

**Evaluación de peligros geológicos mediante imágenes satelitales Landsat 5 en el distrito de Chilete,
Cajamarca**

**Assessment of geological hazards using Landsat 5 satellite images in the district of Chilete,
Cajamarca**

Crispín Zenón Quispe Mamani^{1*}, Víctor Ausberto Arapa Vilca¹

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cajamarca, Av. Atahualpa 1070, C.P. 06003, Cajamarca, Perú

* Autor de correspondencia: cquispe@unc.edu.pe

Resumen

La complejidad geomorfológica y geológica del distrito de Chilete, situado en la provincia de Contumazá, región de Cajamarca, se manifiesta a través de factores condicionantes y desencadenantes fundamentales para la identificación, análisis y evaluación de peligros geológicos. Estos factores están intrínsecamente ligados a secuencias litoestratigráficas del Cretácico inferior y superior del Grupo Goyllarisquiza, abarcando las Formaciones Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat, así como la Formación Inca y el Grupo Puyllicana con sus Formaciones Chulec y Pariatambo. Estas formaciones y secuencias se superponen a depósitos volcanoclásticos de lavas, tobas riolíticas y andesíticas pertenecientes al Grupo Calipuy, y están recubiertas por depósitos coluvio-aluviales, siendo identificados sectores más vulnerables a la ocurrencia de peligros en estas áreas. La aplicación de técnicas avanzadas, como el Sensoramiento Remoto y Teledetección mediante imágenes satelitales Landsat 5, ha resultado crucial para determinar áreas susceptibles a peligros, mediante el procesamiento de imágenes, interpretación de contrastes, texturas y lineamientos estructurales con el software ENVI 5.3. Este estudio, enmarcado en una metodología hipotético-deductiva y de diseño no experimental, se espera que contribuya significativamente a la formulación de políticas de gestión de riesgos a nivel local y regional, reconociendo la importancia de la teledetección como herramienta geocientífica.

Palabras clave: geociencias, geomorfología, riesgos naturales, teledetección, vulnerabilidad

Abstract

The geomorphological and geological complexity of the district of Chilete, located in the province of Contumazá, Cajamarca region, is evident through fundamental conditioning and triggering factors for the identification, analysis, and assessment of geological hazards. These factors are intricately linked to lithostratigraphic sequences of the lower and upper Cretaceous from the Goyllarisquizga Group, encompassing the Chimú, Santa, Carhuaz, and Farrat Formations, as well as the Inca Formation and the Puylluicana Group with its Chulec and Pariatambo Formations. These formations and sequences overlay volcanoclastic deposits of lavas, rhyolitic and andesitic tuffs from the Calipuy Group and are covered by colluvial-alluvial deposits, with sectors more vulnerable to the occurrence of hazards identified in these areas. The application of advanced techniques, such as Remote Sensing and Teledetection using Landsat 5 satellite imagery, has been crucial in determining areas susceptible to hazards through image processing, interpretation of contrasts, textures, and structural alignments using ENVI 5.3 software. This study, framed within a hypothetical-deductive and non-experimental design methodology, is expected to significantly contribute to the formulation of risk management policies at the local and regional levels, recognizing the importance of teledetection as a geoscientific tool.

Key words: geomorphology, geosciences, natural risks, remote sensing, vulnerability

Introducción

En varios sectores de nuestro país, una tendencia urbanística actual es expandirse en áreas con configuración agreste, terreno montañoso y complejas cimentaciones, cada vez más ocupadas por valles, quebradas y ríos. Esta situación sugiere que el riesgo geológico asociado a diversos factores geoambientales aumentará si no se realiza una investigación centrada en identificar y caracterizar las áreas vulnerables afectadas por estos fenómenos (Ortiz, 2003). Los peligros geológicos son resultado de la dinámica terrestre externa, dependiendo de procesos geodinámicos tanto endógenos como exógenos, elementos inherentes a la naturaleza de la Tierra, que evolucionan constantemente tanto en la superficie como en el subsuelo, aunque no siempre sean perceptibles en su totalidad. Muchos de estos procesos, vinculados a variables desencadenantes, pueden desencadenar eventos catastróficos que afectan a personas y propiedades. Aunque en muchos casos no se pueden evitar, su impacto puede mitigarse y su probabilidad de ocurrencia reducirse, simplificando así el riesgo con la disponibilidad de información adecuada.

En los últimos años, se han producido eventos naturales de riesgo en varias zonas con la consiguiente pérdida de vidas humanas, una situación preocupante debido al avance constante de estos procesos hacia áreas más densamente pobladas. Por otro lado, existen evidencias de eventos geológicos peligrosos que ocurrieron y que aún afectan proporciones significativas de tierras de cultivo, viviendas e infraestructura.

La investigación propone la identificación, procesamiento, interpretación y evaluación de peligros geológicos en el distrito de Chilete mediante el uso de imágenes satelitales Landsat 5. Esta investigación no solo puede prevenir y prevenir riesgos geológicos asociados a diferentes factores geoambientales, sino que también servirá como línea de base para futuros estudios o trabajos de campo, comparando y correlacionando con características similares en el distrito y otras áreas locales, regionales y globales. La imagen satelital Landsat 5 permite referenciar, contrastar, evaluar y analizar datos de años anteriores con información reciente en el distrito de Chilete.

Como parte de la investigación, se plantea la adquisición y procesamiento de imágenes satelitales Landsat 5 para interpretar los riesgos en la hoja 15f de Cajamarca (Rivera, 1980). Esto implica establecer y analizar indicadores detonantes y desencadenantes para la zonificación de áreas según parámetros de amenazas, vulnerabilidad y riesgo geológicos, utilizando tecnologías de teledetección y principios de sensoramiento remoto.

Materiales y métodos

La región de Cajamarca se encuentra en la parte norte y occidental del territorio peruano, abarcando el sector sur de la región de Cajamarca, en la cordillera de los Andes del norte del país. El departamento de Cajamarca, políticamente situado en la zona norte del Perú, se extiende entre los paralelos 4° 30' y 7° 30' de latitud sur, y los meridianos 77° 47' y 79° 20' de longitud oeste. Limita al norte con la República de Ecuador, al sur con el departamento de La Libertad, al este con el departamento de Amazonas y al oeste con los departamentos de Piura y Lambayeque. Administrativamente, se encuentra dentro de la región de Cajamarca, abarcando la provincia de Cajamarca, las provincias de San Pablo y Contumazá, así como el distrito de Chilete. La delimitación espacial de esta investigación abarca la parte sureste de la región de Cajamarca, integrada por varios centros poblados, caseríos y anexos que conforman la comprensión territorial. Gran parte de esta área está delimitada por la cuenca hidrográfica del Jequetepeque, cuyas vertientes desembocan en la vertiente del Pacífico. El objetivo de este estudio es la identificación y descripción de peligros geológicos en el distrito de Chilete.

En términos de metodología, se utilizaron imágenes satelitales (Landsat 5) como muestras de investigación. Se llevó a cabo la transferencia a nivel digital, empleando para ello la imagen original y las correcciones necesarias para obtener mapas temáticos de peligros geológicos, evolución geomorfológica, de pendiente y comparación geológica. El control de calidad y procesamiento de los datos se realizaron mediante la detección de firmas espectrales y la identificación de anomalías. Estos procesos tecnológicos permiten una caracterización detallada y precisa de las áreas de estudio, contribuyendo significativamente a la comprensión de los riesgos geológicos en el distrito de Chilete.

Procedimientos y técnicas de recolección de datos

La investigación se clasifica como aplicada, ya que su enfoque está orientado a la evaluación, identificación y descripción de los peligros geológicos con el objetivo de prevenir daños futuros, contribuyendo así a su utilidad y minimizando la vulnerabilidad frente a riesgos geológicos. En cuanto al nivel, se considera descriptiva, dado que se detallan las características geomorfológicas mediante la utilización de planos temáticos, imágenes satelitales, plano geológico e interpretación, proporcionando información detallada sobre el agua, el suelo y la vegetación para identificar las zonas con mayores peligros geológicos. El diseño de la investigación se clasifica como no experimental, ya que no implica una manipulación deliberada de las variables; en su lugar, se centra en la identificación y análisis de las zonas más afectadas por los peligros geológicos, reflejando las condiciones naturales. En términos de método, se caracteriza como cualitativo, ya que se obtienen datos no cuantificables, como las características de la vegetación (densa, escasa, dispersa) y el suelo en las zonas con pendientes moderadas o suaves. Para ello, se han realizado comparaciones de imágenes satelitales para observar los efectos graduales que dejan en el tiempo geológico.

Métodos del estudio

En el marco de este estudio, se empleó el método del análisis geomorfológico, que considera parámetros morfogenéticos, morfométricos y morfodinámicos. La metodología abarcó diversas etapas, comenzando con la delimitación de unidades geomorfológicas mediante la interpretación de imágenes satelitales Landsat, así como el análisis de información bibliográfica y cartográfica, incluyendo el mapa geomorfológico del INGENMET del año 2009. En la etapa de gabinete, se determinó que el estudio se enmarca a nivel macro, con una escala de 1:100 000, permitiendo una visión exploratoria y detallada de la caracterización geomorfológica y riesgos geológicos. Se recopiló información temática y cartográfica relevante para Cajamarca y la región, sirviendo como referencia para la investigación. La interpretación de la imagen satelital Landsat 5 implicó la delimitación de unidades geomorfológicas naturales, apoyada por curvas de nivel, mapas hidrográficos y otras fuentes. El procesamiento de información se realizó mediante herramientas específicas como ENVI 5.3 y ArcGIS, ajustando el mapa preliminar con datos de trabajos de campo y contribuciones de especialistas, culminando en el mapa de evaluación geomorfológica. La identificación de riesgos y clasificación de unidades geomorfológicas consideró la configuración de grandes paisajes, formados por procesos endógenos y exógenos, como vulcanismo, plegamiento, fallamiento, denudación y litología, conformando el armazón de los paisajes actuales. Este enfoque metodológico contribuye a una comprensión detallada y precisa de los riesgos geológicos en el distrito de Chilette.

Contexto geológico regional

Las unidades objeto de estudio se originaron en la bien conocida Cuenca Occidental (Cuenca Chicama según INGEMMET, 1995). Esta cuenca se formó en un entorno deltaico durante el Cretácico inferior, con contribuciones aparentes desde el norte, según investigaciones de Carlotto et al. (2009). En las proximidades de Cajamarca, es posible distinguir cuatro unidades: Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat. Mientras tanto, en los límites de la cuenca, todo el paquete sedimentario se considera como una única unidad perteneciente al Grupo Goyllarisquizga (Figura 1).

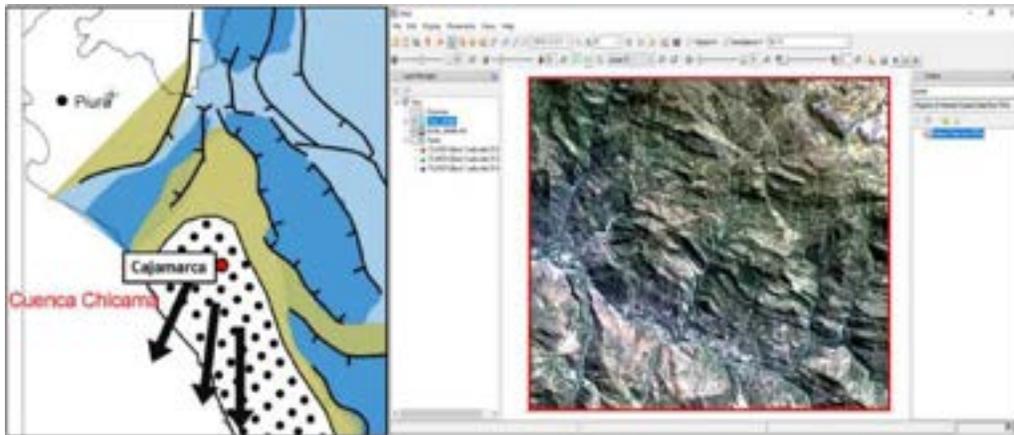


Figura 1. Geografía de la cuenca Chicama durante el Cretácico inferior (izquierda) y Selección ruta de salida de la imagen recortada, para la investigación (derecha).

En la región de Cajamarca, predominan rocas sedimentarias que se formaron a fines del Jurásico, específicamente en una cuenca al oeste que inicialmente estuvo cubierta por el mar. Durante el Neocomiano-Aptiano, la cuenca experimentó un desarrollo continuo con la deposición de sedimentos clásticos, principalmente en el Grupo Goyllarisquizga, Formaciones Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat, acumulando alrededor de 1 500 metros en la cuenca y apenas 200 metros en la plataforma. A pesar de que el mar abarcaba partes de la cuenca, no era profundamente extenso, resultando en una acumulación clástica mayormente deltaica o costera, con excepción de las calizas de la Formación Santa, que representan una considerable transgresión. La plataforma permaneció mayormente emergida. Hacia finales del Aptiano y principios del Albiano, la cuenca y la plataforma empezaron a hundirse, con el mar invadiendo de manera decidida la cuenca y cubriéndola por completo en el Albiano medio. Durante este periodo, se depositaron los niveles calcáreo-arenosos de la Formación Inca en un ambiente transicional, seguido de las calizas Chulec y Pariatambo en la cuenca. Hacia finales del Albiano medio, el mar cubrió totalmente la región hasta llegar al oriente peruano, condiciones que persistieron hasta el Santoniano, durante el cual se acumularon las rocas calcáreas de las Formaciones Yumagual, Mujarrúm, Quilquiñán, Cajamarca y Celendín, con un espesor de aproximadamente 1 500 metros en la cuenca. En el Paleógeno, se depositaron los derrames y brechas del Volcánico Llama, seguidos de las brechas piroclásticas y tobas del Volcánico Porculla; finalmente, en el Neógeno, se depositaron

las tobas de cenizas y cristales del Volcánico Huambos en la región.

Resultados y discusión

Análisis y combinación de las bandas

El satélite Landsat 5, captura imágenes desde el año 1984 hasta la actualidad, el ancho de la escena es alrededor de 180 km² y posee 7 bandas espectrales:

- **Banda 1 (Azul):** Usada para el mapeo de aguas costeras, mapeo de tipo de forestación o agricultura y la identificación de los centros poblados.
- **Banda 2 (Verde):** Corresponde a la reflectancia del verde de la vegetación vigorosa o saludable. También es usada para la identificación de centros poblados.
- **Banda 3 (Rojo):** Es usada para la discriminación de especies de plantas, la determinación de límites de suelos y delineaciones geológicas, así como modelos culturales.
- **Banda 4 (Infrarrojo Reflectivo):** Determina la cantidad de biomasa presente en un área, enfatiza el contraste de zonas de agua-tierra, suelo-vegetación.
- **Banda 5 (Infrarrojo Medio):** Es sensible a la cantidad de agua en las plantas. Usada en análisis de estas, tanto en época de sequía como cuando es saludable. También es una de las pocas bandas que pueden ser usadas para la discriminación de nubes, nieve y hielos.
- **Banda 6 (Termal):** Para la vegetación y detección de la vegetación que se encuentra enferma, intensidad de calor, aplicaciones de insecticidas, para localizar la polución termal, ubicar la actividad geotermal, actividad volcánica.
- **Banda 7 (Infrarrojo medio):** Es importante para la discriminación de tipos de rocas y suelos, así como el contenido de humedad entre suelo y vegetación.

Para la combinación de bandas primero se debe tener la respectiva imagen recortada y calibrada como en los pasos anteriores se mostró.

A continuación, se comienza a combinar bandas usando la data Manager como se muestra en la siguiente imagen (Figura 2).

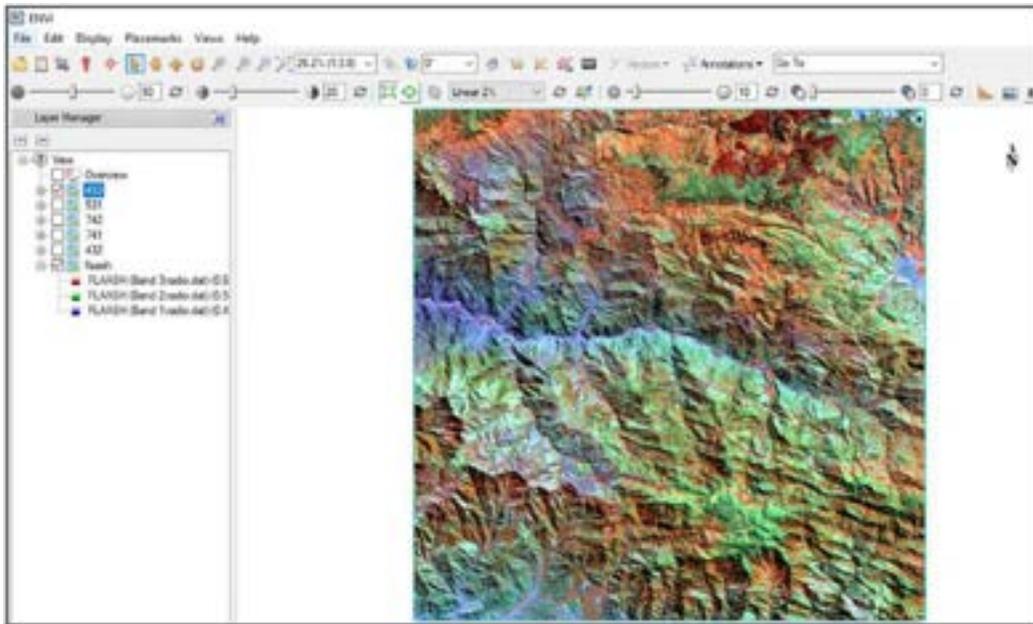


Figura 2. Imagen seleccionada con ruta de salida y combinación de las 7 bandas

Determinación de la litología

Para el presente análisis se necesitó hacer un cociente de bandas para determinar los diferentes tipos de litología que hay en nuestra zona de investigación. Luego se hizo una comparación con el plano geológico del cuadrángulo de Cajamarca 15f, para poder tener una determinación de zonas más específica.

Coficiente de banda 7/5, 5/4 y 3/1

Encontrando similitudes geológicas podemos observar que las tonalidades rosáceas perteneces a rocas volcánicas, las tonalidades verdes presentes en la parte superior tienen relación con andesitas, las tonalidades amarillentas tienen una relación con rocas carbonatadas y/o rocas sedimentarias.

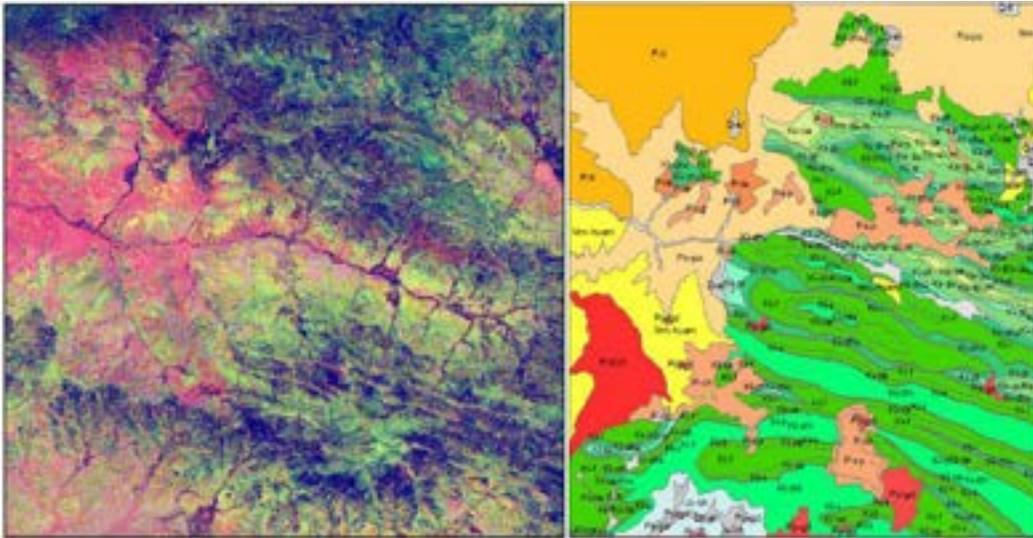


Figura 3. Imagen seleccionada de la zona 4 (izquierda) e imagen de plano geológico regional (derecha)

Para tener un análisis más exacto se comparó la imagen resultante con el plano de comparación geológico para establecer un tipo de correlación.

Determinación de zona de riesgos geológicos

Este análisis se basa en la interpretación de los anteriores ya mencionados, tales como pendientes, litología, geformas, orientación del terreno además de la comparación que se hizo entre imágenes para ver la evolución de la geomorfología.

En la siguiente imagen se han denotado los peligros geológicos que son en su mayoría caída, deslizamientos y flujos, estos se determinaron gracias al análisis de pendientes para ver las zonas con mayor vulnerabilidad, así como también influyeron el mapeo litológico que se hizo por cocientes de bandas.

Importación de datos sobre riesgos geológicos

Luego de haber hecho el análisis con la combinación de bandas se tiene posibles zonas las cuales se podrían clasificar en una de mayor riesgo que otras lo cual se puede corroborar con la importación de datos que han sido recopilados y puestos en Shapefile, a continuación, se muestra como fue el procedimiento para insertar esos datos en la imagen que se ha trabajado. Una vez que se tiene la data, se exporta como vector, `file>open>` y seleccionar donde se tiene guardada. Se han seleccionado el archivo que contiene el recurso de forma ya que es el que contiene toda la información como:

- Deslizamientos

- Erosión
- Zonas críticas
- Caída de rocas.

En la imagen se muestra y se observan todos los puntos críticos asociados a la imagen primaria ahora para un mejor detalle es que se procede a ver los puntos en la zona más reducida (Figura 4).

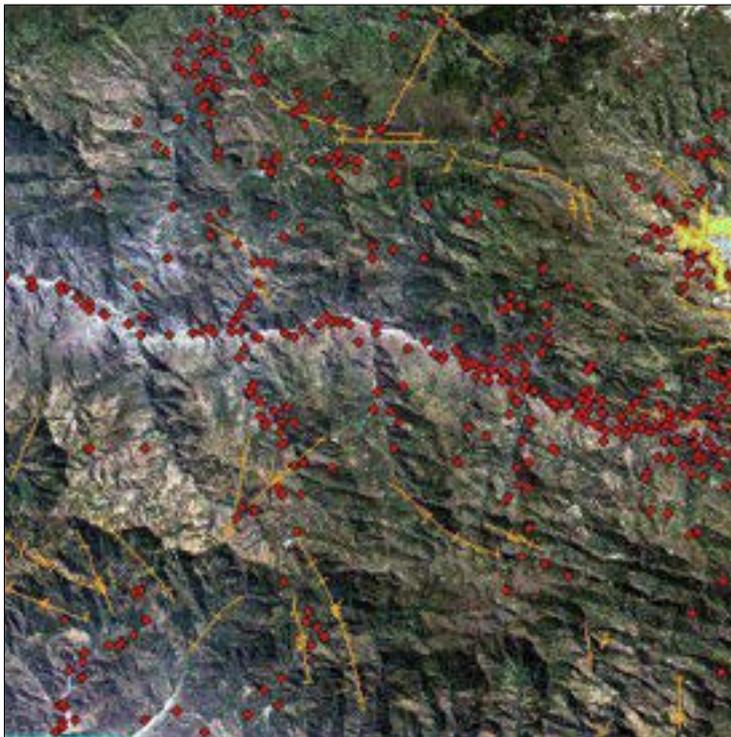


Figura 4. Zonificación de los principales puntos de peligros geológicos

En la Figura 5 se muestran crucetas rojas los cuales identifican los principales peligros geológicos ubicados en la carretera Cajamarca- Ciudad de Dios los cuales fueron identificados mediante la comparación de imágenes, la combinación de bandas para ver la litología, mineralogía zonas de gran humedad lo que conlleva a la inestabilidad de taludes entre otros factores que condicionan la geodinámica del modelamiento actual del terreno.

Después de procesar toda la información, procedemos a la creación de mapas temáticos. Dado que ENVI carece de un editor de mapas, optamos por utilizar ArcGIS, ya que ENVI ofrece la posibilidad de exportar las escenas para su posterior trabajo en ArcMap.



Figura 5. Principales puntos de peligros geológicos

Para exportar datos ArcMap se realiza a partir de la data manager y luego en la opción Export files in ArcMap. El mapa temático de la zona de estudio contiene la información de peligros geológicos, dicho mapa es creado con imágenes en ENVI.

Conclusiones

La correcta integración de herramientas accesibles permite la identificación de áreas propensas a riesgos geológicos, analizando las estructuras morfoestructurales en distintos niveles topográficos (planicies, lomadas, laderas y escarpes) en relación con el tipo de roca, cuencas hidrográficas y suelos. El uso del software ENVI 5.3 ha facilitado el procesamiento de imágenes satelitales a escala regional, permitiendo distinguir contrastes de colores que posibilitan la interpretación desde la primera etapa de la investigación, llevada a cabo principalmente en el entorno de trabajo. Además, el análisis de combinaciones de contrastes, texturas, lineamientos e intensidades por anomalías, integrado con sistemas de información geográfica, requiere corroboración de datos en el campo (In Situ). La composición de bandas para pendientes, relieve de sombras y zonificación se realiza mediante la observación de tonalidades de colores en imágenes satelitales. El mapa de riesgos geológicos se vincula temporalmente con el análisis litológico, pendientes y orientación, estableciendo los factores desencadenantes morfoestructurales que influyen en la dinámica geológica de la región.

Referencias

- Arapa, C. (2022). Evaluación de peligros geológicos y delimitación de la faja marginal para el distrito de Uchumayo, provincia de Arequipa – Región-Arequipa. Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Arribasplata, J. (2014). Peligros Geológicos entre las localidades de Cushunga, Chamis y Alrededores. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Ayala-Carcedo, J. (2002). Riesgos Naturales, Conceptos Fundamentales y Clasificación. Madrid: Ariel.
- CENEPRED. (2014). Lineamientos para el Proceso de Estimación del Riesgo de Desastres.
- Chuvieco, E. (2010). Fundamentos de Teledetección Espacial. Editorial Rialp S.A. Alcalá, España.
- Cuesta, M. (2003). Geomorfología e Inestabilidad de laderas en la cuenca Carbonífera Central (Valle del Nalón, Asturias). Análisis de la susceptibilidad ligada a los movimientos superficiales del terreno. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo.
- Dávila, J. (2011). Diccionario Geológico. Lima, Perú: Ingemmet.
- Díaz, J. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga-Colombia: Instituto de Investigaciones sobre erosión y deslizamientos.
- ESRI. (s.f.). Hillshade function. Recuperado de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/data/imagery/hillshade-function.htm>.
- INDECI (2006). Evaluación de riesgos en Cajamarca.
- INEI. (2017). Censo Nacional Poblacional.
- OEA. (1993). Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado. Washington D.C.
- Rivera, L. (1980). Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba. Boletín número 31-INGEMMET. Lima, Perú.
- Tafur, A. (1950). Nota preliminar de la Geología del valle de Cajamarca, Perú. Tesis Doctoral, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias. Lima, Perú.