el modelo según la prueba ROC.

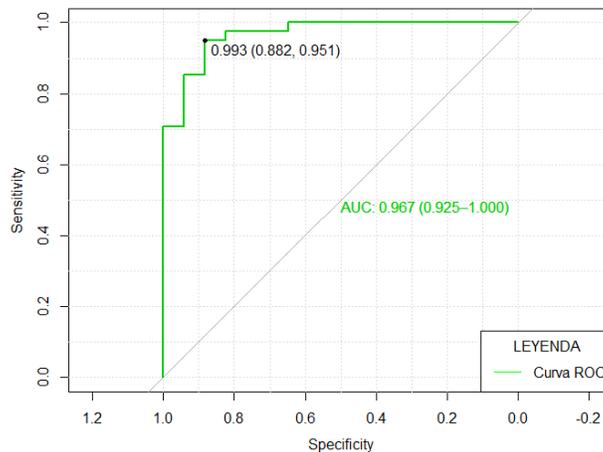


Figura 73: Curva ROC derivadas de simulaciones SINMAP con todas las regiones de calibración (verde). Área bajo la curva: 0.967 95% CI: (0.9252-1.000).

Fuente: Elaboración propia.

El resultado del análisis de la curva ROC nos indica que la precisión global representada por el área. bajo la curva (AUC) fue igual a 0.967 (Figura 73), siendo este un valor mayor a 0.50, y que se puede interpretar que los resultados tienen un valor de aceptación muy alto del modelo, que indica que el 96.7% de los valores corresponden a una predicción correcta y que el 3.3% de los datos el modelo predice en forma errónea.

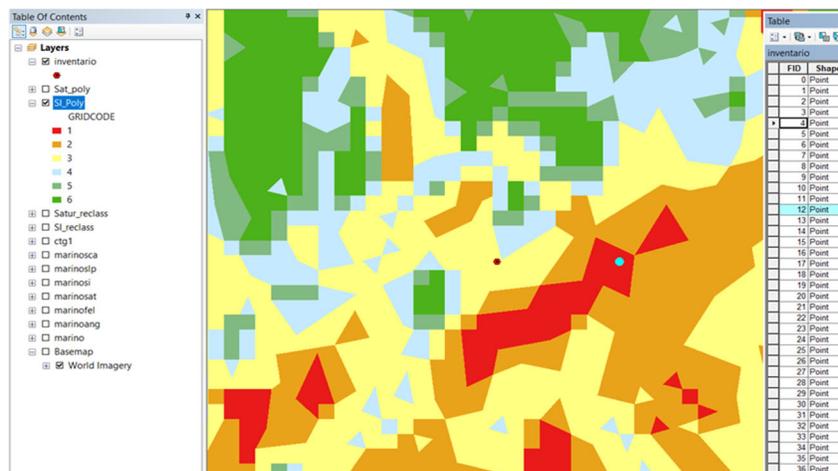


Figura 74: Verificación de las zonas de predicción con los puntos del inventario realizado. (La zona roja indica zona inestable según el modelo y el punto celeste indica un derrumbe inventariado).

Fuente: Elaboración propia.

Otro grupo de deslizamientos han caído en zonas consideradas semi inestables los cuales se encuentran en el umbral de zonas inestables los cuales se han considerado verdadero positivo por tener un índice de estabilidad mayor a uno ($SI < 1$).

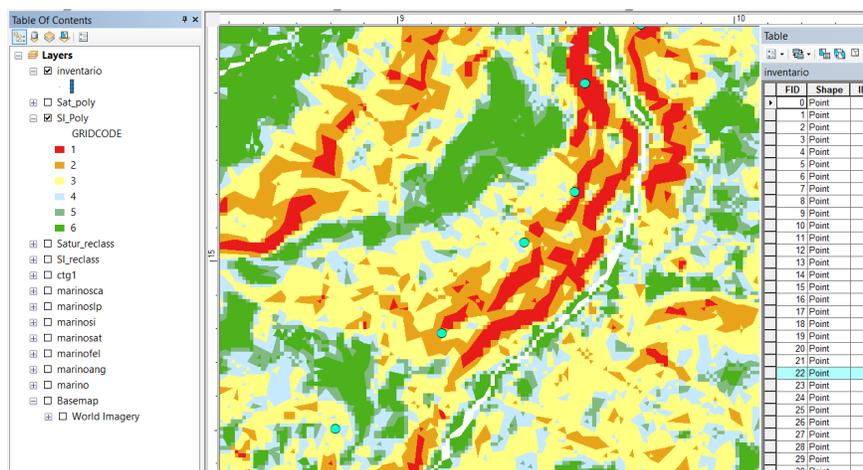


Figura 75: Verificación de las zonas de predicción con los puntos del inventario realizado. (La zona de color marrón claro indica zona inestable según el modelo y el punto celeste indica un derrumbe inventariado).

Fuente: Elaboración propia.

Así también varios puntos han caído dentro de la zona estable, moderadamente estable y casi estable ($SI > 1$). Considerándose para fines de calibración como un falso positivo (Fp). De acuerdo con Pack *et al.* (2005) las razones para esto sucedan pueden ser:

- 1) La roca madre, los procesos de geología superficial y deslizamientos de tierra requiere mayores análisis, dada su complejidad requieren más ensayos.
- 2) En los datos topográficos del DEM no se pueden seleccionar pendientes muy pequeñas pero críticas. Además, también podría atribuirse incertidumbres en la precisión de los lugares de inicio de deslizamientos previamente delimitado.



Figura 76: Verificación de las zonas de predicción con los puntos del inventario realizado. (La zona verde indica zona estable según el modelo y el punto celeste indica un derrumbe inventariado).

Fuente: Elaboración propia.

En general, los deslizamientos de tierra que no se predijeron bien mostraron pendiente media igual a 20 grados y no se evidenció un modelo espacial de deslizamiento. Por otro lado, el mapa de índice de estabilidad obtenida (Figura 78) muestra que muchas áreas clasificadas como inestables no fueron reconocidas por el modelo, como es el caso de los sectores de

FONAVI, Bellavista Alta y San Luis, que se encuentran en la periferia de la ciudad de Abancay y que diversos estudios confirman que se encuentran en un proceso de reptación.

En la predicción del modelo se ha ubicado con bastante aproximación el deslizamiento del 17 de marzo del 2012 (Figura 77), en el sector de Chuyllurpata y los deslizamientos ocurridos en los sectores de Ccocha Pumaranra ocurridos en febrero de 1997 siendo de características catastróficas y ha motivado a muchos estudios de estos deslizamientos.

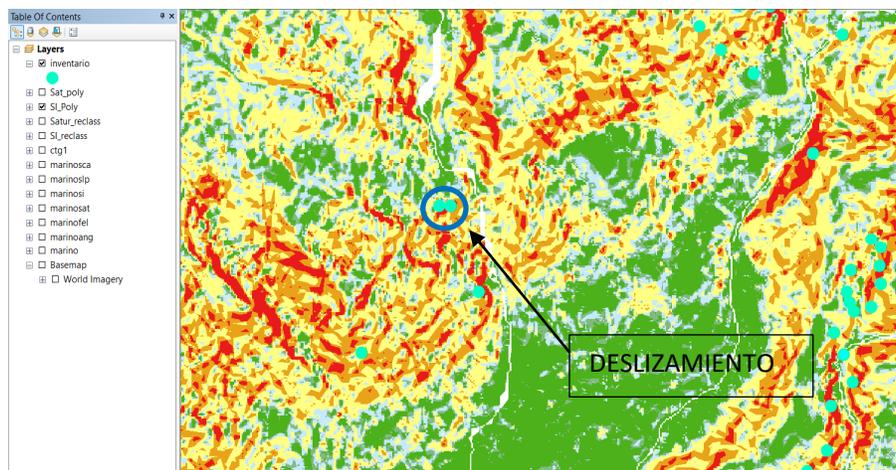


Figura 77: Zona del deslizamiento del 16 marzo del 2012

Fuente: Elaboración propia.

Para aumentar la capacidad del modelo para simular como inestables las ubicaciones donde se han producido deslizamientos de tierra, inevitablemente conduce a simular todas las celdas con condiciones similares a las inestables. Bischetti y Chiaradia (2010).

En el caso de la calibración para las ocho regiones fueron asumidos dividiendo la cuenca en subregiones y rango específico de valores de parámetros para cada uno los cuales fueron asignados limitando el efecto de valores bajos de parámetros solo para aquellas áreas donde era apropiado para evitar la sobreestimación del rango de valores de parámetros utilizados para toda el área ya que para considerar todo el área de la cuenca en una sola región tenía que ser lo suficientemente grande como para cubrir todos los diferentes condiciones.

Las múltiples regiones de calibración mostraron en los resultados una curva ROC adecuada, es decir, una mejor capacidad del modelo para predecir correctamente la mayoría de los

deslizamientos de tierra y los no deslizamientos de tierra para una lluvia que provoque deslizamientos de tierra evento en marzo de 2012.

Sin embargo, los datos geotécnicos utilizados no pudieron capturar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo existentes ya que requiere una geología más detallada y que las evaluaciones geotécnicas son necesarias en el futuro para mejorar la predicción del rendimiento de los modelos.

De lo manifestado anteriormente, la calibración demostró tener una predicción aceptable por lo que, el resultado nos permitió generar el mapa de susceptibilidad para la cuenca del río Mariño.

4.1.2 Mapa de susceptibilidad.

Con el mapa del índice de estabilidad y la utilización de la información temática que se encuentra en formato digital, nos permitirá mejorar la capacidad de gestionar deslizamientos de tierra e información geomorfológica en los sistemas de información geográfica que nos han facilitado la preparación de modelos predictivos de deslizamientos de tierra para prevenir futuros eventos de deslizamientos.

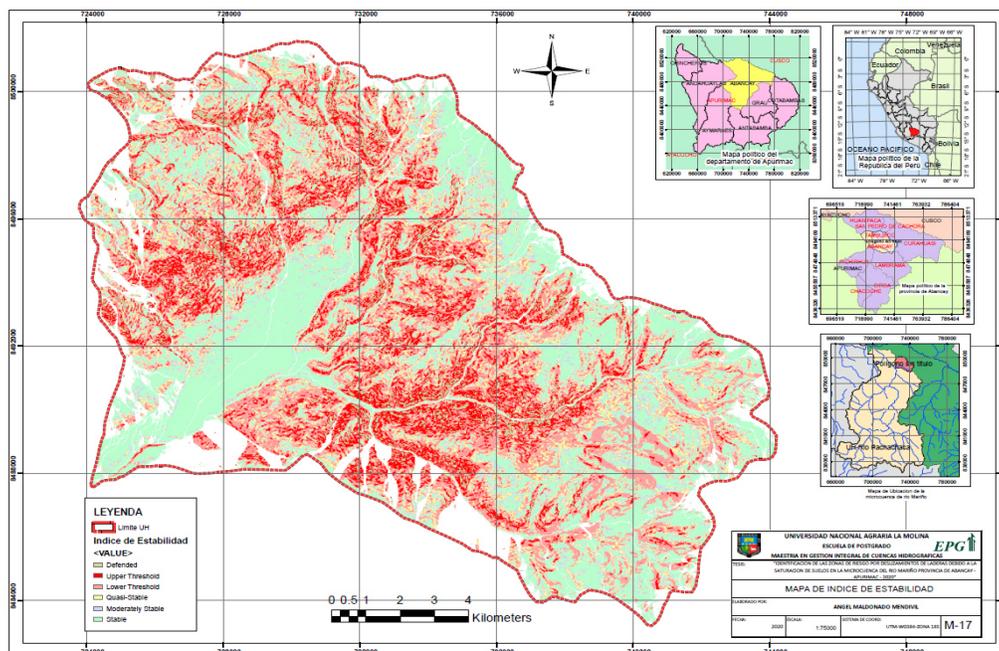


Figura 78: Precisión de la predicción del modelo SINMAP con 08 regiones de calibración

Fuente: Elaboración propia.

El mapa de susceptibilidad de deslizamientos fue creado a partir de las simulaciones con SINMAP con una calibración de ocho regiones. Los resultados obtenidos fueron analizados para cuantificar la discrepancia espacial entre los deslizamientos de tierra provocados por precipitación de diciembre a marzo que corresponden a periodos húmedos de alta saturación de los suelos y su contraste con los resultados del modelo (Figura 80).

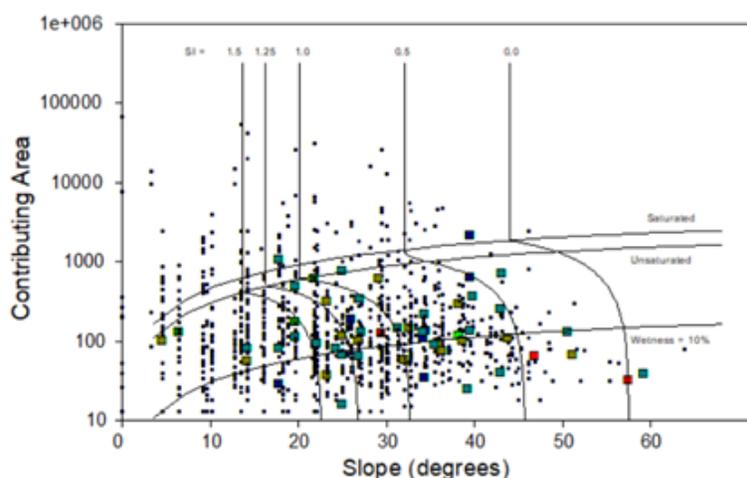


Figura 79: Gráfico de área de pendiente de deslizamientos de tierra inventariados (colores) y puntos de posibles deslizamientos (negro) vs. clases de índice de estabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez determinado la identificación de las zonas de derrumbes a través de su factor de seguridad o índice de estabilidad en taludes y laderas, se procedió a la generación del mapa de susceptibilidad en combinación con los mapas de uso potencial del suelo, uso actual del suelo y el mapa de inestabilidad dando lugar al mapa de susceptibilidad por riesgo de deslizamientos (Figura 78).

Este mapa de susceptibilidad podría usarse en futuras evaluaciones de riesgo, aunque todavía puede ser y debe ser mejorado con mayores pruebas de campo adicionales y focalizadas con datos geotécnicos obtenidos en laboratorio y datos mediciones de campo, así como estudios hidrológicos, hidrogeológicos en cada zona o región de la cuenca.

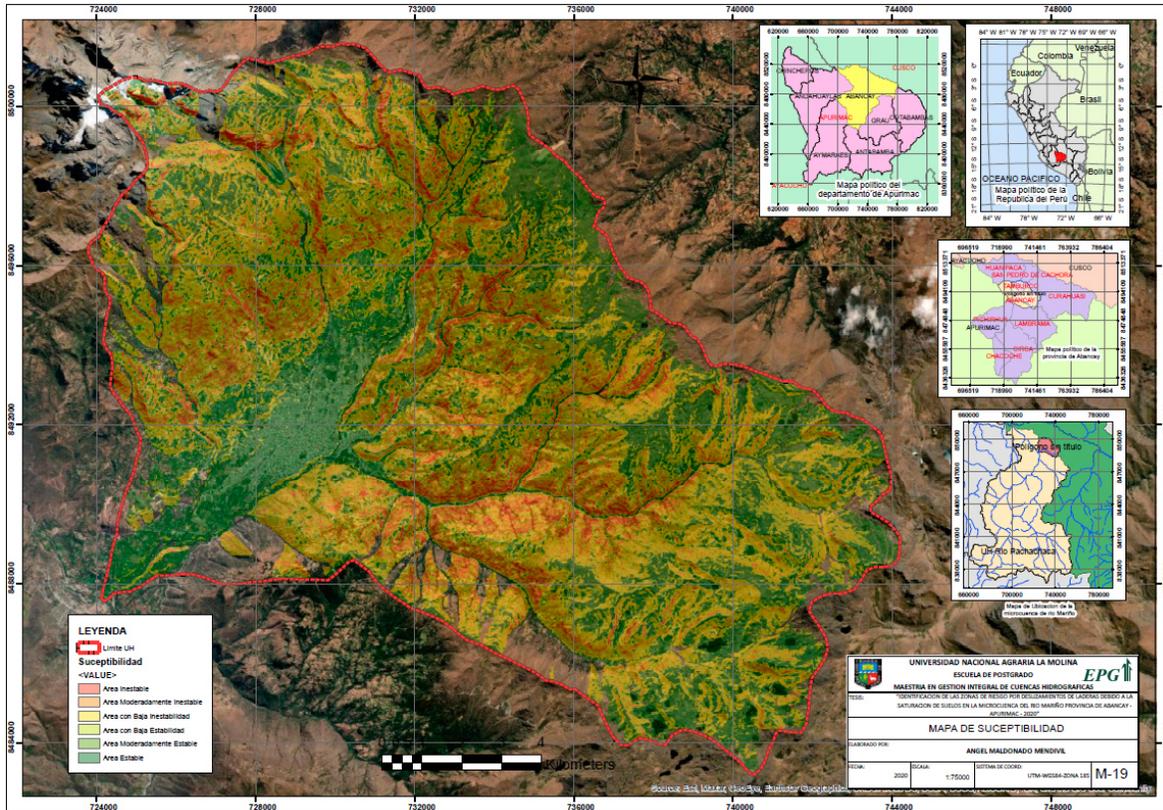


Figura 80: Mapa de susceptibilidad obtenida de acuerdo a la calibración del modelo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21: Clasificación de áreas estables e inestables de acuerdo al mapa de susceptibilidad en la microcuenca del río Mariño.

Descripción	Area en Km2	%
Area muy Inestable	8.0	4.07
Area moderadamente inestable	23.7	12.04
Area con baja inestabilidad	60.2	30.52
Area con baja estabilidad	31.0	15.73
Area moderadamente estable	20.1	10.21
Area estable	54.1	27.43
Total	197.21	100.00

Fuente: Elaboración propia.

V. CONCLUSIONES

- Las variables hidrológicas identificadas fueron la precipitación mensual 788.12 mm, y evaporación mensual obtenidos de la base de datos PISCO, con 1 093.68 mm de promedio anual, así mismo la precipitación máxima de 24 horas obtenidos de los datos históricos de SENAMHI registrados en la estación San Antonio de Abancay, igual a 64.62 mm para un tiempo de retorno de 100 años.
- Las variables geotécnicas que intervienen en el cálculo del factor de seguridad utilizados en el estudio en las 8 regiones de calibración, donde la profundidad del suelo saturado se consideró en 1.5m, la cohesión adimensional entre 0.0 y 0.47 considerando la cohesión de las raíces y la cohesión del suelo al grado de saturación, así también se consideró los valores de la fricción interna del suelo entre 15° y 35° valores característicos del área de estudio, los valores del peso unitario del suelo se estableció entre 13.8 y 22.0 KN/m³ con los que se establecieron las características geotécnicas.
- Dado que el estudio tiene un alcance regional, ha sido necesario recopilar información y generar mapas temáticos como el mapa de usos de suelo, uso potencial del suelo, litografía, geología, hidrografía y mapas climáticos. La información topográfica básica del Modelo de Elevación Digital (DEM) se ha obtenido de una imagen satelital ALOS PALSAR, cuyas imágenes con resolución de los pixeles de 12.5m fueron obtenidos a partir de la base de datos del portal de la institución norteamericana Alaska Satellite Facility (ASF-NASA). Así también se realizó un inventario de la ubicación georreferenciada de los deslizamientos de tierra ocurridos en los últimos 60 años que fueron utilizados en la validación del modelo.
- Al integrar las variables hidrológicas y geotécnicas a través de un SIG se ha utilizado el modelo SINMAP el cual predijo una mayor cantidad de deslizamientos en áreas de terrenos coluviales compuestos por una matriz de formaciones arenosas con presencia de lutitas y limo arcilloso, donde el 78.0% de los 878 deslizamientos pronosticados se

encuentran entre los 10° y 50° de pendiente de ladera. La simulación del modelo el modelo mostro un índice de estabilidad como zona inestable en el 70.69% de los deslizamientos de tierra inventariados clasificadas como inestables, sin embargo, el 29.31% muestra la incapacidad del modelo para predecir correctamente los deslizamientos de tierra restantes.

- El mapa de identificación de deslizamientos se reclasificó en niveles de riesgo obteniendo así el mapa de susceptibilidad (Figura 80), del cual indicamos que se obtuvo un área inestable de 91.90 km² (43.67% del área total de la cuenca), clasificándose en tres zonas o áreas de inestabilidad (Tabla 21) como son, muy inestable con 8.0 km² (4.07% del área total), área moderadamente inestable con 23.7 km² (12.04% del área total) y área con baja inestabilidad con 60.2 km² (30.52% del total total), así mismo se tiene un área estable de 105.3 km² (53.37% del área total de la cuenca), clasificándose en tres áreas estables como son, un área con baja estabilidad con 31.0 km² (15.73% del área total), área moderadamente estable con 20.1 km² (10.21% del área total) y un área muy estable con 54.1 km² (27.43% del área total).

VI. RECOMENDACIONES

- El modelo SINMAP nos permitió elaborar del mapa de susceptibilidad para la microcuenca del río Mariño el cual se recomienda incorporar en la elaboración de los planes de desarrollo y ordenamiento territorial del gobierno regional y de la municipalidad provincial y otras instituciones de la zona de influencia de la unidad hidrográfica, tomando en cuenta las limitaciones y restricciones que involucra la simulación en el modelo.
- La utilización de los sistemas de información geográfica y la percepción remota es de necesidad imperativa para realizar estudios a escala mayor como son las unidades hidrográficas y que su caracterización de estas depende la mayor información disponible para los estudios especializados.
- Una de las tareas muy difíciles es la calibración del modelo ya que puede ser un proceso que consume mucho tiempo debido a la poca información de los parámetros geomorfológicos, geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos y tipo de uso del suelo, por lo tanto, para futuros estudios se debe buscar el procedimiento de optimización automática en el estudio de la zona con la determinación de los parámetros en cada región y zona de calibración de la microcuenca del río Mariño.
- Debido a que en este modelo la calibración requiere mucha información de los parámetros geomorfológicos, geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos y tipo de uso del suelo, es necesario realizar un análisis detallado y focalizado, por lo que futuros estudios especializados, para ser complementada y contar con una información adecuada y confiable.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso, E. 2005. Estabilidad de taludes. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. E.T.S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Catalunya, España.

Amézquita, A.; Ñaupas, H. 1996. Reconocimiento Geomorfológico, Geológico y Geográfico de Abancay y su Hinterland. Informe Científico Universidad Tecnológica de los Andes. Abancay Apurímac Perú.

Aparicio, M. 1999. Fundamentos de hidrología de superficie., p. 188 Editorial Limusa. México.

Apaza, D. 1997. Estudio Geodinámico y Suelos del valle de Abancay – Plan Director de Abancay. Municipalidad Provincia de Abancay Apurímac Perú.

Arévalo, J. 2018. Generación de un algoritmo de simulación para la susceptibilidad de suelos a la remoción en masa utilizando el software Matlab. Trabajo de Grado presentado como requisito para optar por el Título de Ingeniero Ambiental. Universidad Santo Tomas Colombia.

Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E. & Felipe-Obando, O. 2017. Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, Lima-Perú.

Batista, S. 2015 Modelo de susceptibilidad de deslizamientos mediante la aplicación de un sistema de información geográfica (SIG) en la cuenca del rio Mamo, estado Vargas Universidad Central de Venezuela Tesis de Magíster Scientiarum en Ciencias Geológicas. Pag.138

Beguiría, S. 2006 Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Nat Hazards* 37(3):315–329.

Bischetti, G.; Chiaradia, E. 2010. Calibration of distributed shallow landslide models in forested landscapes *Journal of Ag. Eng .*, v.3, p. 23-35.

Biswajeet, P.; Manfred, B. 2012 *Terrigenous Mass Movements, Detection, Modelling, Early Warning and Mitigation Using Geoinformation Technology*; Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Pág. 127-129.

Cardozo, C.; Silva, E.; Lopes, S.; Vieira, A. 2019. Calibration of physically based slope-stability models A case study in nova Friburgo (Rio de Janeiro, Brazil) *Revista Geociencias* Vol. 38, Nº 2.

Cardozo, C. 2018. *A Spatially integrated modelling approach to landslide risk assessment: A case study of the nova Friburgo disaster - RJ, Brazil* Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Tesis Doctoral.

Cereceda, I. 2006. Uso de los SIG en el análisis de susceptibilidad y predicción de deslizamientos. *Compendio de trabajos de investigación CNDG – Biblioteca Instituto Geofísico del Perú*, V. 7: 191 – 202.

Cervi, F.; Berti, M.; Borgatti, L.; Ronchetti, F.; Manenti, F.; Cornisi, A. 2010. Comparing predictive capability of statistical and deterministic methods for landslides susceptibility mapping: a case study in the northern Apennines (Reggio Emilia Province, Italy). *Landslides*, v. 7, p. 433–444.

Chalkias, Ch.; Stathopoulos, N.; Kalogeropoulos, K.; Karymbalis, E. 2016. *Applied Hydrological Modeling with the Use of Geoinformatics: Theory and Practice* Intech Open Science.

Chung, C.; Fabbri, A. 2003. Validación of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, v. 30, p. 451-472.

Cruden, D.; Varnes, D. 1996. *Landslide Types and Processes*, Transportation Research Board. U.S. National Academy of Sciences, Special Report, 247: 36-75.

Cuchillo, M.; Huayta, M. 2014. Susceptibilidad a movimientos en masa en la quebrada Chinchichaca - Abancay. Tesis para optar el título, Universidad nacional San Antonio Abad del Cusco. Perú.

Del Valle, A.; González, B. 2015. Sedimentación coluvial e inestabilidad de laderas en los Andes de Tierra del Fuego. Revista de la Asociación Geológica Argentina Volumen 74.

Díaz, A. 2014. Informe final de susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa en la microcuenca de Sahuanay – distrito de Tamburco, provincia Abancay, región Apurímac. Centro de Estudios y Prevención de Desastres – PREDES. Lima – Perú.

Doménico, P.; Schwartz, F. 1998. Physical and chemical hydrology, John Wiley & Sons, New York, NY, p. 39.

Escobar, G. 2003 Manual de geología para ingenieros. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>.

Fawcett, T. 2006. An introduction to ROC analysis. Pattern Recognition Letters, 27, 861-874.

Forsythe, W. 1985 Manual de laboratorio Física de suelos. Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura San José – Costa Rica.

Garbechet, J.; Martz, L. 1997. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. Journal of Hydrology, v.193, p 204-213.

Geotechdata.info, 2013. Soil permeability coefficient Geotechdata.info - Updated 07.12.2020

Giménez, M. 2008 Metodología de cálculo del factor topográfico, LS, integrado en los modelos RUSLE y USPED. aplicación al arroyo del lugar, Guadalajara (España). Tesis doctoral para obtener el título de ingeniero forestal. Universidad Politécnica de Madrid.

Gómez, G.; Munive, R.; Mallma, T.; Villavicencio, C. 2014 Evaluación de la tasa de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas. Universidad Continental Apuntes. ciencias. sociales. 2014-04(01).

- Gómez, J. 1998. Peligro Geológico en Tamburco Provincia de Abancay departamento de Apurímac. Instituto Geofísico del Perú IGP. Lima - Perú.
- Graciano, S. 2015. Estimación de Umbrales de Lluvia detonante de deslizamientos en las Microcuencas de los Corregimiento de Villa Restrepo y Juntas de la cuenca Combeima Ibaguè – Tolima. Tesis de Grado de Magister Universidad de Tolima. Colombia.
- Greenlee, D. 1987. Raster and Vector Processing for Scanned Linework. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 53 (10): 1383–1387.
- Gutiérrez, A. 2015. El agua infiltración de lluvia, Agente desestabilizador de taludes en la provincia de Málaga. Modelos Constitutivos. Tesis doctoral Universidad de Granada. España.
- Hammond, C.; Hall, D.; Miller, S.; Swetik, P. 1992. "I Level I Stability Analysis (LISA)" Documentación for Versión 2.0. General Technical Report INT-285 United States Departamento de Agriculture Forest Service.
- Herrera, M.; Iglesias, C.; León, Y.; López, E.; González, O. 2015. Predicción de la resistencia del suelo durante la labranza mediante los modelos de presiones pasivas *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, E-ISSN: 2071-0054, RNPS-2177, Vol. 24, No. 3 (julio-agosto-septiembre, pp. 5-12).
- Hidalgo, C.; Vega, J. 2014. Estimación de la Amenaza por Deslizamientos detonados por sismos y lluvia (valle de Aburrá-Colombia). *Rev. EIA. Esc. Ing. Antioquia* No.22 Envigado julio – diciembre 2014.
- IGP. 2018. Evaluación Geológica, Geodinámica y Geotécnica del Sector Fonavi – Abancay. Lima – Perú.
- INDECI. 1998. Estudio Definitivo para reducir la Vulnerabilidad al deslizamiento en el distrito de Abancay Provincia de Abancay Departamento de Apurímac. Instituto Nacional de Defensa Civil Contrato de estudio N°024-98. Abancay – Perú.
- INDECI. 2007. Mapa de peligros de la ciudad de Abancay. Instituto Nacional de Defensa Civil. Contrato INDECI-PNUD-PER/02/051. Abancay – Perú.

Jenson, S.; Domingue J. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11): 1593–1600.

Jiménez, J. 2005. Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de Rules, Granada. Tesis de doctorado Universidad de Granada. España.

Juárez, B.; Rico, A. 1973. *Mecánica de Suelos*. Tomo I, Ed. Limusa. México

Lan, H.; Zhou, C.; Wang, L.; Zhang, H.; Li, R. 2004. Landslide Hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. *Engineering Geology*, (76): 109 – 128.

Luza, C.; Villacorta, S.; Peña, F.; Jaimes, F. 2014, Caracterización geodinámica de la ciudad de Abancay para la prevención de desastres, Instituto Geológico Mínero y Metalúrgico-INGEMMET, Lima-Perú.

Mabee, S.; Duncan, C. 2013. Slope Stability Map of Massachusetts. Massachusetts Emergency Management Agency, the Federal Emergency Management Agency and the Massachusetts Department of Conservation and Recreation.

Macari, E. 2014 Evaluación de riesgos de derrumbes causados por lluvias torrenciales. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Louisiana State University. *Rev. Int. De desastres naturales, accidentes e infraestructura civil* Pág. 117-126.

Martz, L.; Garbechet, J. 1992. Numerical definition of drainage networks and subcatchment areas from digital elevation models. *Computer and Geosciences* v 18(6), p 747-761

Marqués, M.; Silva, R.; Fraga, J.; Coelho, N.; Sato, A. 2011. The influence of vegetation cover and soil physical properties on deflagration of shallow landslides - Nova Friburgo, RJ / Brazil.

Moral, L. 2014. Cálculo de la susceptibilidad de deslizamiento del terreno en Lorca mediante un Sistema de Información Geográfica. Tesis de fin de Grado Universidad Politécnica de Madrid. España.

Morrissey, M.; Wieczorek, G.; Morgan, B. 2001. A Comparative Analysis of Hazard Models for Predicting Debris Flows in Madison County, Virginia. USGS (ed.), Washington, D.C., USA, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.

Oliva, A. 1999. Análisis de la estabilidad y seguridad de taludes. Tesis Doctoral. Departamento de Explotación y Prospección de minas, Universidad de Oviedo, España. 228p.

O'Loughlin, C.; Ziemer, R. 1982. The Importance of Root Strength and Deterioration Rates Upon Edaphic Stability in Steepland Forests.

ONERN. 1976. mapa Ecológico del Perú Guía Explicativa. Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales. Repositorio ANA.

Pack, R.; Tarboton, D.; Goodwin, C. 2005. Terrain stability mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.1.00.

Pack, R.; Tarboton, D.; Goodwin, C.; Prasad, A. 2005 "SINMAP User's manual, A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping", SINMAP User's Manual, Utah State University, 2005.

Pack, R.; Tarboton, D.; Goodwin, C.; Prasad, A. 2005. Stability index approach to terrain stability hazard mapping, SINMAP - User's Manual. Produced in VBA for ArcGIS and C++ under funding by the USDA Forest Service 68 p., Logan, Utah.

Park, N.; Lee, S. 2013 Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event D. W. Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Republic of Korea.

Peña, C. 2014. Monitoreo y Modelo Sistémico a deslizamiento Superficial de Suelos para Manizales. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Colombia. Manizales Colombia.

Peña, C. 2017. Datos de precipitación con el modelo HSB para pronóstico de deslizamiento de suelos superficiales. Boletín de Geología, 39(2): 49-56.

Ramírez, J.; Vélez, J. 2002 Estrategias para la estimación automática de direcciones de drenaje a partir de modelos digitales de terreno. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente,

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Revista Avances en recursos hidráulicos, vol. 9.

Sanders, L. 1998 A manual of Field Hydrogeology. Prentice-Hall, 381 pp.

Sanhueza, C.; Villavicencio, G. 2012 Influencia de la cohesión aparente generada por raíces sobre la estabilidad de un talud natural en las dunas de Reñaca, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.

SENAMHI. 1998. Mapa de Clasificación Climática del Perú Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.

SENAMHI. 2012. Boletín Meteorológica Regional Febrero 2012. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Dirección Regional del Cusco Boletín N°02.

Swets. 1996 Signal detection theory and ROC analysis in psychology and diagnostics: collected papers;

Theyse, H. 2002. Stiffness, strength, and performance of unbound aggregate material: Application of South African HVS and laboratory results to California Flexible Pavements. University of California, Pavement Research Center 76 p., Davis, California.

Tarboton, D. 1997. A new method for the determination of Flow dirección and upslope áreas in grid digital elevation model. Water Resources Research v.33(2), p 309-319

Terzaghi, K.; Peck, R. 1948. Soil Mechanics in Engineering Practice, 1st Edition, John Wiley and Sons, New York.

Thiebes, B.; Bell, R.; Glade, T.; Wang, J.; Bai, S. 2016. Application of SINMAP and analysis of model sensitivity – case studies from Germany and China. Rev. Roum. Géogr./Rom. Journ. Geogr., v. 60, n. 1, p. 3–25.

Thornthwaite, W. 1943. Problems in the classification of climates, the geographical review, vol. 33, N° 2, 1943, págs. 233-265.

Thornthwaite, W. 1933. The climates of the earth - the geographical review, val. 23, 1933, págs. 433-440.

Villacorta, S.; Valderrama, P. 2012 Evaluación del flujo de detritos de Tamburco, Provincia de Abancay, Región Apurímac. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico INGEMMET Informe Técnico N°A6595 p. 29.

Zaichik, B.; Vanes, H.; Sullivan, P. 2003 Modeling slope stability in Honduras: parameter sensitivity and scale of aggregation. *Soil ci Soc Am J.*, v. 67, p. 268 – 278.

Zaichik, B.; Vanes, H. 2003 Applying a GIS slope - stability model to site-specific landslide prevention in Honduras. *J. Soil Water Conservation*, v. 58, N° 1, p. 45-53.

ANEXOS

A.1 Inventario de deslizamientos

N° Deslizamiento	UBICACIÓN UTM		VERIFICACION
	NORTE	ESTE	
1	8492362.60	726381.76	Vp
2	8493481.41	726540.33	Fp
3	8493675.22	726769.38	Vp
4	8493287.60	727500.57	Fp
5	8492239.27	728143.66	Fn
6	8491825.22	727430.09	Vp
7	8491772.37	727386.05	Fp
8	8491807.60	728020.33	Fn
9	8491957.37	728134.85	Fn
10	8494564.98	728628.19	Vp
11	8495058.31	729623.66	Vp
12	8495763.07	729288.90	Vp
13	8495763.07	729385.80	Vp
14	8497207.83	731491.28	Vp
15	8497384.02	731817.23	Vp
16	8497375.21	732099.13	Vp
17	8497146.17	732706.99	Vp
18	8497022.83	731676.28	Vp
19	8496829.02	731958.18	Fn
20	8497190.21	733887.46	Vp
21	8496185.93	732460.32	vp
22	8495489.98	732953.65	Vp
23	8495234.50	732777.46	Vp
24	8495419.50	733032.94	Vp
25	8495269.74	733024.13	Vp
26	8495119.98	733032.94	Vp
27	8495058.31	732742.23	Fp
28	8494970.22	732768.65	Vp
29	8494899.74	732803.89	Vp
30	8494934.98	732953.65	Vp
31	8494723.55	732636.51	Fp
32	8494547.36	732715.80	Fn
33	8494327.12	732795.08	Vp
34	8494133.31	732610.08	Vp
35	8493772.12	732574.85	Vp
36	8493604.74	732407.46	Vp
37	8493305.22	732134.37	Vp
38	8492988.08	731781.99	Fp
39	8492512.36	731517.70	Vp
40	8492538.79	731473.66	Vp
41	8492653.32	730786.52	Vp
42	8492644.51	730689.61	Vp
43	8492468.32	730751.28	Fp
44	8492433.08	730663.18	Fn
45	8492274.51	730231.52	Fp
46	8491922.13	730099.37	Fn
47	8492010.22	730099.37	Fn
48	8492027.84	730152.23	Fp
49	8492133.56	730945.09	Vp
50	8492309.75	731315.09	Vp
51	8492204.03	731297.47	Vp
52	8491243.80	732169.61	Vp
53	8492265.70	731367.94	Vp
54	8490503.80	731949.37	Vp
55	8490336.42	732151.99	Vp
56	8489056.83	728410.15	Fp
57	8488924.69	727881.58	Fp
58	8488946.72	727342.00	Vp

A.2 Relación de Mapas temáticos

M-01 Mapa Ubicación

M-02 Mapa Satelital

M-03 Subcuencas e Inter cuencas

M-04 Red de Drenaje

M-05 Mapa Geomorfológico

M-06 Uso de suelo

M-07 Mapa Geológico

M-08 Mapa Hidrogeológico

M-09 Mapa Climatológico

M-10 Mapa de Isoyetas

M-11 Mapa de Isotermas

M-12 Mapa de Modelo Digital de Elevación

M-13 Mapa de Inventario de Derrumbes

M-14 Mapa de Regiones de Calibración

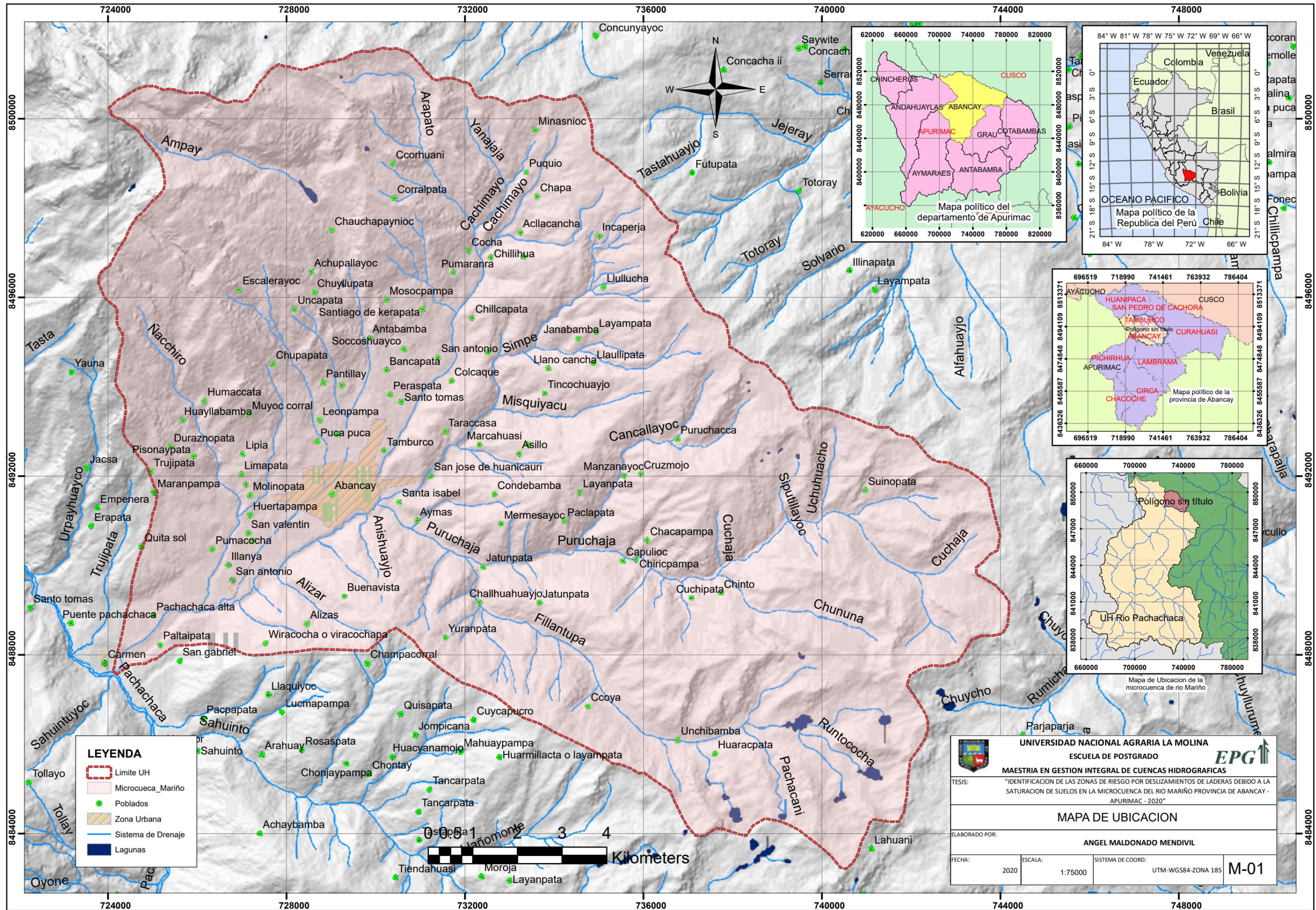
M-15 Mapa de Acumulación de flujo

M-16 Mapa de Pendientes

M-17 Mapa de Índice de Estabilidad

M-18 Mapa de Saturación del Suelo

M-19 Mapa de Susceptibilidad



LEYENDA

- Limite UH
- Microcuenca_Mariño
- Poblados
- Zona Urbana
- Sistema de Drenaje
- Lagunas



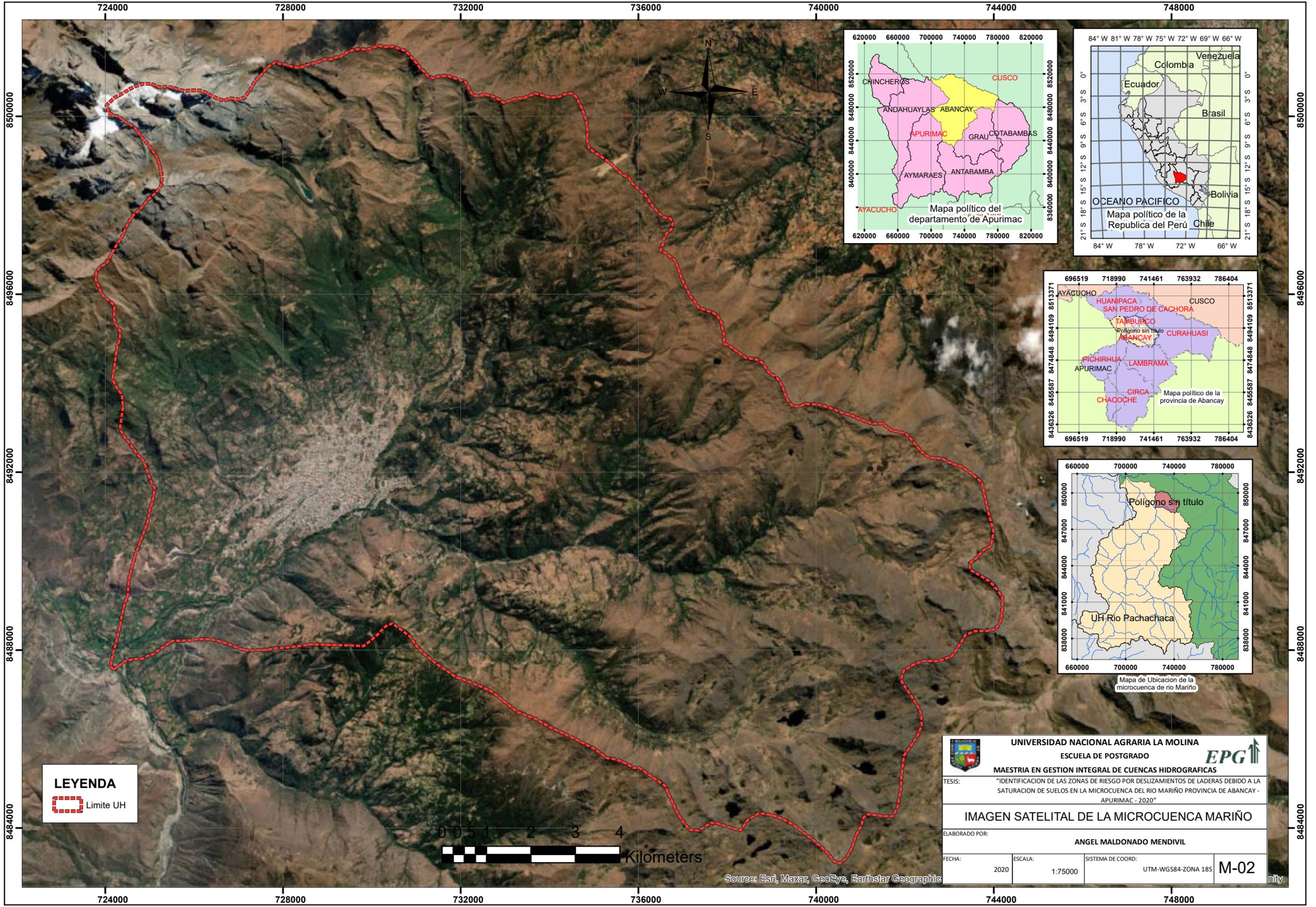
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

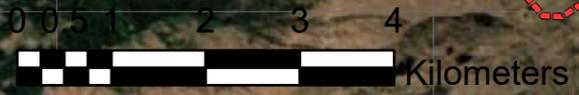
MAPA DE UBICACION

ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-01**

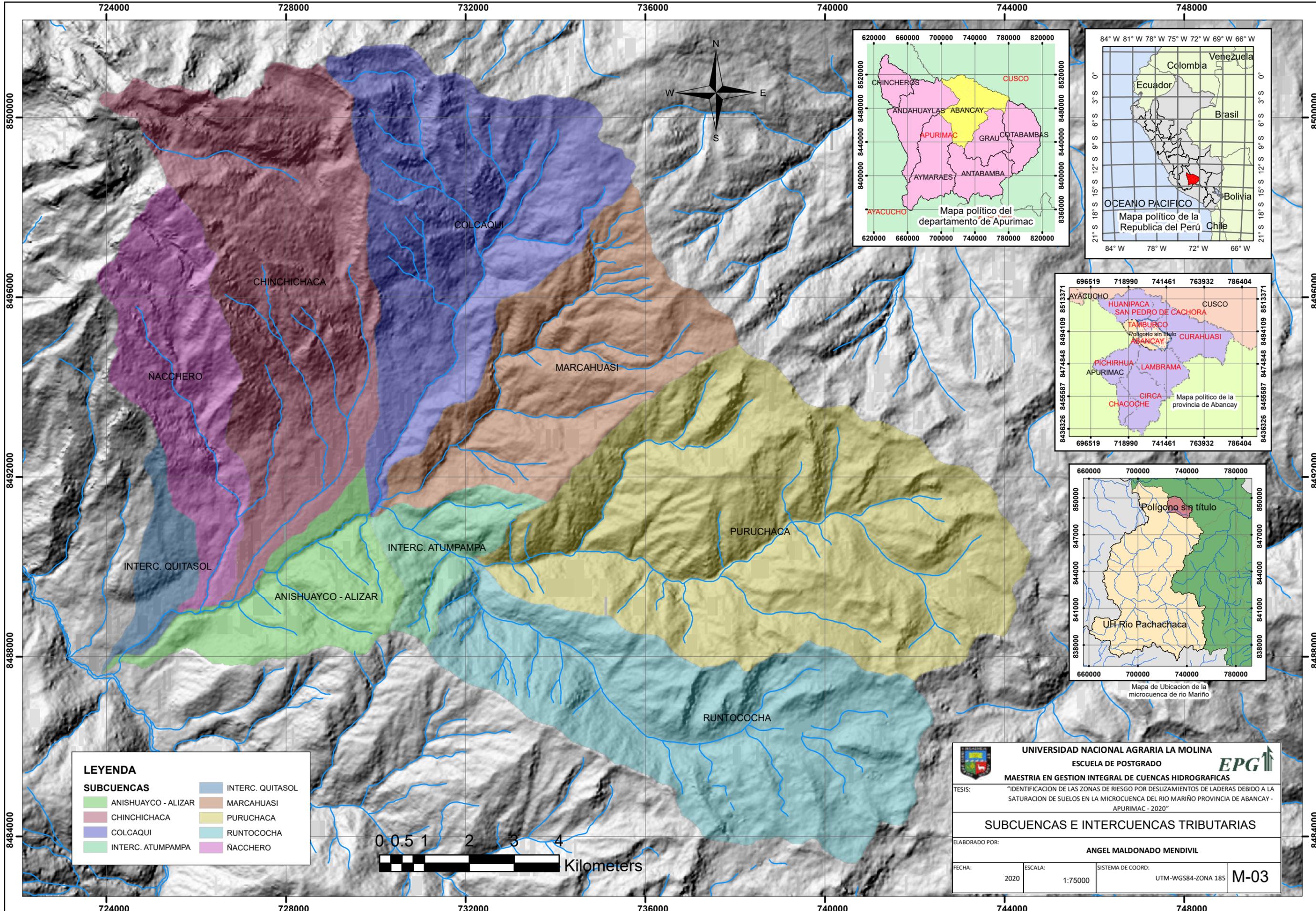


LEYENDA
 Limite UH



Source: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographic

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA ESCUELA DE POSTGRADO EPG			
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS			
TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"			
IMAGEN SATELITAL DE LA MICROCUENCA MARIÑO			
ELABORADO POR: ANGEL MALDONADO MENDIVIL			
FECHA:	ESCALA:	SISTEMA DE COORD:	M-02
2020	1:75000	UTM-WGS84-ZONA 18S	

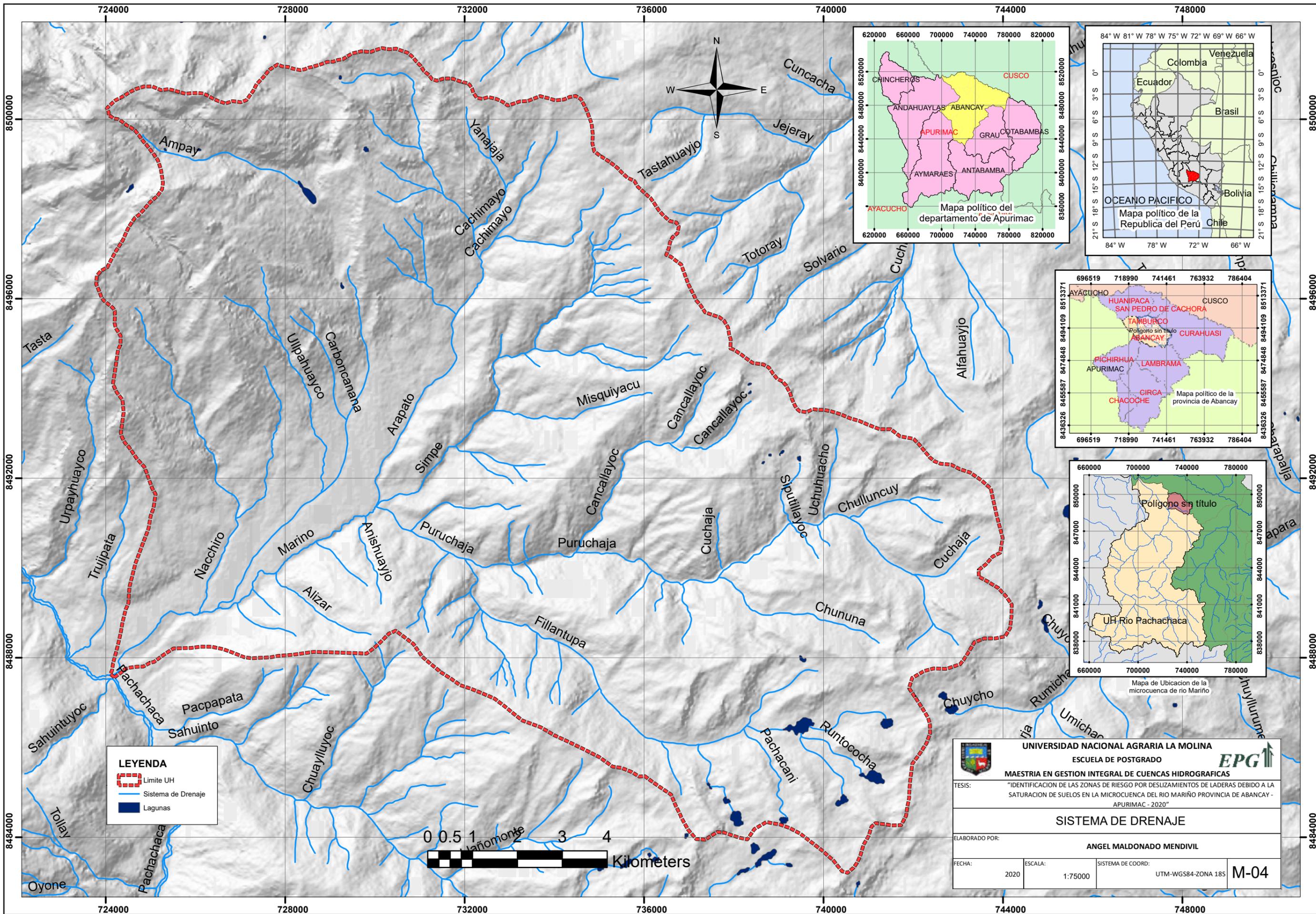


LEYENDA

SUBCUENCAS	
	ANISHUAYCO - ALIZAR
	CHINCHICHACA
	COLCAQUI
	INTERC. ATUMPAMPA
	INTERC. QUITASOL
	MARCAHUASI
	PURUCHACA
	RUNTOCOCHA
	ÑACCHERO

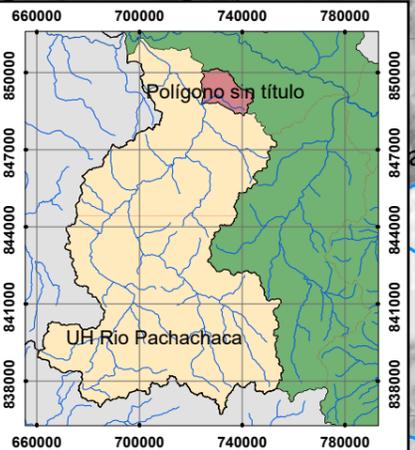
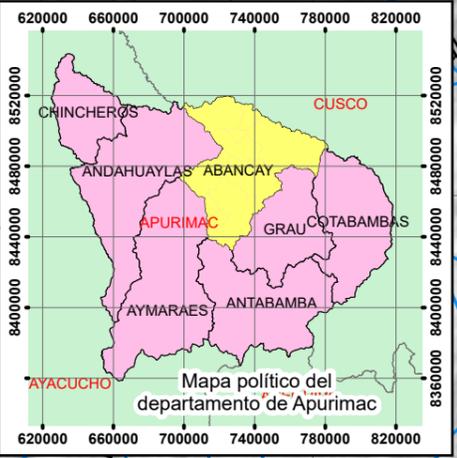



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 ESCUELA DE POSTGRADO 
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS
 TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"
SUBCUENCAS E INTERCUENCAS TRIBUTARIAS
 ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**
 FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-03**



LEYENDA

- Limite UH
- Sistema de Drenaje
- Lagunas



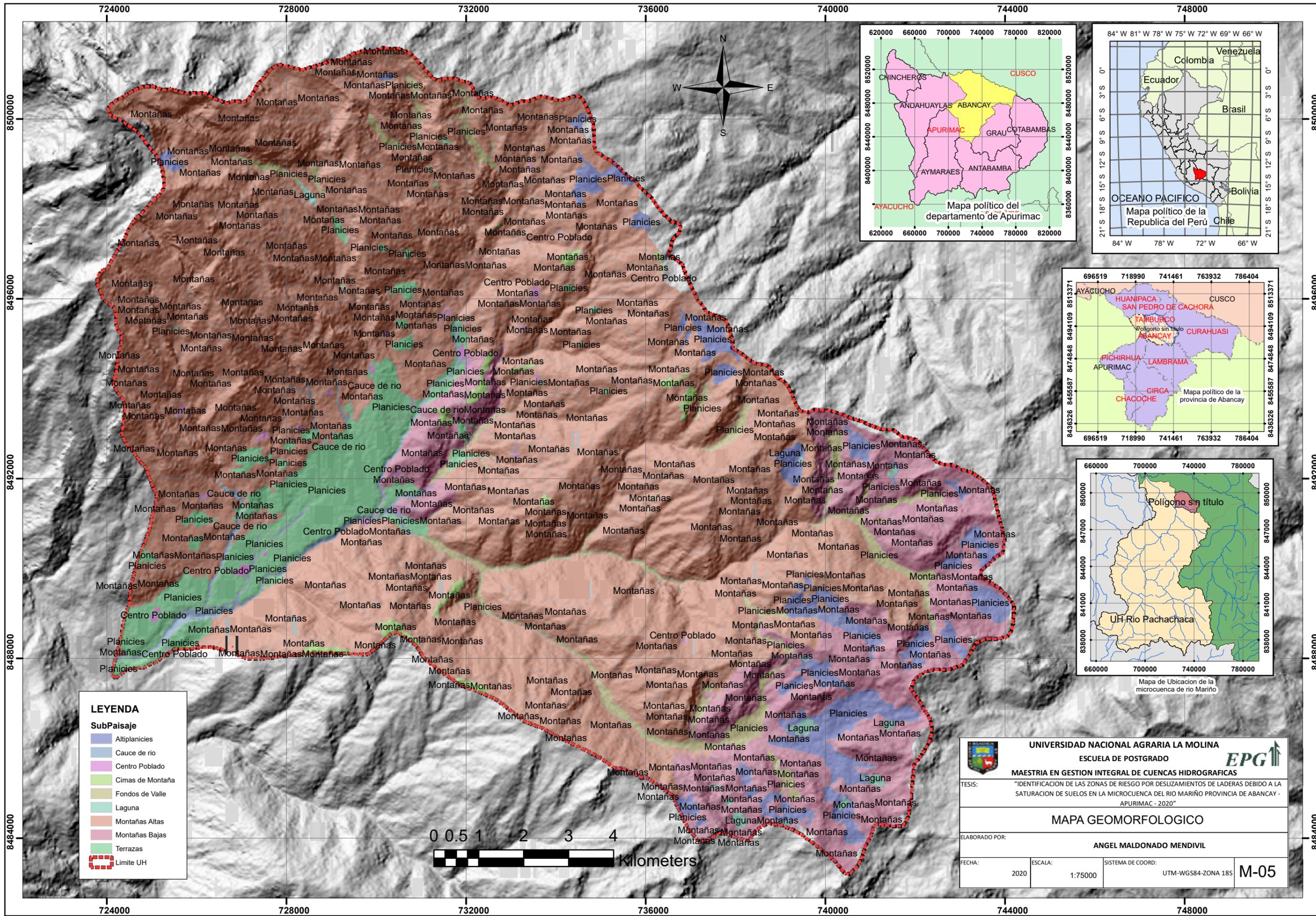
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

SISTEMA DE DRENAJE

ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

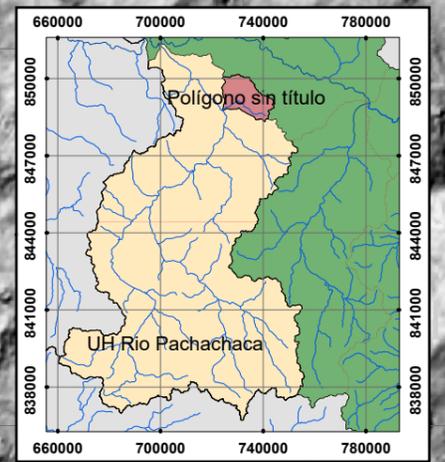
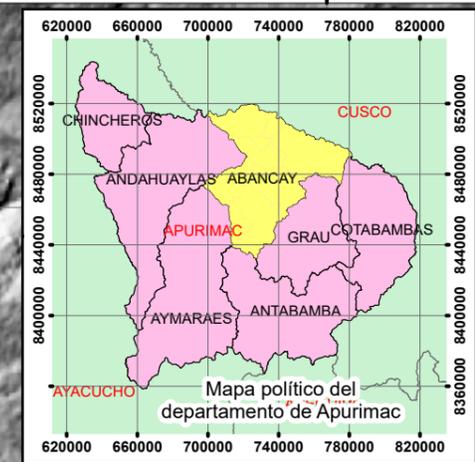
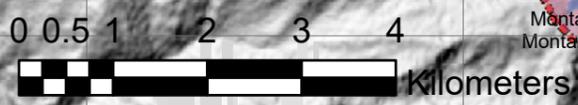
FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-04**



LEYENDA

SubPaisaje

- Altiplanicies
- Cauce de río
- Centro Poblado
- Cimas de Montaña
- Fondos de Valle
- Laguna
- Montañas Altas
- Montañas Bajas
- Terrazas
- Limite UH



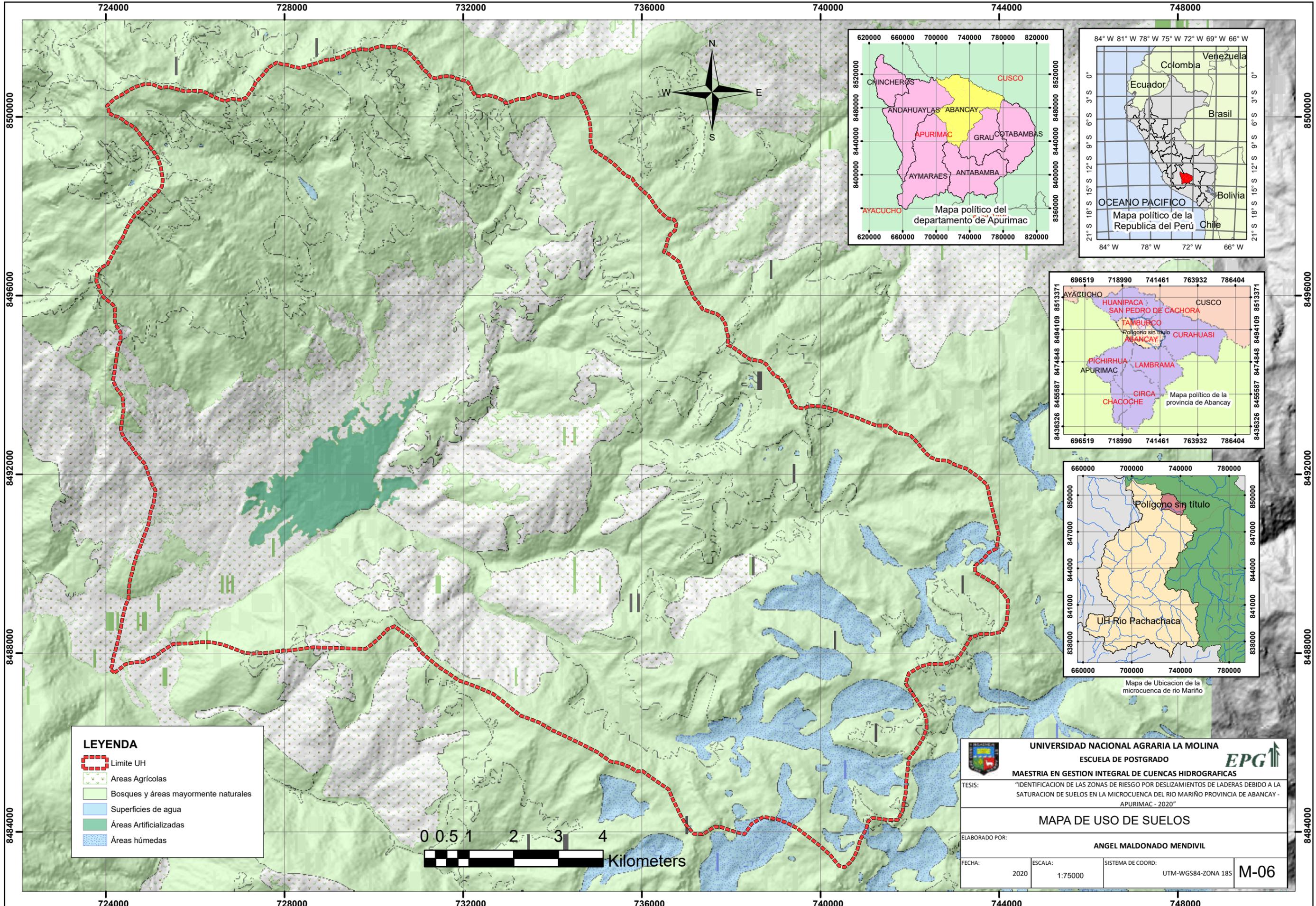
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

MAPA GEOMORFOLOGICO

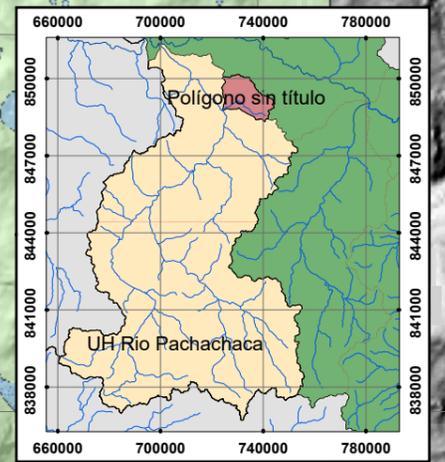
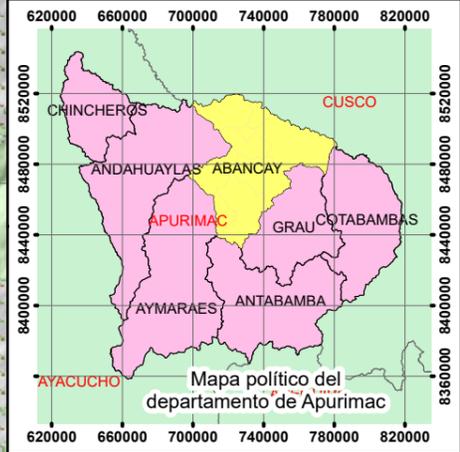
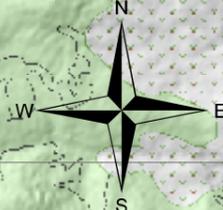
ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-05**



LEYENDA

- Limite UH
- Areas Agrícolas
- Bosques y áreas mayormente naturales
- Superficies de agua
- Áreas Artificializadas
- Áreas húmedas



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

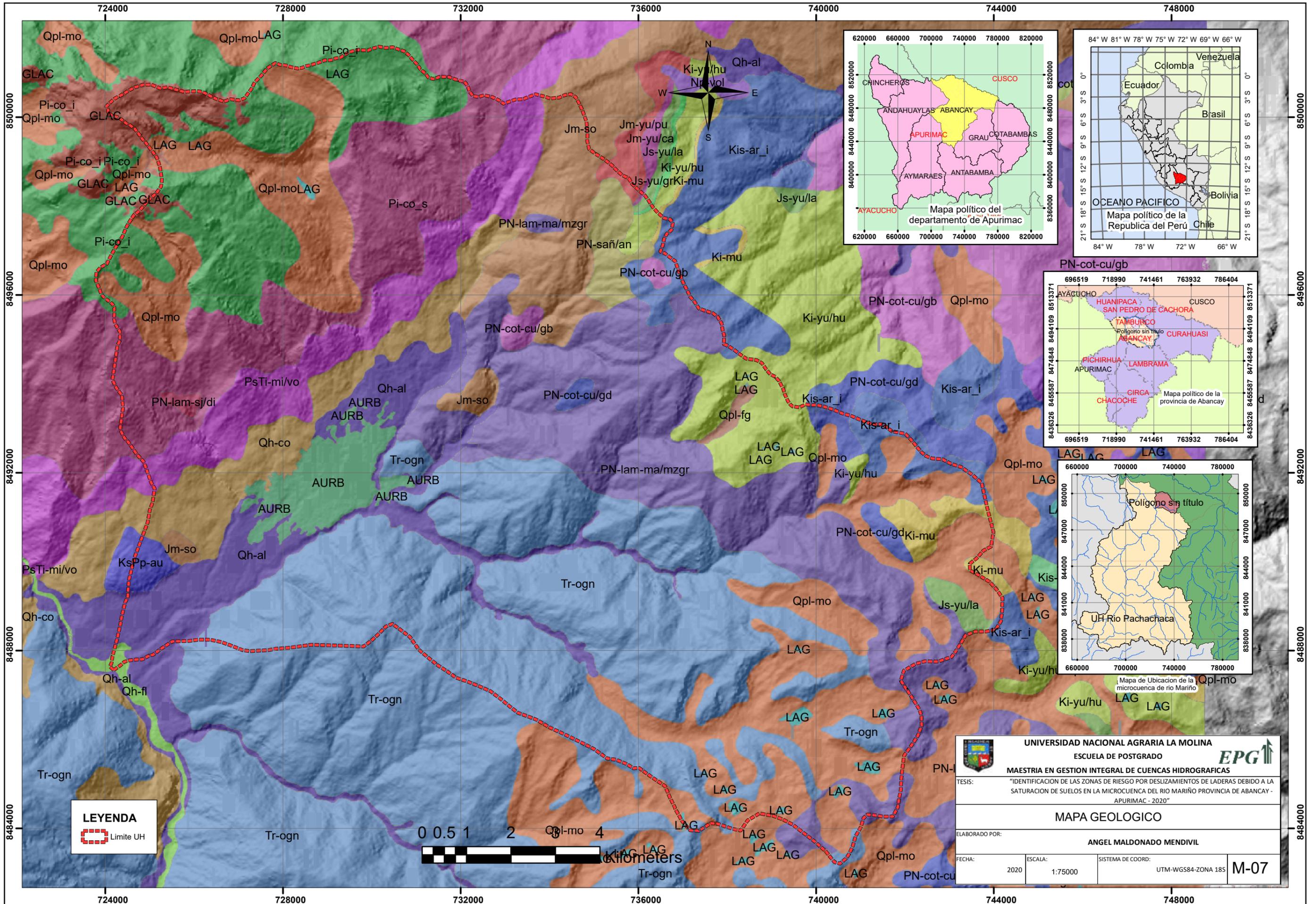
EPG

TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

MAPA DE USO DE SUELOS

ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

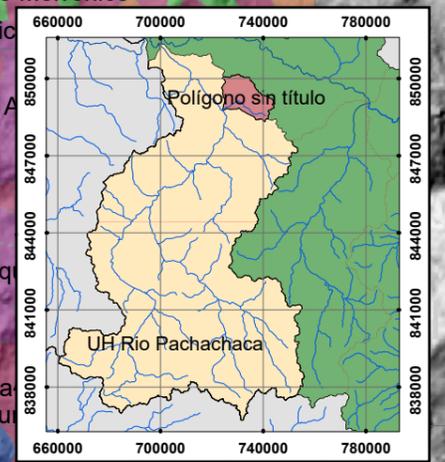
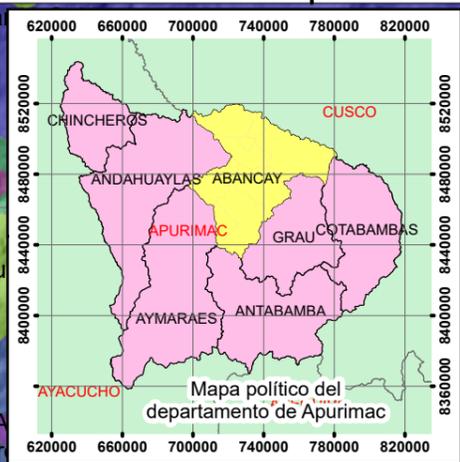
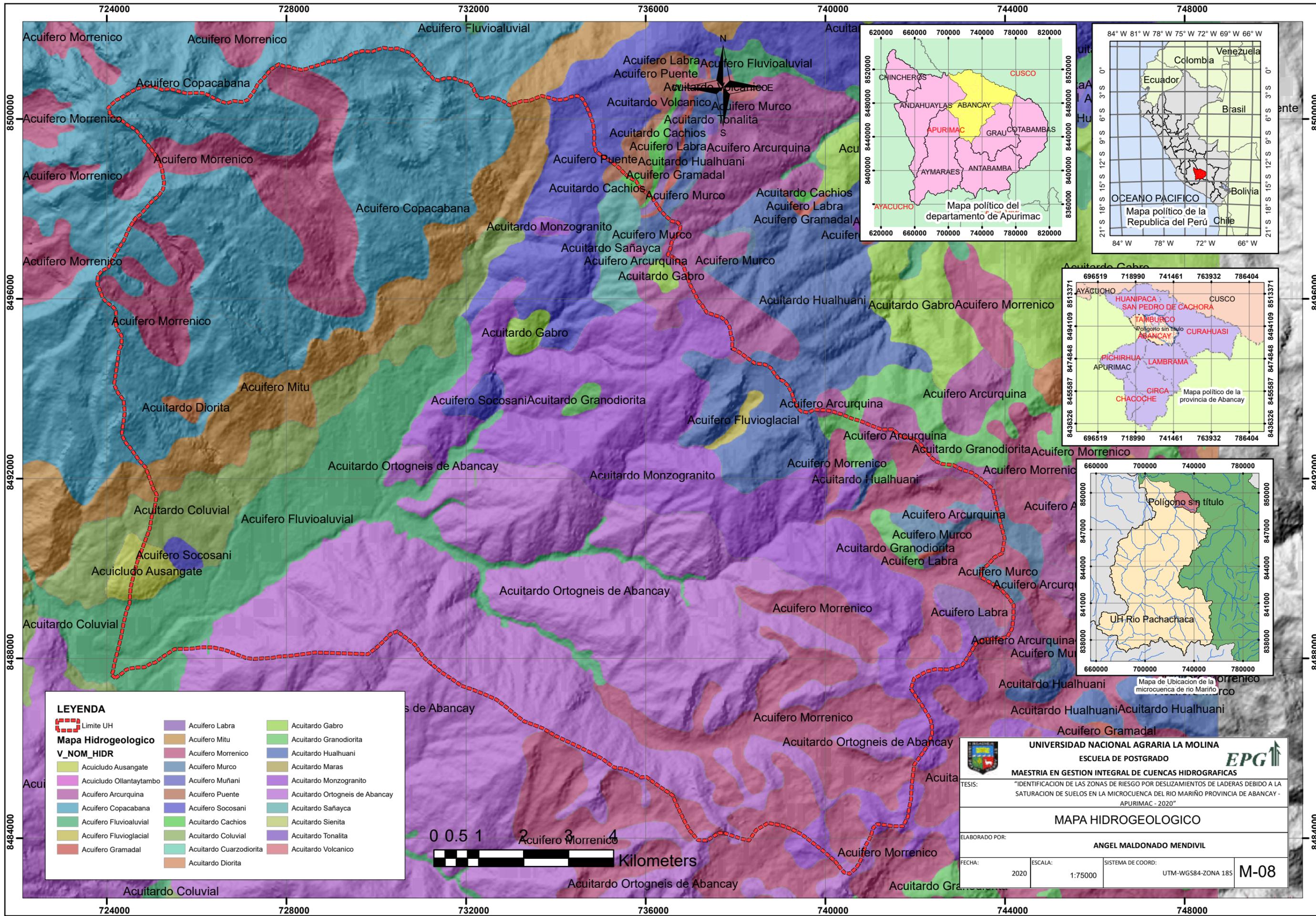
FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-06**



LEYENDA
 Limite UH



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA ESCUELA DE POSTGRADO EPG			
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS			
TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"			
MAPA GEOLOGICO			
ELABORADO POR: ANGEL MALDONADO MENDIVIL			
FECHA:	ESCALA:	SISTEMA DE COORD:	
2020	1:75000	UTM-WGS84-ZONA 18S	M-07



LEYENDA

Limite UH

Mapa Hidrogeológico V_NOM_HIDR

Acuícludo Ausangate	Acuífero Labra	Acuitardo Gabro
Acuícludo Ollantaytambo	Acuífero Mitu	Acuitardo Granodiorita
Acuífero Arcurquina	Acuífero Morrenico	Acuitardo Hualhuani
Acuífero Copacabana	Acuífero Murco	Acuitardo Maras
Acuífero Fluvioaluvial	Acuífero Muñani	Acuitardo Monzograno
Acuífero Fluvioglacial	Acuífero Puente	Acuitardo Ortogneis de Abancay
Acuífero Gramadal	Acuífero Socosani	Acuitardo Sañayca
	Acuitardo Cachios	Acuitardo Tonalita
	Acuitardo Coluvial	Acuitardo Volcanico
	Acuitardo Diorita	



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSTGRADO
EPG

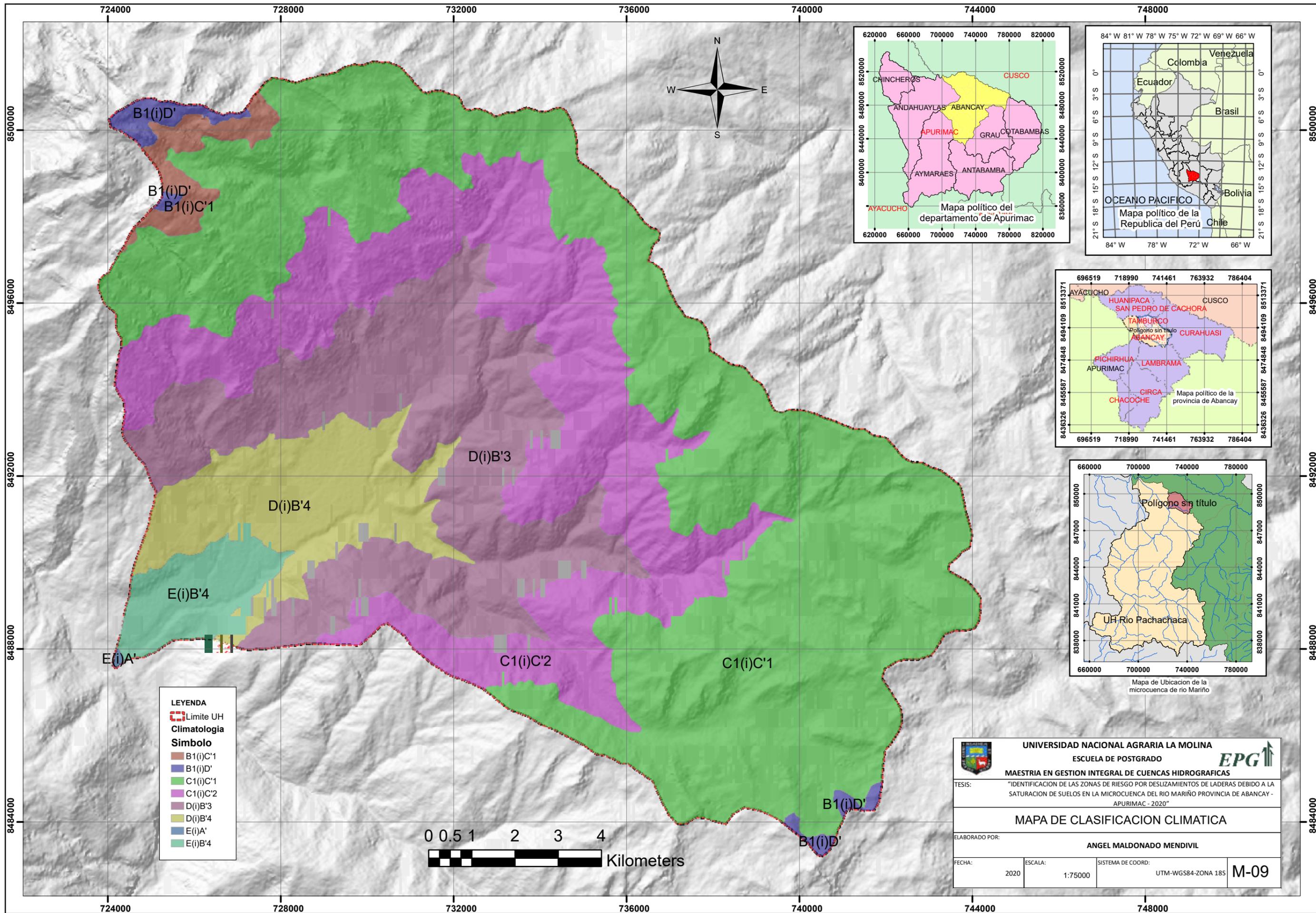
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

MAPA HIDROGEOLOGICO

ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-08**



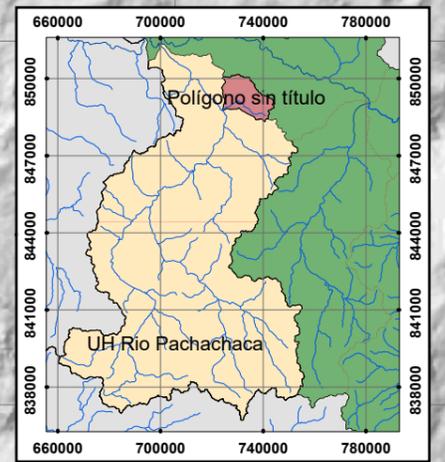
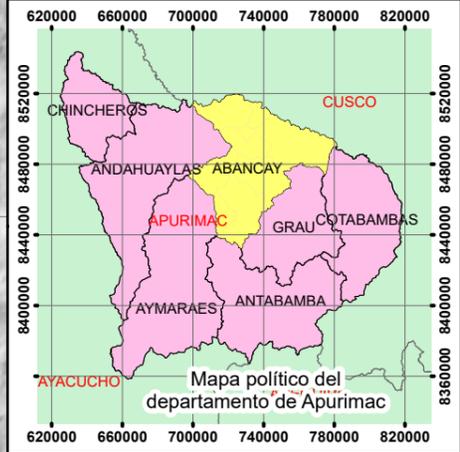
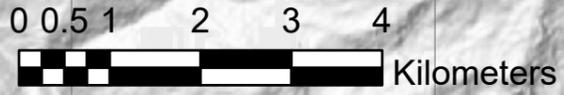
LEYENDA

Limite UH

Climatología

Simbolo

- B1(i)C'1
- B1(i)D'
- C1(i)C'1
- C1(i)C'2
- D(i)B'3
- D(i)B'4
- E(i)A'
- E(i)B'4



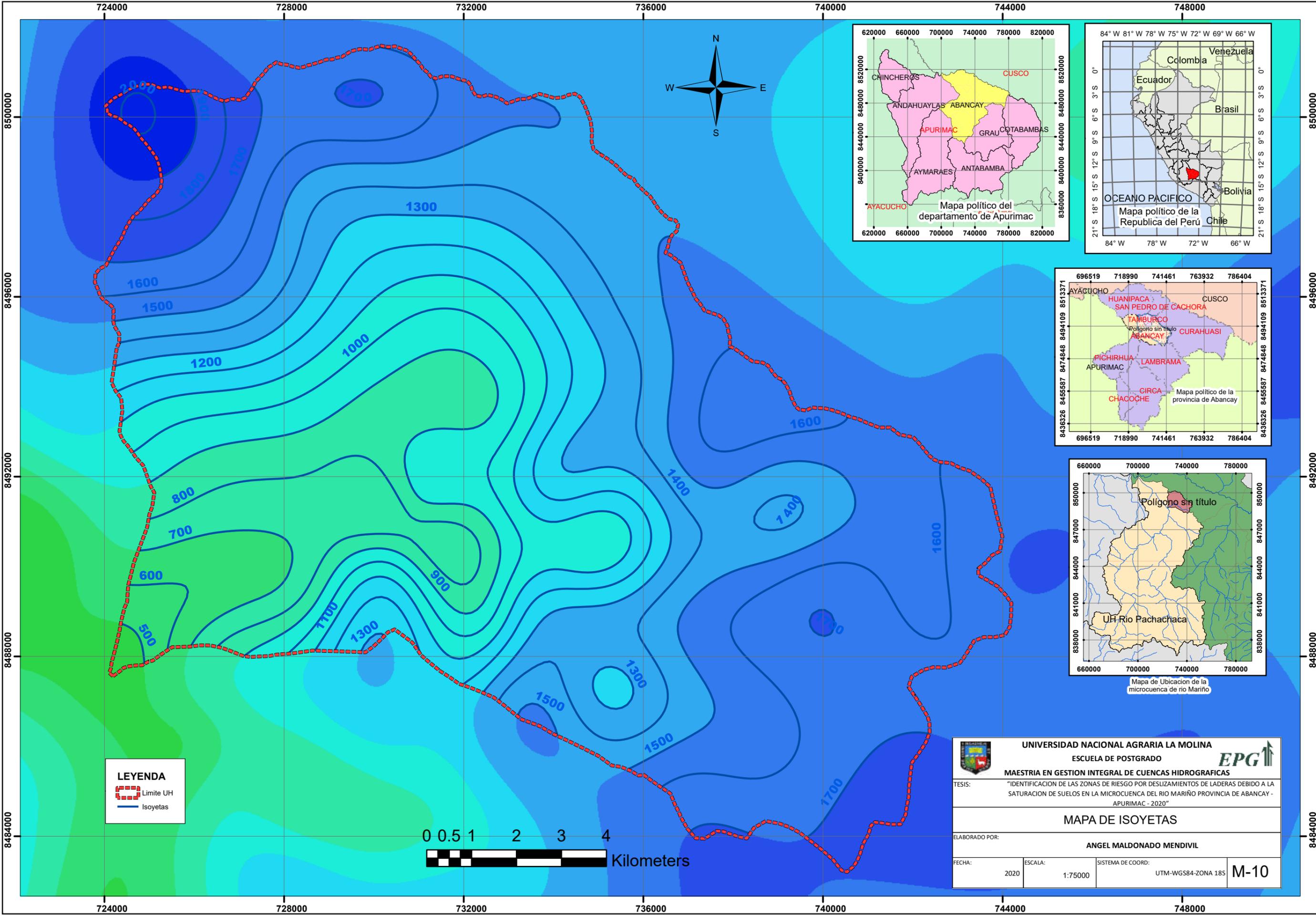
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

MAPA DE CLASIFICACION CLIMATICA

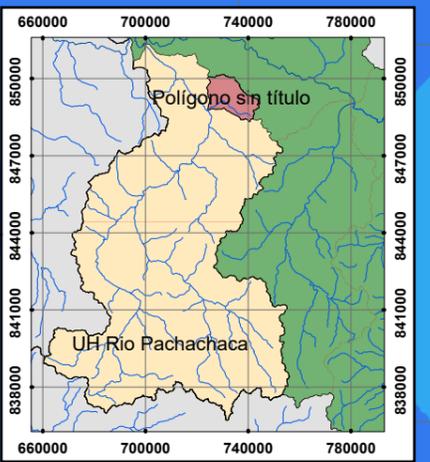
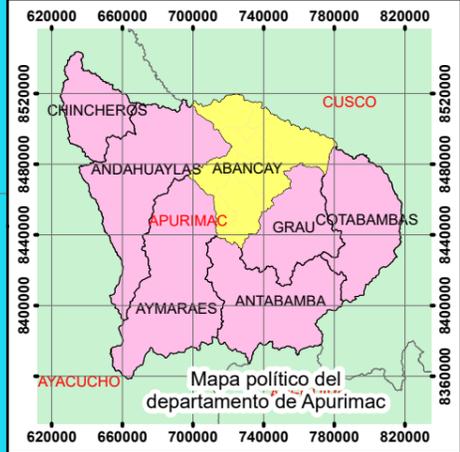
ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-09**



LEYENDA

- Limite UH
- Isoyetas



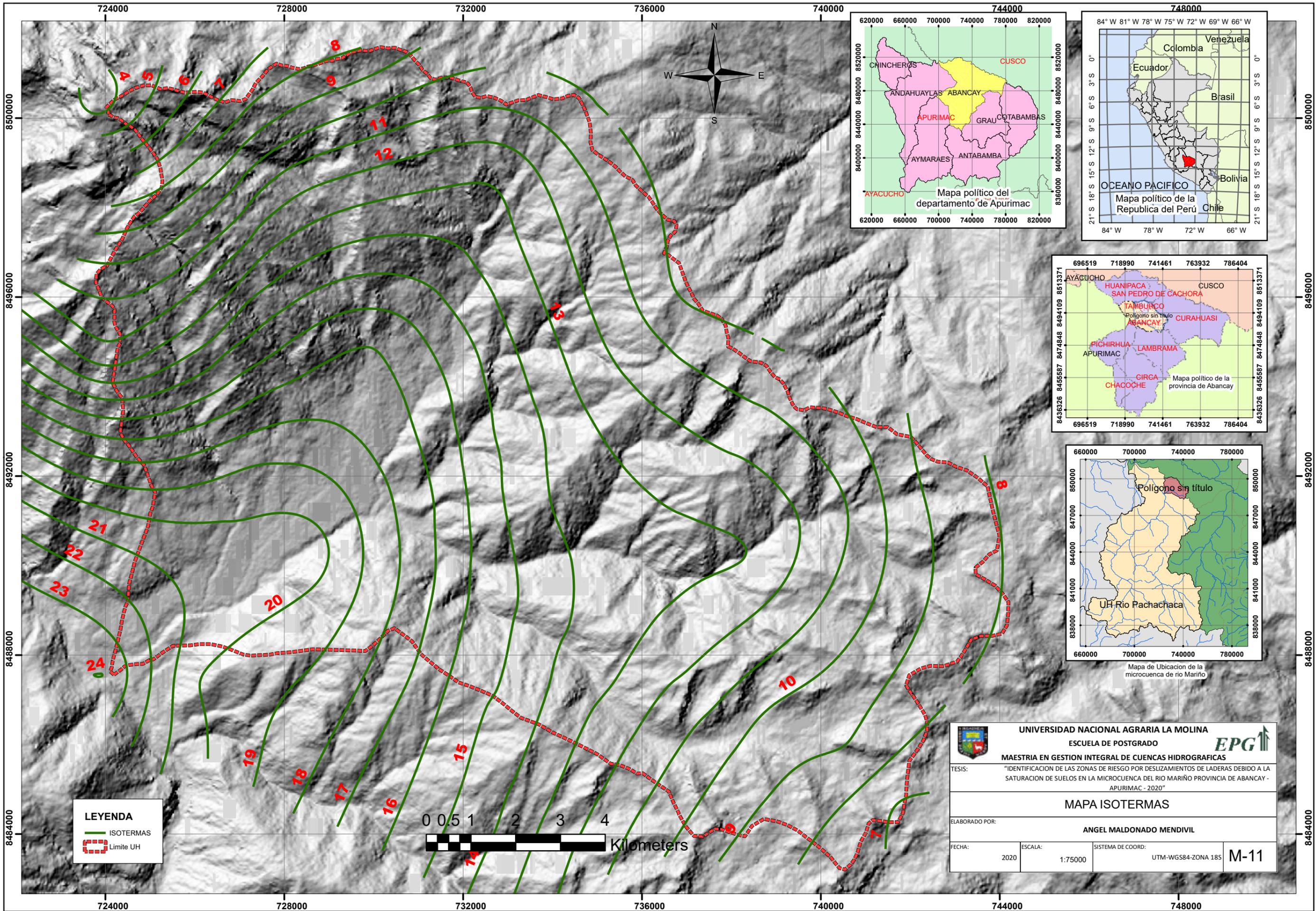
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

MAPA DE ISOYETAS

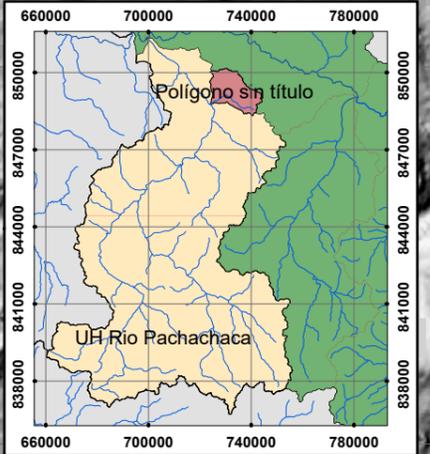
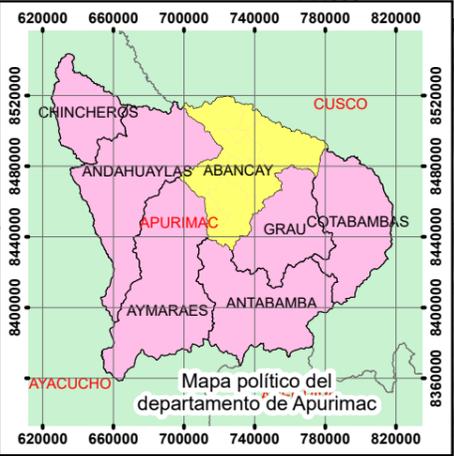
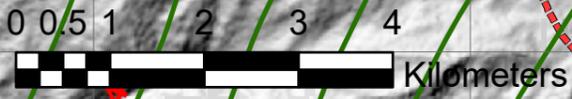
ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-10**



LEYENDA

- ISOTERMAS
- Limite UH



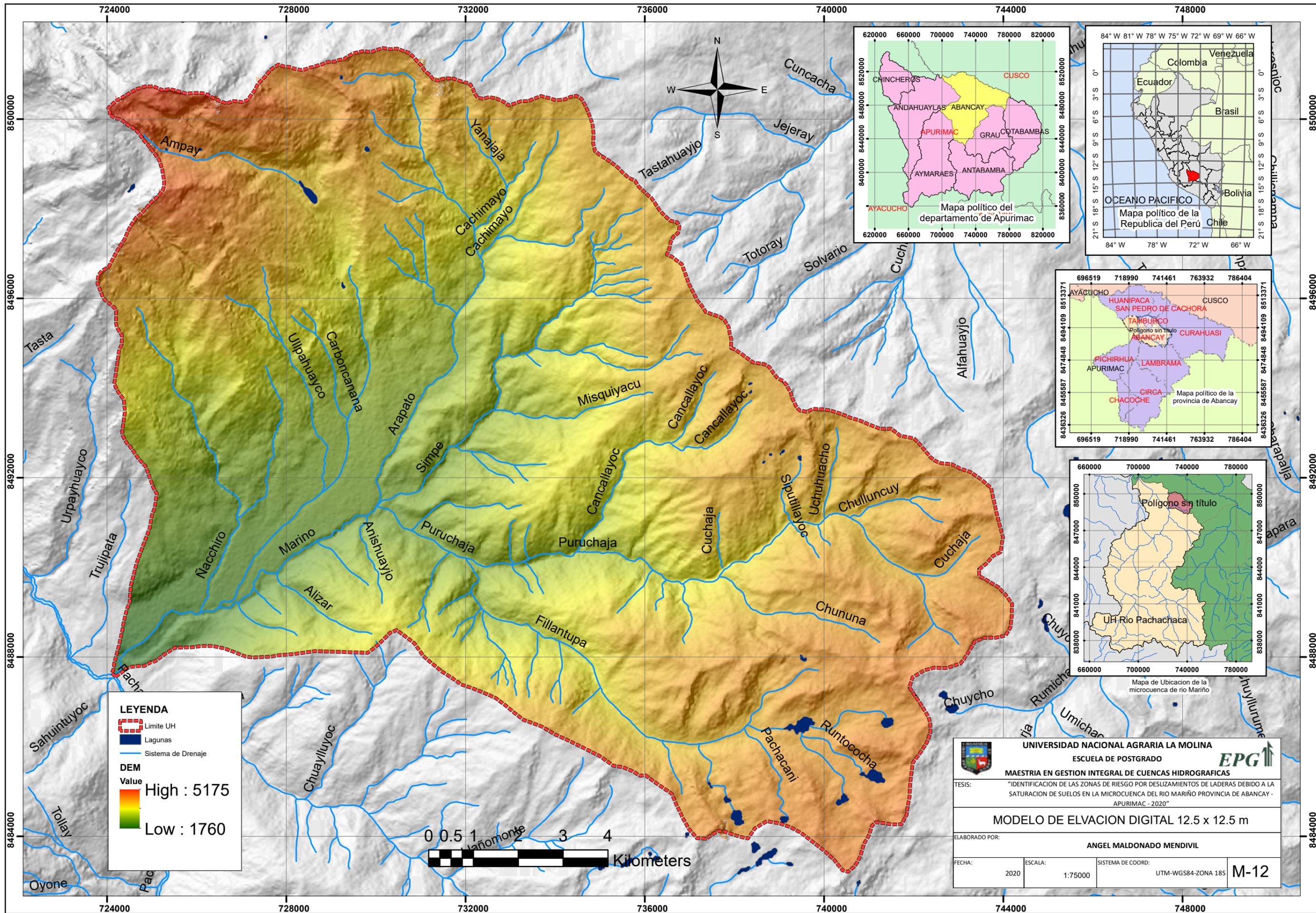
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

MAPA ISOTERMAS

ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-11**



LEYENDA

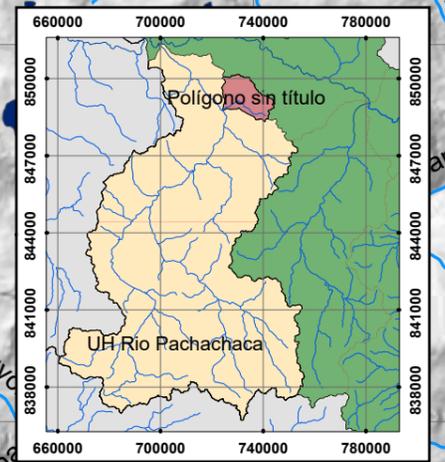
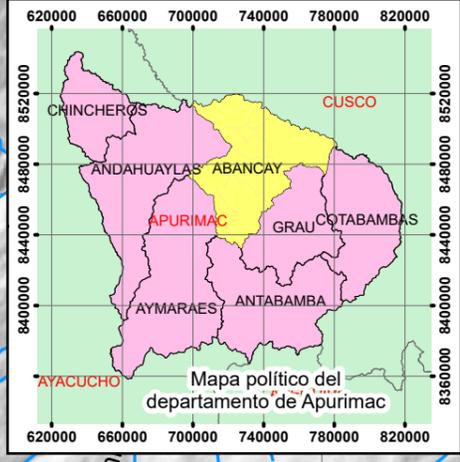
- Limite UH
- Lagunas
- Sistema de Drenaje

DEM

Value

High : 5175

Low : 1760



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

ESCUELA DE POSTGRADO

EPG

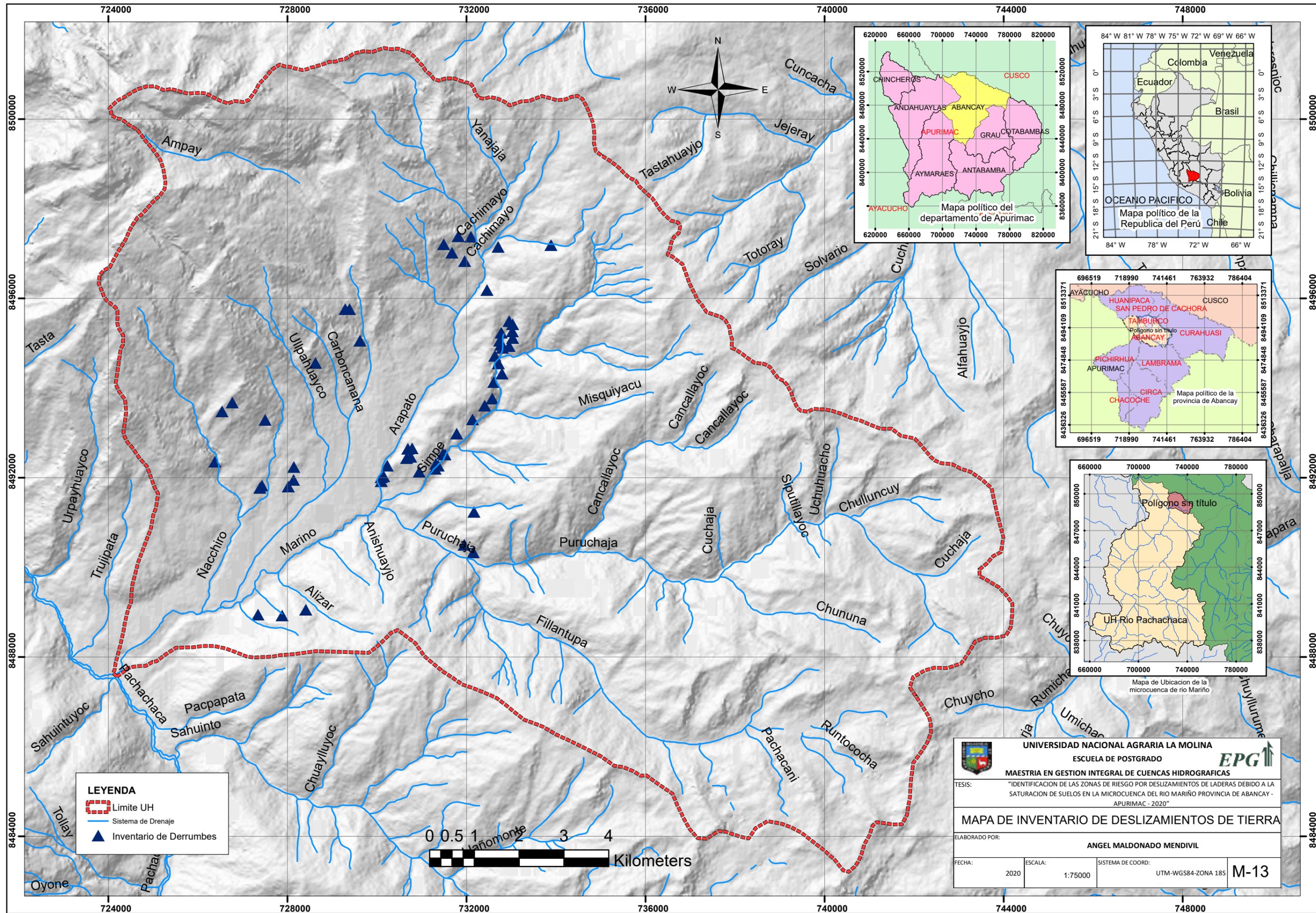
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

MODELO DE ELVACION DIGITAL 12.5 x 12.5 m

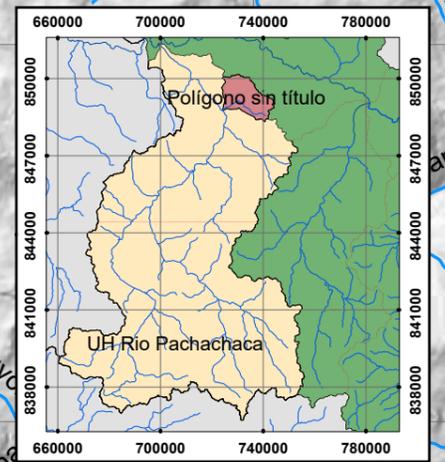
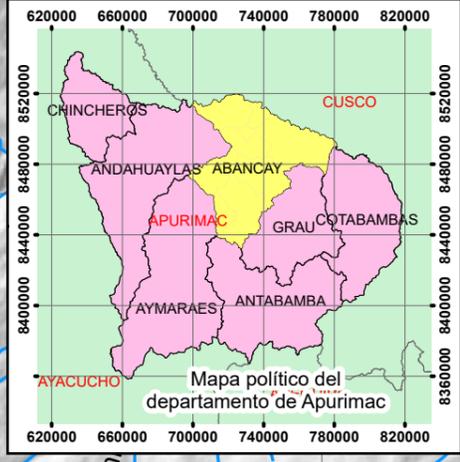
ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-12**



LEYENDA

- Limite UH
- Sistema de Drenaje
- Inventario de Derrumbes



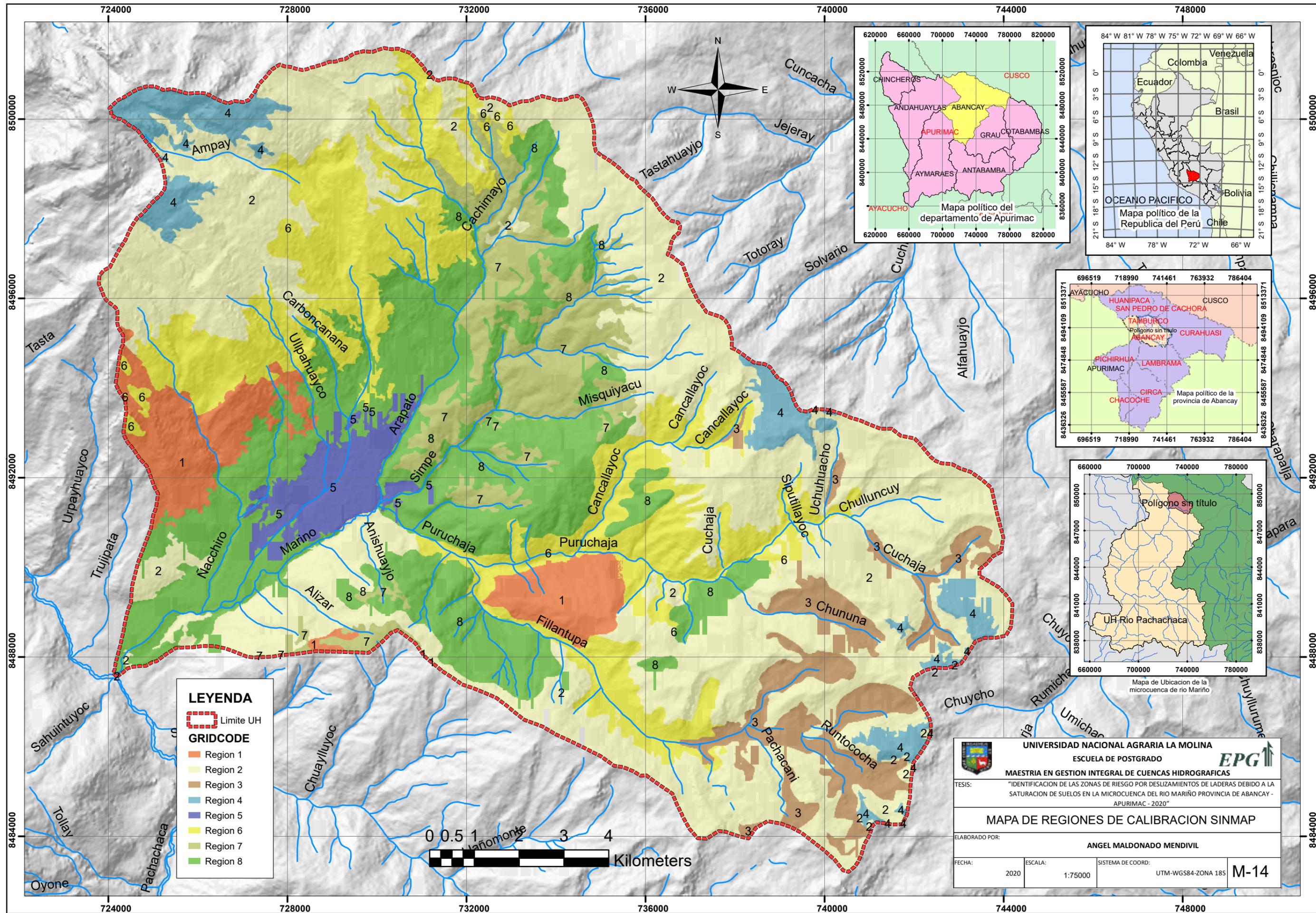
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

MAPA DE INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA

ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-13**



LEYENDA

Limite UH

GRIDCODE

- Region 1
- Region 2
- Region 3
- Region 4
- Region 5
- Region 6
- Region 7
- Region 8

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSTGRADO
EPG

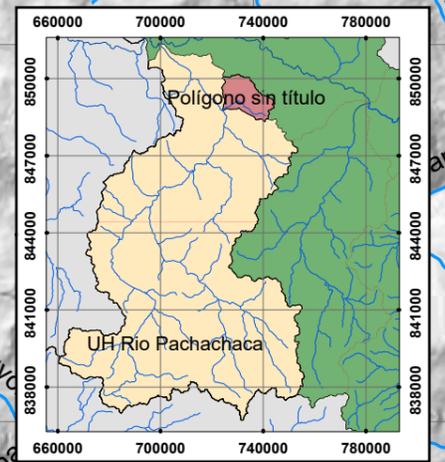
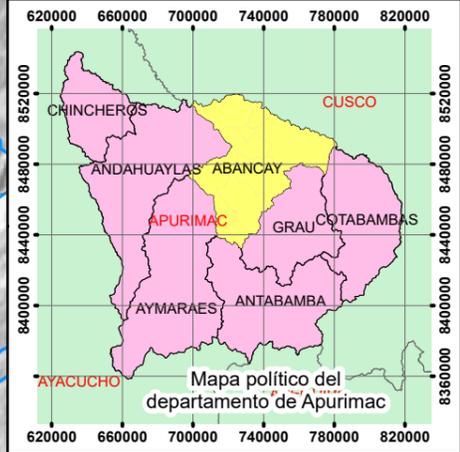
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

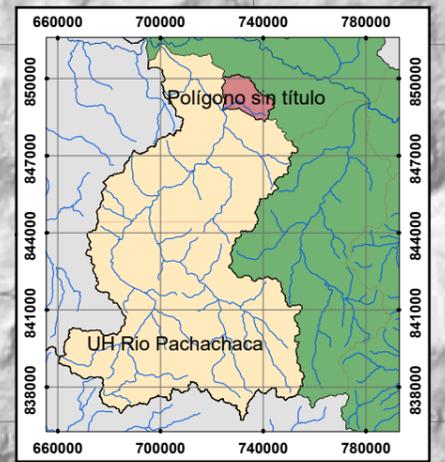
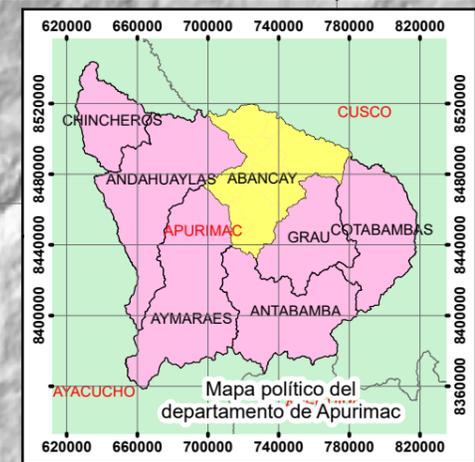
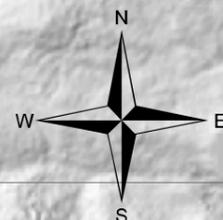
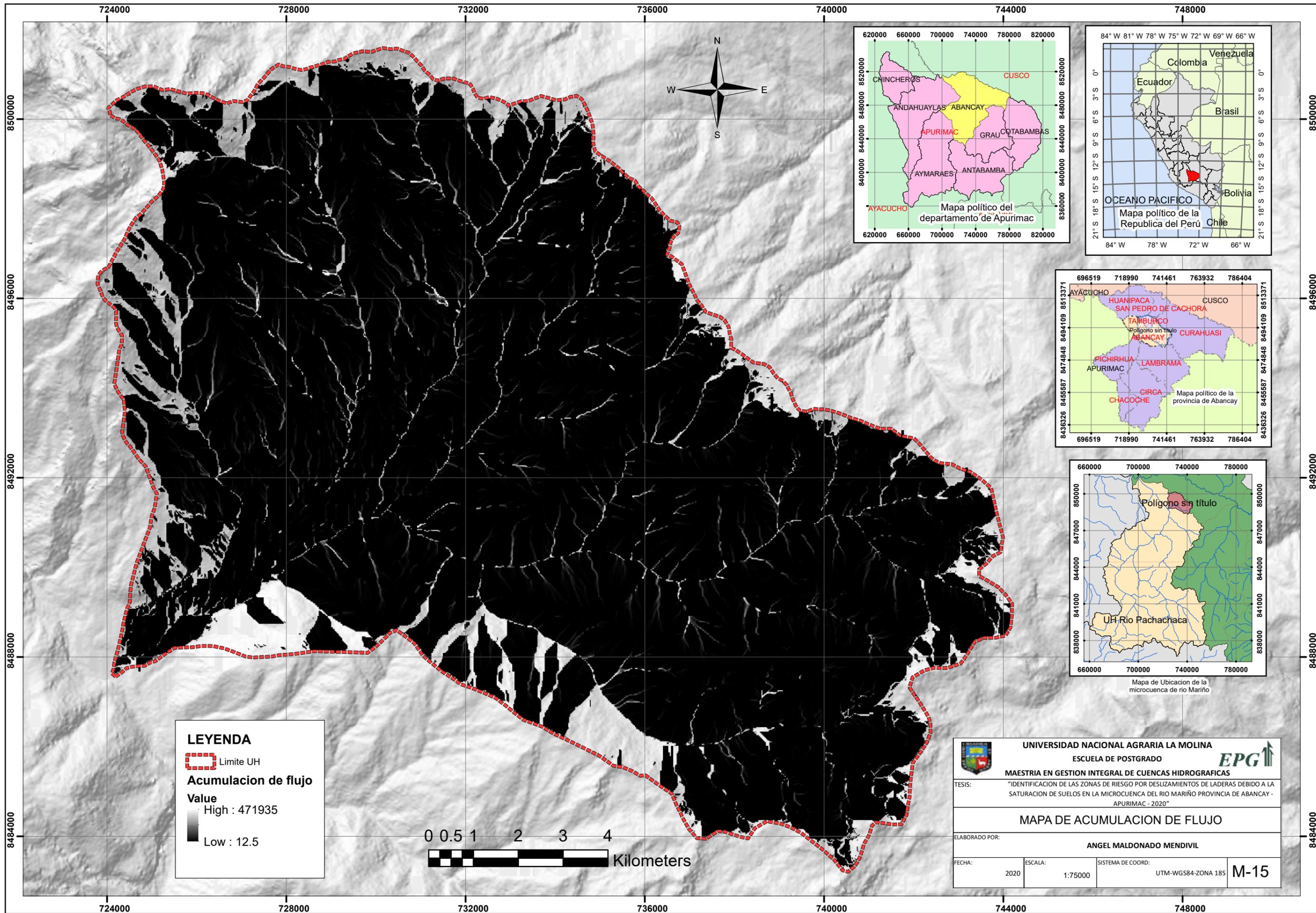
TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

MAPA DE REGIONES DE CALIBRACION SINMAP

ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-14**





LEYENDA

Limite UH

Acumulacion de flujo

Value

High : 471935

Low : 12.5



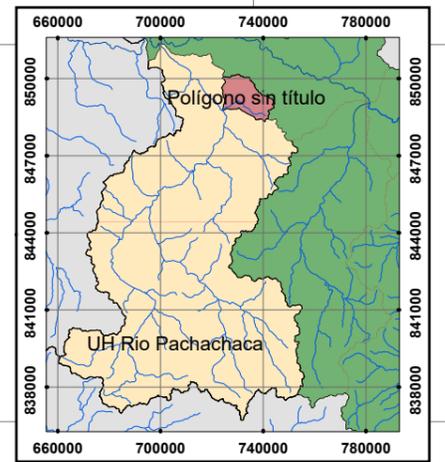
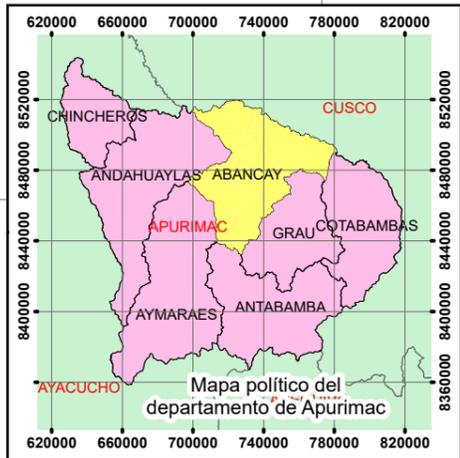
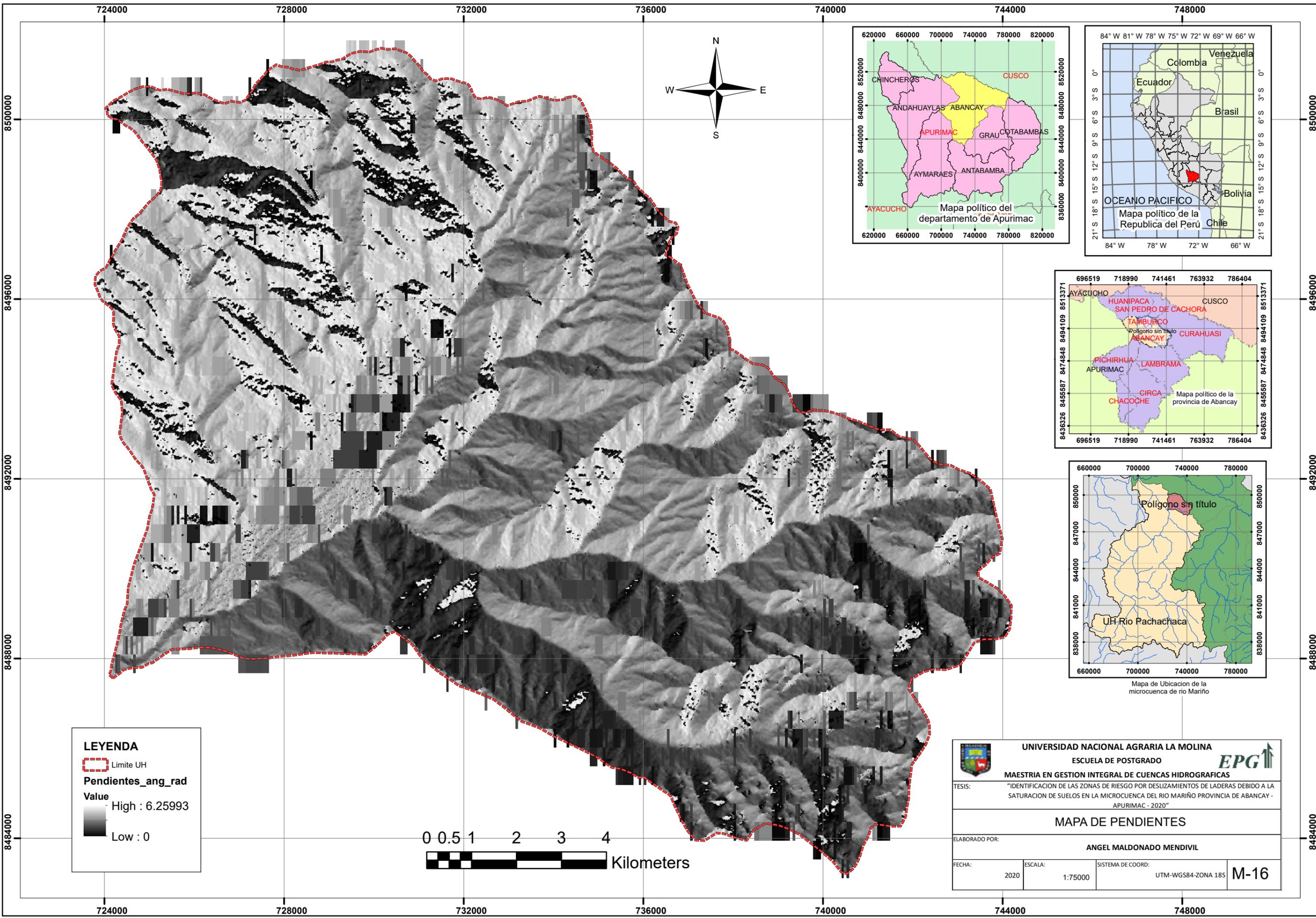
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

MAPA DE ACUMULACION DE FLUJO

ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-15**



LEYENDA

Limite UH

Pendientes_ang_rad

Value

High : 6.25993

Low : 0



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

ESCUELA DE POSTGRADO

EPG

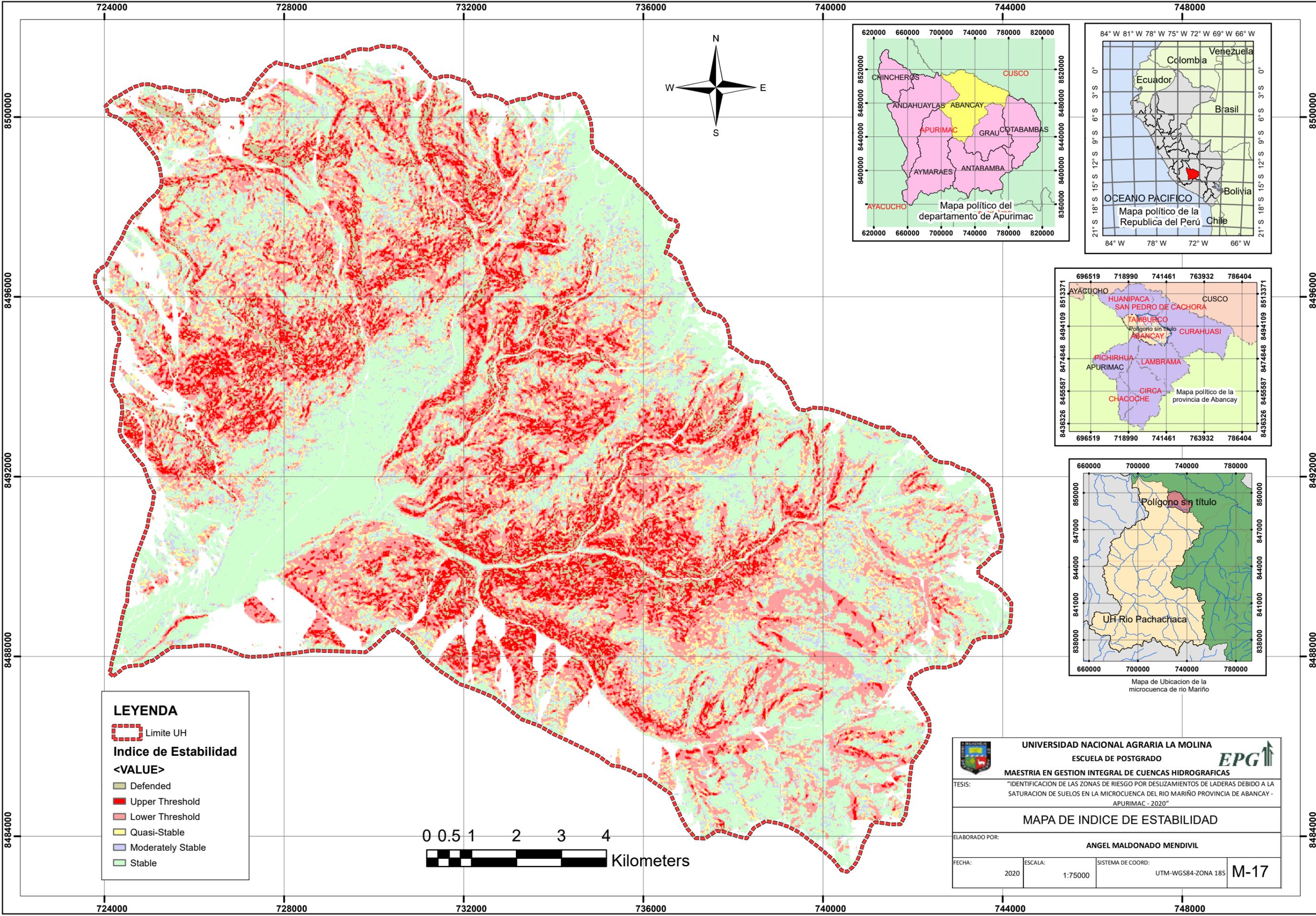
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

MAPA DE PENDIENTES

ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-16**



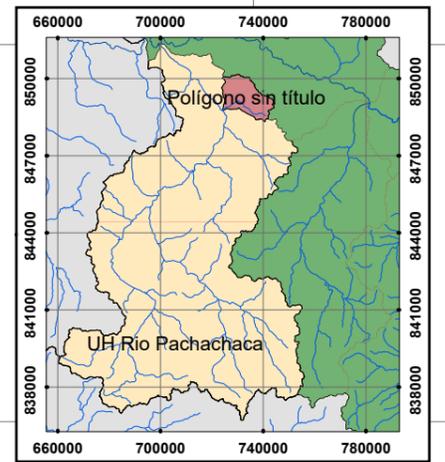
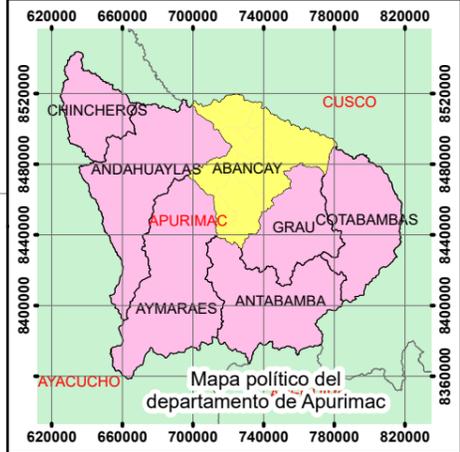
LEYENDA

Limite UH

Indice de Estabilidad

<VALUE>

- Defended
- Upper Threshold
- Lower Threshold
- Quasi-Stable
- Moderately Stable
- Stable



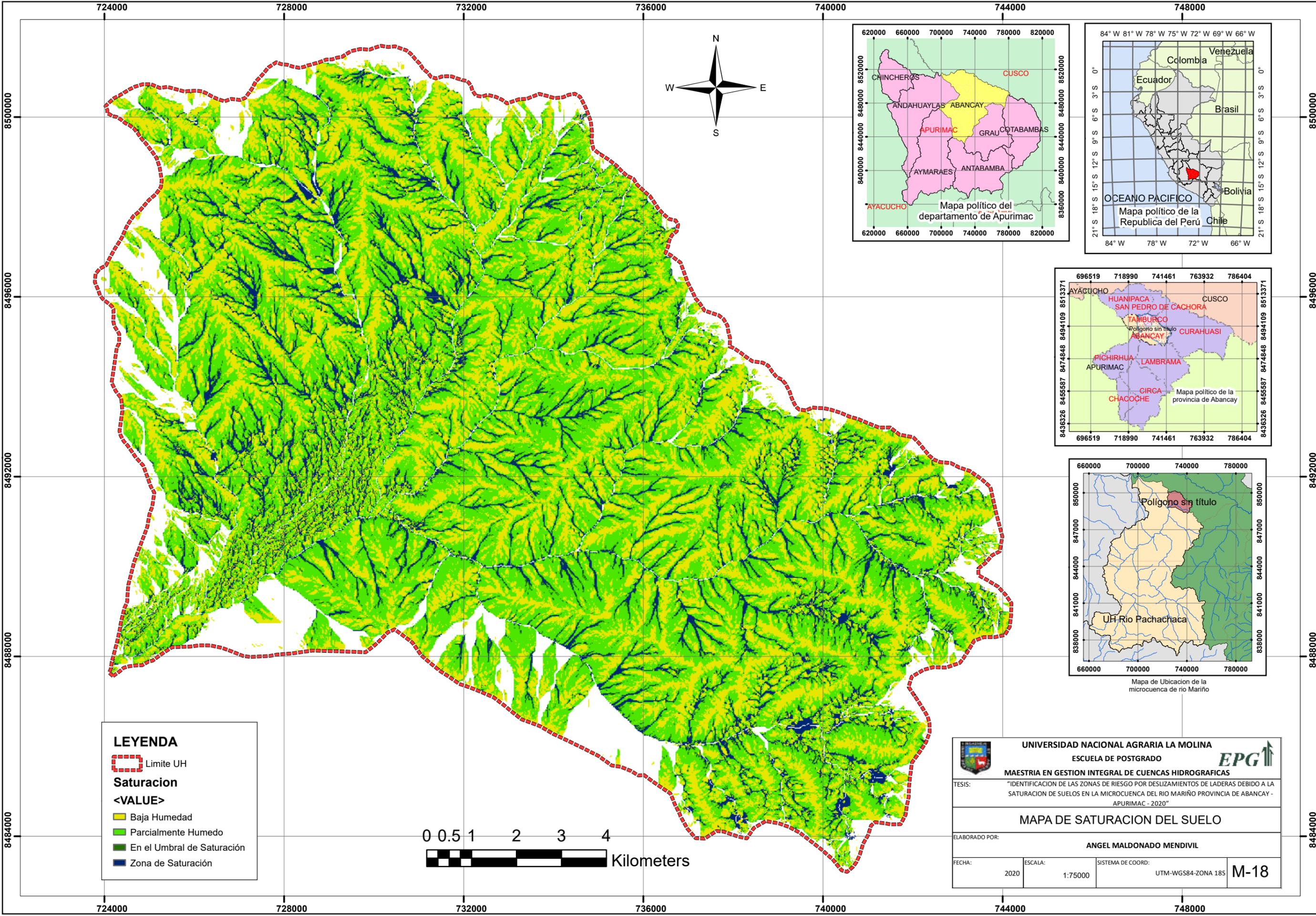
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

MAPA DE INDICE DE ESTABILIDAD

ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-17**



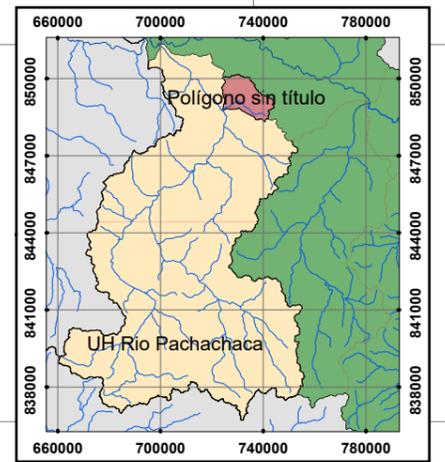
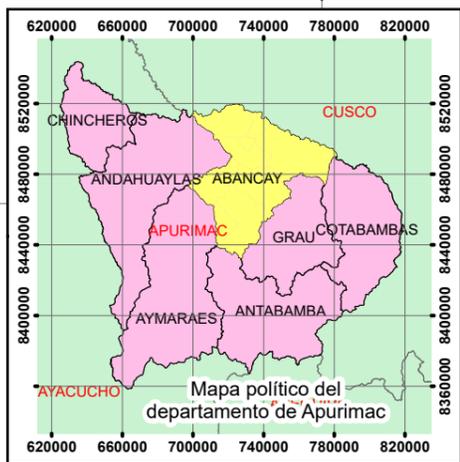
LEYENDA

Limite UH

Saturacion

<VALUE>

- Baja Humedad
- Parcialmente Humedo
- En el Umbral de Saturación
- Zona de Saturación



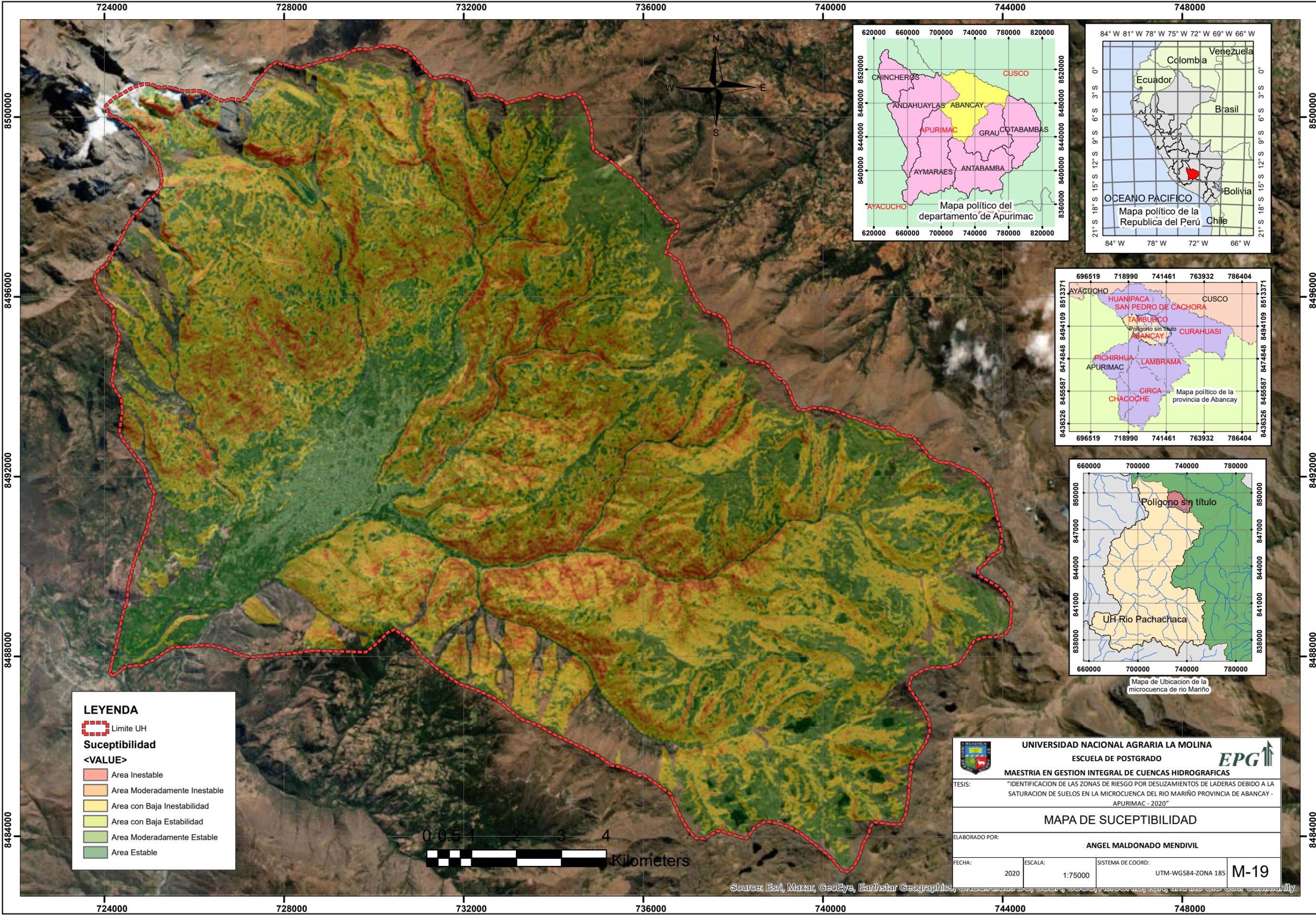
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

TESIS: "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

MAPA DE SATURACION DEL SUELO

ELABORADO POR: **ANGEL MALDONADO MENDIVIL**

FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-18**



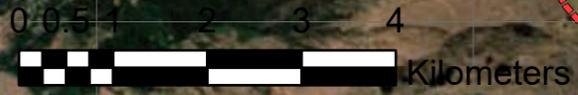
LEYENDA

Limite UH

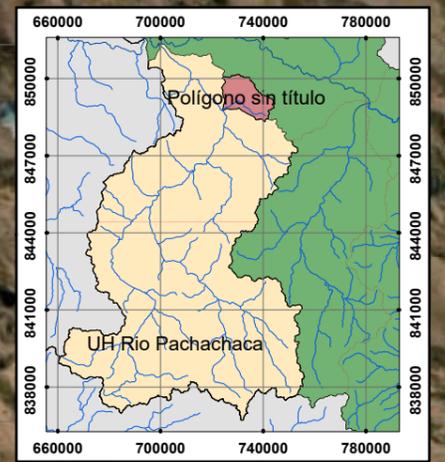
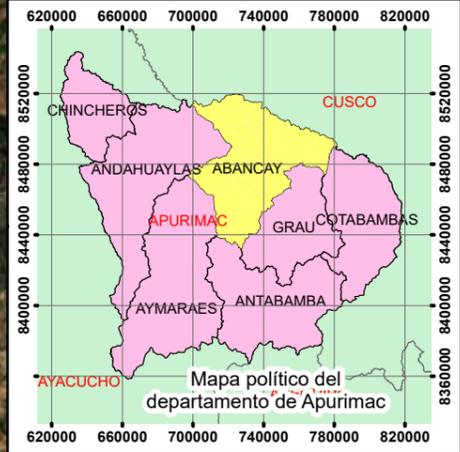
Suceptibilidad

<VALUE>

- Area Inestable
- Area Moderadamente Inestable
- Area con Baja Inestabilidad
- Area con Baja Estabilidad
- Area Moderadamente Estable
- Area Estable



Source: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
ESCUELA DE POSTGRADO
EPG

MAESTRIA EN GESTION INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

TESIS:
 "IDENTIFICACION DE LAS ZONAS DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS DE LADERAS DEBIDO A LA SATURACION DE SUELOS EN LA MICROCUENCA DEL RIO MARIÑO PROVINCIA DE ABANCAY - APURIMAC - 2020"

MAPA DE SUCEPTIBILIDAD

ELABORADO POR:
ANGEL MALDONADO MENDIVIL

FECHA: 2020 ESCALA: 1:75000 SISTEMA DE COORD: UTM-WGS84-ZONA 18S **M-19**