Red DESIR

MÁSTER INTERNACIONAL
APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS MINERALES

TESIS DE MAESTRÍA

Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca del río Llaminchán (Cajamarca, Perú)

Sandra Paula Villacorta Chambi

Marzo de 2007

Red DESIR

MÁSTER INTERNACIONAL
APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS MINERALES
Línea:

Medio Ambiente y Minería

TESIS DE MAESTRÍA

Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca del río Llaminchán (Cajamarca, Perú)

Sandra Paula Villacorta Chambi

Marzo de 2007

CURSO 2006-2007

MÁSTER INTERNACIONAL
APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS MINERALES

Como director del Trabajo,

Autorizo la presentación de la Tesis de Maestría
"Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca del río Llaminchán (Cajamarca, Perú)"

Realizado por
Sandra Paula Villacorta Chambi

Bajo mi dirección
y

Luis Laín Huerta

José Machare Ordoñez

Lionel Fídel Smoll

Víctor Carlotto Caillaux

Firmado: **Prof. Miguel Llorente Isidro**

Fecha: 02 de febrero de 2007

Red DESIR

Constituido el tribunal nombrado por el Coordinador Internacional del Programa de Máster Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales, el día ___ de _____de 2007

Presidente:_____
Secretario:_____
Vocal:_____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis de Maestría el día __ de _____de 2007

EL PRESIDENTE **LOS VOCALES**

EL SECRETARIO

Acta de Calificación de la Tesis de Maestría

En la ciudad de Lima, Perú, el día.....de…….....de 2007 a las.....horas, la candidata Doña Sandra Paula Villacorta Chambi, presentó la defensa de su tesis titulada "Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca del río Llaminchán (Cajamarca, Perú)" requisito indispensable para obtener el título de Master en la Maestría Internacional "Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales".

El tribunal estuvo constituido por:

Nombres y Apellidos

Presidente (a)

Secretario (a)

Vocal

Vocal

Una vez presentada el tribunal lo declaró:

_____ con la puntuación de _____

Basada en la siguiente escala:

Escala de calificaciones	
Base	100
Insufisiente	<50
Suficiente	50-70
Notable	70-80
Sobresaliente	>80

Firmas

_____ Presidente (a)

_____ Secretario (a)

_____ Vocal

_____ Vocal

Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca del río Llaminchán (Cajamarca, Perú)

Memoria de la Tesis de Maestría que para optar al Título de Master en "Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales", impartido por la Red DESIR, es presentada por la Ingeniera Geóloga

Sandra Paula Villacorta Chambi

Universidad Nacional de Ingeniería

Dirección
Miguel Llorente Isidro
Luis Laín Huerta

Tutoría
Lionel Fídel Smoll
José Macharé Ordóñez
Víctor Carlotto Caillaux

Realizada en el Instituto Geológico y Minero de España y el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico de Perú

Marzo de 2007
Lima (Perú)

DEDICATORIA

A Yamile y Jorge

AGRADECIMIENTOS

La realización de estudio no habría sido posible sin el apoyo de dos grandes entidades: el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Por ello, mis mayores muestras de agradecimiento a las autoridades de dichas instituciones representadas por el Ing. Víctor Lay Biancardi, Presidente del Consejo Directivo del INGEMMET; y al Dr. José Pedro Calvo Sorando, Director General del IGME, por las facilidades brindadas durante la ejecución de este estudio.

De igual forma hago llegar mis agradecimientos a las autoridades de la Red-Desir, representados por el Dr. Ricardo Castroviejo y el Dr. José Antonio Espí por el apoyo brindado a nivel profesional y personal durante el desarrollo de este trabajo y del Máster Internacional "Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales 2006-2007".

A mis directores de Tesis: Ing. Miguel Llorente. y Msc. Luis Laín, les agradezco por su paciencia al transmitirme sus amplios conocimientos, por el apoyo y animo constante en el desarrollo de este trabajo.

De igual forma, hago llegar mis mas sinceros agradecimientos a mis asesores: Dr. José Macharé, Dr. Víctor Carlotto e Ing. Lionel Fidel, por sus consideraciones, sugerencias y apoyo total para llevar a buen término éste trabajo de Tesis.

Así mismo agradezco de manera especial al Ing. José cárdenas quien me hizo observaciones fundamentales de todo el documento; al Ing. Bilberto Zavala por sus observaciones acerca de la metodología y a la Ing. Esther Alberruche por sus observaciones acerca de la presentación del trabajo de Tesis.

A mis compañeros de las Dirección de Geología Ambiental del INGEMMET principalmente a Manuel Vílchez y Carlos Guerrero quienes colaboraron con sus datos campo; a Fluquer Peña y Víctor Vargas por los datos hidrogeológicos; a Yeslin Olarte por su apoyo en los trabajos de campo y a Luz Marina Villanueva por las facilidades en las coordinaciones "virtuales" con la oficina.

También quiero agradecer a los demás profesionales del INGEMMET que colaboraron con el desarrollo de este trabajo, en especial a Pedro Navarro por los datos geológicos y a Samuel Lu por el apoyo en SIG.

Finalmente un agradecimiento especial a mi esposo Jorge Quispe por sus observaciones e ideas que me ayudaron a optimizar este trabajo y por su apoyo constante durante todo su desarrollo.

ÍNDICE

I. RESUMEN 13
II. ABSTRACT 13
1 GENERALIDADES 15
1.1 PRESENTACIÓN 15
1.2 CONTENIDO Y ORGANIZACIÓN DE ESTE DOCUMENTO 16
1.3 PROBLEMÁTICA DE PARTIDA 16
1.4 OBJETIVOS 17
1.5 ANTECEDENTES 17
1.6 CONCEPTOS GENERALES 18
1.6.1 Sistemas de información geográfica (SIG) 19
1.6.2 Movimientos de ladera 20
1.6.3 Clasificación de los movimientos de ladera 22
1.6.4 Factores que influyen en la ocurrencia de movimientos de ladera 28
1.7 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO 31
1.7.1 Geografía y Fisiografía 31
1.7.2 Contexto Geológico 40
2 METODOLOGÍA 48
2.1 TRABAJOS PRELIMINARES 48
2.1.1 Recopilación, revisión y clasificación de la información existente 48
2.1.2 Elección de escala de trabajo de campo 48
2.1.3 Delimitación del ámbito de estudio 49
2.1.4 Fotointerpretación 49
2.1.5 Preparación de mapas preliminares 49
2.2 INVENTARIO Y CARTOGRAFIADO 50
2.2.1 Inventario de movimientos de ladera 50
2.2.2 Cartografiado de procesos superficiales 50
2.3 PREPARACIÓN DE BASES DE DATOS ESPACIALES 51
2.3.1 Digitalización y conversión de formatos 51
2.3.2 Organización de la información espacial 51
2.3.3 Clasificación y depuración de datos espaciales 52
2.4 ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD 52
2.4.1 Modelos de susceptibilidad a los movimientos de ladera 53
2.4.2 Modelo, escala y variables elegidas 55
2.4.3 Análisis matricial 73
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 79
3.1 RESULTADOS 79
3.1.1 Inventario de movimientos de ladera 79
3.1.2 Base de datos espaciales 83
3.1.3 Mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera 83
3.1.4 Contribución a la prevención en la región 85
3.2 CONCLUSIONES 85
3.3 RECOMENDACIONES 86
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 88
5 ANEXOS 93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porosidad y permeabilidad de diferentes tipos de materiales (modificado de Davis y De Wiest, 1971).....57
Tabla 2. valoración de la calidad de la roca en función del RMR (modificado de Laín y otros, 2005).....57
Tabla 3. Valoración de la capacidad portante de suelos en función del CBR (modificado de Laín y otros, 2005).....57
Tabla 4. Principales características litológicas, hidrogeológicas y geotécnicas de las unidades litológicas en la cuenca Llaminchán. 64
Tabla 5. Ejemplos de movimientos de ladera inventariados.....65
Tabla 6. Matriz suma de factores.....76
Tabla 7. Matriz de reclasificación de suma de factores.....76
Tabla 8. Matriz síntesis del mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca Llaminchán.....77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes del SIG.....20
Figura 2. Distribución de los movimientos de ladera en diversos ambientes terrestres (Modificado de Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002).....21
Figura 3. Movimientos de ladera con fase aérea (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002)..... 23
Figura 4. Movimientos de ladera con fase terrestre y superficie de ruptura: Deslizamientos (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002)..... 24
Figura 5. Movimientos de ladera con fase terrestre y sin superficie de ruptura: reptación y flujos (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002)..... 25
Figura 6. Ejemplos de Movimientos complejos sucesivos (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002)..... 27
Figura 7. Ejemplos de movimientos complejos simultáneos (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002)..... 27
Figura 8. Ejemplos de movimientos de ladera volcánicos (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002)..... 28
Figura 9. Clasificación de los factores condicionantes y desencadenantes del terreno (Ayala-Carcedo y Olcinas 2002)..... 29
Figura 10. Ubicación de la cuenca del río Llaminchán..... 32
Figura 11. Ubicación de la cuenca Llaminchán en la cuenca Jequetepeque..... 33
Figura 12. Esquema de las unidades geomorfológicas en la cuenca Llaminchán..... 39
Figura 13. Esquema de la geología y unidades estructurales..... 41
Figura 14. Esquema de la columna estratigráfica en la cuenca Llaminchán..... 43
Figura 15. Estructura de carpetas..... 51
Figura 16. Porcentaje del número de movimientos de ladera registrados en el inventario..... 79
Figura 17. Porcentaje del número de deslizamientos rotacionales y traslacionales..... 80

Figura 18. Porcentaje del número de caídas..... 80
Figura 19. Porcentaje del número de flujos..... 81
Figura 20. Porcentaje del número de movimientos de ladera respecto a las unidades geológicas..... 81
Figura 21. Porcentaje del número de movimientos de ladera respecto a las unidades litológicas..... 82
Figura 22. Porcentaje del número de movimientos de ladera según la pendiente del terreno..... 82
Figura 23. Porcentaje del número de movimientos de ladera según el tipo de acuífero..... 83
Figura 24. Ventana de comando ArcINFO donde se observa la secuencia de comandos seguida para la reclasificación del mapa matricial..... 99

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. Bosque Seco ralo caducifolio. Carretera Chilete – San Pablo (tomado de: INRENA-PEJEZA, 2004).....34
Foto 2. Vista panorámica del centro poblado de San Pablo, distrito y provincia San Pablo, departamento de Cajamarca.....36
Foto 3. Vista del centro Arqueológico de Kuntur Wasi.....38
Foto 4. Vista del cauce medio del río Llaminchán.....40
Foto 5. Secuencia de estratos de caliza de la Formación Cajamarca con acumulación de canchales.....42
Foto 6. Depósitos aluviales de la quebrada San Antonio.....59
Foto 7. Andesitas fracturadas correspondientes a la unidad litológica RV2 (Secuencia Chilete) en un tramo de la carretera Chilete-San Pablo-San Bernardino.....62
Foto 8. Desprendimientos de rocas volcánicas fracturadas en ambas márgenes del río Llaminchán, entre Chilete y la mina Paredones (Tabla 5, ficha 30).....66
Foto 9. Desprendimiento de rocas sedimentarias fracturadas de la Formación Farrat en el sector Pueblo Nuevo (Tabla 5, ficha 73).....67
Foto 10. Deslizamiento Sector Pueblo nuevo. Se observa el agrietamiento con un ancho aproximado de 2 metros (Tabla 5, ficha 48).....68
Foto 11. Deslizamiento rotacional en la trocha carrozable Santa Rosa de Unanca-Llanavaco (Tabla 5, ficha 84).....68
Foto 12. Vista del huayco de la quebrada San Antonio (Tabla 5, ficha 24).....69
Foto 13.- flujo de lodo de la quebrada San Nicolás (Tabla 5, ficha 66).....69
Foto 14. Vista de la reptación en el sector de Lachiconga (Tabla 5, ficha 78).....70
Foto 15. Vista del deslizamiento-flujo en el sector de Sarapacha (Tabla 5, ficha 85).....71

I. RESUMEN

La cuenca Llaminchán se ubica en la Cordillera Occidental del norte del Perú, dentro de la región Cajamarca. Tiene un área de 115 km^2, relieve moderado a abrupto y geológicamente está conformada por rocas volcánicas eocenas-oligocenas que cubren discordantemente a rocas sedimentarias cretácicas. El análisis mediante Sistemas de Información Geográfica del cartografiado de procesos superficiales, del inventario de movimientos de ladera, de la topografía, de la litología y de la hidrogeología, efectuado en la cuenca Llaminchán, ha permitido obtener un mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera, de alta calidad. Como resultado, se observa que las zonas con mayor susceptibilidad se encuentran al noreste de la ciudad de San Pablo, el flanco sur del cerro Callancas, el sector norte del poblado Santa Ana, la parte alta del sector Pueblo Libre-El Naranjo y la zona comprendida entre Chilete y la mina Paredones. Esta información, será presentada a las autoridades y a la población para su aplicación en la planificación territorial y en los planes de prevención frente a los desastres naturales en la cuenca Llaminchán, lo que contribuirá al desarrollo sostenible de la Región Cajamarca. Adicionalmente, esta metodología está siendo planteada al INGEMMET para su aplicación en el estudio de otras cuencas hidrográficas.

II. ABSTRACT

The Llaminchan basin is located in the Western Cordillera of northern of Peru, within the Cajamarca region. It has an area of 115 km^2 , a moderate to strong relief and geologically it is made up by eocene-oligocene volcanic rocks that cover uncomformably cretaceous sedimentary rocks. The analysis using Geographic Information Systems of the mapping of superficial processes, the inventory of slope movements, the topography, litology, hydrogeology applied to the Llaminchan Basin, allows to obtain a high quality map of susceptibility to slope movements. As a result, it is show that the zones with greater susceptibility are to the northeast of San Pablo, the southern flank of the Callancas Hill, the northern sector of Santa Ana, the high area of Pueblo Libre-El Naranjo zone, and the zone between Chilete and the Paredones mine. This information, will be presented to the authorities and population for their application in the territorial planning and the plans of prevention by natural disasters in the Llaminchan basin, which will contribute to the sustainable development of the Cajamarca region. Additionally, this methodology is being proposed to the INGEMMET for its application in other studies of hydrographic basins.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1 GENERALIDADES

1.1 PRESENTACIÓN

Este trabajo se presenta como prueba de aptitud para la obtención del título de Master en "Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales" (Master Alfa II – 0459 – FA) en la especialidad: "Análisis y Gestión Ambiental para la puesta en Valor de los Recursos Minerales", una de las dos especialidades de este master, el cual es uno de los proyectos del Programa "América Latina – Formación Académica" (ALFA), y está avalado por La Red Desarrollo Sostenible-Ingeniería-Recursos Naturales (DESIR). La red DESIR integra 20 instituciones de Europa, Iberoamérica y Estados Unidos y su objetivo principal es capacitar a profesionales de América Latina en la aplicación de criterios de desarrollo sostenible, el rigor científico-técnico y el nivel de excelencia internacional. El programa ALFA es un proyecto de cooperación entre Instituciones de Educación Superior de la Unión Europea (UE) y América Latina.

El presente estudio analiza mediante el uso de SIG, un área de interés para el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET), en el marco de la colaboración existente entre el INGEMMET, la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) con el objetivo de obtener un mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera, infraestructura de conocimiento para contribuir a la planificación y ordenamiento territorial a nivel distrital de la cuenca del río Llaminchán. Su desarrollo se ha realizado bajo la dirección de Miguel Llorente Isidro y Luís Laín Huerta por parte del IGME y con la tutoría y supervisión de Lionel Fidel Smoll, José Macharé Ordóñez y Víctor Carlotto Caillaux del INGEMMET.

1.2 CONTENIDO Y ORGANIZACIÓN DE ESTE DOCUMENTO

Este documento está constituido por cuatro capítulos con un total de 106 páginas, ocho tablas, 24 figuras, 15 fotos y diez anexos donde se incluye la cartografía empleada (siete mapas) y resultados.

En el primer capítulo se presenta el contexto que justifica la realización del estudio, mostrándose la problemática de partida, los objetivos y los dos conceptos que estructuran el presente trabajo: las herramientas empleadas (Sistemas de Información Geográfica) y el objeto de análisis (los movimientos de ladera).

En el segundo capítulo se describe el procedimiento seguido en este trabajo con el cual se obtuvieron los resultados y conclusiones, los cuales se resumen en el tercer y último capítulo, donde además se muestran las recomendaciones del caso.

Finalmente, después del apartado de referencias bibliográficas, se presenta los anexos, en los que se puede consultar: las principales definiciones consideradas en trabajos de este tipo (anexo I); la ficha utilizada en el inventario de movimientos de ladera (anexo II); el procedimiento seguido para la reclasificación de la matriz de susceptibilidad en ArcGIS (anexo III) y las cartografías usadas en el análisis mediante SIG y aquellas resultantes del trabajo de Tesis (anexos IV a X).

1.3 PROBLEMÁTICA DE PARTIDA

La zona de estudio se encuentra enmarcada en la región de Cajamarca, una de las regiones de Perú con mayor potencial económico atribuida principalmente a la actividad minera. En efecto, sus tierras albergan al yacimiento de oro más grande de sudamérica conocido como Yanacocha y a numerosos proyectos oro-plata-cobre de gran volumen como Minas Conga, Tantahuatay, La Zanja, Michiquillay, El Galeno, entre otros. Además, esta región tiene importantes centros turísticos e históricos (como los Baños del Inca) y a la fecha registra un crecimiento gradual en agricultura y ganadería.

Para contribuir con el desarrollo económico sostenible de la región Cajamarca, se hace necesario estudios geoambientales, debido a que gran parte del territorio peruano se ve

afectado constantemente por fenómenos naturales como los movimientos de ladera, sin que existan aún planes de contingencia adecuados para actuar frente a los desastres que provocan, ni planes preventivos que permitan un desarrollo ordenado del territorio. Por lo tanto, es muy importante utilizar metodologías modernas para generar información geocientífica que contribuya a la planificación y ordenamiento a nivel regional y distrital, en forma inmediata.

1.4 OBJETIVOS

El objetivo general de este estudio es la obtención del mapa de susceptibilidad por movimientos de ladera en el área de la cuenca Llaminchán.

Los objetivos específicos para la obtención del mapa de susceptibilidad por movimientos de ladera son los siguientes:

- Realizar el inventario de movimientos de ladera
- Generar la cartografía de procesos superficiales (en su mayoría movimientos de ladera) a escala 1/25,000.
- Obtener y preparar bases de datos espaciales para realizar análisis SIG
- Obtener el mapa de susceptibilidad por movimientos de ladera en base a los resultados obtenidos del análisis con SIG.
- Contribuir a la prevención de riesgos por movimientos de ladera en la región de Cajamarca mediante la difusión de los resultados.

1.5 ANTECEDENTES

Entre los distintos trabajos realizados en la zona de estudio, cuatro son de especial relevancia para el desarrollo de esta Tesis de Maestría, a saber: el Plan de Ordenamiento Ambiental de la Cuenca Jequetepeque para la Protección del Embalse Gallito Ciego y el Valle Agrícola", realizado por la Oficina Nacional de Evaluación de los Recursos Naturales (ONERN) en 1984; el "Estudio geodinámico de la cuenca del río Jequetepeque" realizado por Fidel y Olivares (1994), el "Análisis de vulnerabilidad del Proyecto Especial Jequetepeque - Zaña a los peligros naturales", realizado por Vásquez la Crúz (1997) y el "Estudio Geoambiental de la cuenca Jequetepeque" que está desarrollando en la actualidad el INGEMMET.

En el "Plan de Ordenamiento Ambiental de la Cuenca Jequetepeque para la Protección del Embalse Gallito Ciego y el Valle Agrícola", el equipo de profesionales de la ONERN (1984) hace un análisis preliminar de las potencialidades naturales y socioeconómicas, las limitaciones y riesgos naturales y tecnológicos de la región en la que se enmarca la zona de estudio; así como propuestas de ordenamiento y manejo ambiental.

En 1984, Fidel y Olivares en el "Estudio geodinámico de la cuenca del río Jequetepeque" realizan el primer inventario de fenómenos naturales que afectaron el área de la cuenca Jequetepeque, que encuadra a la cuenca Llaminchán y presentan el mapa de zonificación de riesgos y zonas críticas por peligros geológicos en base a información litológica, de pendientes y geodinámica a escala 1/100,000.

Años después, en el "Análisis de vulnerabilidad del Proyecto Especial Jequetepeque - Zaña a los peligros naturales", Vásquez la Crúz (1997) determina en forma preliminar que peligros naturales afectan a las obras de infraestructura más resaltantes de la cuenca Jequetepeque.

El "Estudio Geoambiental de la cuenca Jequetepeque", es el estudio más reciente en el área de la cuenca Jequetepeque y se empezó a ejecutar en marzo del 2006, a cargo del INGEMMET. La finalidad de este estudio es brindar a las autoridades y a la población información de Base Ambiental, que contribuya a mejorar las condiciones de vida de sus habitantes. Dentro de dicha información se encuentra la referida a la susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones.

1.6 CONCEPTOS GENERALES

En este apartado, y con el fin de facilitar el seguimiento de este trabajo, se ha considerado oportuno presentar una síntesis de los conceptos básicos acerca del análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera, sujetos con frecuencia a controversia y confusión. Estos conceptos se refieren a las herramientas empleadas (los SIG) y al objeto de análisis (los movimientos de ladera y su clasificación).

1.6.1 Sistemas de información geográfica (SIG)

Un SIG, es un "Sistema informatizado para la captura, almacenamiento, obtención, análisis y visualización de información espacial" (Clarke, 1990) que tiene cuatro componentes principales, que son el hardware, el software, la información espacial y el equipo técnico especializado (figura 1).

El hardware es el conjunto de componentes informáticos físicos y tangibles empleados. Por ejemplo el monitor, la impresora, el ratón, los discos duros y en general los circuitos, las placas y los chips, entre otros.

El software es el soporte informático lógico e intangible, que hace que funcione el hardware, es decir el conjunto de algoritmos que permite manejar los datos y realizar tareas específicas con ellos. Por ejemplo: Arcgis, Word, Excel, Windows.

La información espacial está constituida por cualquier dato con referencia a su posición en algún sistema de coordenadas y que lleva asociado un identificador único que le diferencia de otros elementos y una serie de atributos que sirven para describir algunas del sus propiedades, es decir, las observaciones que caracterizan a los datos espaciales. Esta información espacial se puede almacenar en dos clases de formatos, los vectoriales o los matriciales.

Los formatos vectoriales se usan para representar la realidad como puntos, líneas y polígonos. Ejemplos de estos son los formatos: dwg, dgn, coverage, shapefile entre otros.

Los formatos matriciales sirven para representar aspectos de la realidad con una distribución heterogénea en el espacio, e incluso la de un instante dado (imágenes de satélite). Como ejemplos de este tipo de formatos tenemos: Grid de ESRI, Tiff, jpg, entre otros.

El equipo técnico especializado es el personal con una buena preparación y formación en el uso de las herramientas informáticas que en su conjunto (hardware y software) permiten el máximo aprovechamiento de la información espacial, desde su creación, importación y exportación hasta su análisis combinado y preparación de los resultados.

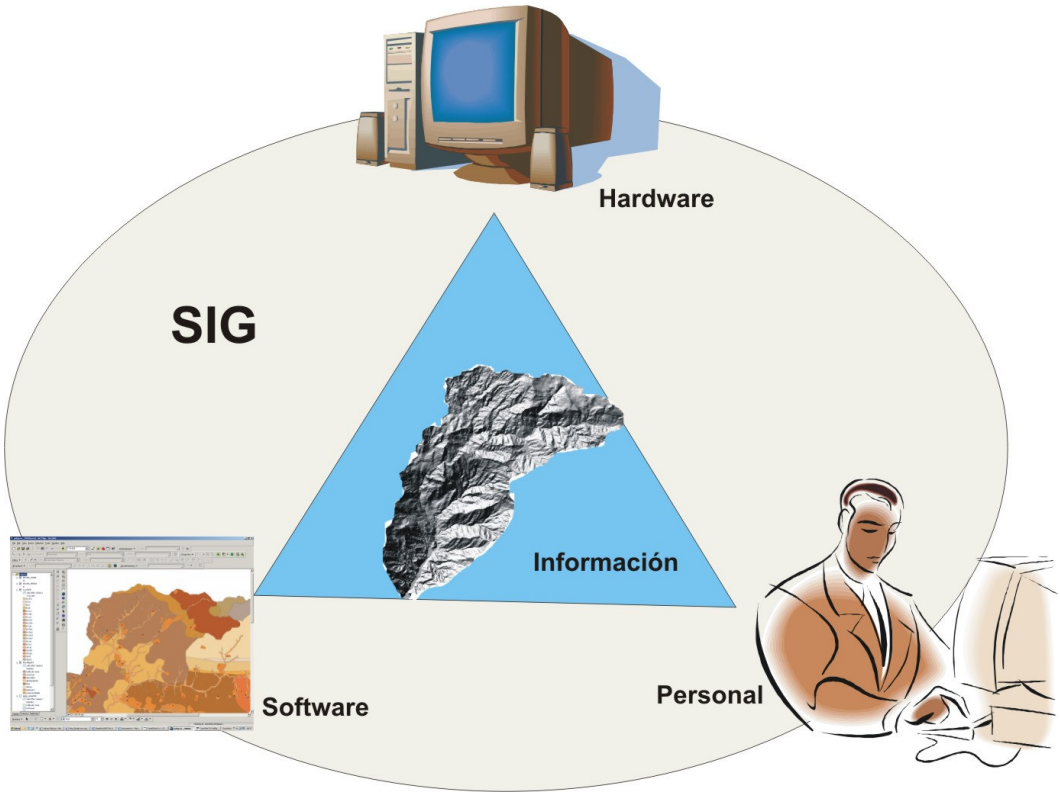

Figura 1. Componentes del SIG

1.6.2 Movimientos de ladera

El objeto de análisis de este estudio son los movimientos de ladera, es decir, procesos por los que materiales rocosos o de suelos que conforman una ladera, se movilizan con ayuda de la gravedad y otros agentes (Varnes, 1978; Cruden y Varnes, 1996). Algunos autores consideran que el agua puede ser un factor acompañante de la gravedad para su ocurrencia (Sharpe, 1938); otros (Crozier, 1986) consideran que los movimientos de ladera se desarrollan sin la ayuda del agua como agente de transporte y aún otros autores señalan que existe un tránsito gradual entre los procesos fluviales y los movimientos de ladera (Bodoque y otros, 2005). Estos movimientos están presentes en casi todos los ambientes terrestres y marinos (figura 2).

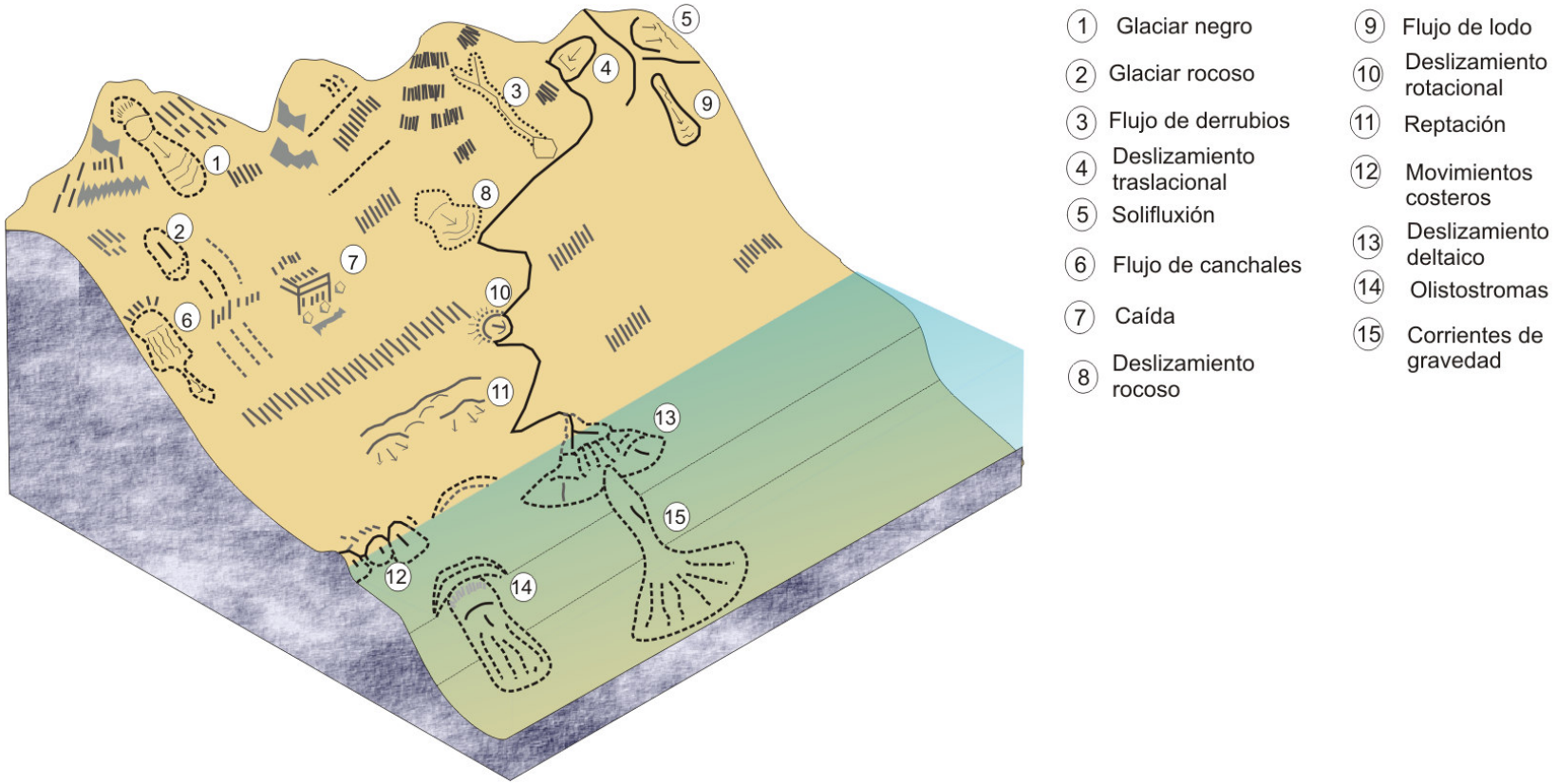

Figura 2. Distribución de los movimientos de ladera en diversos ambientes terrestres (Modificado de Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002).

1.6.3 Clasificación de los movimientos de ladera

Existen varias clasificaciones de movimientos de ladera, sin embargo las usadas con mayor frecuencia se basan en los aspectos cinemáticos, naturaleza de los materiales involucrados y el tipo de movimiento como por ejemplo las de Varnes (1954 y 1978), Hutchinson (1968 y 1988), Hungr y otros (2001); y mas recientemente la propuesta por el Grupo para Estándares relativos a Movimientos en Masa de la región Andina (GEMMA; Jaramillo y otros, 2006) entre muchas otras.

La clasificación mas usada en Perú es la de Varnes (1978) por adaptarse más a las condiciones de sitio existentes en nuestras regiones.

En este trabajo se utiliza una adaptación de la clasificación de Ayala-Carcedo y Olcinas (2002) por considerarse que detalla de forma más completa los procesos ocurrentes en la zona de estudio. Dicha clasificación establece cuatro órdenes de movimientos de ladera: simples, complejos, volcánicos y submarinos (figuras 3 a 8).

- **Simples**

Aquellos con un solo tipo de movimiento de ladera o proceso característico. Se clasifica a su vez en dos familias: movimientos con fase aérea y movimientos con fase terrestre.

A. Familia 1. Movimientos con fase aérea

Son fenómenos por los cuales un volumen de material desciende en caída libre a lo largo de una ladera generalmente de pendientes fuertes a muy fuertes y el material desciende saltando o rodando (Cruden y Varnes, 1996; Soeters y Van Westen, 1996). Son característicos de esta familia los desprendimientos, rebotes, rodaduras, desplomes entre otros (figura 3).

En la zona de estudio se ha registrado del tipo desprendimiento y desplome. Los desprendimientos corresponden al desplazamiento de una masa litológica de suelo o roca fracturada, mediante una caída súbita, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable (Varnes, 1978; Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002). Los desplomes o colapsos son desprendimientos pero de una componente fuertemente vertical (Corominas y García, 1997).

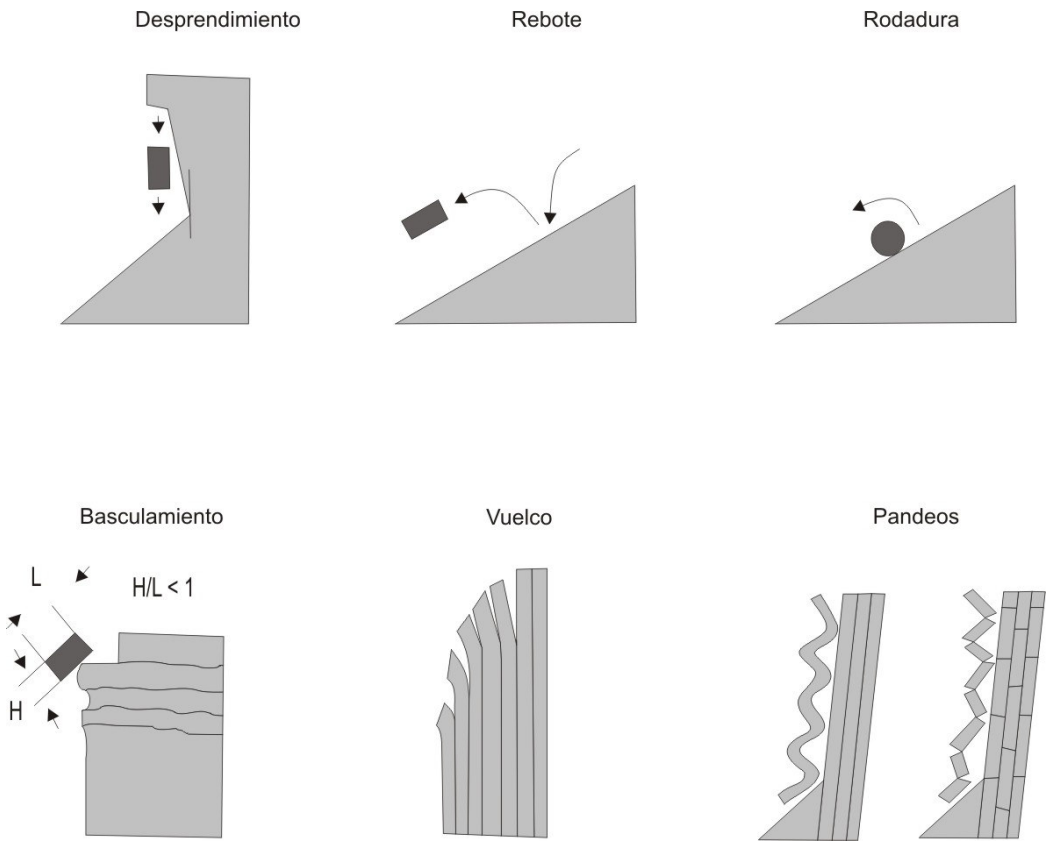

Figura 3. Movimientos de ladera con fase aérea (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002).

B. Familia 2. Movimientos con fase terrestre

Son fenómenos por los cuales un volumen de material desciende a lo largo de una ladera generalmente de pendientes media a baja. En ellos se diferencia los que tiene superficie de ruptura (deslizamientos, figura 4) y los que no tienen superficie de ruptura (reptación y flujos, figura 5).

Deslizamientos

Los deslizamientos son movimientos rápidos o lentos, de grandes volúmenes de material que se desplaza pendiente abajo como un solo bloque, sobre una superficie plana o cóncava inclinada. Se caracterizan por desarrollar una o varias superficies de ruptura (Cruden & Varnes, 1996; Hutchinson, 2001; Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002). Se subdividen de acuerdo al tipo de ruptura en rotacional o traslacional o planar.

Un deslizamiento es *rotacional,* cuando la superficie de falla es curva y el centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo en movimiento. Posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. Frecuentemente en su parte superior se producen hundimientos y en su parte inferior se flujos de materiales que se acumulan en la base de la ladera o son transportados (Suárez, 1998). Soeters y Van Westen (1996) dicen que un deslizamiento rotacional está principalmente asociado con pendientes entre 20 y 40 grados. Ocurren usualmente en suelos homogéneos, naturales o artificiales (Suárez, 1998). Usualmente el material girado conserva su integridad salvo en el pie, donde es común la presencia de grietas radiales (García-Yagüe y García-Álvares, 1988).

Un deslizamiento es *traslacional o planar*, cuando la masa se desplaza a lo largo de una superficie más o menos plana y paralela a la superficie del terreno, teniendo muy poco o nada de movimiento de rotación. Esta generalmente controlado por superficies de debilidad tales como diaclasas, fallas, planos de estratificación (Suárez, 1998). Presenta a su vez subclases: si ocurre sobre discontinuidades sencillas en roca se le conoce como deslizamiento planar, cuando ocurre a lo largo de dos discontinuidades se le conoce como cuña de roca (Suárez, 1998).

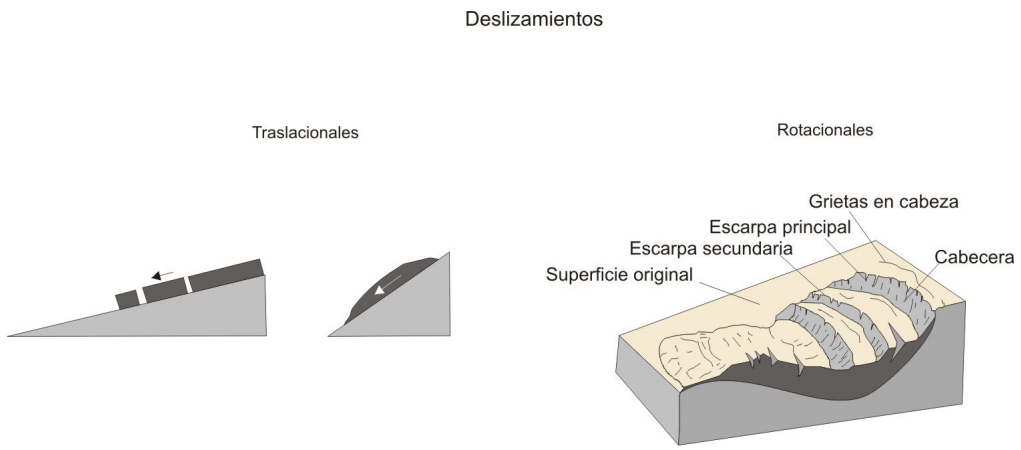

Figura 4. Movimientos de ladera con fase terrestre y superficie de ruptura: Deslizamientos (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002).

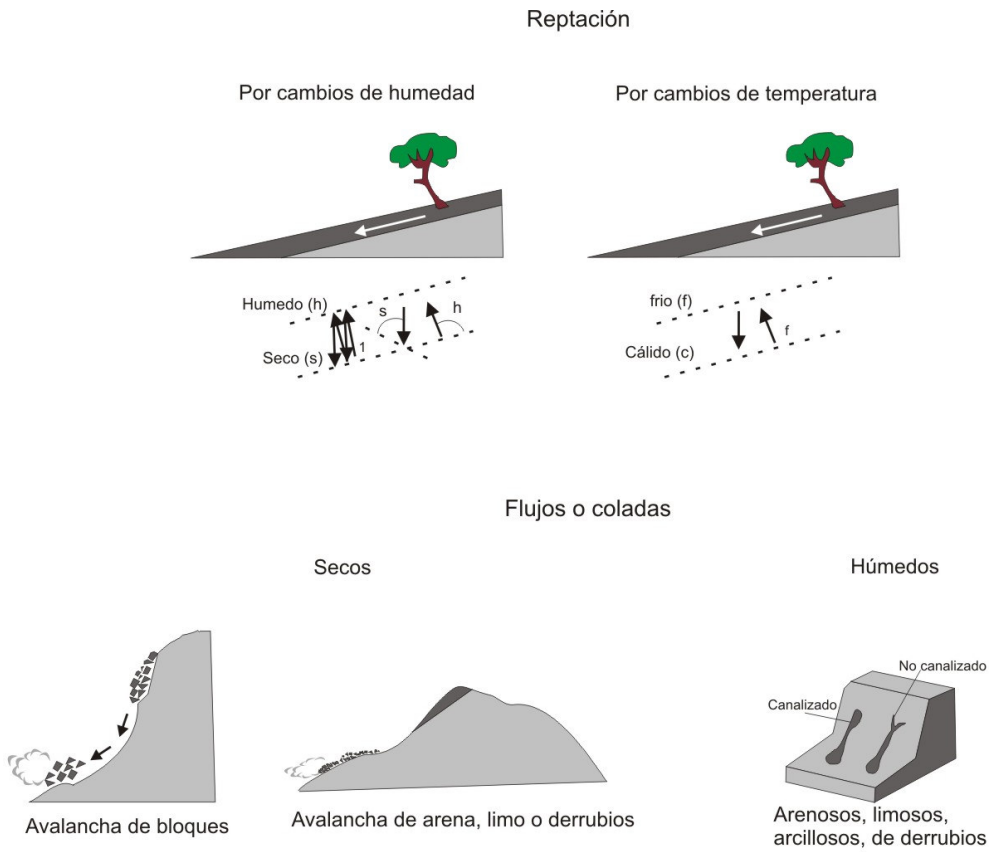

Figura 5. Movimientos de ladera con fase terrestre y sin superficie de ruptura: reptación y flujos (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002).

Reptación

Es el movimiento desde lento hasta extremadamente lento (unos pocos centímetros por año) del suelo subsuperficial, sin una superficie de falla definida (Suárez, 1988). Pueden, por si solos, afectar grandes áreas y evolucionar a otros tipos de movimientos de ladera (Aguilar y Mendoza, 2002)

Flujo

Consiste en el movimiento de materiales fluidos sobre un substrato rígido (figura 5). Los flujos se pueden subdividir de acuerdo al contenido de agua en flujos secos y flujos húmedos (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002); o de acuerdo al tipo y propiedades del material que involucran (Hungr y otros, 2001). Así los puede haber de roca, de detritos, de arena, de suelo, etc.

En la zona de estudio se han reconocido de los tipos flujo de detritos, flujo de lodo y avalancha de rocas.

Los *flujos de detritos* son conocidos en Latinoamérica como huaycos y se pueden considerar como un movimiento canalizado muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados no plásticos (índice de plasticidad menor al 5 % de arenas y finos; Jaramillo y otros, 2006).

Los *Flujos de lodo* son flujos canalizados que transportan materiales muy finos y el contenido de humedad es muy alto (detritos saturados plásticos, Jaramillo y otros, 2006).

Las avalanchas de rocas son flujos extremadamente rápidos de rocas fracturadas de gran magnitud (de varios metros de longitud). La extensión afectada puede llegar a ser kilométrica y muchas avalanchas se han asociado a represamientos de ríos y quebradas (Jaramillo y otros, 2006).

- **Complejos**

Los movimientos complejos son aquellos fenómenos con más de un tipo de movimiento o proceso característico. Consisten en movimientos sucesivos o simultáneos de una misma masa ligados causalmente. Cuando se trata de movimientos que desencadenan otros que se incorporan a la masa inicial se llaman movimientos complejos concatenados.

Los movimientos complejos sucesivos (figura 6) se pueden clasificar en varios géneros de acuerdo a su nivel de complejidad, por ejemplo:

Genero 1. Movimientos complejos de primera clase o binarios (combinación sucesiva de dos movimientos simples). Ejemplo: vuelco-avalancha de rocas.

Genero 2. Movimientos complejos de segunda clase o ternarios (combinación sucesiva de tres movimientos simples). Ejemplo deplome-rebote-deslizamiento de bloque.

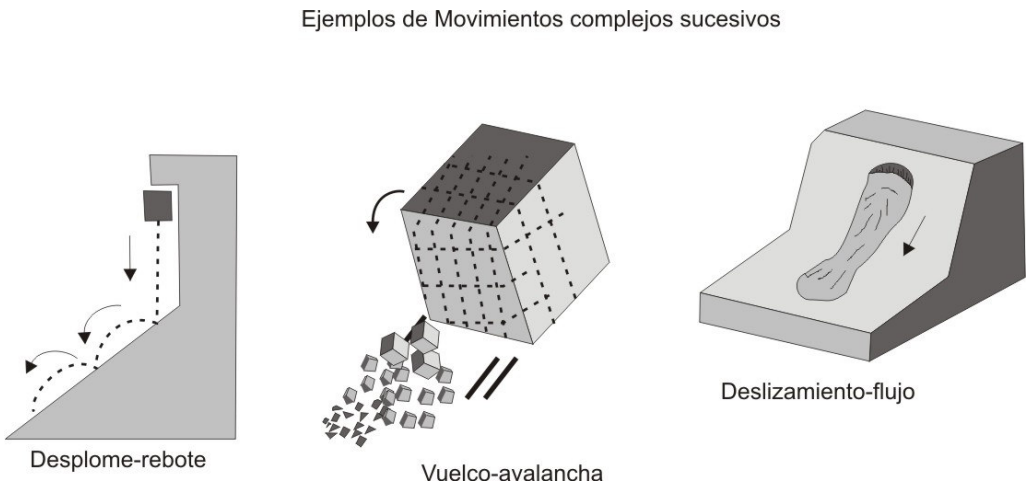

Figura 6. Ejemplos de Movimientos complejos sucesivos (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002).

Los movimientos complejos simultáneos (figura 7) se pueden subdividen en dos géneros: extensiones laterales y movimientos glaciares.

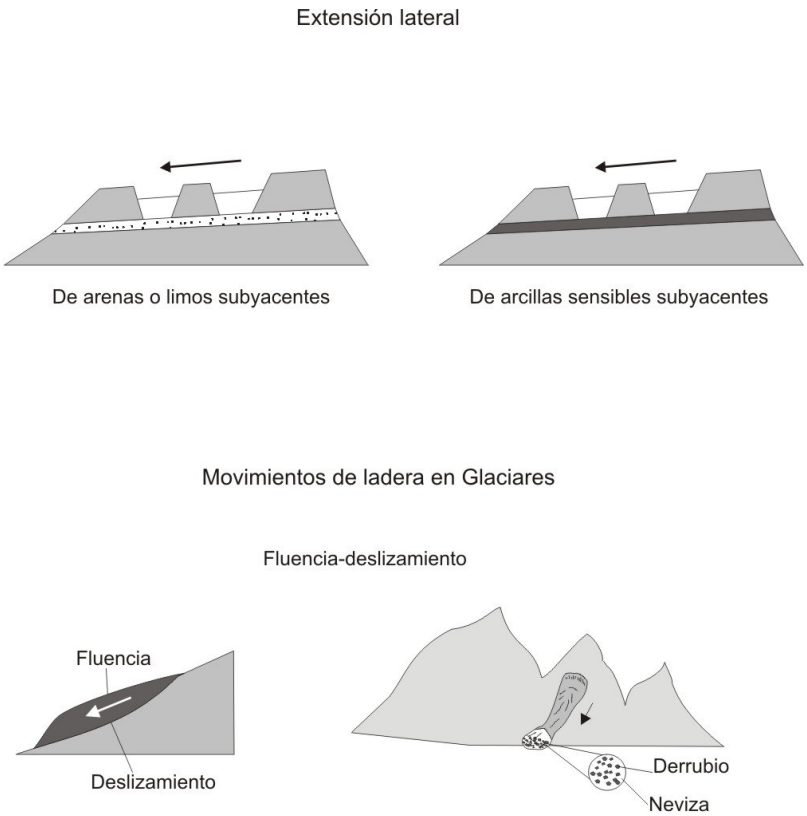

Figura 7. Ejemplos de movimientos complejos simultáneos (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002).

- **Volcánicos**

Los movimientos volcánicos, son aquellos fenómenos en cuyo desencadenamiento intervienen fenómenos propios como vapor, explosiones, expulsión de metano, etc. (figura 8).

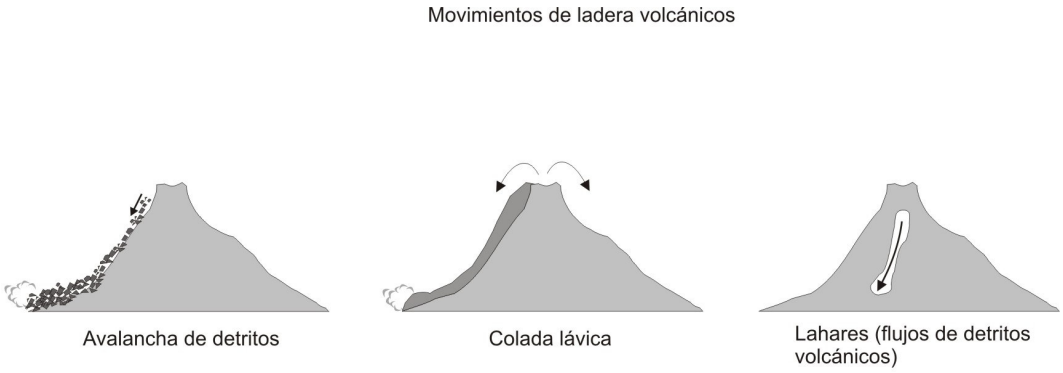

Figura 8. Ejemplos de movimientos de ladera volcánicos (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002).

- **Submarinos**

Son movimientos generados en el fondo marino. Se producen a consecuencia de la inestabilidad de material en pendientes submarinas o por movimientos sísmicos.

1.6.4 Factores que influyen en la ocurrencia de movimientos de ladera

La ocurrencia de movimientos de ladera esta condicionada por la acción simultanea de una serie de factores, existiendo diversas clasificaciones que los definen. De forma general se distingue entre factores condicionantes que propician la ocurrencia del fenómeno y factores desencadenantes que inician el movimiento de masas propensas.

- **Factores condicionantes**

Son aquellas variables que presentan una evolución lenta en el tiempo y que favorecen la inestabilidad de laderas. Entre los factores condicionantes más importantes se tiene a la litología, estructura, hidrogeología, morfometría y clima (Laín y otros, 2005, figura 9).

- **Litología.** Los aspectos litológicos más importantes a tener en cuenta para la ocurrencia de movimientos de ladera es el tipo de material que conforma la ladera, sus propiedades químicas y físicas, resistencia al esfuerzo, grado de

meteorización de los mismos y su forma de evolucionar en cada ambiente natural (Mora y Vahrson, 1993).

- **Estructura.** Los parámetros estructurales de los materiales que constituyen una ladera tales como fracturas, fallas, pliegues, planos de estratificación y foliación se deben tener en cuenta porque pueden favorecer o no los procesos de inestabilidad de laderas (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002).

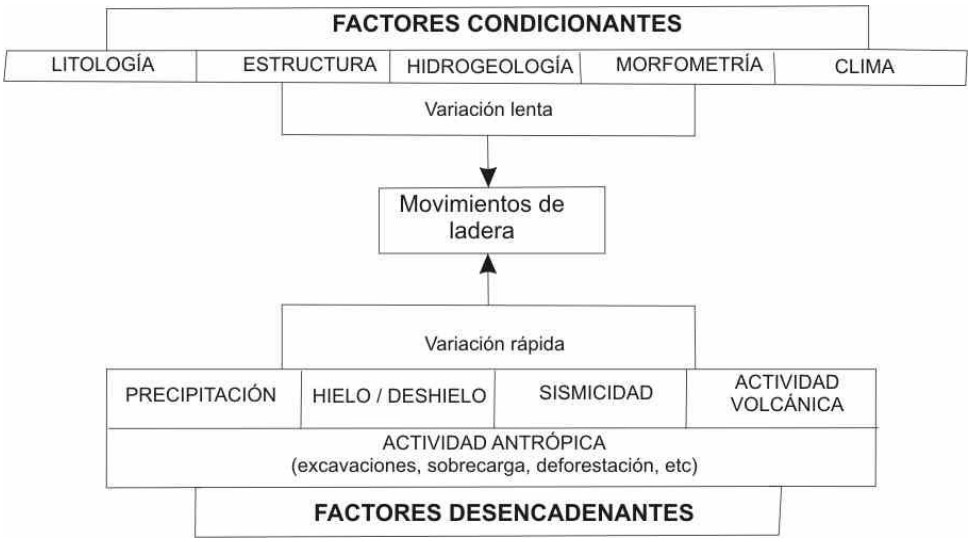

Figura 9. Clasificación de los factores condicionantes y desencadenantes del terreno (Ayala-Carcedo y Olcinas 2002).

- **Morfometría.** Las características morfométricas como la pendiente, altura, amplitud de la ladera, nos dan una idea del grado de equilibrio de los materiales que la componen (Aguilar y Mendoza, 2002). Por ejemplo, se espera que ocurran movimientos de ladera en pendiente moderadas a muy fuertes (Medina, 1991).

- **Hidrogeología.** Los parámetros hidrogeológicos como la porosidad, capacidad de drenaje de los materiales, entre otros tambien influyen en la inestabilidad de laderas.

- **Clima.** Los procesos climáticos pueden afectar el contenido de humedad de los materiales constituyentes de una ladera (Mora y Vahrson, 1993). Además de contribuir a acelerar la meteorización y disminuir la resistencia mecánica de dichos materiales.

Otro parámetro considerado es la vegetación, aunque su influencia en los movimientos de ladera es objeto de discusiones. Para Suárez (1998) el tipo de vegetación debe ser considerado debido a que da una referencia acerca del contenido de agua en una superficie de terreno y de la consistencia del mismo asociada al entramado de las raíces de las plantas, por lo que la deforestación afectaría la estabilidad de un terreno disminuyendo las tensiones capilares de la humedad superficial, eliminando el refuerzo de las raíces y facilitando la infiltración de agua; sin embargo la presencia de vegetación puede de igual forma favorecer la inestabilidad de una ladera.

- **Factores desencadenantes**

Tambien llamados disparadores, son aquellas variables que hacen que un movimiento de ladera se active o desencadene aún en laderas en equilibrio (Aguilar y Mendoza, 2002). Entre los principales factores desencadenantes se tiene a la precipitación, sismicidad, actividad volcánica, inundaciones, actividad antrópica (que causa deforestación, sobrecarga, excavación) y deshielo (figura 9).

- **Precipitación.** la frecuencia y tipo de precipitación son factores que desencadenan o reactivan los movimientos de ladera porque al infiltratse el agua de lluvia y saturarse el tereno pierde capacidad de absorción y puesto que esto implica mayor densidad, mayor presión de poros por contenido de agua y pérdida de cohesión el material falla.

- **Sismicidad.** La actividad sísmica es un factor significativo en el desencadenamiento o reactivación de movimientos de ladera. Las vibraciones provocadas por sismos puede ser lo suficientemente fuertes como para originar deslizamientos de diversa magnitud, afectando extensas áreas.

- **Actividad volcánica.** Los movimientos de ladera pueden estar relacionados con la erupción o con sismos previos a ésta en un volcán. En las primeras etapas de la erupción se depositan flujos piroclásticos, los cuales forman nuevos depósitos o amplían algunos existentes, pudiendo asi provocar movimientos de material en las faldas del volcán. En los volcanes nevados, las altas temperaturas producidas por una erupción funden los depósitos de hielo y nieve, éstos se mezclan con los materiales

piroclásticos previamente expulsados de tal manera que generan avalanchas y flujos de lodo que pueden recorrer grandes distancias.

- **Actividad antrópica**. Las actividades humanas en muchos casos han desencadenado la ocurrencia de movimientos de ladera. Un claro ejemplo es el caso ocurrido el 12 de enero del 2007 en Sao Paulo (Brasil), que por la ejecución de obras subterráneas de ampliación del Metro, las paredes de la obra se hundieron dejando un socavón de cuarenta metros de profundidad. Asimismo, la extracción de materiales para la construcción o la sobrecarga en una ladera debido a la urbanización o la mala disposicion de depósitos de acumulación de residuos solidos, son cambios bruscos en la topografía de un área que pueden desencadenar un movimiento del adera.

  Otros ejemplos de actividades antrópicas que han producido la generación de movimientos de ladera son: la alteración de las condiciones de humedad de una zona debido a la deficiente instalación de alcantarillados, zanjas y canales que pruducen infiltración; la construcción de carreteras; transporte y movimiento de maquinaria pesada que inducen vibración en la ladera, desestabilizándola; los procesos de deforestación o las prácticas agrícolas y ganaderas inadecuadas que generan cambios en la cobertura vegetal que inestabilizan el terreno como el flujo de detritos en la quebrada Huacará en San Ramón (Junín, Perú) que ocurrio el 21 de enero del 2007 debido a las fuertes precipitaciones e intensa deforestación del sector afectando parte del poblado de San Ramón (Núñez y Medina, 2007).

1.7 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

A continuación, para ubicar el área de estudio, se presentará una descripción de la geografía y contexto geológico.

1.7.1 Geografía y Fisiografía

La geografía de la zona de estudio describe la ubicación geográfica, clima, vegetación, principales centros poblados e infraestructura de interés, yacimientos metálicos y zonas de interés cultural en la cuenca. La fisiografía describe la geomorfología, orografía e hidrografía de la cuenca.

- **Ubicación geográfica**

La zona de estudio tiene una extensión aproximada de 115 km^2 y está situada al norte de Perú en la provincia de San Pablo (figura 10), ocupando parte de los distritos de San Pablo y San Bernardino en el Departamento de Cajamarca. Tiene como límites las coordenadas UTM: 9 199,000 a 9 223,000 norte y 736,000 a 757,000 este aproximadamente.

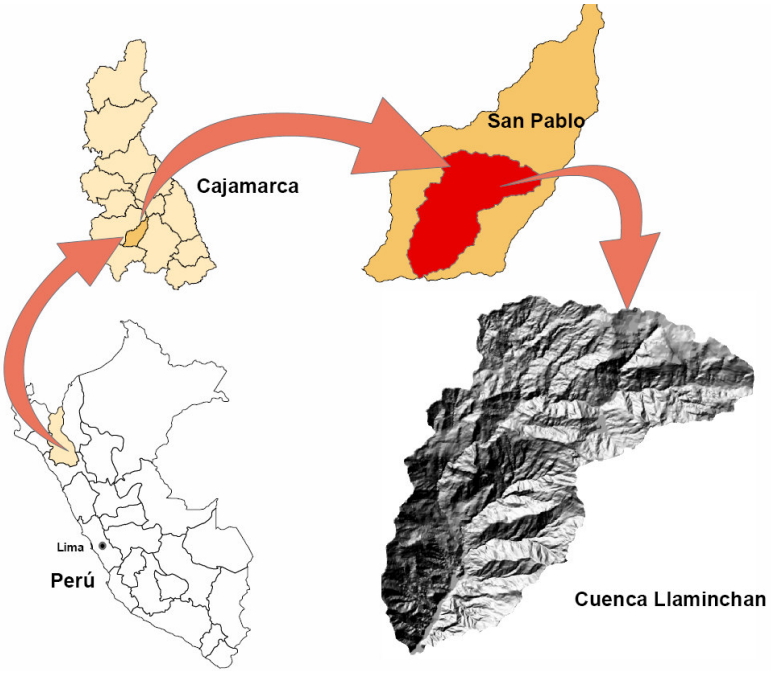

Figura 10. Ubicación de la cuenca del río Llaminchán.

Hidrográficamente la cuenca del río Llaminchán, pertenece a la cuenca del río Jequetepeque (figura 11) que a su vez forma parte de la vertiente pacífica. Esta cuenca esta ubicada en la Cordillera Occidental del norte de Perú conformado por el Arco volcánico Cenozoico.

La topografía es abrupta en casi toda la cuenca salvo en la parte alta, límite norte de la cuenca donde es suave. Las altitudes varían desde los 800 hasta los 4000 metros sobre el nivel del mar (msnm).

Para una mejor referenciación de lugares en la cuenca Llaminchán, en este estudio se le ha dividido en: cuenca baja desde la desembocadura (Chilete) hasta la localidad de San

Bernardino; cuenca media desde San Bernardino al centro poblado de San Pablo; y cuenca alta desde San Pablo a las nacientes de la cuenca.

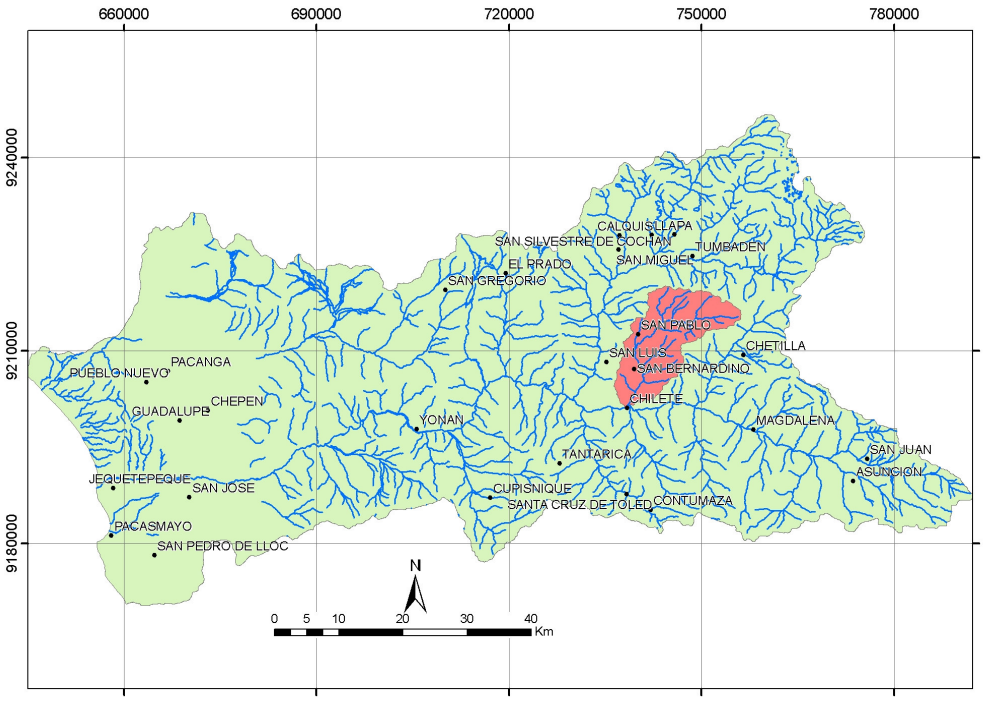

Figura 11. Ubicación de la cuenca Llaminchán en la cuenca Jequetepeque.

- **Clima**

La información del clima en la zona de estudio se ha extraído del "Plan de ordenamiento, manejo ambiental y desarrollo social en la cuenca media y alta del río Jequetepeque para la protección del embalse Gallito Ciego" (INRENA – PEJEZA, 2004), según el cual en la parte baja, zona de desembocadura (alrededores de Chilete) hasta las cercanías de San Bernardino, el clima es semi-cálido seco casi todo el año; mientras que en la cuenca media (San Bernardino a San Pablo) es templado húmedo. Asimismo, en el mencionado trabajo se menciona que la precipitación en la zona de estudio es variable, así por ejemplo la precipitación promedio anual en Chilete está entre de 140 y 420 mm, mientras que en la cuenca alta esta sobrepasa los 600 mm, de la cual, la mayor parte, ocurre entre enero y abril.

Sobre la temperatura, se puede acotar que esta aumenta según la altura. En la estación de Chilete la temperatura promedio anual es cercana a los 20,5 º C disminuyendo a cerca de 14 º C en altitudes cercanas a los 3500 msnm.

- **Vegetación**

La vegetación en la cuenca de la quebrada Llaminchan es variable: escasa en la parte baja entre Chilete y San Bernardino, donde predominan las especies "pasallo" (*Erhioteca ruizii)*, "angolo" (*Phitecellobium sp)*, entre otras características del bosque seco muy ralo y bosque seco ralo caducifolio (INRENA-PEJEZA, 2004; foto 1). En el bosque seco muy ralo se observa muy poca cantidad de especies arbustivas. El bosque seco ralo caducifolio se caracteriza por presentar una multitud de pequeñas hierbas que brotan durante la corta estación de lluvias, en la que también aparecen las hojas de los arbustos. Morfológicamente, esta zona presenta terrazas, laderas y montañas de bajo relieve, propicias para el desarrollo de estos tipos de bosque que crecen en alturas entre los 400 y 2,000 msnm Estos tipos de bosque están acompañados de matorral. Entre las especies arbustivas se encuentran el "palo negro" (*Grawbosquia sp)*, "overo" (*Cordia lutea, Croton sp),* etc. Combinadas con las especies arbóreas de bosque seco como "el faique" (*Acacia macracantha)*, "sapote" (*Capparis sp*, "pate" *Eriotheca sp)*, etc. Existen también zonas de cultivo predominando en esta zona los cultivos de arroz, arvejas, mango y papaya. El 80% de la producción se orienta al mercado local y de las ciudades intermedias en la sierra y la costa. El arroz es cultivado por campesinos relativamente especializados y a diferencia del resto de productos de la zona alta, demanda mayor inversión y uso de tecnología moderna.

Foto 1. Bosque Seco ralo caducifolio. Carretera Chilete – San Pablo (tomado de: INRENA-PEJEZA, 2004)

Entre San Bernardino y San Pablo, la vegetación es bastante densa predominando los cultivos agrícolas, matorrales y herbazales y relictos de bosques (INRENA, 1995). La distribución de los principales cultivos agrícolas depende de la altitud; en áreas cercanas a los ríos se observaron cultivos de arroz y maíz combinado en algunos casos con especies frutales como mango, pacae, plátano, chirimoya, entre otras.

Entre San Pablo y las cabeceras de la cuenca (2,500 a 4,100msnm) la vegetación es medianamente densa predominando el bosque caducifolio, que en los alrededores del río San Pablo, se encuentra poco alterado, tanto en su cobertura como en su composición florística, existiendo aún bosques semidensos con poblaciones importantes de especies con valor comercial, ubicados en áreas poco accesibles.

Los cultivos agrícolas, herbazales, matorrales, pajonal de puna y una zona de reforestación con bosques de pinos (INRENA, 1995). Los cultivos agrícolas desarrollados son la cebada, arveja, zapallo, frejol, papa, oca, y algunas plantaciones de eucalipto. Estos cultivos se encuentran moderadamente estables debido a que la mayoría se encuentra en terrenos con pendientes moderadas y muchos cuentan con regadío, lo cual permite tener casi siempre áreas agropecuarias.

- **Centros poblados e Infraestructura de interés**

Los principales centros poblados de la zona de estudio son Chilete, San Pablo y San Bernardino.

Chilete, ubicada en la provincia de Contumaza a 110 km al este de Pacasmayo, es la capital del distrito del mismo nombre y se localiza en el eje de la carretera Cajamarca-Pacasmayo. Es la ciudad que conecta a los centros poblados de la parte alta de la cuenca Jequetepeque con los que se encuentran en la parte baja. Se encuentra a unos 800 m de altitud y está rodeado de montañas que se elevan sobre los 2,200 m. Cuenta con una población de cerca de 3,250 habitantes y servicios públicos completos: posta médica, hoteles, energía eléctrica, agua, desagüe, teléfono e Internet (INEI, 2005).

San Pablo (foto 2), capital del distrito y provincia del mismo nombre, se ubica al suroeste de la ciudad de Cajamarca, a 25 km de Chilete y a 200 km de la ciudad de Chiclayo. Posee una altitud de 2,365 msnm, cuenta con una población aproximada de 13,480 habitantes (INEI, 2005) y servicios como: posta médica, hospedaje, energía eléctrica, agua, desagüe, teléfono e Internet.

San Bernardino. Capital del distrito del mismo nombre (provincia de San Pablo), se ubica al suroeste de la ciudad de San Pablo, a 15 km de Chilete. Se encuentra a una altitud de 1,350 msnm y cuenta con una población de unos 4,600 habitantes (INEI, 2005) y los siguientes servicios: posta médica, hospedaje (municipal), energía eléctrica, agua, desagüe y teléfono.

Foto 2. Vista panorámica del centro poblado de San Pablo, distrito y provincia San Pablo, departamento de Cajamarca.

Las obras de infraestructura más importantes en la cuenca son las siguientes:

A. Vía Lima-Chilete-Cajamarca.- vía asfaltada.
B. Vía Chilete-San Bernardino-San Pablo.- vía afirmada que cruza la margen derecha de la cuenca Llaminchan desde la parte alta a la baja.
C. Vía Chilete-San Miguel de Pallaques.-Afirmada
D. Subestación eléctrica (SE) Chilete.- con 66/22.9/10 KV

E. Línea de transmisión Pacasmayo-Chilete-Cajamarca.- de 60 a 69 Kv. que enlaza las SEs Tembladera –Chilete – Cajamarca (MEM, 2005).

- **Yacimientos Metálicos**

Los yacimientos metálicos identificados en la región en su mayoría son de oro-plata de tipo epitermal de baja sulfuración y están ampliamente distribuidos en el corredor estructural de orientación noroeste-sureste denominado San Pablo-Porculla (Enríquez y otros, 2006) dentro del cual se localizan la Mina Paredones y numerosos proyectos en diferentes fases de exploración, como es el caso de Los Pircos, Mishahuanca, Coshuro, Lucero, La Mesa y otros. En la zona de estudio sólo destaca la Mina Paredones de zinc-plomo-plata con antecedentes históricos de producción (Castillo, 1978), que a la fecha se encuentra clausurada.

- **Zonas de interés cultural**

En la zona de estudio existen diversas zonas de interés cultural, entre las que destaca la zona arqueológica de Kuntur Wasi. Existen otros restos, pero de menor carácter monumental como las ruinas de Cerro Blanco, El Calvario, La Capellanía, Los Carrizos, Chalaques, Charapango, la Colpa, Inca Tambo, "Las Ventanillas" Callancas y Tuñad y los petroglifos de El Higuerón, Cashorco, Yamadón y Cashaloma.

- El Centro arqueológico de Kuntur Wasi, cuya traducción en quechua sería “La Casa del Cóndor”, se encuentra ubicado en el cerro La Copa (2300 msnm), distrito de San Pablo (provincia de San Pablo) a 93 kilómetros de Cajamarca. Es un centro ceremonial prehispánico (foto 3) con un conjunto de plataformas, plazas superpuestas, recintos con muros de gran tamaño, monolitos y estelas con influencia de la cultura pre-inca Chavín se habría erigido en el año 1100 a.C. Fue descubierta por el arqueólogo peruano Julio C. Tello, quien investigó el complejo en 1946. En 1988 se inició una investigación más detallada de Kuntur Wasi, que estuvo a cargo de la Misión Arqueológica de la Universidad de Tokio, que concluyeron que el oro trabajado en Kuntur Wasi es el más antiguo de América. Su museo de sitio se encuentra en el caserío de La Conga, San Pablo.

Foto 3. Vista del centro Arqueológico de Kuntur Wasi.

- Los Restos arqueológicos de Cerro Blanco, El Calvario, La Capellanía, Los Carrizos, Chalaques, Charapango, la Colpa, Inca Tambo, son edificaciones que servían de "tambos" y que unían un camino principal de los Incas. Constan de muros de variada elevación, hechos de piedras escasamente trabajadas, pero sí cuidadosamente ordenadas de manera que aseguran su estabilidad.

- Restos arqueológicos de "Las Ventanillas" ubicadas en el cerro Tambo Real (Caserío Vista alegre), distrito Tumbadén, con tumbas superpuestas tipo "nido de Águila". Son construcciones con paredes son de mampostería de piedra y barro, que muestran características de centros ceremoniales o nichos funerarios.

- Ruinas de Callancas y Tuñad de características similares a las "ventanillas" y de las cuales se han extraído numerosas cabezas clavas.

- Petroglifos de los cerros El Higuerón, Cashorco, Llamadón y Cashaloma todos en los alrededores de San Pablo (Reyes, 2000).

- **Geomorfología**

En la cuenca Llaminchán se han diferenciado tres unidades geomorfológicas: vertiente, valle y altiplanicie (figura 12).

En la unidad de vertiente se diferencian tres tipos: vertiente montañosa, colinas y piedemonte de acumulación. La primera unidad está condicionada por la tectónica, presentando potentes crestas, empinadas a escarpadas y esta cortada por una red de drenaje ligada a un sistema de facturación de dirección noreste-suroeste. La zona de colinas presenta colinas suaves y se restringe a la parte baja de la cuenca. La zona de piedemonte se ha generado por acumulación de depósitos por procesos gravitacionales.

La zona de valle ha sido modelada por el río Llaminchán y sus afluentes. Presenta a escala local terrazas, playas y abanicos aluviales.

La zona de altiplanicie se encuentra restringida a la cabecera noreste de la cuenca.

En la figura 12 se presenta un esquema de las unidades geomorfológicas diferenciadas en la cuenca Llaminchán.

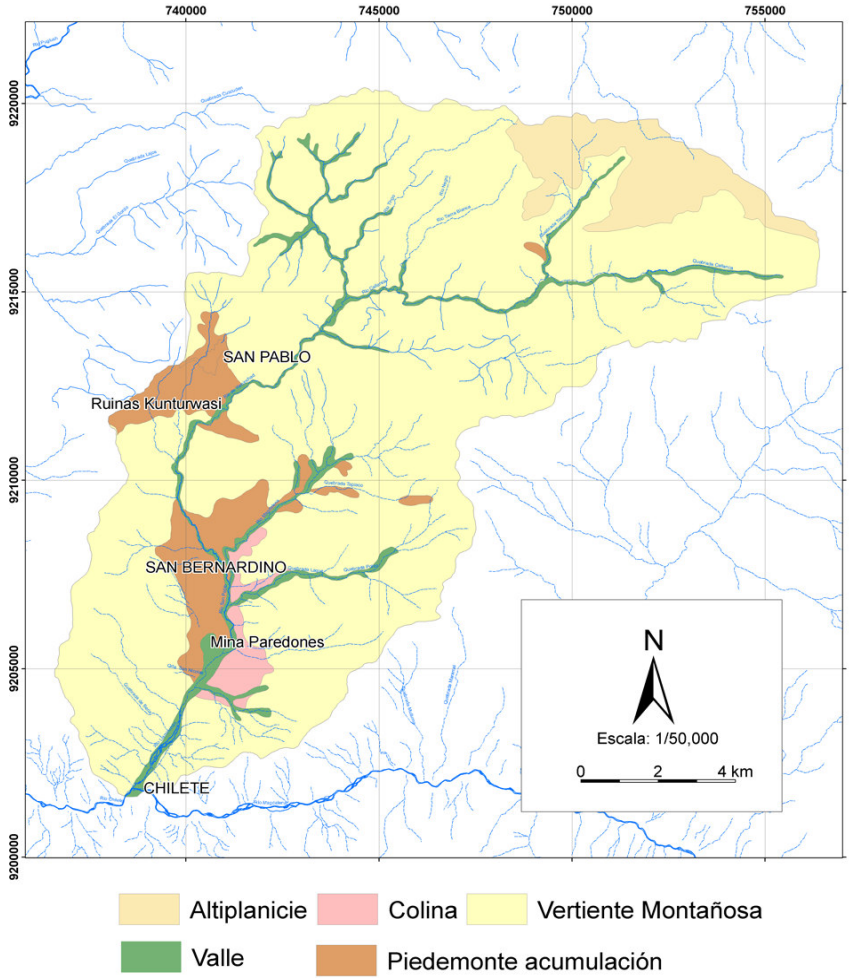

Figura 12. Esquema de las unidades geomorfológicas en la cuenca Llaminchán.

- **Orografía e hidrografía**

Los cerros mas elevados en la cuenca están representados por el Cerro Condordansanan de aproximadamente 3,855 msnm, que demarca el límite noreste de la cuenca, el cerro Molino con unos 3,650 msnm; y los cerros Huayquisongo y Cachipampa ambos con aproximadamente 3,575 m de altitud.

Respecto a los principales cursos de agua en la cuenca del río Llaminchán (foto 4), se puede decir que son los ríos San Pablo y Magdalena, siendo los que recorren la cuenca media y se unen para formar al río Llaminchán. En la parte alta se tiene al río de Yaminchad, un afluente del río San Pablo.

Foto 4. Vista del cauce medio del río Llaminchán.

1.7.2 Contexto Geológico

La información vertida en este apartado, se ha extraído del proyecto de investigación GR4: "Volcanismo Cenozoico (Grupo Calipuy) y su Asociación con los Yacimientos Epitermales, de la Región Norte de Perú", trabajo desarrollado por el INGEMMET a cargo de Pedro Navarro, Robert Monge y Carmen Flores, actualmente en ejecución. Dicha información está actualizada al 2006 y la escala de trabajo ha sido 1/50,000.

- Geología regional

La geología regional de la zona muestra que la estructura mas antigua es la Cuenca Mesozoica Occidental del Norte de Perú (figura 13), que fue rellenada con tres grandes secuencias, una inferior que pertenece a la plataforma silicoclástica que conforman el delta del Grupo Goyllarisquizga, una segunda secuencia que pertenece a una gran plataforma carbonatada epicontinental, y la tercera secuencia al tope del Cretáceo superior compuesta por las series rojas continentales. Esta variedad de sedimentos detríticos indicaría movimientos intermitentes de la corteza terrestre que causaron procesos de transgresión y regresión marina. Posteriormente la actividad volcánica de varios centros eruptivos (estratovolcanes, calderas y complejos de domos en la región), conformaron el Arco volcánico Cenozoico, que se encuentra formando parte de la Cordillera Occidental del Norte de Perú. Este volcanismo fue emplazado durante una intensa e intermitente actividad explosiva, extrusiva y efusiva, originando flujos piroclásticos, flujos de lavas y lahares (flujos de detritos de origen volcánico) a partir de un arco magmático desarrollado en el periodo comprendido entre el Eoceno inferior al Mioceno superior (entre los 54.8 y 8.2 Ma antes de la actualidad), interrumpido esporádicamente.

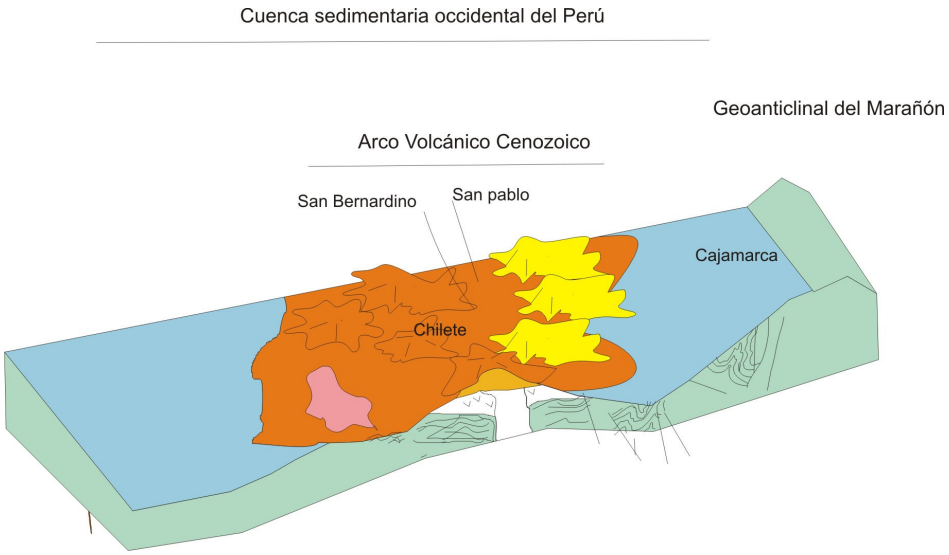

Figura 13. Esquema de la geología y unidades estructurales.

- Geología local

Respecto a la geología de la zona de estudio, las rocas mas antiguas corresponden a una secuencia cretácica de areniscas y cuarcitas blancas grisáceas de grano fino a medio en bancos grueso, que corresponden a la Formación Farrat, que aflora hacia el noreste del

río Llaminchán y en la cabecera este de la cuenca. Concordante a dicha formación, sobreyace la Formación Inca, del Cretácico medio a superior constituida por areniscas ferruginosas en gruesas capas de aproximadamente 500 a 600 m de espesor (Reyes, 1980). Sobre esta se tiene a las formaciones Chulec y Pariatambo compuestas en conjunto por 1,500 m de capas delgadas de color gris oscuras a negras de calizas, lutitas y areniscas calcáreas inter-estratificadas. Le sigue las formaciones Yumagual, Quilquiñan-Mujarrún y Cajamarca (Cretácico medio-superior) que principalmente corresponden a calizas y lutitas (foto 5, figura 14).

Foto 5. Secuencia de estratos de caliza de la Formación Cajamarca con acumulación de canchales.

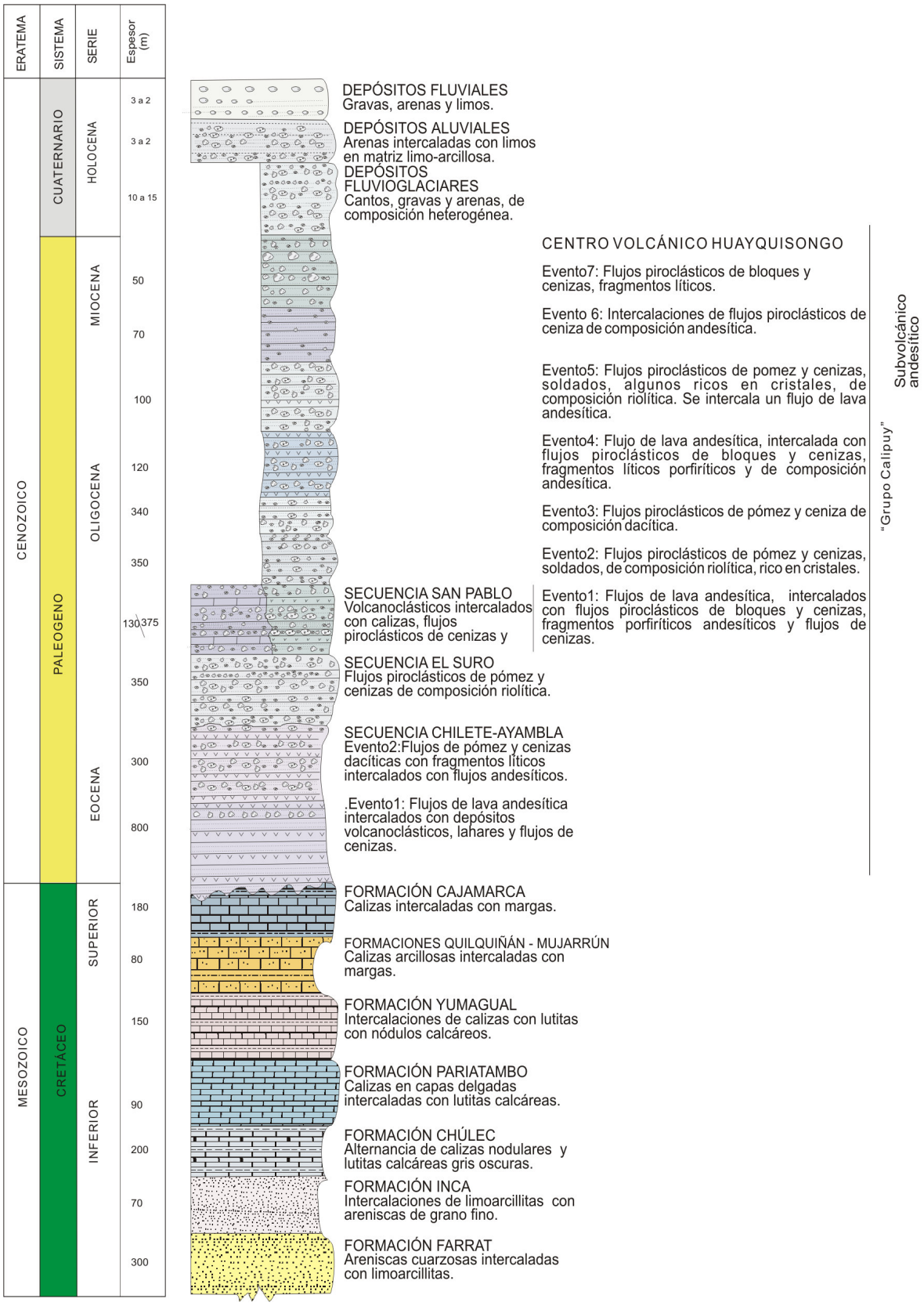

Figura 14. Esquema de la columna estratigráfica en la cuenca Llaminchan.

En el área de estudio, la sección sedimentaria esta cubierta con marcada inconformidad angular por una gruesa sección de rocas volcánicas cenozoicas que conforman las secuencias Chilete-Ayambla, las cuales están cubiertos en discordancia angular por las secuencias Oligocénicas El Suro, San Pablo y los depósitos oligocénicos-miocénicos del centro volcánico Huayquisongo (figura 14).

- Secuencia Chilete – Ayambla

Aflora desde Chilete a la parte media de la cuenca y corresponde a una secuencia volcánica de un espesor promedio de 500 m. No ha sido posible determinar su centro de emisión, sin embargo sus depósitos se han agrupado en dos eventos eruptivos: el primero consiste en flujos de lava, pómez y cenizas andesíticas, intercalados con depósitos volcanoclásticos (de aproximadamente 300 m) y el segundo por secuencias de flujos de cenizas intercalados con lahares, oleadas piroclásticas, flujos de bloques y cenizas; y flujos de pómez y cenizas riolíticas (con un espesor aproximado de 200 m).

- Secuencia El Suro

Consiste esencialmente de flujos piroclásticos de pómez y cenizas riolíticas, algunos de los cuales están soldados. Aflora en la cuenca media y su edad es Oligoceno inferior.

- Secuencia San Pablo

Esta secuencia aflora en los alrededores del poblado de San Pablo y está constituida por intercalaciones de depósitos volcanoclásticos, intercalados con flujos de cenizas andesíticas, lahares (con fragmentos volcánicos subredondeados a subangulosos) y capas de calizas de grano medio. Tiene un espesor de aproximadamente 170 m y se le asigna una edad Oligocénica, por sobreyacer concordantemente a los depósitos de la Secuencia El Suro.

- Centro volcánico Huayquisongo

Se localiza a 12 km al noreste de San Pablo. Sus depósitos, de edad Oligocena-Miocena, consisten en intercalaciones de flujos piroclásticos y de lava, según los cuales se ha establecido siete eventos eruptivos.

El primer evento eruptivo consiste en intercalaciones de flujos piroclásticos de cenizas; flujos de bloques y cenizas alteradas; flujos de lava andesítica (oxidada y fracturada); flujos de bloques y cenizas andesíticas; y flujo de cenizas y fragmentos líticos. Su espesor es de aproximadamente 375 m.

El segundo evento eruptivo consiste en la base, de flujos piroclásticos de pómez y cenizas soldadas de composición riolítica y flujos piroclásticos de pómez y cenizas riolíticas. Su espesor es de aproximadamente 350 m.

El tercer evento eruptivo esta compuesto por flujos piroclásticos de pómez y cenizas dacíticas, que tienen en conjunto un espesor aproximado de 340 m.

En el cuarto evento eruptivo, se tiene en la base un depósito de flujos piroclásticos de bloques y cenizas andesíticas, cubiertos por flujos de lava andesítica con un espesor de aproximadamente 190 m.

El quinto evento eruptivo, presenta intercalaciones de flujos piroclásticos de pómez y cenizas riolíticas soldadas, intercalados con flujos de lava andesítica. Su espesor promedio es de 205 m aproximadamente.

El sexto evento eruptivo está caracterizado por flujos piroclásticos de cenizas andesíticas, fragmentos líticos y pómez. Tiene un espesor que se estima en 150 m.

En el séptimo evento eruptivo se tienen flujos piroclásticos de bloques y cenizas con fragmentos líticos porfiríticos que conforman un espesor de 125 m.

Toda la secuencia descrita ha sido cortada por cuerpos subvolcánicos andesíticos de edad Miocena (figura 14).

Finalmente cubriendo a los volcánicos se encuentran los depósitos Cuaternarios de origen aluvial, fluvial y fluvioglaciar. Los de origen aluvial corresponden a arenas finas a gruesas intercaladas con limos, depositados por flujos de detritos y que se encuentran formando conos de deyección a la salida de las quebradas. Los de origen fluvial están conformados por gravas subangulosas y subredondeadas en un matriz areno limosa y se encuentran

inconsolidados y formando terrazas recientes restringidas al cauce del río Chilete. Los depósitos fluvioglaciares corresponden a material heterogéneo desde bloques hasta suelo transportados por torrentes producto del deshielo glaciar que transportó masivamente dichos materiales. Se ubican ocupando áreas pequeñas al límite norte de la cuenca.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2 METODOLOGÍA

La metodología seguida para el desarrollo del presente estudio, se ha desarrollado en cuatro fases. La primera de ellas comprende los trabajos preliminares que han servido de base para las siguientes fases desarrolladas en este estudio. La segunda etapa, corresponde al inventario y cartografiado de procesos superficiales en la que se efectuaron los trabajos de campo. La tercera fase ha consistido en la preparación de las bases de datos espaciales con la información obtenida en las fases anteriores, para finalmente pasar a la última que ha sido el análisis mediante SIG.

2.1 TRABAJOS PRELIMINARES

Conocer la información disponible en el área de estudio es importante antes de definir la metodología y la escala o precisión del trabajo a aplicar en el análisis de la susceptibilidad por movimientos de ladera, debido a que podría no haber datos suficientes. Con la finalidad de obtener dicha información se efectuaron trabajos preliminares que han consistido en recopilar, revisar y clasificar la información existente, elección de escala de trabajo, efectuar la delimitación de la zona de estudio; interpretar fotos aéreas y preparar mapas preliminares que se usaron en los trabajos de inventario y cartografiado de procesos superficiales.

2.1.1 Recopilación, revisión y clasificación de la información existente

La información recopilada para este estudio incluye: fotos aéreas a escalas 1/50,000 y 1/17,000 de los años 1963 y 1980 respectivamente; imágenes satelitales LANDSAT a escala 1/100,000 del año 2003; topografía digital (1/25,000) e información de trabajos anteriores acerca de la zona de estudio sobre geología, hidrogeología, geotecnia, geodinámica entre otros. Toda esta información se revisó y seleccionó para usar en lo posible la más actualizada y fiable (información oficial en casi todos los casos) o la que proporcionara mayores datos de la zona (referencias bibliográficas).

2.1.2 Elección de escala de trabajo de campo

Una vez que se supo con que información se contaba, se procedió a elegir la escala de trabajo que ha sido 1/25,000 debido a que permite mostrar a nivel distrital los movimientos

de ladera y además porque la información topográfica, que es la base para el los modelos digitales del terreno, esenciales para el análisis de la susceptibilidad por movimientos de ladera; se produjo a dicha escala.

2.1.3 Delimitación del ámbito de estudio

La demarcación de la cuenca Llaminchán, se efectuó con ayuda de cuatro hojas topográficas (15-fI_NO, 15fI_SO, 15-fIV_NE y 15-fIV_SE) a escala 1/25,000 elaboradas por el Proyecto Especial de Titulación de Tierras de Perú (PETT). Este trabajo se realizó primero de forma manual y posteriormente, en los trabajos de preparación de bases de datos espaciales, el límite se revisó y modificó con el software ArcGIS versión 9.1.

2.1.4 Fotointerpretación

Para este trabajo se han utilizado fotografías aéreas verticales en pares estereoscópicos a escalas aproximadas de 1/40,000 y 1/17,000 preparadas por el Servicio Aerofotográfico Nacional de Perú (SAN). En estas fotos, se identificaron 130 zonas con procesos de remoción, las cuales se señalaron preliminarmente como zonas de interés para su comprobación de campo.

2.1.5 Preparación de mapas preliminares

Luego de efectuar los trabajos mencionados en los acápites anteriores se prepararon mapas preliminares que se emplearon en los trabajos de campo. Los principales fueron el mapa de procesos superficiales, el mapa geológico y el mapa base. El mapa de procesos superficiales se generó como resultado de la fotointerpretación y en el se cartografió las zonas afectadas por movimientos de ladera y otros procesos (como la erosión de laderas) observados en las fotos aéreas. En el mapa geológico preliminar (Navarro y otros, 2006) se marcaron los contactos de unidades estratigráficas y principales rasgos estructurales (fallas, pliegues y lineamientos). El mapa base preliminar se usó como mapa de ubicación y acceso y ha contado con toponimia, carreteras y drenaje.

2.2 INVENTARIO Y CARTOGRAFIADO

En este apartado se describen los trabajos de inventario de movimientos de ladera y cartografiado de procesos superficiales, los cuales fueron realizados entre el 27 de octubre y el 13 de noviembre del 2006 en el marco de los trabajos correspondientes al "Estudio Geoambiental de la cuenca Jequetepeque" que está llevando a cabo el INGEMMET. Estos trabajos han permitido obtener el mapa de inventario y procesos superficiales (Anexo VIII).

2.2.1 Inventario de movimientos de ladera

El inventario de movimientos de ladera, ha consistido en el acopio de una serie de observaciones de los sitios afectados por estos fenómenos, en una ficha de campo (INGEMMET, 2005; Anexo 6.2) Estas observaciones incluyen datos de ubicación geográfica del lugar (coordenadas UTM, altitud, departamento, provincia, distrito y lugar; cuenca hidrográfica y cuadrángulo); las causas que dan o dieron lugar a su origen (naturales y/o antrópicas); evidencias visuales de los procesos (actividad, clase, fecha de ocurrencia y recurrencia); aspectos hidrológicos del lugar (drenaje superficial y aguas subterráneas); características geológicas (litología del substrato, estado de alteración); geomorfológicos (relieve, pendiente del terreno, tipo de depósito), estructurales (presencia de discontinuidades en las rocas; rumbo y buzamiento de fallas y diaclasas, grado de fracturamiento y de alteración) incluyendo un registro fotográfico de los fenómenos más notables. De este trabajo se ha obtenido 91 fichas correspondientes a movimientos de ladera. Cabe resaltar que la ficha de inventario del INGEMMET es para diferentes tipos de fenómenos, pero para este trabajo se ha usado solo para inventariar movimientos de ladera.

2.2.2 Cartografiado de procesos superficiales

El cartografiado de procesos superficiales ha consistido en delimitar en hojas topográficas a escala 1/25,000 los procesos de remoción más notables observados in situ. Estos procesos se demarcan con polígonos cerrados (zona de arranque y depósito). Durante esta etapa se corrigieron sobre el terreno los mapas preliminares producto de la información recopilada, la misma que fue revisada y completada con observaciones de campo.

2.3 PREPARACIÓN DE BASES DE DATOS ESPACIALES

Este apartado describe como se obtuvieron, evaluaron y prepararon los datos espaciales necesarios para la creación del modelo de susceptibilidad. Ha consistido en la digitalización y conversión de formatos; organización de la información espacial y la clasificación y depuración de datos espaciales.

2.3.1 Digitalización y conversión de formatos

Debido a que se requería tener toda la información recopilada, en digital, en primer lugar se empezó por digitalizar la que estaba en papel. La información en papel correspondía a la geología a escala 1/50,000 (dos hojas) y al mapa de procesos superficiales a escala 1/25,000 (cuatro hojas) obtenido en campo. Estos mapas en papel, se escanearon, georeferenciaron y digitalizaron en un formato standard de SIG, el formato shapefile.

Por otro lado, hubo que uniformizar al formato shapefile, la información que se obtuvo en digital. Esta información corresponde a la topografía que se tenía en formato autocad.

2.3.2 Organización de la información espacial

Para facilitar el trabajo y procurar un buen seguimiento del proyecto, se creó una estructura de carpetas con una nomenclatura organizada y de acuerdo a su contenido (figura 15). En primer lugar se asignó una unidad virtual (S:) a la carpeta raíz del proyecto SIG para permitir la portabilidad de éste, es decir cambiarla a otra maquina usando el mismo software con el que se generó la información, sin que se desestructure el proyecto.

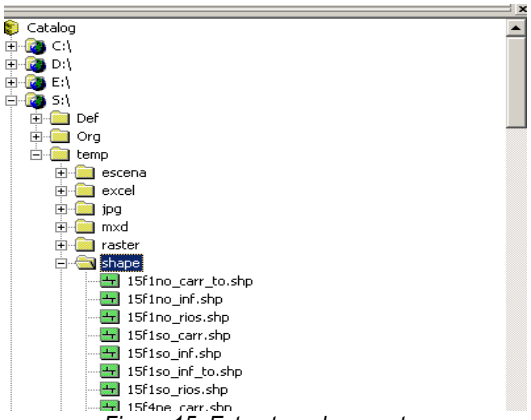

Figura 15. Estructura de carpetas

Las carpetas se llamaron: “Def” (información definitiva), “Org” (solo originales, información cruda) y “Temp” (información temporal generada, que se puede borrar al finalizar el proyecto) y cada una contiene subcarpetas donde se almacenó la información generada. Dentro de cada una las subcarpetas especificaban el tipo de formato, así las subcarpetas se llamaron: shape, *escena, excel, jpg, mxd, layer, raster, Word y pdf*. Todos los archivos se organizaron con una nomenclatura sistematizada, de tal manera que se tuviera un fácil acceso a los archivos con nombres cortos e identificadores de la versión de edición en que se encuentran.

Una vez organizados los directorios donde se guardaron todos los datos, se procedió a revisar, clasificar y depurar la información espacial.

2.3.3 Clasificación y depuración de datos espaciales

La clasificación y depuración de datos espaciales ha consistido en la revisión, corrección, unión y depuración de la información base, de tal manera que quede en estado óptimo para ejecutar el análisis mediante SIG. Se comprobó por ejemplo que el mapa base tuviera todas las curvas acotadas y cuando no se encontraban con valores de cota se procedió a asignarle el valor de altitud correspondiente; o se eliminaron líneas que no correspondían a la cobertura de curvas de nivel en el mismo mapa base. Una vez concluidos los procedimientos descritos, se procedió a generar los atributos requeridos. Estos procedimientos permitieron alcanzar la uniformidad y optimización de los datos espaciales, garantizado su inter-operabilidad y su análisis mediante SIG.

2.4 ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD

En este apartado se describirá la metodología seguida en este estudio para el análisis de la susceptibilidad por movimientos de ladera mediante SIG. Para comprender mejor el procedimiento seguido, a continuación se presenta una síntesis de los principales modelos aplicados en este tipo de trabajo.

2.4.1 Modelos de susceptibilidad a los movimientos de ladera

Existen diversos modelos para abordar el análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera y que han ido cambiando con el tiempo. Los primeros se elaboraban a mano y llevaba mucho tiempo el realizarlos, pero con la aparición de los SIG, los modelos se perfeccionaron, ganándose objetividad y tiempo en los procesos de análisis. A escala local, pueden usarse métodos determinísticos, que calculan el factor de seguridad de una ladera a que se produzca una superficie de rotura; pero a escala regional (distrital, provincial, etc.), se usan índices de susceptibilidad que nos indican el grado de propensión de un área a que se movilicen los terrenos, porque no se pueden obtener los parámetros necesarios para efectuar un análisis determinístico dado que estos parámetros son muy variables a dicha escala.

Los principales modelos aplicados se pueden agrupar en heurísticos o empíricos y estadísticos o probabilísticos.

- **Modelos heurísticos o empíricos**

Estos modelos se basan en la experiencia del investigador para clasificar y ponderar la contribución de los factores causantes de la ocurrencia de movimientos de ladera a la susceptibilidad. Los mapas resultantes de estos métodos generalmente sirven de base para trabajos de mayor detalle y para delimitar las zonas más peligrosas. La escala de trabajo suele oscilar entre 1/100,000 y 1/50,000 (González-Jiménez, 2003). Dentro de este tipo de modelos se encuentran los modelos geomorfológicos y los de combinación de mapas de factores.

A. Modelos geomorfológicos

Este tipo de modelos se basan en la cartografía geomorfológica a partir de la cual se determinan áreas potencialmente inestables (Brunsden y otros, 1975; Hansen y Frank, 1991). Un inconveniente de estos modelos, es que no incorporan al análisis de la susceptibilidad, laderas que no han desarrollado procesos de remoción pero cuyas condiciones de sitio hacen que sea probable el desarrollo de dichos fenómenos en ellas.

B. Modelos de combinación de mapas de factores

Estos modelos se basan en la ponderación de unidades de los mapas de factores que se combinan para obtener un mapa final de zonificación de la susceptibilidad a los movimientos de ladera, cuyos resultados si reflejan la extrapolación a zonas sin procesos de remoción (Carrara y otros, 1995). El inconveniente es que los valores asignados a menudo no tienen suficiente base de campo, es decir no se ajustan a modelos reales.

El IGME ha desarrollado un modelo de combinación de factores basado en el método DELPHI. El método DELPHI, diseñado por investigadores de la Rand Corporation en la década de los cincuenta, se basa en la consulta a expertos y es usado en diversos campos. El método del IGME, consiste el uso de SIG, para extrapolar ponderaciones cualitativas hechas por expertos, de las combinaciones de los factores condicionantes a los movimientos de ladera en zonas inventariadas, mediante el uso de una matriz (Laín y otros, 2005).

- **Modelos estadísticos o probabilísticos**

Este tipo de modelos permiten establecer relaciones estadísticas entre una serie de factores condicionantes de los movimientos de ladera como la litología, pendiente, etc. y la distribución actual y/o pasada de los movimientos de ladera, a escalas de trabajo entre 1/10,000 y 1/5,000 (Remondo y otros, 2003). Su uso requiere crear una base de datos que incluya toda esa información. En estos modelos se pueden diferenciar modelos univariantes y modelos multivariantes, si se trabaja con una o más variables.

A. Modelos univariantes

En los modelos univariantes se puede diferenciar los que utilizan el análisis condicional de los que no lo utilizan. Los que utilizan el análisis condicional, evalúan la relación probabilística entre diversos factores relevantes para la ocurrencia de movimientos de ladera. Se basa en la superposición de uno o más factores con el mapa de distribución de movimientos de ladera para obtener una probabilidad condicionada de cada factor a la presencia o ausencia de estos procesos. Los que no utilizan el análisis condicional, tratan de evaluar la relación probabilística entre los factores mencionados, generando una matriz. Este modelo consiste en determinar el porcentaje de la superficie total de cada

combinación de factores que esta ocupada por las zonas de ruptura de los movimientos de ladera (Irigaray y otros, 1999).

B. Modelos multivariantes

Los modelos multivariantes, estudian la interacción y dependencia de los factores condicionantes para establecer la implicancia de cada uno de ellos. Las técnicas estadísticas mas usadas son la regresión múltiple y el análisis discriminante, ambos basados en la combinación lineal. Estos modelos se realizan de dos maneras, bien usando una población de laderas con atributos recogidos y asociados a deslizamientos individuales (Baeza, 1994); o con el uso de unidades del terreno que cubren el área entera del estudio, para las cuales se recogen datos de un numero de factores y se analizan utilizando regresión múltiple o análisis discriminante que permite separar poblaciones de una misma muestra caracterizadas por las mismas variables (Carrara, 1992).

2.4.2 Modelo, escala y variables elegidas

Una vez que se tuvieron listos los datos espaciales, se procedió a elegir el modelo a usar en el análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera, la escala de presentación y las variables a utilizar. El modelo elegido para la cuenca del río Llaminchán ha sido el método de combinación de factores del IGME (Laín y otros, 2005) por considerarse adecuado dada la información con la que se contaba. Por otro lado, debido a que parte de la información recopilada se tenía a la escala 1/50,000; se eligió esta como escala de representación, además de considerar que a esa escala el tamaño de los mapas es más portátil. Asimismo, las variables o factores condicionantes elegidos han sido pendiente; litología, geotecnia e hidrogeología, para formar las unidades litológicas; y tipo de movimientos de ladera, velocidad y volumen movilizable de los procesos.

- **Pendiente**

Uno de los aspectos importantes en el análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera es la pendiente de los terrenos, ya que sin esta, el terreno no seria una ladera y porque es necesaria para que se produzcan fenómenos gravitacionales en ellas.

El mapa de pendientes de la cuenca del río Llaminchán (anexo IV) se ha elaborado usando mapas topográficos con curvas de nivel cada 25 metros, de las que se generó un Modelo Digital de Elevación (MDE), que es una representación simplificada de una porción de la realidad muy concreta, como son las posiciones en un espacio tridimensional (X,Y,Z). De este MDE se generó el mapa de pendientes calculado como un gradiente de elevaciones.

Para este trabajo, se han diferenciado cinco tipos de pendientes, muy baja, baja, media, fuerte y muy fuerte, habiéndose considerado que distinguir más grados no es optimo porque los datos disponibles no son suficientes para ello y diferenciar menos es desperdiciar información, ya que se tiene la certeza de que estas cinco categorías no exceden los márgenes de error provenientes del MDE.

A. Pendiente muy baja (menor de 10º)

Comprende zonas casi planas asociadas a altiplanicies, terrazas fluviales y a la desembocadura del río Llaminchán. Se ha registrado en zonas de pendiente muy baja flujos de lodo provenientes de las quebradas tributarias al cauce del río Llaminchán asociados a eventos de El Niño (por ejemplo el de 1997-98).

B. Pendiente baja (entre 10º - 20º)

Abarca zonas poco escarpadas y abarca parte de la cuenca baja y media. En esta zona se han registrado con poco frecuencia, movimientos de ladera, salvo deslizamientos muy antiguos identificados cerca de la zona de San Bernardino.

C. Pendiente media (20º - 40º)

Incluye zonas de montañas con crestas moderadas y se presenta ampliamente distribuida en toda la cuenca. Asociadas a esta pendiente y a pendiente fuerte, se han registrado áreas donde los movimientos de ladera ocurren frecuentemente.

D. Pendiente fuerte (40º - 60º)

Zonas de pendiente fuerte se encuentran localizadas en la cuenca baja y media como por ejemplo se ha observado en ambas márgenes del río Llaminchán (entre Chilete y la mina Paredones). Son áreas con intensa actividad geodinámica y una morfología abrupta.

E. Pendiente muy fuerte (mayor de 60 º)

Las zonas asociadas a esta pendiente son muy abruptas y se encuentran restringidas a algunos sectores de la cuenca media como las laderas del cerro Cashiocro. Muchas de ellas, corresponden a zonas de escarpa de movimientos de ladera del tipo deslizamientos y caídas.

o Litología, geotecnia e hidrogeología

La litología, geotecnia e hidrogeología, se ha considerado en la agrupación de tipos de rocas aflorantes como unidades litológicas (Mapa Litológico, anexo VI). Las características geológicas consideradas han sido composición mineralógica y tipo de material. Las características hidrogeológicas han sido transmisividad; permeabilidad y porosidad; almacenamiento y contenido de agua. Para evaluar la permeabilidad se ha tomado como referencia los rangos de variación establecidos por Davis y De Wiest (1971, tabla 1).

POROSIDAD
arcilla
limo
toba
arena bien clasificada
arena y grava mal clasificada
arenisca
basalto poroso
roca cristalina fracturada
roca cristalina masiva

MÁXIMO ↕ MÍNIMO

PERMEABILIDAD	RANGO DE VARIACIÓN (m/día)
grava bien clasificada	$>1 \cdot 10^{3}$
basalto poroso	$5 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{2}$
caliza karstificada	$1 \cdot 10^{2}$
arena bien clasificada	$1 \cdot 10^{1} - 1 \cdot 10^{3}$
arena y grava mal clasificada	$5 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{1}$
roca cristalina fracturada	$< 5 \cdot 10^{-4}$
limo	$1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-2}$
arcilla	$<1 \cdot 10^{-5}$
roca cristalina masiva	$< 5 \cdot 10^{-4}$

Tabla 1. Porosidad y permeabilidad de diferentes tipos de materiales (modificado de Davis y De Wiest, 1971).

Las características geotécnicas correspondieron a resistencia de rocas y capacidad portante de suelos. Para evaluar la resistencia de las rocas se ha tomado como referencia el índice RMR (rock mass ratio, tabla 2) de Bieniaski (1989); y para estimar la capacidad portante de suelos el índice internacional CBR (California Bearing Ratio, tabla 3).

RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Calidad de la roca	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala

Tabla 2. valoración de la calidad de la roca en función del RMR (modificado de Laín y otros, 2005)

CBR	> 80	80 - 40	40 - 10	< 40
Capacidad portante del suelo	Muy buena	Buena	Media	Mala

Tabla 3. Valoración de la capacidad portante de suelos en función del CBR (modificado de Laín y otros, 2005)

A. Unidades litológicas

Para obtener las unidades, litológicas, se ha tomado como base a la información geológica descrita en el apartado 1.7.2; información hidrogeológica proveniente del "Estudio Hidrogeológico de la cuenca Jequetepeque" (Peña y Vargas, inédito) y de la "Caracterización hidrogeológica de la cuenca del río Jequetepeque, regiones de Cajamarca y la Libertad" (Vargas, 2007); así como datos geológico-estructurales y geotécnicos tomados en el campo.

De acuerdo a las características geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas señaladas anteriormente, se definieron tres grandes grupos litológicos: el Grupo I constituido por depósitos superficiales, el Grupo II por rocas sedimentarías y el grupo III por rocas volcánicas.

Grupo I. Depósitos superficiales

El primer grupo litológico está conformado por depósitos superficiales constituidos por rocas sueltas a medianamente consolidadas. Se subdivide en cuatro unidades: DS1, DS2, DS3, DS4 y DS5.

DS-1.- Lo constituyen los depósitos aluviales constituidos por bloques, gravas, cantos redondeados heterogéneos y arena en matriz limo-arcillosa (foto 6). Estos depósitos se distribuyen a lo largo de las quebradas que drenan hacia el interior de la cuenca y se acumulan al pie de las mismas formando conos de deyección de espesores variables (entre 1 m y 3 m). Debido al mecanismo de depositación carecen de estratificación contínua y su espesor aumenta hacia el centro de los conos. Sobre la permeabilidad se puede decir que esta es variable pero en promedio baja por la presencia de finos, por lo que son considerados hidrogeológicamente como acuitardos. Su capacidad portante es regular a buena y para su excavabilidad es apropiado el empleo de medios mecanizados tales como bulldozers, cargadores frontales o retroexcavadoras.

Foto 6. Depósitos aluviales de la quebrada San Antonio.

DS-2.- Está representado por los depósitos de remoción en masa, constituidos por gravas, cantos y bloques subangulosos mal seleccionadas en matriz limo-arcillosa., Su permeabilidad es muy baja debido a que principalmente se saturan de agua y la transmiten lentamente se les considera hidrogeológicamente como acuitardos. Su capacidad portante es mala.

DS-3.- Lo constituyen depósitos eluviales constituidos por arcillas y arenas originados generalmente por meteorización y destrucción mecánica de rocas preexistentes así como por transporte y depositación gravitacional. Estos depósitos se encuentran situados sobre las laderas ocupando áreas de poca extensión y potencia mínima. Tienen una permeabilidad alta y son considerados hidrogeológicamente como acuíferos porosos no consolidados de baja capacidad de almacenamiento. Su capacidad portante es regular a mala y pueden excavarse fácilmente con herramientas manuales (pala y pico).

DS-4.- Está conformado por depósitos fluviales constituidos por gravas y cantos redondeados heterogéneos en matriz arenosa. Tienen una permeabilidad alta y presentan problemas debido al nivel freático alto cercano al a superficie del terreno y a la carencia de cohesión. Considerados hidrogeológicamente como acuíferos porosos no consolidados de alta capacidad de almacenamiento. Su capacidad portante es mala y es fácilmente excavable con herramientas manuales.

DS-5.- Lo conforman depósitos fluvioglaciares constituidos por material heterogéneo en formas y tamaños, desde bloques hasta limos, envueltos en una matriz arcillosa. Estos depósitos han sido transportados por torrentes producto del deshielo glaciar. Debido a la gran heterogeneidad granulométrica de sus componentes, condición de transporte y depositación su permeabilidad es variable pero en promedio alta y son considerados hidrogeológicamente como acuíferos porosos no consolidados. Su capacidad portante es regular a mala y pueden ser excavados fácilmente mediante el empleo de herramientas manuales.

Grupo II. Rocas sedimentarias

Este grupo litológico concentra a las rocas sedimentarias que afloran en el área de estudio, las que a su vez se ha dividido en cuatro unidades: RS1, RS2, RS3 y RS4.

RS-1.- Corresponde a las cuarcitas y conglomerados de la formación Farrat que hidrogeológicamente son consideradas acuíferos fisurados, debido a que son rocas muy fracturadas, lo que hace que su calidad varíe de mala a regular y que posea una porosidad secundaria importante. Además, esta formación tiene también estructuras geológicas que condicionan el almacenamiento y transmisividad de las aguas subterráneas.

RS-2.- Esta constituido por las lutitas, limos, calizas y margas de las formaciones Quilquiñan-Mujarrum, Chulec/Pariatambo y Yumagual. Hidrogeológicamente se le clasifica como acuitardo porque son rocas que almacenan y transmiten aguas subterráneas de forma muy lenta y se comportan como rocas sello. Calidad regular a buena.

RS-3.- Esta conformado por las areniscas y lutitas ferruginosas de la Formación Inca. Hidrogeológicamente se le considera como acuitardo dado que la intercalación de lutitas le

da una permeabilidad muy baja haciendo que esta formación almacene agua pero que la transmita de forma mínima. Calidad regular.

RS-4.- Esta constituido por las calizas de la formación Cajamarca. Su comportamiento hidrogeológico ha sido considerado como acuífero kárstico, debido al fracturamiento y carstificación de las rocas, lo que le da una porosidad secundaria media a alta. La calidad de las rocas es mala a regular.

Grupo III. Rocas volcánicas

Este grupo litológico está constituido por rocas volcánicas que a su vez se divide en las unidades: RV1, RV2, RV3, RV4, RV5 y RV6.

RV-1.- Constituido por las rocas del primer evento de los volcánicos Chilete (flujos lávicos andesíticos) y subvolcánicos andesíticos. Hidrogeológicamente a las rocas de esta unidad se les considera acuitardo, debido a que almacenan y transmiten agua muy lentamente en su interior o en forma localizada por su poca permeabilidad, la porosidad es muy baja. En el área de estudio se presentan con calidad buena a muy buena.

RV-2.-esta unidad esta constituida por las rocas del primer evento de los volcánicos Chilete, pero fracturadas (foto 7). Hidrogeológicamente se les considera acuífero volcánico de baja capacidad de almacenamiento; debido a que transmiten agua en su interior o en forma localizada por su permeabilidad secundaria, pero tienen poca extensión. En la zona de estudio, se presentan muy alterados, fracturados y diaclasados localmente por lo que su calidad se considera mala a regular.

Foto 7. Andesitas fracturadas correspondientes a la unidad litológica RV2 (Secuencia Chilete) en un tramo de la carretera Chilete-San Pablo-San Bernardino.

RV-3.- Esta unidad está conformada por las rocas del segundo evento de los volcánicos Chilete, de la secuencia El Suro y las del centro volcánico Huyquisongo (primer evento). En esta unidad predominan los flujos piroclásticos de bloques, pómez, cenizas, lahares y cenizas riolíticas y andesíticas Son considerados acuitardos y su calidad varia de mala a regular.

RV-4.- Esta conformada por las rocas del sétimo evento del centro volcánico Huyquisongo, flujos piroclásticos de bloques y cenizas con fragmentos líticos porfiríticos. Hidrogeológicamente se les clasifica como acuitardos. Tienen una baja permeabilidad. Calidad regular a buena.

RV-5.- Esta conformada por las rocas del segundo y tercer evento del centro volcánico Huyquisongo que corresponden a flujos piroclásticos soldados de pómez y cenizas dacíticas y riolíticas. Son materiales con porosidad muy baja y permeabilidad mínima. Se le considera acuitardo y la calidad de las rocas que agrupa de regular a buena.

RV-6.- Constituyen a esta unidad, las rocas de la secuencia San Pablo, constituida por intercalaciones de depósitos volcanoclásticos, intercalados con flujos de cenizas andesíticas, lahares (con fragmentos volcánicos subredondeados a subangulosos) y capas de calizas de grano medio. Son materiales con porosidad primaria importante y permeabilidad de media, por lo que se les ha considerado como acuífero volcano-sedimentario con capacidad de almacenamiento media a alta. Su calidad es regular a buena.

En la tabla 4 se presenta un resumen de las principales características litológicas, hidrogeológicas y geotécnicas de las unidades litológicas en la cuenca Llaminchán.

- **Tipo de movimientos observados**

En la zona de estudio los movimientos de ladera observados son principalmente de orden simple y complejos en menor porcentaje (tabla 5).

En la tabla 5 se presentan los ejemplos citados en este apartado, los cuales se han extraído de la base de datos del inventario de movimientos de ladera. En dicha tabla se señala: el número de ficha del inventario; la orden a la que pertenece cada fenómeno inventariado; la familia (en el caso de los movimientos de orden simple) o genero (para el caso de los movimientos de rocen complejo); el tipo de movimiento de ladera; la unidad geológica reconocida en la zona donde se inventarió el fenómeno; la actividad del fenómeno; la morfología; la pendiente del terreno; el paraje y el comentario geodinámico respectivo.

Grupo	Unidad Litológica	Unidad Geológica	Tipo de material	Hidrogeología	Capacidad portante (CBR)	Calidad (RMR)
Depósitos Superficiales	DS1	Depósitos aluviales	Depósitos aluviales	Acuitardo semiconsolidado	Regular a buena	
	DS2	Depósitos de remoción en masa	Depósitos de remoción en masa			
	DS3	Depósitos eluviales	Depósitos eluviales	Acuífero poroso no consolidado	Regular a mala	
	DS4	Depósitos fluviales	Depósitos fluviales		Mala	
	DS5	Depósitos fluvio-glaciares	Depósitos fluvio-glaciares		Regular a mala	
Rocas Sedimentarias	RS1	Formación Farrat	Areniscas cuarzosas	Acuífero fisurado sedimentario		Mala a regular
	RS2	Formación Quilquiñan-Mujarrum, Chulec, Pariatambo y Yumagual	Lutitas, limos, calizas y margas.	Acuitardo sedimentario		Regular a buena
	RS3	Formación Inca	Areniscas y lutitas ferruginosas.			regular
	RS4	Formacion Cajamarca	Calizas	Acuífero kárstico		Mala a regular
Rocas Volcánicas	RV1	Secuencia Chilete, evento 1	Flujos lávicos y subvolcánicos andesíticos.	Acuitardo volcánico		Buena a muy buena
	RV2	Secuencia Chilete 1 fracturada	Lava andesítica fracturada y alterada.	Acuífero fisurado volcánico		mala a regular
	RV3	Secuencias Chilete2, El Suro y Huayquisongo1	Flujos piroclásticos dacíticos y andesíticos de bloques, pómez, cenizas y lahares.	Acuitardo volcánico		
	RV4	Secuencia Huayquisongo7	Flujos piroclásticos dacíticos de bloques y cenizas con fragmentos líticos.			Q. regular a buena
	RV5	Secuencias Huayquisongo2 y 3	Flujos piroclásticos dacíticos y riolíticos de pómez y cenizas.			
	RV6:	Secuencia San Pablo	Depósitos volcanoclásticos de flujos de cenizas interclados con capas de caliza y lahares.	Acuífero fisurado volcánico		

Tabla 4. Principales características litológicas, hidrogeológicas y geotécnicas de las unidades litológicas en la cuenca Llaminchán.

No FICHA	ORDEN	FAMILIA o GENERO	TIPO	NOMBRE ESPECÍFICO	UNIDAD GEOLÓGICA	ACTIVIDAD	MORFOLOGÍA	PENDIENTE	PARAJE	COMENTARIO GEODINÁMICO
Distrito de Chilete										
24	Simple	2	Flujo	Flujo de detritos	Sec. Chilete, evento 1	Inactivo – Joven	Valle fluvial	Baja a media	Quebrada San Antonio	Flujo de material grueso mayor al 50%. En mayor proporción bolones (60%), gravas (20%) y arenas-limos en 20%
30		1	Caida	Desprendimiento	Sec. Chilete, evento 1	Activo	Ladera de lomada	Muy fuerte	Entre Chilete y Mina Paredones	Caída de rocas de talud rocoso de acantilado de forma irregular. Afloramiento de alta resistencia, presenta 4 familias de fracturas. El espesor de aberturas es de 10 a 40 cm con relleno.
Distrito de San Bernardino										
48	Simple	2	Deslizamiento	Deslizamiento rotacional	Sec. Chilete, evento 2	Activo	Ladera de lomada.	Baja a media	Pueblo Nuevo	Deslizamiento de escarpa única de forma semicircular, la velocidad muy rápida, su distribución es retrogresiva.
66		2	Flujo	Flujo de lodo	Sec. Chilete, evento 1	Antiguo	Valle fluvial, terreno escalonado.	Muy baja a baja	Quebrada San Nicolás	Flujos de lodo con deposito de material fino >50%, 40% gravas, 60% arcillas y limos. Desemboca en la margen derecha del río Llaminchán.
73		1	Caida	Desprendimiento	Fm Farrat	Antiguo	Ladera de montaña, terreno mixto.	Media	Pueblo Nuevo	Desprendimiento en el cuerpo de un deslizamiento antiguo. Ladera con extensión de 300 m, bloques caídos de hasta 3 m de diámetro.
Distrito de San Pablo										
78	Simple	2	Reptacion	Reptacion de suelos	Fm Cajamarca	Activo	Valle fluvial, ladera de montaña	Baja a media	Lachiconga (Callancas)	Reptación de suelos en ladera suave con desgarre de cobertura vegetal. Saltos y discontinuidades centimétricas en la ladera.
84		2	Deslizamiento	Deslizamiento rotacional	Fm Chulec	Activo	Valle fluvial, ladera de montaña	20° - 35°	Qda. Sin nombre en la margen derecha del río Callancas	Deslizamiento de escarpa semicircular irregular de 80 m de longitud, con escarpas sucesivas. Salto principal de 2 m, agrietamientos en el cuerpo. Desvió parcialmente cauce de quebrada.
85	Complejo	1	Movimiento complejo	Deslizamiento-Flujo	Fm Cajamarca	Inactivo - Maduro	Valle fluvial, ladera de montaña	20° - 35°	Sarapacha	Evento antiguo, deslizamiento de escarpa de aproximadamente 350 m de longitud.

Tabla 5. Ejemplos de movimientos de ladera inventariados.

A. Movimientos de ladera simples

Los movimientos de ladera de orden simple que se han registrado en la cuenca Llaminchán pertenecen a dos familias: movimientos con fase aérea y movimientos con fase terrestre.

Los movimientos de ladera con fase aérea que se han reconocido son del tipo caídas, de las cuales un mayor número es de tipo desplome y menor de desprendimientos.

Como ejemplos se tiene los desprendimientos de rocas andesíticas fracturadas que se observa a lo largo de la carretera Chilete-San Bernardino, entre el sector de Chilete y La mina Paredones (ambas márgenes de la quebrada Llaminchán, foto 8); el desplome planar de un talud rocoso de pendiente abrupta observado en la margen derecha de la quebrada San Pedro, en las afueras de San Pablo, que puede afectar viviendas y terrenos de cultivo.

Foto 8. Desprendimientos de rocas volcánicas fracturadas en ambas márgenes del río Llaminchán, entre Chilete y la mina Paredones (Tabla 5, ficha 30).

Otro ejemplo se tiene en el desprendimiento del sector Pueblo Nuevo en rocas de la Formación Farrat (foto 9), que afectó 650 m de la trocha carrozable Chilete-San Pablo.

Foto 9. Desprendimiento de rocas sedimentarias fracturadas de la Formación Farrat en el sector Pueblo Nuevo (Tabla 5, ficha 73).

Los movimientos de ladera con fase terrestre que se han reconocido en la cuenca Llaminchán son de los tipos deslizamiento, flujo y reptación.

Los deslizamientos en el área de estudio son muy heterogéneos en formas y dimensión; aunque predominan los de tipo rotacional con superficie de rotura simple. Un ejemplo de este tipo de fenómenos se tiene en el sector de Pueblo Nuevo (Distrito de San Bernardino, foto 10), en la margen derecha del río San Pablo. Dicho proceso está asociado a flujos de cenizas intercalados con lahares y ha sido reactivado por la presencia de terrenos de cultivo en el área y por la erosión del río en tiempos de lluvia.

Foto 10. Deslizamiento Sector Pueblo nuevo. Se observa el agrietamiento con un ancho aproximado de 2 metros (Tabla 5, ficha 48).

Otro ejemplo es el deslizamiento rotacional ubicado a 5 km de Santa Rosa de Unanca siguiendo la trocha carrozable Santa Rosa de Unanca-Llanavaco (foto 11), que se produjo debido a que el substrato constituido por calizas y limolitas es de mala calidad y la pendiente es fuerte. Afectó aproximadamente 100 m de la trocha.

Foto 11. Deslizamiento rotacional en la trocha carrozable Santa Rosa de Unanca-Llanavaco (Tabla 5, ficha 84).

Los flujos varían notablemente en dimensiones y se presentan con más frecuencia en la cuenca media y baja. Se han registrado tres tipos: flujos de detritos, flujos de lodo y avalanchas.

Como ejemplos se tiene el flujo de detritos o huayco de la quebrada San Antonio (foto 12), que afectó en 1998 un tramo de 50 m la trocha carrozable Chilete-San Antonio; o el flujo de lodo de la quebrada San Nicolás (foto 13), frente a la mina Paredones. Según los pobladores, siempre que se producen lluvias fuertes se desplaza material por esta quebrada y afecta a la carretera afirmada Chilete-San Bernardino.

Foto 12. Vista del huayco de la quebrada San Antonio (Tabla 5, ficha 24)

Foto 13.- flujo de lodo de la quebrada San Nicolás (Tabla 5, ficha 66).

La reptación en la zona de estudio está centrada a la parte alta de la cuenca sobre los 3,000 m de altitud. Un ejemplo de reptación se observa en el sector de Yerba Buena que abarca un área aproximada de 300,000 m^2. Otro ejemplo se observa en el sector Lachiconga donde se produce reptación en una zona de pastizales (foto 14) affectando unos 100 m de la Trocha carrozable San Pablo-Callancas.

Foto 14. Vista de la reptación en el sector de Lachiconga (Tabla 5, ficha 78).

B. Movimientos de ladera complejos

En la cuenca Llaminchán los movimientos complejos representan un pequeño porcentaje y corresponden en su mayoría a movimientos sucesivos del tipo deslizamiento-flujo como el que se observó en el sector de Sarapacha (San Pablo, foto 15). Dicho proceso es un evento antiguo, con poca probabilidad de reactivarse si se mantienen las condiciones actuales del sitio.

Foto 15. Vista del deslizamiento-flujo en el sector de Sarapacha (Tabla 5, ficha 85).

- **Velocidad de los procesos observados**

La velocidad de los movimientos de ladera se ha tenido en cuenta para la obtención de la matriz de susceptibilidad, en la medida en que nos aporta información sobre el tipo de procesos esperados. El trabajo del Working Party/World Landslide Inventory, (1995) establece cinco rangos de velocidad y aporta información sobre la severidad del proceso:

Extremadamente lento: menos de 16 mm/año. Sin daños a estructuras construidas con las precauciones del caso.

Muy lento: 16 mm/año. Algunas estructuras permanentes no sufren daño, o si la sufren pueden ser reparadas.

Lento: 1.6 m/año. Carreteras y estructuras vulnerables pueden ser mantenidas con trabajos frecuentes e intensos si el movimiento no dura demasiado o si los movimientos diferenciales en los márgenes del movimiento se distribuyen e una zona amplia.

Moderado: 13 m/mes. Estructuras invulnerables pueden ser mantenidas si están localizadas a corta distancia del pie del deslizamiento; daños intensos en la situadas sobre el movimiento.

Rápido: 1.8 m/h. Escape y evacuación posibles, estructura, posesiones y equipos destruidos

Muy rápido: 3 m/min. Algunas vidas perdidas porque la velocidad es demasiado grande para permitir el escape. Destrucción mayor.

Extremadamente rápido: 5 m/s. catástrofe de violencia mayor; edificaciones expuestas totalmente destruidas, población muerta por el impacto o el material desplazado o por disgregación de la masa desplazada.

En el área de estudio se ha agrupado en tres grupos a las unidades litológicas de acuerdo a como se presentaron las velocidades de los movimientos de ladera en ellas.

Se ha considerado en el primer grupo (velocidad de lenta a moderada) a los materiales escasamente afectados por inestabilidades que además aparecen dispuestos en áreas de escasa pendiente. Tenemos aquí a las unidades RS1, RS3, DS4 y DS5.

En el segundo grupo las velocidades varían de moderada a muy rápida y se ha considerado aquí a los materiales que presentan movimientos de ladera principalmente del tipo deslizamientos. Las unidades aquí son RS4, DS1, RV1, RV4 y RV6.

En el tercer grupo las velocidades son muy rápidas a extremadamente rápidas y se ha considerado a los materiales que presentan movimientos de ladera principalmente del tipo flujos de detritos, desprendimientos y derrumbes. A esta unidad corresponden: DS2, DS3, RS2, RV2, RV3 y RV5.

- **Volumen movilizable por los procesos**

De acuerdo al volumen de masa inestable que podría movilizarse a causa de estos fenómenos, se ha subdividido a las unidades litológicas en dos grupos:

Materiales con volúmenes movilizables muy pequeños a pequeños. Aquí están los materiales escasamente afectados por inestabilidades correspondiendo a rocas sanas y escasamente diaclasadas que aún cuando podrían generar grandes bloques su

probabilidad de caída es reducida. Pertenecen a este grupo las unidades: RS1, RS2, RS3, RS4, RV1, RV3, RV4 y DS4.

Materiales con volúmenes movilizables pequeños a grandes. Agrupa al resto de materiales, correspondiendo a depósitos cuaternarios de ladera, materiales erosionables y rocas fracturadas que han sido afectados por inestabilidades con más frecuencia. A este grupo pertenecen: DS1, DS2, DS3, RV2, RV5 y RV6.

2.4.3 Análisis matricial

En el análisis matricial se ha transformado la información de vectorial a matricial para poder hacer las operaciones algebraicas, pues en formato vectorial solo se pueden hacer operaciones de geoprocesamiento. En formato matricial Para realizar el algebra de capas, primero se necesito elegir un tamaño de píxel adecuado.

- **Elección del tamaño de píxel**

Una vez definidas las variables a utilizar en el análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera, se procedió a elegir el tamaño de píxel, para lo cual se ha considerado lo siguiente:

1. La escala a la que se generó la información vectorial. Toda información vectorial ha sido generada con un nivel de detalle tal, que a una determinada escala los errores son mínimos (despreciables). A una escala mayor que aquella para la que fue pensada dicha información, los errores dejan de ser asumibles y se usan datos con un nivel de detalle insuficiente. Asimismo, a escalas menores que a la que se generó la información, existe más información de la que se es capaz de interpretar. Por ejemplo se puede trabajar a escala 1/100,000 con datos preparados a 1/25,000 mediante algoritmos de generalización reduciendo el nivel de detalle o bien asumiendo que existe más información de la necesaria; pero no es apropiado lo inverso, que sería trabajar a escala 1/25,000 con datos preparados a 1/100,000.

2. Espacio entre curvas de nivel (Z). Considerando que las curvas de nivel se tienen espaciadas cada 25 m, se asume que un incremento de Z (Δz) igual a 25 m

contiene errores aceptables, por tanto cabe pensar que una pendiente del 100 % también se podría asumir que contiene errores aceptables lo que implica un incremento de altura (Δh) igual a 25 m, es decir que si se elige un píxel de 25x25 m se estaría interpolando adecuadamente las curvas de nivel para nuestro MDT; mientras que si se usa un píxel menor a 25 m se interpolarían valores interpretados pro el software obteniendo un MDT irreal.

3. El límite de percepción visual. Para nuestro caso la información base se preparó a escala 1/25,000 por lo tanto considerando que el límite de percepción visual es convencionalmente de 0.2 mm (Santamaría y Sanz, 2005), a esta escala el tamaño del píxel sería de 8x8 m porque con ese tamaño no se apreciaría el pixelado.

Para este estudio se ha elegido un tamaño de píxel de 25x25 porque es preferible optar por el que contenga menos errores.

- **Construcción de la matriz de susceptibilidad**

En esta parte se describe como se ha construido la matriz de susceptibilidad a los movimientos de ladera según los criterios del IGME. Dicha matriz se utiliza para localizar las combinaciones entre pendiente y litología y ponderarlas. Para ello se ha consignado números identificadores enteros a las unidades litológicas y a los rangos de pendientes. Cada dígito del número entero nos ubica dentro de la clase y subclase de pendiente y litología que se tiene y se pueden sumar sin que por ello se vea modificado el significado de cada uno de ellos.

Para identificar a los grupos litológicos y unidades litológicas se ha usado centenas y unidades. Por ejemplo si se quiere ubicar la unidad litológica RS1 su numero identificador es 101, la unidad RS2 es 102 y así sucesivamente.

Para las pendientes se hizo lo mismo pero con el millar y las decenas, de tal modo que si se quiere ubicar por ejemplo, la pendiente muy baja el numero identificador seria 1010. De esta forma se asegura que una determinada posición de la matriz (tabla 6) este asociado a un único valor de suma entre pendiente y litología. Por

ejemplo considerando la unidad RS1 (101) y la pendiente muy baja (1010) la suma de ambas resulta 1111.

Los valores de la matriz suma de factores (tabla 6) sirven para identificar las ponderaciones pendiente y litología correspondientes, las cuales se recogen en la tabla 7. El rango de valores arbitrarios usados en las ponderaciones es de 1 a 5 para identificar con facilidad el significado de la susceptibilidad creciente, es decir, el valor 1 corresponde a una susceptibilidad "muy baja" y 5 a "muy alta" (tabla 7). Por ejemplo si consideramos la unidad RS1 y una pendiente menor de 10 grados el valor asignado sería 1 porque en ese rango de pendiente las rocas de dicha unidad desarrollarían raramente movimientos de ladera (tabla 7).

Posteriormente hubo que volcar estas matrices en mapas en formato raster para realizar el álgebra de capas.

- **Preparación de mapas en formato raster a usar en el algebra de capas**

En el shapefile del mapa de unidades litológicas (anexo VII) se creó en la tabla de atributos asociada a este, un campo (V_Ulito) que contuvo los valores de identificación ligados a las unidades litológicas (tabla 6) y mediante el uso de la herramienta Convert – features a raster se convirtió el mapa de unidades litológicas al formato raster. El mapa de pendientes (Anexo 6.5) se tenía en matricial, así que solo se reclasifico mediante el atributo V_Elev (Valor de elevación). El tamaño de píxel utilizado en ambos casos fue de 25 m, según lo indicado en apartados anteriores.

Mapa de unidades litológicas clasificadas →				Rocas sedimentarias				Rocas volcánicas						Depósitos superficiales				
				100				200						300				
				1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5
Mapa de pendientes reclasificado ↓				**RS1**	**RS2**	**RS3**	**RS4**	**RV1**	**RV2**	**RV3**	**RV4**	**RV5**	**RV6**	**DS1**	**DS2**	**DS3**	**DS4**	**DS5**
pendientes	1000	10	**< 10º**	1111	1112	1113	1114	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1311	1312	1313	1314	1315
		20	**10 a 20º**	1121	1122	1123	1124	1221	1222	1223	1224	1225	1226	1321	1322	1323	1324	1325
		30	**20 a 40º**	1131	1132	1133	1134	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1331	1332	1333	1334	1335
		40	**40 a 60º**	1141	1142	1143	1144	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1341	1342	1343	1344	1345
		50	**> 60º**	1151	1152	1153	1154	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1351	1352	1353	1354	1355
				Mapa suma de los factores ↑														

Tabla 6. Matriz suma de factores.

Mapa de unidades litológicas clasificadas →				Rocas sedimentarias				Rocas volcánicas						Depósitos superficiales				
				100				200						300				
				1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5
Mapa de pendientes reclasificado ↓				**RS1**	**RS2**	**RS3**	**RS4**	**RV1**	**RV2**	**RV3**	**RV4**	**RV5**	**RV6**	**DS1**	**DS2**	**DS3**	**DS4**	**DS5**
pendientes	1000	10	**< 10º**	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1
		20	**10 a 20º**	2	3	1	3	2	3	3	1	2	2	2	2	2	1	1
		30	**20 a 40º**	3	3	1	4	3	4	3	2	3	2	3	4	3	2	2
		40	**40 a 60º**	4	5	2	4	4	4	4	4	4	3	4	5	4	3	4
		50	**> 60º**	5	5	3	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	4	5
				Mapa suma de los factores reclasificado (mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera) ↑														

Tabla 7. Matriz de reclasificación de suma de factores.

- **Álgebra de mapas**

Aplicando el álgebra de capas mediante la herramienta *Raster calculator*, para integrar las coberturas de unidades litológicas y pendientes con sus respectivos atributos de identificación, se obtuvo como resultado el mapa suma de factores. El mapa obtenido muestra los valores de las sumas pendiente y litología que localice.

- **Reclasificación de mapa suma de factores**

Después de la suma de factores se reclasifica cada posición de la matriz con una aplicación programada en una hoja de cálculo que relaciona dichas posiciones con su valor de ponderación correspondiente. Como resultado se obtiene el mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera (anexo IX). En la tabla 8 se muestra la matriz síntesis asociada a dicho mapa.

MATRIZ DE SUSCEPTIBILIDAD		UNIDADES LITOLÓGICAS (apartado 24.2 B)									
		RS3	DS4	RV6	RV4, DS5	RS1, RV1, RV5, DS3	RV3	RS4, RV2	DS1	RS2	DS2
PENDIENTES	< 10º	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
	10 a 20º	1	1	2	1	2	3	3	2	3	2
	20 a 40º	1	2	2	2	3	3	4	3	3	4
	40 a 60º	2	3	3	4	4	4	4	4	5	5
	> 60º	3	4	4	5	5	5	5	5	5	5

Tabla 8. Matriz síntesis del mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca Llaminchán.

Leyenda

1	Susceptibilidad muy baja
2	Susceptibilidad baja
3	Susceptibilidad media
4	Susceptibilidad alta
5	Susceptibilidad muy alta

CAPÍTULO III

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se detallan los resultados obtenidos a través de la aplicación de los procedimientos descritos anteriormente, para el análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera. Asimismo se presentan las conclusiones y recomendaciones a las que se ha podido llegar de acuerdo a los resultados obtenidos.

3.1 RESULTADOS

Este apartado se ha dividido en tres grupos: los resultados producto del inventario de movimientos de ladera, los del trabajo de creación de bases de datos espaciales y los resultados derivados del mapa de susceptibilidad en la cuenca Llaminchán.

3.1.1 Inventario de movimientos de ladera

Del inventario de 91 movimientos de ladera, se puede decir que en el área de estudio un mayor porcentaje de ellos pertenecen a los movimientos con fase terrestre y corresponden a deslizamientos (36 %), siguiendo en importancia los movimientos con fase aérea con un porcentaje de 29 % correspondiente a caídas. En menor porcentaje se tiene otros procesos como los flujos (20 %), reptación (10 %) y movimientos complejos (5 %, figura 16).

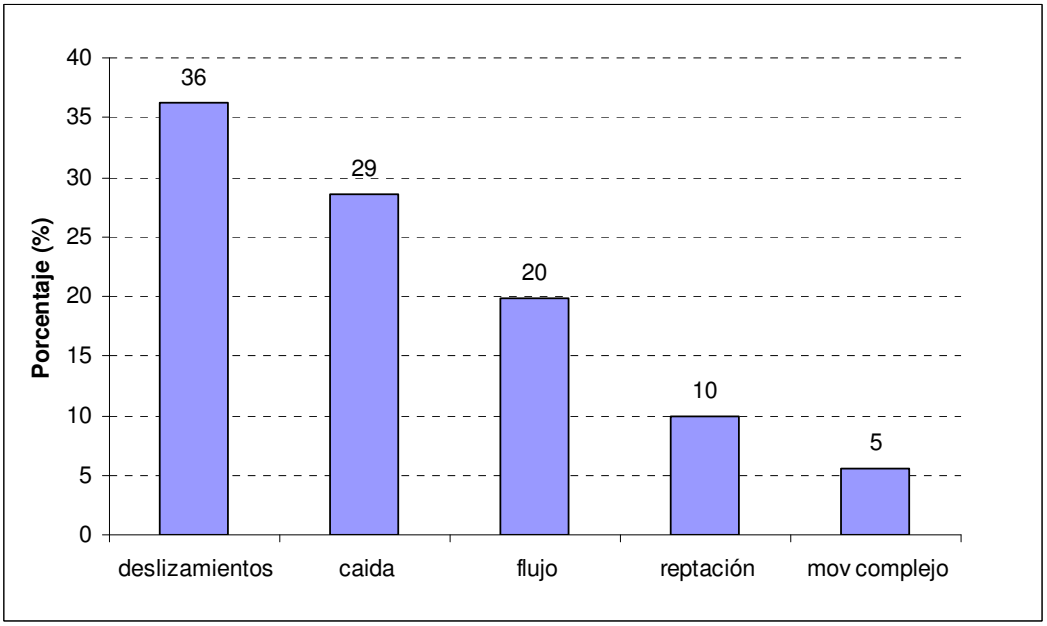

Figura 16. Porcentaje del número de movimientos de ladera registrados en el inventario.

Acerca de los deslizamientos en el área de estudio, del inventario se ha observado que son muy variados en formas y dimensión; predominando los de tipo rotacional con superficie de rotura simple (85 % del total de deslizamientos, figura 17).

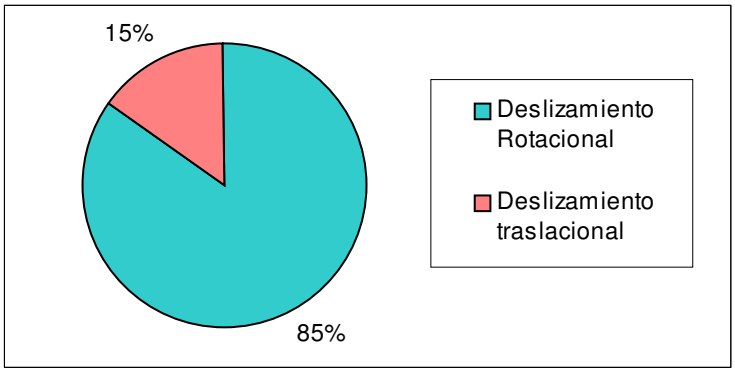

Figura 17. Porcentaje del número de deslizamientos rotacionales y traslacionales

En lo que respecta al número de caídas registrado, los desplomes son los mas frecuentes (figura 18, 73 % del total de caídas) y se localizan en áreas con pendientes mayores a 30 º en afloramientos rocosos fracturados.

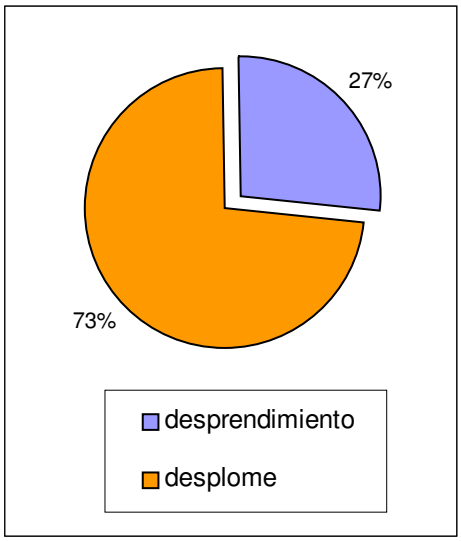

Figura 18. Porcentaje del número de caídas

Sobre los flujos se ha podido notar que varían notablemente en dimensiones y se presentan con más frecuencia en la cuenca media y baja. Un mayor porcentaje de ellos corresponde a los flujos de detrito (66 % del total de los flujos), seguidos de flujos de lodo (17 %) y avalanchas (17 %, figura 19).

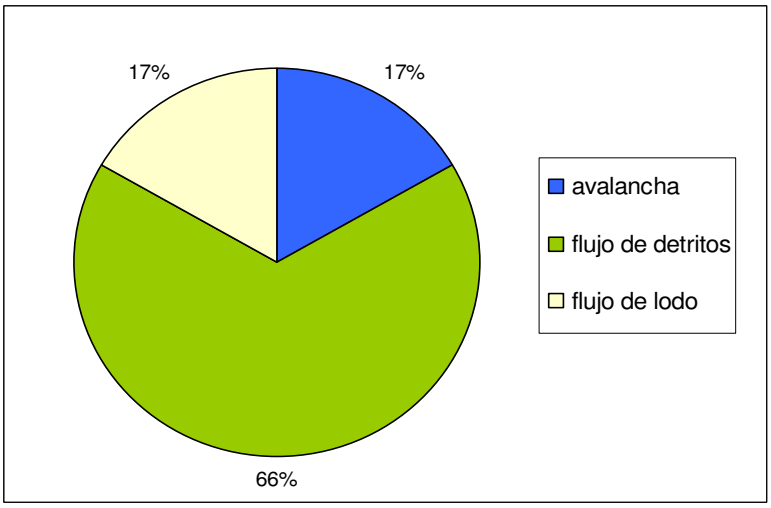

Figura 19. Porcentaje del número de flujos.

Respecto a la litología, se puede observar que existe un mayor porcentaje del número de movimientos de ladera en los depósitos volcánicos de la secuencia Chilete (1 y 2) y Volcánico Huayquisongo (secuencia 1), siendo la formación Cajamarca la unidad geológica con mayor porcentaje de movimientos de ladera en rocas sedimentarias. (Figura 20).

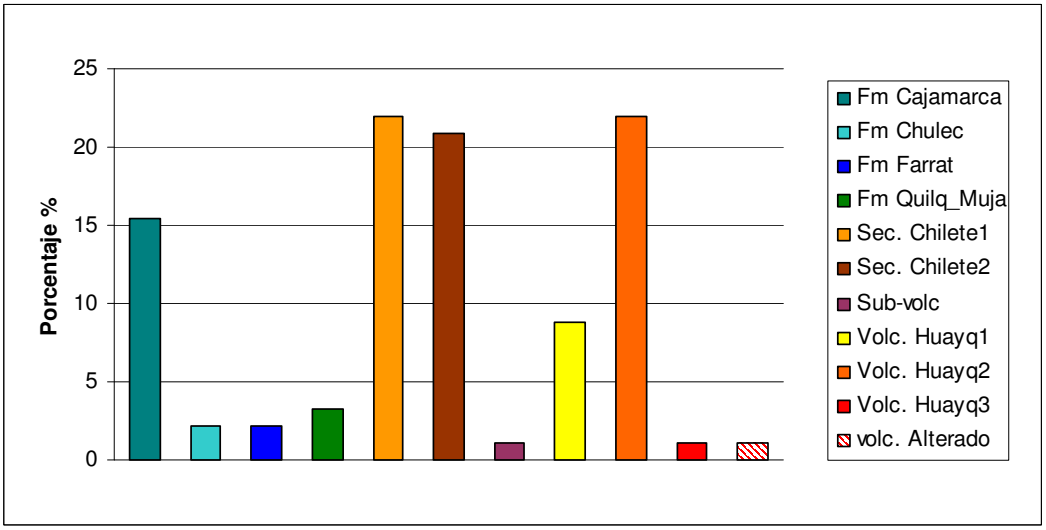

Figura 20. Porcentaje del número de movimientos de ladera respecto a las unidades geológicas.

Sin embargo, observando la variación del porcentaje de movimientos de ladera con respecto a las unidades litológicas, se puede notar que existe un mayor porcentaje en la unidad RV3 (Volcánico Huayquisongo, secuencia 1, Chilete segundo evento y Secuencia El Suro) con el 26 % del número total de fenómenos inventariados;

seguidos por un 20 % correspondiente a la unidad DS1 (depósitos aluviales) y siguiendo las unidades RV5 (Volcánico Huayquisongo, secuencias 2 y 3) y RS4 (formaciones Cajamarca, Chulec, Pariatambo y Yumagual) ambas con 17 % (figura 21).

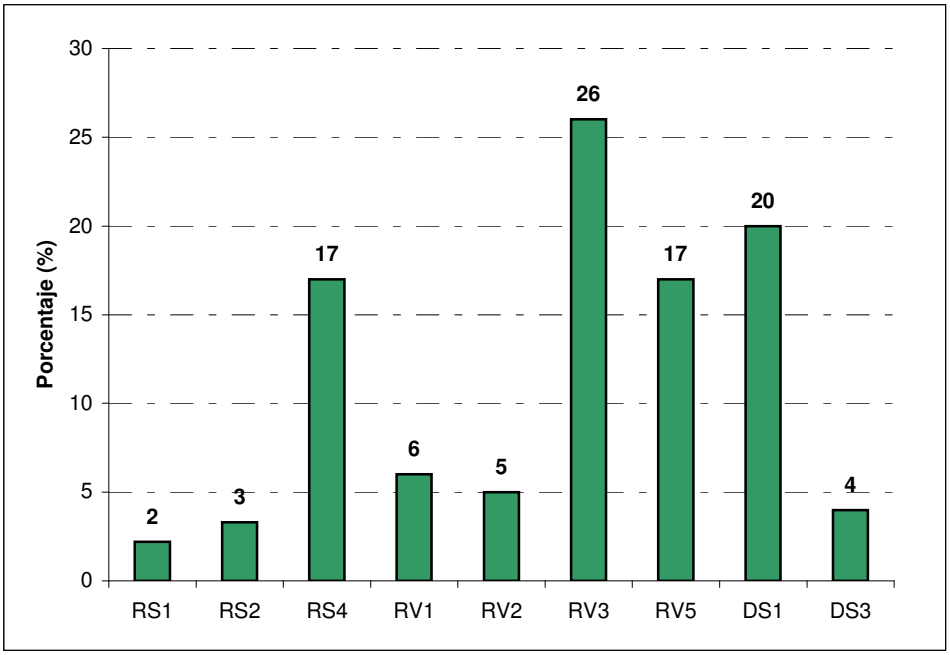

Figura 21. Porcentaje del número de movimientos de ladera respecto a las unidades litológicas.

– Respecto a los aspectos morfométricos (pendientes), se observo un mayor porcentaje de movimientos de ladera en pendientes medias (entre 20 y 40º), seguidas de pendientes bajas (10 a 20º), altas (40 a 60º) y muy altas (> 60º); siendo mucho menos abundantes en pendientes muy bajas (0 a 10º) (figura 22).

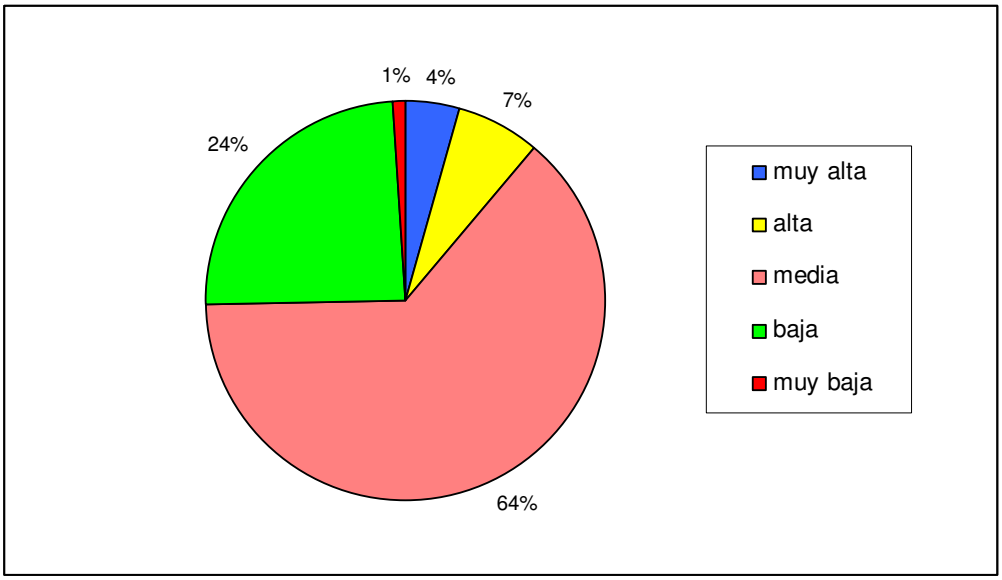

Figura 22. Porcentaje del número de movimientos de ladera según la pendiente del terreno.

- En lo que se refiere a los aspectos hidrogeológicos, en el área de estudio los mayores porcentajes en número de movimientos de ladera se han registrados en unidades del tipo acuitardo volcánico (52 %); acuitardo semiconsolidado (21 %) y acuífero kárstico (15 %, figura 23).

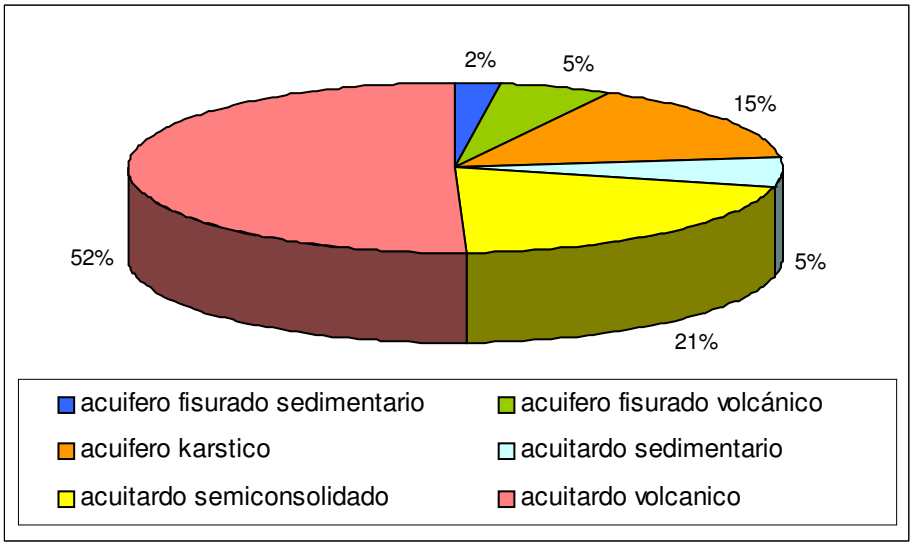

Figura 23. Porcentaje del número de movimientos de ladera según el tipo de acuífero.

3.1.2 Base de datos espaciales

Las bases de datos espaciales han sido una adaptación de la ficha de inventario a los SIG. Se obtuvo data espacial de las siguientes variables: tipo de movimientos observados, grupos litológicos, aspectos morfométricos (pendientes), hidrogeología y geotecnia; y se prepararon bases de datos adjuntas destinadas al análisis de la susceptibilidad. Respecto al tipo de movimientos, se identificaron 91 movimientos de ladera (consultar en version digital).

3.1.3 Mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera

De acuerdo al mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera, se puede decir que la mayor parte del territorio de la cuenca presenta una susceptibilidad baja a media. Las zonas con grado de susceptibilidad alta a muy alta corresponden a terrenos que presentan una pendiente fuerte a muy fuerte y están en las márgenes de las quebradas tributarias principalmente en la cuenca media.

Las zonas donde el material es de mala calidad como es el caso de los volcánicos de las unidades RV3 y RV4, presentan una susceptibilidad media a alta. La razón de que el

mayor número de movimientos de ladera registrados se presente en rocas volcánicas es que en la zona de estudio la mayoría de estas presentan niveles arcillosos.
Muchas de las zonas de rupturas coinciden con zonas de fracturación y zonas de contacto entre las litologías mencionadas o rocas alteradas hidrotermalmente; así como a depósitos de eventos anteriores.

Sobre los centros poblados más importantes, se ha observado que el centro poblado de San Bernardino, se encuentra en una zona de baja a media susceptibilidad mientras que San Pablo se localiza en un territorio con susceptibilidad media a alta. Adicionalmente se puede decir que el centro arqueológico de Kuntur Wasi se ubica en una zona de mediana susceptibilidad.

Según el mapa de susceptibilidad, las zonas con muy alta susceptibilidad son:

- Los cerros Calaquis y Llamadón, ubicados a 700 y 500 m al NE de la ciudad de San Pablo, por su fuerte pendiente y porque en sus faldas se tienen depósitos de deslizamientos muy antiguos sobre un substrato volcánico constituido por tobas con algunos niveles de lavas andesíticas intercaladas con sedimentos arcillosos fácilmente erosionable (tobas).

- El cerro Callancas por su fuerte pendiente y alto fracturamiento de las calizas, en este sector. Afecta la trocha carrozable San Pablo-Iglesiapampa-Pozo Seco, acceso alterno a la ciudad de Cajamarca.

- La zona ubicada al norte de Santa Ana, ladera sur del cerro Casahocro, porque constituye la escarpa de un deslizamientos muy antiguo. Tiene una fuerte pendiente y el substrato esta constituido por una gruesa secuencia de tobas que en la zona se encuentran fracturadas.

- La parte alta del sector Pueblo Libre El Naranjo, flanco oeste del cerro Sujllasta, límite este de la cuenca. Este sector constituye la escarpa de un antiguo depósito de remoción y posee una fuerte pendiente.
- La zona ubicada a 1 km al sur de la mina Paredones, en ambas márgenes de la quebrada Llaminchan. En esta zona el substrato está constituido por lavas

andesíticas que se encuentran intensamente fracturadas y falladas. Al hacer los cortes de carretera se produjeron derrumbes y desprendimientos. Puede afectar la carretera afirmada Chilete – San Bernardino.

3.1.4 Contribución a la prevención en la región

Los resultados del presente estudio, serán presentados a las autoridades y población de la región Cajamarca como parte del "Estudio Geoambiental de la cuenca Jequetepeque", trabajo ejecutado por el INGEMMET (Vílchez y otros, inédito) como información geocientífica que contribuirá en planificación territorial y en la elaboración de planes de acción para el tratamiento de áreas afectadas en la cuenca. Para ello se ha preparado un mapa póster a escala 1/25,000 que se entragará en versión papel (1 ejemplar) a los representantes de la provincia. Se tendrá el documento original en versión digital en la base de datos de la Dirección de Geología Ambiental del INGEMMET para cuando se requiera más copias. Cabe resaltar que a travéz del INGEMMET ser realizará un taller dirigido a la población en general en el distrito de San Pablo capital de la provincia que alberga el territorio de la cuenca Llaminchán. Asimismo esta metodología será puesta a disposición del INGEMMET para compararla con los métodos aplicados a la actualidad y distinguir cual se adecua mejor a las condiciones de sitio de los próximos estudios sobre cuencas hidrográficas a realizarse a nivel nacional.

3.2 CONCLUSIONES

- El inventario y cartografiado de movimientos de ladera son herramientas que proveen de información confiable a los modelos de susceptibilidad a dichos fenómenos.
- El método usado es ventajoso debido a su fácil uso, breve tiempo en el procesamiento de datos espaciales y porque es costo-eficiente.
- La elaboración de una matriz de susceptibilidad es de mucha utilidad para ponderar las relaciones existentes entre unidades litológicas y rangos de pendientes.
- Las bases de datos estandarizadas permiten optimizar el análisis de la susceptibilidad por movimientos de ladera mediante SIG.
- La susceptibilidad a los movimientos de ladera en la cuenca Llaminchán, está relacionada directamente a las pendientes y litología de la zona.

- Las zonas con más alta susceptibilidad se encuentran al noreste de la ciudad de San Pablo (Cerros Llamadón y Calaquis), el flanco sur del Cerro Callancas, el sector norte del poblado Santa Ana, la parte alta del sector Pueblo Libre-El Naranjo (Ladera oeste del cerro Sojllasta) y la zona comprendida entre Chilete y la mina Paredones (laderas en ambas márgenes del río Llaminchán).

3.3 RECOMENDACIONES

- Para mejorar las ponderaciones Pendiente vs. Litología y reducir la subjetividad, es necesario consultar la opinión independiente de otros expertos.
- Para optimizar el resultado de susceptibilidad se recomienda trabajar con geología y topografía con mayor detalle aunque la escala de presentación sea menor.
- Los encargados del análisis de susceptibilidad a los movimientos de ladera, deben ser geólogos especialistas en la materia, con amplio criterio geológico y que dominen software SIG.
- Para planificar la expansión urbana de los centros poblados de San Pablo, deberá tomarse en cuenta el criterio de susceptibilidad y observar las zonas de alta a muy alta susceptibilidad a los movimientos de ladera.
- Se recomienda hacer un estudio local de estabilidad de taludes en los cerros Llamadón y Calaquis, que se encuentran en los alrededores de la ciudad de San Pablo, pues según el mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera esas zonas son de alta a muy alta susceptibilidad.
- Se recomienda evitar ubicar viviendas en los cauces de las quebradas cercanas al centro poblado de San Bernardino.
- Se recomienda efectuar un estudio de la peligrosidad en la zona comprendida entre Chilete y la mina Paredones, considerando además de los parámetros descritos en este estudio, la precipitación y sismicidad por ser ésta un área de susceptibilidad a los movimientos de ladera alta a muy alta y porque afecta una de las vías de acceso principales de la cuenca.

REFERENCIAS

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, V. MENDOZA D. (2002), Aproximación a un Modelo de Susceptibilidad a Movimientos de Masa en el Eje Cafetero, Tesis de grado de Ing. Topográfica, Universidad del Valle. Colombia. 214 pp.

AYALA-CARCEDO, F.; OLCINA, J. (2002). Riesgos Naturales. Editorial Ariel, colección Ciencia, Barcelona, 1304 pp.

BAEZA, (1994). Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica. Universidad Politécnica de Cataluña.

BODOQUE, J., Y OTROS (2005). Resúmenes del VI Congreso Nacional de Geomorfología de España. Sociedad Geológica de España. Santiago de Compostela. España.

BRUNSDEN, D., DOORNKAMP, J., FOOKES, P., JONES, D., KELLY, J. (1975). Large scale geomorphological mapping and highway engineering design. Quart. Journ. Engn. Geol., Vol. 8. Pág. 227-253.

CARRARA, A. (1992). Landslide hazard assessment. Resúmenes 1er Simposium internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica para el estudio de Riesgos Naturales, Bogotá, Colombia, Pág. 329-335.

CARRARA, A., CARDNALI, M., GUZZETTI, F., REICHENBACH, P. (1995). GIS technology in mapping landslide hazard. En: CARRARA, A., GUZETTI, F. (Eds) Netherlands, Pág. 135-175.

CASTILLO, R. (1978) Geología de la Mina “Paredones”: Chilete. Soc. Geol. Del Perú Bol.62 parte III. Pag.253-268. Lima-Perú

CLARKE, K. (1990). Getting Started With Geographic Information Systems. Prentice Hall Series in Geographic Information Science. 1997. 353 p.

COROMINAS, D; GARCÍA-YAGÜÉ, A. (1997). Terminología de los movimientos de laderas. En: IV Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables. Granada, España, págs. 1051 – 1072.

CROZIER, M. (1986). Landslides. Causes, consequences and environment. Ed. Routledge. London y New York. 252 pp.

CRUDEN, M, VARNES, J. (1996). Landslide Types and Processes. En: Turner, A.K. y Schuster, R.L., 1996: Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247.

Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C. 675 p.p.

DAVIS, S., De WIEST, R. (1971). Hidrogeología. Ed. Ariel. Barcelona, España. 563 p.

ENRÍQUEZ, J., RODRIGUEZ, O., RODRIGUEZ, R. (2006). Características estructurales y estratigráficas de los yacimientos epitermales de baja sulfuración en el corredor estructural San Pablo – Porculla. XIII Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos

FIDEL, L.; OLIVARES, P. (1994) Estudio geodinámico de la cuenca del río Jequetepeque. Boletín INGEMMET, Serie C. Nº 10. Lima.

GARCÍA-YAGÜE, A.; GARCÍA-ÁLVARES, J. (1988). Grandes deslizamientos españoles. En: 2do Simposio sobre Taludes y Laderas inestables. Andorra la Vella, España.

GONZÁLEZ-JIMÉNEZ, A. (2006). Modelos de susceptibilidad a los movimientos de ladera: estado actual del conocimiento y revisión de los modelos del Sistema Central Español (Valle del Jerte). Tesina-DEA. Departamento de Geodinámica. Facultad de Geología. Universidad Complutense de Madrid (UCM), Madrid, 136 pp.

HANSEN, A., FRANK, C. (1991). Characterization and mapping of earthquake triggered landslides for seismic zonation. Resúmenes IV Conferencia Internacional de Zonación Sísmica. Standford, California. Páginas 149-195.

ISDR (2004). Living with risk: A global review of disaster reduction initiatives. Ginebra-Suiza.

INSTITUTO NACIONAL DE LOS RECURSOS NATURALES - PROYECTO ESPECIAL JEQUETEPEQUE-ZAÑA (2004) "Plan de ordenamiento, manejo ambiental y desarrollo social en la cuenca media y alta del río Jequetepeque para la protección del embalse Gallito Ciego". 3 vol. Lima.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (2005). Censos Nacionales 2005: X de Población y V de vivienda. Disponible en: http://www.inei.gob.pe/home1.asp [Consulta: 04 de enero de 2007].

JARAMILLO, M. GONZALES, M. HUNGR, O. FIDEL, L. (2006). Tipos de Movimientos en Masa – Clasificaciones. En: Natural Resources Canada (2006). Movimientos en Masa en la región Andina. Una Guía para la Evaluación de Amenazas. Ontario, Canada.

LAÍN, L. LLORENTE, M DÍEZ, A. RUBIO, J. MALDONADO, A. GALERA, J. ARRIBAS, J. (2005) Mapas de peligrosidad geológica en el termino municipal de Albuñol. Publicación IGME (inédito) (Granada).162 pp.

MEDINA, J (1991). Fenómenos Geodinámicos. Estudio y Medidas de Tratamiento. Tecnología Intermedia. Publicación ITGD. Perú. 87 p.

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (2005). Mapa de Líneas de Transmisión Eléctrica. Disponible en: http://www.minemgob.pe/archivos/dge/mapas/lineasdetransmision.pdf [Consulta: 02 de enero de 2007].

MORA, C. VAHRSON, W. (1993). Determinación a Priori de la Amenaza de Deslizamientos Utilizando Indicadores Morfodinámicos. Rev. Tecnología ICE, Vol.3, No.1. 32 – 42 p.

NAVARRO, P., MONGE, R. y FLORES, C. (2006). Volcanismo Cenozoico (Grupo Calipuy) y su Asociación con los Yacimientos Epitermales, de la Región Norte del Perú. INGEMMET. Lima. Inédito

NÚÑEZ, S. MEDINA, L. (2007). Peligros geológicos ocurridos el 21 de enero en el distrito de San Ramón (Provincia de Chanchamayo, Departamento de Junín). Informe técnico Dirección de Geología ambiental – INGEMMET. 34 p.

OFICINA NACIONAL DE EVALUACIÓN DE RECURSOS NATURALES (1988). Plan de ordenamiento Ambiental de la cuenca del río Jequetepeque para la protección del reservorio Gallito Ciego y del valle agrícola. Lima. 313 paginas.

PEÑA, F., VARGAS, V. (2007). Estudio Hidrogeológico de la cuenca Jequetepeque. INGEMMET. Lima. Inédito

REYES, L. (1980). "Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba". Ed. INGEMMET. Lima. 70 pp.

REYES, K. (2000). San Pablo de Cajamarca. Página web del Distrito de San Pablo. Disponible en: http://www.geocities.com/sanpablowebpe/princ_esp.html [Consulta: 08 de diciembre de 2006].

SANTACANA, N. (2001). Análisis e la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica. Aplicación a la cuenca alta del rio Llobregat. Tesis doctoral Univ. Politécnica de Catalunya.

SANTAMARÍA J. y SANZ, T. (2005). Manual de prácticas de topografía y cartografía. Univ. De la Rioja. Servicio de Publicaciones. 115 pp. ISBN 84-689-4103-4.BAS 22

SHARPE, C. 1938. “Landslides and related phenomena”. New Jersey. Pageant Books Inc.

SMITH, K. (2001). Environmental Hazards: Assessing risk and reducing disaster. Routledge, London. 3ra Ed.

SOETERS, R. WESTEN, C. (1996). Slope instability recognition, analysis, and zonation, Landslides Investigation and Mitigation, Special Report 247, Transportation Research Board, National Academy Press, 129-173.

SUÁREZ, J.(1998). Deslizamientos y Estabilidad de Laderas en Zonas Tropicales. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos Ltda.

VARGAS, V. (2007). Caracterización hidrogeológica de la cuenca del río Jequetepeque, regiones de Cajamarca-La Libertad. Tesis de grado. Ingeniería Geológica. Universidad nacional de Cajamarca. Cajamarca-Perú.

VARNES, J.(1978), Slope movement types and processes, in Schuster, R.L., and Krizek, R.J., eds., Landslides: analysis and control: Washington, D.C., National Academy of Sciences, Transportation Research Board Special Report 176, p. 12-33.

VARNES, J. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. En: Natural Hazards. No. 3, UNESCO, Paris, 63 pp.

VÁSQUEZ la Crúz, J. (1997). "Análisis de vulnerabilidad del Proyecto Especial Jequetepeque - Zaña a los peligros naturales". Tesis Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, 144 pp.

VÍLCHEZ, M., VILLACORTA, S., CHIRA, J., PEÑA, F., PARI, W. (2007). "Estudio Geoambiental de la cuenca Jequetepeque". INGEMMET. Inédito. Lima.

ANEXOS

5 ANEXOS

ANEXO I. GLOSARIO

ANEXO II. FICHA DE INVENTARIO

ANEXO III. RECLASIFICACIÓN DE LA MATRIZ DE SUSCEPTIBILIDAD EN ARCGIS

ANEXO IV. MAPA BASE

ANEXO V. MAPA DE PENDIENTES

ANEXO VI. MAPA GEOLÓGICO

ANEXO VII. MAPA LITOLÓGICO

ANEXO VIII. MAPA HIDROGEOLÓGICO

ANEXO IX. MAPA INVENTARIO Y PROCESOS SUPERFICIALES

ANEXO IX. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA

GLOSARIO

Se ha considerado pertinente mencionar en este apartado los conceptos más usados en estos tipos de trabajo.

Riesgo
Son las pérdidas esperadas que podrían producirse a consecuencia de que se produzca un evento peligroso. Para algunos autores son las pérdidas humanas y/o económicas que se darían cuando ocurriera un peligro que dañe infraestructura o interrupción de actividades, durante un periodo de tiempo específico (Varnes, 1984; Soeters y Van Westen, 1996; Ayala-Carcedo, 2002). Para otros autores se define en base a la probabilidad de que eventos peligrosos generen pérdidas de vidas humanas, propiedades, capacidad productiva, etc. en un área sujeta a peligrosidad (Smith, 2001).

Peligrosidad
Es la probabilidad de ocurrencia de eventos capaces de producir daños sobre un área específica. Algunos autores la definen en base a la severidad y probabilidad del proceso destructivo en un periodo de tiempo (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002). La severidad contempla la magnitud (volumen, área caudal) y la intensidad (duración) del evento.

Exposición
Son el grupo de elementos que se ven afectados por la ocurrencia de un evento peligroso. Varios autores coinciden en que los elementos expuestos pueden ser: población, propiedades, actividades económicas (Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002; González de Vallejo, 1988; Brabb y Harrod, 1989; Schuster, 1996; Evans, 1999; Guzzetti, 2000).

Vulnerabilidad
Para Ayala-Carcedo y Olcinas (2002) es el tanto por uno de la exposición que puede ser dañado por la acción de un peligro con una determinada severidad, es decir es la fragilidad intrínseca de un elemento ante la ocurrencia de un hipotético evento.

Susceptibilidad
Es la probabilidad relativa con que un terreno puede desarrollar fenómenos destructivos. Para algunos autores esta ocurre con base en las condiciones locales del terreno (Soeter y Van Westen, 1996; Ayala-Carcedo y Olcinas, 2002). Otros recalcan que en su análisis no se toma en cuenta el aspecto temporal de los fenómenos (Santacana, 2001).

ANEXO II

FICHA DE INVENTARIO

INGEMMET

INVENTARIO DE PELIGROS GEOLOGICOS EN PERU

FICHA DE INVENTARIO

I UBICACIÓN GEOGRAFICA

1 FICHA N°	2 LATITUD	3 LONGITUD	4 COTA	5 FRANJA N°	6 CUADRANGULO (IGN)
1					

7 REGION / DPTO.	8 PROVINCIA	9 DISTRITO	10 PARAJE / CASERIO / LUGAR

11 CUENCA HIDROGRAFICA	12 FECHA	13 EFECTUADO POR	14 FOTOGRAFIA (S)

II TIPOLOGIA

15 TIPO DE PELIGRO						16 NOMBRE ESPECIFICO	17 DENOMINACION
Caida	Vuelco	Flujo	Desplaz. lateral	Reptación			
Deslizamiento	Mov. Complejo	Otro Peligro Geológico					

III DESCRIPCIÓN

18 PROCESOS O CAUSAS NATURALES						19 ACTIVIDAD ANTRÓPICA	
FACTORES DE SITIO		DEL ENTORNO GEOGRAFICO				FACTORES ANTROPICOS	
Substrato de mala calidad (muy meteorizado)		Precipitaciones pluviales intensas (pluviosidad alta)				Excavaciones, Voladuras (cortes en el pie de ladera o talud)	
Alternancia de rocas de diferente competencia		Deshielo y/o retroceso glaciar				Sobrecargas (rellenos: en la corona de un talud)	
Rocas muy fracturadas o diaclasadas		Aguas subterráneas: infiltraciones / presión de poros				Ocupación inadecuado del suelo por el hombre (Áreas vulnerables)	
Orientación desfavorable de discontinuidades		Dinámica Fluvial (Socavamiento del pie de un talud)				Desembalse violento de presas o lagunas naturales	
Naturaleza del suelo (incompetente)		Colmatación del cauce fluvial (sedimentación)				Aprovechamiento de recursos hídricos	
Material de remoción antiguo, susceptible.		Dinámica marina (erosión de costas)		Dinámica eólica		Deforestación o sobrepastoreo de laderas	
Pendiente del terreno	Morfología	Actividad volcánica		Sismicidad y/o fallas activas		Mal sistema de riego; uso inadecuado de agua de escorrentía	
Ausencia o escasez de vegetación		Rotura de un dique morrénico		Otro factor:		Colapso de alguna estructura inducida por sismo	Activ. Minera
Otro factor:		Otro Peligro Geológico				Otro factor:	

20 EVIDENCIAS VISUALES DEL MOVIMIENTO EN MASA

DESLIZAMIENTO / DESLIZAMIENTOS COMPLEJOS

ESTILO	FORMA DE LA ESCARPA							
Escarpa única		Recta		Circular		Elongada		Continua
Escarpas sucesivas		Irregul.		Semicircular		Parabólica		Discontinua
Escarpas múltiples	DIMENSIONES	Longitud de escarpa (m)		Desnivel entre escarpa y pie (m)				
Enjambre de escarpas	SUPERFICIE	Plana		Saltos	Principal (m)			
Reactivación		Rotacional			Secundar. (m)			
Asentamientos	VELOCIDAD DEL MOVIMIENTO	Extr. Rápido		Muy Rápido		Rápido		Moderado
Desviación de cauce y/o embalse		Lento		Muy Lento		Extr. Lento		
	DISTRIBUCIÓN O ACTIVIDAD	Retrogresivo		Progresivo				
		Ensanchándose		Confinado				
	Agrietamientos	Longitudinal		Long. (m)		Prof. (m)		Separac.(m)
		Transversal						
	Depósito de flujo	Distancia recorrida (m)		Longitud de embalse (m)		Altura embalse (m)		
		Volumen de material desilzado (m3)						

DERRUMBES O COLAPSOS / CAIDA DE ROCAS / VUELCOS

ARRANQUE	Tipo de rotura				Taludes			
Talud rocoso fracturado	Cuña	Planar	Vuelco	Mixto	Ladera		Acantilado	Corte artificial
	Forma de zona de arranque				DIMENSIONES DEL DEPÓSITO			
(Roca /suelo)	Regular	Irregular	Continua	Discont.	Longitud de arranque(m):			
					Altura (m)			
Sedimento	CARACTERÍSTICAS DEL DEPÓSITO				EFECTOS PRINCIPALES			
Acumulación de bloques en la ladera	Bloques aislados		Tamaño bloques (		Enterramiento de viviendas (N°)			
					Derrumbe de tierras (m2):			
	Canchales o talus de detritos				Obstrucción de cauce (m):			
					Obstrucción de vía (m):			

FLUJOS (De detritos, de lodo, avalancha de rocas, avalancha de detritos)

DEPOSITO	MATERIAL	Grueso >50%		Fino >50%		Homog.		Heterog.
Cono/abanico	TAMAÑO DE CLASTOS				EFECTOS PRINCIPALES			
Escombrera	Bloq/Bol(%)	Gr (%)	Ar/Lim (%)		Obstrucción de vía (m):			
Chorreras					Erosión de cauce (m):			
Dimensiones del depósito de flujo	Área	Altura	Volumen		Enterramiento de viviendas (N°)			
					Erosión de Puente:			
Distancia recorrida del flujo (m)	Run up				Embalse de cauce (m)			
					Erosión de tierras de cultivo:			
FLUJO DE MATERIAL	Canalizado		No canalizado		Otra:			

ALUD O AVALANCHA DE NIEVE-HIELO / AVALANCHA DE DETRITOS

Agrietamientos en el glaciar		Rompimiento de dique morrénico		Huellas de flujo violento en las paredes del cauce (m)	Distancia recorrida (m)
Avalancha de nieve y/o roca		Ruptura de dique o embalse de un río, producido por un derrumbe o deslizamiento			Volumen (m3)

ARENAMIENTO

Características	Dunas aisladas	Campo de dunas	Dep. eólicos	Médanos
Efectos o daños principales	Áreas de cultivo		Áreas urbanas	Invasión de vías
Extensión o área afectada				

INUNDACIONES

AREA SUSCEPTIBLE A INUNDACION						EXTENSIÓN (m^2)
Llanura inundable		Circunlacustre		Litoral		
Terraza baja		Depresión topográfica		Otra área		ALTURA DE AGUA ALCANZADA (m):
ZONA INUNDADA O INUNDABLE	Urbana / rural			Carretera o vía		
	Agrícola/pastos			Otra		
Altura de terraza (m)		Pendiente longitudinal del río				
Avenida normal		Avenida excepcional				
CURSO PRINCIPAL	Anastomosado		Meándrico		Rectilíneo	

REPTACIÓN

Ladera suave		Ladera abrupta		Avance cara libre a quebrada	
Desgarre de cobertura vegetal		Área afectada			
Saltos y discontinuidades pequeñas en la ladera					
Saturación y remoción de suelo superficial					
Zonas involucradas	Pastizales	Cultivos	Bofedales	Corte artificial	Área urbana

HUNDIMIENTO O SUBSIDENCIA

Galerías de mina	Área urbana		Tierra de cultivo		Área cárstica/dolinas
Dimensiones del área afectada					

EROSION DE LADERAS

Tipo de erosión	Cárcavas	Surcos	Laminar	Bad lands
Dimensiones del área afectada	Longitud	Prof (m)	Área	
Terrenos dañados	Cultivos	Pastizales	Obras civiles	Área urbana

EROSION FLUVIAL O DE RIBERAS

Socavamiento o erosión en el pie de ladera		Estrangulamiento de río o meandro			
Longitud erosionada (m)		Ambas márgenes	SI		No
Área afectada	Terraza	Terraplén	Estructura	Urbana	Agrícola

21 MOVIMIENTOS EN MASA ANTIGUOS (RECONOCIDOS O INFERIDOS)

Tipo	Deslizamiento	Flujo de detritos	Avalancha de detritos	Movimiento complejo
DIMENSIONES PRINCIPALES	Longitud de escarpa antigua (m):	Salto visible (m)	Desnivel entre escarpa y pie de (m)	
Estado del movimiento en masa antiguo	Estabilizado		Reactivado	
Superficie cóncavo-convexa identificada en la carta topográfica				
Bloques de roca aislados o material de remoción identificable				

CARACTERÍSTICAS DE EMBALSES O REPRESAMIENTOS ANTIGUOS

Desviación de curso fluvial		Laguna o embalse natural	
Cono proluvial antiguo con vegetación más joven		Área:	
Valle de Represamiento con modificación de pendiente del río			
Canchales cubiertos con vegetación	Área:	Restos de pueblo sepultado	
Depósitos aluviales extensos en valle con poca dinámica actual			
Abanicos aluviales extensos en la desembocadura de ríos o quebrada			
Depósito coluvial antiguo con gran granulometría			

Dimensiones del depósito antiguo	Área (m2)	Altura embalse (m)	Long. Embalse
Tipo represamiento (Según Costa & Schuster, 1988)			

OTRAS CARACTERISTICAS ENCONTRADAS:

OTROS PROCESOS GEOLÓGICOS ANTIGUOS IDENTIFICADOS

Áreas cársticas desarrolladas		Dunas o campo de dunas fósiles	
Vestigios de cursos de agua o meandros abandonados			
Otro:			

25 EDAD ESTIMADA DEL FENOMENO

Activo		Inactivo-Joven		Inactivo-maduro		Viejo	

CLASIFICACION Y ESTADO DE LA ACTIVIDAD	Activo		Latente
	Reactivado		

Estabilizado		Alta		Baja		Media	

EDAD	Sin registro histórico (>500 años)		Reciente (20 a 100 años)	
	Antiguo (<500 >100 años)		Actual < 20 años	

22 OCURRENCIA ACTUAL (d/m/a)

23 OCURRENCIAS ANTERIORES

24 RECURRENCIA DEL PELIGRO

Periódico		Ocasional		Excepcional	

IV ASPECTOS GEOMORFOLOGICOS E HIDROLOGICOS

26 ASPECTO GEOMORFOLÓGICO PRINCIPAL

VALLE		Fluvial		Glaciar		Cañón		Inundable		Represamie.	
LADERA		Lomada		Colina		Montaña		Monte isla		Volcán	
		Glaciar		Acantilado		Estructural		Depósito eólico			
		Detritos de vertiente		Escombrera o cancha		Morrena		Depósito de remoción			
PLANICIE		Terraza		Abanico		Meseta		LLanura		Playa	

27 PENDIENTE DEL TERRENO

Muy baja	Baja	Media	Fuerte	Muy fuerte	Abrupta
<5°	5-20°	20-35°	35-50°	50-70°	>70°

28 RED DE DRENAJE

Río Principal	
Río Tributario	
Qda/Río Secund.	

29 FORMA DEL TERRENO

Uniforme		Variable ( )		
		Escalonada		Cóncava
		Convexa		Mixta

30 PRESENCIA DE AGUAS SUBTERRANEAS

Filtraciones		Oconales		Bofedales	
CARACTER	Escasa		Permanente		Estacional

31 CUBIERTA VEGETAL Abundante | Escasa | Regular | Nula

32 TIPO DE VEGETACION Sembríos o cultivos | Pastos naturales | Arbustos

V ASPECTOS GEOLOGICO-ESTRUCTURALES Y GEOTÉCNICOS

33 LITOLOGIA DEL SUBSTRATO

Sedim.		Litología Predominante	
Volc-sed			
Volcanic.			
Intrusivo		Formación/Grupo	
Metam.		Unidad/Complejo	

34 DEPOSITOS SUPERFICIALES O SUELOS

Aluv.	Fluv.	Prol.	Col.	Del.	Eól.	Res	Lac.	Mar.	Flu-glac.	Glac.	Antro.

35 TIPO DE SUELO (% clastos)

Bloques	Bolon.	Grava	Arena	Limo	Arcilla

36 GRADO DE SATURACIÓN

Seco	P. Sat	Med.Sat.	Satur.

37 SUELOS GRANULARES (COMPACIDAD)

M.suelto		Suelto		Med. denso		Denso		Muy Denso

38 SUELOS COHESIVOS (CONSISTENCIA)

Muy Blando		Blando		Med. comp		Compacto		Muy Compact		Duro

39 ESPESOR (m)

40 ESTRUCTURAS Y DISCONTINUIDADES EN LAS ROCAS

Fallamiento				Plegamiento							
Fracturamiento		Diaclasamiento		Esquistosidad		Estratificación					
Planar	Cuña	Vuelco	Mixto	Favorable al talud	Desfavorable al talud	Horizontal					

41 INTENSIDAD DE FRACTURAMIENTO

F1	F2	F3	F4	F5

42 GRADO DE ALTERACION

A1	A2	A3	A4	A5	A6

VI DAÑOS OCASIONADOS ( ) O PROBABLES ( )

43 CARRETERA (Km)		44 CAMINO RURAL (Km)		45 VÍA FÉRREA (m)	
46 VIVIENDAS AFECTADAS		47 VIVIENDAS DESTRUIDAS		48 CULTIVOS O PASTIZALES (has)	
49 MUERTOS / DESAPARECIDOS		50 HERIDOS		48 DAMNIFICADOS	
52 CANAL (m)		53 PUENTE (m)		54 REDES DE ENERGIA (m)	
55 GASEODUCTO / OLEODUCTO (Km)		56 PATRIMONIO NATURAL O CULTURAL			
57 OTRA INFRAESTRUCTURA MAYOR					

58 CARACTERÍSTICAS DE LOS DAÑOS	Sin daños / no registrados	Leves	Moderados	Severos	Destrucción, total	Probables

VII CALIFICACION DE RIESGO

59 GRADO DEL PELIGRO	Bajo		Medio		Alto		Muy alto	
60 VULNERABILIDAD	Baja		Media		Alta		Muy alta	
61 RIESGO ESTIMADO								

VIII OTRAS OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

62 MEDIDAS U OBRAS DE PREVENCIÓN Y/O MITIGACION REALIZADAS	SI		NO		CUAL (ES)

DESCRIPCIÓN DE LAS MEDIDAS ADOPTADAS:

63 RECOMENDACIÓN DE OBRAS DE PREVENCIÓN:

CROQUIS (planta o perfil):

IX FUENTE DE INFORMACION (64)

TESIS UNIV.		BOL. TECNICO		REVISTA		INF. TECNICO		ART. PERIODISTICO		INFORM. CAMPO		FOTOINTERPRETAC.	

AUTOR (S):

TITULO ESTUDIO:

FECHA:

BLZC/DIRECCION DE GEOLOGÍA AMBIENTAL

ANEXO III

RECLASIFICACIÓN DE LA MATRIZ DE SUSCEPTIBILIDAD EN ARCGIS

Para la reclasificación de un mapa matricial, según una tabla ASCII, se siguen los siguientes pasos:

1. Crear una infotabla
Ir a *ArcCatalog* y abrir la carpeta elegida. Hacer click derecho: new, info. Crear los siguientes ítems:

FROM, TO, OUT, MAPPING

Donde FROM, TO y OUT son elementos de tipo número entero corto (integer) y MAPPING son elementos de tipo texto (carácter).

2. Crear un ASCII que contenga cuatro columnas separadas por comas, que contendrán, por ejemplo, lo siguiente:

1111,1111,1,'ValueToValue'
Significado:
el valor 1111 pasará a ser 1

'ValueToValue' es el método de reclasificación

3. Desde Inicio – *ArcGis*-ArcInfo Workstation, Abrir en la ventana de comandos "Arc" (figura 24) se escribe el comando Tables que nos das acceso al modulo de tablas.
Dentro del modulo tables teclear:
Select <nombre de la infotabla>
Add from <nombre del txt>

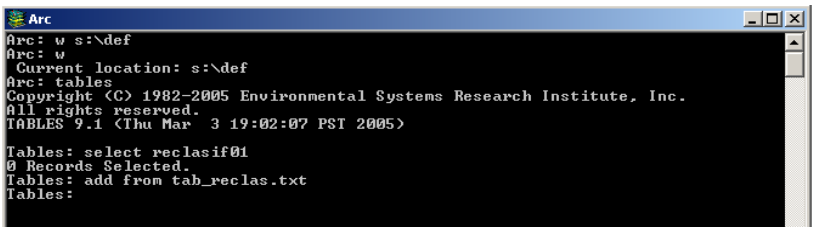

Figura 24. Ventana de comando ArcINFO donde se observa la secuencia de comandos seguida para la reclasificación del mapa matricial.

4. En ArcMap, ir a Análisis espacial (Spatial Analyst), ir a Reclasify, load <nombre de la infotabla.txt>

ANEXO IV

MAPA BASE

ANEXO V

MAPA DE PENDIENTES

ANEXO VI

MAPA GEOLÓGICO

ANEXO VII

MAPA LITOLÓGICO

ANEXO VIII

MAPA HIDROGEOLÓGICO

ANEXO IX

MAPA INVENTARIO Y PROCESOS SUPERFICIALES

ANEXO X

MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA