

**Universidad Nacional de Ingeniería**  
**Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica**



TESIS

**Determinación de la susceptibilidad a los deslizamientos en el  
Valle de Sigwas – Arequipa, mediante aplicación del método Mora  
- Vahrson**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Geólogo

Elaborado por

César Luis Jimenez Miranda

 [0000-0002-1413-4195](https://orcid.org/0000-0002-1413-4195)

Asesor

Dr. Manuel Martín Ego Aguirre Madrid

 [0000-0003-4636-7580](https://orcid.org/0000-0003-4636-7580)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Jimenez Miranda [1]
Referencia/Reference	[1] C. Jimenez Miranda, " <i>Determinación de la susceptibilidad a los deslizamientos en el Valle de Sigvas – Arequipa, mediante aplicación del método Mora - Vahrson</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

---

Citar/How to cite	(Jimenez, 2025)
Referencia/Reference	Jimenez, C. (2025). <i>Determinación de la susceptibilidad a los deslizamientos en el Valle de Sigvas – Arequipa, mediante aplicación del método Mora - Vahrson</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

### ***Dedicatoria***

*Este trabajo se lo dedico a mis padres Luis e Yrma, que con su esfuerzo he podido salir adelante profesionalmente. Y en especial, a mi tío, el Ing. Marco Miranda quien me enseñó a valorar el camino de la ingeniería.*

## **Agradecimientos**

Agradezco a todos aquellos que me apoyaron en la realización de esta tesis, ya que gracias a su soporte pude lograr la meta de culminarla. Particularmente agradezco al Ingeniero Aranzamendi por tomarse el tiempo de aconsejarme y también agradezco al Doctor Ego Aguirre por todo el apoyo brindado para la elaboración de esta tesis, así como por su vocación para enseñar.

## Resumen

El Valle de Sigüas, ubicado en la región de Arequipa, es una zona de actividad agrícola intensa donde la inestabilidad de laderas ha generado impactos significativos tanto en la infraestructura como en el uso del suelo. Esta investigación determina la susceptibilidad a los deslizamientos mediante la aplicación del método Mora-Vahrson, adaptado para incluir a la humedad del suelo como un factor detonante. Se plantea la hipótesis de que la zona noroeste del valle es la más susceptible a deslizamientos debido a la interacción de suelos sobresaturados, geomorfología desfavorable y litología poco consolidada.

El estudio integra datos de geología, geomorfología, pendientes, cobertura del suelo e índices de humedad satelitales en un análisis de superposición ponderada en ArcGIS Pro. Los resultados evidencian que los sectores con material poco consolidado, pendientes elevadas y coberturas de suelo alteradas por actividad antrópica presentan mayor inestabilidad. Además, se confirma que la sobreirrigación en el valle ha generado la sobresaturación del suelo, reduciendo su resistencia y favoreciendo la ocurrencia de deslizamientos.

Se concluye que la combinación de factores geológicos, pendientes y de humedad determina la distribución de las zonas susceptibles. Como medida de mitigación, se recomienda la reforestación con eucaliptos en 40 hectáreas para reducir la infiltración excesiva, además del monitoreo continuo del área y la regulación del riego agrícola. Los resultados de este estudio proporcionan una herramienta útil para la gestión del riesgo geológico en regiones con condiciones similares.

Palabras clave: Susceptibilidad, deslizamientos, sobresaturación, método Mora-Vahrson, geodinámica.

## **Abstract**

The Siguas Valley, located in the Arequipa region, is an area of intense agricultural activity where slope instability has caused significant impacts on both infrastructure and land use. This research determines landslide susceptibility through the application of the Mora-Vahrson method, adapted to include soil moisture as a triggering factor. The hypothesis is that the northwestern part of the valley is the most susceptible to landslides due to the interaction of oversaturated soils, unfavorable geomorphology, and unconsolidated lithology.

The study integrates data on geology, geomorphology, slopes, land cover, and satellite-based moisture indices in a weighted overlay analysis using ArcGIS Pro. The results show that areas with unconsolidated materials, steep slopes, and land cover altered by human activity present greater instability. Furthermore, it is confirmed that over-irrigation in the valley has led to soil oversaturation, reducing its strength and favoring the occurrence of landslides.

It is concluded that the combination of geological, slope, and moisture factors determines the distribution of susceptible zones. As a mitigation measure, reforestation with eucalyptus trees is recommended over 40 hectares to reduce excessive infiltration, along with continuous monitoring of the area and regulation of agricultural irrigation. The results of this study provide a useful tool for managing geological risk in regions with similar conditions.

**Keywords:** Susceptibility, landslides, oversaturation, Mora-Vahrson method, geodynamics.

## Tabla de Contenido

Pág.

Resumen .....	v
Abstract .....	vi
Introducción .....	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo .....	1
1.1 Ubicación y accesibilidad .....	1
1.2 Clima y precipitaciones .....	3
1.2.1 Datos climáticos históricos .....	4
1.2.2 Gestión de recursos hídricos y eventos extraordinarios .....	6
1.3 Actividad agrícola .....	7
1.4 Impacto del proyecto Majes-Siguas I en el uso del agua .....	12
1.4.1 Sobreutilización del recurso hídrico .....	14
1.4.2 Evidencia geofísica de infiltración descontrolada .....	14
1.5 Descripción de la realidad problemática .....	17
1.6 Formulación del problema .....	19
1.6.1 Problema general .....	19
1.6.2 Problemas específicos .....	20
1.7 Objetivos del estudio .....	20
1.7.1 Objetivo general .....	20
1.7.2 Objetivos específicos .....	20
1.8 Hipótesis .....	20
1.8.1 Hipótesis general .....	20
1.8.2 Hipótesis específicas .....	21
1.9 Metodología del estudio .....	21
1.9.1 Enfoque de la investigación .....	21

1.9.2	Tipo y diseño de la investigación .....	21
1.9.3	Población y muestra .....	22
1.9.4	Recolección y procesamiento de la información .....	22
1.10	Antecedentes referenciales.....	23
1.10.1	Antecedentes internacionales .....	23
1.10.2	Antecedentes nacionales .....	24
1.10.3	Antecedentes locales .....	25
Capítulo II. Marco teórico y conceptual .....		26
2.1	Marco teórico .....	26
2.1.1	Deslizamientos: conceptos y clasificación.....	26
2.1.2	Factores condicionantes de los deslizamientos .....	27
2.1.3	Factores detonantes de los deslizamientos .....	27
2.1.4	Métodos de evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos .....	28
2.2	Marco conceptual .....	28
2.2.1	Susceptibilidad a deslizamientos .....	28
2.2.2	Factores condicionantes en el Valle de Sigüas .....	29
2.2.3	Factor detonante en el Valle de Sigüas.....	31
2.2.4	Método Mora-Vahrson.....	31
2.2.5	Teledetección y GIS en la evaluación de deslizamientos .....	35
2.2.6	Normativa y gestión del riesgo de deslizamientos.....	35
2.2.7	Términos de referencia (TdR) y estudios de impacto ambiental (EIA).....	36
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación .....		37
3.1	Elaboración de mapas temáticos .....	37
3.1.1	Mapa geológico .....	37
3.1.2	Mapa de pendientes .....	39
3.1.3	Mapa geomorfológico (2019 – 2024) .....	41



3.1.4	Mapas de humedad (2019 – 2024) .....	46
3.1.5	Mapas de evolución de la cobertura de suelo (2019 – 2024) .....	51
3.2	Aplicación del método Mora-Vahrson.....	56
3.2.1	Recolección y preprocesamiento de datos.....	56
3.2.2	Ponderación de factores .....	56
3.3	Mapas de susceptibilidad a los deslizamientos (2019 – 2024) .....	56
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados.....		61
4.1	Identificación de zonas susceptibles .....	61
4.1.1	Análisis de las zonas críticas .....	63
4.2	Relación entre factores condicionantes y detonantes .....	67
4.2.1	Correlación entre uso agrícola y acumulación de humedad .....	67
4.3	Evaluación del impacto de la sobreirrigación en la inestabilidad .....	71
4.4	Proyección de pérdidas de cultivo y volumen de material .....	72
4.5	Validación del mapa de susceptibilidad a los deslizamientos .....	72
4.6	Medidas de mitigación .....	77
Conclusiones .....		78
Recomendaciones .....		79
Referencias bibliográficas .....		80
Anexos .....		88

## Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1 : Principales rutas de acceso al área de estudio.....	3
Tabla 2 : Principales cultivos de Majes.....	10
Tabla 3 : Factores condicionantes de deslizamientos.....	27
Tabla 4 : Factores detonantes de deslizamientos.....	28
Tabla 5 : Unidades geológicas en el Valle de Sigwas. ....	29
Tabla 6 : Unidades geomorfológicas en el Valle de Sigwas. ....	30
Tabla 7 : Clasificación de la susceptibilidad - Mora (2004). ....	32
Tabla 8 : Justificación de la modificación del método Mora-Vahrson original. ....	34
Tabla 9 : Principales normativas en materia de riesgos geológicos en Perú. ....	35
Tabla 10: Principales TdR y EIA del proyecto Majes-Sigwas. ....	36
Tabla 11: Factor geología y sus atributos en el mapa temático. ....	37
Tabla 12: Factor pendientes y sus atributos en el mapa temático. ....	39
Tabla 13: Factor geomorfológico y sus atributos en el mapa temático. ....	41
Tabla 14: Factor humedad y sus atributos en el mapa temático.....	46
Tabla 15: Factor cobertura del suelo y sus atributos en el mapa temático.....	51
Tabla 16: Ponderación de factores del área de estudio.....	56
Tabla 17: Medidas de mitigación propuestas para la zona de estudio.....	77

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Ubicación del área de estudio en el Valle de Sigwas. ....	2
Figura 2 : Estación meteorológica Pampa de Majes. ....	5
Figura 3 : Caudal promedio mensual en el río Sigwas (1998 - 2017). ....	7
Figura 4 : Área total y sembrada en los distritos de Caylloma. ....	8
Figura 5 : Mapa de agricultura de la zona de estudio. ....	9
Figura 6 : Calendario de cosechas de principales cultivos en Majes. ....	11
Figura 7 : Vista panorámica del área de estudio. ....	12
Figura 8 : Vista aérea del Valle de Sigwas. ....	13
Figura 9 : Mapa de ubicación de ensayos de ERT. ....	14
Figura 10: Capas identificadas en estudio geofísico de El Zarzal. ....	15
Figura 11: Sección de 5 líneas ERT realizadas en la zona de estudio. ....	16
Figura 12: Corona del deslizamiento de El Zarzal (2024). ....	17
Figura 13: Esquema de la zona de Alto Sigwas antes del deslizamiento. ....	18
Figura 14: Esquema de la zona de Alto Sigwas después del deslizamiento. ....	19
Figura 15: Recolección y procesamiento de la información. ....	22
Figura 16: Fotografía del deslizamiento El Zarzal. ....	26
Figura 17: Columna estratigráfica de la zona de estudio. ....	29
Figura 18: Fotografía de zona de humedad en ladera del Valle de Sigwas. ....	31
Figura 19: Diagrama metodológico de procesamiento de información. ....	33
Figura 20: Mapa geológico de la zona de estudio. ....	38
Figura 21: Mapa de pendientes de la zona de estudio. ....	40
Figura 22: Mapa geomorfológico de la zona de estudio (2019). ....	42
Figura 23: Mapa geomorfológico de la zona de estudio (2021). ....	43
Figura 24: Mapa geomorfológico de la zona de estudio (2022). ....	44

Figura 25: Mapa geomorfológico de la zona de estudio (2024).....	45
Figura 26: Mapa de humedad del área de estudio (2019).....	47
Figura 27: Mapa de humedad del área de estudio (2021).....	48
Figura 28: Mapa de humedad del área de estudio (2022).....	49
Figura 29: Mapa de humedad del área de estudio (2024).....	50
Figura 30: Mapa de cobertura de suelo del área de estudio (2019). ....	52
Figura 31: Mapa de cobertura de suelo del área de estudio (2021). ....	53
Figura 32: Mapa de cobertura de suelo del área de estudio (2022). ....	54
Figura 33: Mapa de cobertura de suelo del área de estudio (2024). ....	55
Figura 34: Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos (2019).....	57
Figura 35: Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos (2021).....	58
Figura 36: Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos (2022).....	59
Figura 37: Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos (2024).....	60
Figura 38: Fotografía del deslizamiento El Zarzal. ....	61
Figura 39: Vistas en 3D de la zona de estudio. ....	62
Figura 40: Fotografía de la zona A tomada con dron.....	63
Figura 41: Análisis multitemporal del sector A de Alto Sigüas 2022.....	63
Figura 42: Fotografía del sector deslizado (zona B). ....	64
Figura 43: Fotografía de caída de material (zona B). ....	64
Figura 44: Grietas escalonadas de la zona C.....	65
Figura 45: Grieta escalonada con humedad de la zona C.....	66
Figura 46: Pie del deslizamiento de la zona D. ....	66
Figura 47: Análisis multitemporal del sector D de Alto Sigüas 2022. ....	67
Figura 48: Evidencia de humedad nº1 debido a la infiltración por sobrerriego. ....	68
Figura 49: Evidencia de humedad nº2 debido a la infiltración por sobrerriego. ....	68
Figura 50: NDVI (índice de vegetación) vs NDMI (índice de humedad).....	69

Figura 51: Correlación entre vegetación, humedad y el área ocupada..... 70

Figura 52: Trazabilidad de cambios de áreas agrícolas en la zona A. .... 71

Figura 53: Mapas de vectores de desplazamiento (2019). .... 73

Figura 54: Mapas de vectores de desplazamiento (2021). .... 74

Figura 55: Mapas de vectores de desplazamiento (2022). .... 75

Figura 56: Mapa de vectores de desplazamiento acumulados (2024). .... 76

## Introducción

El Valle de Siguar en Arequipa presenta problemas recurrentes de inestabilidad de laderas, los cuales afectan directamente a la infraestructura agrícola, vial y la población local. Estos deslizamientos se asocian principalmente a la sobresaturación de los suelos por el exceso de riego en las áreas cultivadas, sumado a las condiciones geológicas y geomorfológicas del valle. El caso más representativo es el deslizamiento de El Zarzal, ubicado en la margen derecha del valle, el cual ha presentado desplazamientos de hasta cuatro metros mensuales en algunos sectores, generando pérdidas económicas y poniendo en riesgo a la población local.

Geológicamente el área de estudio está compuesta por la Formación Moquegua, que presenta conglomerados colapsables y areniscas arcillosas, así como por depósitos aluviales y coluviales, y la Formación Millo. Estos materiales, al combinarse con una geomorfología de terrazas y laderas empinadas, generan condiciones favorables para la inestabilidad, especialmente cuando el contenido de humedad aumenta debido al riego intensivo. Estudios previos realizados por el INGEMMET han documentado la evolución de estos procesos, resaltando la necesidad de evaluar la susceptibilidad del terreno para prevenir futuros eventos.

El objetivo principal de esta investigación es determinar la susceptibilidad a deslizamientos en el Valle de Siguar mediante la aplicación del método Mora-Vahrson, adaptado para considerar la humedad del suelo como un factor detonante. Para ello, se realizó un trabajo de campo que incluyó el mapeo geológico y geomorfológico, así como la identificación de zonas críticas donde se evidencian procesos de inestabilidad.

Los resultados obtenidos permitirán identificar las zonas con mayor susceptibilidad a deslizamientos, en especial en el sector noroeste del valle, donde se combinan suelos sobresaturados, pendientes pronunciadas y materiales geológicos poco consolidados. Como parte de las propuestas de mitigación, se plantea la reforestación con especies como

el eucalipto en aproximadamente cuarenta hectáreas, la cual es una alternativa sostenible para reducir la infiltración de agua en comparación con otras alternativas como pozos de bombeo, los cuales han demostrado ser insuficientes para controlar el problema.

El presente estudio busca aportar soluciones prácticas para el manejo de riesgos geológicos en el Valle de Sigüas, y también establecer un marco de referencia para otros valles agrícolas con condiciones similares, particularmente donde la interacción entre el riego intensivo y la inestabilidad de laderas generan condiciones de riesgo permanente. Los resultados de este trabajo proporcionarán herramientas técnicas valiosas para la planificación territorial y la implementación de medidas preventivas, reduciendo así el impacto de los deslizamientos en las actividades económicas y la infraestructura local.

## **Capítulo I. Parte introductoria del trabajo**

### **1.1 Ubicación y accesibilidad**

La zona de interés está situada cerca del área del deslizamiento denominado como El Alto o El Zarzal dentro del sector de Alto Majes, en el ámbito del Valle de Sigüas. Administrativamente, la zona estudiada se extiende por los distritos de Majes, perteneciente a la provincia de Caylloma, y San Juan de Sigüas, en la provincia de Arequipa (Instituto Geográfico Nacional [IGN], 2025).

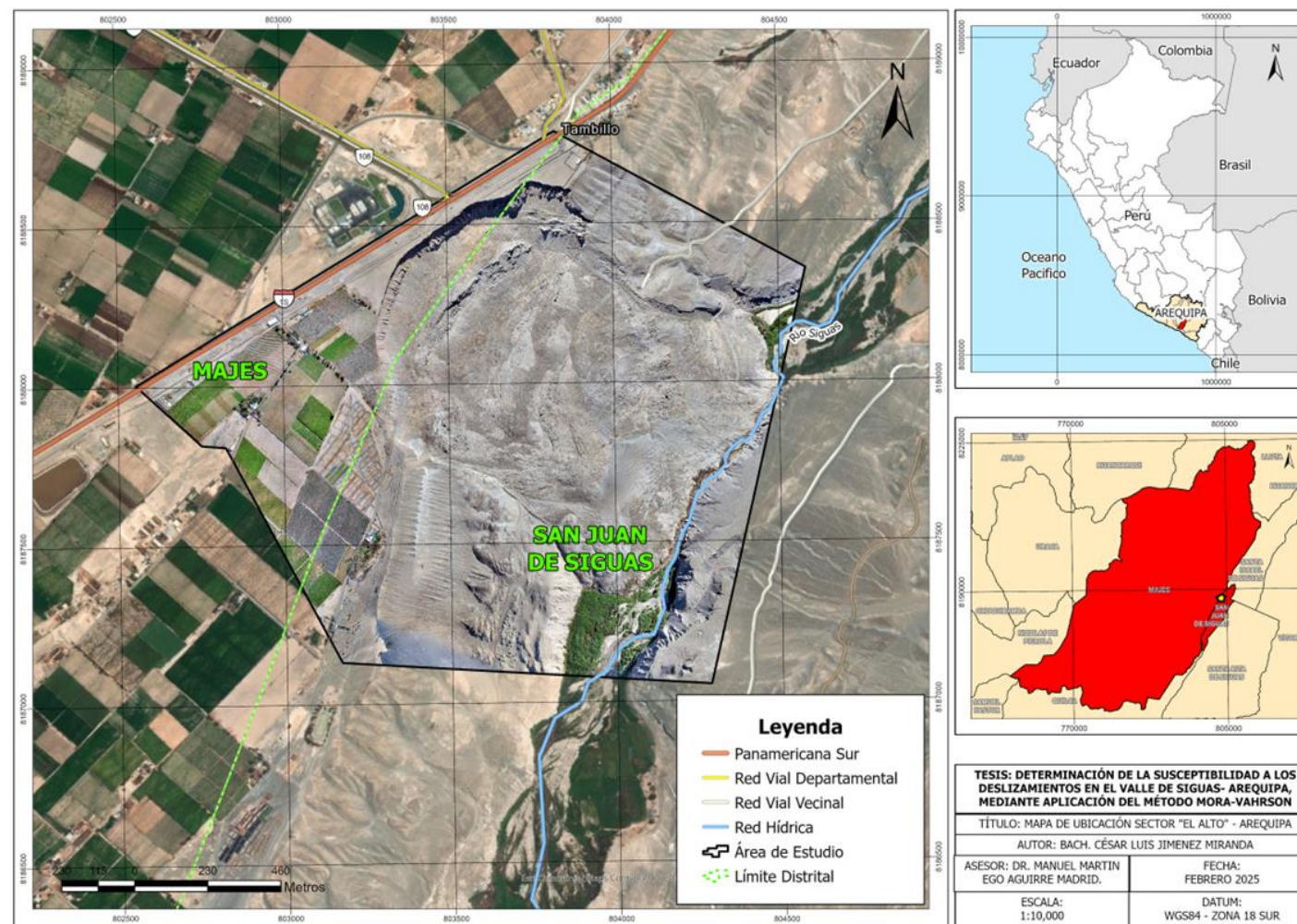
Este estudio no solo considera el área específica afectada por el deslizamiento actual, sino también zonas próximas, para determinar qué tan susceptibles pueden ser ante futuros deslizamientos o eventos de remoción en masa. La altitud promedio del área evaluada ronda los 1,424 metros sobre el nivel del mar (Google Earth, 2025). Ocupando una superficie total de 225.19 hectáreas.

Las coordenadas UTM aproximadas, referidas al sistema WGS84 Zona 18S, corresponden a 803692.44 m Este y 8187871.45 m Sur (IGN, 2025). Geográficamente, el área de estudio está situada hacia el noroeste con respecto a la carretera Panamericana Sur y próxima a la planta industrial procesadora de leche Gloria (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico [INGEMMET], 2021). Al norte se ubica el centro poblado conocido como Alto Sigüas, mientras que hacia el este y sureste predominan áreas agrícolas y terrenos con topografía accidentada (Google Earth, 2025). En la Figura 1 se muestra el mapa de ubicación de la zona de trabajo.



**Figura 1**

*Ubicación del área de estudio en el Valle de Sigwas.*



*Fuente: Elaboración propia.*

El acceso a la zona de estudio puede realizarse a través de diversas vías terrestres, con distancias y tiempos variables de recorrido. A continuación, se detallan las principales rutas de acceso:

**Tabla 1**

*Principales rutas de acceso al área de estudio.*

Vías	Rutas	Tipos de Vía	Distancia	Tiempo de recorrido
Ruta 1: Acceso desde Arequipa por la Panamericana Sur	Arequipa – La Joya – Majes – San Juan de Sigwas – Alto Sigwas	Asfaltada hasta San Juan de Sigwas, luego trocha carrozable	160 km	2 h 30 min
Ruta 2: Acceso desde Majes vía la carretera local	Majes – San Juan de Sigwas – Alto Sigwas	Asfaltada hasta San Juan de Sigwas, luego trocha carrozable	45 km	1 h
Ruta 3: Acceso desde la Panamericana Sur vía desvío a San Juan de Sigwas	Carretera Panamericana Sur – Desvío a San Juan de Sigwas – Alto Sigwas	Asfaltada hasta San Juan de Sigwas, luego trocha carrozable	50 km	1 h 10 min
Ruta 4: Acceso por caminos rurales desde Alto Sigwas	Alto Sigwas – Zona de deslizamiento	Camino rural y sendero peatonal	2 km	30 min a pie

*Nota:* Adaptado de Google Earth (2025).

El tramo final, que conecta Alto Sigwas con la zona del deslizamiento, atraviesa un terreno difícil al que sólo se puede acceder a través de senderos (Google Earth, 2025). Dependiendo de cuál sea la condición actual de la carretera o del clima, puede que sea necesario viajar en vehículos todoterreno o a pie.

## 1.2 Clima y precipitaciones

El Valle de Sigwas presenta condiciones climáticas predominantemente secas a semiáridas en verano, que se vuelven ligeramente más húmedas en los meses de otoño e invierno. Este patrón es típico de áreas cercanas a los Andes, particularmente entre 1.000 y 2.500 metros sobre el nivel del mar (Araujo et al., 2016).

Como señala el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2024), en esta región, las temperaturas máximas suelen rondar los 27°C, mientras que las mínimas rondan los 14°C. Las precipitaciones anuales son

extremadamente bajas, oscilando entre sólo 0,1 y 6 litros por metro cuadrado, lo que se considera insignificante.

De acuerdo con Araujo et al. (2016), en la localidad de Pampa de Majes, a unos 4,5 km al noroeste del sector El Alto, se encuentra una estación meteorológica administrada por el SENAMHI. Según sus registros, las precipitaciones en la zona son mínimas, por lo que los suelos del valle absorben naturalmente muy poca humedad.

Sin embargo, Stein et al. (2024), indican que a pesar de estas condiciones existe una humedad elevada en el suelo debido al riego agrícola. Esta distinción es importante para la investigación porque permite diferenciar entre la humedad de origen natural y la generada por actividades agrícolas, que podría influir significativamente en la estabilidad del suelo.

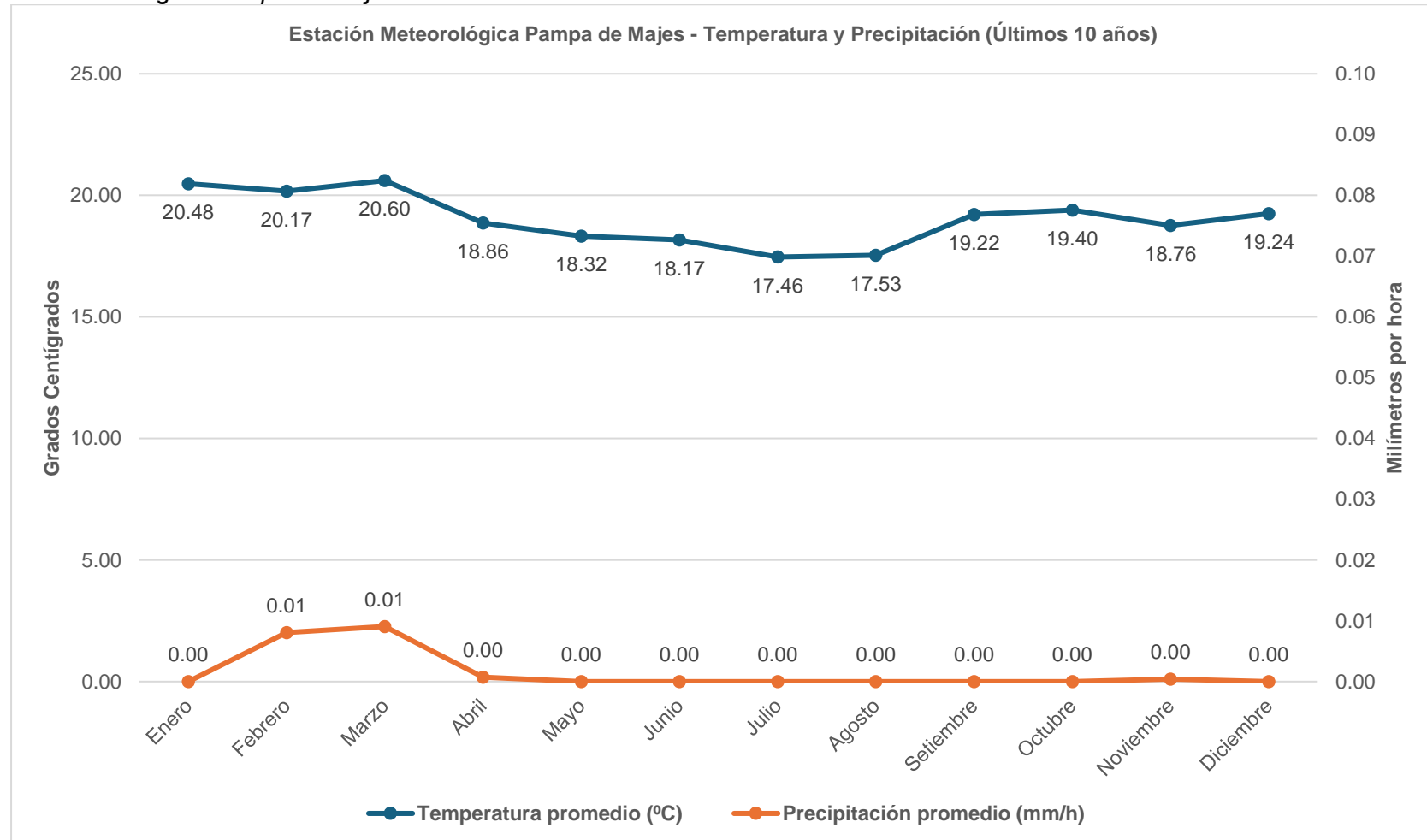
### **1.2.1 Datos climáticos históricos**

De la Figura 2 se desprende que febrero y marzo presentan mayor precipitación con un promedio de 0.01 mm/hora, mientras que en abril y noviembre se presentan en el orden de los 0.001 mm/hora. El resto del año no cuenta con precipitaciones registradas. Con respecto a temperatura, marzo es el mes más cálido del año (20.6 °C), y julio el más frío (17.5 °C), con una variabilidad térmica anual de aproximadamente 3.0 °C. La diferencia de precipitación entre los meses más secos y húmedos no supera 1 mm (SENAMHI, 2024).

Con respecto a los vientos, provienen predominantemente del Pacífico y corresponden a los vientos Alisios, los cuales soplan en dirección suroeste a noreste. La mayor intensidad de estos vientos se presenta entre las 10:00 y 16:30 horas, con una velocidad máxima registrada de 3.0 m/s en junio (Montoya, 2019).

**Figura 2**

*Estación meteorológica Pampa de Majes.*



Fuente: Adaptado de SENAMHI (2024).

### **1.2.2 Gestión de recursos hídricos y eventos extraordinarios**

La represa de Condorama, parte del Proyecto Majes-Siguas I y ubicada en la Cordillera Occidental, en el límite entre los departamentos de Arequipa y Cusco, ha enfrentado eventos importantes relacionados con su capacidad y gestión de descargas debido a condiciones climáticas adversas.

En marzo de 2021, alcanzó el 100% de su capacidad debido a intensas lluvias en las zonas altas, lo que llevó a la Autoridad Autónoma de Majes (AUTODEMA), a realizar descargas hacia el río Colca, advirtiendo a la población sobre una inminente crecida de los ríos Colca, Majes y Camaná (La República, 2021).

De manera similar, en marzo de 2025, AUTODEMA emitió una alerta debido al aumento del caudal en la cuenca Colca-Siguas, debido a las intensas precipitaciones. Se registraron descargas de 103 metros cúbicos por segundo desde la represa hacia el río Colca, exhortando a la población evitar el cruce de puentes peatonales, así como acercarse a las riberas de los ríos (Diario Sin Fronteras, 2025).

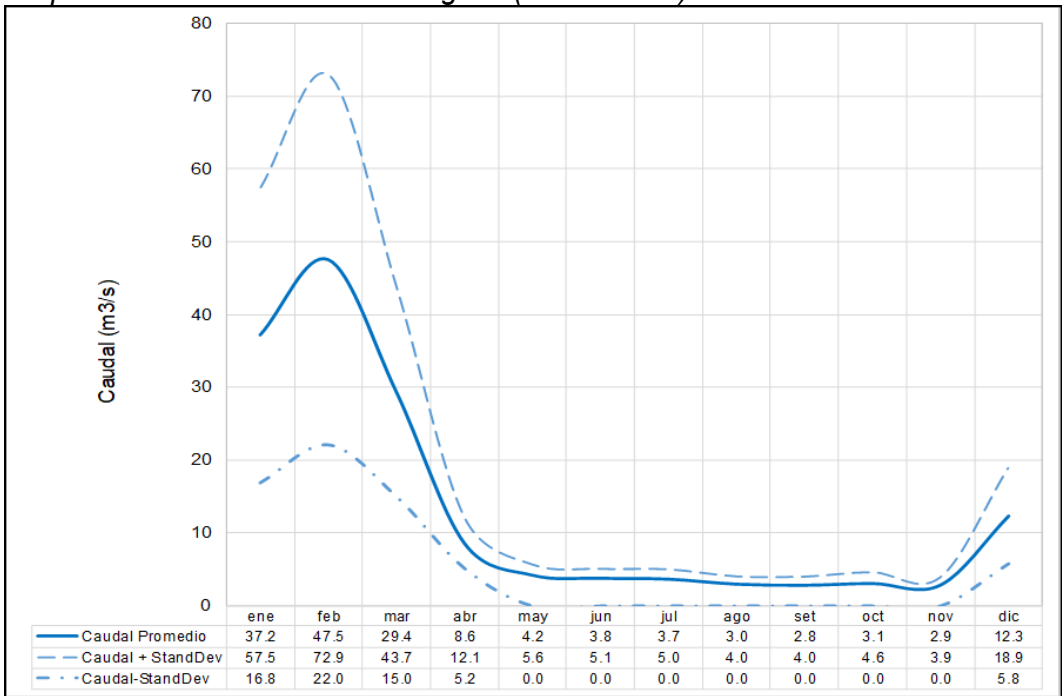
Por otro lado, el río Sigvas también ha experimentado aumentos significativos en su caudal debido a las lluvias en las zonas altas. Como se observa en la Figura 3, el caudal pico anual del río Sigvas se da entre fines de febrero e inicios de marzo con un aproximado de 45 m<sup>3</sup>/s.

Sin embargo, en algunas ocasiones el aumento de caudal ha superado estos valores promedio. Por ejemplo, en febrero del 2025, AUTODEMA dio a conocer que el caudal alcanzó los 130 m<sup>3</sup>/s, lo que obligó a cerrar preventivamente la captación de agua hacia la irrigación Pampa de Majes, para evitar el ingreso de elementos sólidos al sistema (Diario Sin Fronteras, 2025).

Estos eventos resaltan la importancia de gestionar adecuadamente los recursos hídricos durante períodos de lluvias intensas con el fin de mitigar los riesgos asociados a posibles desbordes e inundaciones en el Valle de Sigvas.

**Figura 3**

*Caudal promedio mensual en el río Siguas (1998 - 2017).*



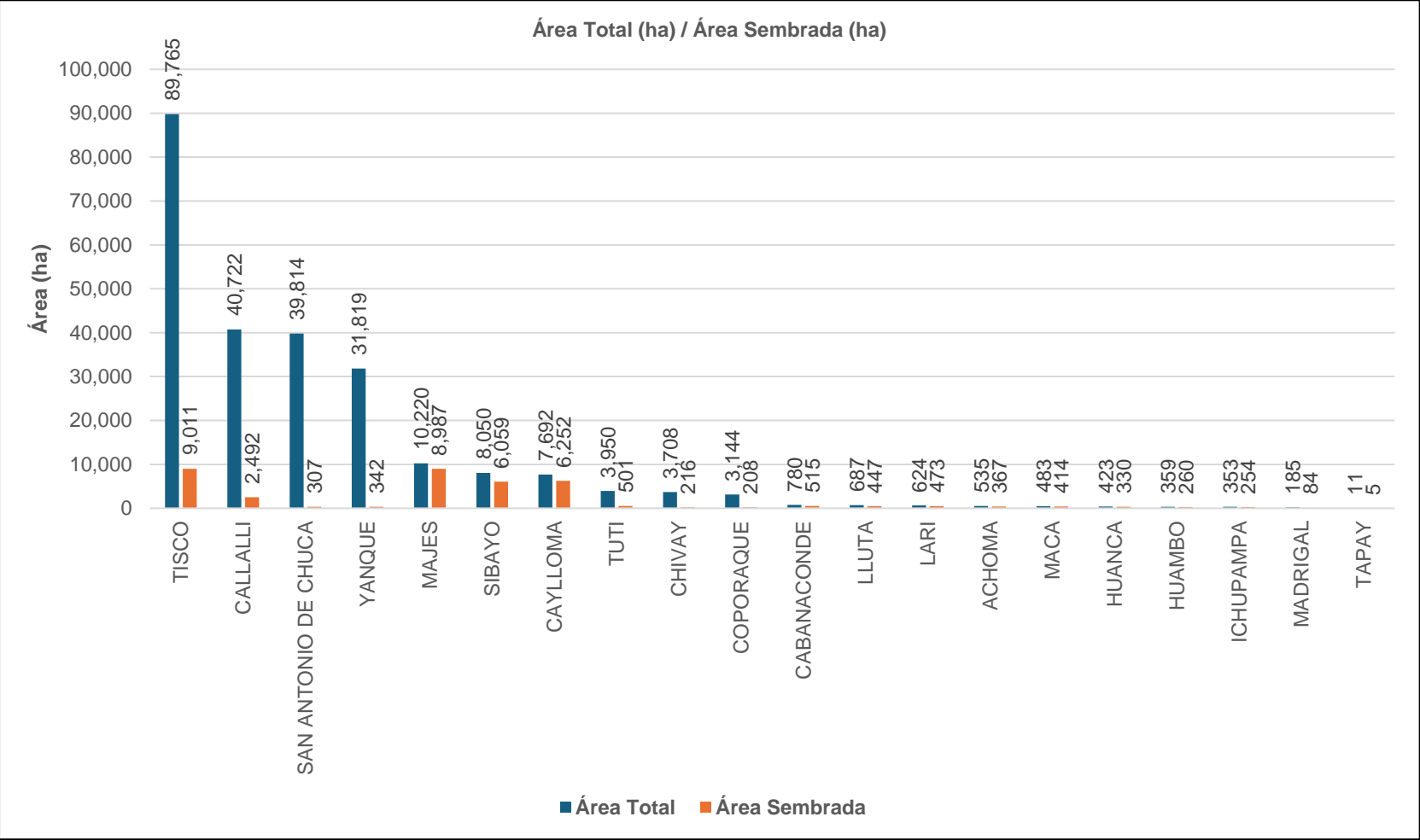
Fuente: García (2018).

### 1.3 Actividad agrícola

El área de estudio comprende los distritos de Majes y San Juan de Siguas. En el caso de Majes, ocupa aproximadamente el 22.5% del área total de estudio y destaca como el principal centro de producción agrícola de la región (Sistema Integrado de Estadística Agraria [SIEA], 2024). Según INGEMMET (2023), esto se debe al proyecto Majes-Siguas I, iniciado en la década de 1980, el cual ha impulsado la expansión agrícola mediante el uso de técnicas avanzadas de riego para la época. De acuerdo con el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI, 2024), y tal como se observa en la Figura 4, el sistema de riego implementado en Majes ha sido fundamental para transformar una zona árida en un área agrícola muy extensa, en la que predominan cultivos de alto valor económico, pero con alta demanda hídrica.

Figura 4

Área total y sembrada en los distritos de Caylloma.

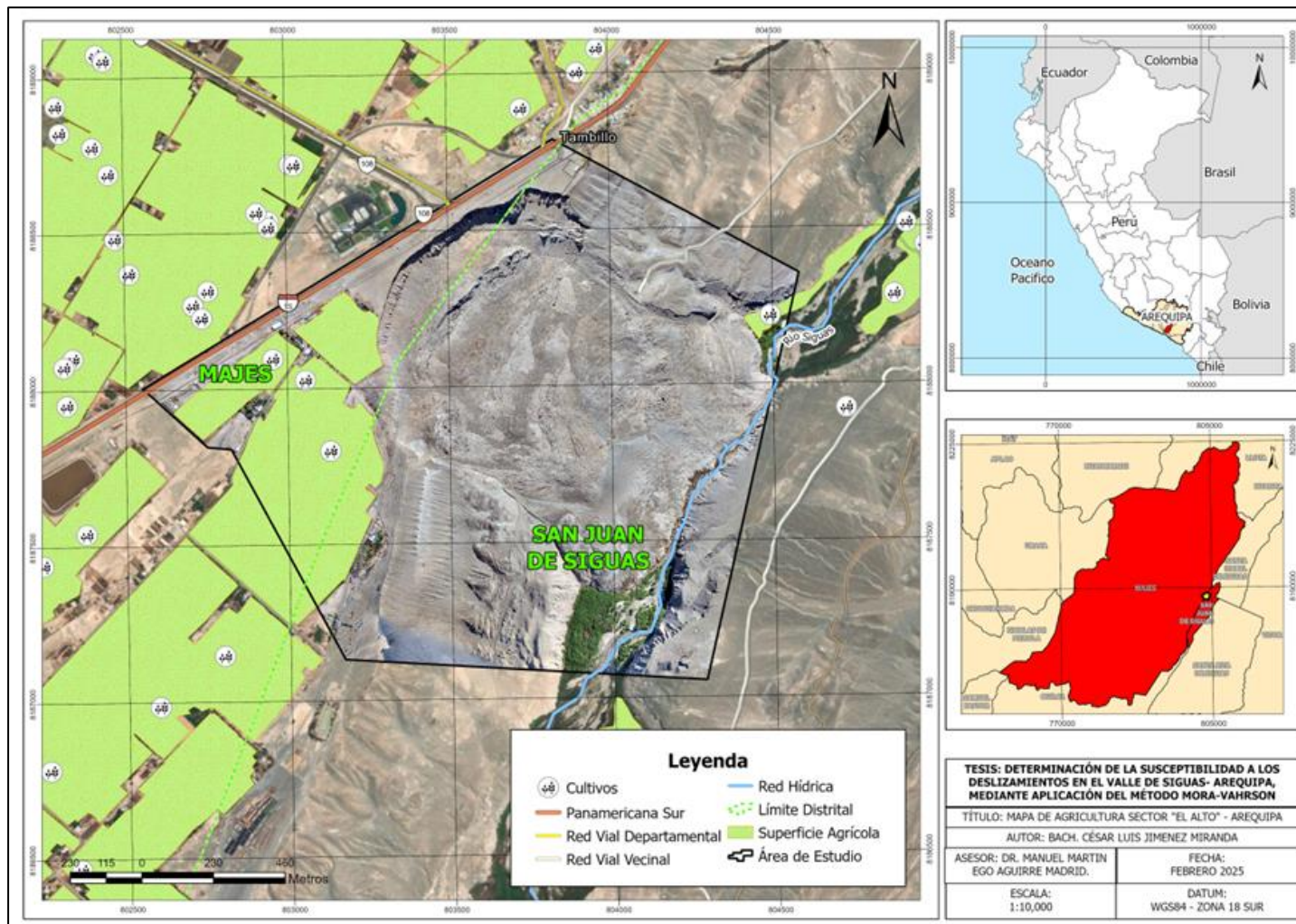


Fuente: Adaptado de MIDAGRI (2024).



**Figura 5**

*Mapa de agricultura de la zona de estudio.*



Fuente: Adaptado de SIEA (2024).



Por otro lado, del mapa de agricultura presentado en la Figura 5, se desprende que San Juan de Sigwas representa el 77.5% del área estudiada con una actividad agrícola menor en comparación con Majes, pero que cuenta con recursos naturales importantes, como el río Sigwas, esencial para el abastecimiento de agua en la región (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1999).

De acuerdo con datos del SIEA (2024), el distrito de Majes cuenta con:

- 2444 productores agrícolas
- 9090.50 ha de cultivos
- 2516 parcelas
- 8842 ha bajo riego

Los principales cultivos en Majes incluyen:

**Tabla 2**

*Principales cultivos de Majes.*

Cultivo	Número de Productores	Área (ha)	Costo Unitario (S/.)	Porcentaje (%)
Maíz Chala	1143	2675.46	4673.50	29.43
Alfalfa	704	1182.82	3608.69	13.01
Papa	472	1010.09	10405.50	11.11
Cebolla	375	691.77	14925.22	7.61
Alcachofa	375	691.77	12835.39	6.45
Ajo	306	550.06	9952.24	6.05
Otros	1295	2394.12	-	26.34

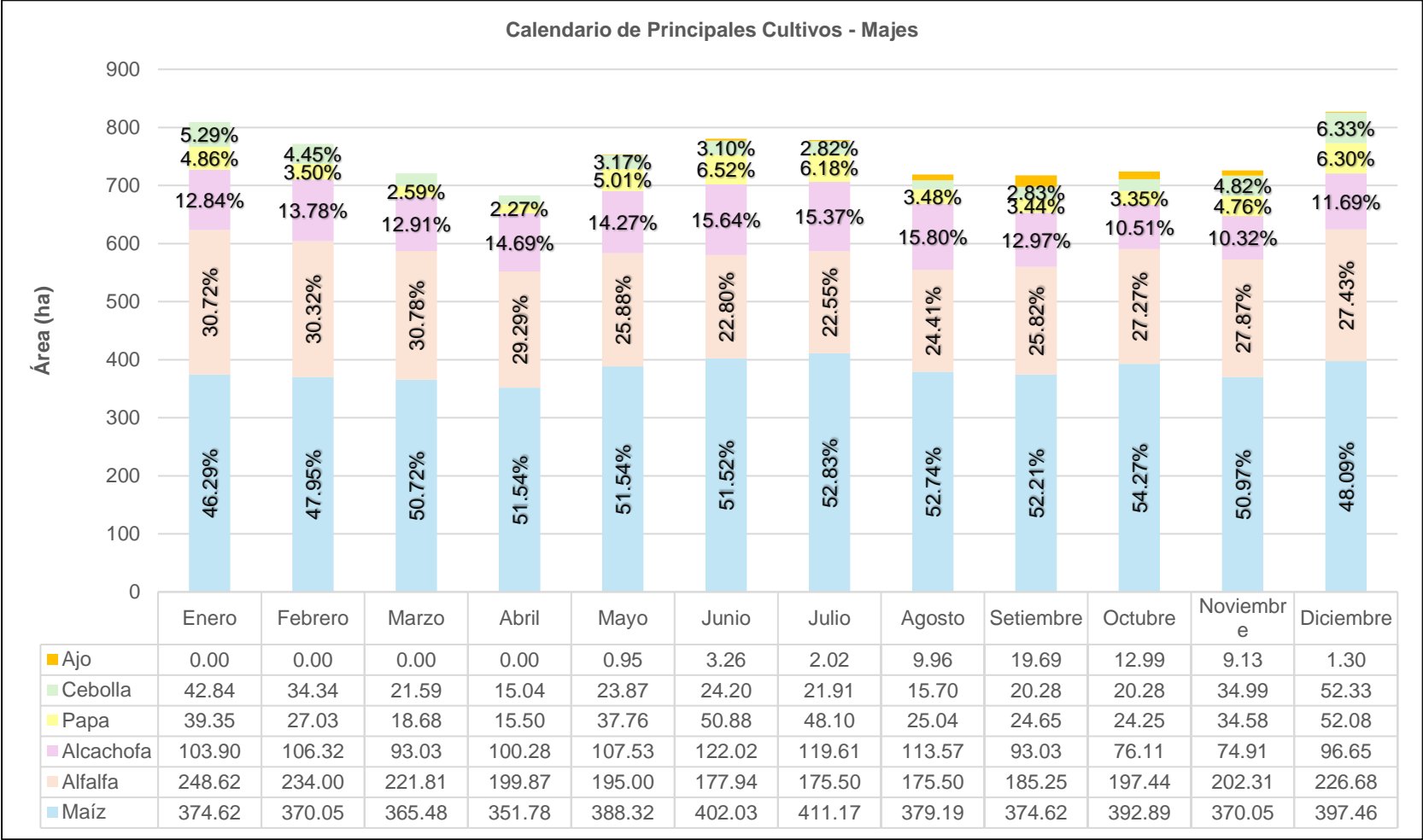
*Nota:* Adaptado de MIDAGRI (2024).

Como señala Suarez-Suarez et al. (2023), todos los cultivos mencionados anteriormente utilizan riego por aspersión. Y los ciclos de siembra y cosecha presentan variaciones estacionales (ver Figura 6), relacionadas con el balance hídrico del suelo y la rotación de cultivos.

Ya que el riego intensivo es uno de los principales factores condicionantes de la humedad del suelo, estos patrones de producción agrícola resultan muy importantes para poder comprender la dinámica de sobresaturación y su relación con los deslizamientos (Martínez, 2016).

Figura 6

Calendario de cosechas de principales cultivos en Majes.



Fuente: Adaptado de SIEA (2024).

#### 1.4 Impacto del proyecto Majes-Siguas I en el uso del agua

El Proyecto Especial Majes-Siguas I, implementado en 1966, fue concebido con el propósito de irrigar aproximadamente 23,000 hectáreas en la Pampa de Majes, contribuyendo significativamente al desarrollo agrícola de la región (ver Figura 7). Sin embargo, según Stein et al. (2024), se ha evidenciado que el uso intensivo del agua para riego ha generado un aumento progresivo del nivel freático, lo que ha sido identificado como un factor detonante de deslizamientos en el valle.

##### Figura 7

*Vista panorámica del área de estudio.*



*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de campo (2024).

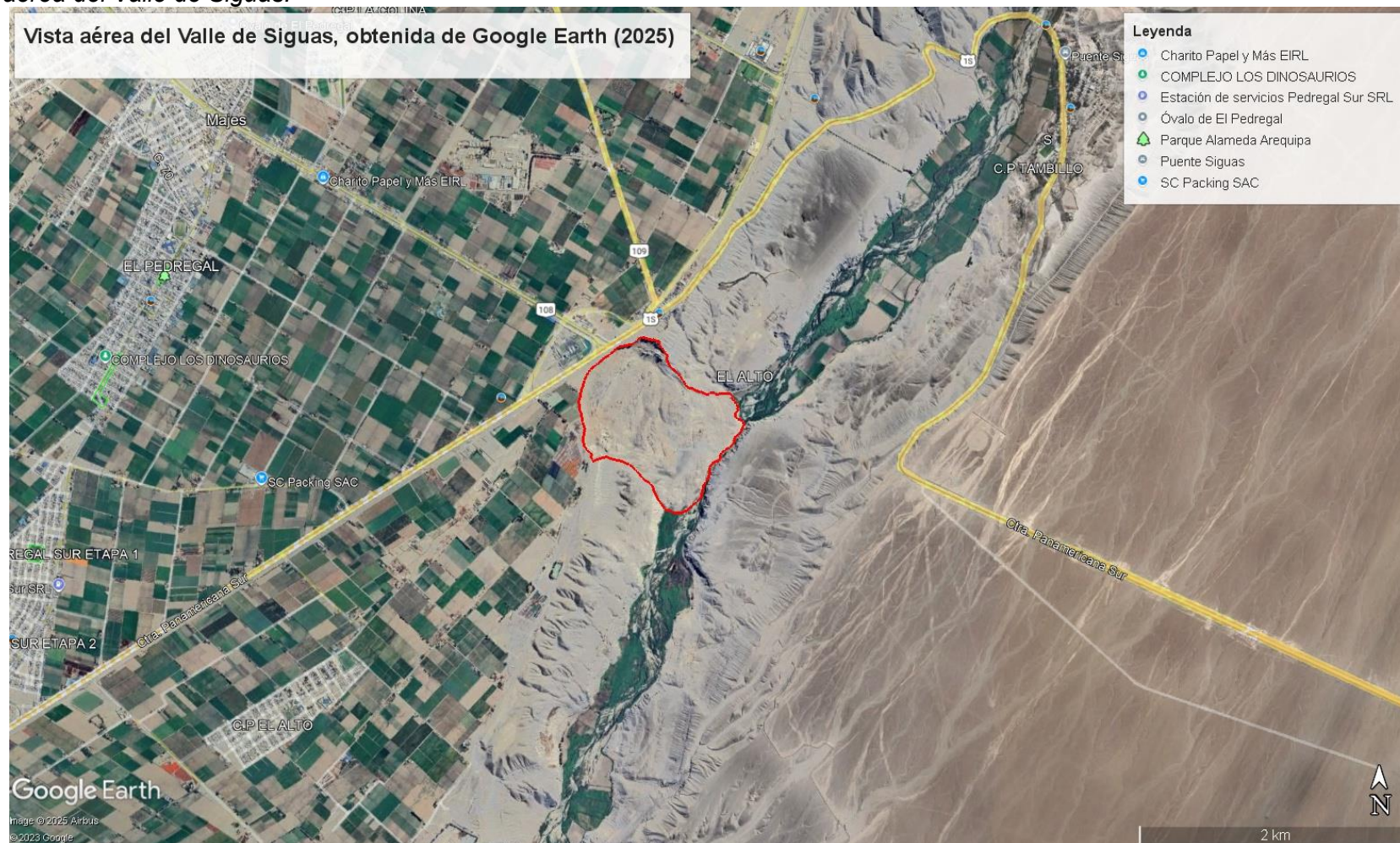
De acuerdo con la Martínez (2016), las filtraciones asociadas al sistema de riego han sido documentadas desde 1993, afectando infraestructura clave como:

- Canales de riego
- Carreteras (Panamericana Sur y vías secundarias)
- Propiedades privadas y áreas agrícolas



**Figura 8**

*Vista aérea del Valle de Sigüas.*



Fuente: Adaptado de Google Earth (2025).

#### 1.4.1 Sobreutilización del recurso hídrico

Según el Banco Central de Reserva del Perú (BCRP, 2016), inicialmente se planteó el uso de 18 mil m<sup>3</sup> de agua por hectárea al año, pero se estarían usando 23.7 mil m<sup>3</sup>, acumulándose 3 mil millones de m<sup>3</sup> de agua, lo que ha contribuido a los deslizamientos.

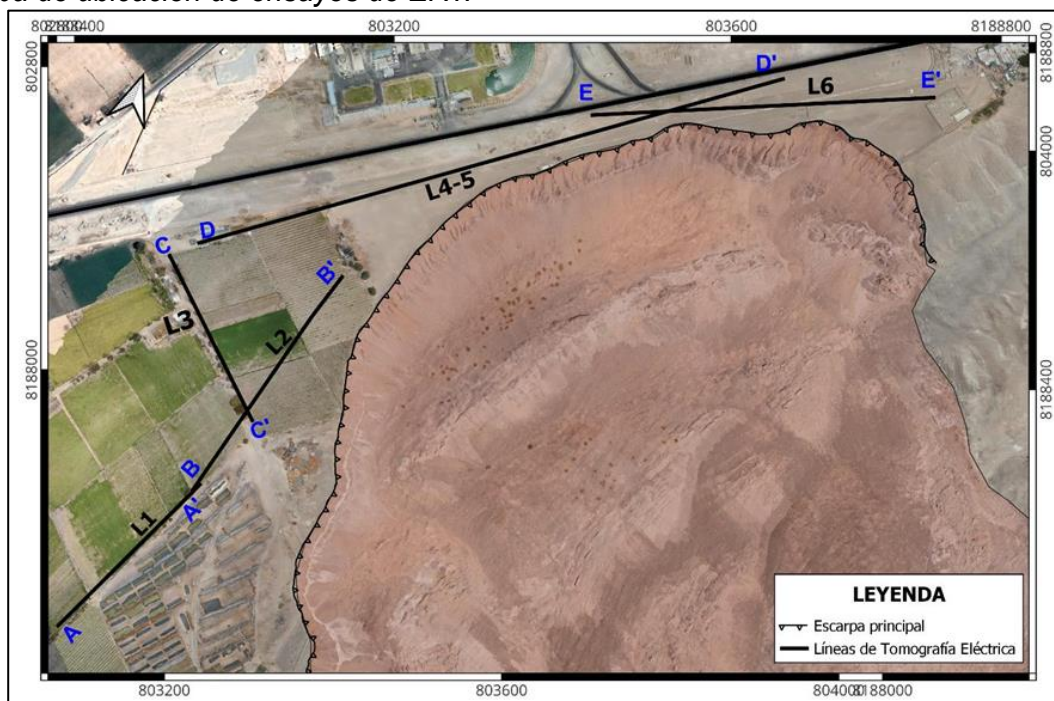
Por otro lado, la ANA (2016), señala que algunos pobladores aplican caudales de hasta 1 L/s/ha, casi el doble del valor aprobado (0.565 L/s/ha). Esto ha generado que infiltraciones descontroladas aumenten la presión hidráulica en el subsuelo y debiliten la estabilidad del terreno.

#### 1.4.2 Evidencia geofísica de infiltración descontrolada

De acuerdo con Perez (2023), para evaluar la presencia de agua subterránea y su relación con la inestabilidad del terreno en el deslizamiento El Zarzal, se realizaron cinco líneas de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) en las cercanías de la corona del deslizamiento de Alto Siguan (ver Figura 9).

**Figura 9**

*Mapa de ubicación de ensayos de ERT.*



Fuente: Perez (2023).

Los resultados de estas mediciones revelaron la existencia de tres capas, cada una de ellas con características contrastantes (Perez, 2023):

**Figura 10**

*Capas identificadas en estudio geofísico de El Zarzal.*



*Fuente:* Adaptado de Perez (2023).

De la Figura 11, se desprende que las Líneas L1, L2 y L3, tienen una presencia de entre 80% y 95% de humedad entre la Capa 1 y Capa 2, lo cual tiene lógica por tener un tendido de líneas muy cercano a la zona de sembríos.

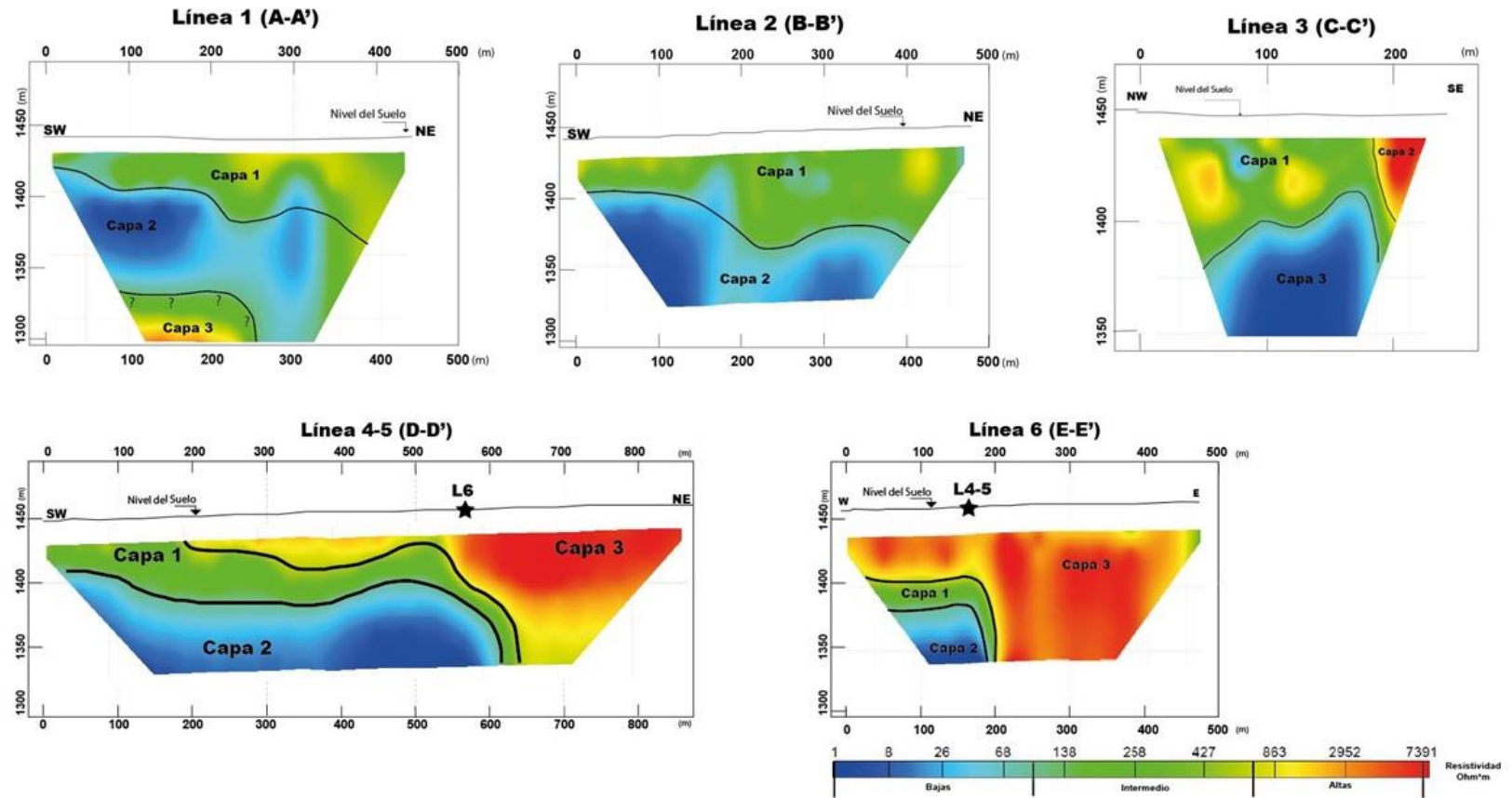
En la Línea L4-5, se observa aproximadamente un 70% de humedad en las mismas capas, sin embargo, el tendido de línea solo abarca un 15% de sembríos en la zona oeste tal como se observa en el mapa de ubicación de ensayos ERT presentados en la Figura 9, lo cual pone en evidencia la expansión lateral de humedad en el subsuelo (Stein et al., 2024).

Por otro lado, en la Línea L6, aunque solo hay un 25% de humedad, esta es una zona donde ya no hay sembríos, por lo que su presencia podría estar relacionada con un nivel freático elevado (Stein et al., 2024).



**Figura 11**

*Sección de 5 líneas ERT realizadas en la zona de estudio.*



*Fuente: Adaptado de Perez (2023).*

Estos resultados concuerdan con los estudios de Stein et al. (2024), que con su modelo hidrogeológico 3D demuestra que el nivel freático se ha elevado hasta 40 m en los últimos 40 años, lo cual ha sido fundamental para el avance del deslizamiento El Zarzal, el cual se inició en 2005 y continúa expandiéndose hasta la actualidad.

### **1.5 Descripción de la realidad problemática**

El Valle de Sigwas, en la región Arequipa, ha sido históricamente una zona de alto valor agrícola, impulsada por la implementación del Proyecto de Irrigación Majes-Sigwas I en 1983. Sin embargo, el uso intensivo del agua para riego ha provocado el ascenso del nivel freático y el incremento de la presión de poros, reduciendo la cohesión de los materiales geológicos y reactivando deslizamientos de gran magnitud (INGEMMET, 2023).

El deslizamiento más representativo, El Zarzal, se reactivó en 2005, ha alcanzado tasas de desplazamiento de hasta 4 metros por mes en algunos sectores, causando pérdidas agrícolas, daños en viviendas e infraestructura vial de los distritos de Majes y San Juan de Sigwas (INGEMMET, 2022) (ver Figura 12). Además, según Zeballos (2020), este fenómeno ha intensificado la contaminación del río Sigwas debido al arrastre de sedimentos y sales, disminuyendo la fertilidad del suelo del valle.

#### **Figura 12**

*Corona del deslizamiento de El Zarzal (2024).*



*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de campo (2024).

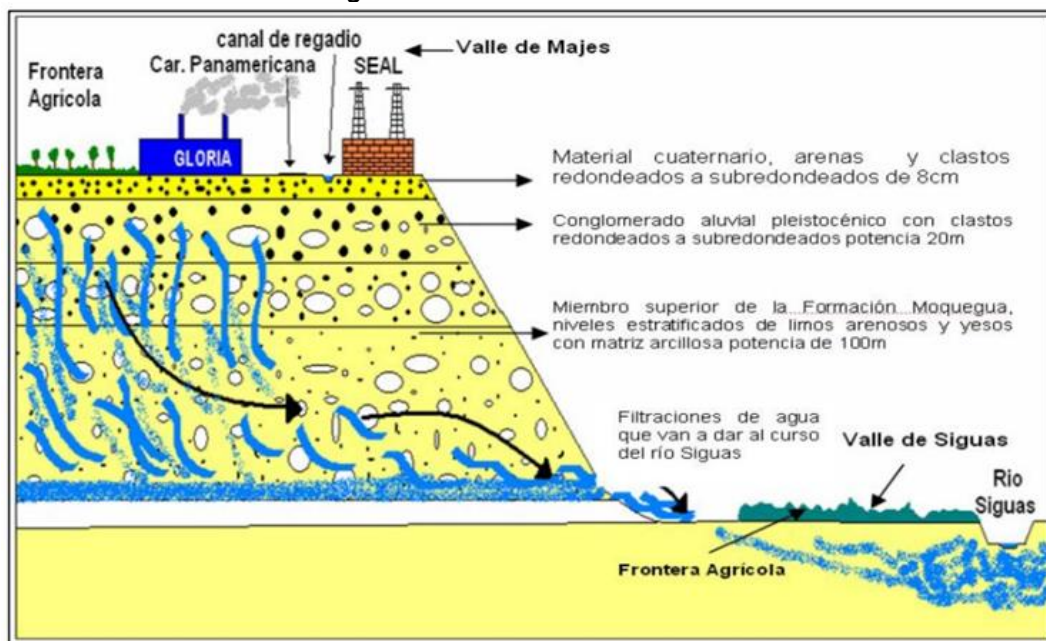


Según INGEMMET (2020), la inestabilidad del terreno responde a la interacción de varios factores: litología poco competente (Formación Moquegua Superior e Inferior, depósitos coluviales y aluviales), geomorfología inestable (Terrazas aluviales, colinas disectadas y vertientes con depósitos de deslizamiento) y pendientes pronunciadas, que en algunos sectores superan los 40°.

El principal factor detonante identificado es la sobresaturación del suelo por infiltración de riego, agravada por filtraciones en canales y reservorios del Proyecto Majes-Siguas I además del uso desmedido del agua en parcelas agrícolas (Aviles y Casallo, 2022; INGEMMET, 2023) (ver Figura 13).

**Figura 13**

*Esquema de la zona de Alto Sigüas antes del deslizamiento.*



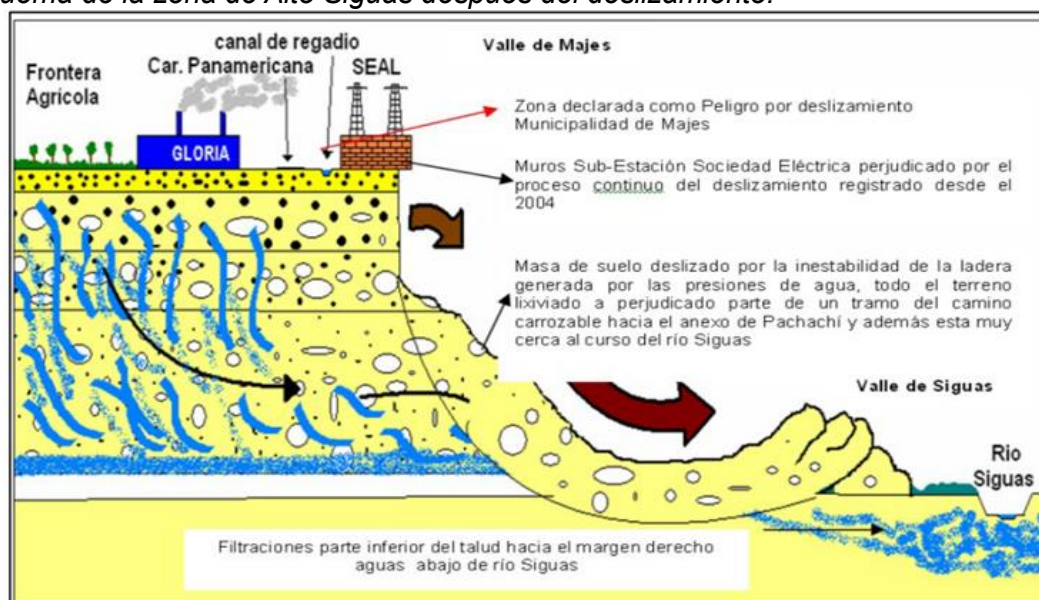
Fuente: Montoya (2019).

Según INGEMMET (2022), el deslizamiento de Alto Sigüas ha provocado pérdidas económicas debido a la destrucción de terrenos agrícolas (cultivos de alfalfa, maíz, papa y cebolla), y ha puesto en riesgo infraestructuras importantes como la planta de leche Gloria y la subestación eléctrica SEAL (ver Figura 14). Hasta el 2022, en la parte alta del valle ya se habían perdido 4.5 hectáreas de terrenos agrícolas y 8.5 hectáreas de terreno eriazo (El Búho, 2022). Además, de acuerdo con Luque y Molina (2018), la infraestructura

vial ha presentado fisuras y deformaciones en caminos rurales y carreteras principales como la Panamericana Sur, afectando la conectividad en la región.

**Figura 14**

*Esquema de la zona de Alto Sigüas después del deslizamiento.*



Fuente: Montoya (2019).

A pesar de los monitoreos de INGEMMET, aún no se ha determinado con precisión las zonas más susceptibles a estos fenómenos ni cómo interactúan los factores geológicos, geomorfológicos y antrópicos en la dinámica del terreno (Pineda y Rodríguez, 2020). Existen vacíos de conocimiento respecto a la influencia del uso del suelo y la humedad en la estabilidad de laderas, lo que limita la planificación de estrategias de mitigación y gestión del riesgo en la zona (Cuanalo et al., 2011).

Ante esta problemática, se requiere identificar con precisión qué zonas del Valle de Sigüas son más susceptibles a los deslizamientos y cómo la aplicación de la metodología Mora-Vahrson puede contribuir a su zonificación y gestión del riesgo (Solís, 2018).

## 1.6 Formulación del problema

### 1.6.1 Problema general

- ¿Cuáles son las zonas susceptibles a deslizamientos en el Valle de Sigüas – Arequipa?

### **1.6.2 Problemas específicos**

- ¿En qué medida la variabilidad geológica impacta en la susceptibilidad a los deslizamientos?
- ¿Cómo inciden las características geomorfológicas y cobertura del suelo en la inestabilidad de laderas de la zona de estudio?
- ¿Cómo influye la humedad en la inestabilidad de laderas de la zona de estudio?

## **1.7 Objetivos del estudio**

### **1.7.1 Objetivo general**

- Determinar las zonas susceptibles a los deslizamientos en el Valle de Sigüas-Arequipa, mediante la aplicación del método Mora-Vahrson.

### **1.7.2 Objetivos específicos**

- Elaborar un mapa geológico detallado de la zona de estudio para identificar la variabilidad geológica y evaluar su impacto como factor condicionante en la susceptibilidad a los deslizamientos, de acuerdo con los criterios del método Mora-Vahrson.
- Elaborar un mapa de pendientes, un mapa geomorfológico y un mapa de cobertura de suelo a escala local para evaluar su influencia en la inestabilidad de las laderas, integrándolos en la ponderación del método Mora-Vahrson.
- Elaborar un mapa de humedad a partir de índices satelitales como el Normalized Difference Moisture Index (NDMI) para evaluar su impacto en la inestabilidad de las laderas de la zona de estudio, incorporándolo en el método Mora-Vahrson.

## **1.8 Hipótesis**

### **1.8.1 Hipótesis general**

- La zona noroeste en el Valle de Sigüas es la más susceptible a deslizamientos, debido a la interacción de suelos sobresaturados, geomorfología desfavorable y litología poco consolidada.

### **1.8.2 Hipótesis específicas**

- La presencia de estratos permeables como conglomerados y areniscas, intercalados con materiales finos, favorece la erosión y reduce la cohesión, siendo estas zonas más susceptibles a deslizamientos.
- Las pendientes abruptas del área de estudio, combinada con coberturas de suelo afectadas por actividades antrópicas, incrementa la susceptibilidad a deslizamientos.
- El aumento de humedad en las laderas, provocado por la sobreirrigación, reduce la cohesión del suelo y favorece la ocurrencia de deslizamientos en la zona de estudio.

## **1.9 Metodología del estudio**

### **1.9.1 Enfoque de la investigación**

Esta investigación adopta un enfoque mixto (Creswell & Creswell, 2018), combinando el análisis cualitativo y cuantitativo para evaluar la susceptibilidad a los deslizamientos en el Valle de Sigüas. El análisis cualitativo se centra en la descripción del terreno, el análisis geomorfológico y la interpretación de procesos geodinámicos a partir de información de campo y antecedentes documentados (Highland & Bobrowsky, 2008). En el componente cuantitativo, se emplean levantamientos topográficos con dron, evaluación de datos geoespaciales y de imágenes satelitales para cuantificar los factores condicionantes y detonantes de los deslizamientos en la zona de estudio (Guzzetti, 2012).

### **1.9.2 Tipo y diseño de la investigación**

El presente estudio es de tipo descriptivo y aplicativo. Descriptivo porque se recopilan datos del lugar para analizarlos y determinar su influencia en la ocurrencia de deslizamientos. Asimismo, es aplicativo, ya que busca identificar y delimitar zonas con distintos grados de susceptibilidad a los deslizamientos mediante la aplicación de conocimientos geológicos y geotécnicos en la gestión del riesgo (Fell et al., 2008).

El diseño de la investigación es no experimental y longitudinal, ya que no se manipulan variables, sino que se realiza un análisis de los fenómenos naturales en su estado natural para observar su comportamiento. Y es longitudinal porque implica el recopilado y análisis de datos en múltiples momentos a lo largo del tiempo, especialmente de las fechas 2019, 201, 2022 y 2024, lo que permite evaluar la evolución de las variables relacionadas con la inestabilidad del lugar.

### 1.9.3 Población y muestra

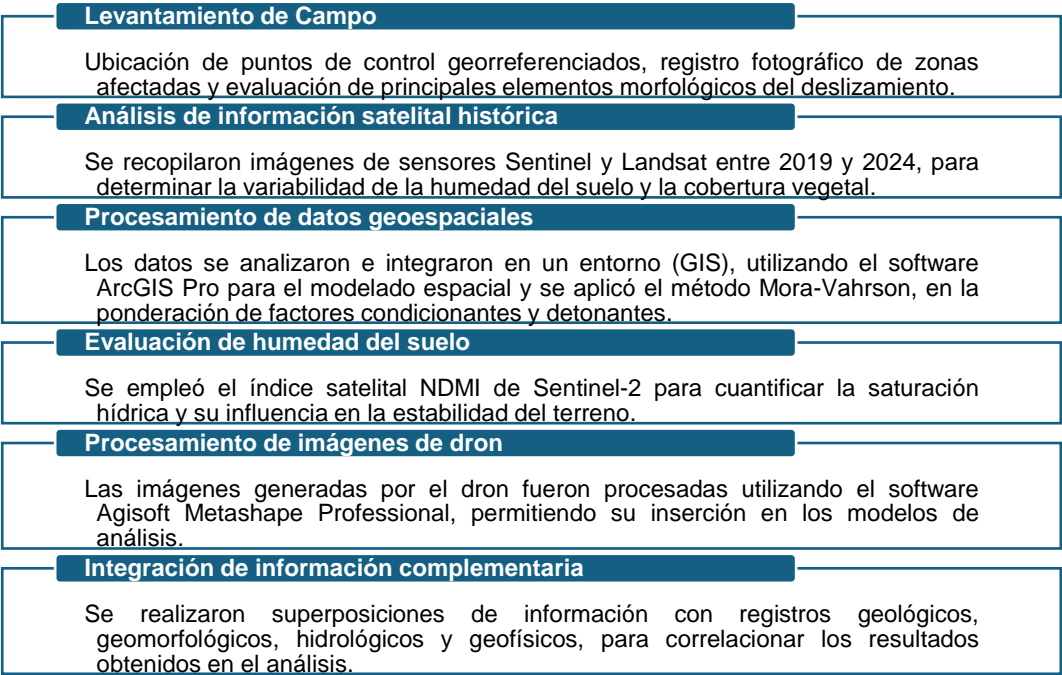
La población de este estudio comprende al área afectada por el deslizamiento El Zarzal y sus alrededores, abarcando una extensión de 225.19 hectáreas. Con respecto a la muestra, se compone de sectores específicos pertenecientes a esta área que han registrado alta actividad de deslizamientos en los últimos años, con desplazamientos de hasta 4 metros mensuales en zonas críticas (INGEMMET, 2023).

### 1.9.4 Recolección y procesamiento de la información

Para las técnicas de recolección y procesamiento de la información, se definieron las siguientes actividades:

**Figura 15**

*Recolección y procesamiento de la información.*



*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de campo y gabinete (2024).

## **1.10 Antecedentes referenciales**

En este acápite se hace un resumen de las investigaciones realizadas a nivel internacional, nacional y local del área de estudio.

### **1.10.1 Antecedentes internacionales**

- La investigación de Ortiz et al. (2023) titulada “Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos en el corregimiento de Chemesquemena, Cesar, Colombia” aplicó la metodología Mora - Vahrson modificada para analizar la susceptibilidad a movimientos en masa. Los resultados indican que aproximadamente el 70% del área, especialmente hacia el noroeste, presenta alta susceptibilidad debido a factores como pendientes pronunciadas, alta pluviosidad, litología compuesta por rocas ígneas intrusivas en avanzado estado de saprolitización, y prácticas agrícolas que requieren riego frecuente, lo cual sobresatura los suelos y altera sus propiedades mecánicas.
- El estudio de Jimenez (2022) titulado “Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de masa aplicando la metodología Mora-Vahrson en la parroquia de Cutchil, Ecuador” aplicó la metodología Mora-Vahrson, utilizando ArcGIS 10.6, para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos en el área. Los resultados revelaron que el 43,28% del área total presenta una susceptibilidad muy alta, afectando principalmente a los sectores de San Antonio, Siticay y Molón. Además, se puso en evidencia que la comunidad carece de conocimiento sobre estos riesgos, resaltando la necesidad de implementar medidas preventivas y de gestión territorial para mitigar los impactos de los deslizamientos.
- El estudio de López et al. (2020) titulado “Aplicación del método Mora-Vahrson para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Manaure, Cesar, Colombia” utilizó la metodología Mora-Vahrson para identificar posibles escenarios de riesgo geológico relacionados con procesos morfodinámicos, evaluando la susceptibilidad bajo diferentes condiciones de actividad sísmica. Los resultados

destacaron la gran utilidad del método Mora - Vahrson para la gestión de riesgos y la planificación del uso del suelo en áreas propensas a deslizamientos.

#### **1.10.2 Antecedentes nacionales**

- Rubio (2023) en su investigación titulada “Zonificación de riesgo a deslizamiento mediante la metodología de Mora Vahrson - Cenepred en el sector El Colorado Parte Baja, Chachapoyas, Amazonas 2022” aplicó el método Mora-Vahrson y la metodología de CENEPRED para analizar el riesgo de deslizamientos en El Colorado, Amazonas. Los resultados indicaron una susceptibilidad media en la zona, con algunas áreas de alta vulnerabilidad y un factor de riesgo significativo. Se recomendó la implementación de un plan de gestión de riesgos para prevenir futuros deslizamientos, resaltando la importancia del uso de metodologías de zonificación en regiones con alto riesgo.
- El estudio de Cornelio (2021) titulado “Comparación del método Mora-Vahrson y Morfométrico en la identificación de zonas susceptibles a deslizamientos, Huancayo” tuvo como objetivo determinar el grado de susceptibilidad a deslizamientos en el talud de corte de la carretera tramo Acopalca – Chamiseria – Vilcacoto, en Huancayo. Se aplicaron los métodos Mora-Vahrson y morfométrico para poder identificar zonas con moderada y alta susceptibilidad a deslizamientos a lo largo del tramo, proporcionando información clave para la prevención y mitigación de riesgos en infraestructuras viales.
- Vigil (2021) en su artículo “Renovación urbana del sector Tuctilla para optimizar el espacio público y residencial, Amazonas, Perú, 2021”, evaluaron la peligrosidad debido a sismos, inundaciones y deslizamientos empleando la metodología Mora-Vahrson. Recolectaron información topográfica mediante GPS, así como datos de precipitación, litología, pendiente y humedad del suelo, para generar mapas de susceptibilidad y clasificar el área en niveles de peligrosidad moderada y mediana. Con base en estos resultados, desarrollaron una propuesta de renovación urbana

según la norma TH.010 del Reglamento Nacional de Edificaciones y el Plan de Desarrollo Urbano local.

### **1.10.3 Antecedentes locales**

- INGEMMET (2023) en su investigación titulada “Monitoreo del deslizamiento de Alto Sigwas durante el periodo 2022” analiza la actividad del deslizamiento de Alto Sigwas, resaltando la retrogresión de su escarpa principal hacia áreas con infraestructura, terrenos agrícolas y zonas pobladas. Además, se observó el desplazamiento de la masa deslizada en dirección al río Sigwas, destacando la necesidad de un monitoreo constante y la implementación de medidas de mitigación para proteger las áreas circundantes.
- El estudio de Montoya (2022) titulado “Estudio geofísico mediante tomografía eléctrica 2D en el sector “El Alto”, Pampas de Majes” hizo uso de la geofísica para caracterizar el subsuelo en las inmediaciones al deslizamiento “El Zarzal”. Se identificaron discontinuidades estructurales como fallas y grietas, así como zonas de baja resistividad asociadas a la concentración de humedad. Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que la sobreirrigación y las fallas geológicas incrementan la susceptibilidad a deslizamientos en el Valle de Sigwas.
- Araujo et al. (2016), en “Análisis de la dinámica de deformación y desplazamiento del deslizamiento de Sigwas mediante imágenes satelitales multitemporales”, describe la evolución temporal del deslizamiento de Sigwas desde su activación en 2005. Utilizando imágenes satelitales multitemporales y de dron, se identificaron bloques suspendidos en la masa deslizada y agrietamientos en la corona, clasificando el área en zonas alta, media y baja. Se observó que la zona baja presenta los mayores desplazamientos, asociados a la saturación hídrica y la acumulación de sedimentos, resaltando la necesidad de estrategias de manejo hídrico y monitoreo continuo para mitigar los riesgos asociados.



## Capítulo II. Marco teórico y conceptual

### 2.1 Marco teórico

#### 2.1.1 *Deslizamientos: conceptos y clasificación*

Los deslizamientos de tierra son procesos geodinámicos que implican el desplazamiento de masas de suelo, roca o detritos bajo la influencia de la gravedad. Estos pueden ocurrir de manera repentina o gradual, dependiendo de la interacción entre factores condicionantes y detonantes. Se consideran un tipo de movimiento en masa que afecta la estabilidad de laderas y taludes naturales o artificiales (Turner & Schuster, 1996).

#### **Figura 16**

*Fotografía del deslizamiento El Zarzal.*



*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de campo (2024).

**2.1.1.1 Clasificación de los deslizamientos.** Según la clasificación de Turner & Schuster (1996), los principales tipos de deslizamientos son rotacionales, traslacionales, caída de rocas, flujos de detritos y reptación del suelo.

El deslizamiento de El Zarzal es del tipo rotacional retrogresivo, caracterizado por una rotación hacia atrás durante el deslizamiento tal como se puede observar en la Figura 16. Este fenómeno está vinculado a la sobresaturación del suelo por riego intensivo,

además de la presencia de estratos geológicos poco consolidados y depósitos coluviales que favorecen la inestabilidad (Araujo et al., 2016).

### 2.1.2 Factores condicionantes de los deslizamientos

Los factores condicionantes influyen en el nivel de susceptibilidad de una ladera a sufrir deslizamientos. Los principales factores condicionantes utilizados están compilados en la tabla siguiente:

**Tabla 3**

#### *Factores condicionantes de deslizamientos.*

Factor Condicionante	Descripción
Litología y propiedades geotécnicas	La resistencia y estabilidad de los suelos y rocas están relacionadas directamente con su composición y grado de consolidación. Terzaghi (1950) estableció que los materiales con índices altos de plasticidad y contenido de arcilla elevados tienden a expandirse y perder resistencia cuando están saturados, aumentando su susceptibilidad a los deslizamientos.
Geomorfología y procesos erosivos	Las diversas formas de relieve, como las terrazas aluviales y colinas disectadas, afectan la estabilidad del terreno. Según el modelo de ciclo de erosión de Davis (1909), las laderas con elevada erosión y pendientes pronunciadas presentan una mayor susceptibilidad a los deslizamientos debido a la remoción progresiva del material superficial.
Pendiente del terreno	La inclinación de una ladera es un con una influencia directa en la estabilidad del suelo. Montgomery & Dietrich (1994) determinaron que con pendientes superiores a 25°, la influencia de la gravedad aumenta considerablemente, favoreciendo el deslizamiento del material superficial.
Cobertura del suelo y uso del terreno	La vegetación y el tipo de uso que se le da al suelo afectan la erosión y la infiltración de agua. El Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED) resalta que la conversión de zonas naturales en áreas de cultivo puede influir aumentando la inestabilidad del suelo al reducirse la cobertura natural del terreno.

*Nota:* Adaptado de Mujica y Pacheco (2013).

### 2.1.3 Factores detonantes de los deslizamientos

Según Highland & Bobrowsky (2008), los factores detonantes son eventos que desencadenan un deslizamiento en una ladera considerada previamente inestable, los más usuales son los sismos, precipitaciones y la humedad por sobresaturación. Sin embargo,

debido a las condiciones de esta investigación, la humedad es considerada como el único factor detonante tal como se observa en la tabla siguiente:

**Tabla 4**

***Factores detonantes de deslizamientos.***

<b>Factor Condicionante</b>	<b>Descripción</b>
Humedad	La infiltración excesiva de agua genera un aumento en la presión de poros y reduce la cohesión del material (Duncan & Wright (2014). En regiones áridas con riego intensivo, esta sobresaturación del suelo puede desempeñar un papel similar al de las precipitaciones en la activación de deslizamientos (Lacroix et al., 2020).

*Nota:* Adaptado de García-Chevesich et al. (2013).

#### **2.1.4 Métodos de evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos**

La evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos se realiza mediante métodos determinísticos, heurísticos, estadísticos y geoespaciales (Mendoza y Aristizábal, 2017). Uno de los enfoques heurísticos más utilizados y con posibilidad de mejoras es el Método Mora-Vahrson (1994), el cual integra factores intrínsecos del terreno (litología, pendiente, geomorfología y cobertura de suelo) con factores detonantes (humedad) para clasificar la susceptibilidad. Según Quesada y Feoli-Boraschi (2018), este método ha demostrado ser eficaz en la determinación de zonas susceptibles a deslizamientos, especialmente cuando se implementa en entornos GIS.

## **2.2 Marco conceptual**

### **2.2.1 Susceptibilidad a deslizamientos**

Es la propensión de una ladera o área a sufrir movimientos en masa, determinada por condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrológicas, sin considerar la frecuencia o magnitud de eventos previos (Fell et al., 2008).

El método de Mora-Vahrson (1994) evalúa esta susceptibilidad mediante la aplicación de análisis multicriterio asignando pesos a diversos factores y combinándolos para generar un índice en mapas de zonificación de riesgo.

En el área del deslizamiento El Zarzal, el análisis de susceptibilidad es necesario debido a la interacción de factores como la alta humedad del suelo, la composición

geológica poco consolidada, pendientes pronunciadas y geomorfología variada. La aplicación de técnicas de teledetección con entornos GIS facilita la identificación de zonas vulnerables para la gestión del riesgo de deslizamientos (Berov et al., 2016).

### 2.2.2 Factores condicionantes en el Valle de Sigvas

**2.2.2.1 Litología en el Valle de Sigvas.** Según Araujo et al. (2016), las unidades geológicas del Valle de Sigvas identificadas son:

**Tabla 5**

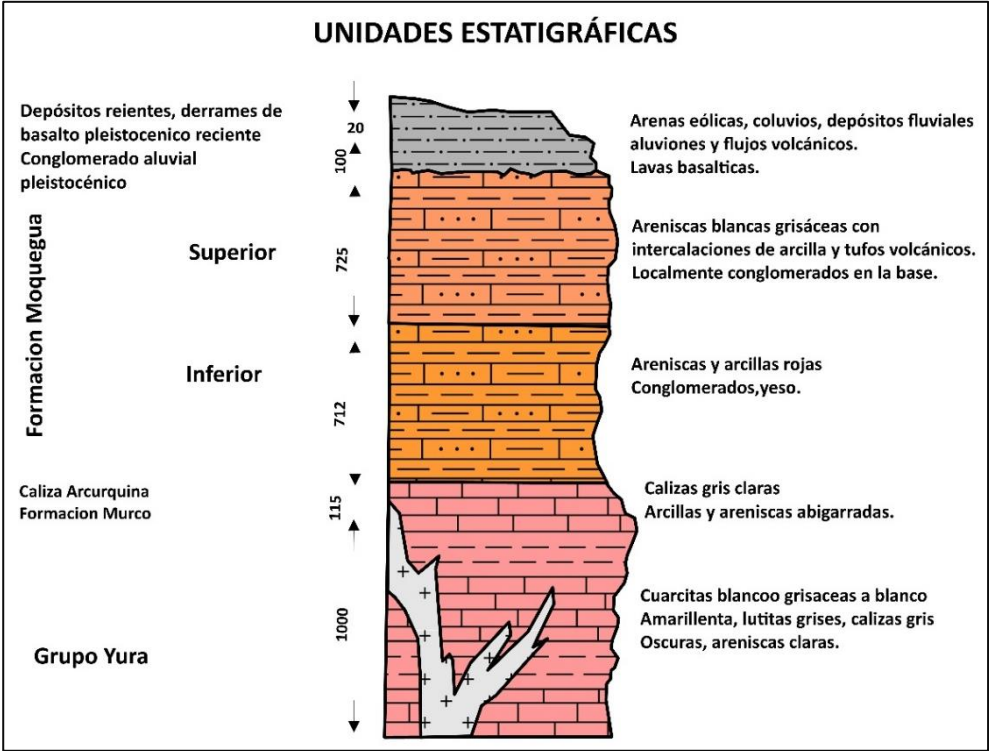
*Unidades geológicas en el Valle de Sigvas.*

Unidades Geológicas	Descripción
Formación Moquegua (Miembro Superior e Inferior)	Compuesta principalmente por conglomerados y areniscas arcillosas. Son altamente porosos y susceptibles a la saturación hídrica, lo que reduce su cohesión y estabilidad (ver Figura 17).
Formación Millo	Constituida por tufos volcánicos y areniscas, cuyo comportamiento mecánico varía según el grado de compactación y alteración de estos materiales.
Depósitos coluviales y aluviales	Materiales no consolidados que actúan como zonas de acumulación de humedad, favoreciendo la inestabilidad del terreno.

*Nota:* Adaptado de Araujo et al. (2016).

**Figura 17**

*Columna estratigráfica de la zona de estudio.*



*Fuente:* Montoya (2019).

**2.2.2.2 Geomorfología del Valle de Sigüas.** Según el Sistema de Información Geológico y Catastral Minero (GEOCATMIN, 2025), las principales unidades geomorfológicas identificadas en la zona de estudio son:

**Tabla 6**

*Unidades geomorfológicas en el Valle de Sigüas.*

Unidades Geomorfológicas	Descripción
Terrazas aluviales	Áreas elevadas que son formadas por sedimentación fluvial, susceptibles a inestabilidad cuando se sobresaturan.
Colina y lomada disectada en roca sedimentaria	Estructuras con relieves irregulares de pendientes pronunciadas y alta disección erosiva, lo que favorece la inestabilidad del terreno.
Vertientes con depósitos de deslizamiento	Sectores previamente afectados por movimientos en masa, con alto riesgo de reactivación. Es donde se categoriza el deslizamiento de El Zarzal.
Altiplanicie sedimentaria	Superficie extensa y relativamente plana, con suelos poco consolidados que pueden facilitar la infiltración de agua y la pérdida de su estabilidad, especialmente en zonas agrícolas.

*Nota:* Adaptado de Geocatmin (2025).

**2.2.2.3 Pendiente del terreno en el Valle de Sigüas.** En la zona de estudio se utiliza la clasificación de pendientes hecha por Mujica y Pacheco (2013) debido a la topografía variable presente, en la cual se plantean seis categorías: Muy baja, baja, moderada, fuerte, muy fuerte y extrema. Adicionalmente se identifican taludes con alturas que varían entre los 85 m a 100 m entre la corona y la cabeza del deslizamiento. Con respecto a la altura promedio entre la corona y la parte baja del valle, es de aproximadamente 215 m.

**2.2.2.4 Cobertura del suelo y uso del terreno.** El uso intensivo del suelo para actividades agrícolas en el Valle de Sigüas ha incrementado la erosión y la infiltración de agua. La conversión de áreas naturales en tierras de cultivos ha reducido la estabilidad del suelo, aumentando de esta manera el riesgo a los deslizamientos. Además de los cultivos, la región presenta otras coberturas del suelo como áreas construidas, suelos sin cobertura, pastizales, vegetación densa y cuerpos de agua (ESRI Land Cover, 2025).



### **2.2.3 Factor detonante en el Valle de Sigwas**

**2.2.3.1 Humedad.** Principal factor detonante en la región, debido a la infiltración de agua por sobrerriego en estratos permeables, lo que incrementa la presión de poros y reduce la cohesión del material. Según Sentinel Hub EO (2025), se identifican zonas de alta humedad, moderada humedad, baja humedad y secas.

En la Figura 18 se observan niveles de humedad a una profundidad aproximada de 131 m, lo que evidencia el aumento del nivel freático.

#### **Figura 18**

*Fotografía de zona de humedad en ladera del Valle de Sigwas.*



*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de campo (2024).

### **2.2.4 Método Mora-Vahrson**

Mora-Vahrson (1994) desarrollaron originalmente un modelo basado en un sistema de clasificación de factores que permite evaluar la susceptibilidad a los deslizamientos. El método se basa en dos indicadores principales: la susceptibilidad intrínseca y el indicador de desencadenamiento, que son calculados a partir de ecuaciones que ponderan la influencia de la pendiente, la litología, la humedad del suelo, la sismicidad y la precipitación.

La ecuación original de la metodología es:

$$H = (Sr \times Sl \times Sh) \times (Ts + Tp) \quad (1)$$

Donde:

H = Susceptibilidad a los deslizamientos

Sr = Factor de pendiente

Sl = Factor de litología

Sh = Factor de humedad

Ts = Factor de intensidad sísmica

Tp = Factor de intensidad de precipitación.

El resultado de esta ecuación permite clasificar el nivel de peligro de deslizamientos en cinco categorías. Por otro lado, para la determinación de los pesos dados a los factores que intervienen en los procesos de deslizamientos Mora (2004), propuso lo siguiente:

**Tabla 7**

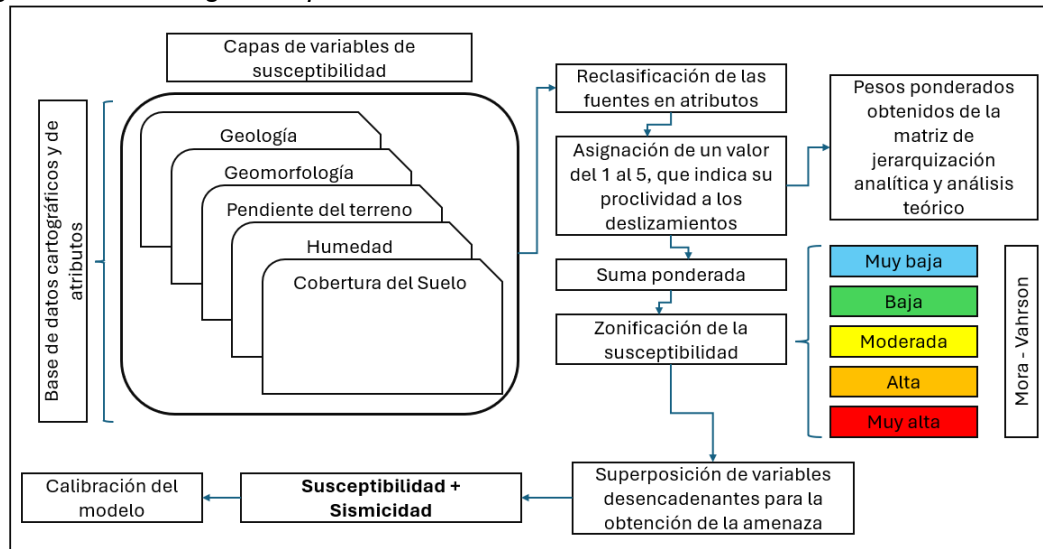
*Clasificación de la susceptibilidad - Mora (2004).*

Clase	Calificativo de susceptibilidad al deslizamiento	Descripción
I	Muy baja	Sectores estables sin necesidad de medidas correctivas. Se debe considerar la influencia de áreas cercanas con susceptibilidad moderada a muy alta. Aptos para urbanización densa y edificios esenciales como hospitales, escuelas y bomberos.
II	Baja	Sectores estables que solo requieren correcciones menores para grandes infraestructuras. Se debe considerar la influencia de áreas cercanas con susceptibilidad moderada a muy alta. Aptos para urbanización densa y edificios esenciales. Especial atención a rellenos mal compactados.
III	Moderada	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos o mejoras del sitio, como movimientos de tierra, estructuras de retención y manejo de aguas. Especial cuidado con rellenos mal compactados. Recomendado para urbanización de baja densidad.
IV	Alta	Alta probabilidad de deslizamiento (<50%) ante sismos fuertes o lluvias intensas. Requiere estudios de estabilidad detallados y medidas correctivas para su uso. De lo contrario, deben conservarse como áreas de protección.
V	Muy alta	Muy alta probabilidad de deslizamiento (>50%) ante sismos fuertes o lluvias intensas. Uso urbano prohibido; recomendado como área de protección.

*Nota:* Adaptado de Mora (2004).

**Figura 19**

*Diagrama metodológico de procesamiento de información.*



Fuente: Adaptado de Mujica y Pacheco (2013).

**2.2.4.1 Adaptación metodológica para el Valle de Sigüas.** En este estudio, se utiliza una versión modificada del método Mora–Vahrson original, adaptada a las condiciones particulares del Valle de Sigüas. Ha sido ajustada para incorporar un análisis basado en la superposición ponderada en ArcGIS Pro, donde cada factor es multiplicado por un valor de peso asignado según su influencia en la inestabilidad del terreno (Mujica y Pacheco, 2013).

La ecuación modificada para el Valle de Sigüas es:

$$H = (0.10 \times Cs) + (0.35 \times Hs) + (0.25 \times P) + (0.15 \times G) + (0.15 \times Gm) \quad (2)$$

Donde:

H = Susceptibilidad a los deslizamientos

Cs = Cobertura del suelo (10%)

Hs = Humedad del suelo (35%)

P = Pendientes (25%)

G = Geología (15%)

Gm = Geomorfología (15%)

En este modelo, la humedad del suelo es el único factor detonante, con la mayor ponderación (35%), debido a que la sobresaturación causada por riego intensivo es el principal desencadenante de deslizamientos en el Valle de Sigüas.



### 2.2.4.2 Justificación de la modificación del método Mora-Vahrson

Las justificaciones para la modificación del método están compiladas en la siguiente tabla:

**Tabla 8**

*Justificación de la modificación del método Mora-Vahrson original.*

Modificación	Justificación
Eliminación de la sismicidad y la precipitación como factores detonantes	En la metodología original, estos factores juegan un rol decisivo en la activación de deslizamientos. Sin embargo, en el Valle de Sigüas, la actividad sísmica no ha sido un detonante significativo, y las precipitaciones son escasas. En cambio, la humedad del suelo adquiere un peso preponderante, ya que la sobresaturación por riego es la principal causa de inestabilidad (Stein et al., 2024).
Incorporación de la geomorfología y cobertura de suelo	Tomando en cuenta a las modificaciones del método original hechas por Mujica & Pacheco (2013). Se ha verificado que la geomorfología influye directamente en la susceptibilidad de las laderas y la cobertura del suelo cobra relevancia ya que puede mejorar o agravar tanto la infiltración de agua como la protección contra la erosión
Uso de la Superposición Ponderada en ArcGIS Pro	Se aplica una técnica de análisis espacial en GIS donde factor y subfactor puede integrarse cuantitativamente a la ecuación de ponderación, facilitando la generación de mapas de susceptibilidad a deslizamientos con mayor precisión.

*Nota:* Elaboración propia a partir de trabajos de gabinete (2024).

**2.2.4.3 Aplicabilidad y beneficios.** Esta versión modificada del método Mora-Vahrson optimiza la identificación de zonas susceptibles a deslizamientos en el Valle de Sigüas, por lo que su implementación permitirá:

- Elaborar mapas de susceptibilidad con mayor nivel de detalle y precisión.
- Identificar zonas críticas donde la humedad acumulada actúe como principal detonante.
- Analizar la evolución de la cobertura del suelo y los cambios en la humedad, mejorando la precisión en la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos.
- Diseñar estrategias de mitigación basadas en la gestión eficiente del riego y la protección de laderas.

**2.2.5 Teledetección y GIS en la evaluación de deslizamientos**

En el presente estudio, se implementarán herramientas de teledetección y GIS que son de suma importancia para identificar y monitorear deslizamientos. La teledetección utiliza imágenes satelitales para calcular índices como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y el NDMI (Normalized Difference Moisture Index), que permiten detectar cambios en la vegetación y la humedad del suelo (Rahman y Mesev, 2019). Al integrar estos datos de teledetección en el GIS junto con información geológica, topográfica e hidrológica, es posible generar mapas de susceptibilidad a deslizamientos, facilitando la planificación y mitigación de riesgos.

**2.2.6 Normativa y gestión del riesgo de deslizamientos**

En el Perú, la gestión del riesgo de desastres naturales, incluyendo los deslizamientos, está regulada por el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), creado mediante Ley N° 29664. Este sistema actúa en coordinación con la Presidencia del Consejo de ministros (PCM) a través de la Secretaría de Gestión del Riesgo de Desastres, que actúa como autoridad normativa (Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI], 2024).

**Tabla 9**

*Principales normativas en materia de riesgos geológicos en Perú.*

Normativa	Descripción
Ley N° 29664	Ley que crea el SINAGERD, definiendo lineamientos para la prevención y mitigación de desastres naturales.
Decreto Supremo N° 048-2011-PCM	Aprueba la reglamentación de la Ley N° 29664, que detalla los procesos para la gestión del riesgo de desastres.
Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (PLANAGERD) 2022 – 2030	Instrumento que establece las acciones requeridas para concretar lo establecido en la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.

*Nota:* Adaptado de INDECI (2024).

Si bien en el Valle de Sigwas se han realizado estudios previos sobre la dinámica de los deslizamientos, aún no se cuenta con un plan de manejo integral para mitigar sus impactos (Araujo et al., 2024). Este estudio contribuirá a la identificación de áreas de alto riesgo y proporcionará información clave para futuras estrategias de prevención.

**2.2.7 Términos de referencia (TdR) y estudios de impacto ambiental (EIA)**

Debido al proyecto Majes – Sigwas, podemos encontrar los siguientes documentos oficiales relativos a estudios ambientales:

**Tabla 10**

*Principales TdR y EIA del proyecto Majes-Sigwas.*

Título	Año	Descripción
Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) de la Infraestructura Hidráulica Mayor del Sistema Regulado Colca - Sigwas (Proyecto Majes Sigwas I Etapa), Para la Autoridad Autónoma de Majes	2022	Provee directrices de adecuación y manejo ambiental para la infraestructura hidráulica del Proyecto Majes - Sigwas I ya que se identificaron una serie de efectos negativos sobre el medio físico tal como alteración en la calidad del aire, degradación del suelo, deterioro de la calidad del agua y erosión hídrica, entre otros.
Términos de Referencia (TdR) para la Modificación del Estudio de Impacto Ambiental Detallado (MEIA-d) de la Represa Angostura	2023	Establece los criterios para la actualización y modificación de aspectos clave del proyecto Majes Sigwas II. Se plantea en los puntos más relevantes la incorporación de nuevas áreas en la evaluación, estrategias de relocalización para centro poblado Pusa Pusa, actualización de compromisos ambientales y la implementación de medidas de mitigación ante la descarga de aguas en el río Chalhuanca.
Estudio de Impacto Ambiental de la Represa de Angostura y Gestión Ambiental a Nivel Definitivo	2010	Evalúa los efectos que la construcción, operación y cierre de esta infraestructura podrían generar en el entorno natural y socioeconómico. La represa de Angostura ubicada en Pampas de Pusa Pusa y La Calera, afectarían directamente al Proyecto Majes-Sigwas II

*Nota:* Adaptado de la Autoridad Autónoma de Majes (AUTODEMA, 2024).

## Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

El presente capítulo describe el proceso metodológico utilizado para determinar la susceptibilidad a deslizamientos en el Valle de Sigüas, integrando análisis geoespaciales, interpretación de imágenes satelitales y evaluación de factores geológicos, geomorfológicos e hidrológicos. Para ello, se elaboraron mapas temáticos que representan la distribución espacial de las principales variables que influyen en la estabilidad del terreno.

El método Mora-Vahrson se ha aplicado como herramienta principal para la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos, utilizando datos obtenidos a partir de imágenes satelitales Sentinel-2, levantamientos topográficos con dron y observaciones de campo. Adicionalmente, se han incorporado los resultados de los informes técnicos más recientes de INGEMMET (2020, 2022, 2023), los cuales han identificado la sobresaturación del suelo como el principal factor detonante en la región y han evidenciado desplazamientos de hasta 4 metros mensuales en algunas zonas del desplazamiento.

### 3.1 Elaboración de mapas temáticos

#### 3.1.1 Mapa geológico

Se elaboró a partir de datos geológicos obtenidos de GEOCATMIN (2025), a escala 1:50,000 y observaciones de campo realizadas en mayo de 2024. En la zona de estudio, las principales unidades geológicas identificadas son:

**Tabla 11**

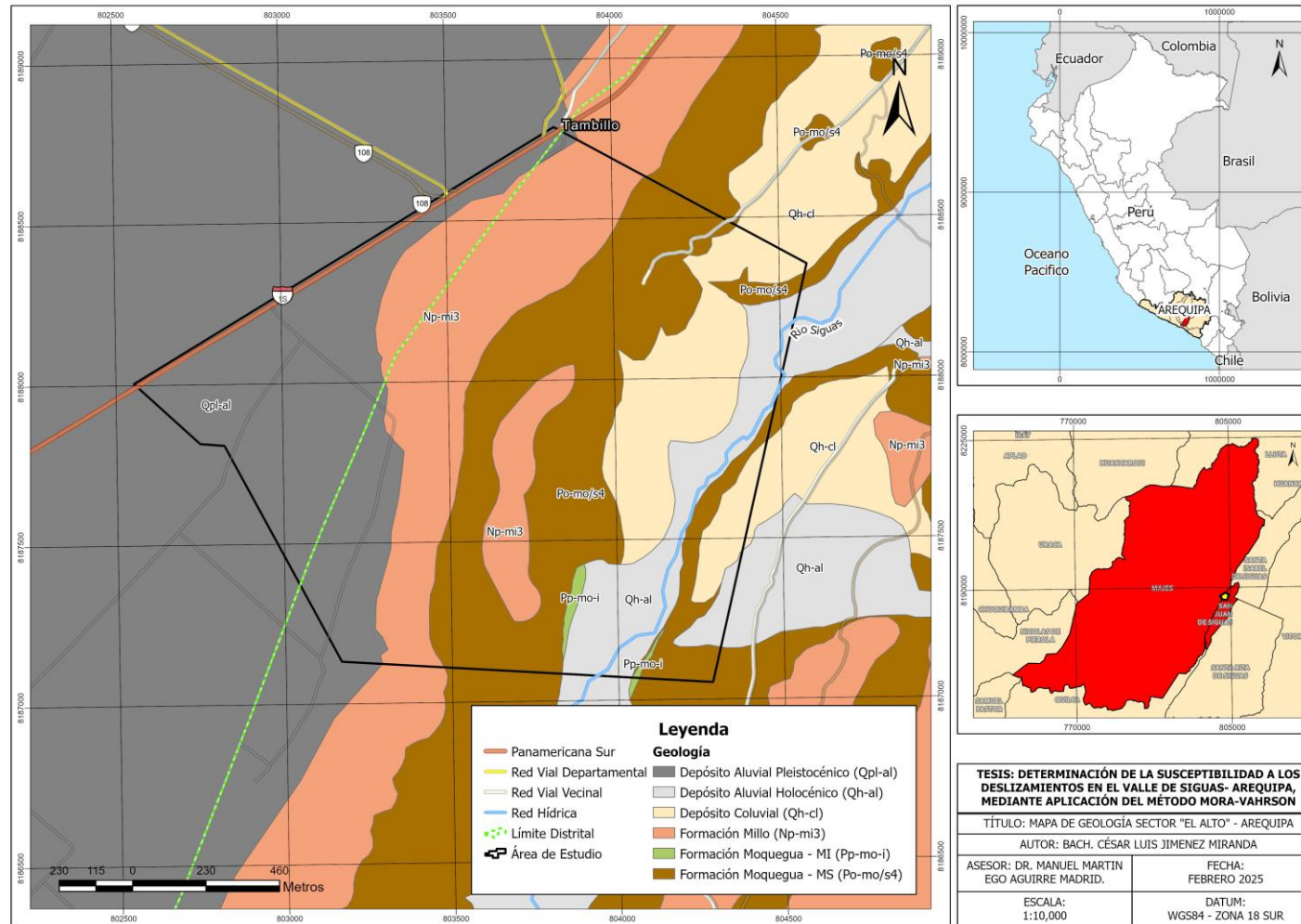
*Factor geología y sus atributos en el mapa temático.*

Atributos	Ponderación
Depósito aluvial pleistocénico	3
Depósito aluvial holocénico	4
Depósito coluvial	5
Formación Millo	2
Formación Moquegua (Miembro Inferior)	2
Formación Moquegua (Miembro Superior)	2

*Nota:* Elaboración propia a partir de trabajos en gabinete (2025).

**Figura 20**

*Mapa geológico de la zona de estudio.*



*Fuente:* Adaptado de GEOCATMIN y actualizado a partir de trabajos de campo (2024).

Según INGEMMET (2023), la zona del deslizamiento de Alto Sigwas se encuentra en un área clasificada como de peligro muy alto, esto se debe a la presencia de materiales no consolidados y acumulaciones de humedad en depósitos coluviales.

### 3.1.2 Mapa de pendientes

En mayo de 2024 se realizó un levantamiento topográfico utilizando un dron DJI Mavic 2 Pro, lo que permitió generar un Modelo Digital de Elevación (MDE). A partir de este MDE, se elaboró un mapa de pendientes que facilita el análisis de la variabilidad del relieve en la zona de estudio.

Las pendientes se clasificaron en seis categorías de acuerdo con la metodología de Mujica y Pacheco (2013):

**Tabla 12**

*Factor pendientes y sus atributos en el mapa temático.*

Atributos	Ponderación
Muy baja (0° - 8°)	1
Baja (8° - 16°)	2
Moderada (16° - 24°)	3
Fuerte (24° - 32°)	4
Muy fuerte (32° - 40°)	5
Extrema (> 40°)	5

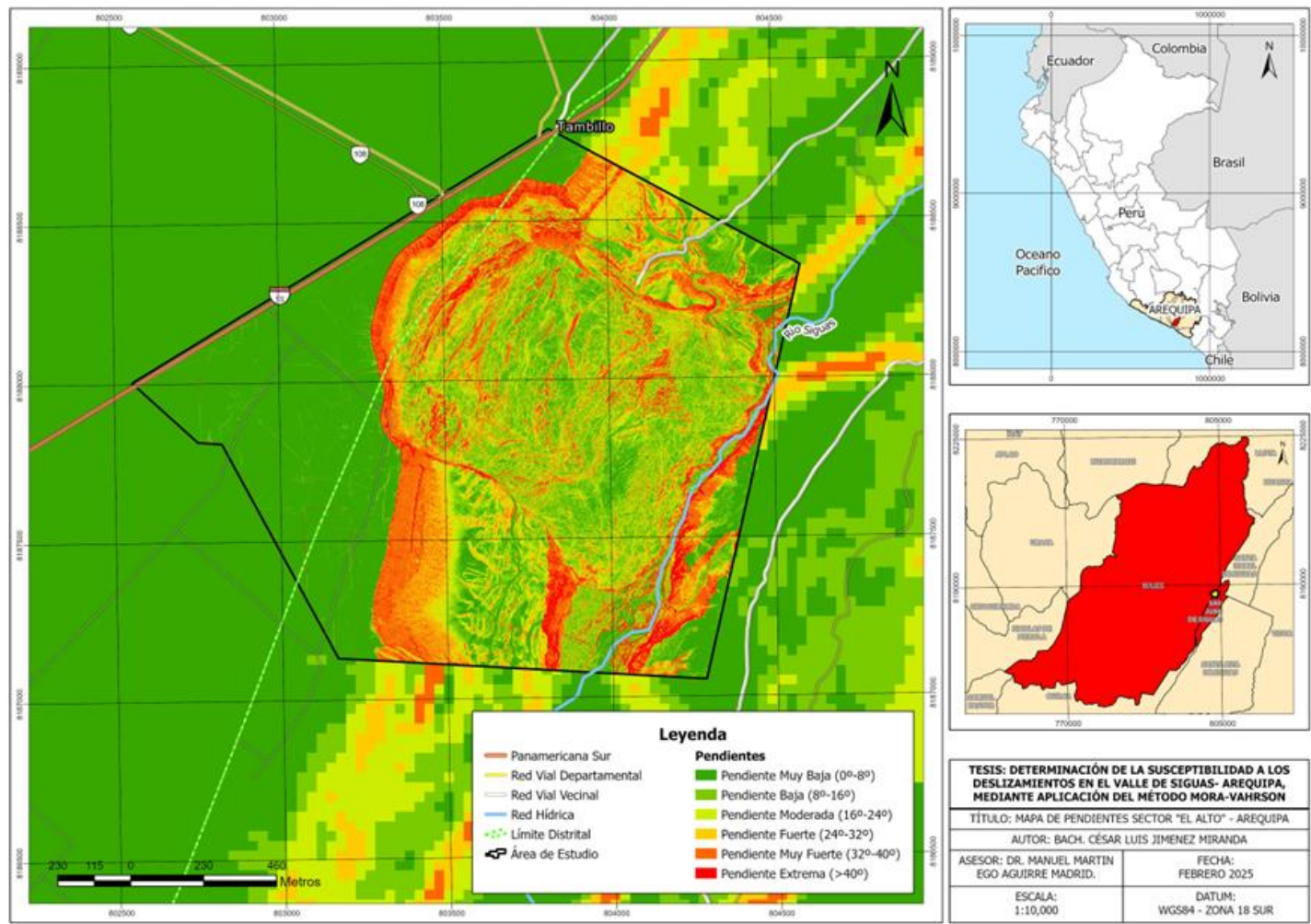
*Nota:* Elaboración propia a partir de trabajos en gabinete (2025).

El mapa de pendientes de la Figura 21 muestra áreas con taludes pronunciados, con alturas promedio de 100 m, alcanzando inclinaciones mayores a 40° en sectores críticos como la corona del deslizamiento. Estas características, combinadas con la geología poco consolidada y la sobresaturación del suelo, han favorecido la reactivación del deslizamiento y la movilidad del material en la margen derecha del Valle de Sigwas.

En este contexto, el mapa de pendientes constituye una herramienta fundamental para la identificación de zonas críticas, ya que permite evaluar la influencia de la inclinación del terreno en la estabilidad de laderas (Van Westen et al., 2008).

Figura 21

Mapa de pendientes de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia a partir de vuelo de dron en trabajos de campo (2024).

3.1.3 Mapa geomorfológico (2019 – 2024)

Ha sido elaborado en base a datos obtenidos de GEOCATMIN (2025), ortofotos de alta resolución y observaciones de campo realizadas en 2024. En la zona de estudio se han identificado cuatro unidades geomorfológicas principales, clasificadas de la siguiente manera:

Tabla 13

*Factor geomorfológico y sus atributos en el mapa temático.*

Atributos	Ponderación
Altiplanicie sedimentaria (AP-s)	2
Colina y lomada disectada en roca sedimentaria (RCLD-rs)	3
Terraza aluvial (T-al)	1
Vertiente con depósito de deslizamiento (V-dd)	5

*Nota:* Adaptado de GEOCATMIN (2025).

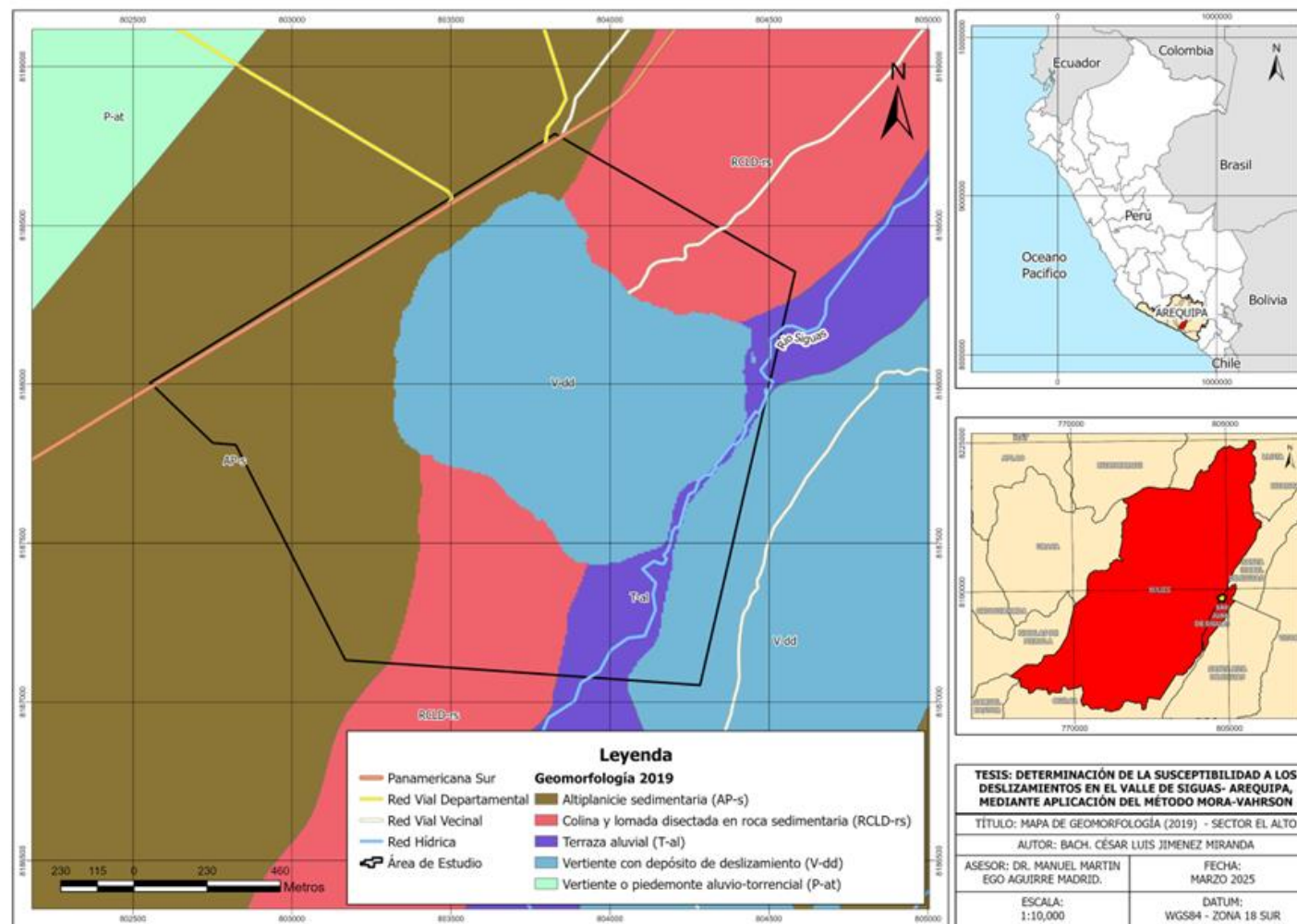
Cada una de estas unidades presenta diferentes grados de estabilidad y susceptibilidad a movimientos en masa, siendo un factor clave en la evaluación del riesgo en el Valle de Sigüas.

El mapa geomorfológico, por lo tanto, no solo permite visualizar la distribución de las unidades del relieve, sino que también ayuda a comprender cómo las interacciones con otros factores están influenciando la susceptibilidad a deslizamientos en el Valle de Sigüas. Esta integración con otros mapas temáticos facilitará la identificación de zonas críticas en la zona de estudio.



**Figura 22**

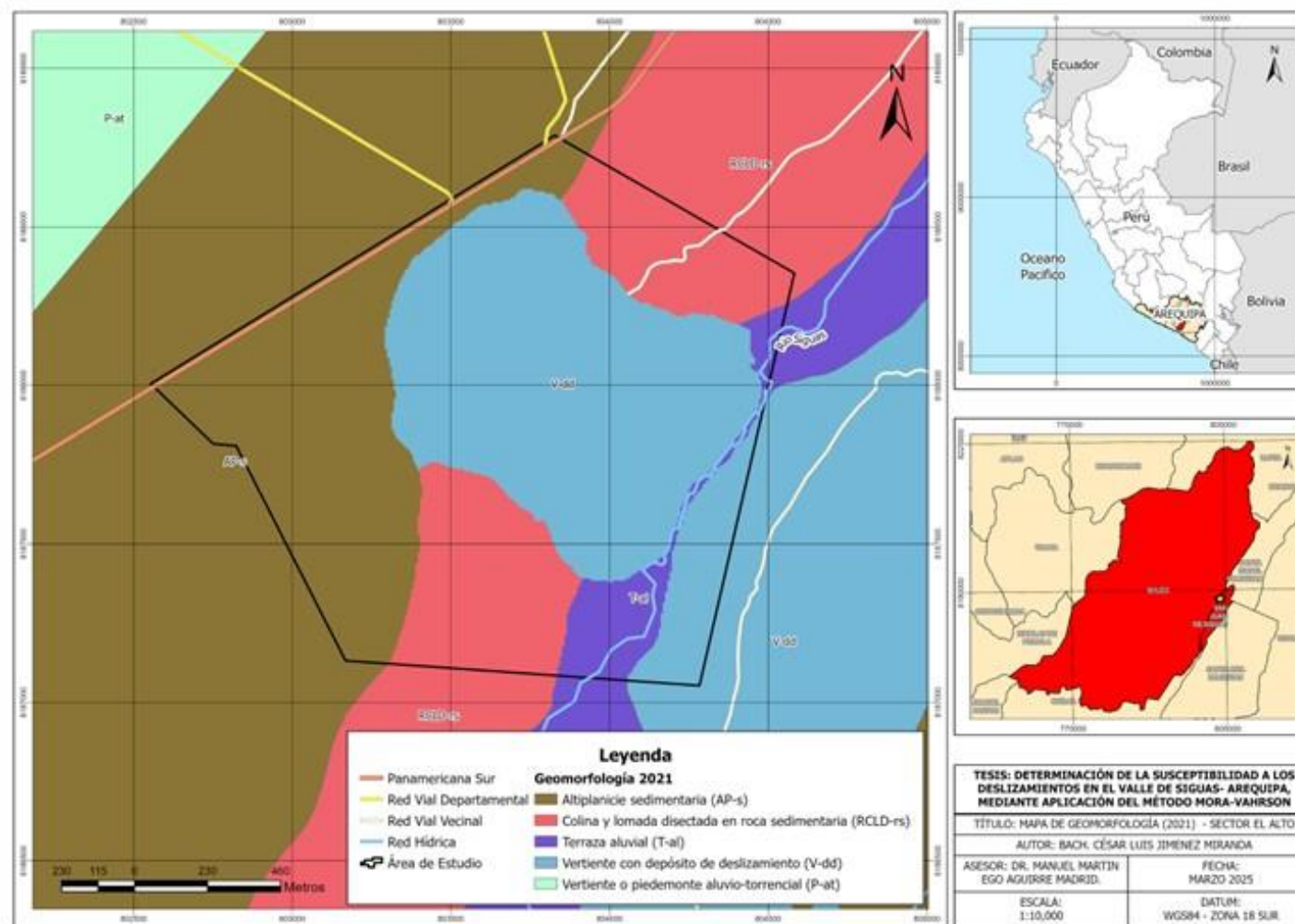
*Mapa geomorfológico de la zona de estudio (2019).*



*Fuente: Adaptado de INGEMMET (2020).*

**Figura 23**

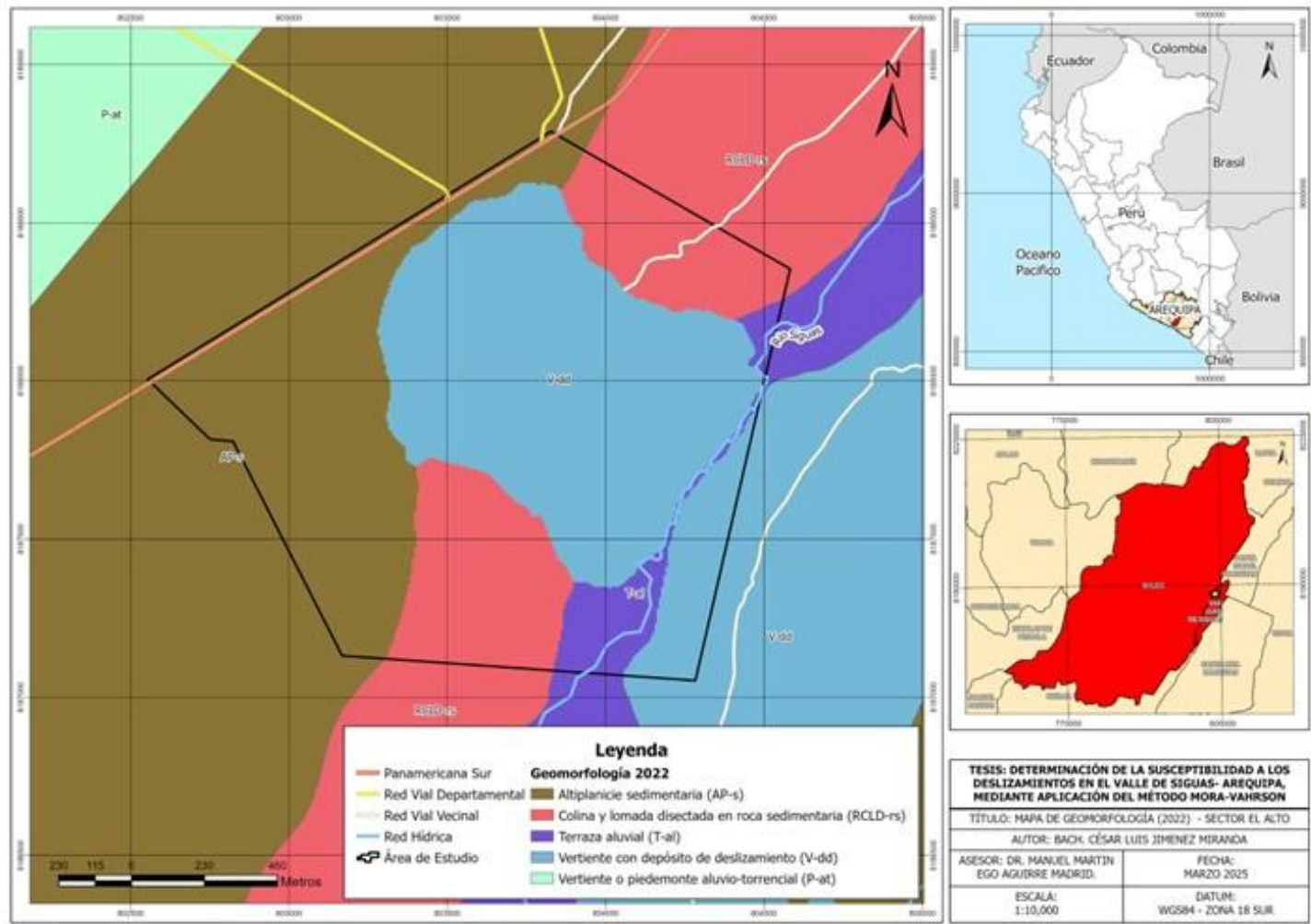
*Mapa geomorfológico de la zona de estudio (2021).*



*Fuente: Adaptado de INGEMMET (2021).*

Figura 24

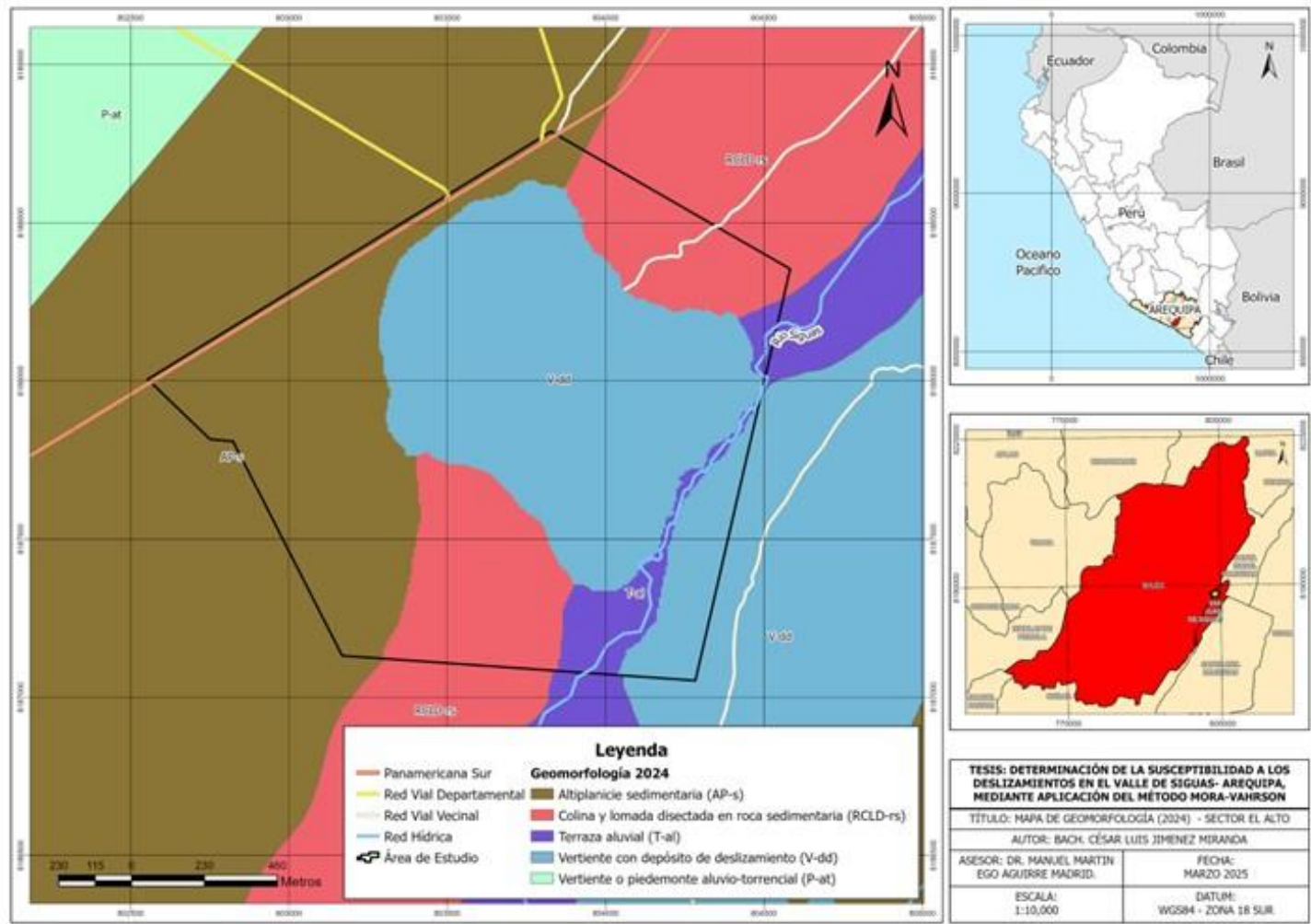
Mapa geomorfológico de la zona de estudio (2022).



Fuente: Adaptado de INGEMMET (2022).

Figura 25

Mapa geomorfológico de la zona de estudio (2024).



Fuente: Elaboración propia a partir de trabajos de campo (2024).

**3.1.4 Mapas de humedad (2019 – 2024)**

Para la elaboración de los mapas de humedad, se ha utilizado el Índice de Humedad Diferencial Normalizado (NDMI) derivado de imágenes satelitales Sentinel-2 en el periodo 2019-2024. Este índice permite detectar variaciones en la humedad del suelo y la vegetación, proporcionando información clave para evaluar su impacto en la estabilidad del terreno.

Los valores del NDMI han sido categorizados en cuatro rangos para facilitar la interpretación de la humedad en la zona de estudio:

**Tabla 14**

*Factor humedad y sus atributos en el mapa temático.*

Atributos	Ponderación
Alta humedad	5
Moderada humedad	4
Baja humedad	2
Seco	1

*Nota:* Elaboración propia a partir de trabajos en gabinete (2025).

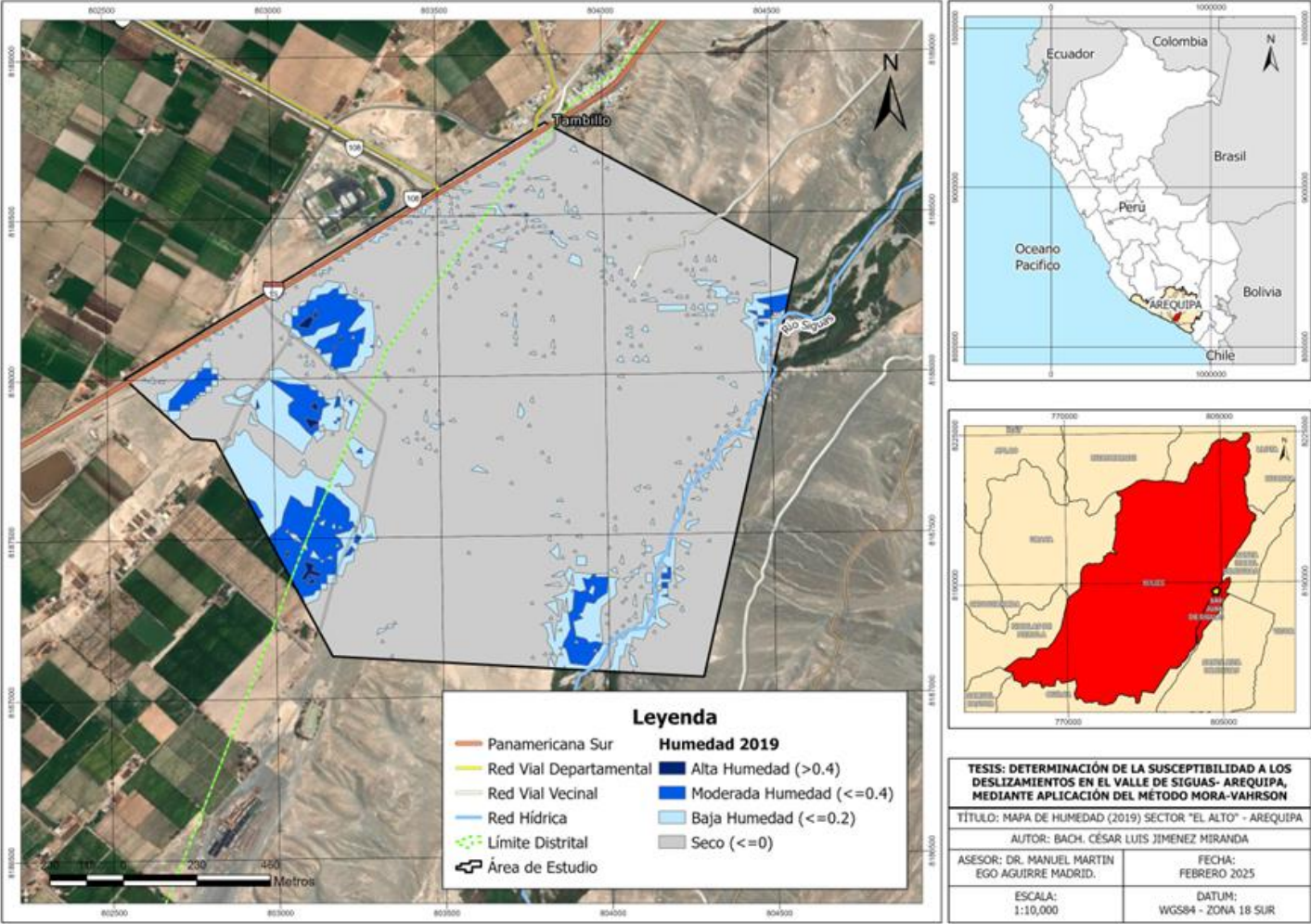
Los análisis han demostrado que las zonas con mayor acumulación de humedad coinciden con áreas donde la infiltración de agua de riego es más intensa, particularmente en terrenos agrícolas cercanos a los canales principales del Proyecto Majes-Siguas. Según INGEMMET (2023), la acumulación de humedad en la margen derecha del Valle de Sigwas ha generado un incremento en la presión de poros en los suelos de baja capacidad de drenaje, lo que ha reducido la resistencia del material y favorecido la propagación de los deslizamientos.

El NDMI también ha sido útil para identificar sectores con estrés hídrico en cultivos, lo que resulta crucial para la gestión agrícola y la prevención de deslizamientos inducidos por riego excesivo (EOS Data Analytics, 2023). Se han identificado ciclos de aumento de humedad durante los períodos de máxima actividad agrícola, lo que sugiere una correlación entre la sobreirrigación y la inestabilidad del terreno.



Figura 26

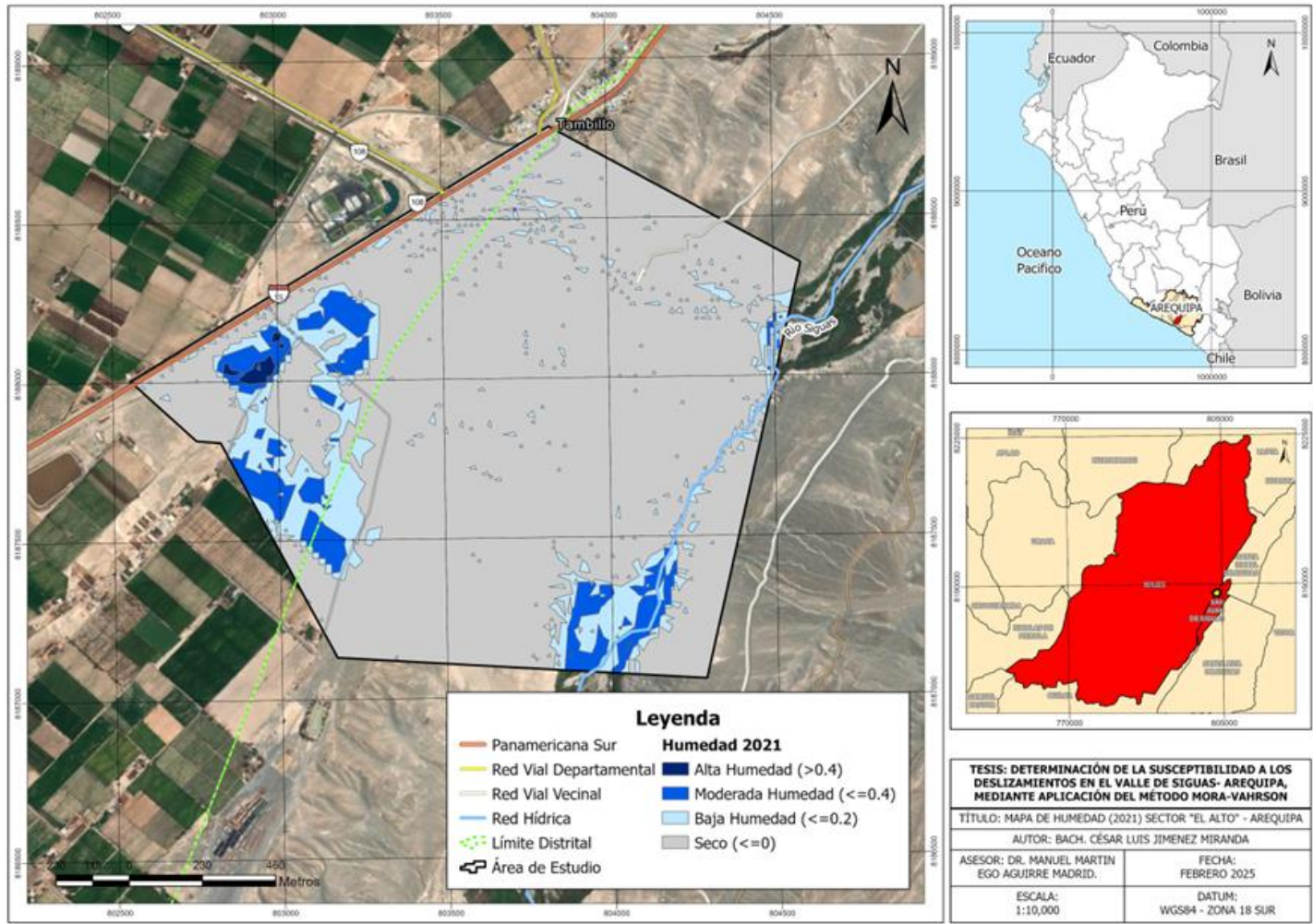
Mapa de humedad del área de estudio (2019).



Fuente: Adaptado de Sentinel Hub EO (2024).

Figura 27

Mapa de humedad del área de estudio (2021).

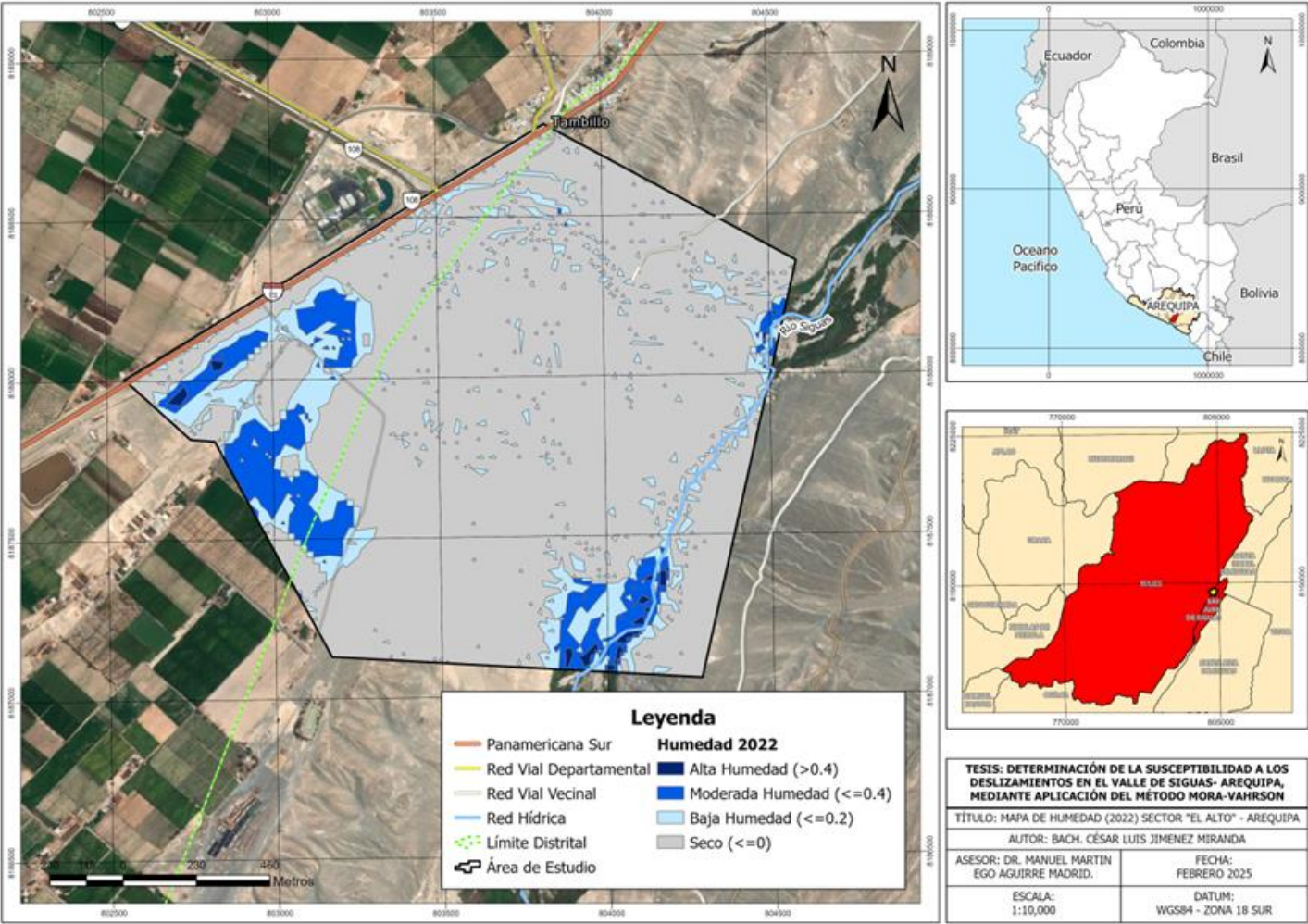


Fuente: Adaptado de Sentinel Hub EO (2024).



Figura 28

Mapa de humedad del área de estudio (2022).

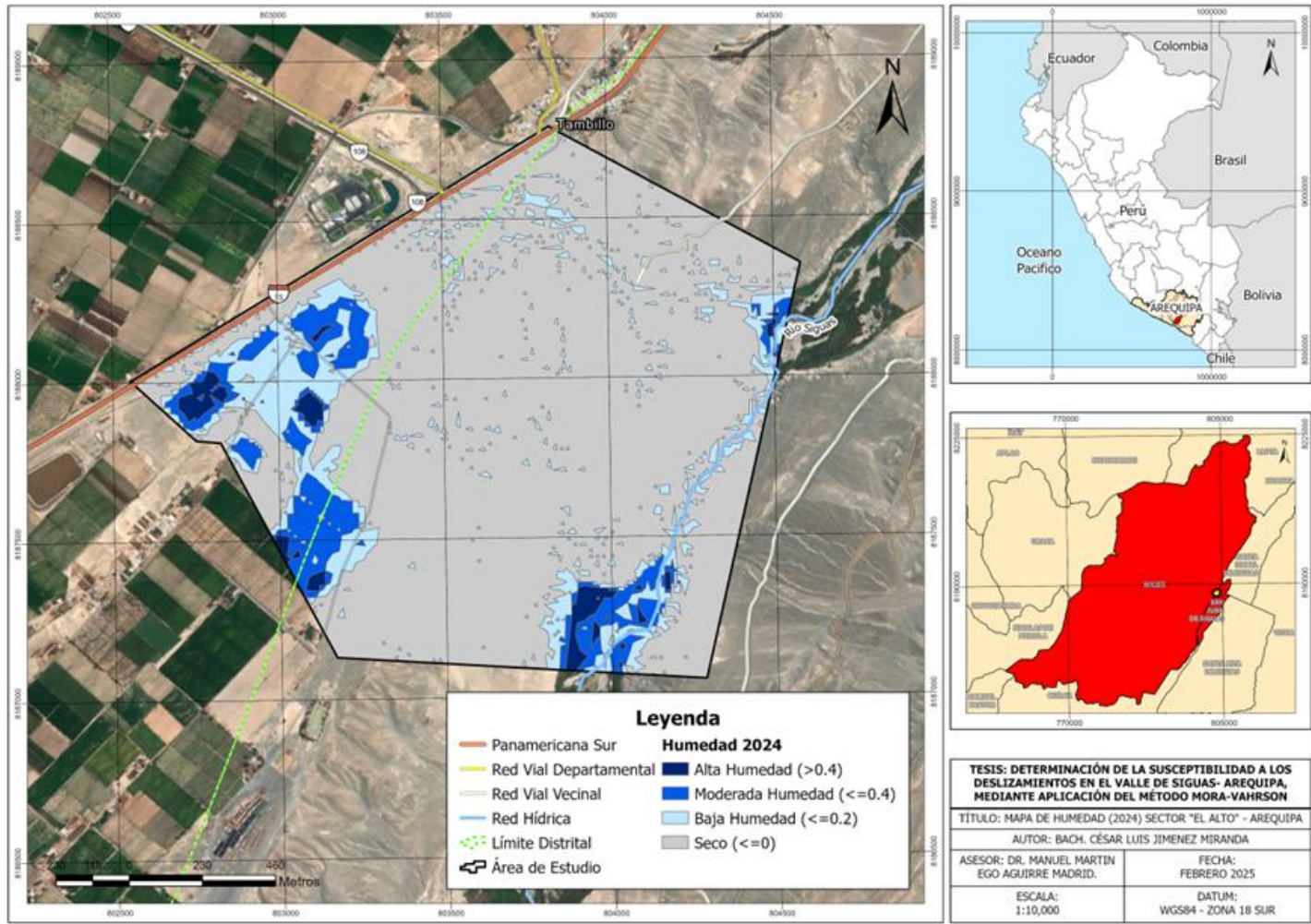


Fuente: Adaptado de Sentinel Hub EO (2024).



Figura 29

Mapa de humedad del área de estudio (2024).



Fuente: Adaptado de Sentinel Hub EO (2024).

**3.1.5 Mapas de evolución de la cobertura de suelo (2019 – 2024)**

Utilizando imágenes satelitales de Sentinel-2 y datos del ESRI Land Cover (2025), se ha realizado un análisis multitemporal de la evolución de la cobertura de suelo en el periodo 2019-2024. Este análisis permite evaluar el impacto de los cambios en el uso del suelo sobre la estabilidad de las laderas.

Para la clasificación de la cobertura de suelo, se han identificado las siguientes seis categorías principales en función de su relación con la estabilidad del terreno:

**Tabla 15**

*Factor cobertura del suelo y sus atributos en el mapa temático.*

Atributos	Ponderación
Agua	1
Área Construida	4
Cultivos	5
Pastizales	2
Suelo sin cobertura	5
Vegetación densa	1

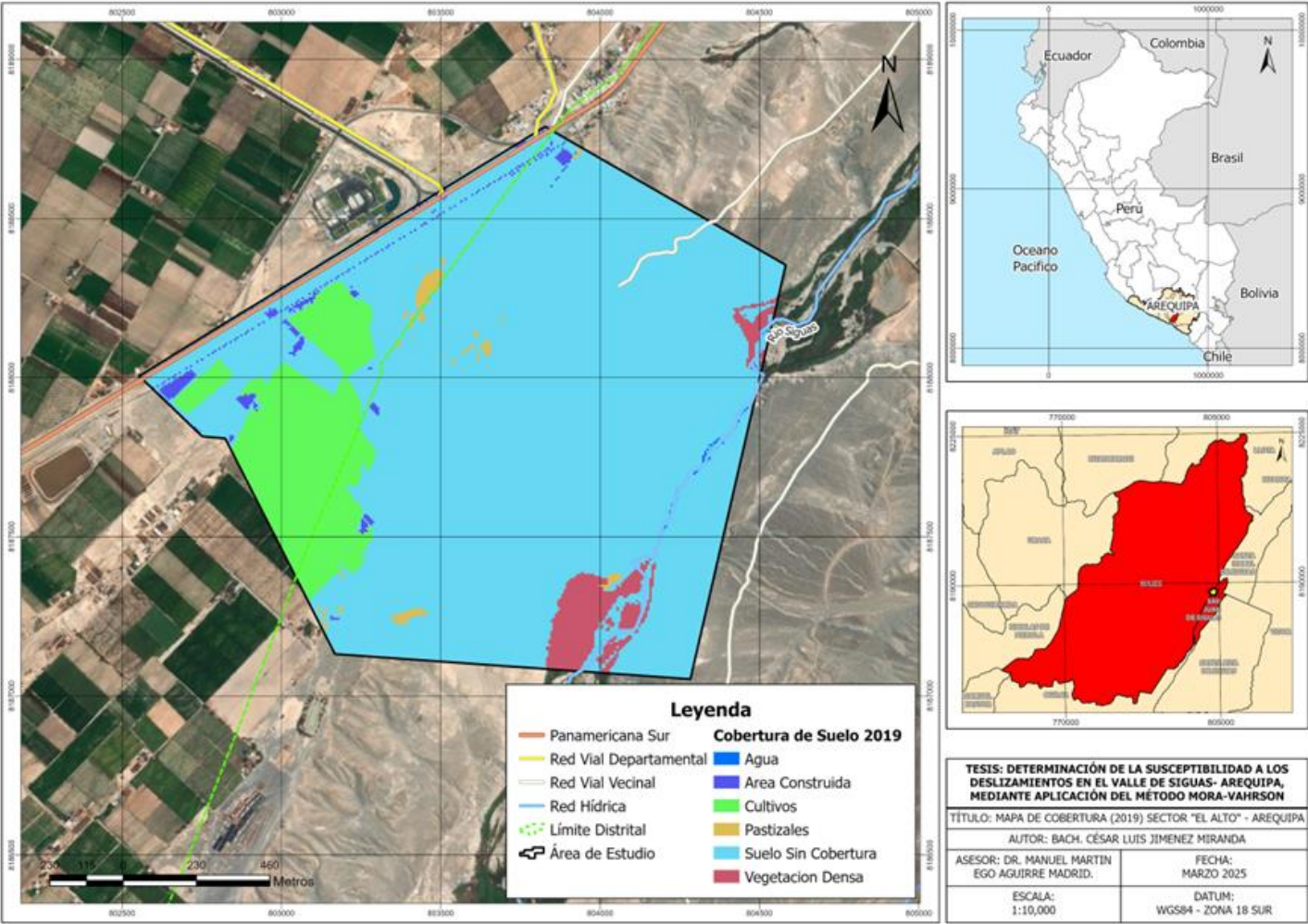
*Nota:* Elaboración propia a partir de trabajos de gabinete (2025).

Estos mapas se han generado debido a la clara expansión de las áreas agrícolas en sectores de Majes y San Juan de Sigüas, favoreciendo a la acumulación de humedad en sectores de pendientes elevadas, generando una mayor presión sobre las laderas.

Según Vanacker et al. (2003), la deforestación y la conversión de terrenos naturales en áreas agrícolas han reducido la cobertura vegetal protectora, incrementando la erosión y la exposición del suelo a la infiltración descontrolada. Además, los cambios en la cobertura de suelo han generado alteraciones en la dinámica de escorrentía superficial, lo que podría estar contribuyendo al desplazamiento progresivo de los deslizamientos en la región.

Figura 30

Mapa de cobertura de suelo del área de estudio (2019).

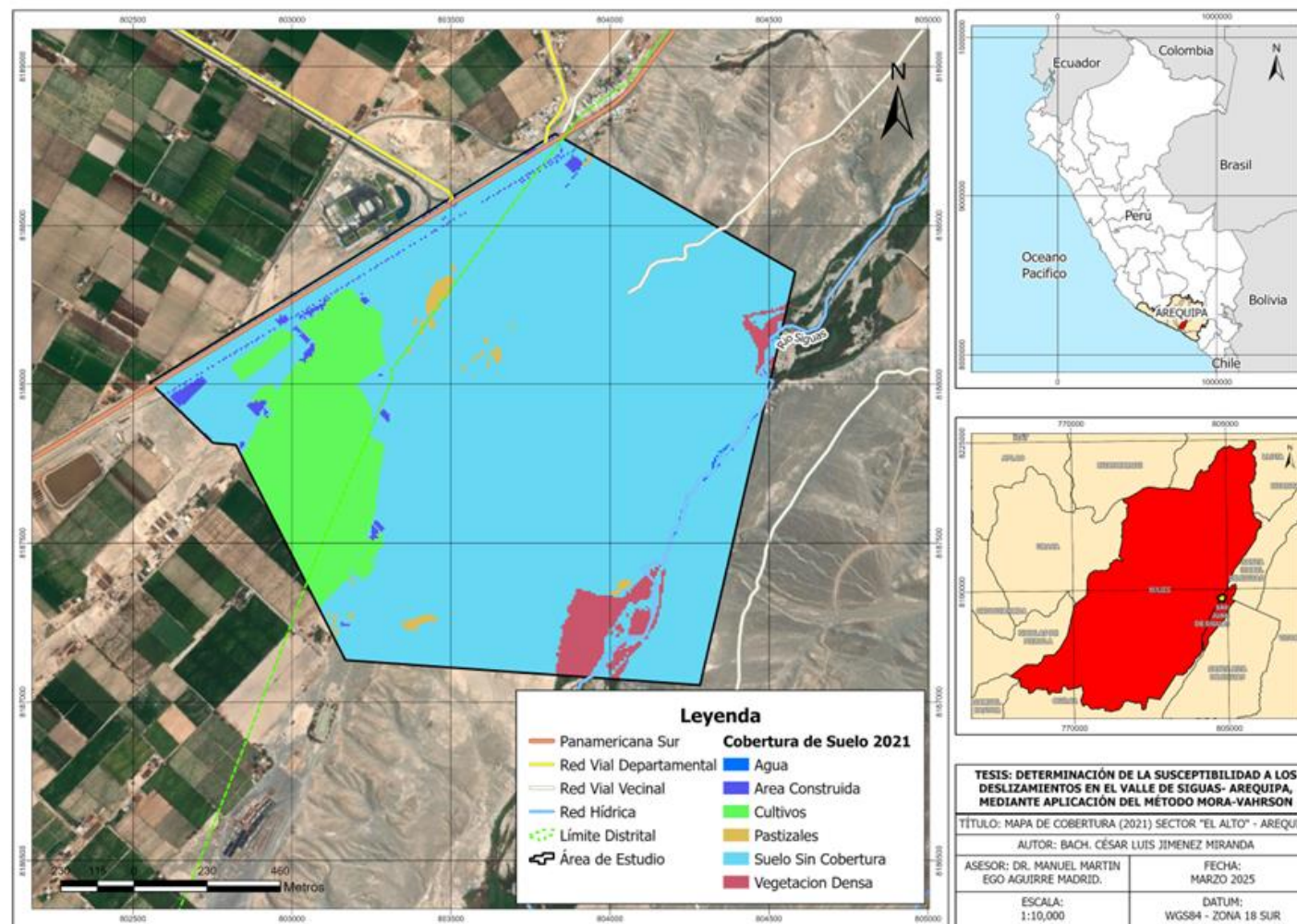


Fuente: Adaptado de ESRI Land Cover (2019).



**Figura 31**

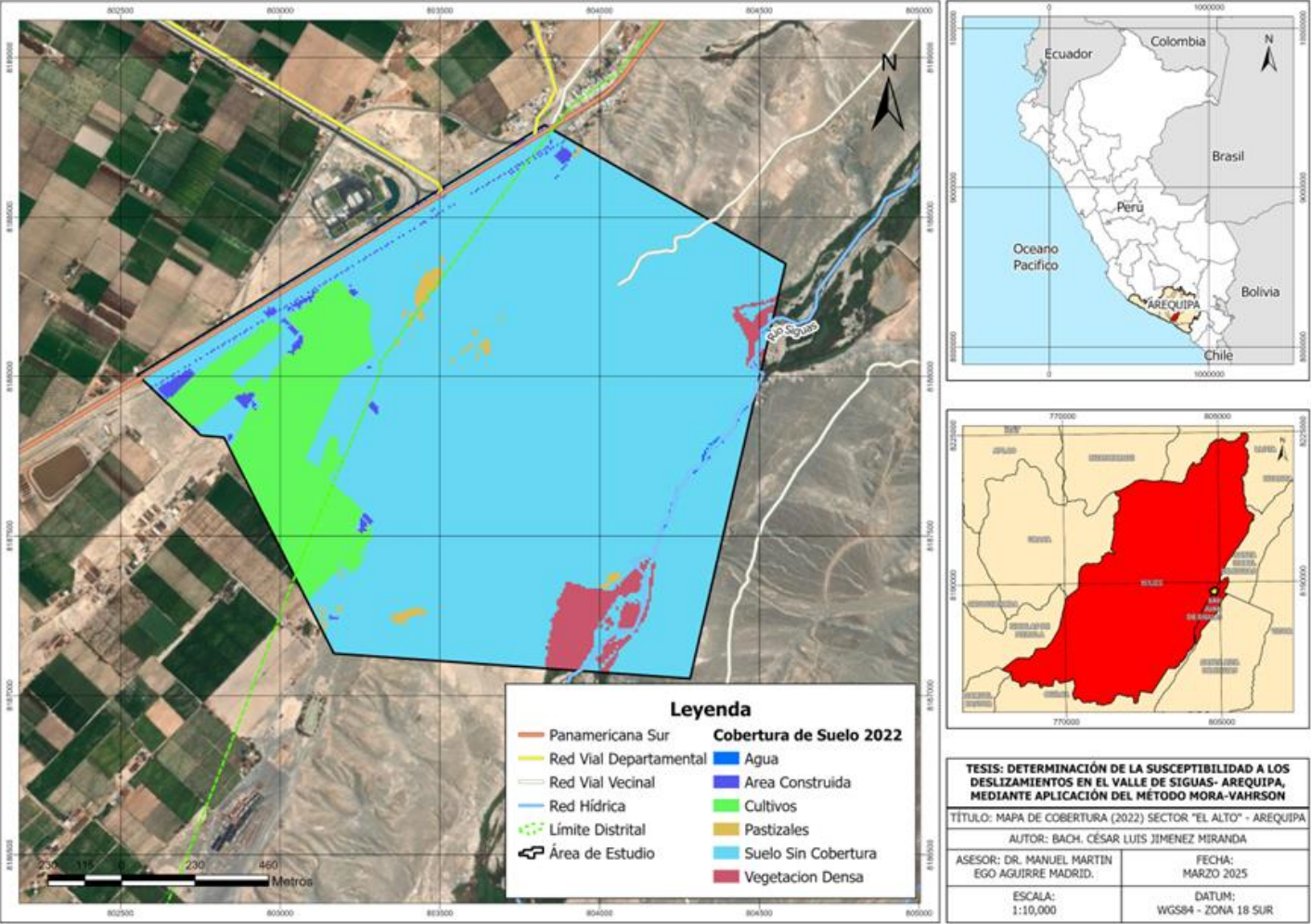
*Mapa de cobertura de suelo del área de estudio (2021).*



*Fuente: Adaptado de ESRI Land Cover (2021).*

Figura 32

Mapa de cobertura de suelo del área de estudio (2022).

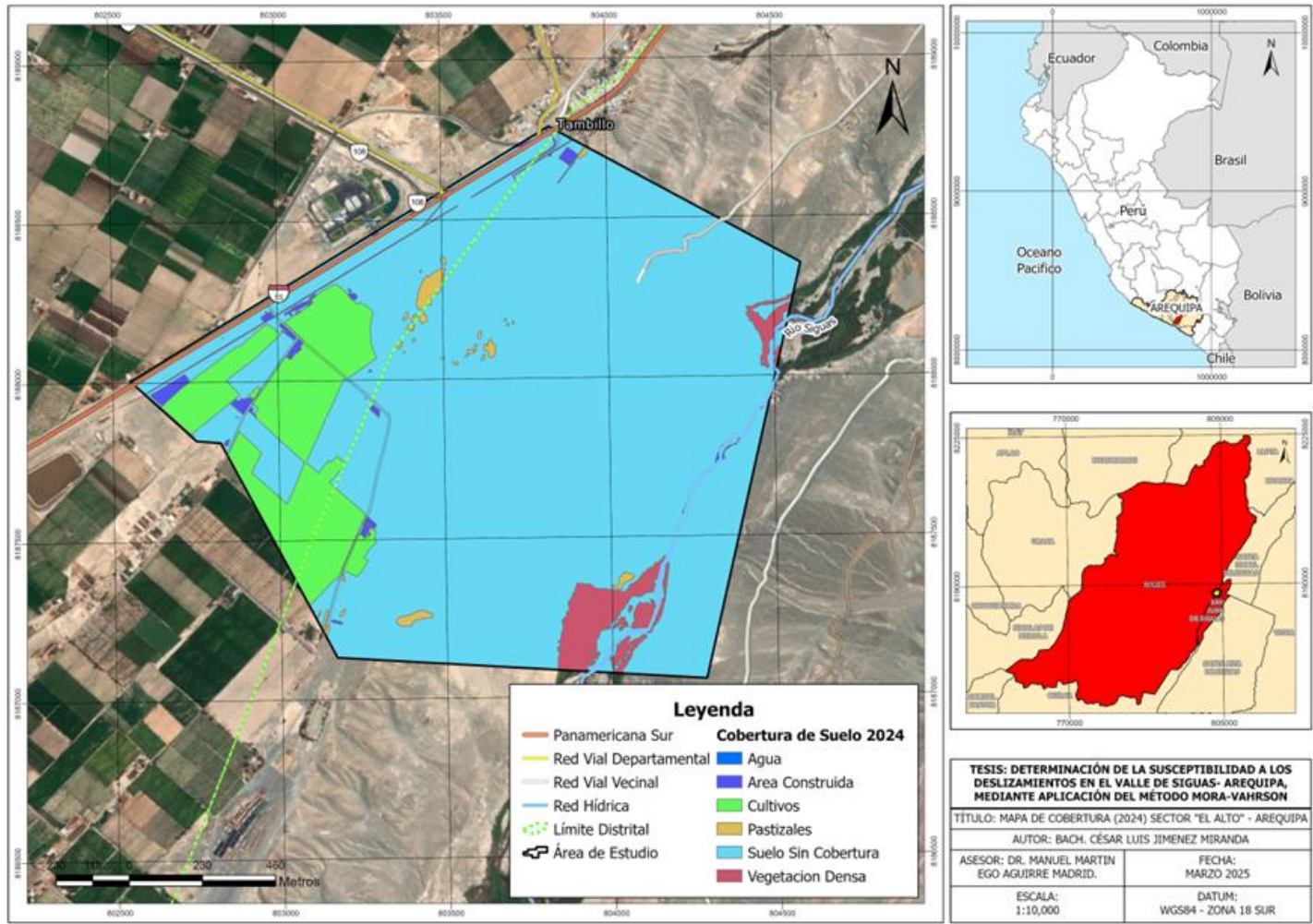


Fuente: Adaptado de ESRI Land Cover (2022).



Figura 33

Mapa de cobertura de suelo del área de estudio (2024).



Fuente: Elaboración propia a partir de trabajos de campo (2024).

### 3.2 Aplicación del método Mora-Vahrson

En esta investigación, se aplicó este método utilizando un enfoque geoespacial a través de GIS, lo que ha permitido integrar y analizar datos multitemporales para la caracterización del riesgo en la zona de estudio.

#### 3.2.1 Recolección y preprocesamiento de datos

Para la implementación del método, se recopilaron y procesaron capas de Geología, Geomorfología, Pendientes, Cobertura de Suelo y Humedad de Suelo, asegurando la compatibilidad entre las mismas y facilitando el análisis espacial de la susceptibilidad a deslizamientos.

#### 3.2.2 Ponderación de factores

Siguiendo la metodología original de Mora-Vahrson y considerando estudios recientes en el Valle de Sigüas, se asignaron las siguientes ponderaciones:

**Tabla 16**

*Ponderación de factores del área de estudio.*

Factores	Ponderación
Geología	15%
Geomorfología	15%
Pendientes	25%
Cobertura del suelo	10%
Humedad del Suelo	35%

*Nota:* Elaboración propia a partir de trabajos de gabinete (2025).

La sobresaturación del suelo ha sido identificada como el principal factor detonante en la región (INGEMMET, 2023), razón por la cual la humedad del suelo recibió la mayor ponderación en la ecuación de susceptibilidad.

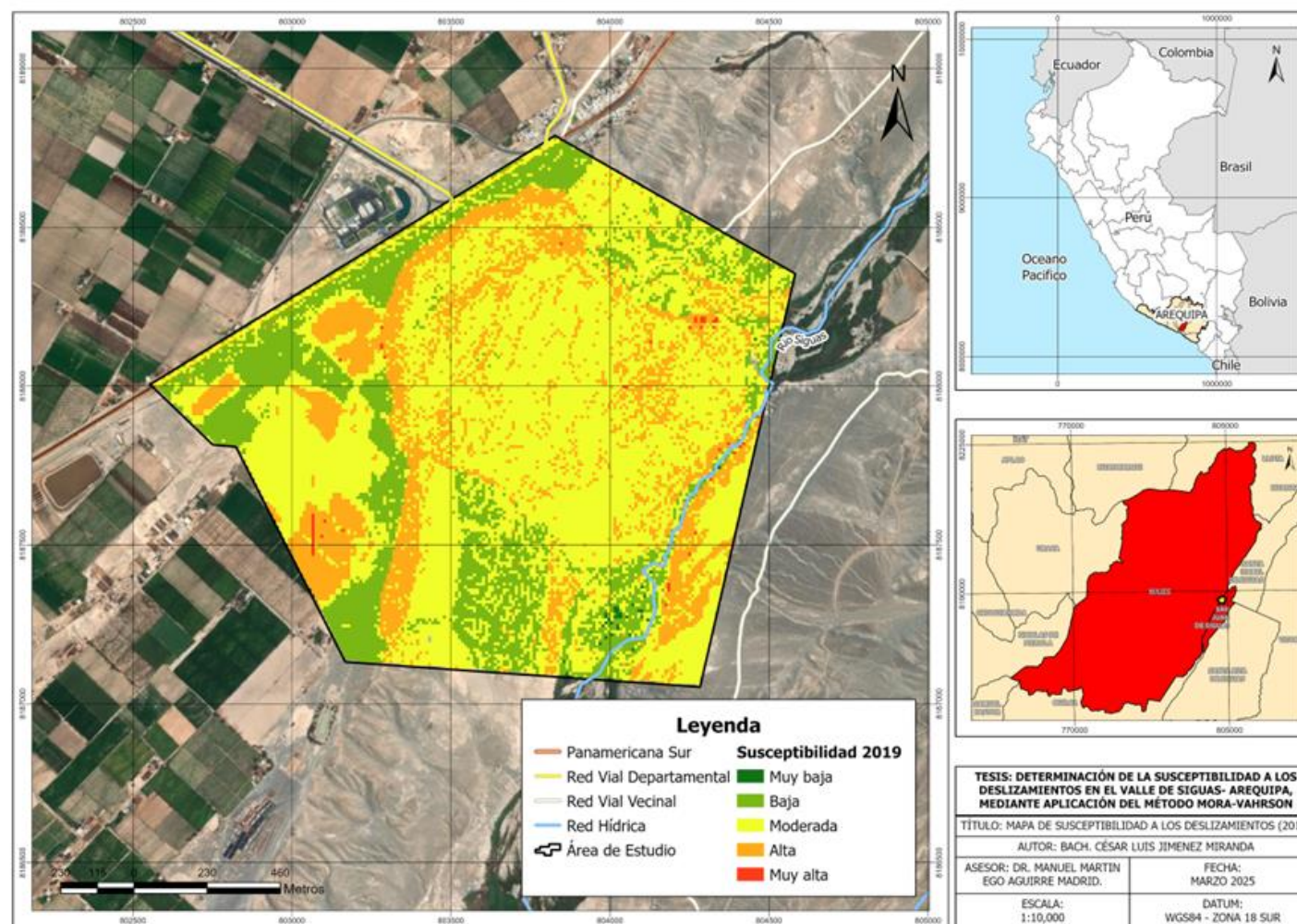
Este cálculo se realizó utilizando herramientas SIG, aplicando la “Superposición Ponderada” en ArcGIS Pro para la integración y modelado de los datos.

### 3.3 Mapas de susceptibilidad a los deslizamientos (2019 – 2024)

Los sectores de los mapas de susceptibilidad a deslizamientos para el periodo 2019-2024 se han clasificado como de Muy baja, baja, moderada, alta y muy alta susceptibilidad a deslizamientos.

**Figura 34**

*Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos (2019).*

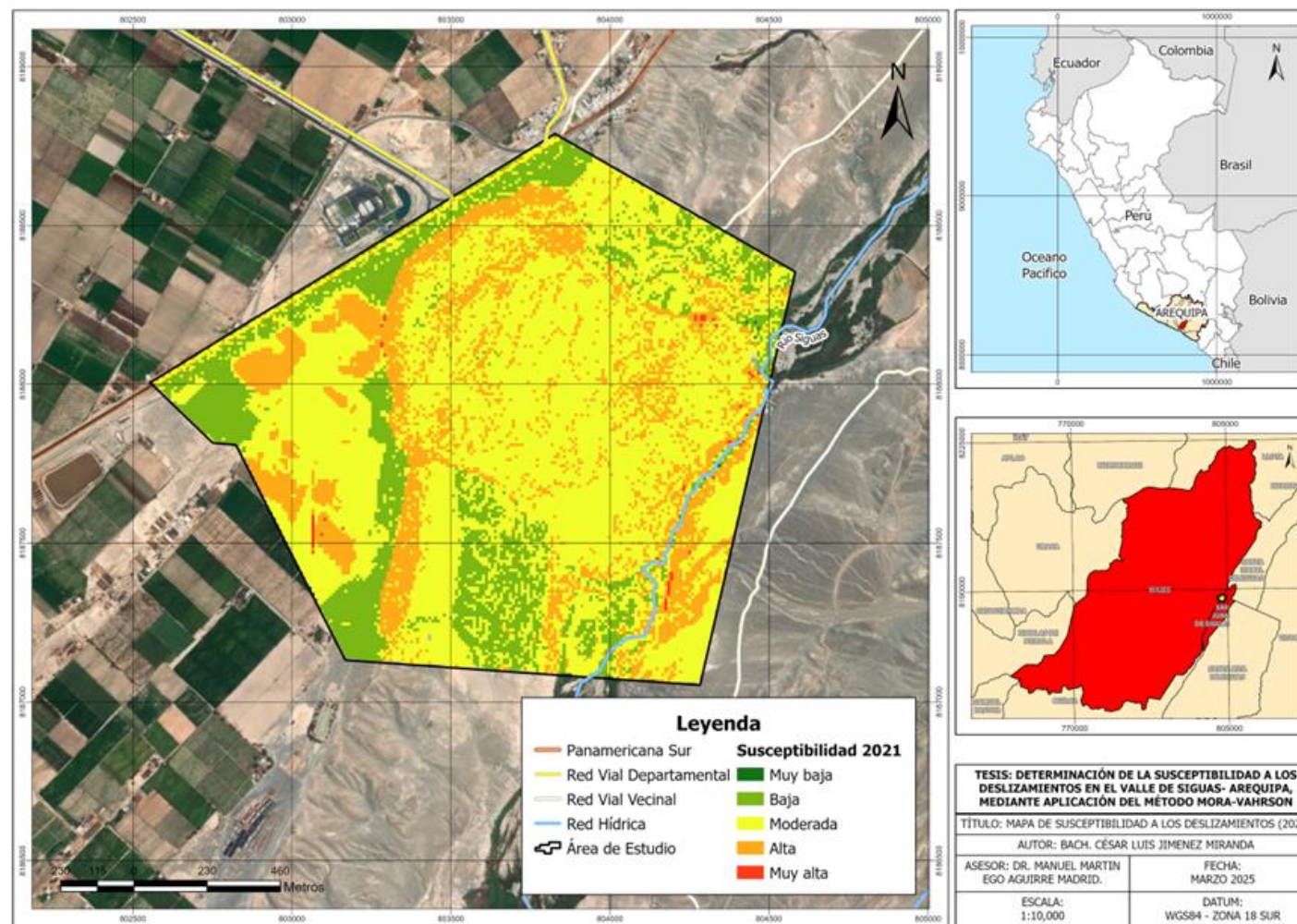


*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de gabinete.



**Figura 35**

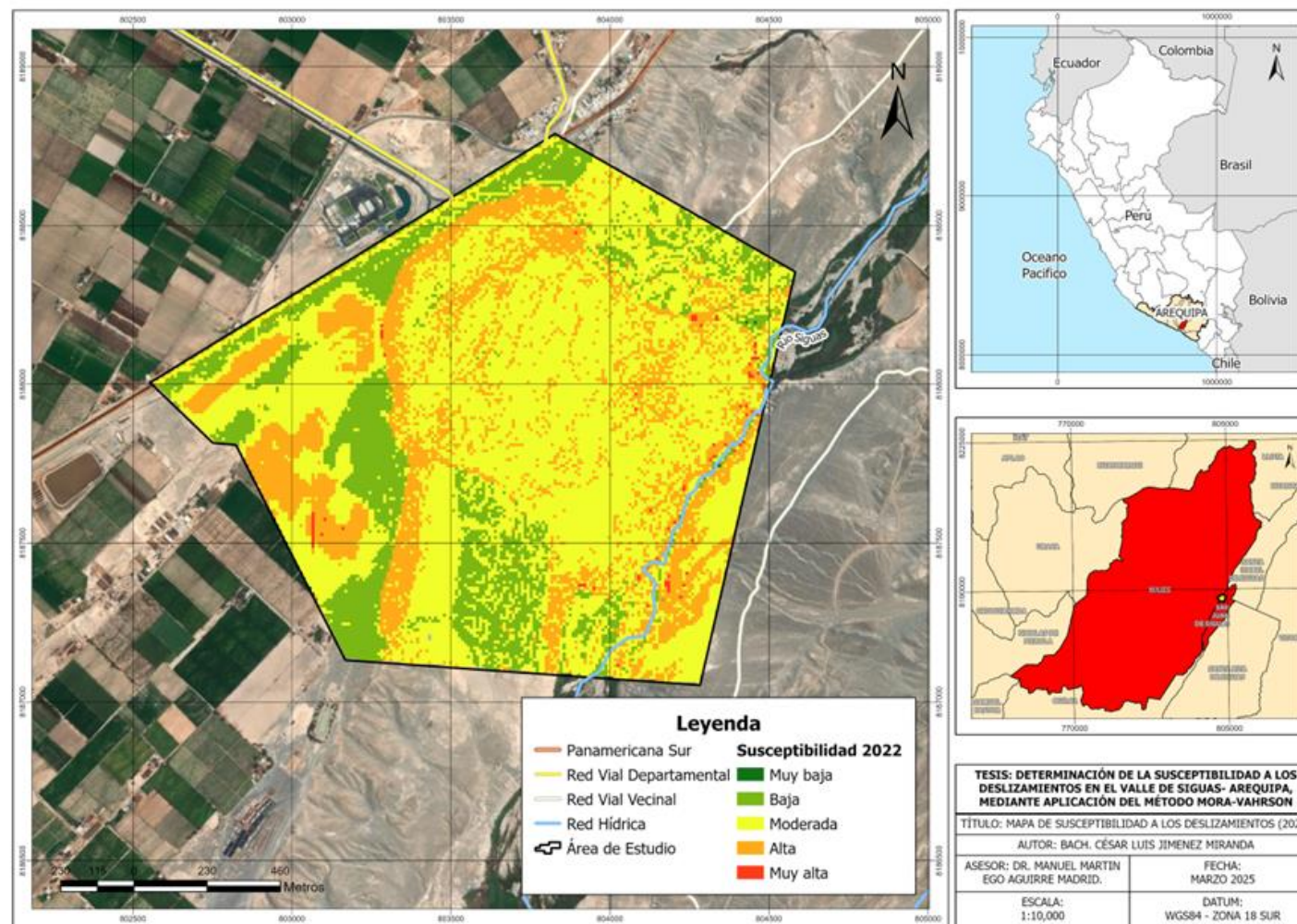
*Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos (2021).*



*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de gabinete.

**Figura 36**

*Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos (2022).*

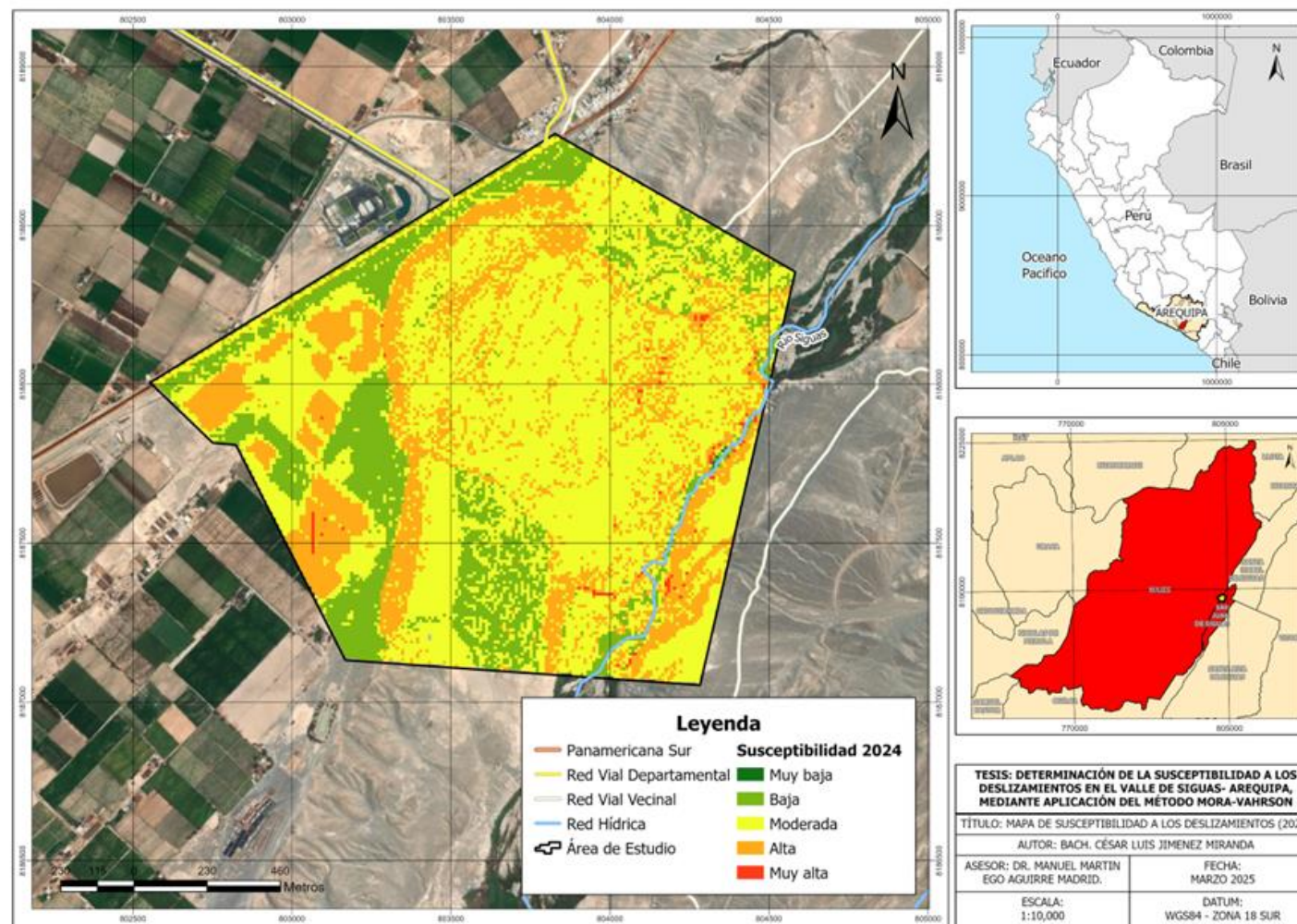


*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de gabinete.



**Figura 37**

*Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos (2024).*



*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de gabinete.

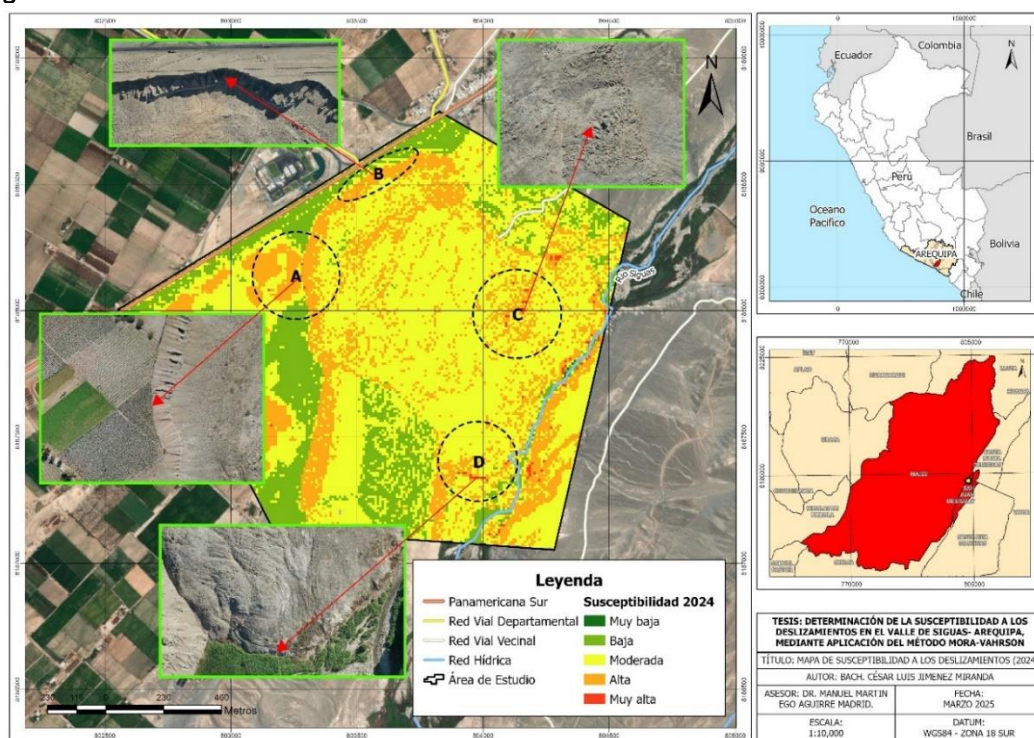
## Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

### 4.1 Identificación de zonas susceptibles

En la figura siguiente, se incluye el mapa de susceptibilidad a deslizamientos correspondiente al año 2024 con cuatro zonas críticas identificadas (A, B, C y D).

**Figura 38**

*Fotografía del deslizamiento El Zarzal.*



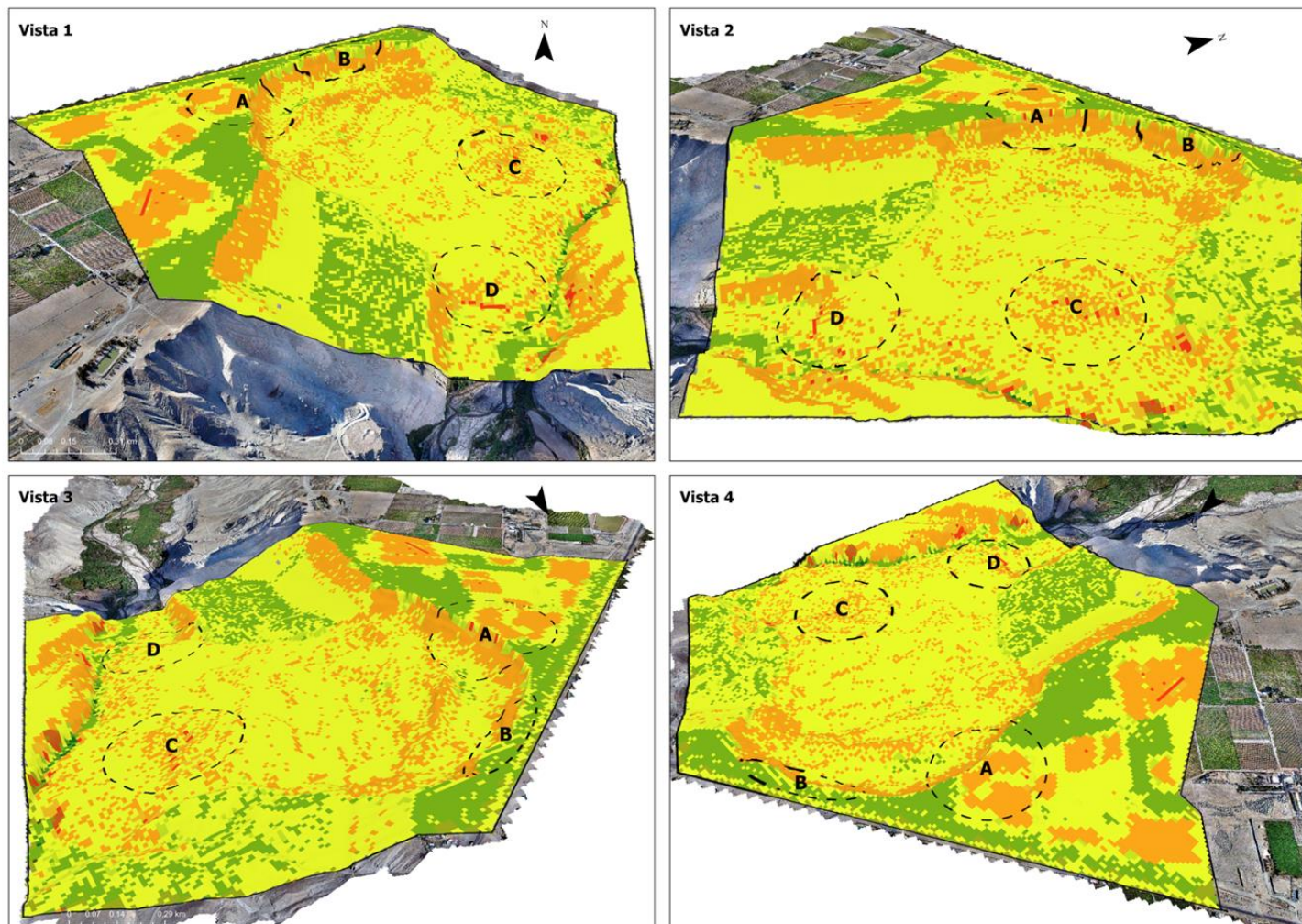
*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de gabinete (2024).

De la misma forma, en la Figura 39, se presentan 4 vistas en 3D del mapa de susceptibilidad con el objetivo de presentar una mejor visibilidad de la topografía del terreno evaluada.



**Figura 39**

*Vistas en 3D de la zona de estudio.*



*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de gabinete (2024).

#### 4.1.1 Análisis de las zonas críticas

**4.1.1.1 Zona A: sector oeste con actividad agrícola intensiva.** Esta área se caracteriza por tener pendientes extremadamente pronunciadas, como se muestra en el mapa de pendientes de la Figura 21 y una litología compuesta por depósitos aluviales (con clastos de hasta 20 cm y matriz arenosa) y la Formación Millo (Conglomerados poco consolidados, cubiertos localmente por tufos) (INGEMMET, 2023). Además, tal como se observa el mapa geomorfológico de la Figura 25, es una altiplanicie sedimentaria afectada directamente por una vertiente con depósito de deslizamiento (deslizamiento El Zarzal). Asimismo, es percibida como una zona con moderada humedad tal como lo demuestra la Figura 29, debido a la presencia de sembríos incluso en la corona del deslizamiento.

#### Figura 40

*Fotografía de la zona A tomada con dron.*



*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de campo (2024).

Según INGEMMET (2023), la corona de este sector tuvo un retroceso máximo de hasta 6 m hacia terrenos de cultivo en el periodo de noviembre 2021 a noviembre 2022, lo que confirma su alta susceptibilidad (ver Figura 41).

#### Figura 41

*Análisis multitemporal del sector A de Alto Sigüas 2022.*



*Fuente:* INGEMMET (2023).



De la zona A se desprende un patrón de caída de material poco consolidado, la acumulación de agua superficial y subterránea debido al regadío de cultivos incrementa la probabilidad de deslizamientos, especialmente en época de sembríos.

**4.1.1.2 Zona B: sector noroeste cercano a infraestructuras viales.** Esta área se compone de las mismas características presentes en la Zona A, con la diferencia de que esta zona no presenta sembríos, la corona de está a 37 m de la Panamericana Sur y a 2.6 m de un agrietamiento paralelo de longitud 58m.

**Figura 42**

*Fotografía del sector deslizado (zona B).*



*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de campo (2024).

**Figura 43**

*Fotografía de caída de material (zona B).*



*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de campo (2024).

En la zona B, se observa el mismo patrón de caída de material poco consolidado tal como en la Zona A, pese a que esta zona no tiene sembríos, de la línea L4-5 de la Figura 11, se desprende que hay presencia de agua subterránea debido al aumento del nivel freático que provoca la sobreirrigación en la zona de sembríos.

**4.1.1.3 Zona C: sector este de grietas escalonadas.** Esta área se caracteriza por tener pendientes moderadas y una litología compuesta por depósitos coluviales (bloques métricos y clastos sueltos, asociados a erosión de la Formación Millo) (INGEMMET, 2023). Además, tal como se observa en el mapa geomorfológico de la Figura 25, es una vertiente con depósito de deslizamiento (El Zarzal) y es una zona de baja humedad según el mapa de la Figura 29.

En la zona C se observa la presencia de grietas paralelas escalonadas con una altura por escalón de unos 20 cm (ver Figura 44).

**Figura 44**

*Grietas escalonadas de la zona C.*



*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de campo (2024).

Al momento de la visita (23/05/2024), se encontró también presencia de zonas de humedad en algunas grietas (ver Figura 45), lo cual podría explicar la identificación de pequeños sectores con baja humedad tal como se observa en el mapa correspondiente de la Figura 29.



**Figura 45**

*Grieta escalonada con humedad de la zona C.*



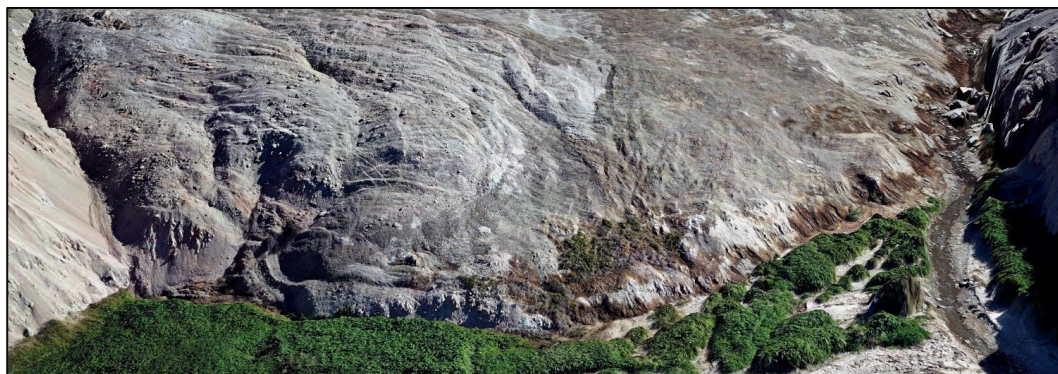
*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de campo (2024).

**4.1.1.4 Zona D: sector sur pie del deslizamiento.** Esta área se caracteriza por tener pendientes moderadas y una litología compuesta por depósitos aluviales (clastos de hasta 20 cm y matriz arenosa) y la Formación Moquegua Inferior (areniscas arcósicas de grano medio, arcillas intercaladas con láminas de yeso y conglomerados) (Guisado, 1968).

Esta zona es considerada de alta humedad, según el mapa correspondiente y es observable en la Figura 46.

**Figura 46**

*Pie del deslizamiento de la zona D.*



*Fuente:* Elaboración propia a partir de trabajos de campo (2024).

De acuerdo con INGEMMET (2023), el pie de este sector tuvo un avance máximo de hasta 6 m hacia el río Sigüas en el periodo de noviembre 2021 a noviembre 2022, (ver Figura 47).

**Figura 47**

*Análisis multitemporal del sector D de Alto Sigüas 2022.*



Fuente: INGEMMET (2023).

De la Zona D se desprende que hay una serie de condiciones favorables para los deslizamientos como la humedad alta, material poco consolidado, pendientes moderadas a altas y estar al pie del deslizamiento. Generando consecuentemente el represamiento del río Sigüas.

## **4.2 Relación entre factores condicionantes y detonantes**

### **4.2.1 Correlación entre uso agrícola y acumulación de humedad**

La actividad agrícola en el Valle de Sigüas, caracterizada por la rotación de cultivos a lo largo del año, genera una demanda de riego variable tal como es visible en la Figura 6, lo que provoca una acumulación progresiva de humedad en el subsuelo. Este fenómeno es más evidente en sectores donde la infiltración del agua es alta debido a la presencia de materiales poco consolidados o suelos con baja capacidad de drenaje.

El tipo de cultivo sembrado también cobra relevancia en la demanda del riego. Por ejemplo, la alcachofa y la alfalfa suelen requerir en promedio 1200 mm de agua por año (Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA], 2015). Por lo que esta elevada demanda hídrica, sumada a la morfología del terreno, ha contribuido a la sobresaturación del suelo en algunas zonas, particularmente en la región noroeste del valle.

La interacción entre el uso agrícola y las características físicas del terreno ha demostrado ser determinante en la acumulación de humedad y, por ende, en la inestabilidad de las laderas. En particular, las pendientes escarpadas amplifican este efecto, ya que, al entrar en contacto con agua, reducen la resistencia al corte del material, facilitando el desprendimiento y la movilización de material.



**Figura 48**

*Evidencia de humedad n°1 debido a la infiltración por sobreirrigación.*



*Fuente: Elaboración propia a partir de trabajos de campo (2024).*

**Figura 49**

*Evidencia de humedad n°2 debido a la infiltración por sobreirrigación.*



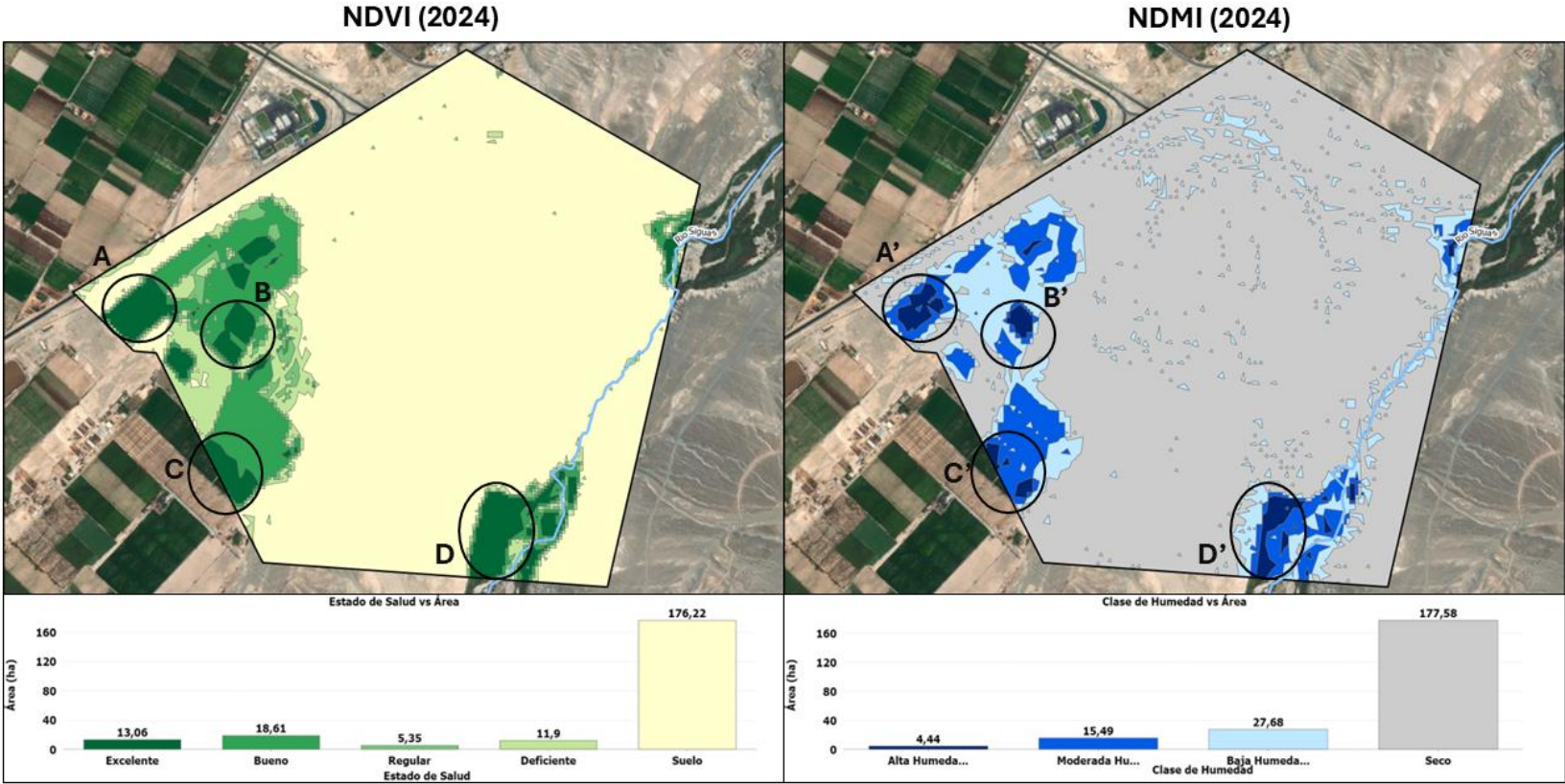
*Fuente: Elaboración propia a partir de trabajos de campo (2024).*

Asimismo, se presenta una correlación entre agricultura y humedad para verificar su influencia:



Figura 50

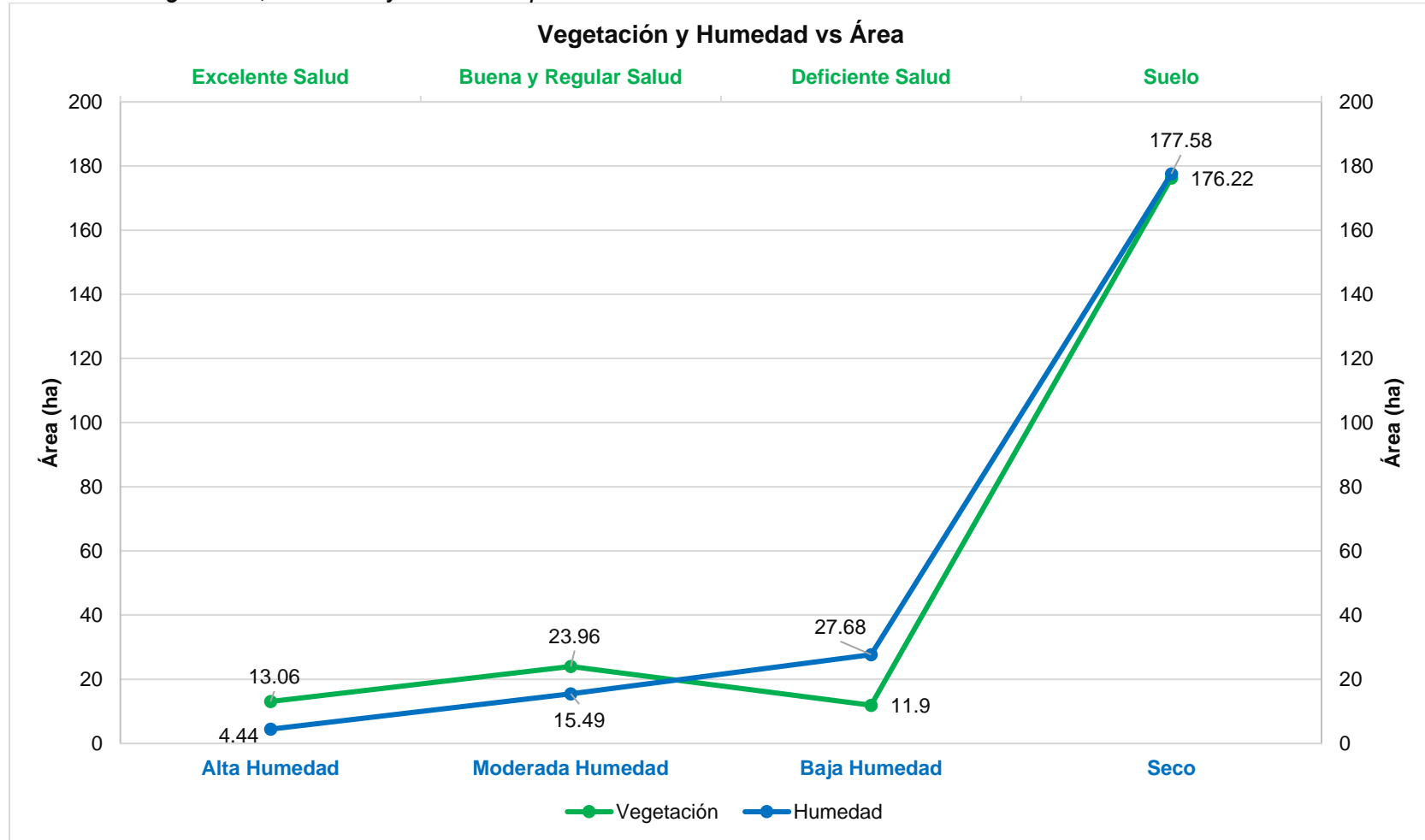
NDVI (índice de vegetación) vs NDMI (índice de humedad).



Fuente: Adaptado de Sentinel Hub EO (2025).

**Figura 51**

*Correlación entre vegetación, humedad y el área ocupada.*



Fuente: Adaptado de Sentinel Hub EO (2025).

En la Figura 50 se realizó una comparativa seleccionando 4 sectores A, B, C y D que demuestran una influencia directa entre la vegetación sana y zonas con alta humedad. Y para corroborar esta influencia, en la Figura 51 se generó una correlación entre las áreas abarcadas por las capas de vegetación y de humedad, afirmando tal propuesta.

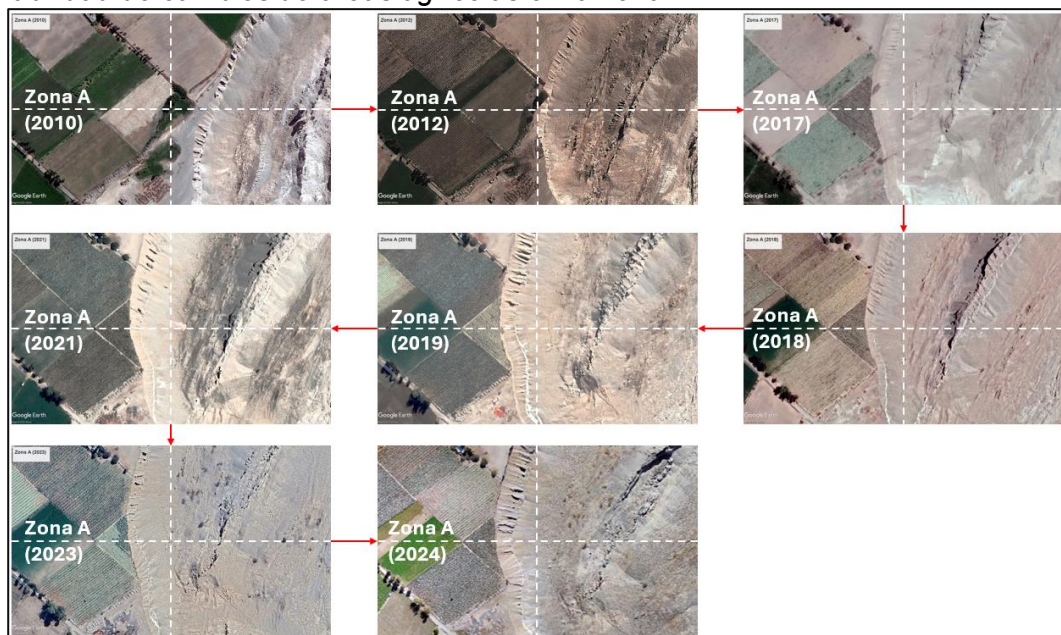
#### 4.3 Evaluación del impacto de la sobreirrigación en la inestabilidad

Se han identificado diversas áreas en el Valle de Sigüas donde la sobreirrigación ha generado una acumulación excesiva de humedad en el suelo, incrementando la inestabilidad de las laderas. Estas áreas presentan evidencias como fisuras en la superficie y desplazamientos recientes de material.

Se hace énfasis en la Zona A, debido a que es uno de los sectores más propensos a deslizar a corto plazo y es posible tener trazabilidad de los cambios con respecto a la cobertura de sembríos.

#### Figura 52

*Trazabilidad de cambios de áreas agrícolas en la zona A.*



Fuente: Adaptado de Google Earth (2025).

#### **4.4 Proyección de pérdidas de cultivo y volumen de material**

Al analizar el mapa de susceptibilidad para el período 2024, se identificaron unas 30.51 hectáreas de terrenos agrícolas con riesgo de deslizamiento a mediano plazo. Considerando que la altura promedio del talud es de 100 metros y la densidad del depósito aluvial donde están asentados estos sembríos es de 2.15 t/m<sup>3</sup>, se estima que el volumen en riesgo asciende a 65 millones de toneladas. Esta situación podría generar una pérdida económica anual de S/10,159,830.00.

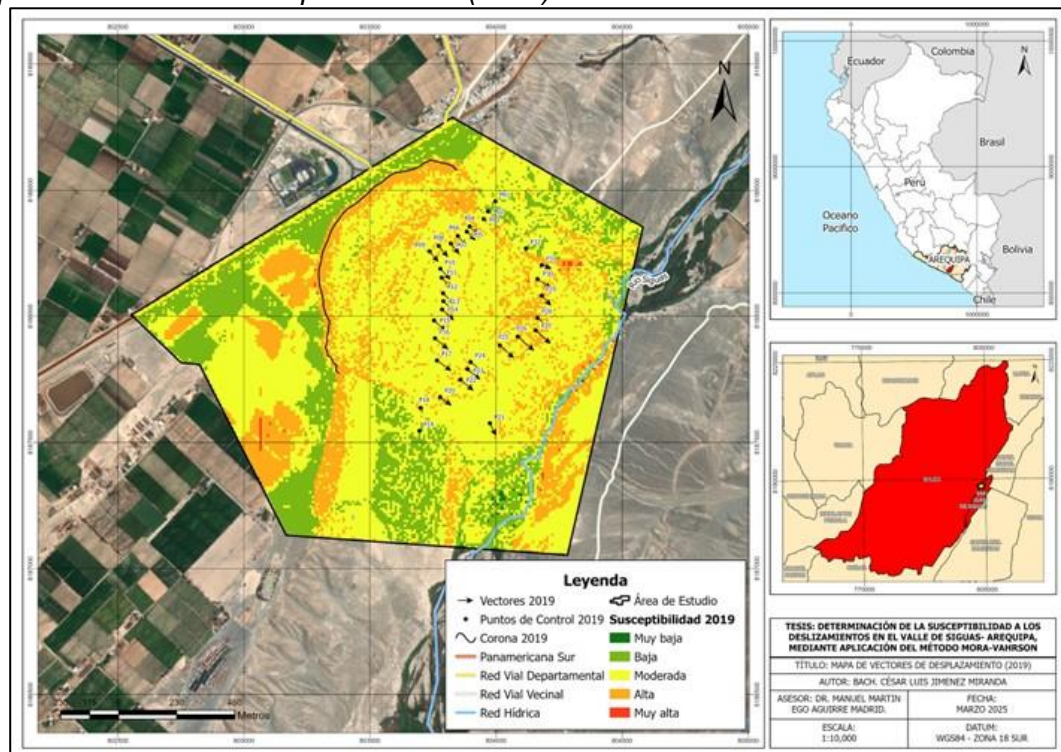
Realizando el mismo análisis a la Zona crítica A, que presenta un riesgo de deslizamiento a corto plazo, afectarían 4.8 hectáreas de terrenos agrícolas, equivalentes a 10.32 millones de toneladas en riesgo, con una pérdida anual estimada en S/1,598,400.00.

#### **4.5 Validación del mapa de susceptibilidad a los deslizamientos**

Para evaluar la precisión del mapa de susceptibilidad final, se realizó una superposición con los registros de monitoreo de deslizamientos documentados en los informes de INGEMMET correspondientes a los años 2019, 2021 y 2022. Estos informes incluyen mapas con vectores que indican la orientación y magnitud de los desplazamientos del terreno, lo cual permite evaluar si las zonas identificadas como altamente susceptibles coinciden con los eventos documentados.

**Figura 53**

*Mapas de vectores de desplazamiento (2019).*



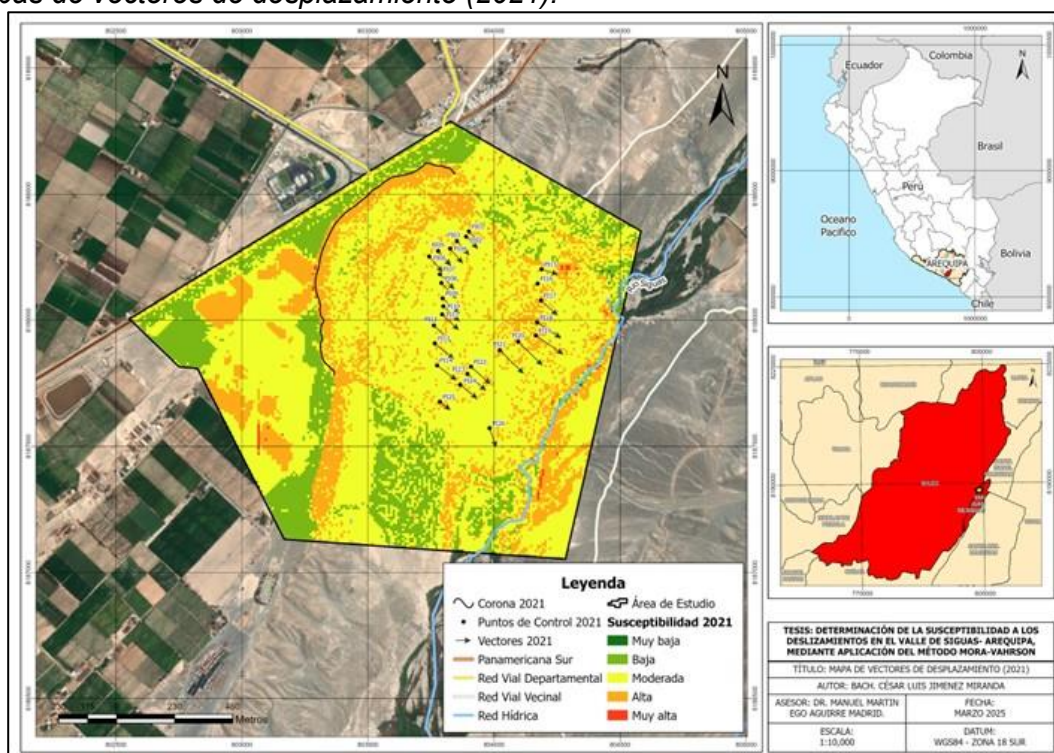
*Fuente:* Adaptado de INGEMMET (2018-2019) y mapa de susceptibilidad de elaboración propia.

En la superposición hecha para el año 2019, los vectores calculados por INGEMMET fueron hechos para el período 2018 – 2019 y evidencian una tendencia de movimiento desde la parte central del deslizamiento hacia el sureste. Según el mapa de susceptibilidad generado, estas áreas se clasifican con una susceptibilidad de moderada a alta, lo cual concuerda con la ubicación de los vectores. Además, la corona del deslizamiento presenta una susceptibilidad alta a lo largo de toda su extensión.



**Figura 54**

*Mapas de vectores de desplazamiento (2021).*

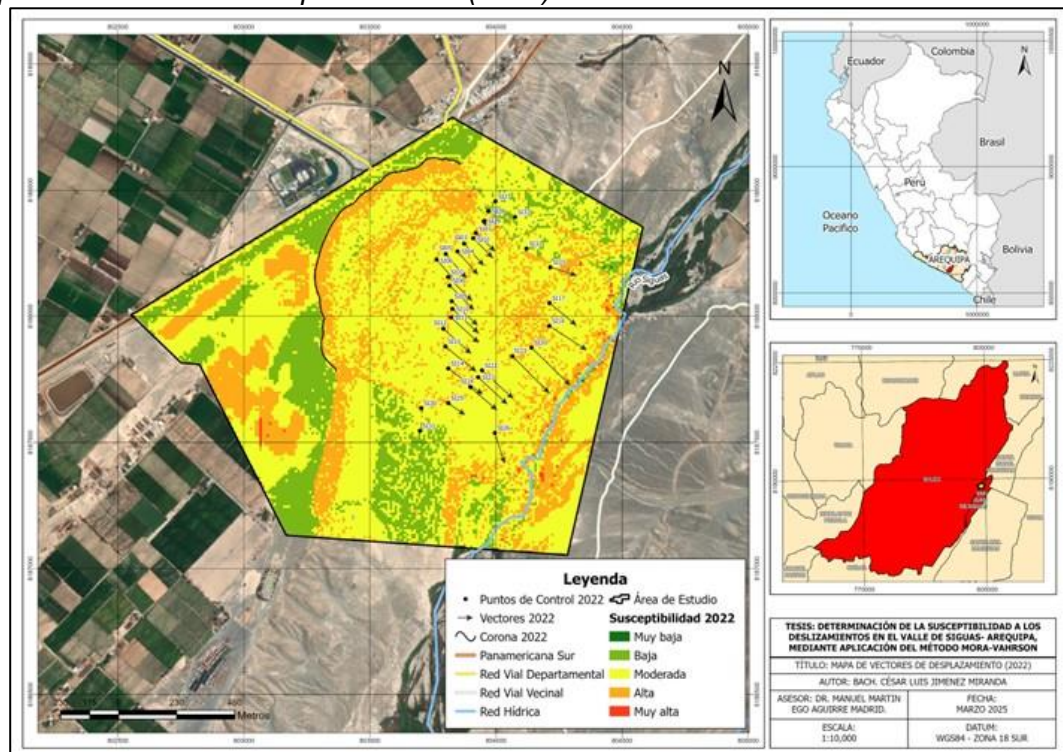


*Fuente:* Adaptado de INGEMMET (2020-2021) y mapa de susceptibilidad de elaboración propia.

En la superposición correspondiente al período 2020-2021, se sigue observa la misma tendencia identificada previamente, con un avance mayor en el pie del deslizamiento hacia la parte sur del mapa, así como en la zona este, lo que ha provocado un estrechamiento del río Siguas. Adicionalmente se observa un ligero retroceso de la corona del deslizamiento en dirección noroeste, en comparación con el año 2019. Estos movimientos han generado pérdidas de terrenos de cultivo e infraestructura en los distritos de Majes y San Juan de Siguas (INGEMMET, 2021).

**Figura 55**

*Mapas de vectores de desplazamiento (2022).*



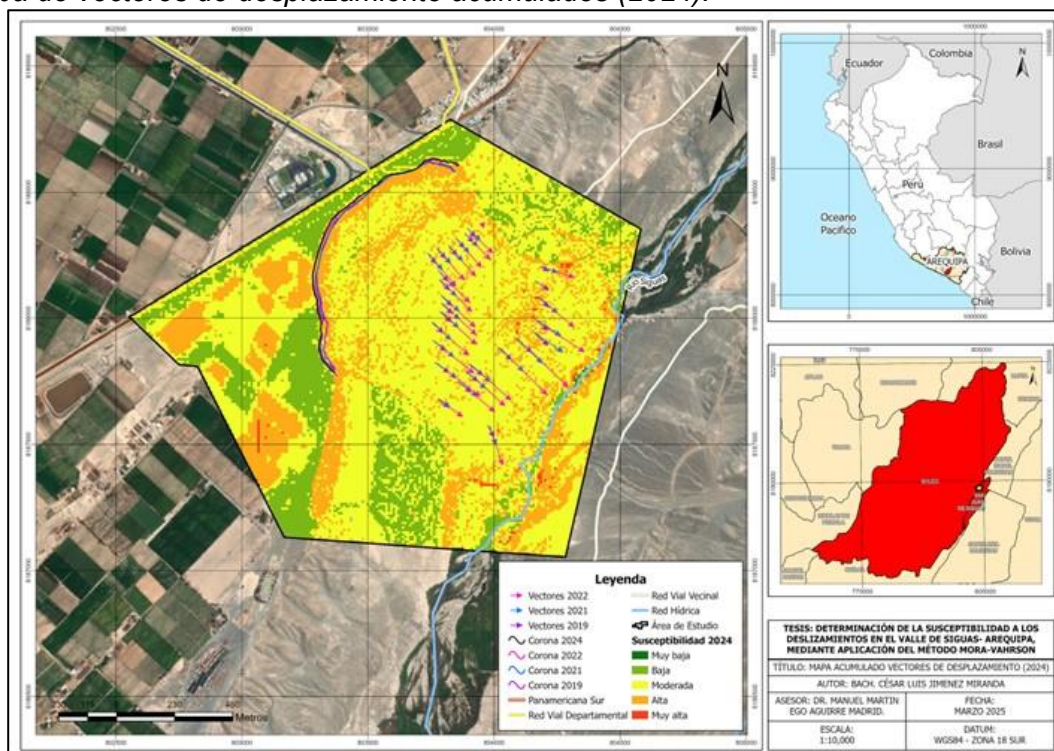
*Fuente:* Adaptado de INGEMMET (2021-2022) y mapa de susceptibilidad de elaboración propia.

Con respecto al período 2021-2022, el Zarzal mostró desplazamientos más significativos en la parte central y baja del deslizamiento, con una expansión del pie del deslizamiento de aproximadamente 11 metros hacia el sur y un resaltante retroceso de la corona entre 4 y 8 metros en dirección noroeste.

Según INGEMMET (2022), los desplazamientos horizontales para este período fueron entre 1.14 m y 9.70 m, mientras que los desplazamientos verticales fueron de 0.01 m a 1.92 m de profundidad.

**Figura 56**

*Mapa de vectores de desplazamiento acumulados (2024).*



*Fuente:* Adaptado de INGENMET (2020, 2021 y 2022) y mapa de susceptibilidad de elaboración propia.

Con respecto al año 2024, no hay información vectorial vigente del período, pero la tendencia de vectores acumulados muestra una orientación de deslizamiento muy similar desde el 2019, variando principalmente en magnitud. De la Figura 56, se desprende que hay un retroceso continuo de la corona del deslizamiento hacia el noroeste, lo cual pone en peligro las zonas de sembríos adyacentes, así como la Carretera Panamericana Sur.

El análisis realizado demuestra que el mapa de susceptibilidad es una herramienta necesaria para la gestión del riesgo de deslizamientos en el Valle de Sigüas. La comparación con registros históricos de desplazamiento confirma su utilidad para identificar zonas críticas.

Sin embargo, en el proceso se identificaron ciertas limitaciones, como la ausencia de información DEM para periodos diferentes al 2014 en plataformas de imágenes satelitales. Se recomienda integrar mediciones geodésicas y modelados de estabilidad de taludes en futuros estudios para optimizar la confiabilidad del mapa.

#### 4.6 Medidas de mitigación

Con respecto a las medidas de mitigación se tienen 3 opciones principales:

**Tabla 17**

*Medidas de mitigación propuestas para la zona de estudio.*

Medida	Costo inicial (USD)	Mantenimiento anual (USD)	Tiempo de efectividad	Requiere energía	Duración
Pozos de bombeo (9 unidades)	\$202,500	Alto (69,984)	Inmediato	Si	10 – 15 años
Drenes horizontales (15 unidades)	\$337,500	Medio	Inmediato	No	Operativa mientras se mantenga adecuadamente
Reforestación con eucaliptos (40 ha)	\$46,000	Incluido en el costo inicial	3 años	No	50 + años

*Nota:* Adaptado de Rahardjo et al. (2003), Perico-Granados et al. (2024) y Stein et al. (2024).

Los pozos de bombeo verticales son adecuados para la extracción de agua a mucha profundidad, reduciendo la presión de agua en el talud, sin embargo, pueden no ser tan efectivos para drenar áreas grandes y representan un consumo energético constante.

Por otro lado, los drenes horizontales pueden extraer y drenar el agua eficazmente en áreas específicas, estabilizando rápidamente el talud. Sin embargo, la perforación horizontal es técnicamente la más compleja y costosa de las 3 medidas, además de requerir un monitoreo y mantenimiento continuo.

En cuanto a la reforestación con eucaliptos, estos requieren de un alto consumo de agua, lo que puede ayudar a reducir el nivel freático. Sus raíces pueden alcanzar hasta 20 metros de profundidad, contribuyen a la estabilidad del terreno y disminuyen la susceptibilidad a los deslizamientos. Sin embargo, durante los primeros 2 o 3 años, la plantación de eucaliptos podría aumentar la susceptibilidad del suelo a la erosión. Por lo tanto, sería necesario complementar la medida con el uso de cubiertas vegetales como pastos, para proteger el suelo.

## Conclusiones

Se ha determinado que la presencia de estratos geológicos con baja cohesión, como conglomerados y areniscas intercaladas con materiales finos, incrementa significativamente la susceptibilidad a deslizamientos. La erosión recurrente y la alta permeabilidad de estos materiales facilitan la infiltración de agua, reduciendo la resistencia del suelo y favoreciendo la ocurrencia de movimientos en masa en el Valle de Sigüas.

El análisis geomorfológico y de cobertura de suelo evidenció que las zonas con pendientes abruptas y coberturas degradadas, ya sea por actividad agrícola intensiva o deforestación, presentan mayor inestabilidad. La combinación de estas características con laderas disectadas y terrazas aluviales ha demostrado ser un factor relevante en la generación de deslizamientos, de acuerdo con la ponderación del método Mora-Vahrson.

La humedad del suelo, evaluada mediante índices satelitales como NDMI, ha mostrado una correlación directa con la activación de deslizamientos. Se evidenció que la sobreirrigación en la zona noroeste del Valle de Sigüas ha contribuido en la sobresaturación de suelos, reduciendo su cohesión y aumentando el riesgo de movimientos en masa. Estos resultados refuerzan la hipótesis de que la interacción entre humedad excesiva, geomorfología desfavorable y litología poco consolidada genera un entorno altamente propenso a deslizamientos.

## **Recomendaciones**

Se recomienda instalar una red de monitoreo geotécnico y geofísico en las zonas más vulnerables, incorporando sensores de humedad y estaciones GNSS para detectar variaciones en la estabilidad del terreno. Esto permitirá alertar con anticipación la posible ocurrencia de deslizamientos y mejorar la gestión del riesgo en la zona.

Dado que la geomorfología y la cobertura de suelo han demostrado ser factores condicionantes críticos, se recomienda restringir el desarrollo de infraestructura y asentamientos en zonas altamente susceptibles a deslizamientos, basándose en los mapas de susceptibilidad generados en este estudio.

Como estrategia más viable y sostenible para reducir la sobresaturación del suelo, se recomienda la reforestación con eucaliptos en un área aproximada de 40 hectáreas. Esta alternativa es más rentable en comparación con los pozos de bombeo, cuyo intento de implementación en 2017 resultó ineficaz y costoso. La plantación de eucaliptos permitirá absorber el exceso de agua en el suelo, estabilizar las laderas y mitigar el riesgo de deslizamientos.



## Referencias bibliográficas

- Araujo, G., Valderrama, P., Taipe, E., Christian, H., Díaz, J., y Miranda, R. (2016). *Dinámica del Deslizamiento de Sigvas*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. [https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/1196/1/A6715-Dinamica del deslizamiento de Sigvas-Arequipa.pdf](https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/1196/1/A6715-Dinamica%20del%20deslizamiento%20de%20Sigvas-Arequipa.pdf)
- Autoridad Autónoma de Majes. (s.f.). *Autodema Informa*. <https://www.autodema.gob.pe/category/autoinforma/>
- Aviles, D., y Casallo, G. (2022). *Comparación multitemporal de imágenes de alta resolución para el monitoreo de estabilidad de taludes en el valle de Sigvas - Arequipa* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio institucional URP. <https://repositorio.urp.edu.pe/entities/publication/94114f36-fa87-4f40-989f-2ea37ac339ae>
- Banco Central de Reserva del Perú. (2016). *Informe Económico y Social Región Arequipa*. <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Proyeccion-Institucional/Encuentros-Regionales/2016/arequipa/ies-arequipa-2016.pdf>
- Berov, B., Ivanov, P., Dobrev, N., & Krastanov, M. (2016). Addition to the method of Mora & Vahrson for landslide susceptibility along the Bulgarian Black Sea coast. In *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice* (pp. 397–403). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b21520-39>
- Cornelio, N. (2021). *Comparación del Método Mora-Vahrson y Morfométrico en la identificación de zonas susceptibles a deslizamientos, Huancayo* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Los Andes]. Repositorio institucional UPLA. <https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/3002>
- Creswell, J. W. & Creswell, J. D. (2018). *Mixed Methods Procedures, Research Design Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (3ª ed., pp. 337-357). SAGE Publications.

- Cuanalo, O., Oliva, A., y Gallardo, R. (2011). Inestabilidad de laderas Influencia de la Actividad Humana. *Elementos*, 84, 39–46.  
<https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000001436.pdf>
- Diario Sin Fronteras. (2025, Febrero). *Incremento del caudal del río Sigwas provoca corte de agua en Majes*. <https://diariosinfronteras.com.pe/2025/02/07/arequipa-incremento-del-caudal-del-rio-siguas-provoca-corte-de-agua-en-majes/>
- Diario Sin Fronteras. (2025, Marzo). *Autodema alerta sobre crecida del río Colca por lluvias intensas*. <https://diariosinfronteras.com.pe/2025/03/10/autodema-alerta-crecida-rio-colca-lluvias-intensas-peligro/>
- EOS Data Analytics. (2023, Noviembre). *NDMI (Normalized Difference Moisture Index)*. <https://eos.com/make-an-analysis/ndmi/>
- ESRI Land Cover. (s.f.). *Rasters de cobertura de suelo de la región Arequipa*. <https://livingatlas.arcgis.com/landcover/>
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3–4), 85–98.  
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>
- García, J. (2018). *Estudio hidrológico de las cuencas Camaná, Majes, Sihuas, Quilca – Vittor – Chili con información satelital* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio institucional UNALM.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12996/3530>
- Google Earth. (2023, Mayo). [Metadatos de altura y coordenadas del sector Alto Majes]. Consultado el 1 de febrero de 2025 en <https://maps.app.goo.gl/ZKWe5Yfg3DVS9X3t7>
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K.-T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1–2), 42–66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>

- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw Hill.
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook: A guide to understanding landslides* (U.S. Geological Survey Circular 1325). U.S. Geological Survey.  
[https://pubs.usgs.gov/circ/1325/pdf/C1325\\_508.pdf](https://pubs.usgs.gov/circ/1325/pdf/C1325_508.pdf)
- Instituto Geográfico Nacional. (s.f.). *Capa de límites distritales del Perú*. IDEP.  
<https://www.idep.gob.pe/>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (2020). *Monitoreo del Deslizamiento Alto Sigwas*  
*Periodo 2018 - 2019*.  
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/3048>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (2021). *Monitoreo Geodésico y Fotogramétrico del Deslizamiento de Alto Sigwas a Octubre 2021*.  
<https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/12378>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (2022). *Monitoreo del Deslizamiento de Alto Sigwas Periodo 2021*. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/13676>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (2023). *Monitoreo del Deslizamiento de Alto Sigwas Periodo 2022*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/4795>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2024, Noviembre). *Norma técnica N.º Normas actualizadas de la gestión del riesgo de desastres*. Gob.pe  
<https://www.gob.pe/institucion/indeci/normas-legales/6151098-normas-actualizadas-de-la-gestion-del-riesgo-de-desastres>
- Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2015). *Tecnología de Manejo del Cultivo de Alcachofa de Exportación en Sierra*.  
<https://repositorio.inia.gob.pe/server/api/core/bitstreams/719dee73-bd4c-453f-91b0-118c30600f5a/content>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales (1999). *Evaluación Técnica del área propuesta para el desarrollo del proyecto de irrigación Alto Sigwas – Pampas Bayas (Margen Izquierda del Río Sigwas) con la finalidad de definir los alcances del estudio*

- hidrogeológico y proponer el planteamiento hidráulico más adecuado para el sistema de riego.* <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3299>
- Jiménez, P. (2022). *Evaluación de la susceptibilidad a deslizamiento de masa aplicando la metodología Mora-Vahrson en la Parroquia Cutchil, Cantón Sigsig* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador]. Repositorio institucional UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23154>
- Luque, X., y Molina, M. (2018). *Utilización de Elementos Finitos y Análisis Numérico para la obtención de los factores de seguridad en el talud de Sigvas (Entre km.920 - km.921), Distrito de Majes - Caylloma y Distrito San Juan de Sigvas - Arequipa, Arequipa* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio institucional UCSM. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/8412>
- López, R., Zuluaga, A., Gómez, F., y Tapia, L. (2020). Aplicación del Método Mora-Vahrson para Evaluar la Susceptibilidad a Deslizamiento en el Municipio de Manaure, Cesar, Colombia. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 4(2), 57. <https://doi.org/10.55467/reder.v4i2.50>
- Martínez, I. (2016). Los deslizamientos en el Valle de Sigvas y el exceso de riego en la Pampa de Majes (Arequipa). *Agua y más.* <https://hdl.handle.net/20.500.12543/2586>
- Mendoza, J., y Aristizábal, E. (2017). Metodología para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en proyectos lineales. Estudio de caso en el acueducto del municipio de Fredonia, Antioquia. *Ingeniería y Ciencia*, 13(26), 173–206. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.13.26.7>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2024, Julio). *Padrón de Productores Agrarios, superficies agrícolas y principales cultivos de Arequipa*. Observatorio PPA <https://observatorio-ppa.midagri.gob.pe/>
- Montgomery, D., & Dietrich, W. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4), 1153–1171. <https://doi.org/10.1029/93WR02979>

- Montoya, V. (2019). *Caracterización del suelo e identificación de discontinuidades estructurales de deslizamientos mediante tomografía eléctrica 2D. El Alto, Pampas de Majes* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio institucional UNAS. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8755>
- Mora C., & Vahrson, W. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. *Environmental & Engineering Geoscience*, xxxi(1), 49–58. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.xxxi.1.49>
- Mora, R. (2004). *Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del Cantón San José, Provincia de San José, Costa Rica*. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
- Mujica, S., y Pacheco, H. (2013). Metodología para la generación de un modelo de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa, en la cuenca del río Camurí Grande, estado Vargas, Venezuela. *Revista de Investigación*, 37(80), 215–243. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4687635>
- Ortiz, V., Polo, C., Giraes, D., y Manco, D. (2023). Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa implementando el método Mora-Vahrson modificado para el casco urbano de Chemesquemena, Cesar, Colombia. *Tecnura*, 27(77), 49–69. <https://doi.org/10.14483/22487638.19951>
- Perez, F. (2023). *Caracterización Geofísica de zonas inestables en el valle de Sigüas mediante análisis comparativo de deslizamientos recientes y antiguo* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio institucional UNAS. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/5d51d132-15e8-40fa-8c9e-31d5751972a7>
- Perico, N., Tovar, C., Medina, E., Acosta, P., y Perico, N. (2025). Bioingeniería de taludes con árboles para disminuir deslizamientos: caso Betéitiva, Boyacá, Colombia. *Revista De Iniciación Científica*, 11(1), 24 - 32. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v11.1.4120>

- Pineda, J., y Rodríguez, C. (2020). Influencia de la morfogénesis en la estabilidad de laderas. *Obras y Proyectos*, 27, 26–40. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132020000100026>
- Quesada, A., y Feoli, S. (2018). Comparación de la Metodología Mora-Vahrson y el Método Morfométrico para Determinar Áreas Susceptibles a Deslizamientos en la Microcuenca del Río Macho, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 1(60). <https://doi.org/10.15359/rgac.61-2.1>
- Rahardjo, H., Hritzuk, K., Leong, E., & Rezaury, R. (2003). Effectiveness of horizontal drains for slope stability. *Engineering Geology*, 69(3–4), 295–308. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00288-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00288-0)
- Rahman, S., & Mesev, V. (2019). Change Vector Analysis, Tasseled Cap, and NDVI-NDMI for Measuring Land Use/Cover Changes Caused by a Sudden Short-Term Severe Drought: 2011 Texas Event. *Remote Sensing*, 11(19), 2217. <https://doi.org/10.3390/rs11192217>
- Rubio, L. (2023). *Zonificación de Riesgo a Deslizamiento mediante la metodología de Mora Vahrson - CENEPRED en el sector El Colorado Parte Baja, Chachapoyas, Amazonas 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. Repositorio institucional UNTRM. <https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/3634>
- Sentinel Hub EO. (2025, enero). *Rasters de humedad de los distritos de Majes y San Juan de Sigvas* <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2025, Febrero). *Datos Hidrometeorológicos a Nivel Nacional: Estación Pampa de Majes*. <https://www.senamhi.gob.pe/servicios/?p=estaciones>
- Sistema de Información Geológico y Catastral Minero. (s.f.). *Capas de geología y geomorfología de Arequipa*. Geocatmin. <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>



- Sistema Integrado de Estadística Agraria. (s.f.). *Metadatos de Calendarios de Siembras y Cosechas de los cultivos en los distritos de Majes y San Juan de Sigwas*.  
<https://siea.midagri.gob.pe/portal/calendario/>
- Solís, J. (2018). *Análisis de vulnerabilidad de la carretera nacional 218 Tramo Jaboncillal de Goicoechea a Carmen de Cartago* [Tesis de pregrado, Universidad de Costa Rica]. Repositorio institucional UCR.  
<https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/items/f7c14be6-6475-4cfb-a641-f4c387dddd15>
- Stein, S., Dugan, B., Gonzales Zenteno, E., Ticona, J., & Minaya, A. (2024). Slope stabilization through groundwater management with limited hydrogeological data: a case study from Majes, southern Peru. *Environmental Earth Sciences*, 83(8).  
<https://doi.org/10.1007/s12665-024-11509-1>
- Suárez, C., Borjas, R., Alvarado, L., Castro, V., Anculle, A., y Julca, A. (2023). Caracterización de las unidades agrícolas en la primera etapa del Proyecto de Irrigación Majes-Siguas, Perú. *Peruvian Agricultural Research*, 5(2), 52–66.  
<https://doi.org/10.51431/par.v5i2.855>
- Terzaghi, K. (1950). Mechanism of Landslides. In *Application of Geology to Engineering Practice* (pp. 83–123). Geological Society of America.  
<https://doi.org/10.1130/Berkey.1950.83>
- Turner, A., & Schuster, R. (1996). *Landslides: Investigation and mitigation*. Transportation Research Board.
- Van Westen, C., Castellanos, E., & Kuriakose, S. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3–4), 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Vanacker, V., Vanderschaeghe, M., Govers, G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., & de Bievre, B. (2003). Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean watersheds. *Geomorphology*, 52(3–4), 299–315.  
[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00263-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00263-5)




- Vigil, J. L. (2021). *Renovación Urbana del sector Tuctilla para optimizar el espacio público y el uso residencial* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. Repositorio institucional UNTRM. <https://doi.org/10.25127/ucni.v4i3.801>
- Zavalaga, M. (2022, Marzo). *El abismo que amenaza con desaparecer el valle de Sigvas y Majes I en Arequipa*. El Búho. <https://elbuho.pe/2022/03/arequipa-el-abismo-que-amenaza-con-desaparecer-el-valle-de-siguas-y-majes-i-video/>
- Zeballos, R. (2020). *Conflicto Socioambiental alrededor del Proyecto Especial Majes Sigvas I: El caso de la Salinización y Deslizamientos del Valle de Sigvas en el distrito de San Juan de Sigvas* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio institucional PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/items/0caf67c3-2f5e-4346-9ebe-7eff6019ab1b>





## **Anexos**

	Pág.
Anexo 1: Alternativas de Mitigación .....	1

## Anexo 1: Alternativas de Mitigación






### Reforestación con Eucaliptos:






Ventajas
Alta tasa de crecimiento 
Reducción de la humedad del suelo 
Adaptabilidad 
Protección contra la erosión 
Rentabilidad 
Bajo Mantenimiento 

Desventajas
Alto consumo de agua 
Baja biodiversidad 
Suelos más ácidos 
Riesgo de incendios 

Especie	Características
Eucalyptus Globulus	Rápido crecimiento, ideal para zonas de altitud media y suelos profundos.
Eucalyptus Camaldulensis	Adaptable a zonas áridas.
Eucalyptus Tereticornis	Resistente al calor y a vientos fuertes.
Eucalyptus Saligna	Crecimiento rápido, suelos profundos.
Eucalyptus Robusta	Tolerante a suelos húmedos.






### Pozos de Bombeo:

Ventajas
Reducción inmediata de nivel freático 
Control técnico preciso 
Solución localizada 
Efecto relativamente rápido 
Independencia de factores climáticos 

Desventajas
Costo elevado 
Dependencia de energía eléctrica 
Mantenimiento continuo 
Impacto ambiental local 
Solución temporal 

### Drenes Horizontales:

Ventajas
Disminuyen presión de poros 
Tecnología simple y económica 
No depende de energía eléctrica 
Mantenimiento sencillo 
Solución pasiva y permanente 
Mejoran estabilidad a mediano plazo 

Desventajas
Riesgo de obstrucción 
Dificultad de instalación 
Diseño técnico especializado 
Efecto no inmediato 
Poca adaptabilidad a condiciones 

Fuente: Elaboración propia.