



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**EVALUACIÓN DE PELIGRO DE REMOCIONES EN MASA EN
QUEBRADA DE APOQUINDO, SECTOR ORIENTE DE SANTIAGO,
REGIÓN METROPOLITANA.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

PABLO ANDRÉS CEBALLOS GUTIÉRREZ

PROFESOR GUÍA:
MARISOL DEL PILAR LARA CASTILLO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

SANTIAGO DE CHILE

2016

RESUMEN DEL TRABAJO DE TÍTULO

Para optar al título de: Geólogo

Por: Pablo Andrés Ceballos Gutiérrez

Fecha: 4 de Agosto de 2016

Profesor guía: Marisol del Pilar Lara Castillo

EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE REMOCIONES EN MASA, EN QUEBRADA DE APOQUINDO, SECTOR ORIENTE DE SANTIAGO, REGIÓN METROPOLITANA.

El presente trabajo consiste en el análisis del peligro de remociones en masa, del tipo deslizamientos de suelo y roca, caídas de rocas y flujos de detritos, en la Quebrada de Apoquindo y sus alrededores, aplicando la metodología propuesta por Lara (2007).

La quebrada de Apoquindo, se ubica en el frente precordillerano del sector oriente de Santiago, Región Metropolitana. La geología de la zona está compuesta por lavas de la Formación Abanico, intrusivos dioríticos, y depósitos aluviales y coluviales. En las cercanías del área se encuentra la Falla San Ramón, la cual es una falla inversa, activa y con orientación predominante Norte-Sur, esta estructura es importante ya que podría ser un factor gatillante de remociones en masas.

La metodología propuesta es aplicada a escala de hoya hidrográfica y se divide en dos fases principales, la primera se enfoca en la evaluación de la susceptibilidad de la zona de estudio, mediante métodos de ponderación de factores condicionantes. La segunda fase comprende la evaluación del peligro de remociones en masa, basada en análisis cuantitativos, probabilísticos y cualitativos de estabilidad de laderas y análisis del alcance para cada remoción estudiada. Este análisis se realiza bajo diferentes escenarios climáticos, sísmicos y estáticos, dado el contexto precordillerano en que se encuentra la zona de estudio. Estos escenarios representan los probables agentes desencadenantes de las remociones en masa.

Los resultados de susceptibilidad muestran que la zona de estudio es susceptible a fenómenos de remociones en masa superficiales de tipo deslizamiento de suelo y caídas de roca, y en menor grado a mecanismos de tipo flujos y deslizamientos de rocas profundos.

Los análisis de peligro de remociones en masa muestran que la zona presenta mayormente peligro de procesos superficiales, de deslizamientos en bloque y caídas de rocas, principalmente en afloramientos ubicados hacia la cabecera de la quebrada principal, y en afloramientos locales en laderas de alta pendiente, con alcances al pie de laderas. El peligro de flujos de detritos se observa en las quebradas que bajan de las cabeceras de la hoya hidrográfica y en el cauce de la quebrada principal. En el caso de deslizamiento de suelos superficiales el mayor peligro se distribuye al sur de la quebrada principal, en laderas de orientación norte.

Agradecimientos

En este momento tan especial, donde al fin se cierra un ciclo muy importante en mi vida, quisiera agradecer inmensamente a mi familia. A mis cinco hermanos (Liliana, Rosario, Alejandro, Magdalena y Sebastián) que siempre me han apoyado y dado consejos. Pero en especial a mis queridos padres Alejandro y María Liliana personas ejemplares que siempre me han dado fuerzas y han confiado en mí. Pero lo más importante me han enseñado a nunca aflojar, siempre poner el hombro a adversidades y el que la sigue la consigue!

Quisiera agradecer a mi profesora guía Marisol Lara, que ha sido una ayuda fundamental en este proceso, siempre con muy buena disposición y paciencia para escuchar y responder todas mis dudas. Y sobre todo por aportarme con sus conocimientos. Muchas gracias profesora! También a mis profesores co-guias que con sus comentarios y alcances han hecho que aborde de buena manera este trabajo.

Por ultimo a mis amigos de Geo y sección, Chamita, Flowers, Vargas, mono, Chemy, Tuqui, Nacho Maureira, Pablo Valdenegro, mi pana Tomas León, Nicolás Poblete etc... Que me acompañaron en noches de estudios, carretes, conversas en fogatas de terrenos, siempre tirando buena onda y buena compañía. Gracias cabros!

Muchas gracias a todos por darme esa alegría, ánimo y ayudarme a no aflojar en toda mi estadía en esta universidad y lograr sacar esta carrera que me apasiona!

Va dedicado a mis padres, hermanos, sobrinos y amigos!

Tabla de Contenido

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introducción | 1 |
| 1.1 | Introducción..... | 1 |
| 1.2 | Ubicación y vías de acceso | 2 |
| 1.3 | Objetivos | 3 |
| 1.3.1 | Objetivo general..... | 3 |
| 1.3.2 | Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.4 | Metodología | 4 |
| 1.4.1 | Trabajo de gabinete..... | 4 |
| 1.4.2 | Trabajo de terreno | 5 |
| 2 | Marco conceptual | 5 |
| 2.1 | Introducción..... | 5 |
| 2.2 | Remociones en masa..... | 5 |
| 2.2.1 | Definición..... | 5 |
| 2.2.2 | Clasificación de remociones en masa | 5 |
| 2.3 | Factores condicionantes | 10 |
| 2.3.1 | Geología y geotecnia..... | 11 |
| 2.3.2 | Geomorfología | 11 |
| 2.3.3 | Hidrología e Hidrogeología | 12 |
| 2.3.4 | Vegetación..... | 12 |
| 2.3.5 | Clima | 13 |
| 2.3.6 | Actividad antrópica | 13 |
| 2.4 | Factores gatillantes de remociones en masa | 14 |
| 2.4.1 | Precipitaciones | 14 |
| 2.4.2 | Sismos..... | 15 |
| 3 | Metodología para la evaluación de peligro de remociones en masa | 15 |
| 3.1 | Introducción..... | 15 |
| 3.2 | Esquema general | 16 |
| 3.2.1 | Estudios preliminares de gabinete (G1)..... | 16 |
| 3.2.2 | Estudios en terreno, fase I (T1) | 17 |
| 3.2.3 | Trabajo de gabinete (G2)..... | 18 |
| 3.2.4 | Evaluación de probabilidad de falla (Trabajo de Gabinete G3) | 21 |
| 3.2.5 | Evaluación del alcance de la remoción en masa (Trabajo de Gabinete G4) | 24 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2.6 | Evaluación del Peligro Geológico (Trabajo de Gabinete G6) | 26 |
| 4 | Antecedentes del área de estudio | 27 |
| 4.1 | Introducción | 27 |
| 4.2 | Marco Geomorfológico y Geológico Regional | 27 |
| 4.2.1 | Marco Geomorfológico | 27 |
| 4.2.2 | Marco Geológico | 29 |
| 4.3 | Descripción local del área de estudio | 33 |
| 4.3.1 | Geomorfología | 33 |
| 4.3.2 | Geología | 37 |
| 4.3.3 | Estructuras | 47 |
| 4.3.4 | Vegetación | 49 |
| 4.3.5 | Clima | 50 |
| 4.3.6 | Sismicidad | 51 |
| 4.3.7 | Intervención Antrópica | 55 |
| 5 | Evaluación del peligro de remociones en masa | 57 |
| 5.1 | Introducción | 57 |
| 5.2 | Definición de unidades geomorfológicas | 57 |
| 5.3 | Cálculo de Índices de Susceptibilidad de remociones en masa | 58 |
| 5.3.1 | Deslizamiento de Suelo | 62 |
| 5.3.2 | Flujos de detritos | 63 |
| 5.3.3 | Caídas de rocas | 64 |
| 5.3.4 | Deslizamiento de rocas | 66 |
| 5.4 | Evaluación probabilidad de falla | 67 |
| 5.4.1 | Deslizamientos traslacionales de suelo (superficiales) | 67 |
| 5.4.2 | Deslizamiento de rocas | 68 |
| 5.4.3 | Caídas de rocas | 71 |
| 5.4.4 | Flujos de detritos | 71 |
| 5.5 | Evaluación del alcance de las remociones en masa | 72 |
| 5.5.1 | Deslizamientos de suelo traslacional (superficial) | 72 |
| 5.5.2 | Deslizamiento de rocas rotacionales profundos | 72 |
| 5.5.3 | Caídas de rocas | 72 |
| 5.5.4 | Flujos de detritos | 73 |
| 5.6 | Evaluación del peligro de remociones en masa | 75 |
| 6 | Discusiones | 81 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| 6.1 | Consideraciones para este estudio | 81 |
| 6.2 | Respecto a la metodología..... | 82 |
| 6.3 | Respecto a las áreas del peligro | 83 |
| 7 | Conclusiones | 86 |
| 8 | Bibliografía..... | 88 |
| ANEXOS | | 92 |
| 1 | Tablas de cálculo de índice de susceptibilidad..... | 92 |
| 2 | Evaluación probabilidad de falla (PF)..... | 100 |
| 2.1 | Probabilidad de falla para deslizamiento de rocas..... | 100 |
| 2.2 | Probabilidad de falla deslizamiento en bloque..... | 110 |
| 2.3 | Probabilidad de falla deslizamiento de suelos superficiales y flujos de detritos | 112 |
| 3 | Evaluación de alcance caída de rocas..... | 113 |
| 4 | Mapas peligro de remociones en masa..... | 147 |

Índice de Tablas

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabla 2.1. | Clasificación de remociones en masa (Varnes, 1978)..... | 6 |
| Tabla 2.2. | Escala de velocidad de remociones en masa (Cruden & Varnes, 1996) | 6 |
| Tabla 2.3. | Factores condicionantes relevantes para cada tipo de remoción en masa (Hauser, 1993)..... | 11 |
| Tabla 3.1. | Ponderación máxima de factores condicionantes de deslizamientos en suelo (Lara, 2007) | 19 |
| Tabla 3.2. | Ponderación máxima de factores condicionantes de deslizamientos en roca (Lara, 2007) | 20 |
| Tabla 3.3. | Ponderación máxima de factores condicionantes de caídas de rocas (Lara, 2007) | 20 |
| Tabla 3.4. | Ponderación máxima de factores condicionantes de flujos (Lara, 2007) | 21 |
| Tabla 3.5. | Relación entre probabilidad numérica y cualitativa para la evaluación del peligro geológico (Lara, 2007) | 22 |
| Tabla 3.6. | Relación entre probabilidad de generación de caídas y pendientes (Lara, 2007) | 24 |
| Tabla 3.7. | Relación entre probabilidad de alcance de deslizamiento y pendientes (Lara, 2007) | 25 |
| Tabla 3.8. | Relación entre probabilidad de alcance de caídas de rocas y pendientes (Lara, 2007) | 26 |
| Tabla 3.9. | Relación entre probabilidad de alcance de flujos y pendientes (Lara, 2007) ... | 26 |
| Tabla 3.10. | Matriz de combinación para definir el Grado de Peligro Global (Lara, 2007) . | 27 |
| Tabla 4.1. | Sets de discontinuidades en el área de estudio en la Formación Abanico | 48 |
| Tabla 4.2. | Sets de discontinuidades en el área de estudio en Intrusivo diorítico | 48 |
| Tabla 5.1. | Ponderación de factores condicionantes para caídas de rocas, modificado de Lara (2007), en rojo valor intermedio agregado para el factor de caídas de rocas declaradas | 58 |

| | |
|--|----|
| Tabla 5.2. Ponderación de factores condicionantes para deslizamiento de rocas, modificado de Lara (2007). | 59 |
| Tabla 5.3. Ponderación de factores condicionantes para flujos, modificado de Lara (2007). | 60 |
| Tabla 5.4. Ponderación de factores condicionantes para deslizamiento de suelo, modificado de Lara (2007). | 61 |
| Tabla 5.5. Unidades con $IS \geq 50$. Caso deslizamiento de suelo | 63 |
| Tabla 5.6. Unidades con $IS \geq 50$. Caso flujos de detritos | 64 |
| Tabla 5.7. Unidades con $IS \geq 50$. Caso caídas de rocas | 65 |
| Tabla 5.8. Unidades con $IS \geq 50$. Caso deslizamiento de rocas | 66 |
| Tabla 5.9. Parámetros geotécnicos para suelos superficiales y su desviación estándar | 67 |
| Tabla 5.10. Probabilidad de Falla y Factor de Seguridad para deslizamientos superficiales. | 68 |
| Tabla 5.11. Propiedades de roca para análisis de deslizamientos masivos | 69 |
| Tabla 5.12. Probabilidad de Falla y Factor de Seguridad para deslizamientos de roca rotacionales profundos. Bajo los diferentes escenarios | 70 |
| Tabla 5.13 Probabilidad de Falla y Factor de Seguridad para deslizamientos en bloque de roca. Bajo los diferentes escenarios | 71 |
| Tabla 5.14. Parámetros geotécnicos para flujos de detritos y su desviación estándar | 71 |
| Tabla 5.15. Probabilidad de Falla y Factor de Seguridad para flujos de detritos. Bajo los diferentes escenarios. | 72 |
| Tabla 5.16. Pendientes críticas de alcance para deslizamiento de suelo traslacionales. En los diferentes escenarios. | 72 |
| Tabla 5.17 Relación entre probabilidad numérica y cualitativa para evaluación de peligro gelogico | 74 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Área de estudio y sus alrededores, en negro zona de estudio y en rojo vías de acceso. Imagen satelital modificada de Google Earth en ArcGis 10 | 3 |
| Figura 2.1 Esquema de caídas de roca | 7 |
| Figura 2.2 Esquema deslizamiento de suelo, modificado de Int. Geotech. Soc. UNESCO, 1993 en Dikau et al., 1996 por Gonzales de Vallejos (2002) | 7 |
| Figura 2.3 Esquema de deslizamiento rotacional y sus partes; modificado de Varnes (1998) por Gonzales de Vallejos (2002) | 8 |
| Figura 2.4 Clasificación usada por el British Geology Service, modificada de Cruden & Varnes (1996) | 9 |
| Figura 3.1. A la derecha esquema de la metodología de Lara (2007); a la izquierda, estudios preliminares para la evaluación de peligros de remociones en masa (Lara, 2007). | 17 |
| Figura 4.1. Segmentación morfoestructural Andina entre 32° y 35° , basado en Charrier y Muñoz (1994); Tasara y Yañes (2003) y Giambiagi et al. (2008). En rojo área de estudio. | 29 |
| Figura 4.2. Mapa Geológico Regional (Fock, 2005) | 33 |
| Figura 4.3. Modelo digital, zona de estudio demarcada en rojo, se muestran principales quebradas y altos topográficos. Sistema de coordenadas UTM WGS-84 (zona 19S) | 34 |
| Figura 4.4. Distribución de pendientes de laderas en área de estudio. Elaboración propia, ArcGis 10. | 35 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.5. Distribución de aspecto (orientación de laderas). Elaboración propia, ArcGis 10. | 36 |
| Figura 4.6. Cauce principal de la hoya hidrográfica de la Quebrada de Apoquindo. | 37 |
| Figura 4.7. Afloramiento de la Formación Abanico..... | 38 |
| Figura 4.8. A la izquierda se observa caída de roca; a la derecha, macizo rocoso descrito, ambos corresponden a la Formación Abanico. | 39 |
| Figura 4.9. Macizo descrito, perteneciente al intrusivo diorítico..... | 40 |
| Figura 4.10. A la izquierda se observa caída de rocas en ladera; a la derecha, bloque de roca en quebrada principal, ambos corresponden al intrusivo diorítico. | 40 |
| Figura 4.11. Depósito aluvial-fluvial, a la derecha se aprecian bloques mayores. | 41 |
| Figura 4.12. Depósito de abanico aluvial. | 42 |
| Figura 4.13. Depósito coluvial, en zona de alta pendiente. | 42 |
| Figura 4.14. Escombros de falda. A la izquierda bloques de 0,5-1 m de diámetro, a la derecha matriz limo-arenosa..... | 43 |
| Figura 4.15. A la izquierda se observan caídas de rocas en ladera; a la derecha, deslizamiento de suelo superficial..... | 44 |
| Figura 4.16. Quebrada con aporte de material detrítico. | 44 |
| Figura 4.17. Depósito de flujo de detritos..... | 45 |
| Figura 5.1. Unidades geomorfológicas. Elaboración propia, ArcGis 10. | 57 |
| Figura 5.2. Mapa de susceptibilidad de deslizamiento de suelos, metodología Lara (2007), aplicada a escala 1:20000. | 62 |
| Figura 5.3. Mapa de susceptibilidad de Flujos, metodología Lara (2007), aplicada a escala 1:20000..... | 63 |
| Figura 5.4. Mapa de susceptibilidad de caídas de rocas, metodología Lara (2007), aplicada a escala 1:20.000. | 64 |
| Figura 5.5. Mapa de susceptibilidad de deslizamientos de rocas, metodología Lara (2007), aplicada a escala 1:20000. | 66 |
| Figura 5.6. Ejemplo de unidad geomorfológica 80 en SLIDE. | 69 |
| Figura 5.7. Ejemplo deslizamiento en cuña en SWEDGE. | 70 |
| Figura 5.8. Ejemplo alcance (en rojo) caída de roca en Rocfall. Unidad geomorfológica 62. | 73 |
| Figura 5.9. Vista al este. Zonificación de peligros de flujos de detritos (Antinao et al., 2003). En verde área de estudio..... | 74 |
| Figura 6.1. Relación IS y Peligro para deslizamiento de suelos superficiales. Caso estático con tormentas. | 84 |
| Figura 6.2. Relación IS vs Peligro para deslizamiento de rocas profundos. Caso sísmico con tormentas. | 85 |
| Figura 6.3. Relación IS vs Peligro. Flujos de detritos. Caso sísmico con tormentas..... | 86 |

1 Introducción

1.1 Introducción

Los fenómenos de remociones en masa están definidos como procesos de transporte de material, de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores (Hauser, 1993). Incluyen todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierra por efectos de la gravedad (Cruden, 1991).

En la literatura científica se encuentran muchas clasificaciones de movimientos en masa; la mayoría de ellas se basan en el tipo de materiales, los mecanismos de movimiento, el grado de deformación del material y el grado de saturación. Estos factores, junto con las características geológicas, geotécnicas y geomorfológicas del entorno, condicionan la potencial generación de remociones en masa, así como las velocidades de desplazamiento y el volumen de material desplazado.

Las clasificaciones de Varnes (1958,1978) y Hutchinson (1968,1988) son los sistemas más ampliamente aceptados en el mundo. Varnes (1958, 1978) emplea como criterio principal en la clasificación el tipo de movimiento y en segundo lugar, el tipo de material. Una nueva versión actualizada de la clasificación de Varnes divide los movimientos en masas en cinco tipos: caídas, toppling o volcamientos, deslizamientos, propagación, flujos y deformación de laderas (Hungry et al, 2013). Las clasificaciones también consideran el tipo de material en que se producen, pudiendo involucrar rocas y suelos, estos últimos subdivididos en detritos y tierra.

Es importante tener en cuenta que en la práctica es difícil asignar un movimiento en masa a una clase en particular, debido a que la mayoría de los procesos son bastante complejos y presentan diferentes comportamientos a lo largo de su trayectoria. Además hay factores externos que influyen en el tipo de movimiento, por ejemplo, si una determinada ladera pudiera fallar como deslizamiento traslacional en condiciones de humedad moderada, el mismo deslizamiento se puede transformar en una avalancha o un flujo de detritos en condiciones de mayor humedad, aumentando la longitud de su recorrido (Crozier y Glade, 2005).

Los principales factores condicionantes de remociones en masa son: la geomorfología de la zona (rasgos como la altura, extensión y pendiente de las laderas, y la topografía); geología y geotecnia (tipo de material involucrado y las estructuras presentes); hidrología e hidrogeología; clima y vegetación (factores como lluvia y humedad del área, entre otros) y finalmente intervenciones antrópicas que generen modificación en el medio.

Si bien es importante identificar los factores condicionantes, es de suma importancia identificar los factores que se encargan de desencadenarlo. Los principales factores desencadenantes son los sismos y lluvias intensas. Las condiciones geológicas, geomorfológicas y climáticas presentes en Chile, hacen que el país se vea constantemente afectado por remociones en masa. En la Región Metropolitana de Santiago, en Chile Central, estos procesos son comunes, en especial en el sector piedemonte, con presencia de centros urbanos y en la alta cordillera. En la zona de

estudio los fenómenos de movimientos de masa más comunes son deslizamientos, los que varían desde pequeños deslizamientos superficiales hasta mega deslizamientos antiguos; flujos de detritos (aluviones), los cuales pueden alcanzar las planicies formadas por abanicos aluviales de diversas quebradas que drenan el frente montañoso, sobre las que la urbanización se ha desarrollado sin medir catástrofes de peligros geológicos que afectan la zona. En la Región Metropolitana de Santiago se aprecia una importante expansión urbana, llegando a ocupar los faldeos precordilleranos para ser habitados, lo que hace que estos fenómenos constituyan una amenaza importante para la población. Además de los eventos históricos de remociones en masa ocurridos en las cercanías del área de estudio. Por esto es de suma importancia generar estudios que aporten a la comunidad.

En este contexto este trabajo tiene como objetivo realizar un análisis de susceptibilidad y posterior zonificación del peligro de remociones en masa, utilizando la metodología de Lara (2007). La zona está ubicada al nororiente de Santiago, específicamente en el sector precordillerano de la comuna de Las Condes.

El último evento histórico importante acontecido en la ciudad de Santiago es el gran aluvión del 3 de mayo de 1993, ocurrido en las quebradas de Macul y San Ramón. Donde flujos de detrito y barro fueron desencadenados por lluvias anormalmente intensas, afectando fuertemente a la población, causando 29 muertes y 9 desaparecidos, además de 5000 hogares dañados y 307 completamente destruidos (Sepúlveda et al., 2006).

1.2 Ubicación y vías de acceso

La zona de estudio se ubica en la precordillera al nororiente de la cuenca de Santiago, delimitada hacia el norte por el Río Mapocho y hacia el sur por la Quebrada Los Almendros, en la comuna de Las Condes. El área incluye la hoya hidrográfica de la Quebrada de Apoquindo o Quebrada Grande, la cual se ubica entre las coordenadas UTM (WGS-84 zona 19 sur) 35800 y 36500 Este, y 630700 y 630000 Norte.

Las vías de acceso al área de interés, por encontrarse en las cercanías de zonas urbanas, son bastantes y de fácil acceso. Como por ejemplo Av. Las Flores, que nos permite acceder al Parque San Carlos de Apoquindo, (perteneciente a la Asociación de Parques Cordillera) y a su vez internarnos en la Quebrada de Apoquindo para poder recorrer la zona a pie. Por otro lado, la calle Charles Hamilton la cual nos permite ver la zona norte del área. Si bien hay buenos accesos, existen zonas de acceso limitado por la presencia de importante vegetación y otras áreas por ser propiedades privadas.

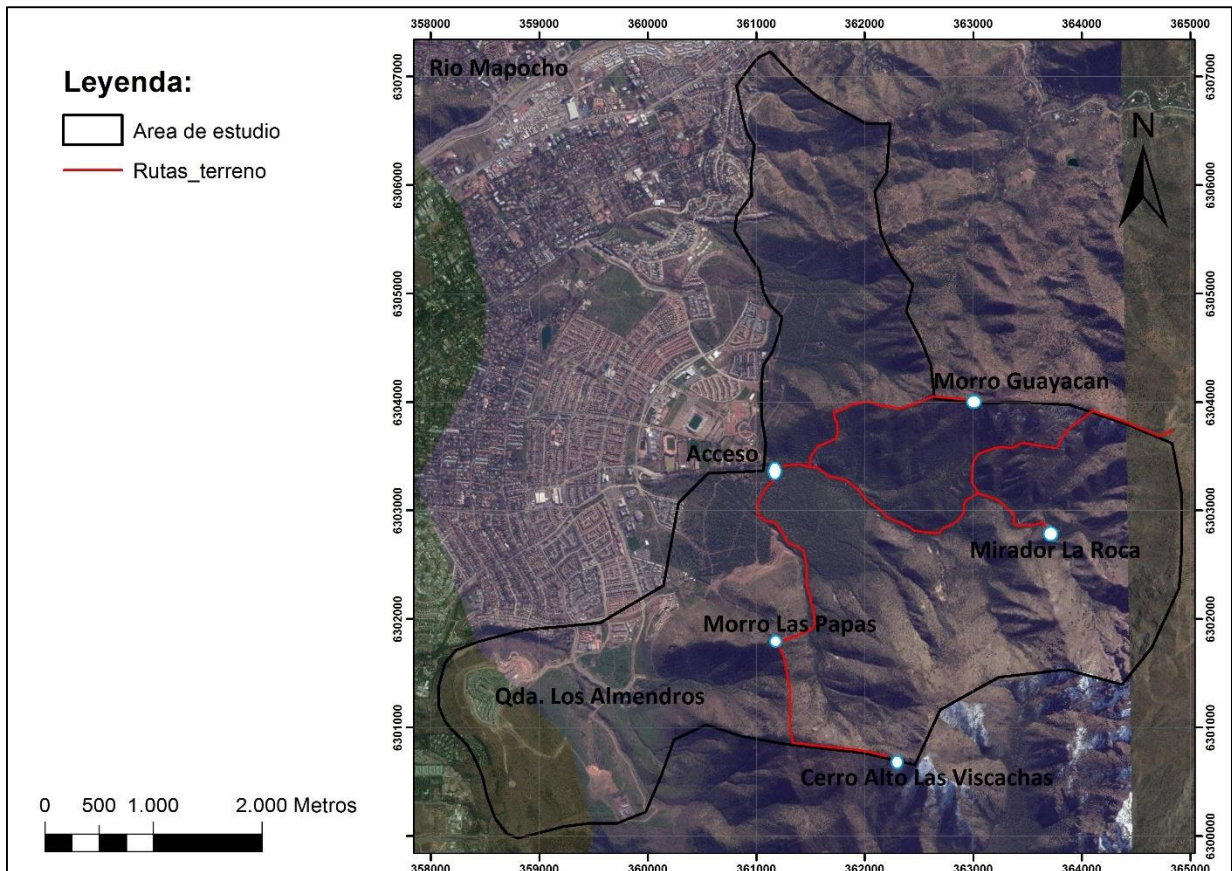


Figura 1.1 Área de estudio y sus alrededores, en negro zona de estudio y en rojo vías de acceso. Imagen satelital modificada de Google Earth en ArcGis 10

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la susceptibilidad y peligro de remociones en masa en la hoya hidrográfica Quebrada de Apoquindo, en el Sector Oriente de Santiago, Región Metropolitana. Aplicando metodologías semicuantitativas, que incorporan criterios geológicos, geomorfológicos y geotécnicos.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Identificar los eventos de remociones en masa declarados en la zona de estudio.
2. Realizar una caracterización geológica-geotécnica de suelos y rocas existentes en la zona de estudio.

3. Identificar y caracterizar los factores condicionantes, tales como; geología y geotecnia, geomorfología, hidrología, actividades antrópicas, vegetación y clima, y factores desencadenantes de potenciales eventos de remociones en masa en la zona.
4. Evaluar la susceptibilidad de remociones en masa, con la metodología de Lara 2007.
5. Evaluar la estabilidad de laderas y el alcance de potenciales remociones en masa.
6. Evaluar el peligro de remociones en masa, con la metodología de Lara 2007.
7. Realizar mapas temáticos de susceptibilidad y peligro de remociones en masa que permitan representar los datos y resultados obtenidos.

1.4 Metodología

Para evaluar el peligro de remociones en masa en el área se aplicará la metodología de Lara (2007), la cual se aplica a escala de hoja hidrográfica. A continuación se describe de forma general esta metodología, que consta de trabajo de gabinete, terreno y laboratorio. Este último no es parte de los alcances de esta memoria.

En el Capítulo 3 se presenta el detalle metodológico propuesto por Lara (2007), para el estudio de peligro de remociones en masas.

1.4.1 Trabajo de gabinete

- Revisión bibliográfica, de los siguientes aspectos importantes: caracterización de los distintos mecanismos de remociones en masa; elaboración de un marco geológico preliminar; recopilación de información de métodos de evaluación de susceptibilidad de ocurrencia de remociones en masa; mapeo de fotografías aéreas disponibles de Google Earth; caracterización de procesos geológicos de remociones en masa y análisis de vías de acceso para visita en terreno a la zona de estudio.
- Evaluación de la susceptibilidad a remociones en masa, a través de la metodología establecida por Lara (2007). El resultado de esta fase es la generación de mapas de susceptibilidad a escala 1:20.000, para cada uno de los tipos de remociones en masa estudiadas, con un índice de susceptibilidad (IS) comparable, el cual varía entre 0 y 100. Serán las unidades con un $IS \geq 50$, las que se consideraran para estudios posteriores de peligro geológico (Lara, 2007). Todo esto se realizara incorporando el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la cartografía y en el análisis de los datos.
- Evaluación de estabilidad de las laderas asociadas a unidades con $IS > 50$ mediante utilización de software (Swedge, Rocplane, Rocfall, Excel.) para la asignación de grados de peligro de remociones en masa. El resultado corresponde a mapas de peligro de remociones en masa escala 1:20.000.

1.4.2 Trabajo de terreno

Consiste en reconocer la geología de la zona de estudio, obtener datos geotécnicos de suelos y roca, identificar zonas inestables y potenciales de generación de remociones en masa. Todos estos puntos a escala de hoya hidrográfica.

2 Marco conceptual

2.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo definir los conceptos utilizados en el presente estudio. Posterior a la revisión bibliográfica de distintos autores, se hace una recopilación de los principales términos y procesos involucrados en remociones en masa y peligro.

2.2 Remociones en masa

2.2.1 Definición

El término remoción en masa ha sido definido por, Cruden & Varnes (1996), y actualizado por Hungr et al. (2013), como procesos de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca, o ambos, en diversas proporciones, generados por distintos factores, correspondiendo intrínsecamente a procesos gravitacionales, considerando que una porción específica del conjunto del terreno se desplaza hasta una cota o nivel inferior al original. Algunos movimientos en masa, como la reptación de suelos, son lentos, a veces imperceptibles y difusos, en tanto que otros, como algunos deslizamientos pueden desarrollar velocidades altas y pueden definirse con límites claros, determinados por superficies de rotura (Glade y Crozier, 2005).

2.2.2 Clasificación de remociones en masa

Las remociones en masa han sido clasificadas por autores Cruden & Varnes (1996), de acuerdo al tipo de movimiento y al material involucrado (Varnes, 1978) (Tabla 2.1). En este aspecto, los tipos de materiales, a partir de los cuales se pueden generar los distintos tipos de eventos, corresponden a roca y suelo; en tanto los tipos de movimientos que se pueden generar son desprendimientos (o caídas), *toppling* (o volcamientos), deslizamientos, extensiones laterales, y flujos (Figura 2.4). De manera simple, la combinación de estos términos dará el nombre a la remoción en masa, sin perder en consideración que pueden existir eventos combinados que le otorguen complejidad tanto al comportamiento del fenómeno como a la clasificación que se pretenda otorgarle.

A continuación se presentan los principales tipos de remociones en masa, con alguna información e ilustraciones esquemáticas.

Tabla 2.1. Clasificación de remociones en masa (Varnes, 1978)

| Tipo de movimiento | Tipo de material | |
|-----------------------|---|------|
| | | Roca |
| Caída | Grano grueso (detritos, <80% partículas <2mm) | |
| Toppling | | |
| Deslizamiento | Rotacional | |
| | Traslacional | |
| Extensiones laterales | | |
| Flujos | | |
| Complejos | | |

Los movimientos generados presentan diversas tasas de movimientos, que van desde extremadamente rápidos a extremadamente lentos. De manera de unificar estos términos, Cruden & Varnes (1996) asocian valores de tasa de movimiento con términos cualitativos de rapidez (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Escala de velocidad de remociones en masa (Cruden & Varnes, 1996)

| Clase según velocidad | Descripción | Velocidad [m/s] | Velocidad típica |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| 7 | Extremadamente rápido | 5 | 5 m/s |
| 6 | Muy rápido | 0,05 | 3 m/min |
| 5 | Rápido | 5×10^{-4} | 1,8 m/hr |
| 4 | Moderado | 5×10^{-6} | 13 m/mes |
| 3 | Lento | 5×10^{-8} | 1,6 m/año |
| 2 | Muy lento | 5×10^{-10} | 16 mm/año |
| 1 | Extremadamente lento | $< 5 \times 10^{-10}$ | <16 mm/año |

2.2.2.1 Caída de roca

Son movimientos abruptos de bloques independientes de roca, siendo sus causas principales la presencia de discontinuidades en el macizo rocoso. El material desprendido podrá alcanzar el pie del talud mediante caída libre, rodando y rebotando, lo que dependerá principalmente de la forma del bloque y del ángulo de pendiente del talud. Durante la caída, los materiales podrán adquirir una alta energía cinética, permitiéndoles abarcar una amplia área a los pies de la ladera, lo cual se acrecentaría si se suma una cantidad importante de material aportado (Varnes, 1978).

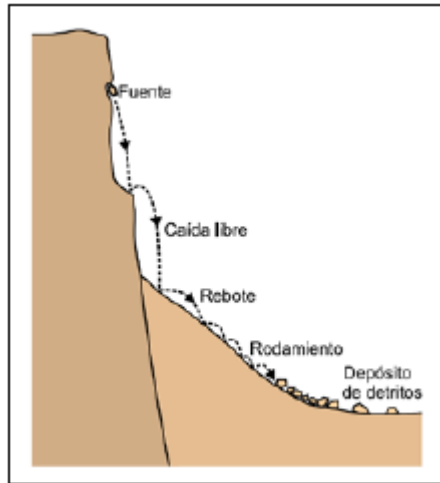


Figura 2.1 Esquema de caídas de roca

2.2.2.2 Deslizamientos

Los deslizamientos son movimientos de masas, de suelo o roca que deslizan, con respecto al sustrato, sobre una o más superficies de roturas al ser superada la resistencia de corte de estas superficies (Hauser 2000). Esta masa, generalmente, se desplaza en conjunto, comportándose como unidad en su recorrido; la velocidad puede ser muy variable, pero suelen ser procesos rápidos y alcanzar grandes volúmenes. Producto de la pérdida de resistencia, del contenido de agua o de la pendiente existente, la masa puede continuar deslizándose más allá del pie de la ladera, dando lugar a un flujo. La figura 2.2 presenta un esquema para la descripción de las características y dimensiones de deslizamientos.

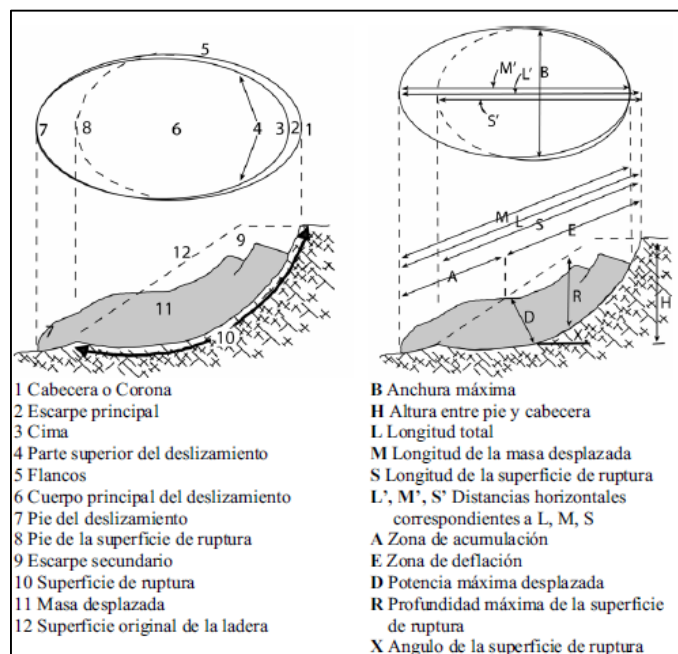


Figura 2.2 Esquema deslizamiento de suelo, modificado de Int. Geotech. Soc. UNESCO, 1993 en Dikau et al., 1996 por Gonzales de Vallejos (2002)

De acuerdo al mecanismo y tipo de ruptura pueden distinguirse deslizamientos rotacionales y traslacionales (Varnes 1978), los primeros más frecuentes en suelos cohesivos homogéneos, mientras que los segundos, ocurren en suelos más gruesos no cohesivos o superficies planas previamente debilitadas, tales como planos de estratificación, contacto entre diferentes tipos de materiales, superficie estructural e incluso finas capas de arcillas. (González de Vallejos et al. 2002)

En los deslizamientos rotacionales la rotura, que puede ser superficial o profunda, tiene lugar a favor de superficies curvas o en “forma de cuchara”. Una vez iniciada la inestabilidad, la masa comienza a rotar, pudiendo dividirse en varios bloques que deslizan entre sí y que dan lugar a “escalones”, con la superficie basculada hacia la ladera, y a grietas de tracción estriadas. La parte inferior de la masa deslizada se acumula al pie de la ladera formando un depósito en forma de lóbulo con grietas de tracción transversales. (Gonzalez de Vallejos et al. 2002). La figura 2.3 muestra un esquema de un deslizamiento rotacional y sus partes.

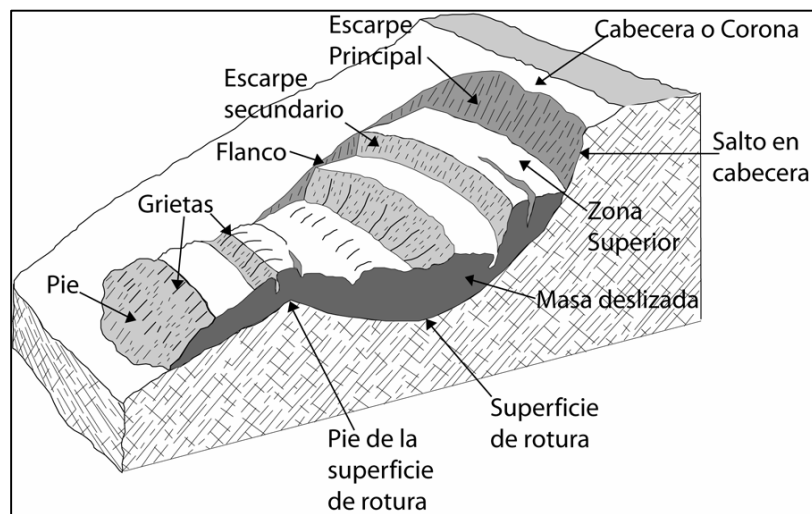


Figura 2.3 Esquema de deslizamiento rotacional y sus partes; modificado de Varnes (1998) por Gonzales de Vallejos (2002)

En los deslizamientos traslacionales la rotura tiene lugar a favor de las superficies planas de debilidad preexistentes, siendo extensos y alcanzando grandes distancias, aun cuando suelen no ser muy profundos. Las masas que deslizan, ya sea suelo o roca, en ocasiones son bloques rectangulares previamente independizados por discontinuidades o grietas.

2.2.2.3 Flujos de detritos

Los flujos son movimientos de masas de suelo, derrubios o bloques rocosos con abundante presencia de agua, siendo esta el principal agente desencadenante. El material está disgregado y se comporta como un fluido, sufriendo una deformación continua, sin presentar superficies de rotura definidas. Estos movimientos poco profundos pueden tener lugar en laderas de bajas pendientes, incluso menos de 10°. (Varnes, 1978; González de Vallejo et al., 2002).

| Material | | ROCA | DETRITO | SUELO |
|--------------------|----------------------|------|---------|-------|
| Tipo de movimiento | | | | |
| CAIDA | | | | |
| | VOLCAMIENTO | | | |
| DESIZAMIENTO | Rotacional | | | |
| | Traslacional (plana) | | | |
| PROPAGACION | | | | |
| FLUJO | | | | |
| COMPLEJO | | | | |

Figura 2.4 Clasificación usada por el British Geology Service, modificada de Cruden & Varnes (1996)

2.2.2.4 Volcamiento (Toppling)

Tipo de movimiento en masa dado por acción de la gravedad, empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas, en el cual hay una rotación generalmente hacia adelante de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto o pivote de giro en su parte inferior (Varnes, 1978). Goodman (1976) diferencian dos tipos de volcamientos:

-Volcamiento de bloques: involucra roca relativamente competente, donde el fallamiento ocurre por pérdida de la estabilidad y rotación de uno o varios bloques a partir de un punto en su base. Es controlado por una orientación específica de discontinuidades y generalmente está asociado a velocidades altas.

-Volcamiento flexural: involucra roca más frágil y densamente diaclasada; el fallamiento ocurre por el doblamiento de columnas de rocas delgadas.

2.2.2.5 Extensiones laterales o de propagación

Es un movimiento de bloques rocosos o masas de suelo muy coherente y cementado sobre un material blando y deformable. Los bloques se desplazan muy lentamente a favor de pendientes muy bajas. Los movimientos son debidos a la pérdida de resistencia del material subyacente, que fluye o se deforma bajo el peso de los bloques rígidos. Las extensiones laterales se dan en laderas suaves, pueden ser muy extensos y provocados por licuefacción del material infrayacente, o por procesos de extrusión lateral de arcillas blandas y húmedas, bajo el peso de masas superiores (González de Vallejo et al., 2002).

2.3 Factores condicionantes

Son aquellos factores que pueda generar una situación potencialmente peligrosa o inestable. Estos corresponden principalmente a la geomorfología, geología, geotecnia y vegetación, que actúan controlando la susceptibilidad de una zona a generar fenómenos de remoción en masa.

Cada uno de los distintos procesos de remoción en masa tiene génesis y comportamientos distintos, por lo cual cada uno podrá ser influenciado por diversos factores de maneras y grados diferentes. (Tabla 2.4, Hauser 1993).

Este capítulo presenta los diferentes factores a considerar para la determinación de susceptibilidad o amenaza de cada evento de remoción en masa en una zona determinada.

Tabla 2.3. Factores condicionantes relevantes para cada tipo de remoción en masa (Hauser, 1993)

| Tipo de remoción en masa Factores Condicionantes | Caídas | Deslizamientos | Toppling | Flujos | Extensiones Laterales |
|---|--------|----------------|----------|--------|-----------------------|
| Geología y Geotecnia | X | X | X | X | X |
| Geomorfología | X | X | X | X | X |
| Hidrología e Hidrogeología | X | X | X | X | X |
| Vegetación y Clima | | X | | X | X |
| Actividad Antrópica | X | X | X | X | |

2.3.1 Geología y geotecnia

Entre los factores que influyen en esta categoría, se encuentran el tipo de depósito y el material que lo compone, la densidad, plasticidad, humedad y permeabilidad, es importante mencionar que además de estos factores, la litología de la roca, su estructura, alteración y meteorización, influirán en cómo se comporta en términos mecánicos la masa a ser movilizada.

2.3.2 Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos que condicionan eventos de remoción en masa son principalmente la topografía, pendientes de las laderas, cambios fuertes de pendientes de las laderas, y la extensión y altura de las laderas. Estas características inciden en la velocidad, energía y volumen de las remociones que puedan originarse. Así también, cualquier modificación de ellos puede transformar una ladera estable en inestable y generar remociones (Popescu, 2002). Otros factores importantes a tomar en cuenta como factor condicionante es la forma y superficie de la hoya hidrográfica y la orientación de la ladera con respecto al norte, aspecto geográfico que puede influir por ejemplo en el tiempo de exposición al sol y por lo tanto, en el grado de humedad, presencia de vegetación y meteorización en la ladera.

Una topografía escarpada y ángulos altos de pendientes de ladera es el primer factor geomorfológico a considerar, siendo propicios para la generación de flujos, deslizamientos y derrumbes. Pendientes mayores a 25° en las cabeceras de las hoyas hidrográficas, son favorables para el desarrollo de flujos o aluviones (Hauser, 1993), aunque algunos podrían generarse sobre pendientes menores que no sobrepasan los 15° (Sauret, 1987 en Sepúlveda, 1998).

La geometría de la ladera es uno de los factores más importantes en la evaluación de generación de deslizamientos, por cuanto determinara las orientaciones de las fuerzas resistentes y las solicitantes.

2.3.3 Hidrología e Hidrogeología

La red de drenaje, las posiciones y variaciones del nivel freático, caudales, coeficientes de escorrentías y coeficientes de infiltración, son factores hidrológicos e hidrogeológicos que condicionan la generación de remociones en masa ya que están directamente relacionados a la incorporación de agua en los suelos o macizos rocosos (Lara, 2007). El agua juega un papel negativo en la resistencia de los materiales, ya que por un lado, genera presiones intersticiales que reducen la resistencia, aumentan los esfuerzos de corte por el incremento de peso del terreno y generan fuerzas desestabilizadoras en grietas y discontinuidades, y por otro lado reduce la resistencia al corte de discontinuidades al lavar los rellenos de estas (González de Vallejo et al. en Muñoz, 2013).

El suelo saturado presentara variaciones en los rangos de cohesión dependiendo de su granulometría. De todas maneras, la incorporación de agua en la estructura del suelo, que en ciertos casos puede llegar a la saturación, genera una disminución en la resistencia del material, disminuyendo su tensión efectiva producto de la generación de presiones de poros (Lambe & Whitman, 1972).

2.3.4 Vegetación

Según Selby (1993), la vegetación contribuiría a disminuir el efecto erosivo sobre las laderas, generado por factores como el clima, propiedades del suelo y topografía. La existencia de árboles en las laderas permitiría la absorción de agua por parte de estos disminuyendo el grado de saturación del suelo. Además, sus raíces en general ayudarían a la estabilización de las laderas actuando como anclajes de reforzamiento, sin dejar de considerar que en algunos casos esta estabilización es solo superficial.

Sin embargo los eventos de remoción en masa generados en Chile, principalmente en zonas climáticas lluviosas con poca vegetación, demuestran que no siempre la vegetación contribuye a disminuir la erosión sobre laderas, como por ejemplo deslizamientos ocurridos en el sur de Chile, en la Región de Aisén, producto de un sismo ocurrido en abril del 2007, donde una parte de un cerro con frondosa vegetación deslizo provocando un tsunami.

2.3.5 Clima

Los factores más importantes que generan erosión de laderas son el viento, temperaturas, radiación solar y precipitaciones, siendo estas últimas las más influyentes.

El carácter fluctuante y variable del clima en el tiempo, le otorga una extraordinaria variabilidad a todos los procesos geodinámicos. Por ende, las situaciones más críticas se vinculan a la frecuencia y severidad de los fenómenos extremos (sequías e inundaciones), pues son precisamente estos eventos los que provocan las mayores pérdidas económicas y sociales (Hauser, 2002).

Las precipitaciones condicionan la estabilidad del macizo, al disminuir la resistencia de las estructuras al incorporar agua entre las fracturas del macizo y/o la estructura del suelo, disminuyendo el coeficiente de roce. Este factor adquiere gran importancia por ejemplo para las caídas de rocas en zonas de acantilados, ya que el agua se infiltra por arriba y las caídas suelen producirse cerca de la cumbre de las laderas. Además los grandes eventos de flujo de detrito y barros han sido gatillados por lluvias intensas, asociadas con saturación del material por lluvias cercanas al día del evento, que en este caso estaría actuando como condicionante en la estabilidad de la ladera (Lara, 2007).

2.3.6 Actividad antrópica

Las actuaciones humanas ocupan un lugar importante dentro de los factores que modifican las condiciones y fuerzas que actúan sobre las laderas. Las excavaciones, la construcción de presa y embalses, las sobrecargas de edificios, estructuras, terraplenes, rellenos o escombreras sobre laderas y las voladuras en zonas cercanas, entre otros, modifican los estados tenso-deformacionales del terreno y sus propiedades geotécnicas, generando inestabilidades. Algunas de estas acciones generan principalmente, hundimientos, caídas, deslizamientos y flujos.

Las principales causas de desestabilización son los cambios de geometría y pendiente, los cambios en las condiciones hidrogeológicas y las fuerzas estáticas externas. Las excavaciones superficiales para vías de comunicación y transporte, boquillas de túneles, minería y otras obras varían los perfiles de equilibrio de las laderas y pueden desencadenar movimientos, dependiendo de otros factores condicionantes, como las estructuras geológicas, la resistencia o el contenido en agua del terreno. Las excavaciones más desfavorables son las realizadas a pie de las laderas, por soportar esta zona las mayores tensiones, situación frecuente en la construcción de vías de comunicación por valles o por zonas bajas de las laderas (Gonzalez de Vallejo et al., 2002).

2.4 Factores gatillantes de remociones en masa

Existen factores que modifican la estabilidad preexistente del terreno y gatillan la ocurrencia de un evento de remoción en masa, conocidos como factores desencadenantes (Gonzalez de Vallejo et al., 2002). Un agente gatillante se caracteriza principalmente por la existencia de un corto lapso entre causa y efecto. Los agentes desencadenantes más comunes son las lluvias de gran intensidad y los sismos; secundariamente las erupciones volcánicas, la intervención antrópica, la fusión de nieve, entre otros.

2.4.1 Precipitaciones

El desencadenamiento de los movimientos de ladera por causas meteorológicas y climáticas está relacionada fundamentalmente con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones (González et al., 2002). Así, precipitaciones de poca o alta intensidad en periodos largos de tiempo, podrían desencadenar factores gatillantes de remociones en masa profundas, y otras de gran intensidad pero en periodos cortos, un potencial factor desencadenante de eventos superficiales en zonas donde la susceptibilidad a remociones en masa sea alta (Aleotti, 2004).

El agua en el terreno da lugar a presiones que alteran los estados tensionales, por presiones intersticiales y aumento del peso, a procesos de erosión interna y externa, y finalmente a cambios mineralógicos, todos estos aspectos modifican las propiedades y resistencia de los materiales, sobre todo en los suelos. Además las precipitaciones intensas aumenta la escorrentía superficial, lo que se traduce en un mayor grado de erosión de laderas, pudiendo generar fenómenos de remociones en masa.

En Chile Central, estudios de los eventos de remociones en masa de los últimos 50 años, establecen que existe una clara correlación entre la presencia del fenómeno El Niño, en el cual hay una tendencia al exceso de precipitaciones, y el desarrollo de tormentas gatillantes de eventos de remociones en masa (García 2000, en Padilla 2006). En cuanto a la intensidad de las precipitaciones, estas se pueden asociar a precipitaciones líquidas de intensidad cercana a 80 mm/día en la zona central, valor utilizado por Padilla (2006) en la elaboración de modelos que asocian intensidades de precipitaciones con remociones en masa con alta probabilidad de ocurrencia.

Otro tipo de acciones relacionadas con el clima son los procesos de hielo-deshielo estacionales, que provocan inestabilidades superficiales en laderas de suelos de zonas frías y desprendimiento en macizo rocosos donde el hielo provoca la meteorización y fracturación del material, provocando caídas de rocas (González de Vallejos et al., 2002).

2.4.2 Sismos

Los sismos pueden provocar movimientos de todo tipo en las laderas, dependiendo de las características de los materiales, de la magnitud y de la distancia al epicentro. Desprendimiento de bloques, deslizamientos, flujos y avalanchas rocosas pueden ocurrir durante eventos sísmicos. Asimismo, cuando el material es un suelo saturado, no cohesivo, la vibración puede causar remociones en masa debido a la licuefacción.

En zonas sísmicas activas del mundo, alguna de los más desastrosos deslizamientos de tierra o roca de la historia, han sido provocadas por una descarga sísmica. Los materiales particularmente susceptibles son los que tienen una baja resistencia o de estructuras metaestables como loes, cenizas volcánicas en laderas empinadas, arenas saturadas de baja densidad, los depósitos de grano fino de arcilla y acantilados de roca fracturada o hielo. Cuando esto ocurre en regiones sísmicas, la zonificación del peligro de deslizamiento debe estar íntimamente ligada con la zonificación sísmica a través de una evaluación de como los materiales responderán a la aceleración, la amplitud y la duración de la sísmica, junto con la estimación de los intervalos de recurrencia (Varnes, 1984).

Chile es uno de los países más sísmicos del mundo, siendo testigo de terremotos que han ocasionado tantas pérdidas humanas como materiales. En ingeniería, el peligro sísmico es una de las herramientas más utilizadas en la prevención de dichas pérdidas (Leyton et al., 2010). La aceleración sísmica generalmente utilizada en este tipo de análisis, es la aceleración sísmica horizontal máxima (“peak ground acceleration” o PGA). Este valor de PGA es usado comúnmente debido a su relación con fuerzas inerciales sobre los cuerpos afectados, donde las más altas fuerzas dinámicas inducidas son cercanas a él (Lara, 2007).

3 Metodología para la evaluación de peligro de remociones en masa

3.1 Introducción

Para el análisis de susceptibilidad y peligro de remoción en masas de la zona de interés, se aplica la metodología propuesta por Lara (2007), donde unifica metodologías cualitativas y cuantitativas. Para análisis de susceptibilidad, se determina un índice de susceptibilidad basado en la suma de puntajes ponderados para distintos factores condicionantes de diferentes tipos de fenómenos de remociones en masa, con lo cual se identifican zonas críticas para la generación de estos eventos. Para la evaluación del peligro, se utilizan diversos softwares y modelos numéricos, y así obtener la probabilidad de falla y su alcance. Finalmente se elaboran mapas de peligros de la zona de estudio para los diferentes tipos de remociones en masa ya mencionados.

3.2 Esquema general

A continuación, se presenta un esquema general de la metodología de evaluación de peligros de remociones en masa presentado por Lara (2007). Las etapas principales son:

3.2.1 Estudios preliminares de gabinete (G1)

Esta fase consta de la recopilación de información y antecedentes para la zona de estudio para la evaluación de peligro geológico, mediante revisión bibliográfica, prensa, fotografías aéreas, mapas, cartas geológicas, entre otros. A partir de éstas será posible realizar un catastro de eventos ocurridos en la zona y recolectar la información necesaria para el análisis de estabilidad de laderas, como es geología, geomorfología, características geotécnicas, hidrología e hidrogeología, sismicidad, clima, vegetación y actividad antrópica.

Se debe tener presente que esta fase corresponde a una etapa de trabajo en gabinete, donde la información recopilada será posteriormente completada y corroborada en la etapa de trabajo en terreno. Los principales puntos a considerar son la definición de la escala del trabajo, que podrá posteriormente ser modificada de acuerdo al nivel de detalle del trabajo que se vaya realizando, la identificación y descripción de los factores condicionantes y la identificación de los factores gatillantes de remociones en masa ocurridas en la zona de estudio, basado principalmente en la recopilación de antecedentes del área. Junto con esto, a partir del trabajo cartográfico deben descartarse las zonas de baja pendiente, irrelevantes para la generación de las remociones en masa que se evaluarán (laderas con pendientes menores a 10° serán descartadas del estudio de susceptibilidad).

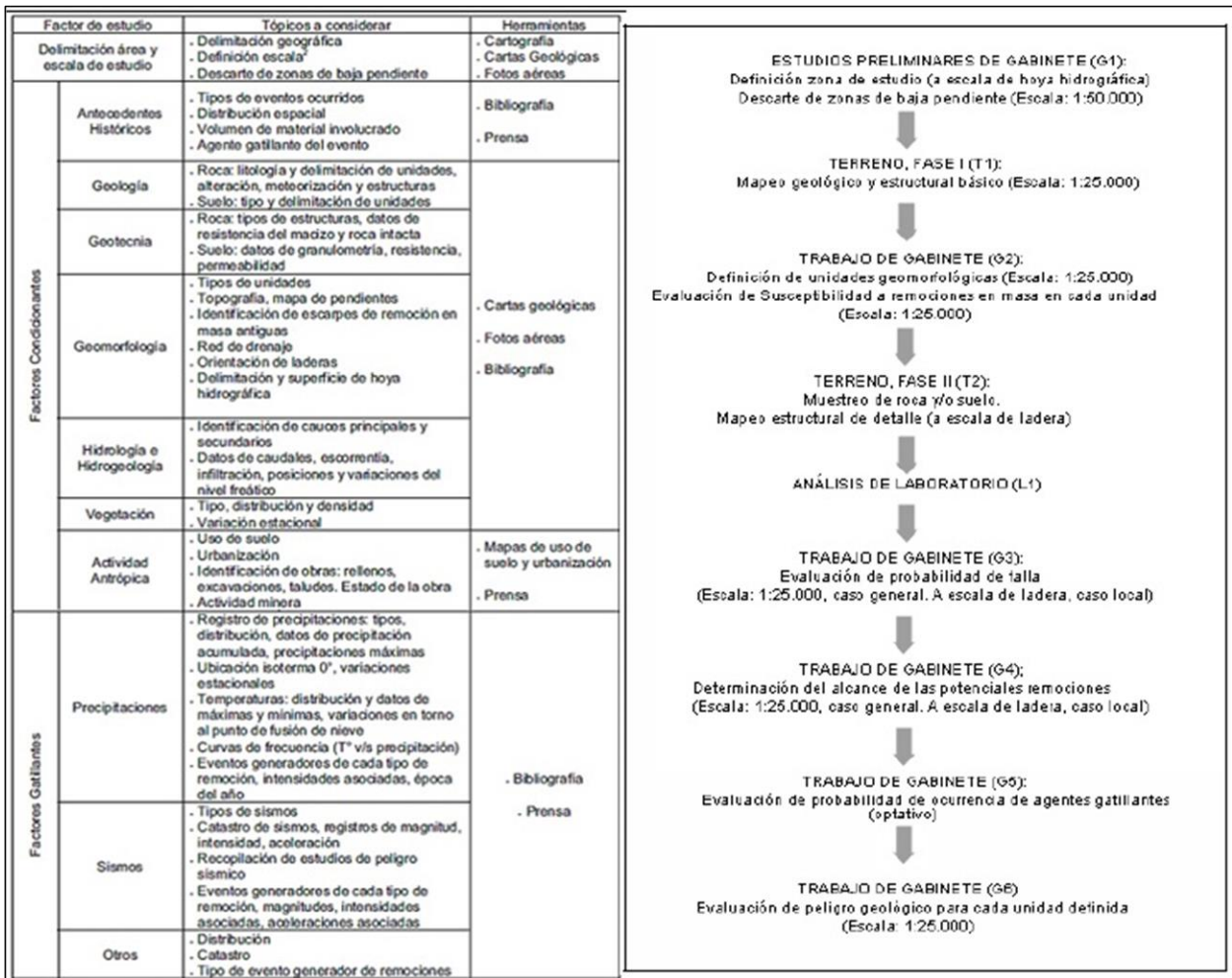


Figura 3.1. A la derecha esquema de la metodología de Lara (2007); a la izquierda, estudios preliminares para la evaluación de peligros de remociones en masa (Lara, 2007).

3.2.2 Estudios en terreno, fase I (T1)

El terreno consistió en la caracterización de unidades de roca y suelo, clasificación geotécnica de propiedades in-situ, condiciones antrópicas y finalmente la identificación de la vegetación presente en la zona. El objetivo de esta etapa es la realización de un mapa a la escala de trabajo definida, que reúna la información recolectada en terreno (mapeo geológico básico, que consta de la delimitación espacial de las unidades de suelo y roca, que es posible identificar en la zona) y la recopilada en la etapa de revisión de antecedentes.

En cuanto a la geomorfología, uno de los rasgos más relevantes a considerar corresponde a las pendientes de laderas en el área de estudio, sus alturas, exposición al sol y geometrías asociadas, las cuales se pueden obtener a partir de la generación en SIG de un modelo de elevación digital (DEM). La geomorfología incluye también la identificación, delimitación y descripción de unidades geomorfológicas como , abanicos aluviales, depósitos de remociones antiguas, escarpes de falla, y escarpes de remoción

en masa antiguos y recientes, además de la caracterización del drenaje del área involucrada en el estudio y el encajonamiento de los cauces y quebradas.

La geotecnia debe ser descrita de manera básica, en cada depósito y afloramiento que sea posible. Esta caracterización sería recomendable reforzarla más adelante por estudios en laboratorio y generación de líneas de detalle en zonas que sean catalogadas en pasos posteriores como críticas para la generación de remociones en masa, ya que esto último no es parte de los alcances de esta memoria.

La fase de terreno constará de un último punto referente a la identificación de la vegetación existente en la zona de estudio. La descripción de sus características debe enfocarse en el tipo de vegetación presente (diferenciando entre vegas, arbustos, árboles y praderas), cómo se encuentra distribuida, su densidad en términos relativos, alturas promedios y a qué tipo de depósito se encuentra asociada. Esto permitirá principalmente comparar estabilidad de laderas en base a este factor e identificara zonas que no han sufrido removilizaciones relativamente recientes de material al encontrarse provistas de densidades importante de vegetación.

3.2.3 Trabajo de gabinete (G2)

Esta etapa consta de dos puntos principales:

1. División de la zona de estudio en unidades geomorfológicas mediante definición de rasgos geomorfológicos y geológicos similares, como son la orientación de la ladera (aspecto), la pendiente, litología y tipos de depósitos. Bajo este punto, quiebres de pendientes muy fuerte y cambios bruscos en el aspecto son factores para definir una nueva unidad; de esta manera cada una de ellas quedara definida por un aspecto y pendiente promedio. No se recomienda definir más de 150 unidades, de manera que la continuación del estudio sea práctico y eficiente.
2. Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa, donde se calcula un Índice de Susceptibilidad (IS), para cada unidad definida y se basa en la suma de los puntajes ponderados para cada uno de los factores condicionantes de remociones en masa. De esta manera, cada unidad tendrá un IS asociado a deslizamiento de roca, deslizamiento suelo, caída de rocas y flujos de manera independiente. Las unidades con $IS \geq 50$ se considera como susceptible y se seleccionaran para análisis de peligro de remoción en masa. El resultado de esta fase es un mapa de susceptibilidad para cada uno de los tipos de remociones en masa estudiadas, con un Índice de Susceptibilidad comparable que varía entre 0% y 100%.

Para cada factor condicionante de remociones en masa se establece un peso en porcentaje, que define su grado de importancia en la generación del evento. Este porcentaje se definió bajo criterio del autor basado en la metodología de Sepúlveda (1998), revisión bibliográfica y la calibración gradual de la metodología mediante aplicación en la zona de estudio. Sepúlveda (1998), a su vez se basa en las opiniones de diversos profesionales del área geológica y geotécnica para establecer las ponderaciones.

Basado en la metodología elaborada por Sepúlveda (1998), y en la calibración con las observaciones en la zona piloto de la zona central de Chile, hechas paralelamente al desarrollo de la metodología, se utilizan los valores propuestos para el cálculo del IS. Se determina un valor crítico de IS=50 para considerar una unidad susceptible, definido arbitrariamente mediante la calibración con las remociones en masa observadas en la quebrada San Ramón. Considerando que las características geológicas, geotécnicas y geomorfológicas son las más relevantes, en ese aspecto, se tiene, para cada tipo de remoción, los siguientes factores con sus respectivos pesos (Tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4):

Evaluación de susceptibilidad a Deslizamientos en suelo

Se presentan las ponderaciones máximas consideradas por Lara (2007) para cada factor, es decir, el caso más crítico para generar una remoción. La suma de todos los porcentajes corresponde a un 100%. La Tabla 3.1 Presenta los factores desglosados en diversos rangos dependiendo de las condiciones que presenta la unidad estudiada.

Tabla 3.1. Ponderación máxima de factores condicionantes de deslizamientos en suelo (Lara, 2007)

| Factor | Descripción | % |
|--------------------|--|----------|
| Geomorfología | Pendientes de ladera (f_1) Exposición al sol (f_2) | 35% |
| Geología-Geotecnia | Características geológicas-geotécnicas del material (f_3) Condiciones de humedad y saturación (f_4) | 30% |
| Clima-Vegetación | Acumulación de nieve (f_5) Cobertura vegetal (f_6) | 10% |
| Antrópico | Desestabilización artificial de laderas (f_7) | 10% |
| Antecedentes | Deslizamientos declarados en la ladera (f_8) Deslizamientos declarados en la unidad de suelo (f_9) | 15% |

Así, se calcula el IS para cada una de las unidades geomorfológicas definidas mediante la siguiente ecuación:

$$IS_{DS} = \left(\sum_{i=1}^9 f_i \right) \cdot f_{10}$$

Para esta ecuación el subíndice DS se refiere al tipo de remoción en masa estudiado (Deslizamientos de Suelo), f_i es cada uno de los 9 factores considerados, y f_{10} está asociado a la compatibilidad del material de la unidad con el mecanismo analizado. De esta manera, toma valores 0 y 1, siendo nula la susceptibilidad cuando el material de la unidad es roca.

Evaluación de susceptibilidad a Deslizamiento en roca

Al igual que en el caso anterior, la Tabla 3.2 muestra la ponderación máxima de factores condicionantes de deslizamiento en roca propuesto por Lara (2007).

Tabla 3.2. Ponderación máxima de factores condicionantes de deslizamientos en roca (Lara, 2007)

| Factor | Descripción | % |
|--------------------|---|----------|
| Geomorfología | Pendientes de ladera (f_1) | 35% |
| Geología-Geotecnia | Características geológicas-geotécnicas del material (f_2) | 35% |
| Clima | Acumulación de nieve (f_3) | 5% |
| Antrópico | Desestabilización artificial de laderas (f_4) | 10% |
| Antecedentes | Deslizamientos declarados en la ladera (f_8) | 15% |

Luego, el IS para cada unidad se calcula según la siguiente ecuación:

$$IS_{DR} = \left(\sum_{i=1}^5 f_i \right) \cdot f_6$$

Así, las unidades sólo asociadas a suelo, entregarán un IS=0 por la incompatibilidad del material de la unidad con el mecanismo estudiado indicado por f_6 .

Evaluación de susceptibilidad a Caídas de roca

La Tabla 3.4 muestra los valores ponderadores para cada factor condicionante a considerar.

Tabla 3.3. Ponderación máxima de factores condicionantes de caídas de rocas (Lara, 2007)

| Factor | Descripción | % |
|--------------------|---|----------|
| Geomorfología | Pendientes de ladera (f_1) | 35% |
| Geología-Geotecnia | Características geológicas-geotécnicas del material (f_2) | 35% |
| Clima | Acumulación de nieve (f_3) | 10% |
| Antrópico | Desestabilización artificial de laderas (f_4) | 5% |
| Antecedentes | Caída de roca declarada en la ladera (f_8) | 15% |

Así, el valor para IS será el resultado de la siguiente ecuación:

$$IS_C = \left(\sum_{i=1}^5 f_i \right) \cdot f_6$$

Toda unidad asociada sólo a suelo, entregara un IS=0 dado que f_6 será nulo.

Evaluación de susceptibilidad a flujos de detritos

La Tabla 3.3 muestra la ponderación máxima de factores condicionantes de flujos de Lara (2007).

Tabla 3.4. Ponderación máxima de factores condicionantes de flujos (Lara, 2007)

| Factor | Descripción | % |
|--------------------|---|----------|
| Geomorfología | Pendientes de ladera (f ₁) Exposición al sol (f ₂) Encajonamiento canal de drenaje (f ₃) Exposición al sol (f ₄) | 35% |
| Geología-Geotecnia | Características geológicas-geotécnicas del material (f ₅) Condiciones de humedad y saturación (f ₆) | 35% |
| Clima-Vegetación | Acumulación de nieve (f ₇) Cobertura vegetal (f ₈) | 10% |
| Antrópico | Obstrucción de canal de drenaje (f ₉) Desestabilización artificial de laderas (f ₁₀) | 10% |
| Antecedentes | Aluviones declarados en la hoya (f ₁₁) | 10% |

Luego, el IS para cada unidad se calcula según la siguiente ecuación:

$$IS_F = \left(\sum_{i=1}^{11} f_i \right) \cdot f_{12}$$

Si f_{12} indica roca como material de la unidad, entonces la susceptibilidad resultará nula.

3.2.4 Evaluación de probabilidad de falla (Trabajo de Gabinete G3)

Esta parte de la metodología contemplo la determinación de las probabilidades de falla para cada una de las unidades geomorfológicas que cumplan la condición $IS \geq 50$, mediante la implementación de diversas herramientas numéricas y computacionales, con las cuales posteriormente se determinó el peligro de cada tipo de remoción.

Para esta etapa se requiere del conocimiento de la geometría representativa de la unidad geomorfológica en estudio, la cual será base para la aplicación de la mayoría de los softwares utilizados. Los casos de desarrollos locales de remoción en masa también deben pasar estos análisis, especialmente en aquellas zonas donde fue posible observar en terreno la existencia de los eventos; en este último caso la geometría de la ladera corresponde a aquella donde efectivamente se observó la remoción en masa local.

La evaluación de la probabilidad de falla debe hacerse bajo un escenario que considere tanto las condiciones de saturación del material como las aceleraciones sísmicas

correspondientes. En estas condiciones, se proponen los siguientes casos para la realización de los análisis: material saturado (tabla de aguas en superficie), semi-saturado (ubicación de la tabla de aguas a criterio del profesional; si no se tienen datos se sugiere ubicarla a mitad de profundidad de la unidad geológica en la sección analizada) y no saturado (sin tabla de aguas); combinado con la opción de considerar o no un sismo, definido mediante su aceleración horizontal (y vertical, si se estima necesario), en un modelo de análisis pseudoestático.

Si bien la probabilidad de falla obtenida es en la mayoría de los casos un valor numérico, ésta se llevará a una probabilidad cualitativa del origen de la remoción. Esto es necesario ya que no todos los resultados serán numéricos y se deben tener probabilidades comparables entre sí de manera que, al evaluar el peligro geológico de remociones en masa, los tipos de eventos analizados sean también comparables. La Tabla 3.5 tiene su justificación en los factores de seguridad asociados. En los análisis probabilísticos, una probabilidad de falla del 50% tiene un factor de seguridad asociado igual o muy cercano a 1. Este valor es considerado el límite para designar la estabilidad o inestabilidad de una ladera, aunque no exista total certeza de la ocurrencia del evento, de ahí que la probabilidad asociada superior al 50% fuese considerada alta. Para cada tipo de remociones en masa la evaluación de probabilidad de falla se realizó mediante distintas herramientas computacionales y numéricas.

Tabla 3.5. Relación entre probabilidad numérica y cualitativa para la evaluación del peligro geológico (Lara, 2007)

| Probabilidad numérica de generación de un FRM | Probabilidad cualitativa de generación de un FRM |
|---|--|
| 0% - 25% | Bajo |
| 25% - 50% | Medio |
| >50% | Alto |

Se sugiere además, la evaluación de laderas locales para cualquier caso en que los resultados no sean satisfactorios con respecto a lo observado en terreno o con respecto a los antecedentes que se tienen de la zona de estudio. Esto manifiesta la posibilidad de elaborar análisis alternativos a escala de mayor detalle que la definida inicialmente.

Deslizamiento de suelo

La evaluación de deslizamientos es diferente para el caso de deslizamientos traslacionales (superficial) y rotacionales (profundo), este último no se analizara debido a la geología de la zona, donde existe solo suelos superficiales.

Deslizamiento traslacional

El modelo aplicado para los deslizamientos traslacionales es el de ladera infinita, este será aplicable en aquellas zonas donde el espesor del suelo es mucho menor comparado con su extensión (caso de laderas con suelo superficial). Con esto se determinó para cada unidad geomorfológica el factor de seguridad asociado. En este

tipo de remociones en masa, se calculara de una forma distinta a la propuesta por Lara, 2007, la cual propone la utilización del software @RISK, pero como no se puede tener acceso a este software, se propone calcular la probabilidad de falla mediante una modelación Montecarlo, en la cual se asignaron a cada variable una distribución estadística representativa, utilizando el software Excel 2013.

Deslizamiento de roca

Las laderas en roca pueden o no estar controladas por estructuras. Cuando no es así se habla de deslizamientos rotacionales profundos, los cuales pueden ser analizados con los mismos softwares que para el caso de suelos, pero con parámetros geomecánicos del macizo rocoso. En tanto, para los deslizamientos controlados por estructuras existe un paso previo al análisis de estabilidad de taludes, que corresponde al análisis cinemático de las laderas.

El primer paso para el análisis de bloques se realiza en el software DIPS (www.rocscience.com), donde se representan las estructuras medidas (datos de terreno) y a partir de ellos se definen los sets estructurales predominantes, que serán la base para el análisis cinemático. Como no se logró un análisis detallado de las estructuras no fue posible realizar el análisis cinemático, pero si se logró observar in-situ deslizamiento en cuñas y con los datos que se lograron medir, se obtuvo el factor de seguridad y probabilidad de falla con los softwares SWEDGE y ROCPLANE.

Los casos de laderas críticas para la generación de dichos eventos, pasarán al análisis estático y/o sísmico respectivo.

Deslizamientos planares

Este tipo de deslizamiento puede ser analizado mediante la implementación del software RocPlane (www.rocscience.com), que utiliza la geometría de la ladera, las propiedades de los materiales, y la orientación de las estructuras, para entregar directamente, en su opción probabilística, los factores de seguridad y las probabilidades de falla asociadas a deslizamiento plano por estructuras.

Deslizamiento en cuña

Este tipo de deslizamiento también puede ser analizado mediante la implementación de los softwares de Rocscience, SWEDGE, está orientado específicamente al análisis de deslizamiento en cuña. De igual forma requiere los datos de la geometría de la ladera, las propiedades de los materiales, y la orientación de las estructuras que generan la cuña que aflora en la ladera.

Caídas de rocas

Este análisis se basó en los deslizamientos en bloque y en la presencia de discontinuidades observadas en terreno. Para el caso de las laderas con deslizamiento en bloque, se asumirá que estos mismos deslizamientos son los que producen las caídas de roca y por lo tanto la probabilidad de falla y el factor de seguridad de la ladera

para las caídas de rocas serán las mismas que para los deslizamientos planos, cuña y/o toppling. Con respecto a presencia de discontinuidades pero que no cumplan con condiciones cinemáticas de deslizamientos se aplicaran criterios de pendientes en que se puedan generar caídas de rocas (Keef, 1984). Las probabilidades asignadas a los diversos rangos de pendientes se basan en asumir la existencia de estructuras capaces de generar caídas de rocas.

Tabla 3.6. Relación entre probabilidad de generación de caídas y pendientes (Lara, 2007)

| Probabilidad de generación de caídas | Pendiente de ladera en situación estática | Pendiente de ladera en situación sísmica |
|--------------------------------------|---|--|
| Baja | 50°-60° | 40°-50° |
| Media | 60°-65° | 50°-55° |
| Alta | >65° | >55° |

Flujos de detritos

El modelo utilizado será el mismo que para deslizamiento de suelos trasalacionales (superficiales), ósea el de ladera infinita, donde la probabilidad de falla se obtendrá mediante una modelación Montecarlo, en la cual se asignaron a cada variable una distribución estadística representativa, utilizando el software Excel 2013.

Las unidades a utilizar en este caso son las unidades de suelo que rellenan los cauces, bajo una condición saturada.

3.2.5 Evaluación del alcance de la remoción en masa (Trabajo de Gabinete G4)

Este punto de la metodología, se encarga de determinar el alcance que tendrán las remociones en masa en caso de desencadenarse. Cada uno de los diferentes eventos tiene su propia evaluación, y se realizan mediante la utilización de diversas herramientas tanto computacionales como numéricas, o bien de manera cualitativa. Los datos para dicha evaluación fueron obtenidos a través de bibliografía de trabajos anteriores y observación en terreno.

Deslizamiento de suelo

Para este tipo de alcance se hace una distinción entre deslizamientos masivos y deslizamientos superficiales. Para los primeros se determinó mediante el volumen deslizado y criterios geomorfológicos (topografía y quiebre de pendientes), es decir el

alcance del deslizamiento corresponde al área y volumen que el material deslizado ocuparía en la zona afectada, dada la topografía y pendientes de esta última. Para el caso de los deslizamientos superficiales se define, a partir del modelo de ladera infinita, el ángulo crítico ($\beta_{\text{crítico}}$) para que deslice, lo que significa que su factor de seguridad sea igual a 1. De existir zonas bajo la ladera en estudio con pendientes iguales o mayores a ese ángulo crítico, entonces se definen zonas de alcance del deslizamiento según el siguiente criterio (Tabla 3.7):

Tabla 3.7. Relación entre probabilidad de alcance de deslizamiento y pendientes (Lara, 2007)

| Probabilidad de alcance | Rangos de pendiente según ángulo crítico |
|-------------------------|---|
| Bajo | $\beta_{\text{crítico}} - 2^{\circ} < \beta < \beta_{\text{crítico}} + 2^{\circ}$ |
| Medio | $\beta_{\text{crítico}} + 2^{\circ} < \beta < \beta_{\text{crítico}} + 4^{\circ}$ |
| Alto | $\beta_{\text{crítico}} + 4^{\circ} < \beta < \beta_{\text{crítico}} + 6^{\circ}$ |

Deslizamiento de roca

Se utiliza el mismo criterio para deslizamientos de suelo masivos, es decir, se realizara mediante criterios geomorfológicos y conservación de material deslizado y depositado. Los casos de deslizamientos en bloques tienen un alcance local al pie del talud de donde se generaron.

Caídas de roca

Se utilizó el software Rocfall para determinar el alcance de caídas de rocas, el cual entregó la distancia total recorrida de la roca al caer, estas distancias estarán asociadas a una probabilidad alta de alcance.

Para su implementación es necesario un perfil topográfico representativo de la unidad geomorfológica estudiada junto con características de la roca. Para sectores que no estuvieron en el recorrido entregado por Rocfall se estimó una probabilidad de alcance de acuerdo al análisis de pendientes como se indica en la tabla 3.8:

Tabla 3.8. Relación entre probabilidad de alcance de caídas de rocas y pendientes (Lara, 2007)

| Probabilidad del alcance de caídas de roca | Rangos de pendientes de laderas | |
|--|---------------------------------|-------------------|
| | Situación estática | Situación sísmica |
| Bajo | 35° - 40° | 30° - 35° |
| Medio | 40° - 45° | 35° - 40° |
| Alto | 45° - 50° | 40° - 50° |

Flujos de detritos

La estimación del alcance de los flujos se realizara mediante criterios geológicos-geomorfológicos y antecedentes. Los cambios de pendientes es el factor que se considerara determinante para el comienzo de la depositación junto con el estudio de flujos anteriores (si es que existen datos). Las formas de la depositación y su extensión dependerán de las características atribuidas al flujo (ya sea por observación en terreno o por bibliografía) y de la geomorfología.

Esta metodología evalúa el alcance del flujo de acuerdo a los rangos de pendientes presentados en la Tabla 3.9, incorporando antecedentes de áreas afectadas por flujos.

Tabla 3.9. Relación entre probabilidad de alcance de flujos y pendientes (Lara, 2007)

| Probabilidad de alcance de flujos | Rangos de pendientes de quebradas |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Bajo | 10° - 13° |
| Medio | 13° - 15° |
| Alto (*) | ≥ 15° |

3.2.6 Evaluación del Peligro Geológico (Trabajo de Gabinete G6)

En esta última fase se debe reunir los resultados de probabilidades de falla del material, del alcance de la remoción y alternativamente del agente gatillante, para todos los tipos de remociones en masa y unidades geomorfológicas estudiadas. El objetivo es definir el peligro de remociones en masa en la zona de estudio, dividiéndolo en diferentes rangos de importancia.

El peligro asociado a los distintos eventos de remociones en masa corresponderá a la combinación de las probabilidades de generación y de alcance en la zona de estudio, traduciéndose en un Grado de Peligro. Las dos probabilidades tuvieron como división tres grados: alto, medio y bajo, esto se muestra en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Matriz de combinación para definir el Grado de Peligro Global (Lara, 2007)

| Probabilidad de Falla | Probabilidad de Alcance | Grado de Peligro |
|-----------------------|--------------------------|------------------|
| Alto | Nulo | Nulo |
| | Alto | Alto |
| | Medio | Alto |
| | Bajo | Medio |
| Medio | Nulo | Nulo |
| | Alto | Alto |
| | Medio | Medio |
| | Bajo | Medio |
| Bajo | Nulo | Nulo |
| | Alto | Medio |
| | Medio | Medio |
| | Bajo | Bajo |
| Nulo | Nulo, Alto, Medio o Bajo | Nulo |

4 Antecedentes del área de estudio

4.1 Introducción

En el presente capítulo, en primer lugar se presenta una descripción geológica y geomorfológica regional; luego una descripción geológica y geomorfológica local, con los datos y observación tomados en terreno; posteriormente una descripción de la vegetación presente en el área, además del clima y sismicidad que constituyen potenciales factores gatillantes de fenómenos de remociones en masa; y por último la intervención antrópica a la que ha sido sometido la zona.

4.2 Marco Geomorfológico y Geológico Regional.

La zona de estudio se ubica en Chile Central, dentro del frente precordillerano del Sector Oriente de la ciudad de Santiago. Geomorfológicamente se divide en tres unidades longitudinales, Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal, (Figura 4.1). La geología básicamente está compuesta por depósitos volcánicos, intrusivos del Cretácico y del Mioceno y Depósitos Cuaternarios (Figura 4.2).

4.2.1 Marco Geomorfológico

En la zona central de Chile, es posible identificar cinco unidades geomorfológicas principales, las cuales de oeste a este son: Cordillera de la Costa, Depresión Central y Cordillera Principal, las cuales se presentan paralelas entre sí y con una orientación

aproximada Norte-Sur. La zona de estudio se encuentra en el sector nor-oriental de la Cuenca de Santiago, en el límite que separa la depresión central del frente cordillerano, dentro de la Cordillera Principal Occidental (Fock, 2005). El área está delimitada hacia el Norte por el río Mapocho y al Sur por la Quebrada Los Almendros. A continuación se describen las unidades ya mencionadas (Figura 4.1):

- Cordillera de la Costa: Está compuesta por cerros que rara vez superan los 2000 m.s.n.m y se puede subdividir a grandes rasgos en dos flancos. En el flanco oeste está conformada principalmente por basamento intrusivo y metamórfico del Paleoceno-Jurásico, cubierto por depósitos marinos de Mioceno tardío al presente. El flanco este está conformado por secuencias estratificadas del Jurásico Superior al Cretácico Superior que mantean al este de granitos Cretácicos (Wall et al., 1999; Sellés y Gana, 2001; SERNAGEOMIN, 2003; Farías et al., 2008).
- Depresión Central: En su porción correspondiente a la Región Metropolitana está limitada al Norte por el Cordón de Chacabuco y al Sur por los cerros de Paine, posee alturas que van entre los 450 y los 650 m. s.n.m. Está rellena por un grueso paquete de sedimentos, de espesores que en lugares superan los 500 m (Araneda *et al.* 2000), no consolidados de origen aluvio-fluvial, fluvio-glacial y posiblemente glacial -provenientes de las hoyas hidrográficas de los ríos Mapocho y Maipo-; por sedimentos fluviales -de los esteros Lampa, Colina y Angostura-; por depósitos de cenizas volcánicas provenientes de los centros volcánicos de la Cordillera Principal, y por conos de deyección que se desprenden del relieve montañoso, engranando en parte con los materiales fluviales y glaciofluviales (Karzulovic, 1957; Tricart *et al.*, 1965). Estos sedimentos cubren un paleorelieve del que sobresalen algunas cumbres en forma de “cerros isla”, como: Cerro Renca, Cerro Colorado, Cerro Santa Lucía, Cerros de Chena, Cerros de Lonquén, etc. La mayor parte de los sedimentos que rellenan la cuenca en la Región Metropolitana provienen de la hoya parcial del Maipo superior, siendo el abanico de este río el de mayor tamaño, cubriendo más del 50% de la superficie del relleno (Fernández, 2001).
- Cordillera Principal: Se puede dividir según sus características geológicas en tres: Cordillera Principal Oeste, Central y Este. La Cordillera Principal Oeste consiste en secuencias Cenozoicas que solo exhiben deformación importante en su flanco más occidental, constituidas por las formaciones Abanico y Farellones principalmente. La Cordillera Principal Central también está compuesta de rocas Cenozoicas, pero a diferencia de la anterior, la deformación es mucho más intensa. La Cordillera Principal Oriental está compuesta casi exclusivamente de secuencias deformadas Mesozoicas. Tanto la Cordillera Principal Central como Oriental constituyen las fajas plegadas y corridas reconocidas a esta latitud (Farías et al., 2008).

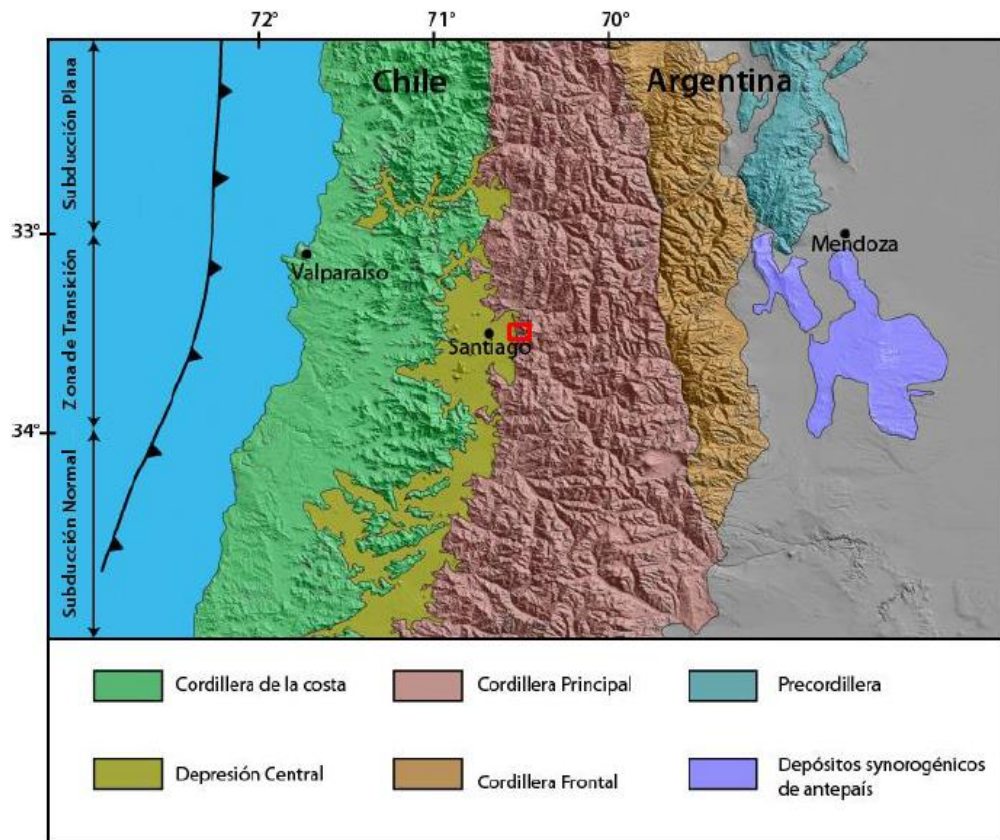


Figura 4.1. Segmentación morfoestructural Andina entre 32° y 35°, basado en Charrier y Muñoz (1994); Tasara y Yañes (2003) y Giambiagi et al. (2008). En rojo área de estudio.

4.2.2 Marco Geológico

El marco geológico y tectónico de Chile Central se encuentra condicionado por la presencia de la subducción de la placa oceánica bajo la corteza continental, fenómeno que viene ocurriendo al menos desde el Jurásico Inferior y que ha influido principalmente en la ubicación de los arcos volcánicos y en la presencia de cuencas de trasarcos, de antearco, entre otros.

Como muestra la Figura 4.2, el marco geológico regional incluye rocas de la Formación Abanico, unidades de Intrusivos Hipabisales, depósitos de remociones en masa, depósitos coluviales y fluviales antiguos, además de depósitos aluviales y aluviales de piedemonte. A continuación se describen las principales formaciones reportadas en la Hoja Geológica de Til-Til-Santiago (Wall et al., 1999).

4.2.2.1 Rocas estratificadas

Formación Abanico (Eoceno superior?-Mioceno Inferior)

Secuencia principalmente volcánica andesítica a basáltica, con intercalaciones piroclásticas sedimentarias continentales, con espesor expuesto de 2000m. Aflora en el sector oriental de Santiago, dispuesto concordantemente sobre la Formación Lo Valle,

al norte de Colina. Su techo no está expuesto y esta intruida por 'stocks' y diques datados entre 34 y 19 Ma.

En la zona se distingue su nivel inferior (1), correspondiente a lavas de composición andesítica a basáltica, con intercalaciones de tobas brechosas, tobas soldadas y rocas sedimentarias continentales, de hasta 1800m de espesor. Cerca de la base, ocurre una intercalación de tobas vítreas riolíticas a dacíticas soldadas, con lavas básicas subordinadas. Una intercalación sedimentaria, de 200 m de espesor, aflora al este del cerro Manquehue. Está formada por limolitas y areniscas tobaceas y conglomerados fluviales.

El nivel superior (2), corresponden a brechas piroclásticas finas, conglomerados y areniscas volcanoclásticas subordinadas, de colores gris a morado claro, de hasta 350 m de espesor (Wall et al., 1999).

Formación Farellones (Mioceno)

Secuencias de lavas andesítico basálticas de 150 m de espesor, dispuesta sobre la Formación Abanico, a través de una falla subhorizontal y que ocupa un área de 1,5 km² en las nacientes de la quebrada La Leonera. Estos afloramientos se asignaron por correlación litológica con rocas que se encuentran en el cordón de Los Españoles. Se han reportado edades K-Ar comprendidas entre los 20-10 Ma (Wall et al., 1999).

4.2.2.2 Rocas Intrusivas

Intrusivos hipabisales andesíticos y dacíticos (20-19 Ma)

'Stocks' y diques andesíticos y dacíticos de anfíbola (57-72% SiO₂) de hasta 4 km² de superficie, que intruyen en varias localidades, a la Formación Abanico (cerro Grande de Chacabuco, cerro Manquehue). Los 'stocks' del Cerro Manquehue presentan enclaves máficos microgranulares de anfíbola y plagioclasa. La química de estos intrusivos describe un patrón de diferenciación calcoalcalino de bajo a medio potasio, y son muy características sus elevadas razones La/Yb (8-27), anomalías de Eu positivas, altos contenidos de Sr (600 ppm) y bajos contenidos de Y (<10 ppm) y Sc (<12 ppm). Tales características son compatibles con su derivación de una fuente con granate como mineral residual estable (Wall et al., 1999). Según Sellés (1999) ésta correspondería a corteza oceánica en facies de anfibolita a eclogita.

Intrusivos hipabisales (34-19 Ma)

'Stocks', filones manto, cuellos volcánicos y diques, cuya composición varía desde gabros a andesitas de piroxeno, forman cuerpos de tamaño inferior a 8 km² y afloran, preferentemente, en el sector centro-oriental de Santiago. Dentro de este grupo se incluyen, ente otros, dioritas y andesitas de edad miocena-inferior, intruyendo a la Formación Abanico. Parte de estos intrusivos han sido referidos como Unidad Intrusiva II (Thiele, 1980), en general su edad y características químicas, son similares a las que

presentan las lavas de la Formación Abanico (Selles, 1999), y es posible que correspondan a sus conductos alimentadores. (Wall et al., 1999). Estas rocas se encuentran en puntos específicos del área de estudio.

4.2.2.3 Geología del Cuaternario

Depósitos de remoción en masa (Pleistoceno-Holoceno)

Depósitos originados por flujos de detritos, flujos de barro, deslizamientos, desprendimiento de bloques, reptación y hundimiento. En la zona, afloran en la loma Los Rulos. Dentro de este conjunto se incluyen los depósitos del portezuelo Lo Curro, sedimentos que incorporan bloques de hasta 10 m de diámetro y que, probablemente, representen depósitos de colapso gravitacional originados por deslizamiento de la ladera oriental del cerro Manquehue (Wall et al., 1999).

Depósitos fluviales antiguos (Pleistoceno-Holoceno)

Sedimentos no consolidados, asociados a cursos fluviales abandonados, constituidos por ripios, gravas, gravas arenosas clasto-soportadas, arenas y limos. En la zona se incluye depósitos fluviales aterrizados, ubicados entre 3 y 20 metros sobre el curso fluvial actual y que presentan una cobertura de suelo bien desarrollada (Wall et al., 1999).

Depósitos coluviales (Pleistoceno Superior-Holoceno)

Sedimentos no consolidados, ubicados en las faldas y al pie de los cerros, a la salida de quebradas y en pequeños valles intermontanos. Formados, principalmente, por clastos y bloques, mal seleccionados (escombros de falda). Constituyen mantos adosados a los cerros con pendientes de 4° a más de 10°, y presentan estratificación grosera paralela a las laderas (Wall et al., 1999).

Depósitos aluviales de piedemonte (Pleistoceno Superior-Holoceno)

Sedimentos no consolidados, ubicados en la desembocadura de quebradas mayores. Se encuentran, principalmente, en el borde precordillerano al oriente de Santiago, y forman abanicos aluviales, con pendientes de 3° a 6°. Están constituidos por una alternancia de depósitos de remoción en masa (flujos de detritos), con depósitos fluviales y mantos de crecida, que se interdigitan, y en parte, progradan sobre los depósitos aluviales de los ríos Maipo y Mapocho (Wall et al., 1999).

Depósitos aluviales (Pleistoceno Medio-Pleistoceno Superior)

Sedimentos no consolidados, que rellenan gran parte de las cuencas de Santiago. Forman parte de extensos abanicos aluviales coalescentes con suave pendiente hacia el oeste, provenientes de las hoyas hidrográficas principales. Hacia sus cabeceras, estos depósitos se interdigitan con depósitos coluviales y aluviales de piedemonte. Están formados por gravas y arenas, con sedimentos finos en menor proporción.

Antecedentes gravimétricos señalan espesores medios de 400-480 m en el sector norte del valle de Santiago (Wall et al., 1999). Se reconocen cinco sistemas aluviales, asociados al drenaje mayor, el río Maipo. Entre estos se encuentran los depósitos aluviales del río Mapocho donde se han identificado restos óseos de mamíferos pleistocenos.

4.2.2.4 Estructuras

En Chile Central, se presentan varias estructuras de falla, entre las que se destacan la falla San Ramón. Su rumbo es aproximadamente NS, variando en algunos tramos a NNW-SSE, y afecta a la Formación Abanico. La continuación de esta falla hacia el norte, describe la falla Pocuro (Carter y Aguirre, 1965; Rivano et al., 1993; Campbell, 2005).

Falla San Ramón

Esta falla se ubica en la parte Oeste de la zona de estudio. Las características geomorfológicas indican que la falla tendría un movimiento inverso (Rauld, 2002). Monta la Cordillera Principal sobre la Depresión Central (Rauld, 2002) deformando depósitos aluviales, coluviales y fluviales del Plioceno-Holoceno (Fock, 2005). Corresponde a una falla inversa de vergencia Oeste (Rauld, 2002; Charrier et al., 2005).

Falla Pocuro

Corresponde a la continuación al Norte de la falla San Ramón. En el bloque Oeste, la formación presenta estratos de rumbos N-S y manteos suaves de 25-30°E, mientras que el bloque del Este, los manteos son fuertes, verticales a subverticales (Carter y Aguirre, 1965; Rivano et al., 1993; Campbell, 2005).

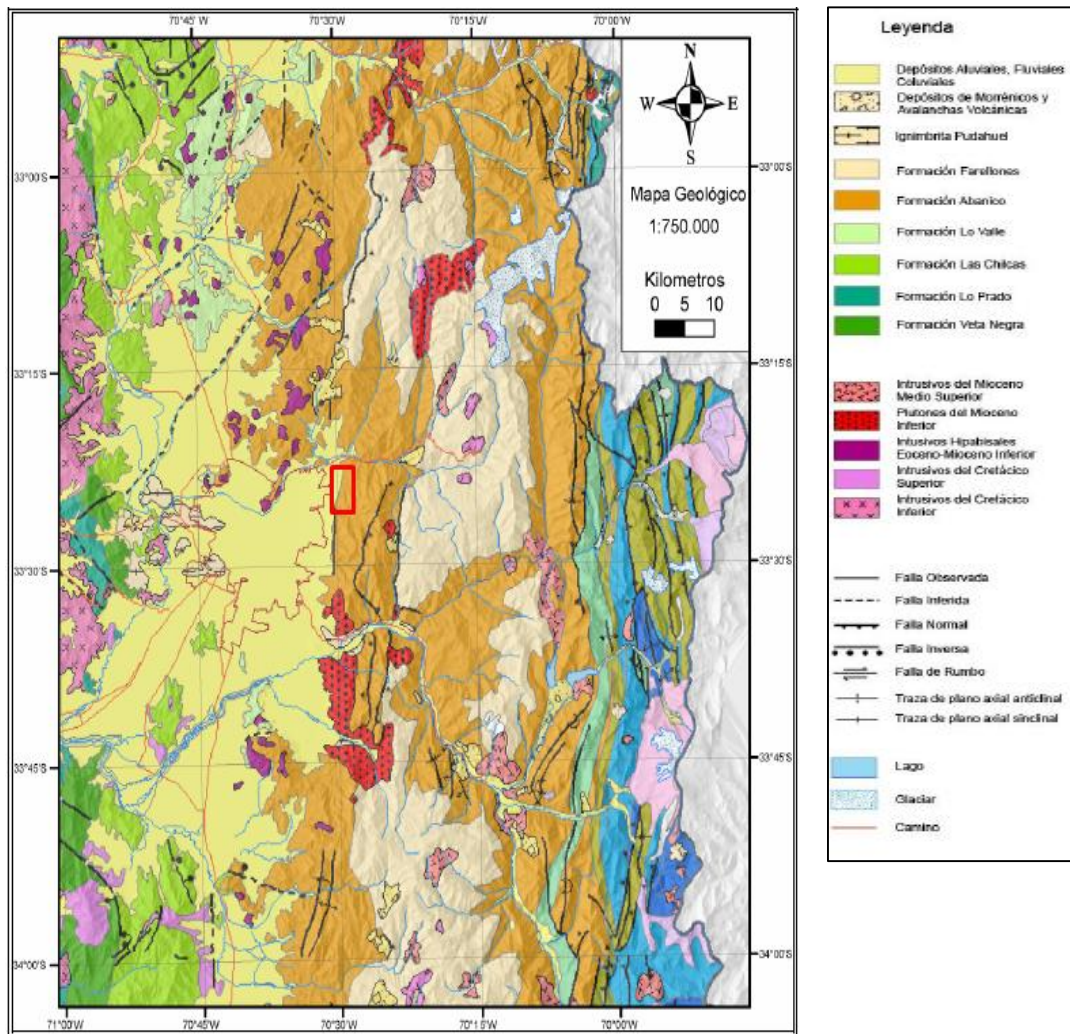


Figura 4.2. Mapa Geológico Regional (Fock, 2005)

4.3 Descripción local del área de estudio.

4.3.1 Geomorfología

La zona de estudio se ubica en el límite de la Depresión Intermedia y la Cordillera Principal, abarcando los faldeos cordilleranos de la zona nororiente de Santiago (Figura 4.3).

En el área está presente la hoya hidrográfica de la Quebrada de Apoquindo, que pertenece al Parque San Carlos de Apoquindo, la cual tiene una superficie de 16 Km². Hacia el norte existen hoyas hidrográficas más pequeñas que llegan hasta el Río Mapocho que tienen una superficie de 4,8 Km². La zona en su totalidad tiene una superficie de 20,8 Km² que está delimitada por cordones montañosos y zonas urbanas. Hacia el sur limitada por el cerro Los Rulos (1024 m.s.n.m) y la Quebrada de San Ramón, al norte por el Río Mapocho y finalmente al oeste por el cerro Apoquindo (883

m.s.n.m). También se encuentran los cerros Alto del Naranjo (1460 m.s.n.m) y Alto las Viscachas (1861 m.s.n.m), siendo este último el más alto de la zona.

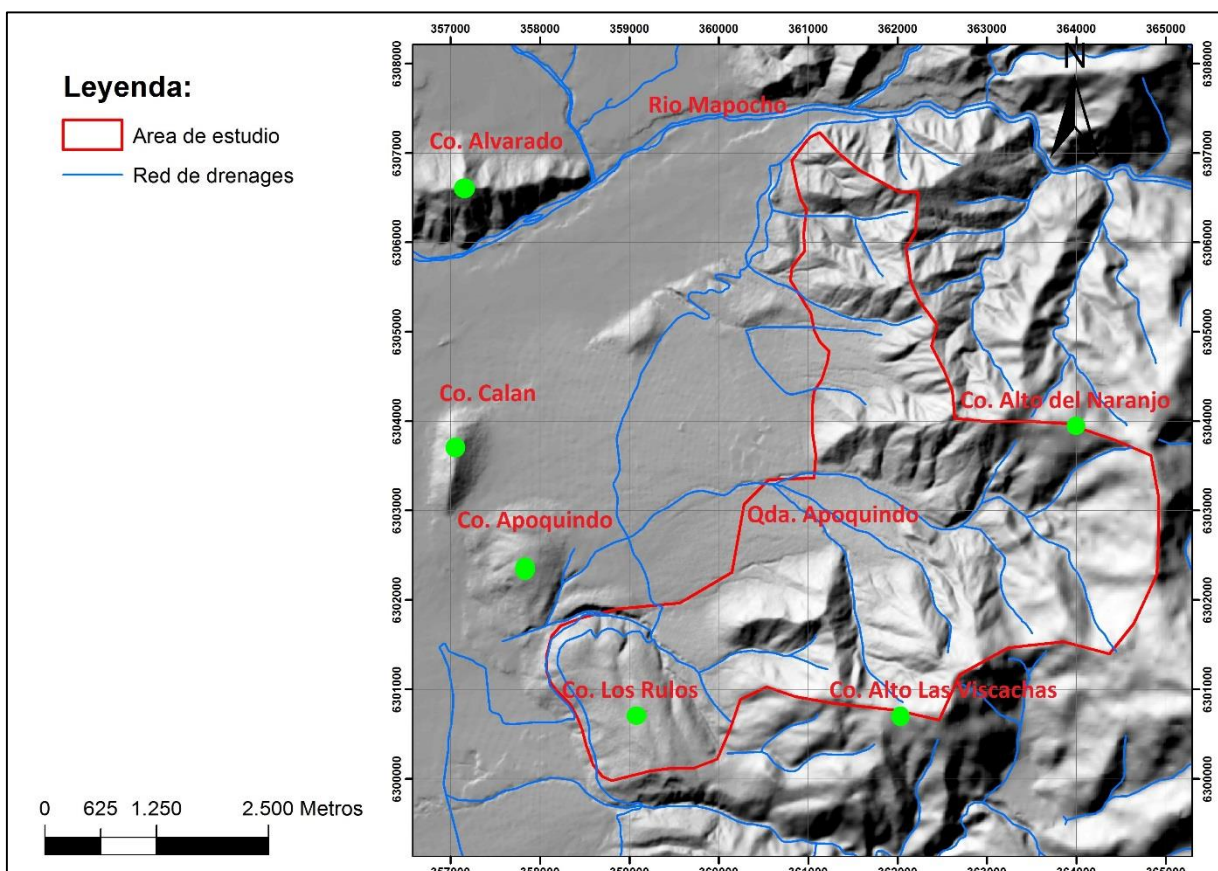


Figura 4.3. Modelo digital, zona de estudio demarcada en rojo, se muestran principales quebradas y altos topográficos. Sistema de coordenadas UTM WGS-84 (zona 19S)

Los aspectos geomorfológicos más relevantes a considerar para la generación de remociones en masas, corresponden a las pendientes de las laderas, sus alturas, exposición al sol y geometría asociada, las cuales se obtienen a partir de un modelo de elevación digital (DEM).

A partir del DEM, se obtiene un mapa de pendientes (Figura 4.4). En la metodología a aplicar, se indica que los sectores con pendientes inferiores a 10° no serán considerados para la evaluación de la susceptibilidad, se identifican en la misma figura estas áreas por colores grises.

La quebrada de Apoquindo y quebrada Los Almendros descienden en sentido este-oeste, sin embargo quebradas pequeñas alimentan la quebrada principal (quebrada de Apoquindo) con orientación NNW-SSE. La zona de interés presenta una topografía relativamente suave, las pendientes oscilan entre los 10° y 48° y las alturas varían entre los 950 m.s.n.m y 1950 m.s.n.m. Existiendo zonas planas en los sectores más altos, en el área urbana y en la salida de las quebradas donde las pendientes son menores a 10° .

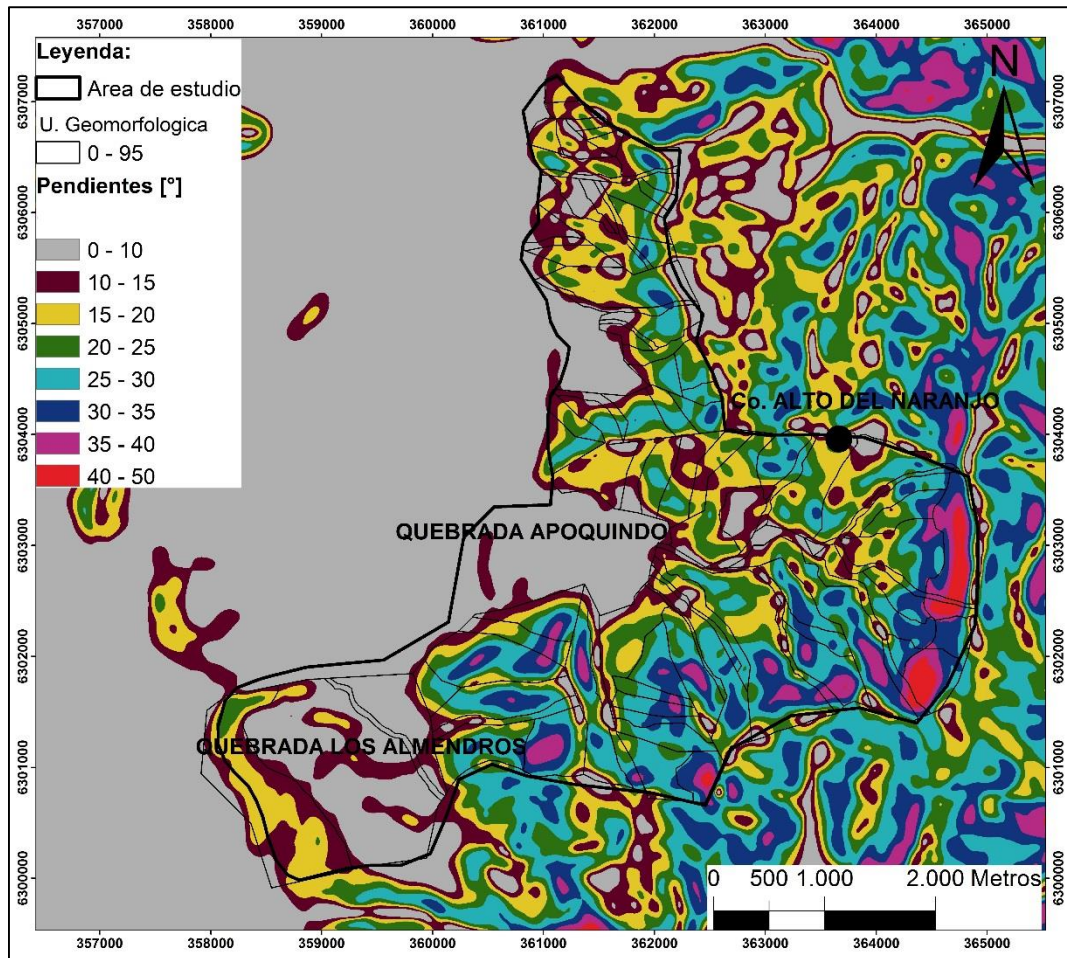


Figura 4.4. Distribución de pendientes de laderas en área de estudio. Elaboración propia, ArcGis 10.

Para determinar los distintos grados de exposición al sol en las laderas, se elabora un mapa de aspecto a partir del DEM (Figura 4.5). En él se observa que la orientación mayoritaria de las laderas es al suroeste, noroeste y oeste, en menor cantidad al norte, noroeste y sur. Este es un factor que influye en la cantidad de vegetación que puede encontrarse en la zona, observándose que laderas que miran hacia el norte, noroeste y al oeste tienen menor cantidad de vegetación que el resto. El efecto es generado porque el sol pasa por el norte de este a oeste, impidiendo de cierta manera que la tierra conserve una cantidad importante de humedad, condición fundamental para el crecimiento de vegetación. Con respecto al valor de la pendiente, a mayor pendiente menor es la vegetación.

El escurrimiento de la quebrada Apoquindo y afluentes es de tipo esporádico. Viéndose afectada por aguas lluvias, donde generalmente aumentan sus frecuencias en épocas invernales. La longitud del cauce de la quebrada principal es de 4 km aproximadamente y su inclinación promedio es de 15° (Figura 4.6).

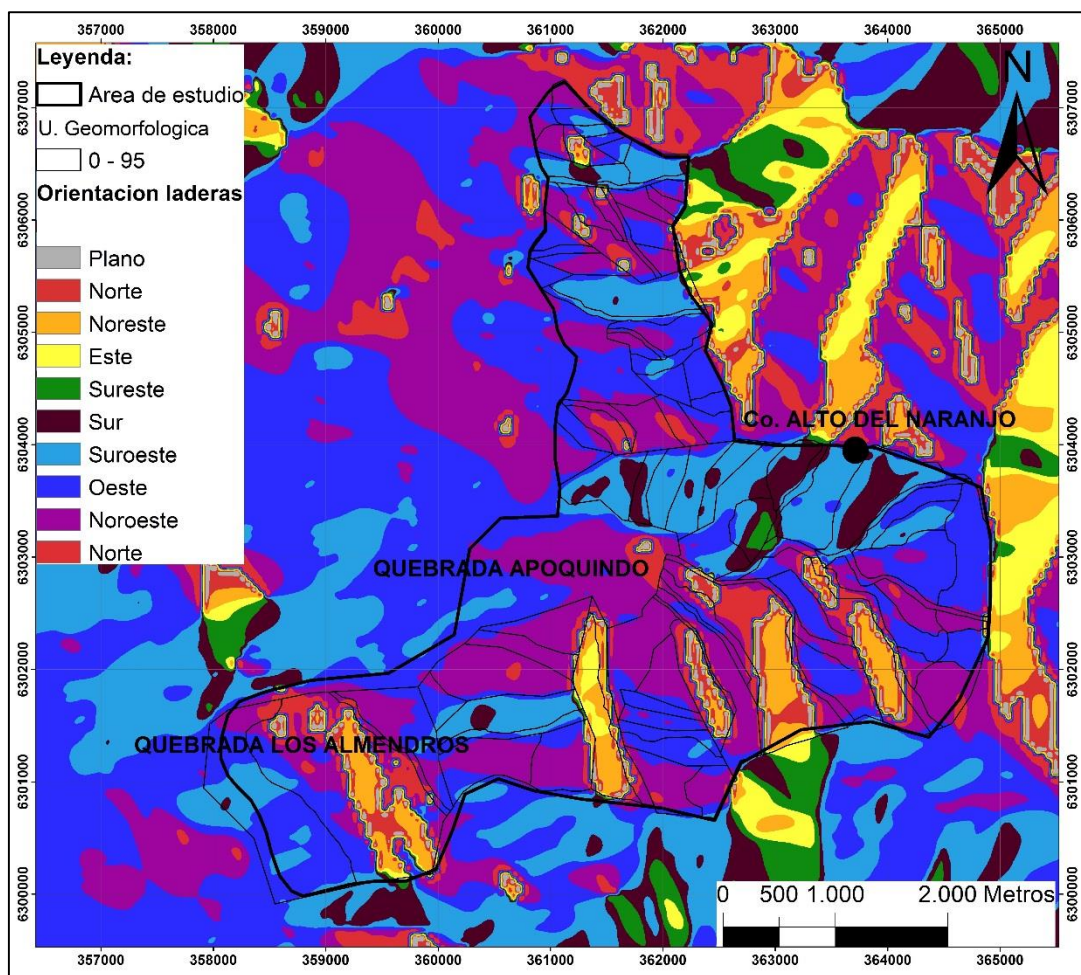


Figura 4.5. Distribución de aspecto (orientación de laderas). Elaboración propia, ArcGis 10.



Figura 4.6. Cauce principal de la hoya hidrográfica de la Quebrada de Apoquindo.

4.3.2 Geología

En el área de estudio se reconocen rocas estratificadas volcánicas asignadas a la parte inferior de la Formación Abanico descrita por Wall et al. (1999), rocas intrusivas dioríticas y andesitas descritas por Wall et al. (1999) y Thiele (1980), depósitos fluviales-aluviales, depósitos coluviales, remociones en masa y escombros de falda (Figura 4.18).

A continuación se describen las unidades geológicas definidas en la zona de estudio y sus características geotécnicas principales:

4.3.2.1 Unidades de roca

-Formación Abanico (Tsa)

Esta unidad aflora en toda la zona de estudio. Se encuentra compuesta por lavas, brechas volcánicas y tobas (Figura 4.7). En la zona central de la hoya hidrográfica de Apoquindo (quebrada principal), la Formación Abanico está intruída por filones de composición diorítico que presenta una orientación general N-S.

Corresponden a rocas de alta resistencia en estado fresco. En terreno se estimó su resistencia a la compresión entre 100-250 (MPa) (R5), levemente meteorizada (Grado II), muy fracturada con estructuras abiertas formando estructuras en cuña y bloques de

diferente tamaño que al caer se acumulan en las laderas de la quebrada y en la quebrada misma. La condición de las discontinuidades es mala, su geometría es plana y están rellenas de ceolitas. Finalmente su GSI está entre 50-60.

Cabe mencionar que el macizo descrito se encuentra en un salto de agua seco, ubicado en la parte central de la quebrada de Apoquindo. La potencia del afloramiento es de 8 m aproximadamente (Figura 4.8).



Figura 4.7. Afloramiento de la Formación Abanico.



Figura 4.8. A la izquierda se observa caída de roca; a la derecha, macizo rocoso descrito, ambos corresponden a la Formación Abanico.

-Unidad de intrusivos hipabisales (Mi)

Esta unidad aflora en puntos específicos en la zona central de la hoya hidrográfica principal. Está compuesta por diques intrusivos dioríticos, que intruyen a la Formación Abanico, éstos corresponden a la Unidad Intrusiva II, definidos por Thiele (1980) (Figura 4.9 y 4.10).

Estos intrusivos son de color claro, de grano medio y composición granodiorítica. En general se encuentran moderadamente meteorizados (Grado III); muy fracturados, generan bloques de roca que al caer se acumulan en las laderas de las quebradas; su resistencia es débil, en terreno se estimó una resistencia a la compresión entre 5-25 (MPa) (R2) y su GSI está entre 45-50. El macizo descrito se encuentra a 100 m aproximadamente del acceso al Parque San Carlos de Apoquindo en la ladera norte y su potencia es de 10 m aproximadamente (Figura 4.9).



Figura 4.9. Macizo descrito, perteneciente al intrusivo diorítico.



Figura 4.10. A la izquierda se observa caída de rocas en ladera; a la derecha, bloque de roca en quebrada principal, ambos corresponden al intrusivo diorítico.

4.3.2.2 Unidades de suelo

-Depósitos aluviales-fluviales (Qaf)

Estos son intercalaciones de depósitos aluviales y fluviales. Se pueden apreciar en cortes de las quebradas, las cuales varían su espesor de 2-3 m. Granulométricamente son depósitos de grava-arenosa con algunos bloques que llegan hasta 1 m de diámetro y de matriz limo arenosa. El material está compuesto por partículas subangulosas, de composición volcánica perteneciente a la Formación Abanico y en algunos casos se encuentran clastos del intrusivo diorítico (Figura 4.11).



Figura 4.11. Deposito aluvial-fluvial, a la derecha se aprecian bloques mayores.

-Depósitos abanicos aluviales (Qa)

Son depósitos aluviales de granulometría gravo-arenosa con matriz limo-arcillosa de color pardo, que se encuentran rellenando el pie de las quebradas y alcanzando zonas urbanas. Sus clastos son monomicticos de composición lavas andesiticas, subangulosos, de esfericidad baja y de tamaño de 1-50 cm (Figura 4.12). Topográficamente generan un relieve suave y de poca pendiente.



Figura 4.12. Depósito de abanico aluvial.

-Depósitos coluviales (Qc)

Acumulación de bloques, grava y arena con escasa matriz. Se encuentran en zonas de alta pendiente, en laderas de cerros y en zonas urbanas. Son depósitos de baja compactación, que se concentran al pie de afloramientos rocosos y en equilibrio inestable. Litológicamente corresponden a lavas y brechas pertenecientes a la Formación Abanico (Figura 4.13).



Figura 4.13. Deposito coluvial, en zona de alta pendiente.

-Escombros de falda

Depósito que ha sido reconocido en toda el área de estudio y presenta espesores de 0,5-1,5m aproximadamente. Compuesto por bloques de hasta 2 m de diámetro, algo de grava fina en una matriz limo-arenosa, de color pardo y plasticidad media, y en otros sectores por arenas finas de color negro y plasticidad baja (Figura 4.14). Se encuentran distribuidos las laderas de los cerros y valles de pequeñas pendientes adyacentes a quebradas. Su litología corresponde a lavas de la Formación Abanico y en menor cantidad al Intrusivo diorítico. El estado suelto en que se encuentran los tiene sujetos a un retrabajo del material, ya sea producto de aceleraciones sísmicas, lluvias o bien por efectos gravitatorios.



Figura 4.14. Escombros de falda. A la izquierda bloques de 0,5-1 m de diámetro, a la derecha matriz limo-arenosa.

-Remociones en masa recientes (Q_{rmr})

Son depósitos gravitacionales que se encuentran distribuidos en las laderas de los cerros y en las quebradas. Se observaron caídas de rocas (Figura 4.16), con bloques de tamaño desde los 20 cm a 3 m, pertenecientes a la Formación Abanico e intrusivos. Se observaron también flujos de detritos que rellenan los cauces actuales, con depósitos matriz soportados de granulometría tipo arena media-fina, con bloques angulosos de hasta 1 m de diámetro y algo de grava fina o gravilla (Figura 4.17). Finalmente se reconoció deslizamiento de rocas en forma de cuña, reconocidas en los macizos ya descritos anteriormente y deslizamiento de suelos locales (Figura 4.15).

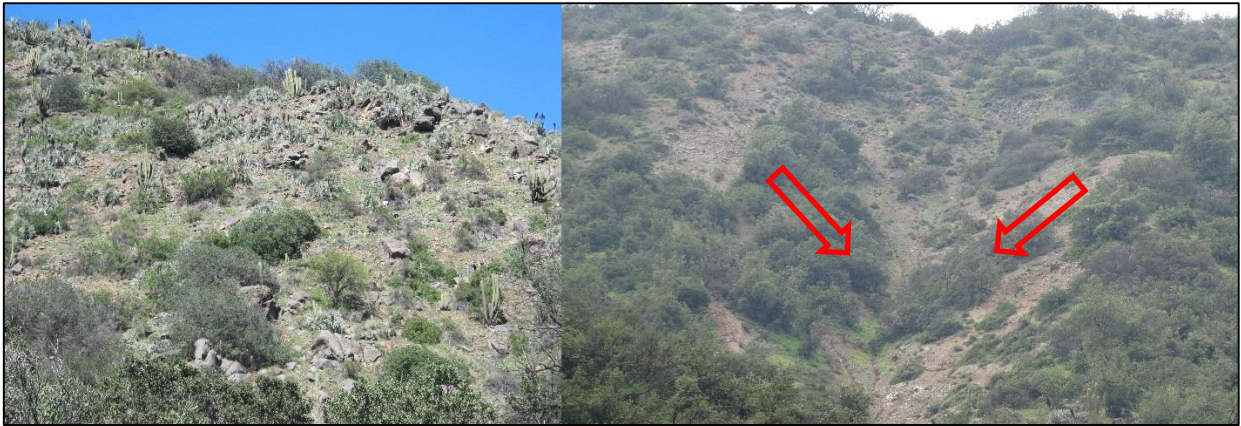


Figura 4.15. A la izquierda se observan caídas de rocas en ladera; a la derecha, deslizamiento de suelo superficial.

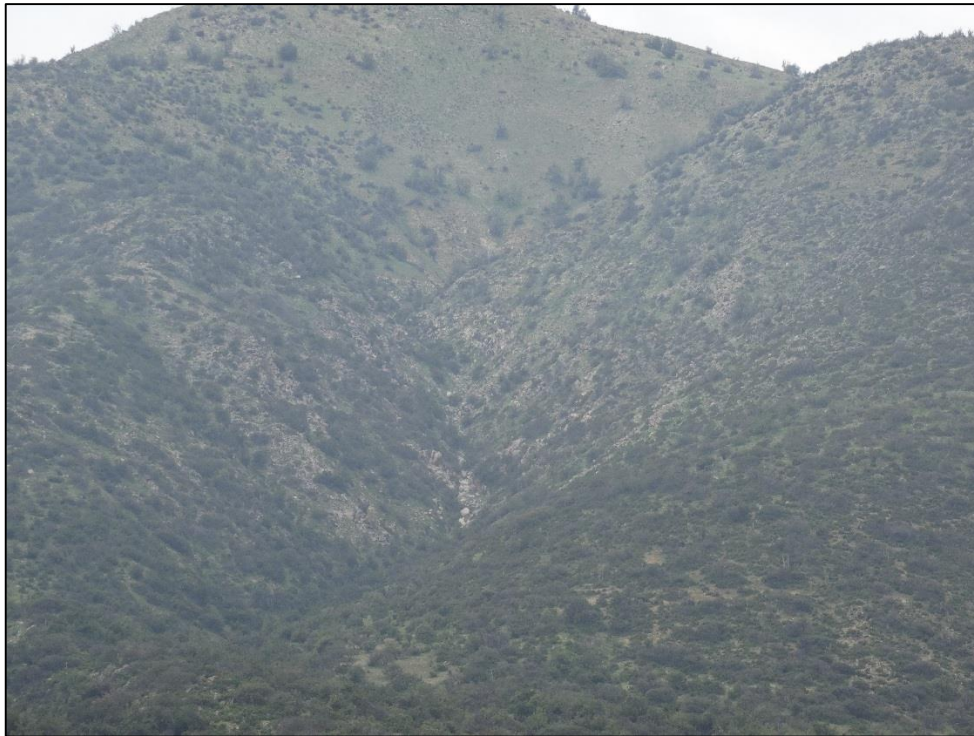


Figura 4.16. Quebrada con aporte de material detrítico



Figura 4.17. Depósito de flujo de detritos.

-Relleno sedimentario del Río Mapocho (Rsm)

Esta unidad se reconoce en altos topográficos que corresponden a los cerros Calan, Apoquindo y Los Rulos; en su base están compuestos por depósitos de gravas fluviales, con imbricación que señala aportes desde el Río Mapocho. Hacia la parte superior pasan en forma transicional mixta a depósitos de flujos de detritos intercalados con niveles de arenas, gravilla y limos. Estos últimos son cubiertos por depósitos de flujos de detritos y barro. Esta serie sedimentaria es consistente con una migración y encajonamiento hacia el norte del cauce de Río Mapocho. (Rauld, 2011).

En los cerros Calan y Apoquindo se aprecian depósitos de grava y bolones bien redondeados e imbricados, cortados y basculados por una falla inversa. En el cerro Los Rulos aflora una falla que monta rocas volcánicas, lavas y tobas, de la Formación Abanico sobre depósitos aluviales, angulosos y mal seleccionados (Rauld, 2011).

El conjunto de cerros Calan, Los Rulos y Apoquindo corresponden a una misma estructura que se ha desarrollado a partir de la actividad de la falla San Ramón y que posteriormente fue disectada por erosión de las quebradas que descienden desde el este (Rauld, 2011).

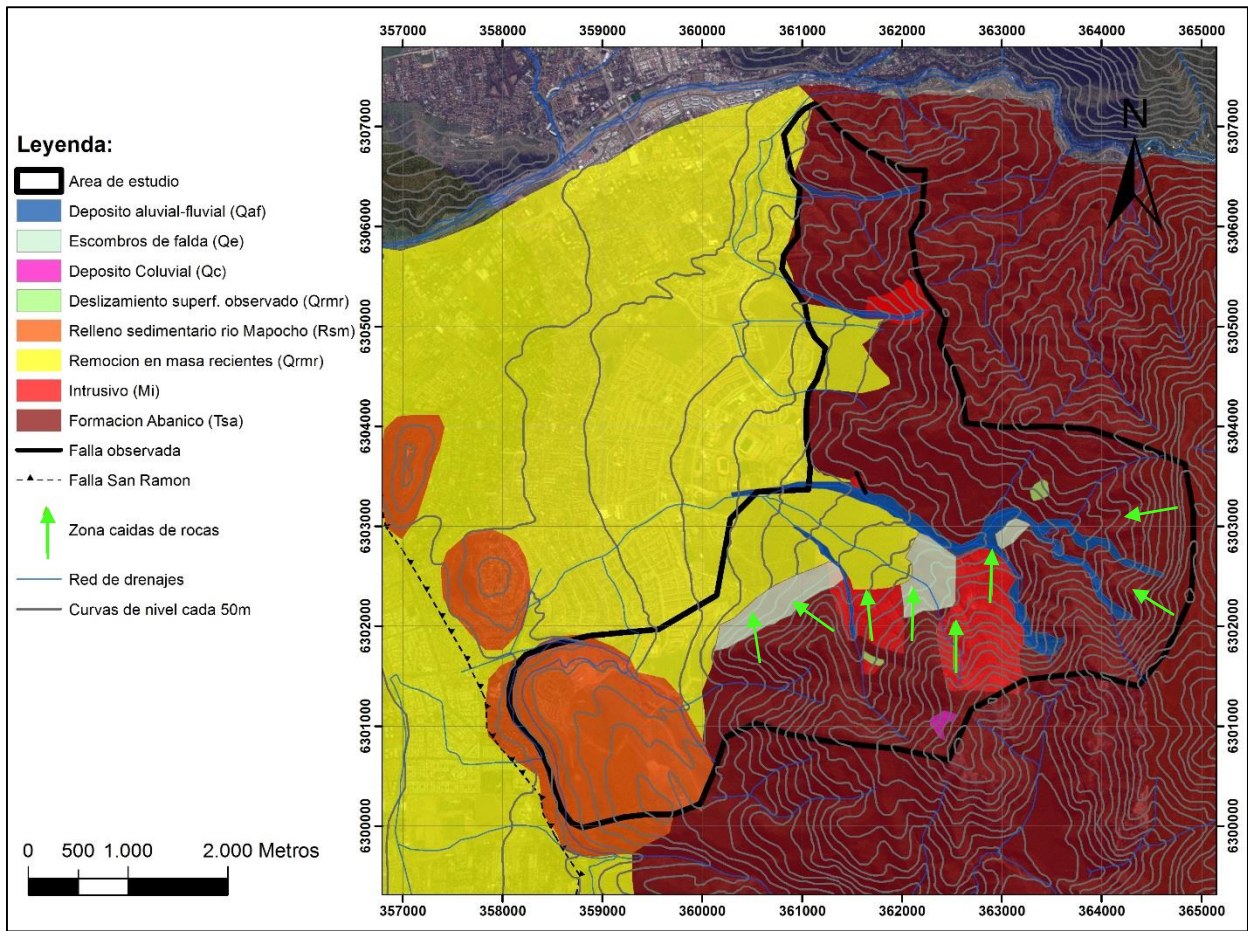


Figura 4.18. Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de Rauld, 2011.

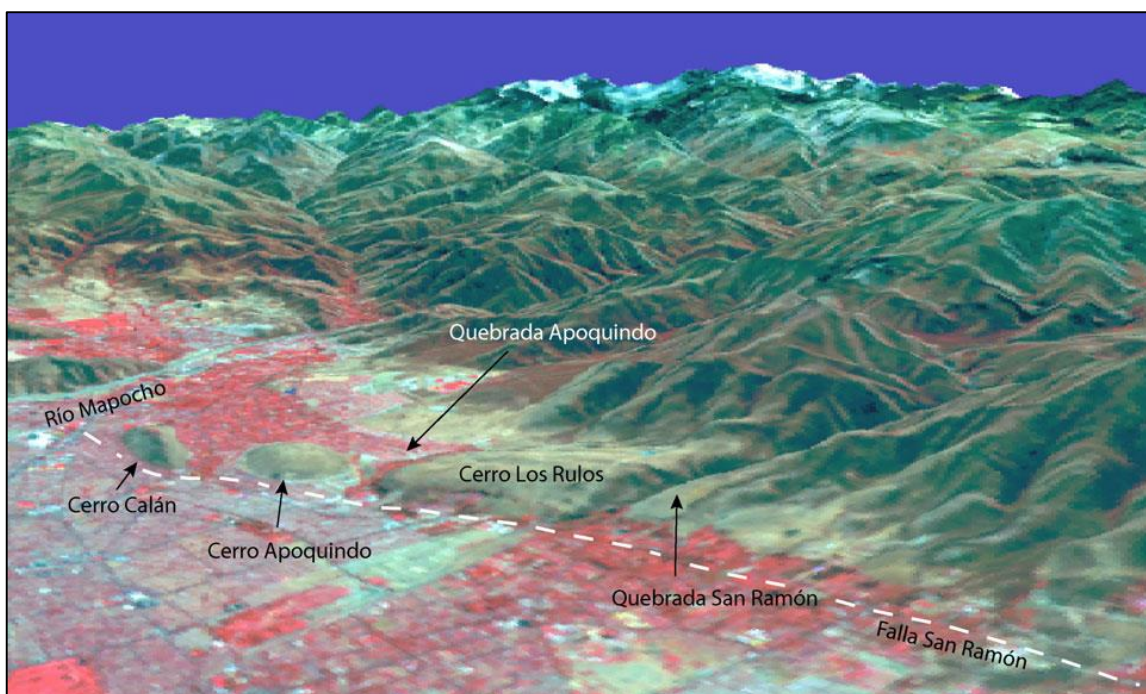


Figura 4.19. Perspectiva virtual de la zona. Se aprecia la estructura formada por los cerros Calán, Apoquindo, Los Rulos y Falla San Ramón. Tomado de Rauld, 2002.

4.3.3 Estructuras

4.3.3.1 Estructuras mayores

La mayor estructura corresponde a la Falla San Ramón (FSR) (Figura 4.19), que corresponde a un sistema de fallas de mecanismo principal inverso, que limita el valle de la Depresión Central, con el frente cordillerano. La traza de la falla se ha definido a partir del estudio de escarpes morfológicos y rasgos estructurales asociados a la misma, entre los ríos Mapocho y Maipo (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011). El área de estudio se encuentra a 3.5 Km al oriente de la traza de la FSR.

De acuerdo a Armijo et al. (2010) y Rauld (2011) al sur del río Mapocho, la traza principal de la FSR se encuentra directamente a los pies de los cerros Calán y Apoquindo, con una dirección NNO-SSE, donde la falla se encuentra a un cota de 720 m.s.n.m. Al sur de la quebrada San Ramón su rumbo es aproximadamente NS.

4.3.3.2 Estructuras menores

Corresponden a estructuras medidas en dos puntos de la zona de estudio y definen sets estructurales.

El primer macizo descrito corresponde a lavas de la Formación Abanico (Figura 4.8), ubicado en un salto de agua que se encontraba seco. La pared rocosa tiene una potencia de 8 m aproximadamente, donde se identificaron cinco sets de diaclasas principales que se muestran en la tabla 4.1. Donde de acuerdo a lo observado en terreno los sets 1 y 2 son los que generan deslizamiento de roca en forma de cuñas.

Tabla 4.1. Sets de discontinuidades en el área de estudio en la Formación Abanico

| N° Set | Dip (°) | DipDir (°) |
|--------|---------|------------|
| 1 | 86 | 65 |
| 2 | 60 | 320 |
| 3 | 10 | 252 |
| 4 | 70 | 20 |
| 5 | 25 | 88 |

El segundo macizo descrito corresponde a un intrusivo diorítico, ubicado a 100 m del acceso al Parque San Carlos de Apoquindo. El afloramiento tiene una potencia de 10 m aproximadamente y se identificaron cinco sets de diaclasas principales (Figura 4.20), se muestran en la tabla 4.2. También se observó la existencia de una falla con rumbo N110E y manteo 90°, la cual está alterando la parte este del macizo, donde el material está muy meteorizado y se disgrega fácilmente como el maicillo.

Tabla 4.2. Sets de discontinuidades en el área de estudio en Intrusivo diorítico

| N° Set | Dip(°) | DipDir (°) |
|--------|--------|------------|
| 1 | 80 S | 210 |
| 2 | 90 | 336 |
| 3 | 22 | 155 |
| 4 | 68 | 300 |
| 5 | 80 | 17 |



Figura 4.20. Macizo descrito, correspondiente al Intrusivo diorítico.

4.3.4 Vegetación

En la zona de estudio es posible identificar los denominados bosques o matorrales esclerófilos, los cuales están íntimamente ligados a zonas templadas, con estaciones secas prolongadas. Estos bosques se caracterizan por tener una vegetación que no pierde sus hojas en invierno (Gajardo, 1994).

Los arbustos y árboles abarcan toda la extensión del área de estudio, acentuándose en laderas que miran al sur y en las quebradas donde pasan flujos esporádicos de agua, observándose árboles que llegan hasta los 3 m de altura y gran densidad de arbustos. En partes donde las cotas superan los 1500 m.s.n.m o tienen alta pendiente, y laderas que miran al norte o al oeste, la vegetación disminuye o solo se encuentran arbustos pequeños.

Los arbustos o árboles que predominan en la zona son, los Colliguayes (*Colliguaja odorifera*), Litres (*Litrea caustica*), Espino (*Acacia caven*), Chilcas (*Nardophyllum lanatum*), Tevos (*Ratanilla trinervis*), Quisco (*Echinopsis chelensis*), Pulla (*Pulla verteroniana*), Peumos (*Criptocaria alba*) y Quillayes (*Quillaja saponaria*), entre otros (Figura 4.21) (www.asociacionparquecordillera.cl).



Figura 4.21. Vegetación de la zona. A la izquierda Quillay; a la derecha, Quisco y Litres.

4.3.5 Clima

Las características climáticas de Chile son condicionadas por dos principales factores atmosféricos: el Anticiclón Subtropical Pacífico Sureste y sistemas frontales asociados a depresiones migratorias extratropicales, estos factores condicionan directamente el régimen pluviométrico en Chile Central (Miller, 1976).

El clima de la región central de Chile, puede ser clasificado como mediterráneo, caracterizado por una estación cálida y seca en verano y lluviosa durante el invierno (Miller, 1976). Dentro de esta clasificación general, para la Región Metropolitana, se distinguen dos subtipos climáticos:

- Clima templado cálido con estación seca prolongada.
- Clima templado cálido con estación seca de 4 a 5 meses.

En la zona de estudio se presenta el clima templado cálido con estación seca prolongada, lo que implica un periodo seco de 7 a 8 meses con precipitaciones bajo los 40 mm. Las precipitaciones se concentran entre los meses de Mayo y Septiembre, y por sobre los 1500 m.s.n.m., estas precipitaciones son principalmente nieve. La humedad alcanza un 64% como promedio anual, mientras que las amplitudes térmicas varían, desde, 21.6°C en Enero (temperaturas media mensual), al mes más frío Junio con 7.5°C. En Santiago las precipitaciones alcanzan un promedio anual de 258.2 mm, concentradas entre Mayo y Septiembre (Anuario 2014, Dirección Meteorológica de Chile).

Para la zona precordillerana las precipitaciones aumentan con la altitud, con un gradiente que se ha calculado de 30 mm/100m en valor medio anual (Aceituno et al., 1988). La altitud de la línea de nieve en las tormentas de invierno varía típicamente entre los 1500 y 2900 m.s.n.m., con un valor medio de 2100 m.s.n.m. (Garreaud y

Ruttlant, 1996), en la zona de estudio la caída de nieve es muy poca por tener altura máxima de 1800 m.s.n.m.

La presencia del Fenómeno de El Niño genera una mayor cantidad de precipitaciones, y con esto la zona central de Chile se caracteriza por presentar una gran variación interanual en las precipitaciones invernales y primaverales, con sequías intensas y frecuentes inundaciones durante los años lluviosos. La ocurrencia de eventos de remociones en masa en la zona oriente de Santiago, muestra un claro aumento durante los años que presentan el Fenómeno de El Niño (García, 2000; Sepúlveda et al., 2006).

4.3.6 Sismicidad

El margen de subducción chileno es un margen convergente, que se caracteriza por una alta tasa de sismicidad, lo que ha provocado un gran número de sismos en el último siglo en todo el país. Como por ejemplo el del Maule en 2010 de Mw 8.8 y el de Valdivia en 1960 de Mw 9.5. En la zona central de Chile se pueden distinguir los siguientes tipos de sismos: interplaca, intraplaca de profundidad intermedia, intraplaca continental e intraplaca oceánica (outer-rise).

En un contexto global, según la norma NCH 433, Of. 96, la zona de estudio se enmarca dentro de la zona sísmica de subducción definida como zona 2, asociada a aceleraciones sísmicas máximas de 0,2g (Figura 4.22). Por lo tanto existe un desarrollo de sismicidad superficial (0-20 km de profundidad) en el flanco occidental de la Cordillera de Los Andes de Chile Central entre los 70°S y 71° S de latitud (Barrientos et al., 2004).

El último gran sismo, con epicentro en la zona central, registrado en la ciudad de Santiago corresponde al terremoto de marzo de 1985, de magnitud Mw=7.8, de tipo interplaca de bajo ángulo, con epicentro a unos 20 km costa afuera entre Valparaíso y Algarrobo, a 15 km de profundidad (Comte et al., 1986). Las coordenadas del sismo fueron 33.13°S, 71.87°W (National Earthquake Information Service, USA).

A partir de un escenario similar al terremoto de 1985, Fernández (2001) establece las intensidades sísmicas esperadas debido a las condiciones del suelo en el área de Til Til- Santiago, específicamente en el relleno sedimentario. De acuerdo a este trabajo la zona de estudio se encuentra en un área de peligrosidad sísmica media asociada a las intensidades sísmicas de 7.0 a 7.5 grados.

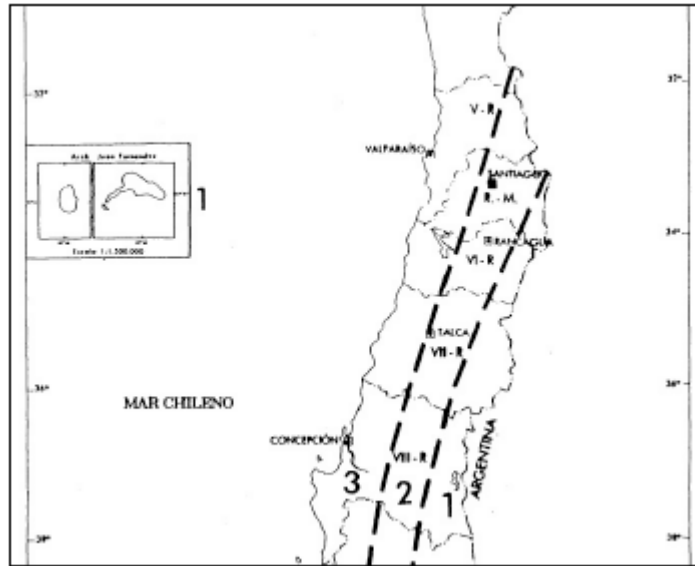


Figura 4.22. Zonas sísmicas para Chile Central (NCh 433, OF.96.)

Los terremotos superficiales generan altas intensidades sísmicas que podrían ascender a los 9 grados en la escala MSK en la zona epicentral, cuando la magnitud del sismo bordea los 7 grados. Los sismos más importantes de este tipo son el de Las Melosas del 4 de Septiembre de 1958, fue una secuencia de 3 sismos en un intervalo de 6 minutos, todos con profundidad focal estimada en 8 km y de magnitudes calculadas de $M_w=6.3$. Y el sismo de Curicó, el 30 de Agosto de 2004 con magnitud de $M_w=6.2$ (Farias, 2007).

En la Figura 4.23 se muestra la ubicación del área de estudio con respecto a la Falla San Ramón definida por Armijo et al. (2010), donde la falla pasa por la zona oeste del área de interés. Investigaciones recientes han evidenciado que la FSR es una falla activa (Armijo et al., 2010; Rauld, 2011). Estudios geomorfológicos y estructurales de los depósitos y rocas deformadas y afectadas por la falla, han permitido estimar tasas de deslizamientos promedio del orden ~ 0.13 mm/año - 0.40 mm/año. A escala de los últimos años, estos resultados indican que se trata de una falla que representa un peligro potencial para la ciudad de Santiago (Armijo et al, 2010; Rauld, 2011). Dada a la cercanía con la zona de estudio, las aceleraciones asociadas a la sismicidad de la FSR podrían tener un efecto importante en el área.

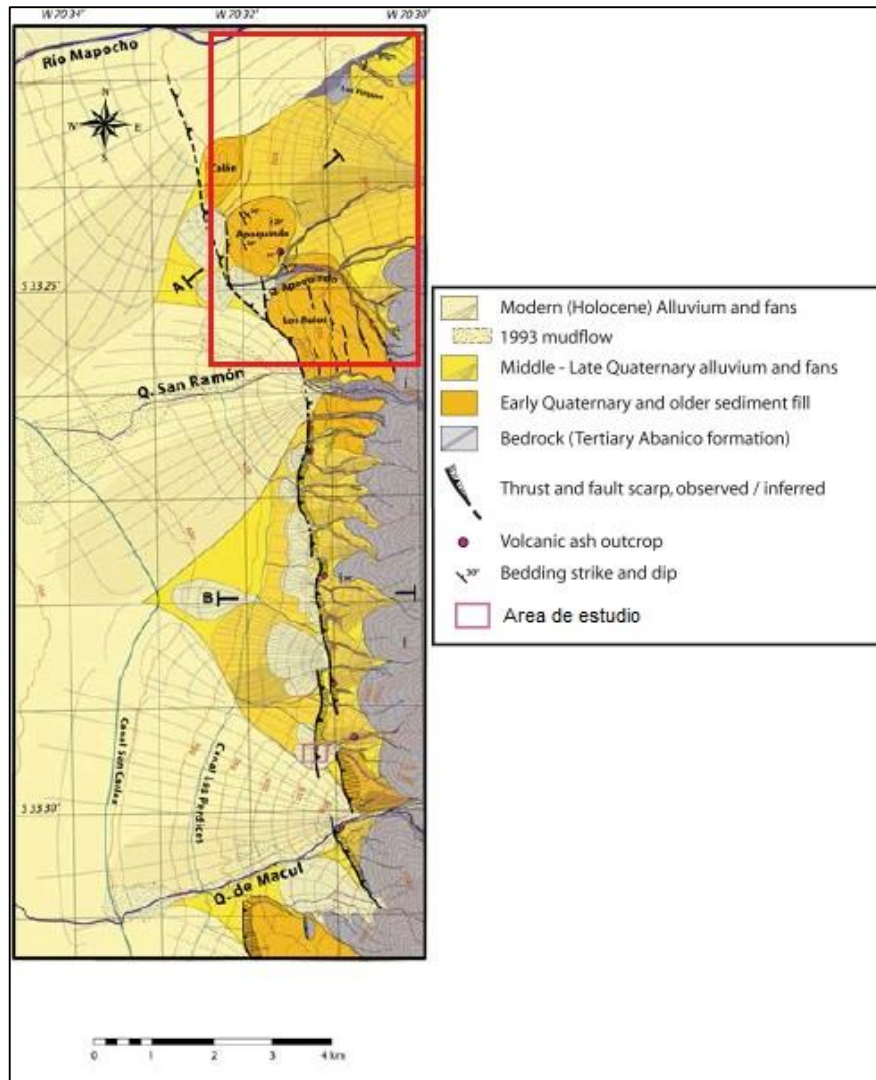


Figura 4.23. Trazo de la Falla San Ramón. La falla corta unidades geomorfológicas aluviales y de piedemonte en general, de edad cuaternaria, zona de estudio enmarcada en rojo. Modificado de Rauld 2002 y Armijo et al., 2010, en "Evaluación del peligro sísmico zona oriente de Santiago" Departamento de Geología, Universidad de Chile, 2011.

Métodos probabilísticos utilizados por Leyton et al. (2010), obtienen como resultado valores de aceleración horizontal máxima de 0,55g para un periodo de retorno de 475 años y de 0,72g para 1950 años, en la zona urbana de Santiago, y ensayos realizados por Pérez et al. (2014), arrojan valores promedio de aceleración horizontal máximos de 0.7-0.8g para un sismo de magnitud $M_w=6.9$ en la Falla San Ramón.

En las figuras 4.24 y 4.25 es posible verificar que la fuente interplaca es la que modula el peligro sísmico en Chile central, produciendo los mayores valores de la aceleración horizontal máxima en la costa. Pero, tanto la fuente intraplaca de profundidad intermedia como la cortical tienen una gran influencia en la zona de Santiago, lo que redundaría en un aumento de los valores esperados en la zona del valle central y precordillerana de la Región Metropolitana (Leyton et al., 2010).

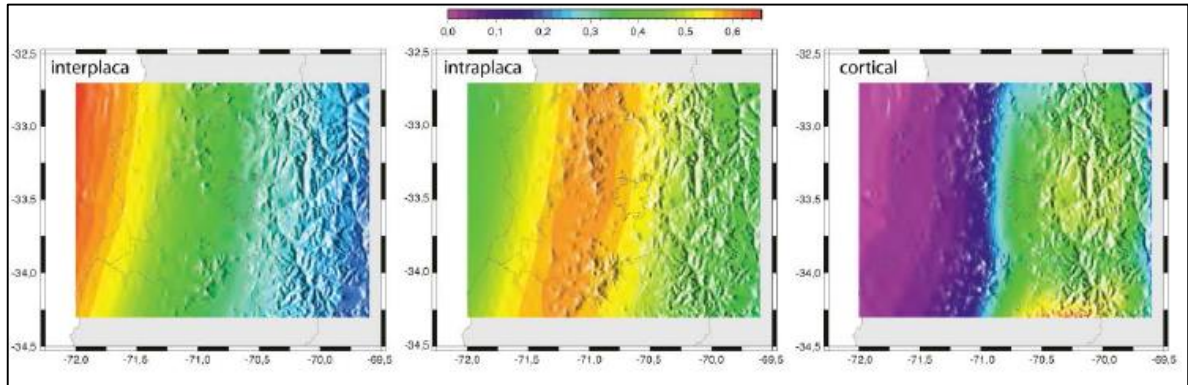


Figura 4.24. Aceleración horizontal máxima esperada para un sismo de fuente interplaca, intraplaca y cortical, con periodo de retorno de 475 años, el color es proporcional al PGA (en g), Leyton et al., 2010.

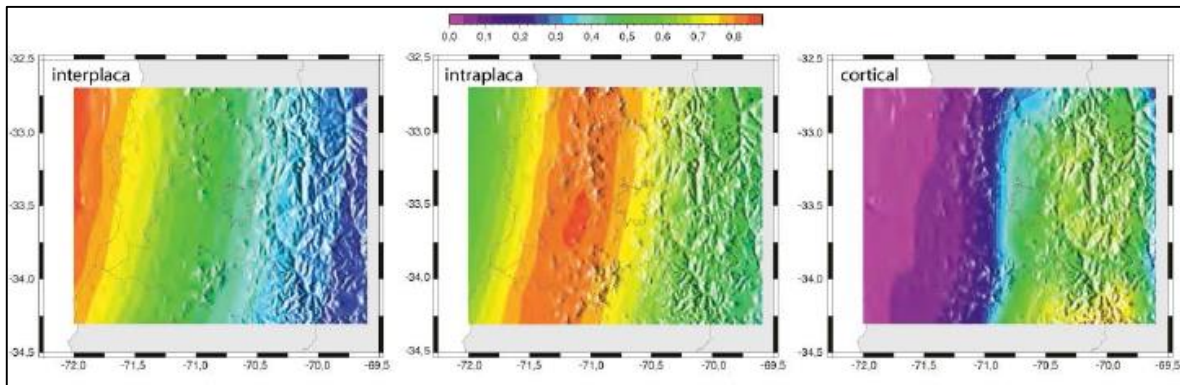


Figura 4.25. Aceleración horizontal máxima esperada para un sismo interplaca, intraplaca y cortical, con periodo de retorno de 1950 años, el color es proporcional al PGA (en g), Leyton et al., 2010.

Para estimar las capacidades sismogénicas de la Falla San Ramón, mediante aproximaciones determinísticas, se utilizaron regresiones hechas con datos de todo el mundo, las cuales relacionan el largo de ruptura observado en superficie, los desplazamientos promedios en la falla y la magnitud máxima esperada. Considerando una magnitud máxima esperada de $M_w=7.4$, se ha estimado el peligro asociado a la Falla San Ramón en la Región Metropolitana. Como lo muestra la Figura 4.26, donde las aceleraciones horizontales máximas alcanzan valores entre 37%g y 70%g, en particular en la zona de estudio alcanzando máximos de 47%g y 70%g, es decir un grado alto de peligro (Evaluación del peligro sísmico zona oriente de Santiago, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 2011).

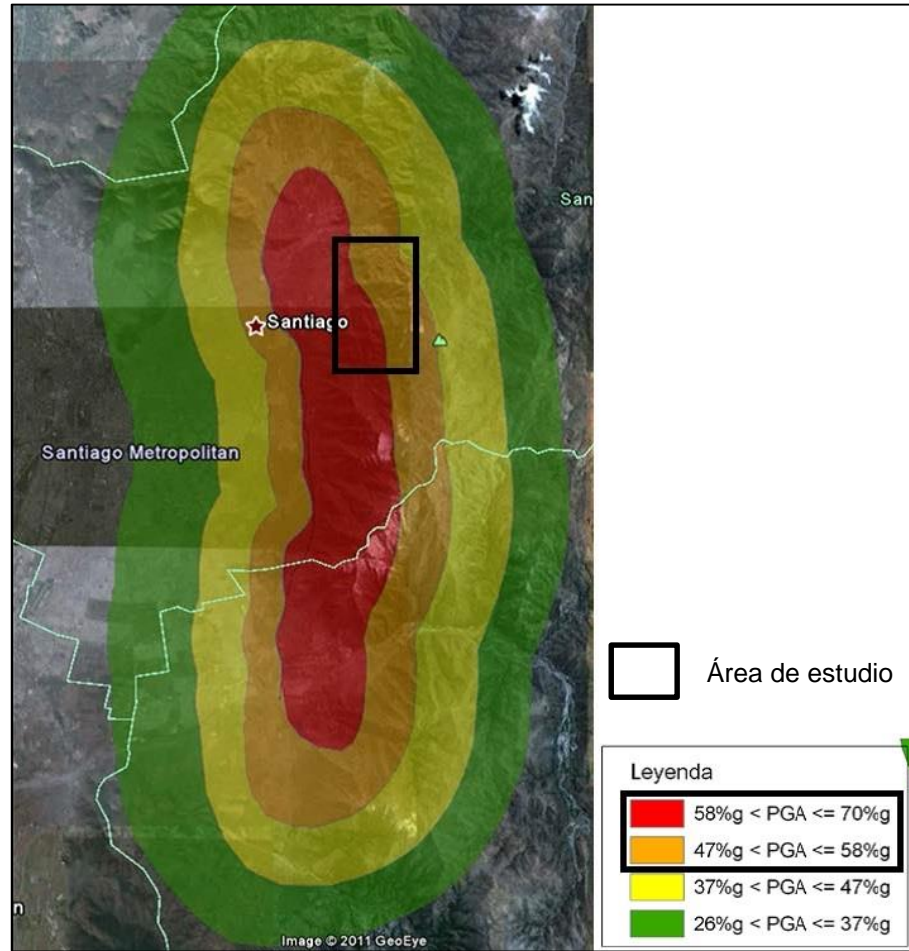


Figura 4.26. Peligro asociado a la Falla San Ramón, para un sismo de intensidad máxima esperada de $M_w=7.4$ según técnicas determinísticas, área de estudio enmarcada en negro. Extraído de "Evaluación del peligro sísmico zona oriente de Santiago", Departamento de Geología, Universidad de Chile, 2011.

4.3.7 Intervención Antrópica

El control que ejerce el factor humano sobre la estabilidad de laderas es importante en la generación de eventos de remociones en masas. En el área de estudio se aprecia una gran actividad antrópica, principalmente en los abanicos aluviales, en especial el que desemboca en la quebrada de Apoquindo. En él se encuentran una gran cantidad de caminos pavimentados, edificaciones y el centro deportivo San Carlos de Apoquindo, donde sus cimientos están constituidos de material de relleno. Se presenta una gran cantidad de cortes artificiales de ladera, algunos taludes incluyen obras de estabilización como muros de hormigón, hormigón proyectado (shotcrete) (Figura 4.28) y mallas con pernos (Figura 4.27).



Figura 4.27. Intervención antrópica. A la izquierda se observa mallas con pernos; a la derecha, muros de hormigón y camino asfaltado.

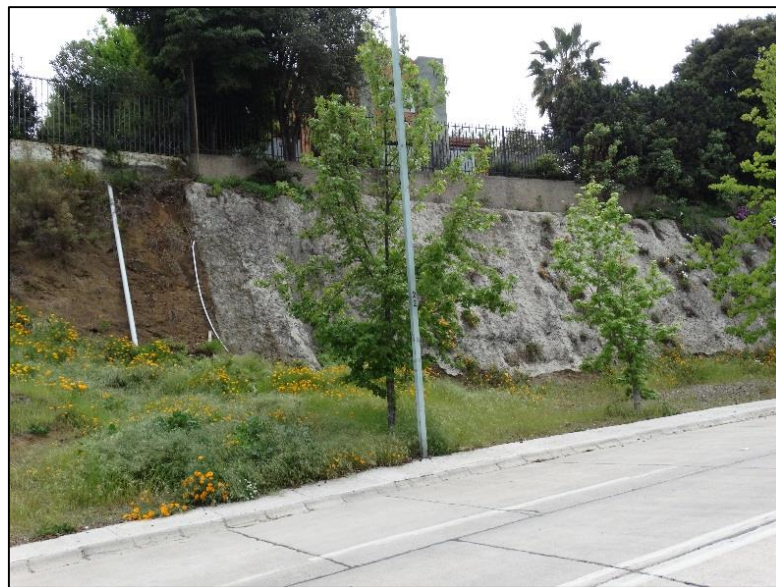


Figura 4.28. Hormigón proyectado (shocrete) en talud.

5 Evaluación del peligro de remociones en masa

5.1 Introducción

En este capítulo se presenta la evaluación de susceptibilidad y peligro de remociones en masa en el área definida por la hoya hidrográfica de la quebrada de Apoquindo y quebradas menores, hacia el norte hasta el río Mapocho.

5.2 Definición de unidades geomorfológicas

Para aplicar la metodología de evaluación de susceptibilidad de remociones en masa de Lara (2007), se determinó las unidades geomorfológicas del área, en base a su geología, geomorfología, mapas de pendientes y de aspecto (orientación de laderas). Estas unidades geomorfológicas se definieron utilizando el software ArcGis 10, obteniendo 96 unidades (a escala 1:20.000). Esto se puede observar en el mapa de Unidades Geomorfológicas (Figura 5.1). Se eliminaron las áreas de laderas con pendientes menores a 10° .

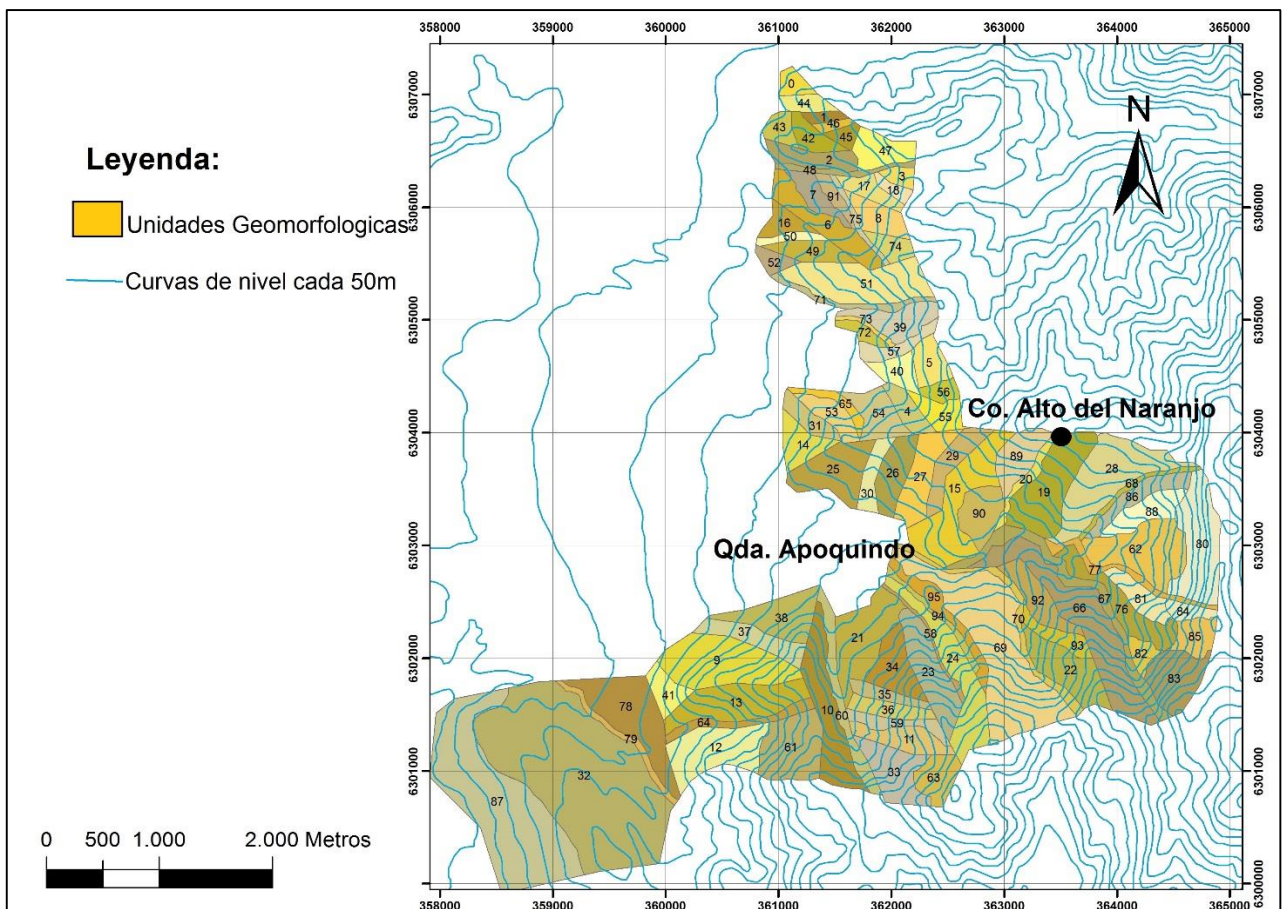


Figura 5.1. Unidades geomorfológicas. Elaboración propia, ArcGis 10.

Para cada una de estas unidades se calcula un Índice de Susceptibilidad (IS) para los diferentes tipos de remoción en masa que considera la metodología: flujos de detritos, deslizamiento de suelo, deslizamiento de rocas y caídas de rocas.

5.3 Cálculo de Índices de Susceptibilidad de remociones en masa

Se calcula un Índice de Susceptibilidad (IS) para cada tipo de remoción y para cada una de las unidades geomorfológicas definidas, en base a ponderación de los factores condicionantes y sus respectivas ponderaciones máximas según Lara (2007). La metodología se describió en más detalle en el capítulo 3. Para este estudio, la metodología de Lara (2007) solo considera unidades con $IS \geq 50$ como áreas susceptibles, éstas zonas serán consideradas para estudios posteriores de evaluación de peligro geológico.

Es importante mencionar que se ha agregado un valor intermedio en la tabla de ponderación de caídas de rocas, específicamente en el factor “Caídas de rocas declaradas en la ladera”, cuando no se logra obtener antecedentes debido a problemas de acceso o vegetación que impiden su observación in situ y se busca ser conservador al momento de la evaluación. Para todas las demás evaluaciones el valor intermedio ya había sido previamente definido por las metodologías. Las tablas de cálculo de índice de susceptibilidad se presentan a continuación.

Tabla 5.1. Ponderación de factores condicionantes para caídas de rocas, modificado de Lara (2007), en rojo valor intermedio agregado para el factor de caídas de rocas declaradas

| Factor | Especificaciones | Rangos | % |
|--|--|--------------------------------|----|
| 1.-Pendientes de laderas | Promedio de ladera | 15°-20° | 4 |
| | | 20°-25° | 10 |
| | | 25°-30° | 18 |
| | | 30°-40° | 25 |
| | | 40°-60° | 32 |
| | | >60° | 35 |
| 2.-Características geológicas-geotécnicas del material | Será más favorable a medida que presente estructuras subverticales en el macizo, alta frecuencia de fracturas y orientación de fracturas en el sentido de la ladera. Se consideran además los factores generadores de deslizamientos de roca | muy favorable | 35 |
| | | favorable | 24 |
| | | medianamente favorable | 15 |
| | | poco favorable | 9 |
| | | muy poco favorable | 3 |
| 3.-Acumulación de nieve | Asociado a procesos de hielo/deshielo, que contribuyen en la caídas de roca debido a la generación de esfuerzos en tracción en la roca | estacional | 10 |
| | | siempre | 4 |
| | | esporádica | 2 |
| | | nula | 0 |
| | | importante | 5 |
| 4.-desestabilización artificial de laderas | Por ejemplo cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc. | poco importante | 3 |
| | | no observado | 0 |
| | | presente | 15 |
| 5.-Caídas de roca declaradas en la ladera | Presencia de bloques caídos | sin antecedentes | 5 |
| | | no observado | 0 |
| | | suelo | 0 |
| 6.-Tipo de material | En este caso, el material suelo no está en estudio, por lo tanto pondera por o al resto de los factores | roca (cobertura <1 m de suelo) | 1 |

Tabla 5.2. Ponderación de factores condicionantes para deslizamiento de rocas, modificado de Lara (2007).

| Factor | Especificaciones | Rangos | % |
|---|---|---|----|
| 1-Pendiente de ladera | Promedio de la ladera | 15°-20° | 11 |
| | | 20°-25° | 15 |
| | | 25°-30° | 20 |
| | | 30°-40° | 25 |
| | | 40°-60° | 30 |
| | | >60° | 35 |
| 2-Características geológicas-geotécnicas del material | Su generación se ve favorecida por alto grado de fracturamiento , alta meteorización y presencia de agua en el macizo. La orientación de fracturas permitirán identificar el tipo de deslizamiento: deslizamiento plano (superficie de deslizamiento en el sentido de la ladera), cuña (por intersección de estructuras) o toppling (fracturas opuestas al sentido de la ladera). Puede considerarse valores bajos de RMR (<30) –modificado según orientación de estructuras en laderas- como indicativo aproximado de condiciones muy favorables para generación de deslizamientos | Muy favorable | 35 |
| | | Favorable | 28 |
| | | Medianamente favorable | 18 |
| | | Poco favorable | 11 |
| | | Muy poco favorable | 4 |
| 3-Acumulación de nieve | Según estacionalidad | Estacional | 5 |
| | | Siempre | 2 |
| | | Esporádica | 1 |
| | | Nula | 0 |
| 4-Desestabilización artificial de laderas | Por ejemplo cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc. | Importante | 10 |
| | | Poco importante | 5 |
| | | No observado | 0 |
| 5-Deslizamientos declarados en la ladera | Información escrita y/u observación de superficies de deslizamiento | presente | 15 |
| | | sin antecedentes | 5 |
| | | no observado | 0 |
| 6-Tipo de material | En este caso, el material suelo no está en estudio, por lo tanto pondera por o al resto de los factores. Suelo muy superficial en unidades mapeadas como roca no se considera | suelo | 0 |
| | | Roca (cobertura aproximada <1m-1,5m de suelo) | 1 |

Tabla 5.3. Ponderación de factores condicionantes para flujos, modificado de Lara (2007).

| Factor | Especificaciones | Rangos | % |
|--|--|--------------------------------|----|
| 1.-Pendientes de laderas | Promedio de ladera | 10°-15° | 3 |
| | | 15°-20° | 6 |
| | | 20°-25° | 9 |
| | | 25°-30° | 11 |
| | | 30°-40° | 13 |
| | >40° | 15 | |
| 2.- Encajamiento canal de drenaje al pie de la ladera | Promedio de la unidad. Si la unidad es sólo canal de drenaje, el puntaje f2 se asocia a f1, quedando sólo como un puntaje otorgado por "pendiente del canal". | <5° | 1 |
| | | 5°-10° | 5 |
| | | >10° | 10 |
| 3.-Encajamiento canal de drenaje | Dado por la geomorfología y la relación profundidad/ancho del canal. Un encajamiento alto puede reflejarse, entre otros, en un valor alto de esta razón. Puede considerarse un valor mayor a 0,7 como encajamiento alto. | alto | 7 |
| | | medio | 4 |
| | | bajo | 1 |
| 4.- Exposición al sol | Para el caso de Chile central, alta exposición: laderas mirando al N, al estar expuestas al sol durante todo el año. Parcial: laderas mirando E_W. Baja: laderas mirando al S. | Alta | 3 |
| | | Parcial | 2 |
| | | baja | 0 |
| 5.-Características geológicas-geotécnicas del material | La generación de flujos se ve favorecida, entre otros, por suelos de baja compactad, permeabilidad, y espesores críticos de suelo, presencia de estructuras y presencia de finos. En roca: alta meteorización y frecuencia de fracturas (valores bajos de GSI a nivel de ladera), litología (rocas menos resistentes) y alteraciones | muy favorable | 25 |
| | | favorable | 18 |
| | | medianamente favorable | 13 |
| | | poco favorable | 8 |
| | | muy poco favorable | 3 |
| 6.-Condiciones de humedad y saturación | Asociado a: (1) Capacidad de saturación por abajo (profundidad nivel freático <2m es muy favorable para generación de flujos, >2m poco favorable, ~2m favorable) y por arriba (infiltración por precipitación). (2) Capacidad de almacenaje de agua en la estructura de suelo. (3) Variaciones estacionales de humedad. Mayor almacenaje y humedad alta favorecen la generación de flujos. | muy favorable | 10 |
| | | favorable | 7 |
| | | poco favorable | 3 |
| | | muy poco favorable | 2 |
| 7.- Acumulación de nieve | Según estacionalidad | siempre | 5 |
| | | estacional | 2 |
| | | esporádica | 1 |
| | | nula | 0 |
| 8.- Cobertura vegetal | Densidad en la ladera | nula a baja | 5 |
| | | moderada | 3 |
| | | alta | 0 |
| | | | |
| 9.-Obstrucción canal de drenaje | No considera estructuras destinadas a contener los flujos | importante | 5 |
| | | moderada | 4 |
| | | baja | 2 |
| | | no observado | 0 |
| 10.-Desestabilización artificial de laderas | Por ejemplo cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc. | importante | 5 |
| | | poco importante | 3 |
| | | no observado | 0 |
| 11.-Aluviones declaradas en la hoya hidrográfica | Información escrita y/u observación de depósitos de flujos en la zona de estudio. Considerar como eventos frecuentes aquellos con recurrencia < 10 años. | históricos frecuentes | 10 |
| | | históricos poco frecuentes | 7 |
| | | prehistóricos | 4 |
| | | sin antecedentes | 1 |
| 12.-Tipo de material | En este caso, el material roca no está en estudio, por lo tanto pondera por 0 al resto de los factores | suelo | 1 |
| | | roca (cobertura <1 m de suelo) | 0 |

Tabla 5.4. Ponderación de factores condicionantes para deslizamiento de suelo, modificado de Lara (2007).

| Factor | Especificaciones | Rangos | % |
|--|---|--------------------------------|----|
| 1.-Pendientes de laderas | Promedio de ladera | 15°-20° | 9 |
| | | 20°-25° | 15 |
| | | 25°-30° | 21 |
| | | 30°-40° | 26 |
| | | >40° | 30 |
| 2.- Exposición al sol | Para el caso de Chile central, alta exposición: laderas mirando al N, al estar expuestas al soldurante todo el año. Parcial: laderas mirando E_W. Baja: laderas mirando al S. | Alta | 5 |
| | | Parcial | 3 |
| | | baja | 1 |
| 3.-Características geológicas-geotécnicas del material | Condiciones muy favorables para generación de deslizamiento son, entre otros, baja densidad (<~1,6- 1,8 kN/m ³), baja resistencia, alta cantidad de material fino en su composición (>~50%); además de la estructura y estratificación del suelo. La generación de material removible a partir de roca se ve favorecido por alta meteorización y alteración. | muy favorable | 20 |
| | | favorable | 14 |
| | | medianamente favorable | 10 |
| | | poco favorable | 6 |
| | | muy poco favorable | 2 |
| 4.-Condiciones de humedad y saturación | Considerar: (1)Capacidad de saturación por abajo (profundidad nivel freático) y por arriba (infiltración por precipitación). (2) Capacidad de almacenaje de agua en la estructura de suelo (asociado a presencia de niveles impermeables). Saturación y mayor almacenaje favorecen generación de deslizamientos. La relación (profundidad N.F./espesor suelo) cercana a 0 indica condiciones muy favorables de generación, ~0,5 es favorable. | muy favorable | 10 |
| | | favorable | 7 |
| | | poco favorable | 3 |
| | | muy poco favorable | 2 |
| 5.- Acumulación de nieve | Según estacionalidad | siempre | 5 |
| | | estacional | 2 |
| | | esporádica | 1 |
| | | nula | 0 |
| 6.- Cobertura vegetal | Densidad en la ladera | nula a baja | 5 |
| | | moderada | 2 |
| | | alta | 0 |
| 7.-Desestabilización artificial de laderas | Por ejemplo cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc. | importante | 10 |
| | | poco importante | 5 |
| | | no observado | 0 |
| 8.-Deslizamientos declaradas en la unidad geomorfológica | Información escrita y/u observación de escarpes y superficies de deslizamiento. | presente | 10 |
| | | sin antecedentes | 3 |
| | | no observado | 0 |
| 9.-Deslizamientos declaradas en la unidad geológica de suelo | Información escrita y/u observación de escarpes y superficies de deslizamiento. | presente | 5 |
| | | sin antecedentes | 2 |
| | | no observado | 0 |
| 10.-Tipo de material | En este caso, el material roca no está en estudio, por lo tanto pondera por 0 al resto de los factores | suelo | 1 |
| | | roca (cobertura <1 m de suelo) | 0 |

Mediante la implementación de las tablas anteriores sobre cada unidad geomorfológica se han definido los IS para caída de rocas, deslizamiento de roca, flujos y deslizamiento de suelos (Resultados de tablas de evaluación de IS en Anexo 1). A partir de estos índices se obtiene un Mapa de Susceptibilidad para cada tipo de remoción en masa estudiada, los cuales se muestran a continuación.

5.3.1 Deslizamiento de Suelo

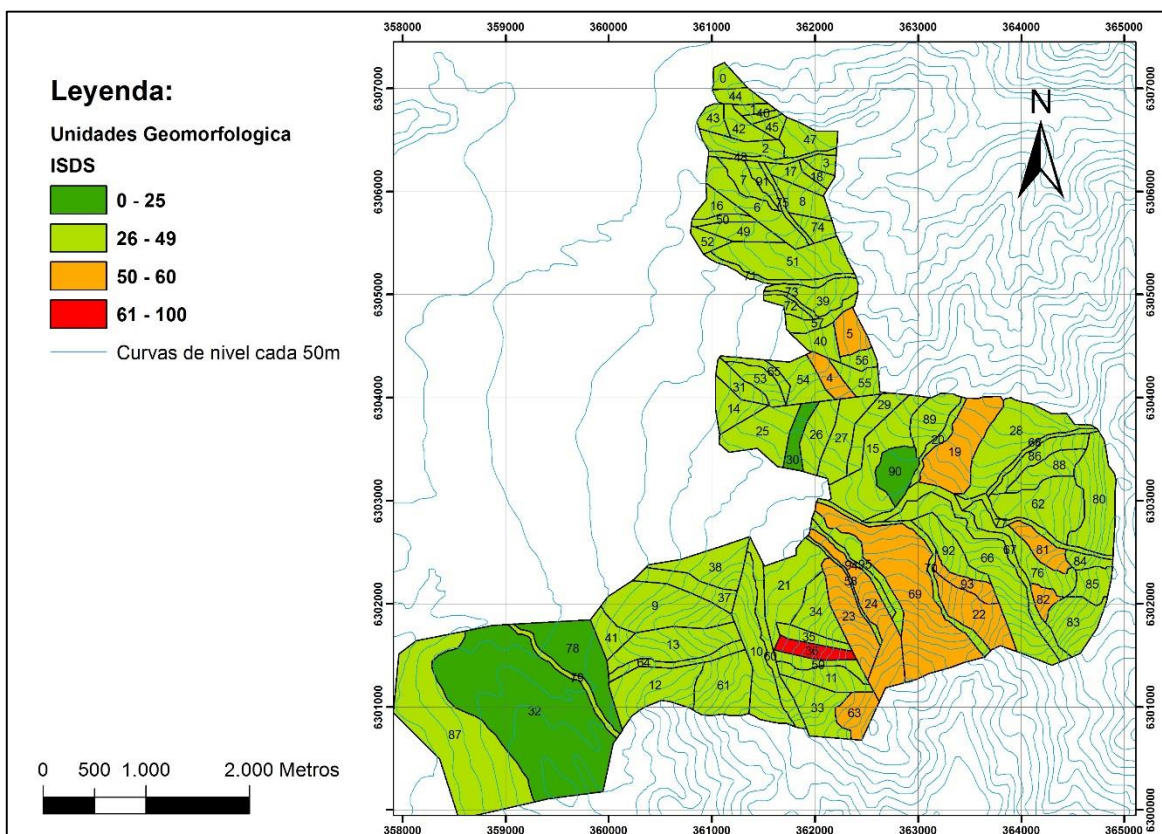


Figura 5.2. Mapa de susceptibilidad de deslizamiento de suelos, metodología Lara (2007), aplicada a escala 1:20000.

En el mapa de Índice de Susceptibilidad de Deslizamiento de Suelos (Figura 5.2) se observa un dominio de índices que van entre los 26 y 49, en este caso en las cabeceras no se encontraron $IS \geq 50$, ya que solo existe material rocoso y no hay suelo. También se puede observar que hay una directa relación con la exposición al sol e índices mayores en las partes donde las laderas están orientadas hacia el oeste y el norte, las cuales tienen nula o baja densidad de vegetación e inciden en la estabilidad de la ladera.

Es importante mencionar que de las 12 unidades geomorfológicas con $IS \geq 50$, hay 9 unidades que tienen índices entre 50 y 51, éstas se evaluaron con un criterio conservador, específicamente en el factor “deslizamientos declarados en la unidad geomorfológica” y “deslizamientos declarados en la unidad geológica de suelo”, se le asignó el rango “sin antecedentes” ya que no se logró recorrer toda la unidad. Esto hace que pasen el límite de $IS \geq 50$. A continuación se presenta la tabla 5.5 con los $IS \geq 50$, los cuales pasarán a la etapa G3.

Tabla 5.5. Unidades con IS \geq 50. Caso deslizamiento de suelo

| Unidad | IS | Unidad | IS | Unidad | IS |
|--------|----|--------|----|--------|----|
| 4 | 51 | 23 | 51 | 69 | 51 |
| 5 | 51 | 24 | 51 | 81 | 51 |
| 19 | 51 | 36 | 63 | 82 | 51 |
| 22 | 56 | 63 | 56 | 93 | 50 |

5.3.2 Flujos de detritos

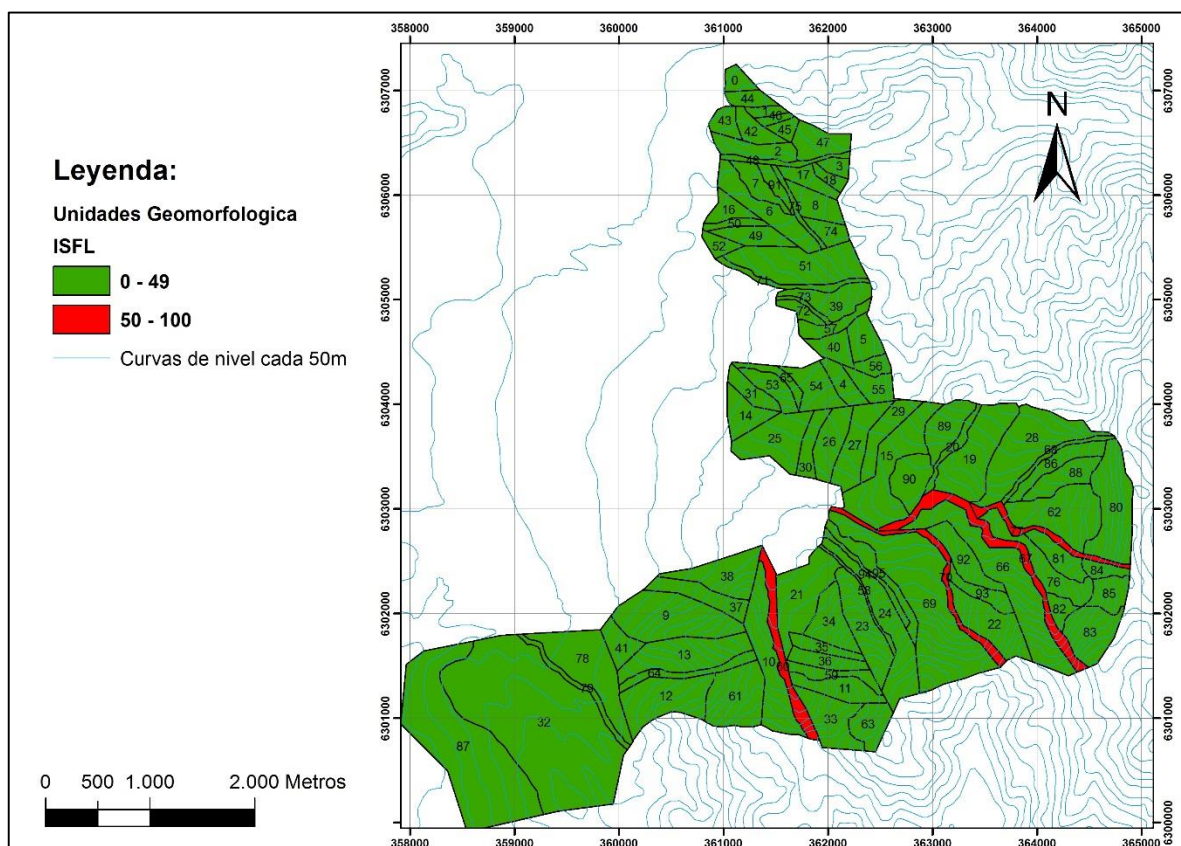


Figura 5.3. Mapa de susceptibilidad de Flujos, metodología Lara (2007), aplicada a escala 1:20000.

En el mapa de Índice de Susceptibilidad de Flujos (Figura 5.3), hay un dominio de índices que están entre los 28 y 38, solo 4 unidades geomorfológicas tienen un IS \geq 50 y llegan solo al 56 como máximo. Estas unidades se ven influenciadas por la pendiente promedio, que llegan hasta los 25° y en algunos casos por el encajonamiento grado medio que tienen. Cabe mencionar que el análisis se realizó solo en las quebradas y no en las laderas, puesto que las laderas ya fueron analizadas en los deslizamientos de suelos y sería redundante analizarlas nuevamente. A continuación se presenta la tabla 5.6 con los IS \geq 50 los cuales pasaran a la etapa G3.

Tabla 5.6. Unidades con $IS \geq 50$. Caso flujos de detritos

| Unidad | IS |
|--------|----|
| 60 | 50 |
| 67 | 56 |
| 70 | 50 |
| 77 | 53 |

5.3.3 Caídas de rocas

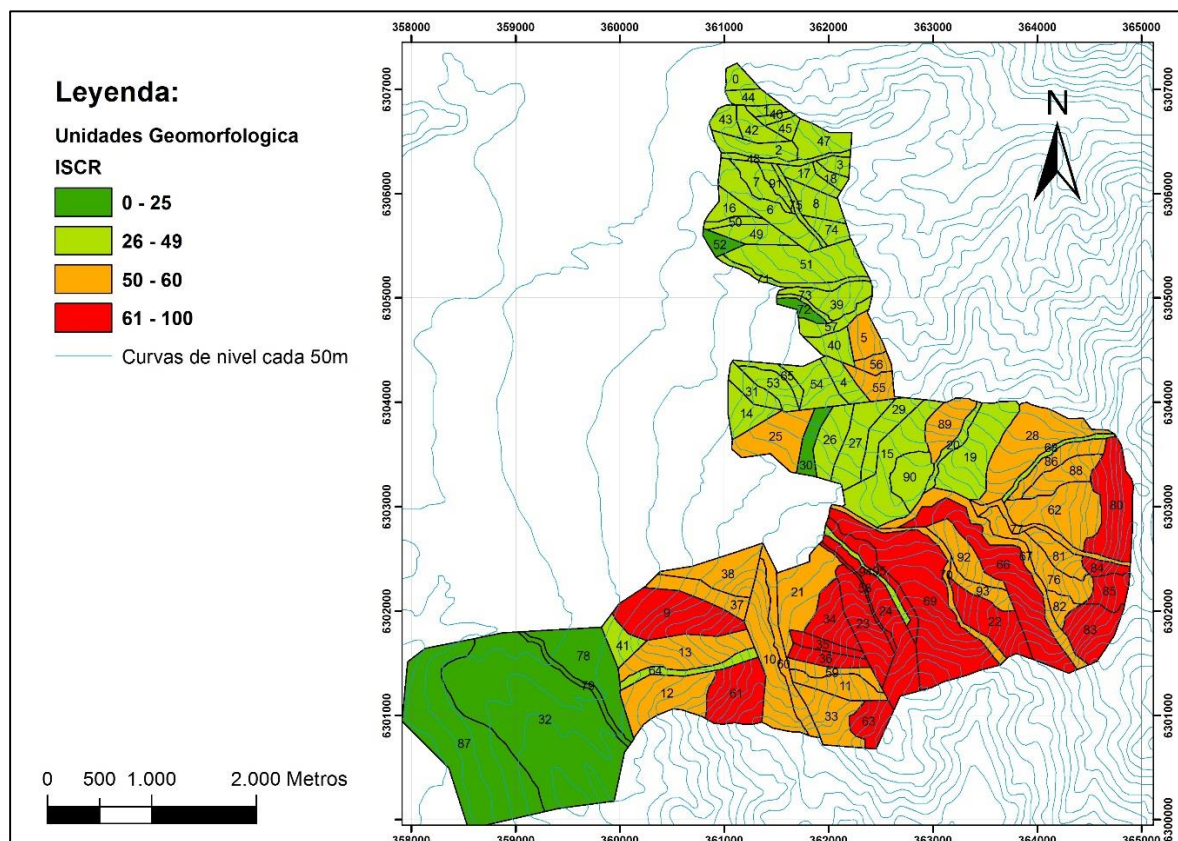


Figura 5.4. Mapa de susceptibilidad de caídas de rocas, metodología Lara (2007), aplicada a escala 1:20.000.

En el mapa de Índice de Susceptibilidad de Caídas de Rocas (Figura 5.4) se observa que los $IS \geq 50$ están presentes en gran parte del área de la Quebrada de Apoquindo, esto debido principalmente a la gran cantidad de afloramientos de rocas. Éstas tienen características geológicas-geotécnicas que van de medianamente favorable a muy favorable para que existan caídas de rocas. Esto combinado con las pendientes promedio que alcanzan los 35° en las cabeceras y caídas de rocas declaradas in situ, nos dan Índices predominantes que van de 50 a 78, con máximos de 78, los cuales son los rangos más altos en la clasificación con la que se ha trabajado en este estudio.

Como se mencionó las zonas susceptibles se consideran con un $IS \geq 50$, por lo que en este caso hay zonas susceptibles prácticamente en la totalidad de la Hoya Hidrográfica de la Quebrada de Apoquindo, que se concentran en las cabeceras y en la parte centro sur de la quebrada. A continuación se presenta la tabla 5.7 con los $IS \geq 50$ los cuales son 44 unidades geomorfológicas que pasaran a la etapa G3 (evaluación de probabilidad de falla).

Tabla 5.7. Unidades con $IS \geq 50$. Caso caídas de rocas

| Unidad | IS | Unidad | IS | Unidad | IS | Unidad | IS |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| 5 | 57 | 28 | 52 | 60 | 58 | 81 | 60 |
| 9 | 61 | 33 | 60 | 61 | 65 | 82 | 60 |
| 10 | 60 | 34 | 76 | 62 | 60 | 83 | 78 |
| 11 | 57 | 35 | 67 | 63 | 67 | 84 | 78 |
| 12 | 50 | 36 | 67 | 66 | 71 | 85 | 78 |
| 13 | 60 | 37 | 50 | 67 | 52 | 86 | 52 |
| 21 | 55 | 38 | 50 | 69 | 71 | 88 | 60 |
| 22 | 67 | 55 | 57 | 70 | 52 | 89 | 60 |
| 23 | 67 | 56 | 57 | 76 | 60 | 92 | 58 |
| 24 | 69 | 58 | 76 | 77 | 60 | 93 | 58 |
| 25 | 51 | 59 | 58 | 80 | 78 | 95 | 69 |

5.3.4 Deslizamiento de rocas

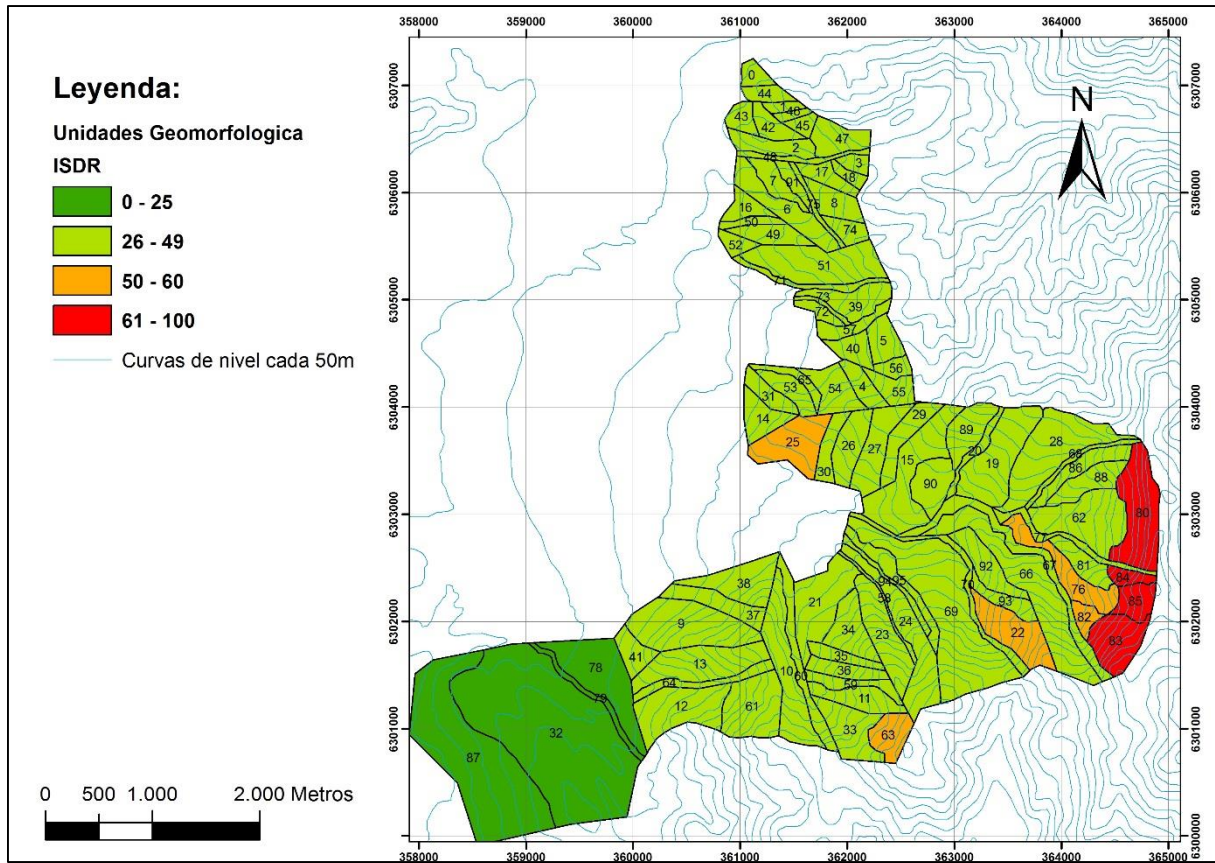


Figura 5.5. Mapa de susceptibilidad de deslizamientos de rocas, metodología Lara (2007), aplicada a escala 1:20.000.

En el mapa de Índice de susceptibilidad de Deslizamiento de Rocas (Figura 5.5), se observa un claro dominio de índices en un rango entre 26 y 49, puesto que por una parte sólo en zonas puntuales se logró observar deslizamientos declarados. Y por otro lado las características geológicas-geotécnicas van desde poco favorables a favorables, es por esto que sólo existen 9 unidades geomorfológicas con $IS \geq 50$, donde el máximo índice es de 70 y se encuentran nuevamente en las cabeceras. A continuación se presenta la tabla 5.8 con los $IS \geq 50$ los cuales pasaran a la etapa G3.

Tabla 5.8. Unidades con $IS \geq 50$. Caso deslizamiento de rocas

| Unidad | IS | Unidad | IS | Unidad | IS |
|--------|----|--------|----|--------|----|
| 22 | 60 | 76 | 55 | 83 | 70 |
| 25 | 59 | 80 | 70 | 84 | 70 |
| 63 | 60 | 82 | 55 | 85 | 70 |

5.4 Evaluación probabilidad de falla

A continuación se realizan los análisis para la obtención del factor de seguridad (FS) y la probabilidad de falla (PF), para cada unidad geomorfológica que cumplen con las condiciones de $IS \geq 50$ y se aplica para cada una de las remociones en masa ya estudiadas (Anexo 2). Estos análisis se realizan bajo los escenarios estáticos-sísmicos, sísmicos-tormentas y estático-tormentas. El escenario de tormentas se asocia a que el material estará saturado. Los escenarios considerados son los más críticos de acuerdo al contexto del área de estudio.

Se asumió un escenario sísmico representado para aceleraciones horizontales. Se tomó en cuenta los estudios realizados por el departamento de geología, Universidad de Chile (2011) en el informe "Evaluación del peligro sísmico zona oriente de Santiago". De acuerdo al estudio ya mencionado, la zona se encuentra donde las aceleraciones máximas van entre 47%g y 70%g obteniendo un promedio de PGA de 60%g dado por la sismicidad en la falla San Ramón. Es por esto que se asume un coeficiente sísmico de 0.3 g, valor que está asociado al PGA ya mencionado. Se utiliza la mitad del 60%g debido a que la aceleración máxima es instantánea y no representa el promedio durante el sismo. Esto describe el escenario sísmico asumido y es el utilizado para la obtención de generación de deslizamientos de suelos superficiales, deslizamiento de rocas, caídas de rocas y flujos de detritos. El análisis bajo el escenario de tormentas es una condición climática adoptada que está presente en la zona, asumiendo saturación de los suelos que rellenan los cauces (caso de análisis de flujos), en laderas y en rocas.

5.4.1 Deslizamientos traslacionales de suelo (superficiales)

Dada la geología del área de estudio sólo se analizará este tipo de deslizamientos ya que no se identificaron suelos de gran espesor.

Como se mencionó en el capítulo 3 de la metodología, se propone determinar el factor de seguridad y la probabilidad de falla para cada unidad susceptible a deslizamientos traslacionales, a través del modelo de ladera infinita (con 1,5m como espesor máximo) con el método estadístico de Montecarlo (Anexo 2). Esto se realizó utilizando el software Excel.

Al no realizar estudios geotécnicos de suelos, porque no son del alcance de esta memoria, se utilizaron los parámetros de Lara (2007). Los cuales son representativos de la zona ya que se realizó en un área muy cercana (Quebrada San Ramón) a la de este trabajo. Los parámetros son de un suelo no cohesivo, información confirmada en terreno. Se aplicó distribución Normal y desviación estándar en las distintas variables para obtener la probabilidad de falla (Tabla 5.9).

Tabla 5.9. Parámetros geotécnicos para suelos superficiales y su desviación estándar

| | ϕ [°] | c [kPa] | γ [kN/m ³] | z [m] |
|----------------------------|------------|---------|-------------------------------|-------|
| Suelo no cohesivo | 30 | 0 | 15 | 1,5 |
| σ | 5 | 0 | 0,5 | 0,3 |

Tabla 5.10. Probabilidad de Falla y Factor de Seguridad para deslizamientos superficiales.

| Unidad | IS | Situación estática con tormentas | | | Situación sísmica con tormentas | | | Situación sísmica seco | | |
|--------|----|----------------------------------|--------|-----------------|---------------------------------|--------|-----------------|------------------------|--------|-----------------|
| | | FS | PF [%] | PF. Cualitativa | FS | PF [%] | PF. Cualitativa | FS | PF [%] | PF. Cualitativa |
| 4 | 51 | 1,342 | 15 | Bajo | 0,659 | 92 | Alto | 0,681 | 90 | Alto |
| 5 | 51 | 1,148 | 14 | Bajo | 0,59 | 97 | Alto | 0,609 | 95 | Alto |
| 19 | 51 | 2,577 | 11 | Bajo | 0,943 | 84 | Alto | 0,973 | 81 | Alto |
| 22 | 56 | 1,281 | 14 | Bajo | 0,631 | 92 | Alto | 0,651 | 90 | Alto |
| 23 | 51 | 1,177 | 38 | Medio | 0,591 | 96 | Alto | 0,61 | 95 | Alto |
| 24 | 51 | 1,234 | 26 | Medio | 0,621 | 93 | Alto | 0,642 | 91 | Alto |
| 36 | 63 | 1,042 | 41 | Medio | 0,546 | 98 | Alto | 0,564 | 98 | Alto |
| 63 | 56 | 0,937 | 73 | Alto | 0,499 | 100 | Alto | 0,515 | 100 | Alto |
| 69 | 51 | 1,414 | 26 | Medio | 0,664 | 91 | Alto | 0,686 | 89 | Alto |
| 81 | 51 | 1,056 | 33 | Medio | 0,478 | 96 | Alto | 0,494 | 95 | Alto |
| 82 | 51 | 1,001 | 45 | Medio | 0,527 | 99 | Alto | 0,545 | 99 | Alto |
| 93 | 50 | 1,215 | 39 | Medio | 0,609 | 99 | Alto | 0,629 | 99 | Alto |

Como se puede apreciar los resultados obtenidos (Tabla 5.10) muestran que en situaciones sísmicas con tormentas y sísmica en estado seco, todas las unidades tienen una alta probabilidad de falla. En el caso estático con tormentas, la mayoría de las unidades tienen probabilidades medias de fallas. Sólo la unidad 63 tiene una alta probabilidad de falla en los tres escenarios, debido a que es la que tiene la mayor pendiente de las unidades con 33°. La mayoría de las unidades con peligro se distribuyen principalmente en las cabeceras y en la zona sur de la Quebrada de Apoquindo, donde las laderas miran al norte y al oeste, teniendo una alta exposición al sol, lo que influirá en su estabilidad para este tipo de remociones en masa.

5.4.2 Deslizamiento de rocas

Los deslizamientos en roca se han diferenciado entre rotacionales profundos (masivos) o en bloque, los primeros no están controlados por estructuras, en cambio los segundos están controlados por estructuras. A continuación se detalla la obtención de probabilidad de falla para ambos casos.

5.4.2.1 Deslizamientos rotacionales profundos (masivos)

Las unidades susceptibles ($IS \geq 50$) han sido analizadas mediante el software SLIDE (Perfiles en Anexo 2), para obtener la probabilidad de falla y factor de seguridad asociados a su geometría y a las propiedades de la roca que lo componen. Esto se realizó utilizando el criterio de rotura de macizos rocosos de Hoek and Brown y utilizando los parámetros obtenidos por Lara (2007) se muestran en la tabla 5.11. Se realiza el análisis bajo tres escenarios, sísmico-tormenta, sísmico-seco y estático-tormenta.

Tabla 5.11. Propiedades de roca para análisis de deslizamientos masivos

| Propiedad | Litología (Andesita) |
|-------------------------------|----------------------|
| Densidad [KN/m ³] | 26 |
| UCS [KN/m ²] | 50000 |
| Roca intacta (mi) | 25 |
| GSI | 55 |

De acuerdo a los resultados de la zona de estudio, en general no se han detectado mayores inestabilidades. Tan sólo para la unidad geomorfológica 80 se ha obtenido una probabilidad alta de falla, en el escenario sísmico con tormentas. Es importante mencionar que se decidió utilizar el criterio de Janbu con el fin de ser conservador a la hora de evaluar. Esto debido a la incertidumbre que tenemos en la zona, ya que no se tienen muchos datos de las partes más altas (cabeceras) por su difícil acceso. El FS de Janbu son más bajos que con Bishop. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 5.12 y en la figura 5.6.

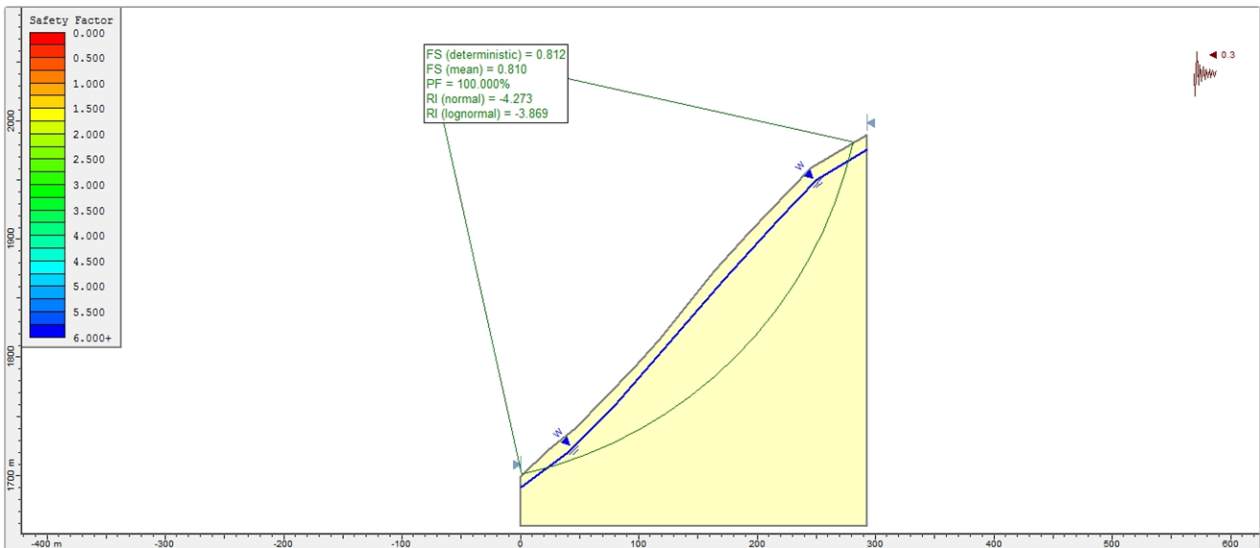


Figura 5.6. Ejemplo de unidad geomorfológica 80 en SLIDE.

Tabla 5.12. Probabilidad de Falla y Factor de Seguridad para deslizamientos de roca rotacionales profundos. Bajo los diferentes escenarios

| Unidad | IS | Situación estática con tormentas | | | Situación sísmica con tormentas | | | Situación sísmica seco | | |
|--------|----|----------------------------------|--------|-----------------|---------------------------------|--------|-----------------|------------------------|--------|-----------------|
| | | FS | PF [%] | PF. Cualitativa | FS | PF [%] | PF. Cualitativa | FS | PF [%] | PF. Cualitativa |
| 22 | 60 | 3,012 | 0 | Bajo | 1,655 | 0 | Bajo | 2,384 | 0 | Bajo |
| 25 | 59 | 6,045 | 0 | Bajo | 2,795 | 0 | Bajo | 3,803 | 0 | Bajo |
| 63 | 60 | 2,968 | 0 | Bajo | 1,428 | 0 | Bajo | 2,341 | 0 | Bajo |
| 76 | 55 | 3,412 | 0 | Bajo | 1,779 | 0 | Bajo | 2,522 | 0 | Bajo |
| 80 | 70 | 1,588 | 0 | Bajo | 0,812 | 100 | Alto | 1,747 | 0 | Bajo |
| 82 | 55 | 3,893 | 0 | Bajo | 2,209 | 0 | Bajo | 3,242 | 0 | Bajo |
| 83 | 70 | 2,025 | 0 | Bajo | 1,13 | 0,2 | Bajo | 1,885 | 0 | Bajo |
| 84 | 70 | 2 | 0 | Bajo | 1,116 | 0,7 | Bajo | 1,904 | 0 | Bajo |
| 85 | 70 | 2,943 | 0 | Bajo | 1,645 | 0 | Bajo | 2,491 | 0 | Bajo |

5.4.2.2 Deslizamiento en bloque locales

Se identificaron en terreno deslizamientos en bloques locales, específicamente deslizamientos en cuña (Figura 5.7). Con las mediciones de estructuras que se lograron obtener en terreno, se evaluaron las probabilidades de falla y factores de seguridad asociados mediante los softwares SWEDGE y ROCPLANE (Anexo 2).

Como se puede apreciar en la tabla 5.13, el análisis de las estructuras para deslizamientos en cuña, bajo los tres escenarios ya mencionados, tiene una alta probabilidad de falla, en cambio para el caso de los deslizamientos planos, su probabilidad de falla es nula.

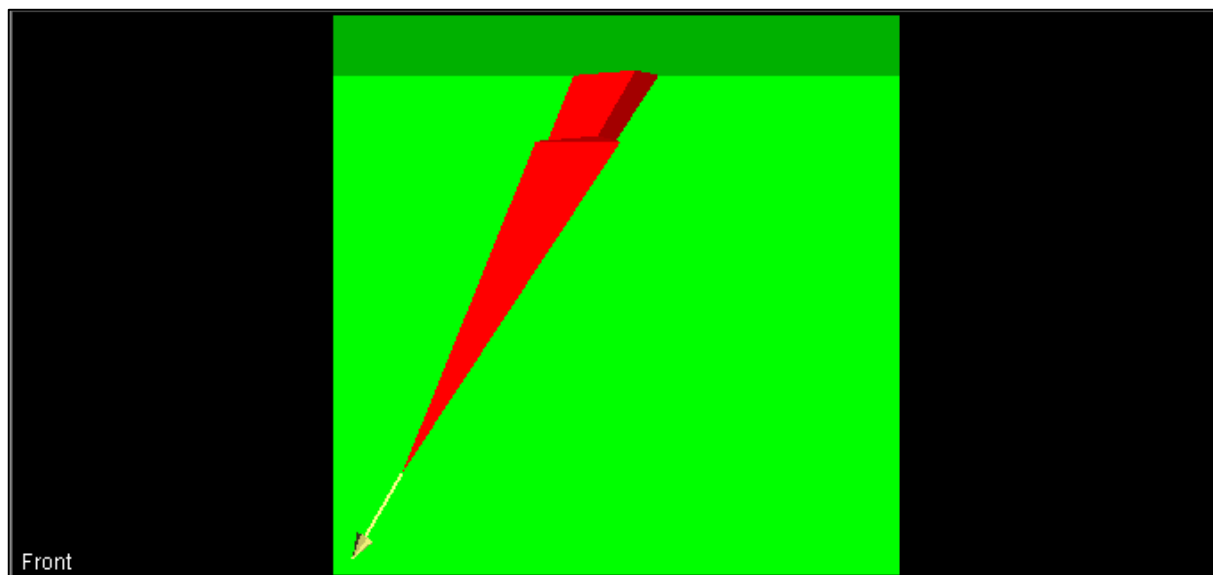


Figura 5.7. Ejemplo deslizamiento en cuña en SWEDGE.

Tabla 5.13 Probabilidad de Falla y Factor de Seguridad para deslizamientos en bloque de roca. Bajo los diferentes escenarios

| Tipo de deslizamiento | Situación Estática Tormenta | | Situación sísmica tormenta | | Situación sísmica seco | |
|-----------------------|-----------------------------|--------|----------------------------|--------|------------------------|--------|
| | FS | PF [%] | FS | PF [%] | FS | PF [%] |
| Cuña | 0 | 100 | 0 | 100 | 0,301 | 100 |
| Planar | 11,151 | 0 | 7,608 | 0 | 9,136 | 0 |

5.4.3 Caídas de rocas

Para las unidades susceptibles de caídas de rocas, los factores de seguridad y probabilidad de falla se asumen como los mismos que para los deslizamientos en bloque. Asumiendo que además las caídas se generan como deslizamientos y que tienen las mismas características geotécnicas para que ocurra un evento de este tipo, siguen el mismo análisis de deslizamiento de roca en bloque. A estos resultados se le han agregado zonas locales de caídas de rocas registradas en terreno, las cuales se le han asignado un peligro alto de generación y sectores que presentan ángulos mayores a 30° que representan posibles zonas de caídas de rocas.

5.4.4 Flujos de detritos

Al igual que en las unidades susceptibles de deslizamiento de suelos superficiales, se ha analizado los flujos a través del modelo de ladera infinita con el método estadístico de Montecarlo, esto asumiendo que los flujos empiezan con deslizamientos superficiales en laderas. Los datos utilizados son los obtenidos por Lara 2007 (Tabla 5.14). Se aplicó distribución Normal y desviación estándar en las distintas variables para obtener la probabilidad de falla.

Tabla 5.14. Parámetros geotécnicos para flujos de detritos y su desviación estándar

| | ϕ [°] | c [kPa] | γ [kN/m ³] | z [m] |
|----------------------------|------------|---------|-------------------------------|-------|
| Suelo no cohesivo | 45 | 0 | 19 | 1,5 |
| σ | 5 | 0 | 0,5 | 0,3 |

Se ha asumido saturación del suelo ante los escenarios dinámico y estático. Las zonas que tienen probabilidad media (PF entre 25%-50%) de generación son principalmente las quebradas que bajan de la cabecera de la hoya hidrográfica.

Tabla 5.15. Probabilidad de Falla y Factor de Seguridad para flujos de detritos. Bajo los diferentes escenarios.

| Unidad | IS | Situación estática con tormentas | | | Situación sísmica con tormentas | | |
|--------|----|----------------------------------|--------|-----------------|---------------------------------|--------|-----------------|
| | | FS | PF [%] | PF. Cualitativa | FS | PF [%] | PF. Cualitativa |
| 60 | 50 | 3,911 | 2 | Bajo | 1,615 | 18 | Bajo |
| 67 | 56 | 2,305 | 6 | Bajo | 1,18 | 25 | Medio |
| 70 | 50 | 3,552 | 2 | Bajo | 1,529 | 18 | Bajo |
| 77 | 53 | 2,283 | 6 | Bajo | 1,158 | 29 | Medio |

5.5 Evaluación del alcance de las remociones en masa

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis del alcance de los diferentes tipos de remociones en masa estudiadas.

5.5.1 Deslizamientos de suelo traslacional (superficial)

Al igual que en el análisis de probabilidad de falla se utiliza el modelo de ladera infinita, donde se busca obtener una pendiente crítica de deslizamiento, es decir, el ángulo de pendiente para el cual el factor de seguridad es 1. Por ende pendientes mayores a la pendiente crítica generan factores de seguridad menores a 1, otorgando una situación inestable. La tabla 5.16 muestra los resultados obtenidos, para las unidades geomorfológicas 4,5,19,22,23,24,36,63,69,81,82 y 93.

Tabla 5.16. Pendientes críticas de alcance para deslizamiento de suelo traslacionales. En los diferentes escenarios.

| Pendiente crítica | Pendiente crítica | Pendiente crítica |
|----------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Situación estática con tormentas | Situación sísmica con tormentas | Situación sísmica seco |
| 29° | 12° | 13° |

5.5.2 Deslizamiento de rocas rotacionales profundos

Solo la unidad geomorfológica 80 ha obtenido probabilidad alta de producir deslizamiento rotacional profundo (masivo). En este caso se analiza el alcance para esta unidad a través de criterios geomorfológicos. En el caso de deslizamiento en bloques, su alcance es local.

5.5.3 Caídas de rocas

El alcance de esta remoción se analizó mediante el software Rocfall (Perfiles en Anexo 3) y criterios de ángulos para alcance de caídas de rocas. El análisis mostró que en escenario sísmico las unidades geomorfológicas 62 (Figura 5.8), 63, 67 y 80, y en el escenario estático las unidades 63 y 80 tienen un alcance más allá de la unidad geomorfológica definida. Éstas se ubican en las partes más altas de la hoya

hidrográfica (cabeceras), donde las pendientes son mayores y se encuentra la mayor cantidad de afloramientos de la Formación Abanico. El alcance de caídas de roca afecta específicamente el sector este y sur de la Quebrada de Apoquindo, lo que genera un alto grado de peligro en esas zonas. Para el escenario sísmico asumido se determinó el alcance con velocidad inicial horizontal de 3 m/s.

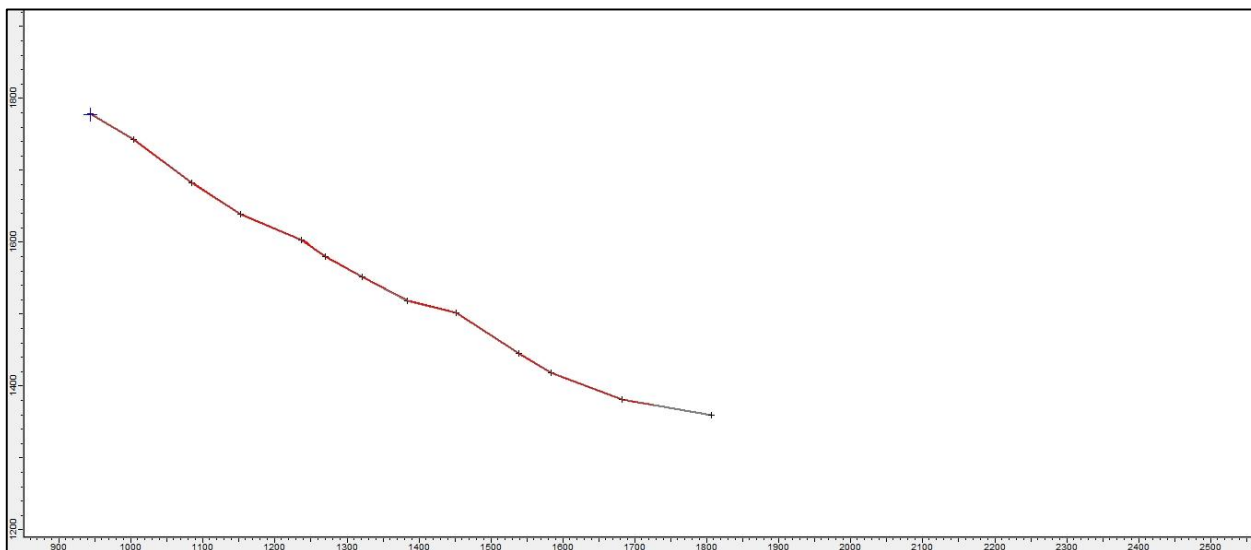


Figura 5.8. Ejemplo alcance (en rojo) caída de roca en Rocfall. Unidad geomorfológica 62.

5.5.4 Flujos de detritos

En este caso el alcance se ha determinado siguiendo criterios de ángulos expuestos en el Capítulo 3 y se incluye antecedentes de peligro de flujos en la zona, obtenidos principalmente de la carta de Peligros de Remociones en Masas e inundaciones de Santiago (2003), donde sí existe alto grado de peligro de flujos de detritos en el área estudiada. Dada las características cualitativas sobre los flujo de detritos se opta por un análisis conservador y se respeta lo indicado por Antinao et al., 2003. Como lo muestra la figura 5.9.

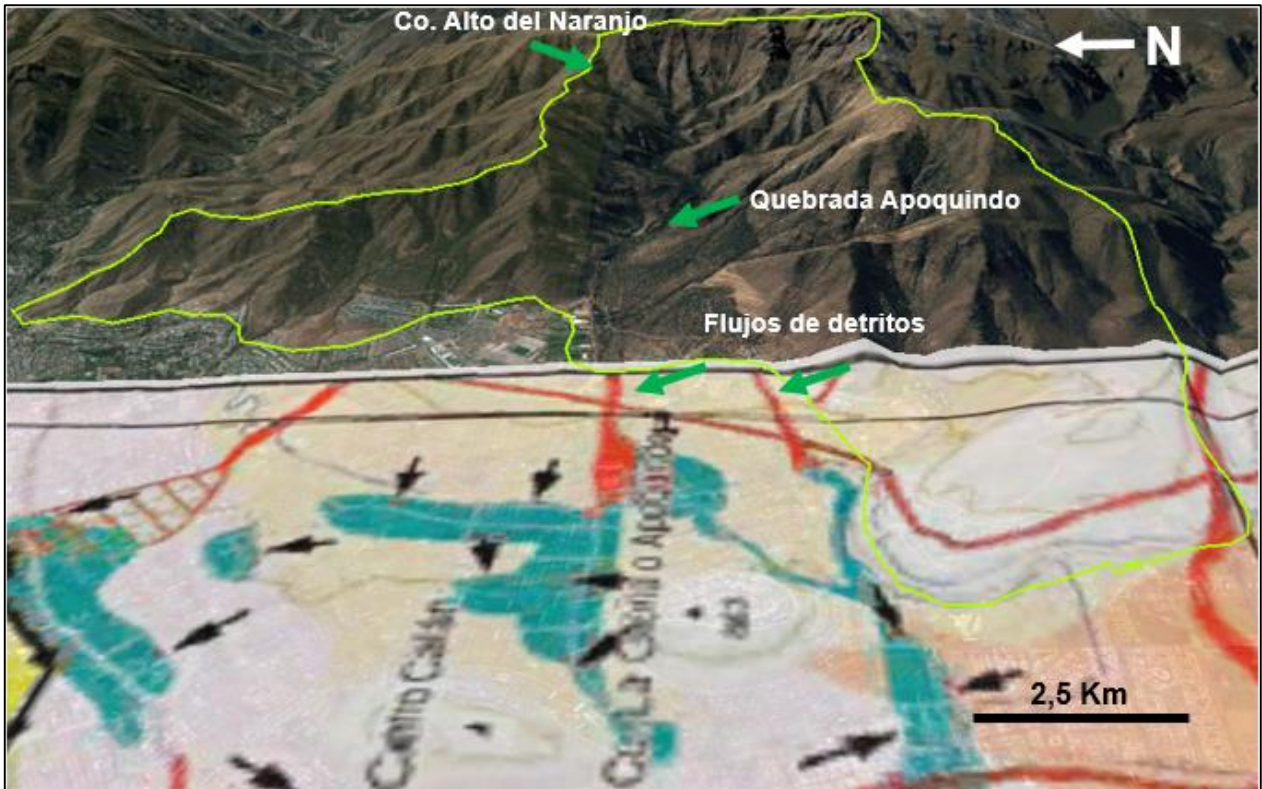


Figura 5.9. Vista al este. Zonificación de peligros de flujos de detritos (Antinao et al., 2003). En verde área de estudio.

A continuación se muestra la Tabla 5.17, la cual resume la relación entre grados de peligro, y los factores de seguridad y probabilidad de falla para cada remoción estudiada.

Tabla 5.17 Relación entre probabilidad numérica y cualitativa para evaluación de peligro

| Remociones en masa Grado de peligro | Deslizamiento suelo superficiales | Flujos de detritos | Deslizamiento de roca profundos |
|--|---|---|---|
| Alto | $0,494 \leq \mathbf{FS} \leq 0,973$ $73 \leq \mathbf{PF} \leq 100$ | - | $\mathbf{FS}= 0,812$ $\mathbf{PF}= 100$ |
| Medio | $1,001 \leq \mathbf{FS} \leq 1,414$ $26 \leq \mathbf{PF} \leq 45$ | $1,18 \leq \mathbf{FS} \leq 1,158$ $25 \leq \mathbf{PF} \leq 29$ | - |
| Bajo | $1,148 \leq \mathbf{FS} \leq 2,577$ $11 \leq \mathbf{PF} \leq 15$ | $1,529 \leq \mathbf{FS} \leq 3,911$ $2 \leq \mathbf{PF} \leq 18$ | $1,13 \leq \mathbf{FS} \leq 6,045$ $0 \leq \mathbf{PF} \leq 0,7$ |

5.6 Evaluación del peligro de remociones en masa

El peligro de remociones en masa se obtuvo mediante combinación de la probabilidad de falla y el alcance de la posible remoción en masa, como lo indica la etapa G6 de la metodología, descrita en el Capítulo 3. Se realiza un mapa para cada tipo de remoción en masa, en los diferentes escenarios estudiados (Mapas originales, escala 1:20.00 en Anexo 4). En el escenario sísmico se asumió una aceleración horizontal de 0,3 g, asociado a un sismo producido por la falla San Ramón.

Para el caso de deslizamientos de suelos superficiales en las situaciones sísmico-tormenta y sísmico-seco, se observa que los grados altos se concentran en la parte sur y sureste de la Quebrada de Apoquindo, donde se encuentra gran cantidad de suelo superficial no cohesivo. No se analizó la zona más alta ubicada al este de la hoya hidrográfica, ya que en las cabeceras sólo se encuentra afloramiento de roca, no se identificó suelo superficial a distancia. En el escenario estático-tormenta, la mayoría de las unidades tiene un peligro bajo a medio, solo en casos puntuales ubicadas en la zona sur de la quebrada principal, lugar donde las pendientes son mayores.

En el caso de deslizamiento en bloque y caídas de rocas, se realizó un mapa generalizado de estos dos tipos de remociones, puesto que ambos presentan similar distribución e igual grado de peligro, considerando además pequeñas zonas locales de caídas de rocas. El grado de peligro va de medio a alto, distribuyéndose principalmente en las cabeceras y en las zonas sur y este de la quebrada principal. Se diferencian en el escenario estático y sísmico, en el que este último sus alcances son mayores y existen más unidades geomorfológicas con grado de peligro alto.

En tanto, para el caso de deslizamiento de roca rotacionales profundos (masivos) como se mencionó anteriormente, solo la unidad geomorfológica 80, ubicada en la parte este de la zona, donde se encuentran las cabeceras más altas y con mayor cantidad de afloramiento de la Formación Abanico, tiene alto grado de peligro y su alcance se definió a través de criterios geomorfológicos.

Finalmente para los flujos de detritos, se tomaron en cuenta los resultados del análisis numérico de ladera infinita, como también antecedentes de la zona (Antinao et al., 2003). Este último tuvo gran influencia a la hora de asignarle peligros a las diferentes unidades geomorfológicas, porque si bien nos dan probabilidades de falla bajas a medias, se optó por respetar el antecedente ya mencionado, quedando las quebradas que bajan de la cabecera de la hoya hidrográfica y el cauce de la quebrada principal con un alto peligro. Sin embargo, también existen flujos con probabilidad de falla media (PF entre 0-25%), específicamente los que están en las quebradas al sur del cauce principal, las cuales tienen menores pendientes.

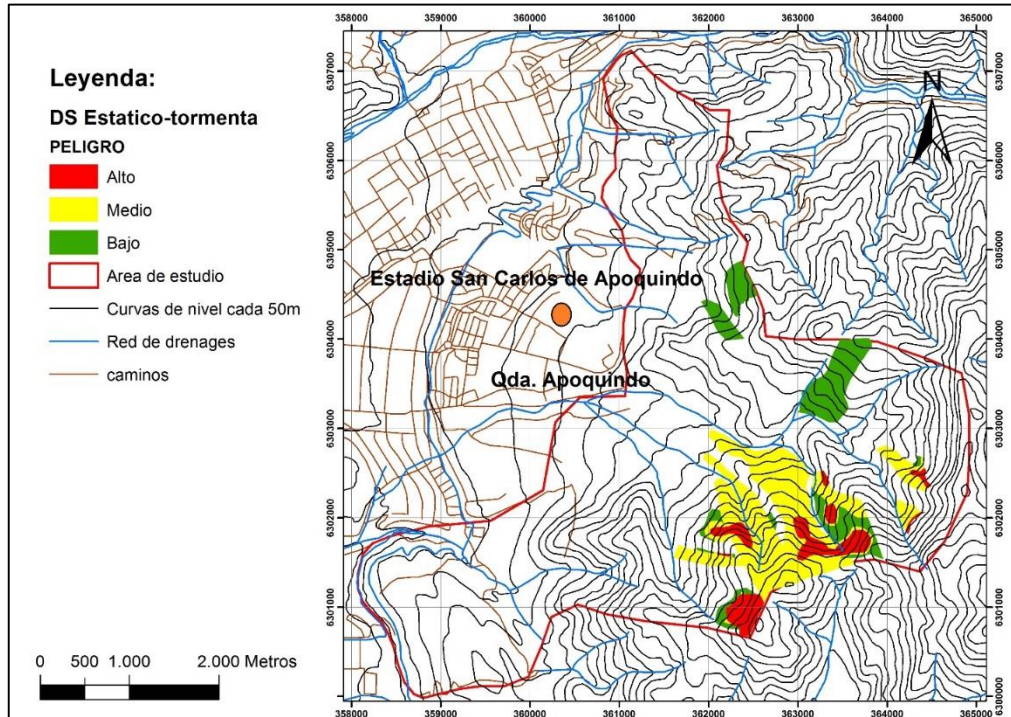


Figura 5.10. Mapa de peligro de deslizamiento superficial de suelo, Quebrada de Apoquindo. Escenario estático-tormentas. Mapa original, escala 1:20.00 en Anexo 4.

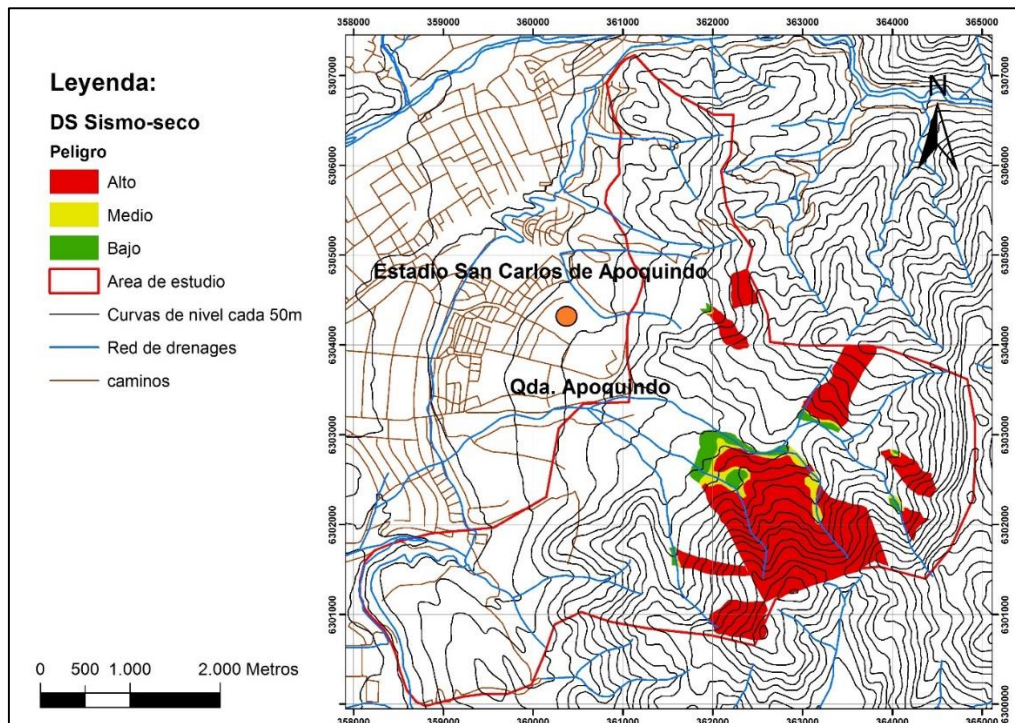


Figura 5.11. Mapa de peligro de deslizamiento superficial de suelo, Quebrada de Apoquindo. Escenario sismo-seco. Mapa original, escala 1:20.00 en Anexo 4.

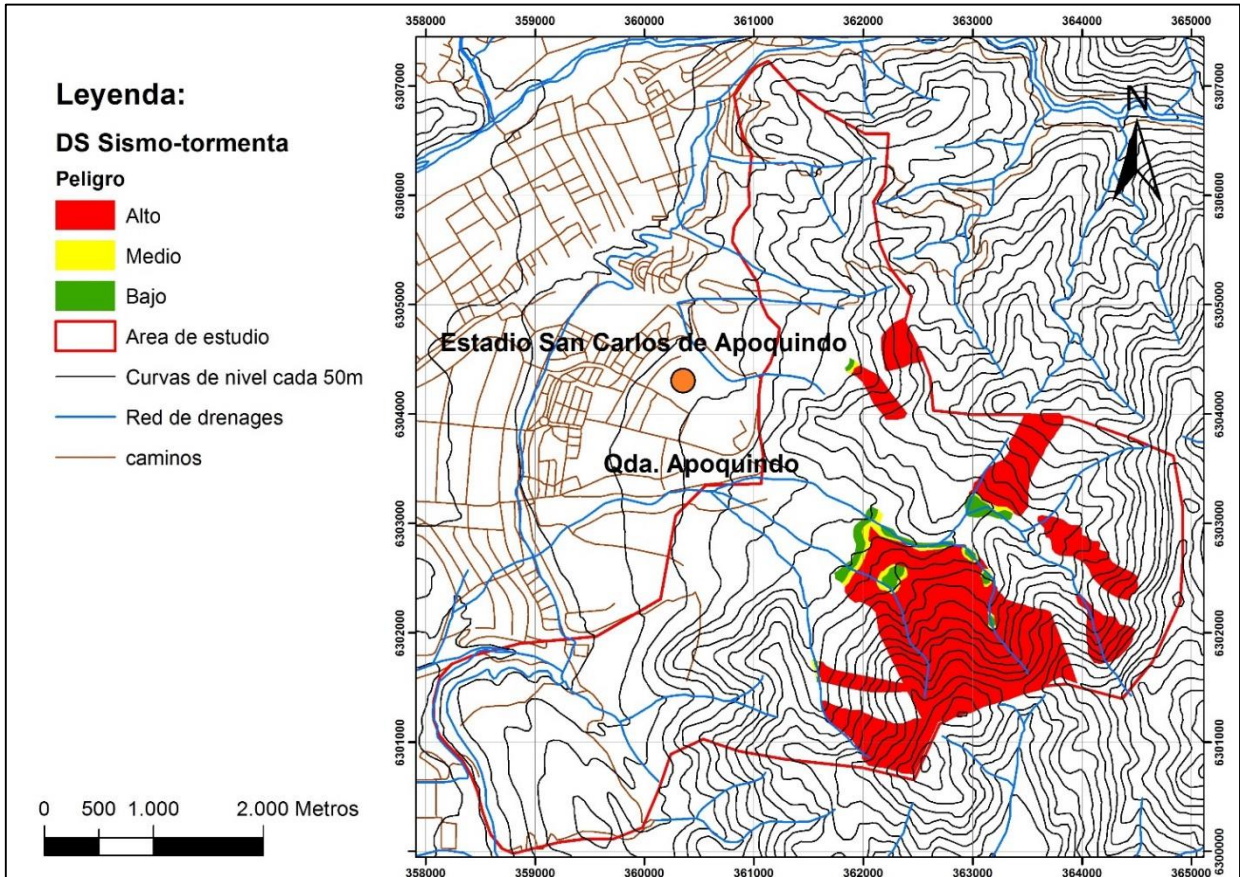


Figura 5.12. Mapa de peligro de deslizamiento superficial de suelo, Quebrada de Apoquindo. Escenario sismo-tormentas. Mapa original, escala 1:20.00 en Anexo 4.

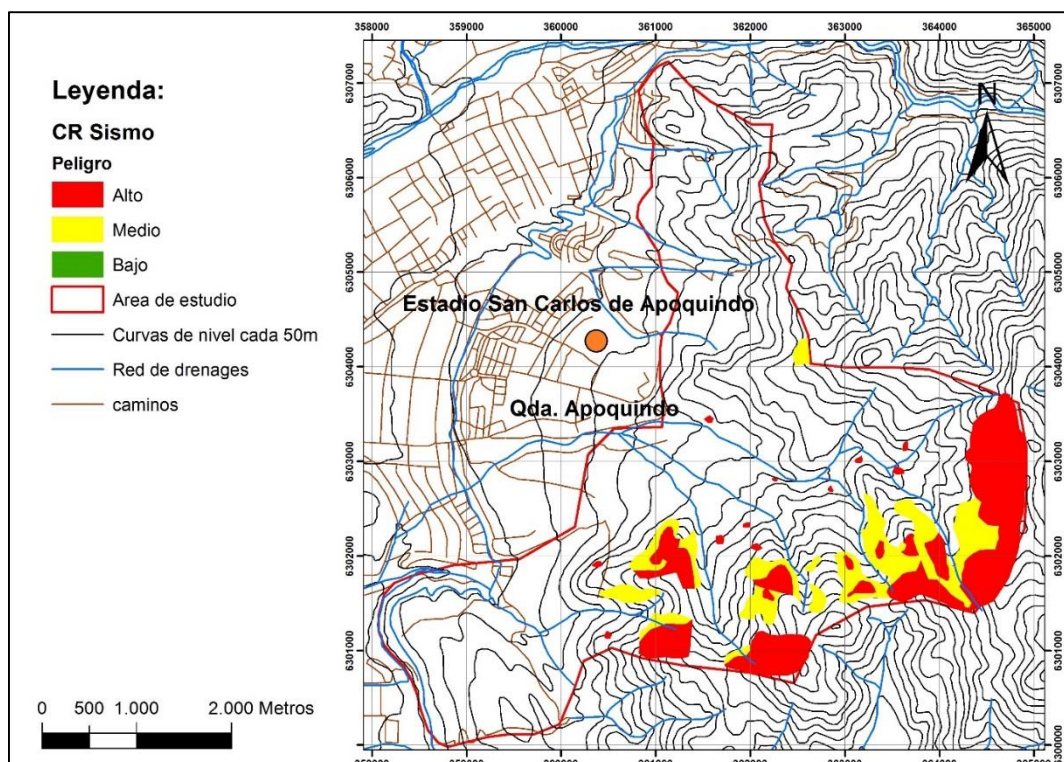


Figura 5.13. Mapa peligro caída de roca y deslizamiento en bloque de rocas, Quebrada de Apoquindo. Escenario sísmico. Mapa original, escala 1:20.00 en Anexo 4.

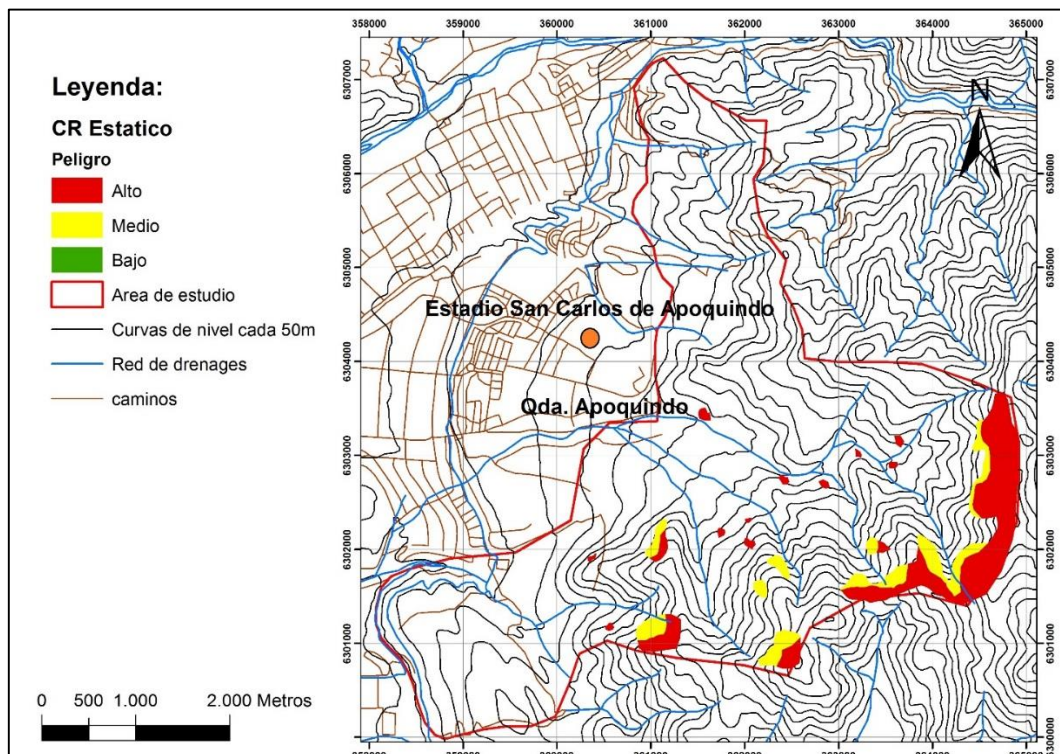


Figura 5.14. Mapa peligro caída de roca y deslizamiento en bloque de rocas, Quebrada de Apoquindo. Escenario estático. Mapa original, escala 1:20.00 en Anexo 4.

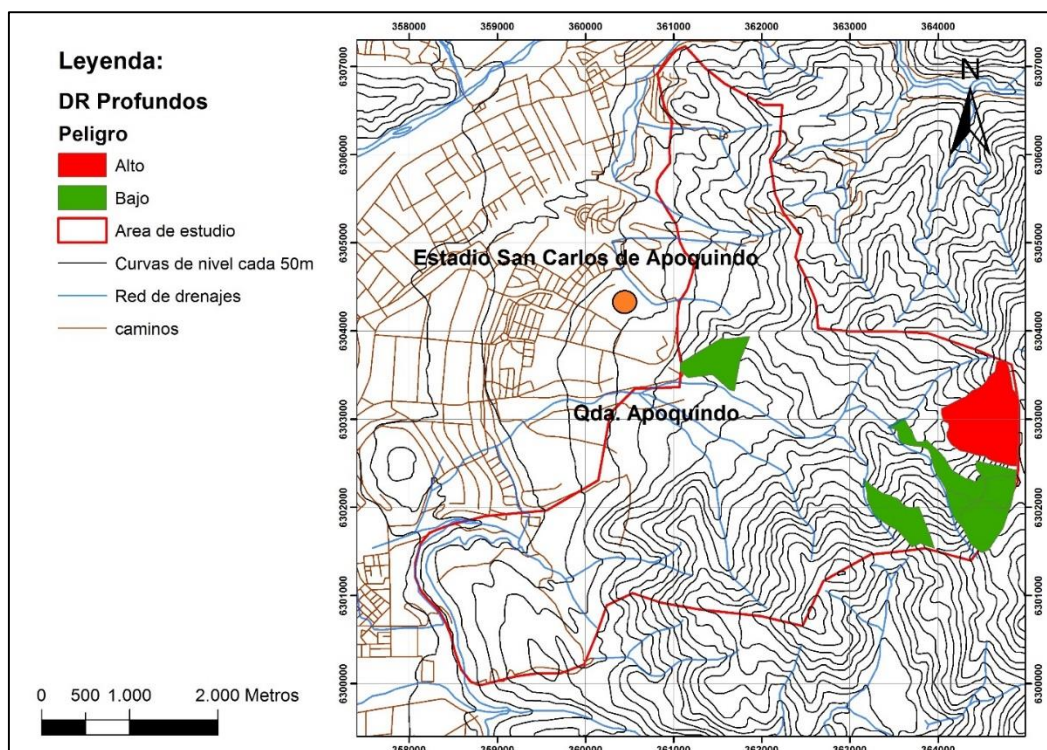


Figura 5.15. Mapa peligro deslizamiento de roca rotacional profundos, Quebrada de Apoquindo. Escenario sísmico-tormenta. Mapa original, escala 1:20.00 en Anexo 4.

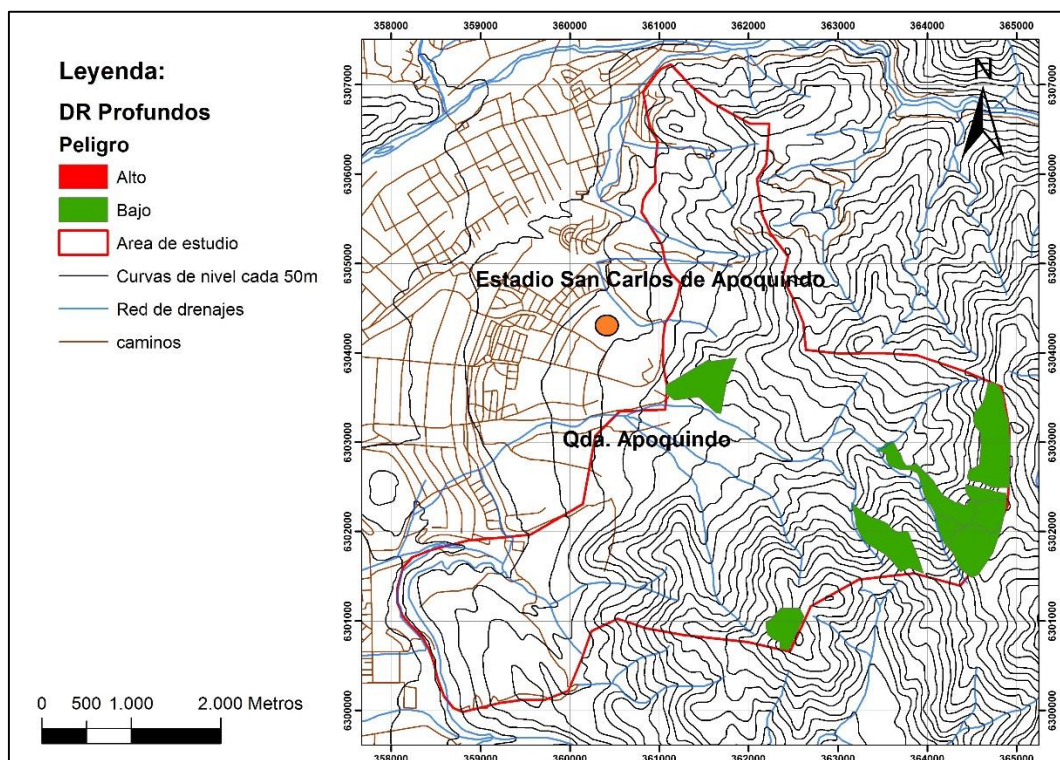


Figura 5.16. Mapa peligro deslizamiento de roca rotacional profundo, Quebrada de Apoquindo. Escenario estático-tormenta y sísmico-seco. Mapa original, escala 1:20.00 en Anexo 4.

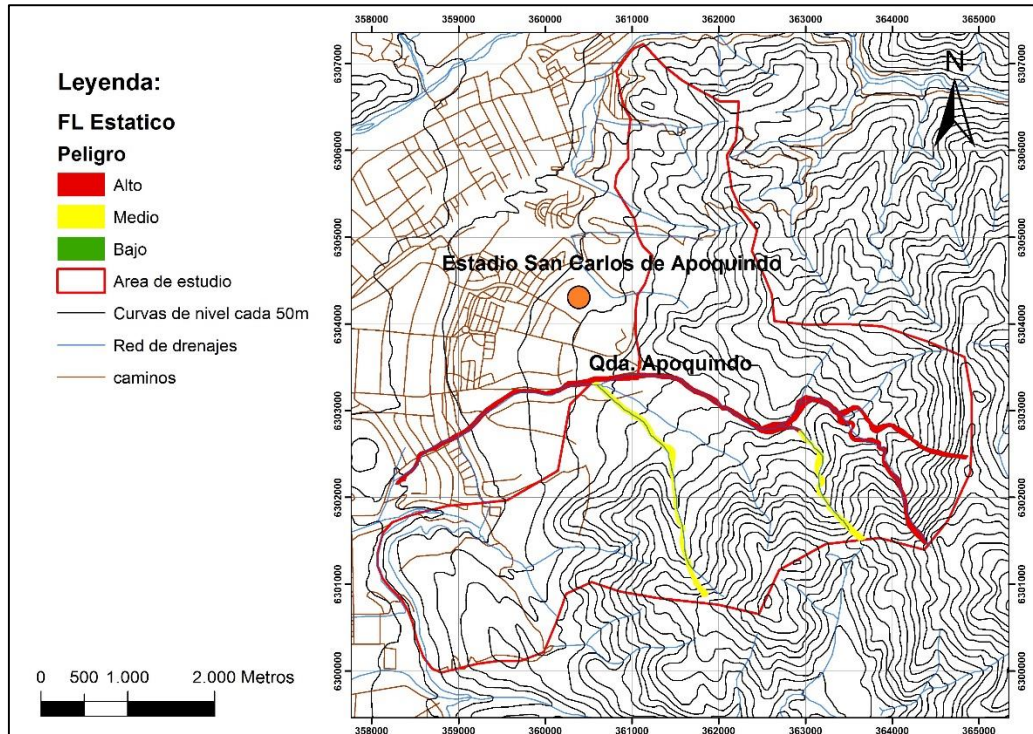


Figura 5.17. Mapa peligro flujos de detritos, Quebrada de Apoquindo. Escenario estático-tormentas. Mapa original, escala 1:20.00 en Anexo 4.

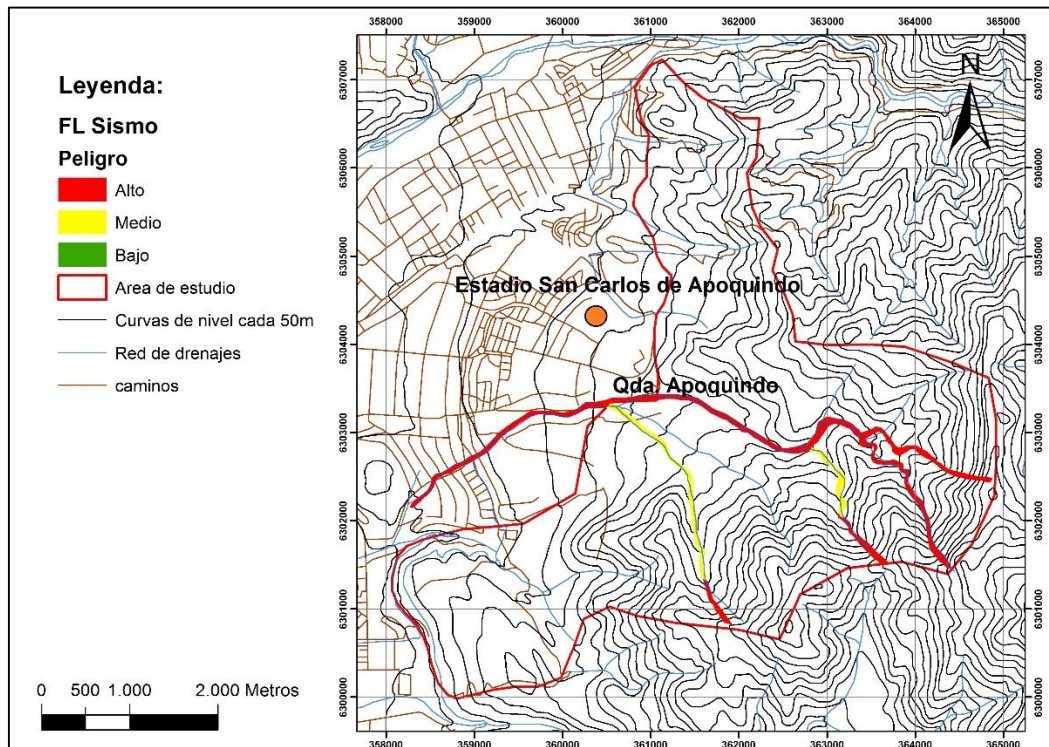


Figura 5.18. Mapa peligro flujos de detritos, Quebrada de Apoquindo. Escenario sísmico-tormenta. Mapa original, escala 1:20.00 en Anexo 4.

6 Discusiones

6.1 Consideraciones para este estudio

Para realizar la evaluación del peligro de remociones en masa en la Quebrada de Apoquindo, se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

- Una de las limitaciones más importante fue que no se pudo tener acceso a toda el área de estudio, particularmente en el sector norte de la Quebrada de Apoquindo, donde los terrenos son privados y no se permitió el ingreso. Otro sector que no se pudo visitar fueron las partes más altas de la hoya hidrográfica de la quebrada principal, es por esto que para el análisis fue fundamental los antecedentes de la zona e interpretación a través de imágenes satelitales. Además dada la incertidumbre en las áreas ya mencionadas, la evaluación del peligro de remociones en masa, se analiza bajo criterios conservadores.
- Los parámetros de suelo y rocas, que se utilizaron para el análisis de Factor de Seguridad y Probabilidad de Falla, fueron extraídos de Lara (2007), ya que la etapa de la metodología que hace referencia al análisis de laboratorio, no es parte del alcance de este trabajo.
- Las unidades de suelo se encuentran a lo largo de toda el área de estudio, su espesor es variable, pero siempre se mantiene entre 0,5 m y 1,5 m, es por esto que para el estudio de peligro para deslizamiento de suelos, solo se analizó el caso de suelos superficiales. Para el análisis de susceptibilidad en la parte de las cabeceras, no se analizó deslizamiento de suelos, porque sólo existen afloramientos de la Formación Abanico.
- El escenario climático considerado es con presencia de tormentas. De esta manera, para los flujos se ha considerado saturación del suelo de 100%, para los deslizamientos de suelos superficiales una profundidad del nivel freático cercana a la superficie (debido al poco espesor de los suelos involucrados) y para deslizamiento de rocas también se satura al 100%.
- Cuando se genera el mapa de pendientes de la zona en estudio, se contó con información topográfica de buen detalle en las zonas bajas, con curvas de nivel que están cada 10 m. En las áreas más altas no se logró obtener un buen detalle de las pendientes, ya que se ocuparon curvas de nivel cada 50 m, lo cual no alcanza un nivel óptimo de detalle en estas áreas. Es por esto que al considerar la pendiente promedio de las unidades definidas, donde el detalle no es el mejor para la metodología, se estima conveniente observar este factor en detalle en aquellas unidades cuyo IS se acerque al límite de 50.

6.2 Respeto a la metodología

Como se mencionó a lo largo de todo este trabajo, la metodología empleada en la zona de estudio es la propuesta por Lara (2007), la cual consta de dos etapas fundamentales, una de ellas es la delimitación de zonas susceptibles a remociones en masa y la otra es la evaluación del peligro para cada tipo de remoción en masa. La determinación de las zonas susceptibles se basa en información de la geología básica, geomorfología, estructuras mayores y condiciones climáticas, en cambio para evaluar el peligro se necesita información en detalle de cada unidad a estudiar como estructuras menores y geomorfología. Esto se verificó directamente con el trabajo en terreno que se realizó, en tres visitas al Parque Natural San Carlos de Apoquindo y sus alrededores.

Para la etapa de evaluación de la susceptibilidad (etapa G2 de la metodología) es necesario definir unidades geomorfológicas que tengan en común características geomorfológicas (pendientes y orientación de laderas) y características geológicas (tipo material o depósito). Se definieron 96 unidades geomorfológicas a escala 1:20.000, las cuales están en el rango óptimo propuesto por Lara (2007), que establece un máximo de 150 unidades. Esto agilizó la aplicación de las tablas de susceptibilidad y los distintos Softwares para obtención de la probabilidad de falla.

Con respecto a las tablas de susceptibilidad ha sido agregado un valor intermedio en particular, en el ponderador del factor condicionante que habla de caídas de rocas declaradas en la ladera, donde se agrega un ponderador cuando no existen antecedentes de caídas de rocas.

La evaluación del peligro se realizó bajo tres escenarios distintos, dado el contexto sísmico y climático en que se encuentra la zona de estudio, estos fueron: sísmico-tormenta, sísmico-seco y estático-tormentas. Estos escenarios se han establecido como datos de entrada para el análisis de la estabilidad de laderas y se han escogido por representar las condiciones más extremas para la generación de remoción en masa. El escenario sísmico asumido es de una aceleración horizontal de 0.3g, asociado a un sismo producido por la falla San Ramón, donde se espera una intensidad máxima de $M_w=7.4$. No hay registros de aceleración verticales, es por esto que solo se asume la aceleración horizontal ya mencionada.

Con respecto a la probabilidad de ocurrencia de los escenarios, se puede decir que el escenario sísmico-tormenta es el menos probable que ocurra y el más probable es el caso estático-tormenta.

Para el análisis del factor de seguridad y probabilidad de falla en el caso de deslizamientos rotacionales profundos (masivos) donde se utilizó el software SLIDE, se decide analizarlo bajo el criterio de Janbu, debido a la incertidumbre que hay en la zona por no haber visitado ciertas áreas. Es por esto que se optó por un análisis conservador y Janbu da factores de seguridad menores y por ende mayores probabilidad de fallas. Si bien la mayoría de las unidades geomorfológicas analizadas dan probabilidad de falla nula, solo la unidad 80 bajo el escenario más crítico (sismo-tormenta), utilizando el criterio de Janbu nos da una alta probabilidad de falla ($FS=0,812$ y $PF=100\%$). La combinación de estos factores gatillantes en términos generales es poco probable que ocurra.

En el caso de deslizamientos superficiales de suelo y flujos de detritos, Lara (2007) propone analizar con la utilización del software @RISK, pero como no se puede tener acceso a este software, se propone calcular la probabilidad de falla mediante el método estadístico de Montecarlo, en el que se asignaron a cada variable una distribución estadística representativa, utilizando el software Excel.

El mapeo estructural en detalle para el análisis cinemático no se pudo lograr ya que se requiere de afloramientos adecuados, donde la cobertura de la información dependerá del tiempo y acceso, así como también la existencia de suficientes afloramientos. Sin embargo, en nuestro caso el acceso a una cantidad representativa y con buenos afloramientos no fue posible por encontrarse en zonas muy altas, pero se observó in-situ un macizo donde se identificó deslizamiento de roca en cuñas. Con los datos obtenidos se logró obtener un factor de seguridad y probabilidad de falla a través de los softwares ROCPLANE y SWEDGE.

El peligro obtenido tendrá la categoría de alto-medio-bajo, mediante el criterio presentado en la Tabla 3.5, donde estas equivalencias se justifican con los factores de seguridad asociados. En los análisis probabilísticos, una probabilidad de falla del 50% tiene un factor de seguridad asociado igual o muy cercano a 1. Este valor es considerado el límite para designar la estabilidad o inestabilidad de una ladera, aunque no exista total certeza de la ocurrencia del evento, de ahí que la probabilidad asociada superior al 50% fuese considerada alta. Para cada tipo de remociones en masa la evaluación de probabilidad de falla se realizó mediante distintas herramientas computacionales y numéricas.

El mapa de peligro es la combinación tanto de la aplicación de la metodología como los resultados obtenidos y la recopilación de antecedentes. En algunos casos como en los flujos de detritos los resultados de los análisis dan PF bajas a medias. Los antecedentes que existen en la zona tienen un factor importante a la hora de asignarle un grado de peligro. Es por esto que si bien los análisis numéricos pueden ser discutibles, de igual manera el resultado final resulta ser confiable tomando en cuenta todos los factores ya mencionados.

Finalmente es importante señalar que la metodología empleada es sugerida y puede sufrir variaciones al ser aplicada en diferentes contextos geológicos.

6.3 Respecto a las áreas del peligro

Como se indicó en la metodología la primera fase del estudio consta en la realización de la evaluación de susceptibilidad a escala de las unidades geomorfológicas definidas. En algunos casos se pudo observar algunas remociones, como deslizamientos de suelos superficiales pequeños que no son representativos de la unidad geomorfológica, aunque se hayan considerado dentro de los puntajes dados en el IS.

En general, las unidades geomorfológicas que presentan un $IS \geq 50$ y con las probabilidades de fallas asociadas, se desprende que estas unidades susceptibles presentan un cierto grado de peligro, es decir, tienen un grado de inestabilidad.

En la Tabla 5.10 se aprecia que las unidades susceptibles para deslizamientos de suelos superficiales en el escenario sísmico ya sean con tormentas o seco, todas tienen una alta probabilidad de falla y se le asocia un grado alto de peligro de deslizamiento. Esto indica que el sismo es un factor gatillante importante en estos casos, sobre todo en este tipo de suelos no cohesivos. Es importante mencionar que en estos casos como el peligro para todas las unidades es alto, es posible que existan algunas unidades con un IS menor a 50 que de haber sido analizadas podrían obtener un peligro asociado.

En la situación estática con tormentas, como lo indica la Figura 6.1 la mayoría de las unidades que bordean el IS crítico presentan un grado de peligro bajo a medio, a excepción de la unidad 63 y 81, la cual tiene mayor pendiente que todas las demás unidades. Por lo tanto es probable que si IS crítico fuera mayor, quedarían una gran cantidad de unidades con un grado de peligro medio a alto.

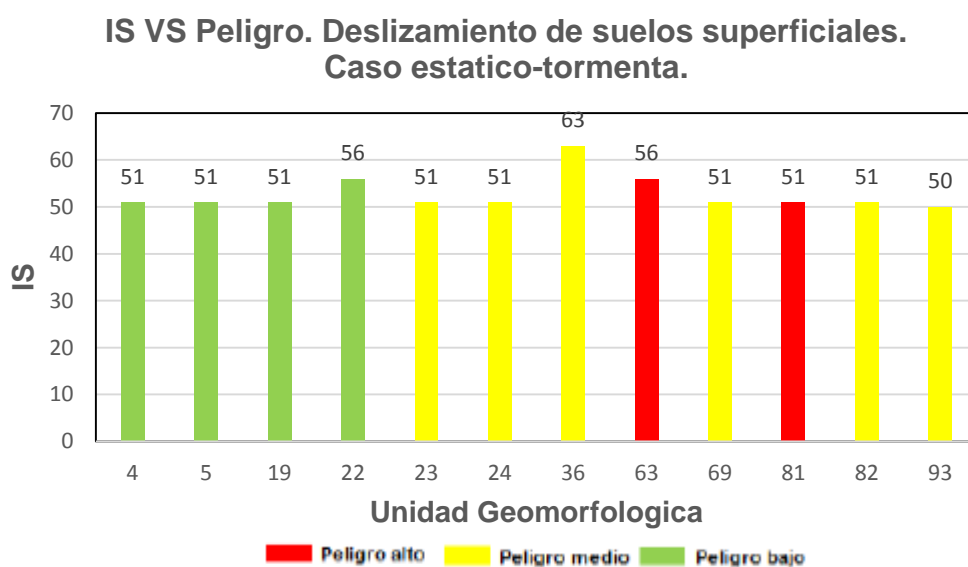


Figura 6.1. Relación IS y Peligro para deslizamiento de suelos superficiales. Caso estático con tormentas.

En el caso de deslizamientos de rocas profundos, se puede apreciar en la Tabla 5.12, que para todos los escenarios propuestos, las unidades susceptibles tienen una probabilidad de falla baja y por lo tanto bajo grado de peligro asociado, a excepción de la unidad 80 para el escenario más crítico (Sismo con tormenta) que obtiene un grado alto de peligro como lo muestra la Figura 6.2. Es importante indicar que la ocurrencia de la combinación de los factores gatillantes asumidos en el escenario más crítico (lluvias intensas con un sismo producido por la falla San Ramón), en términos generales es poco probable que suceda. Esta unidad se sitúa en la parte con mayor pendiente de la zona (cabeceras) y con la mayor presencia de afloramientos de la Formación Abanico. Dado que predomina el grado de peligro bajo, lleva a suponer que el IS crítico está subestimado.

IS vs Peligro. Deslizamiento de rocas profundos. Caso sísmico con tormentas

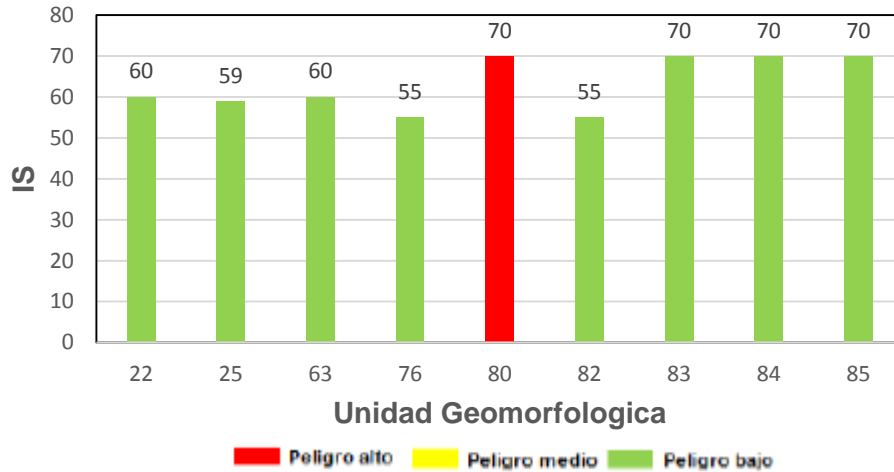


Figura 6.2. Relación IS vs Peligro para deslizamiento de rocas profundos. Caso sísmico con tormentas.

Como se señaló en el capítulo 5.4 en el caso de las caídas de rocas para las unidades susceptibles, los factores de seguridad y probabilidad de falla son las mismas que para deslizamientos de roca en bloque, esto asumiendo que las caídas se generan como deslizamiento, por esto se decidió realizar un mapa de peligro generalizado con estos dos tipos de remociones en masa. Los deslizamientos de roca en bloque muestran una alta probabilidad de falla para el tipo de deslizamiento en cuña y por ende un alto grado de peligro, a estos resultados se les han agregado zonas locales de caídas de rocas observadas en terreno, donde se les ha asignado un grado de peligro alto. La distribución predominante de estas remociones en masa se encuentra en las cabeceras y en la parte norte de la Quebrada de Apoquindo, donde se logró observar in situ la mayor cantidad de caídas de roca.

Finalmente en los flujos de detritos como se aprecia en la Tabla 5.15, las unidades susceptibles en el escenario estático tienen una probabilidad de falla baja y por ende un grado de peligro bajo. Como se muestra en la Figura 6.3 en el escenario sísmico el grado de peligro va de medio a alto. Como existen antecedentes en la zona que asignan un peligro alto de flujos (Antinao et al., 2003), a la hora de asignarle el grado del peligro este punto fue muy importante. Considerando este antecedente se opta por un análisis conservador debido a la incertidumbre que hay en la zona y se respeta lo realizado por Antinao et al., 2003. Quedando las quebradas que bajan de las cabeceras y el cauce principal con un grado de peligro alto. En este caso la metodología desde un punto de vista cuantitativo se vio truncada. No se realizaron modelos hidráulicos que intentaran representar su comportamiento ya que escapa de los alcances de esta memoria, sin embargo la mejor estimación de peligro de flujos que se logró realizar se basó en observaciones geológicas y geomorfológicas de la zona de estudio, y en los antecedentes existentes del área.

IS vs Peligro. Flujos. Caso sismico tormenta.

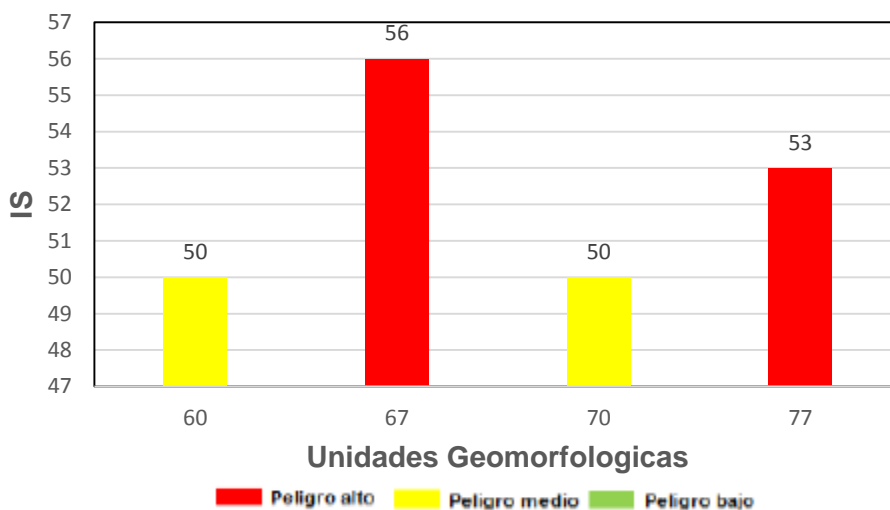


Figura 6.3. Relación IS vs Peligro. Flujos de detritos. Caso sísmico con tormentas.

7 Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo de memoria para la zona de estudio son las siguientes:

- El área de estudio se ubica en la Región Metropolitana, específicamente en los faldeos precordilleranos del sector de la comuna de Las Condes. En la zona se distingue el nivel inferior de la Formación Abanico, correspondiente a lavas de composición andesítica a basáltica, con intercalaciones de tobas brechosas, tobas soldadas y rocas sedimentarias continentales de hasta 1800 metros de espesor. También se presenta Intrusivos hipabisales cuya composición varía desde gabros a andesitas de piroxeno, dentro de este grupo se incluyen, entre otros, dioritas y andesitas instruyendo a la Formación Abanico, correspondiente a la Unidad Intrusiva II (Thiele, 1980). Dentro de las unidades de suelos presentes, se encuentran depósitos aluviales a lo largo de toda la quebrada principal y coluviales en las laderas, y depósitos de remociones en masa antiguos, concentrados en la zona oeste del área de estudio.
- La metodología consta de dos fases principales: la fase inicial que corresponde a la evaluación de susceptibilidad de remociones en masa la cual se basa en la ponderación de diferentes factores condicionantes para cada tipo de evento, aplicado a las 96 unidades geomorfológicas definidas a través de características geomorfológicas (pendiente y orientación de laderas). En tanto la segunda etapa es la evaluación de peligro, que se basa en la obtención de probabilidades de generación y probabilidades de alcance de los diferentes tipos de remociones en masa.

- Los factores más influyentes en la evaluación de susceptibilidad de remociones en masa son: geomorfología y características geológicas-geotécnicas. En relación a la geomorfología, las pendientes que se presentan en el área son altas y se distribuyen por las cabeceras de la hoya hidrográfica. Las características geológicas-geotécnicas van desde medianamente favorable a favorable a mecanismos de remoción en masa y presentan estructuras menores desarrollando sets estructurales que producen deslizamientos, se logró identificar en terreno deslizamiento en bloque de cuñas.
- La evaluación de susceptibilidad de remociones en masa en la quebrada de Apoquindo muestra que la zona de estudio es susceptible a fenómenos de remociones en masa superficiales de tipo deslizamiento de suelo y caídas de roca, y en menor grado a mecanismos de tipo flujos y deslizamientos de rocas profundos. Los valores de IS entregados por la metodología de Lara (2007), reflejan resultados consistentes según las condiciones observadas en la zona de estudio.
- La evaluación del peligro se ha realizado para los distintos tipos de remociones en masa, obteniendo que el mayor peligro de deslizamientos en bloque se encuentra principalmente en la zona este (cabeceras) y sur de la quebrada principal. Las caídas de rocas presentan una distribución muy similar a los deslizamientos en bloque, considerando además aquellas zonas locales que se identificaron en terreno. El mayor peligro de flujos de detritos se presentan en las quebradas que bajan de las cabeceras de la hoya hidrográfica y en el cauce de la quebrada principal. En el caso de deslizamiento de suelos superficiales el mayor peligro se distribuye al sur de la quebrada principal, donde las laderas tienen una orientación al norte y por ende con escasa vegetación, lo cual podría afectar su estabilidad.
- El carácter sísmico de nuestro país y específicamente del área en la que se enmarca la zona en estudio, con la presencia de la falla San Ramón y la generación de precipitaciones intensas en épocas invernales o estivales, corresponden a importantes gatillantes de fenómenos de remociones en masa superficiales y flujos de detritos en el área. El peligro en el área de estudio está ligado a mecanismos de carácter superficial y local, a excepción de los antecedentes de flujos de detritos que alcanzan zonas urbanas.
- Se recomienda realizar estudios más profundos de los flujos de detritos en la zona, para realizar planes de mitigación de daños orientados a la población de las áreas aledañas a la quebrada Apoquindo.

8 Bibliografía

- Aleotti, P., 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology* N°.73, Elsevier, p 247-265.
- Antinao, J.L., Gosse, J., 2008. Large rockslides in the Southern Central Andes of Chile (32-34.5°S): Tectonic control and significance for Quaternary landscape evolution.
- Antinao J.L., Fernandez J., Naranjo J. y Villarroel P., 2003. Peligros de Remociones en Masa e Inundaciones de la cuenca de Santiago. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, No.2.
- Araneda, M., Avendaño, M., Merlo C., 2000. Modelo gravimétrico de la cuenca de Santiago, etapa III final. IX Congreso Geológico Chileno, actas vol. 2, p. 404 – 408.
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, G., Vargas, J., Campos, R., Lacassin, y Kausel E., 2010. The West Andean Thrust (WAT), the San Ramon Fault and the seismic hazard for Santiago, Chile.
- Barrientos, S., Vera, E., Alvarado, P., Monfret, T., 2004. Crítal sesmicity in Central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 759-768 pp.
- Cambell, D. (2005). Termocronología del sector comprendido entre los ríos Rocin y Aconcagua: Implicancias en la evolución meso-cenozoica de la zona. Tesis (Geólogo). Santiago. Universidad de Chile.
- Carter, W.D. y Aguirre, L., 1965. Structural geology of Aconcagua province and its relationship to the Central valley graben, Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 76 pp. 651-664.
- Charrier, R., Bustamante, M., Comte, D., Elgueta, S., Flynn, J., Iturra, N., Muñoz, N., Pardo, M., Thiele, R y Wyss, A.R., 2005. The Abanico extensional basin: Regional extensión, chronology of tectonic inversión and relation to shallow seismic activity and Andean uplift. *Neues Jahrbuch Fur Geologie Und Palaontologie-Abhandlungen*, 236 (1-2) pp. 43-77.
- Cruden, D., 1991. A simple definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. No. 43, p. 27-29.
- Cruden, D., Varnes, D., 1996. Landslide types and processes. In Turner A.K & Schuster R.L., 1996. *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington D.C. 675p.
- Comte, D., Eisenberg, A., Lorca, E., Pardo, M., Ponce, L., Saragoni, R, Singh, S.K y Suarez, G., 1986. The great 1985 Central Chile erathquake: A repeat of previous great earthquake in the región? *Science*, Vol.233, 449-453pp.
- Departamento de Geología, Universidad de Chile., 2011. Evaluación del peligro sísmico zona oriente de Santiago.
- Gajardo, R., 1994. La vegetación Natural de Chile. Clasificación y Distribución Geográfica. Editorial Universitaria, Santiago, Chile. 165p.

- García, V., 2000. Fenómenos de remociones en masa asociados a la ocurrencia de las anomalías atmosféricas, Santiago Oriente. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Garreaud, R. y Ruttlund, J., 1996. Analisis meteorológico de los aluviones de Antofagasta y Santiago de Chile en el periodo 1991-1993. *Atmosfera*, 9, p 251-271.
- Farías, M., Charrier, R., Carretier, S., Martinod, J., Fock, A., Campbell, D., Cáceres, J., y Comte, D., 2008. Late Miocene high and rapid surface uplift and its erosional response in the Andes of central Chile (33°-35°S). *Tectonics*, vol. 27, NºTC1005, 22 p.
- Fernández, J., 2001. Estudio geológico ambiental para la planificación territorial de sector TilTil-Santiago. Memoria para optar al título de geólogo. Departamento de Geología. Universidad de Chile. 126 p.
- Fock, A., 2005. Cronología y Tectónica de la exhumación en el Neógeno de Los Andes de Chile Central entre los 33° y 34° S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Garcia, V., 2000. Fenómenos de remociones en masa asociados a la ocurrencia de anomalías atmosféricas, Santiago Oriente. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Glade, T. and Crozier, M., 2005: The nature of landslide hazard impact, in: *Landslide hazard and risk*, p 43-74.
- Gonzales de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. 2002. Ingeniería Geológica. Editorial Pearson 744p.
- Goodman, R. E., 1976. *Methods of Geologic Engineering in Discontinuous Rock*. St. Paul, Minnesota: Chapter 3, pp. 58-90.
- Hauser, A., 1985. Flujos de barro en la zona preandina de la Región Metropolitana: Características, causas, efectos, riesgos y medidas preventivas. *Revista Geológica de Chile* No. 24, p 75-92
- Hauser, A., 1993. Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 45, p. 7-29.
- Hauser, A., 2000. Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín Nº45.
- Hauser Y. Arturo, remociones en masa en Chile versión actualizada. Servicio nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín nº59, 2002.
- Hutchinson JN, 1988. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: *Proceedings of the 5th international symposium on landslide*, p 3-35.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2013. The Varnes classification of landslide types, an update, p. 167-194.
- Karzulovic, J., 1957. Sedimentos cuaternarios y aguas subterráneas en la cuenca de Santiago. *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas*. Universidad de Chile. Volumen 14 – 15. p. 5 -120
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 95, p 406-421.

- Lambe, W., Whitman, R., 1972. Mecánica de suelos. Instituto Tecnológico de Massachusetts, Editorial Limusa-Wiley S.A., 583p.
- Lara, M. 2007. Metodología para la evaluación y zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en la quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar al Grado de Magister en Ciencias Mención Geología y Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología.
- Leyton, F., Sepulveda, S., Astroza, M., Rebolledo, S., Gonzalez, L., Ruiz, S., Fonceca, C., Herrera, M. y Lavado, J., 2010. “Zonificación sísmica de la cuenca de Santiago, Chile”. En X Jornadas chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica. Santiago, Chile.
- Llambías, E. J., Quenardelle, S., and Montenegro, T., 2003. The Choiyoi Group from central Argentina: a subalkaline transitional to alkaline association in the craton adjacent to the active margin of the Gondwana continent *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 16, p. 243–257.
- Newmark, N.M. y Hall W.J., 1982. Earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, 15 (2). 139-160 pp.
- Miller, A., 1976. The climate of Chile. *Climates of Central and South America*, W. Schwerdtfeger (Ed), *World Survey of Climatology*, Vol 12. Pp 113-145.
- Muñoz, E. 2013. Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en zonas urbanas. Estudio de caso en Viña del Mar, V región. Tesis para optar al grado de magister en ciencias mención Geología. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología, 164p.
- Padilla, C., 2006. Análisis de factores meteorológicos desencadenantes de remociones en masa en el sector oriente de Santiago. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Perez, A., Ruiza, J.A., Vargas, G., Rauld, R., Rebolledo, S., y Campos, J., 2014. Improving seismotectonics and seismic hazard assessment along the San Ramon Fault at the Eastern border of Santiago city, Chile. Pp 243-274.
- Popescu, M.E., 2002. Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options. Keynote Lecture, *Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures*, Singapore, p. 61-81.
- Rauld, R., 2002. Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago Oriente, entre el río Mapocho y la quebrada de Macul. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Rauld, R., 2011. Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33°S). Tesis para optar al Grado de Doctor en Ciencias mención Geología. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Rivano, S., Sepulveda, P., Boric, R y Espiñeira, D. 1993. Mapa Geológico de las hojas Quillota y Portillo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica N°73, escala 1:250.000. Santiago.

- Sauret, B., 1987. Coulees de debris canalisees. Compte rendu bibliographique. In Risques Naturels. Bulletin de liason des Laboratoires des Ponts et Chaussees, N°. 150-151, p.65-77.
- Selby, M.J., 1993. Hillslope materials and processes. Second Edition, Oxford University Press, 451p.
- Selles, D. y Gana, P., 2001. Geología de área Talagante-San Francisco de Mostazal: Regiones Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins, SERNAGEOMIN, 30p.
- Sepúlveda, S., 1998. Metodología para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos: Aplicación en la quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Sepulveda, S., Rebolledo, S., 2006. Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response. Quaternary International 158: p 83-95.
- Sepulveda, S., Padilla, C., 2008. Rain-induced debris and mudflow triggering factors assessment in the Santiago cordilleran foothills, Central Chile. 201-215 pp.
- SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: Version digital. Servicio Nacional de Geología y Minería. Publicación Geología Digital, N°4.
- Thiele, R, 1980. Geología de la Hoja de Santiago, Región Metropolitana. Carta Geológica de Chile N°. 39. Instituto de Investigaciones Geológicas. 1 mapa. 51 p.
- Tricart, J., Michel, M., 1965. Informe sobre la Geomorfología de la cuenca de Santiago y sus relaciones con aguas subterráneas. Instituto de Investigaciones Geológicas, 25p
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In Landslides, Analysis and Control, Special Report N°176. Schuster, R.L., Krizek, R.J., edits. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., p.11-33.
- Varnes, D.J., 1984. Landslide Hazard Zonation: A review of principles and practice. Natural Hazards 3, UNESCO, 63p.
- Wall, R., Selles, D. y Gana, P., 1999. Área Til Til-Santiago, Región Metropolitana, Sernageomin, 17p.

ANEXOS

1 Tablas de cálculo de índice de susceptibilidad.

En cada tabla se indica con rojo aquellas unidades que obtienen $IS \geq 50$.

Tabla 1.1 Índice de susceptibilidad para caídas de rocas, metodología Lara (2007). Escala 1:20.000.

| Unidad | F1CR | F2CR | F3CR | F4CR | F5CR | F6CR | ISCR |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 10 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 31 |
| 1 | 10 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 31 |
| 2 | 10 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 31 |
| 3 | 18 | 15 | 2 | 0 | 5 | 1 | 41 |
| 4 | 18 | 24 | 0 | 0 | 5 | 1 | 48 |
| 5 | 25 | 24 | 2 | 0 | 5 | 1 | 57 |
| 6 | 10 | 15 | 0 | 3 | 5 | 1 | 34 |
| 7 | 10 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 31 |
| 8 | 18 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 39 |
| 9 | 18 | 24 | 0 | 3 | 15 | 1 | 61 |
| 10 | 18 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 60 |
| 11 | 25 | 24 | 2 | 0 | 5 | 1 | 57 |
| 12 | 10 | 24 | 0 | 0 | 15 | 1 | 50 |
| 13 | 18 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 60 |
| 14 | 10 | 15 | 0 | 3 | 15 | 1 | 44 |
| 15 | 10 | 15 | 2 | 0 | 5 | 1 | 33 |
| 16 | 4 | 15 | 0 | 3 | 5 | 1 | 28 |
| 17 | 18 | 24 | 0 | 0 | 5 | 1 | 48 |
| 18 | 18 | 24 | 0 | 0 | 5 | 1 | 48 |
| 19 | 18 | 24 | 0 | 0 | 5 | 1 | 48 |
| 20 | 10 | 24 | 2 | 0 | 5 | 1 | 42 |
| 21 | 4 | 35 | 0 | 0 | 15 | 1 | 55 |
| 22 | 25 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 67 |
| 23 | 25 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 67 |
| 24 | 18 | 35 | 0 | 0 | 15 | 1 | 69 |
| 25 | 10 | 35 | 0 | 0 | 5 | 1 | 51 |
| 26 | 10 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 31 |
| 27 | 10 | 15 | 2 | 0 | 15 | 1 | 43 |
| 28 | 10 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 52 |
| 29 | 10 | 15 | 2 | 0 | 15 | 1 | 43 |
| 30 | 4 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 25 |
| 31 | 10 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 31 |
| 32 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 1 | 10 |
| 33 | 18 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 60 |
| 34 | 25 | 35 | 0 | 0 | 15 | 1 | 76 |
| 35 | 25 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 67 |
| 36 | 25 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 67 |
| 37 | 10 | 24 | 0 | 0 | 15 | 1 | 50 |
| 38 | 10 | 24 | 0 | 0 | 15 | 1 | 50 |
| 39 | 18 | 24 | 0 | 0 | 5 | 1 | 48 |
| 40 | 10 | 24 | 0 | 0 | 5 | 1 | 40 |
| 41 | 10 | 18 | 0 | 0 | 15 | 1 | 44 |
| 42 | 10 | 24 | 0 | 0 | 5 | 1 | 40 |

| | | | | | | | |
|----|----|----|---|---|----|---|----|
| 43 | 10 | 24 | 0 | 3 | 5 | 1 | 43 |
| 44 | 10 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 31 |
| 45 | 10 | 24 | 0 | 0 | 5 | 1 | 40 |
| 46 | 18 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 39 |
| 47 | 18 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 39 |
| 48 | 10 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 31 |
| 49 | 10 | 24 | 0 | 0 | 5 | 1 | 40 |
| 50 | 4 | 15 | 0 | 3 | 5 | 1 | 28 |
| 51 | 10 | 24 | 2 | 0 | 5 | 1 | 42 |
| 52 | 4 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 25 |
| 53 | 10 | 24 | 0 | 0 | 5 | 1 | 40 |
| 54 | 18 | 24 | 0 | 0 | 5 | 1 | 48 |
| 55 | 25 | 24 | 2 | 0 | 5 | 1 | 57 |
| 56 | 25 | 24 | 2 | 0 | 5 | 1 | 57 |
| 57 | 18 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 39 |
| 58 | 25 | 35 | 0 | 0 | 15 | 1 | 76 |
| 59 | 18 | 24 | 0 | 0 | 15 | 1 | 58 |
| 60 | 18 | 24 | 0 | 0 | 15 | 1 | 58 |
| 61 | 25 | 24 | 0 | 0 | 15 | 1 | 65 |
| 62 | 18 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 60 |
| 63 | 25 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 67 |
| 64 | 10 | 18 | 0 | 0 | 15 | 1 | 44 |
| 65 | 4 | 24 | 0 | 0 | 5 | 1 | 34 |
| 66 | 18 | 35 | 2 | 0 | 15 | 1 | 71 |
| 67 | 10 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 52 |
| 68 | 10 | 24 | 2 | 0 | 5 | 1 | 42 |
| 69 | 18 | 35 | 2 | 0 | 15 | 1 | 71 |
| 70 | 10 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 52 |
| 71 | 10 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 31 |
| 72 | 4 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 25 |
| 73 | 4 | 24 | 0 | 0 | 5 | 1 | 34 |
| 74 | 18 | 15 | 2 | 0 | 5 | 1 | 41 |
| 75 | 10 | 15 | 2 | 0 | 5 | 1 | 33 |
| 76 | 18 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 60 |
| 77 | 18 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 60 |
| 78 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 1 | 10 |
| 79 | 4 | 9 | 0 | 0 | 0 | 1 | 14 |
| 80 | 25 | 35 | 2 | 0 | 15 | 1 | 78 |
| 81 | 18 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 60 |
| 82 | 18 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 60 |
| 83 | 25 | 35 | 2 | 0 | 15 | 1 | 78 |
| 84 | 25 | 35 | 2 | 0 | 15 | 1 | 78 |
| 85 | 25 | 35 | 2 | 0 | 15 | 1 | 78 |
| 86 | 10 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 52 |
| 87 | 4 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 25 |
| 88 | 18 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 60 |
| 89 | 18 | 24 | 2 | 0 | 15 | 1 | 60 |
| 90 | 4 | 15 | 0 | 0 | 15 | 1 | 35 |
| 91 | 10 | 15 | 0 | 0 | 5 | 1 | 31 |
| 92 | 18 | 24 | 0 | 0 | 15 | 1 | 58 |
| 93 | 18 | 24 | 0 | 0 | 15 | 1 | 58 |
| 94 | 18 | 24 | 0 | 0 | 5 | 1 | 48 |
| 95 | 18 | 35 | 0 | 0 | 15 | 1 | 69 |

Tabla 1.2 Índice de susceptibilidad para deslizamiento de roca, metodología Lara (2007). Escala 1:20.000.

| Unidad | F1DR | F2DR | F3DR | F4DR | F5DR | F6DR | ISDR |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | 15 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 39 |
| 1 | 15 | 11 | 0 | 0 | 5 | 1 | 32 |
| 2 | 15 | 11 | 0 | 0 | 5 | 1 | 32 |
| 3 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 4 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 5 | 25 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 49 |
| 6 | 15 | 18 | 0 | 5 | 5 | 1 | 44 |
| 7 | 15 | 11 | 0 | 0 | 5 | 1 | 32 |
| 8 | 20 | 11 | 0 | 0 | 5 | 1 | 37 |
| 9 | 20 | 18 | 0 | 5 | 5 | 1 | 49 |
| 10 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 11 | 25 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 49 |
| 12 | 15 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 39 |
| 13 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 14 | 15 | 11 | 0 | 5 | 0 | 1 | 32 |
| 15 | 15 | 28 | 1 | 0 | 0 | 1 | 45 |
| 16 | 11 | 11 | 0 | 5 | 5 | 1 | 33 |
| 17 | 20 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 44 |
| 18 | 20 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 44 |
| 19 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 20 | 15 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 40 |
| 21 | 11 | 28 | 0 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 22 | 25 | 28 | 1 | 0 | 5 | 1 | 60 |
| 23 | 25 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 49 |
| 24 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 25 | 15 | 28 | 0 | 0 | 15 | 1 | 59 |
| 26 | 15 | 11 | 0 | 0 | 5 | 1 | 32 |
| 27 | 15 | 11 | 1 | 0 | 5 | 1 | 33 |
| 28 | 15 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 40 |
| 29 | 15 | 11 | 1 | 0 | 5 | 1 | 33 |
| 30 | 11 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 35 |
| 31 | 15 | 11 | 0 | 0 | 5 | 1 | 32 |
| 32 | 0 | 11 | 0 | 0 | 5 | 1 | 17 |
| 33 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 34 | 25 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 49 |
| 35 | 25 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 49 |
| 36 | 25 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 49 |
| 37 | 15 | 11 | 0 | 0 | 5 | 1 | 32 |
| 38 | 15 | 11 | 0 | 0 | 5 | 1 | 32 |
| 39 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 40 | 15 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 39 |
| 41 | 15 | 11 | 0 | 0 | 5 | 1 | 32 |
| 42 | 15 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 39 |
| 43 | 15 | 11 | 0 | 5 | 5 | 1 | 37 |
| 44 | 15 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 39 |
| 45 | 15 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 39 |
| 46 | 20 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 44 |
| 47 | 20 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 44 |
| 48 | 15 | 11 | 0 | 0 | 5 | 1 | 32 |

| | | | | | | | |
|----|----|----|---|---|----|---|----|
| 49 | 15 | 11 | 0 | 0 | 5 | 1 | 32 |
| 50 | 11 | 11 | 0 | 5 | 5 | 1 | 33 |
| 51 | 15 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 40 |
| 52 | 11 | 11 | 0 | 0 | 5 | 1 | 28 |
| 53 | 15 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 39 |
| 54 | 20 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 44 |
| 55 | 25 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 49 |
| 56 | 25 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 49 |
| 57 | 20 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 44 |
| 58 | 25 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 49 |
| 59 | 20 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 44 |
| 60 | 20 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 44 |
| 61 | 25 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 49 |
| 62 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 63 | 25 | 28 | 1 | 0 | 5 | 1 | 60 |
| 64 | 15 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 39 |
| 65 | 11 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 35 |
| 66 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 67 | 15 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 40 |
| 68 | 15 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 40 |
| 69 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 70 | 15 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 40 |
| 71 | 15 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 39 |
| 72 | 11 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 35 |
| 73 | 11 | 11 | 0 | 0 | 5 | 1 | 28 |
| 74 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 75 | 15 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 40 |
| 76 | 20 | 18 | 1 | 0 | 15 | 1 | 55 |
| 77 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 78 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 1 | 12 |
| 79 | 11 | 11 | 0 | 0 | 0 | 1 | 23 |
| 80 | 25 | 28 | 1 | 0 | 15 | 1 | 70 |
| 81 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 82 | 20 | 18 | 1 | 0 | 15 | 1 | 55 |
| 83 | 25 | 28 | 1 | 0 | 15 | 1 | 70 |
| 84 | 25 | 28 | 1 | 0 | 15 | 1 | 70 |
| 85 | 25 | 28 | 1 | 0 | 15 | 1 | 70 |
| 86 | 15 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 40 |
| 87 | 11 | 11 | 0 | 0 | 0 | 1 | 23 |
| 88 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 89 | 20 | 18 | 1 | 0 | 5 | 1 | 45 |
| 90 | 11 | 18 | 0 | 0 | 0 | 1 | 30 |
| 91 | 15 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 39 |
| 92 | 20 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 44 |
| 93 | 20 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 44 |
| 94 | 20 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 44 |
| 95 | 20 | 18 | 0 | 0 | 5 | 1 | 44 |

Tabla 1.3 Índice de susceptibilidad para deslizamiento de suelos, metodología Lara (2007). Escala 1:20.000

| Unidad | F1DS | F2DS | F3DS | F4DS | F5DS | F6DS | F7DS | F8DS | F9DS | F10DS | ISDS |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| 0 | 15 | 5 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 41 |
| 1 | 15 | 1 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 35 |
| 2 | 15 | 1 | 6 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 31 |
| 3 | 21 | 5 | 10 | 3 | 1 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 48 |
| 4 | 21 | 5 | 10 | 3 | 1 | 5 | 0 | 3 | 2 | 1 | 51 |
| 5 | 26 | 3 | 10 | 3 | 1 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 51 |
| 6 | 15 | 3 | 6 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 35 |
| 7 | 15 | 3 | 6 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 35 |
| 8 | 21 | 1 | 10 | 3 | 0 | 5 | 0 | 3 | 2 | 1 | 46 |
| 9 | 21 | 5 | 10 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 45 |
| 10 | 21 | 5 | 10 | 3 | 1 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 46 |
| 11 | 26 | 3 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 44 |
| 12 | 15 | 5 | 10 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 39 |
| 13 | 21 | 1 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 37 |
| 14 | 15 | 5 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 41 |
| 15 | 15 | 3 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 33 |
| 16 | 9 | 3 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 33 |
| 17 | 21 | 3 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 45 |
| 18 | 21 | 3 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 43 |
| 19 | 21 | 3 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 10 | 2 | 1 | 51 |
| 20 | 15 | 3 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 33 |
| 21 | 9 | 5 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 30 |
| 22 | 26 | 5 | 10 | 3 | 1 | 5 | 0 | 3 | 2 | 1 | 56 |
| 23 | 26 | 5 | 10 | 3 | 1 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 51 |
| 24 | 21 | 5 | 10 | 3 | 1 | 5 | 0 | 3 | 2 | 1 | 51 |
| 25 | 15 | 1 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 30 |
| 26 | 15 | 1 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 30 |
| 27 | 15 | 1 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 31 |
| 28 | 15 | 1 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 36 |
| 29 | 15 | 1 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 31 |
| 30 | 9 | 1 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 24 |
| 31 | 15 | 3 | 10 | 3 | 0 | 0 | 5 | 3 | 2 | 1 | 42 |
| 32 | 0 | 1 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 20 |
| 33 | 21 | 5 | 10 | 3 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 43 |
| 34 | 26 | 5 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 47 |
| 35 | 26 | 1 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 42 |
| 36 | 26 | 5 | 10 | 3 | 1 | 5 | 0 | 10 | 2 | 1 | 63 |
| 37 | 15 | 3 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 32 |
| 38 | 15 | 5 | 10 | 3 | 0 | 2 | 5 | 0 | 0 | 1 | 41 |
| 39 | 21 | 3 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 44 |
| 40 | 15 | 3 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 37 |
| 41 | 15 | 3 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 37 |
| 42 | 15 | 3 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 39 |
| 43 | 15 | 3 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 39 |
| 44 | 15 | 1 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 35 |
| 45 | 15 | 1 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 35 |
| 46 | 21 | 1 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 41 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|----|---|----|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 47 | 21 | 1 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 41 |
| 48 | 15 | 1 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 35 |
| 49 | 15 | 3 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 37 |
| 50 | 9 | 1 | 10 | 3 | 0 | 0 | 5 | 3 | 2 | 1 | 34 |
| 51 | 15 | 1 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 36 |
| 52 | 9 | 1 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 29 |
| 53 | 15 | 3 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 39 |
| 54 | 21 | 3 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 40 |
| 55 | 26 | 3 | 10 | 3 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 46 |
| 56 | 26 | 3 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 44 |
| 57 | 21 | 1 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 41 |
| 58 | 26 | 1 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 43 |
| 59 | 21 | 3 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 40 |
| 60 | 21 | 3 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 40 |
| 61 | 26 | 3 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 45 |
| 62 | 21 | 3 | 10 | 3 | 1 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 46 |
| 63 | 26 | 5 | 10 | 3 | 1 | 5 | 0 | 3 | 2 | 1 | 56 |
| 64 | 15 | 3 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 32 |
| 65 | 9 | 3 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 33 |
| 66 | 21 | 5 | 10 | 3 | 1 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 46 |
| 67 | 15 | 5 | 10 | 3 | 1 | 5 | 0 | 3 | 2 | 1 | 45 |
| 68 | 15 | 3 | 10 | 3 | 1 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 40 |
| 69 | 21 | 5 | 10 | 3 | 1 | 5 | 0 | 3 | 2 | 1 | 51 |
| 70 | 15 | 3 | 10 | 3 | 1 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 40 |
| 71 | 15 | 3 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 37 |
| 72 | 9 | 3 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 31 |
| 73 | 9 | 3 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 31 |
| 74 | 21 | 5 | 10 | 3 | 1 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 48 |
| 75 | 15 | 3 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 38 |
| 76 | 21 | 3 | 10 | 3 | 1 | 5 | 0 | 3 | 2 | 1 | 49 |
| 77 | 21 | 3 | 10 | 3 | 1 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 46 |
| 78 | 0 | 3 | 6 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 18 |
| 79 | 9 | 3 | 6 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 27 |
| 80 | 26 | 3 | 6 | 3 | 1 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 45 |
| 81 | 21 | 5 | 10 | 3 | 1 | 5 | 0 | 3 | 2 | 1 | 51 |
| 82 | 21 | 5 | 10 | 3 | 1 | 5 | 0 | 3 | 2 | 1 | 51 |
| 83 | 26 | 5 | 6 | 3 | 1 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 47 |
| 84 | 26 | 5 | 6 | 3 | 1 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 47 |
| 85 | 26 | 5 | 6 | 3 | 1 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 47 |
| 86 | 15 | 3 | 10 | 3 | 1 | 5 | 0 | 3 | 2 | 1 | 43 |
| 87 | 9 | 3 | 6 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 29 |
| 88 | 21 | 1 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 3 | 2 | 1 | 42 |
| 89 | 21 | 1 | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 37 |
| 90 | 9 | 1 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 24 |
| 91 | 15 | 3 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 39 |
| 92 | 21 | 3 | 10 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 38 |
| 93 | 21 | 5 | 10 | 3 | 0 | 5 | 0 | 3 | 2 | 1 | 50 |
| 94 | 21 | 3 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 45 |
| 95 | 21 | 3 | 10 | 3 | 0 | 2 | 0 | 3 | 2 | 1 | 45 |

Tabla 1.4 Índice de susceptibilidad para flujos de detritos, metodología Lara (2007). Escala 1:20.000.

| Unidad | F1FL | F2FL | F3FL | F4FL | F5FL | F6FL | F7FL | F8FL | F9FL | F10FL | F11FL | F12FL | ISFL |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
| 0 | 9 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 32 |
| 1 | 9 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 26 |
| 2 | 9 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 26 |
| 3 | 11 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 34 |
| 4 | 11 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 36 |
| 5 | 13 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 35 |
| 6 | 9 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 31 |
| 7 | 9 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 31 |
| 8 | 11 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 33 |
| 9 | 11 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 36 |
| 10 | 11 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 36 |
| 11 | 13 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 32 |
| 12 | 9 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 34 |
| 13 | 11 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| 14 | 9 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 32 |
| 15 | 9 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| 16 | 6 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| 17 | 11 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 33 |
| 18 | 11 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 30 |
| 19 | 11 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 30 |
| 20 | 9 | 10 | 1 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 40 |
| 21 | 6 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 29 |
| 22 | 13 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 38 |
| 23 | 13 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 38 |
| 24 | 11 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 36 |
| 25 | 9 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 26 |
| 26 | 9 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 26 |
| 27 | 9 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 26 |
| 28 | 9 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 26 |
| 29 | 9 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 26 |
| 30 | 6 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 23 |
| 31 | 9 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| 32 | 3 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 20 |
| 33 | 11 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 34 |
| 34 | 13 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 36 |
| 35 | 13 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 30 |
| 36 | 13 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 38 |
| 37 | 9 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| 38 | 9 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 32 |
| 39 | 11 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 30 |
| 40 | 9 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| 41 | 9 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| 42 | 9 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 31 |
| 43 | 9 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 31 |
| 44 | 9 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 26 |
| 45 | 9 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 26 |
| 46 | 11 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| 47 | 11 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|---|---|----|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 48 | 9 | 10 | 1 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 1 | 44 |
| 49 | 9 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| 50 | 6 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 23 |
| 51 | 9 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 26 |
| 52 | 6 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 23 |
| 53 | 9 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 31 |
| 54 | 11 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 33 |
| 55 | 13 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 35 |
| 56 | 13 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 32 |
| 57 | 11 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| 58 | 13 | 10 | 4 | 0 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 48 |
| 59 | 11 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 33 |
| 60 | 11 | 10 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 7 | 1 | 50 |
| 61 | 13 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 35 |
| 62 | 11 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 33 |
| 63 | 13 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 38 |
| 64 | 9 | 10 | 1 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 40 |
| 65 | 6 | 10 | 1 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 40 |
| 66 | 11 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 36 |
| 67 | 9 | 10 | 4 | 3 | 13 | 3 | 1 | 5 | 0 | 0 | 7 | 1 | 56 |
| 68 | 6 | 10 | 1 | 2 | 13 | 3 | 1 | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 41 |
| 69 | 11 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 36 |
| 70 | 6 | 10 | 4 | 2 | 13 | 3 | 1 | 3 | 0 | 0 | 7 | 1 | 50 |
| 71 | 9 | 10 | 1 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 40 |
| 72 | 6 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 25 |
| 73 | 6 | 10 | 1 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 37 |
| 74 | 11 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 34 |
| 75 | 9 | 10 | 1 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 40 |
| 76 | 11 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 35 |
| 77 | 9 | 10 | 4 | 2 | 13 | 3 | 1 | 3 | 0 | 0 | 7 | 1 | 53 |
| 78 | 0 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 19 |
| 79 | 6 | 10 | 4 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 1 | 46 |
| 80 | 13 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 37 |
| 81 | 11 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 36 |
| 82 | 11 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 36 |
| 83 | 13 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 38 |
| 84 | 13 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 38 |
| 85 | 13 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 38 |
| 86 | 9 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 33 |
| 87 | 6 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| 88 | 11 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| 89 | 11 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 28 |
| 90 | 6 | 0 | 0 | 0 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 23 |
| 91 | 9 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 31 |
| 92 | 11 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 30 |
| 93 | 11 | 0 | 0 | 3 | 13 | 3 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 36 |
| 94 | 11 | 10 | 1 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 45 |
| 95 | 11 | 0 | 0 | 2 | 13 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 33 |

2 Evaluación probabilidad de falla (PF).

2.1 Probabilidad de falla para deslizamiento de rocas.

SLIDE es una herramienta computacional que evalúa la estabilidad de deslizamientos rotacionales, entregando posibles superficies de falla a generarse destacando aquella con menor factor de seguridad. Necesita parámetros geométricos y geotécnicos, se pueden añadir grietas de tensión, presión de agua fuerzas externas y soportes. Los datos de ingreso son: Geometría de la ladera, tipos de superficies de despegue, dirección del deslizamiento, propiedades del material y método de análisis (Bishop, Jnbu, etc.). Para la probabilidad de falla se necesita entregar una distribución estadística a cada variable aleatoria definida. A continuación se muestran perfiles realizados con el software SLIDE para deslizamiento de rocas profundos. Bajo los escenario sísmico-tormenta, sísmico-seco y estático-tormenta.

-Caso estático-tormenta:

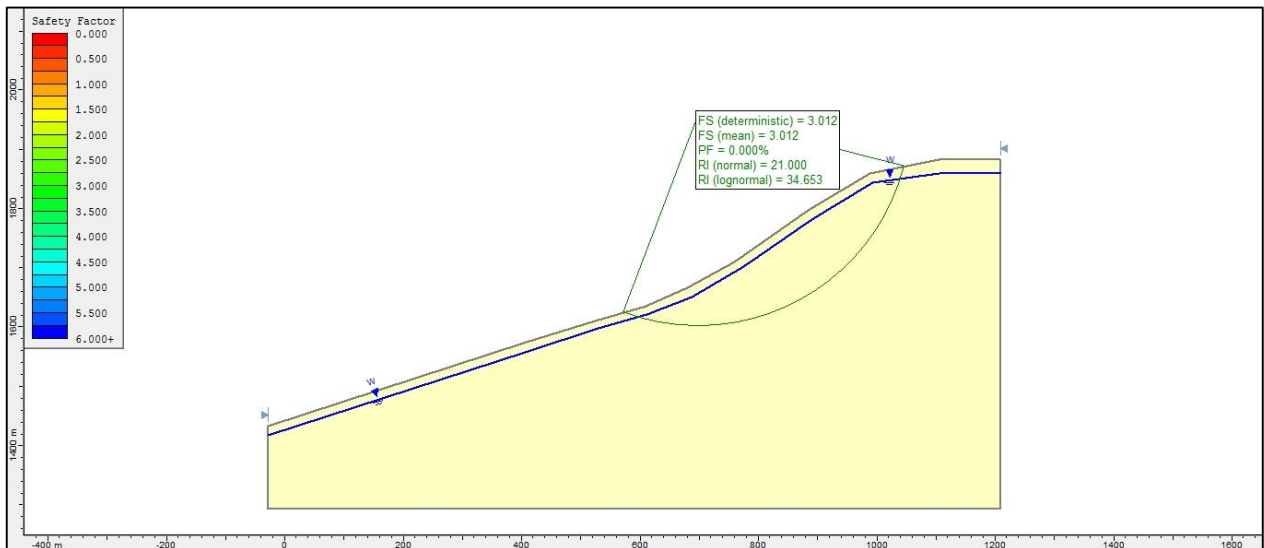


Figura 2.1 Unidad 22

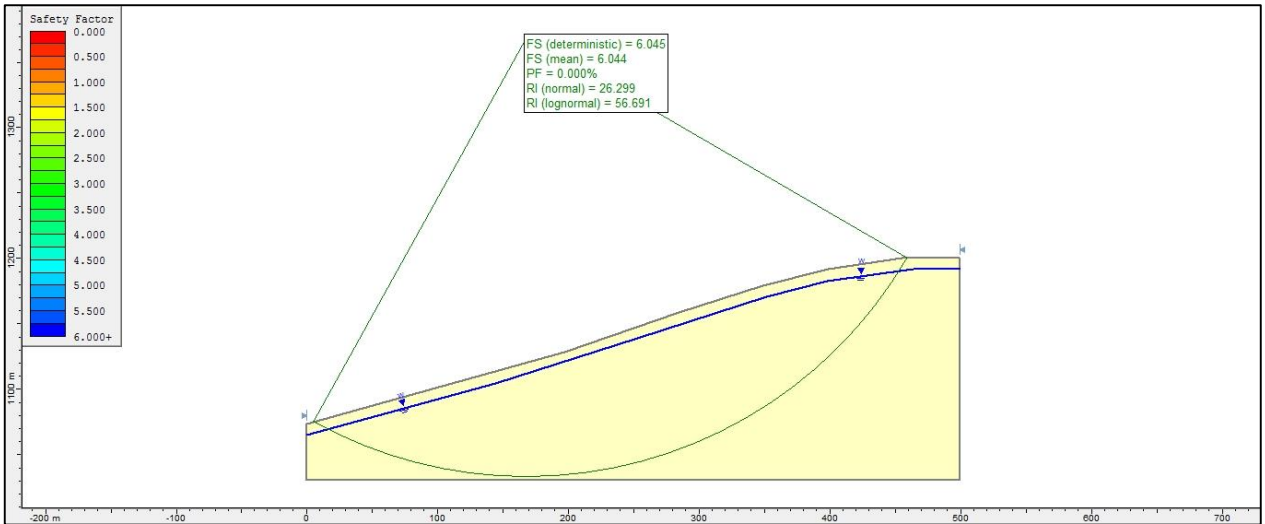


Figura 2.2 Unidad 25

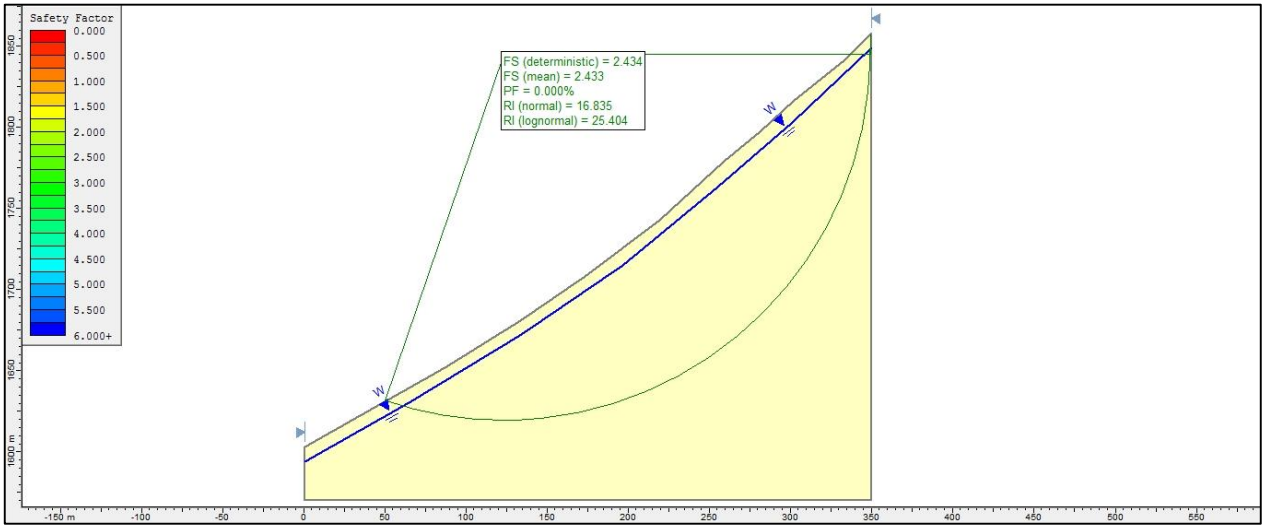


Figura 2.3 Unidad 63

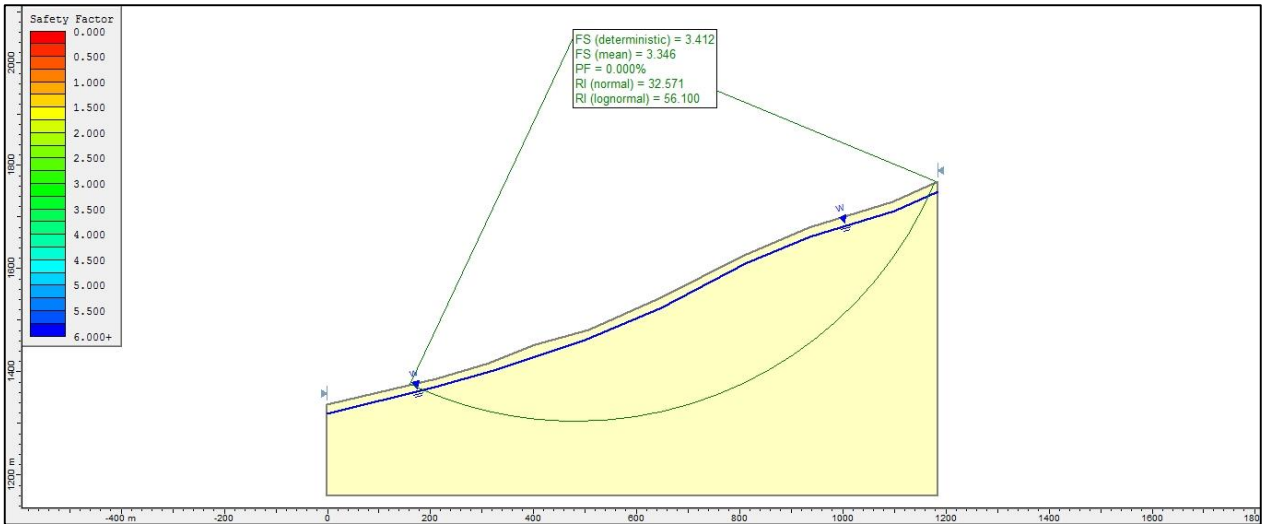


Figura 2.4 Unidad 76

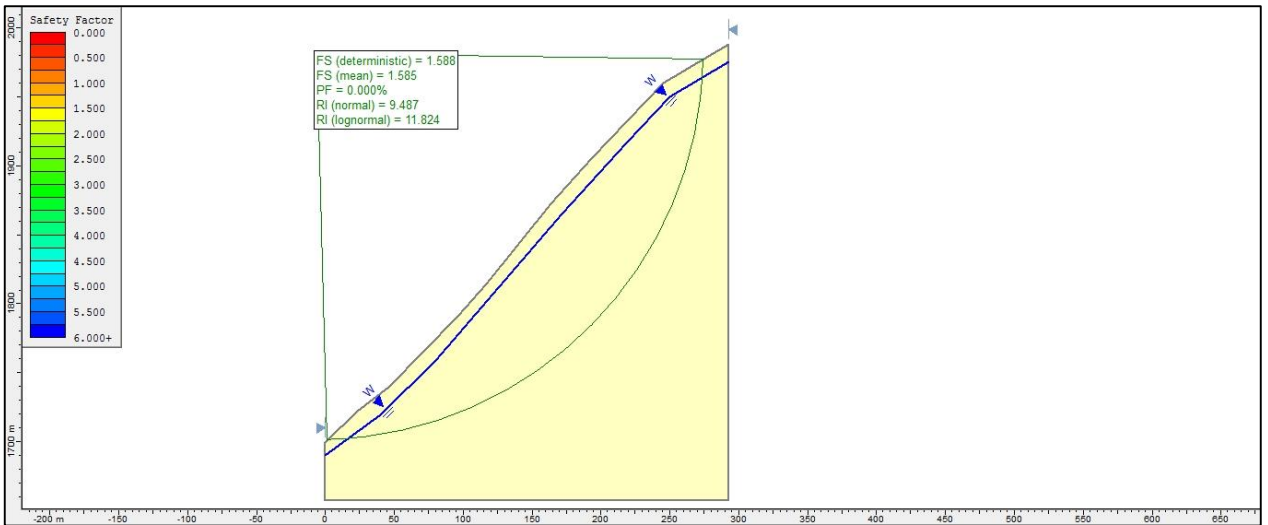


Figura 2.5 Unidad 80

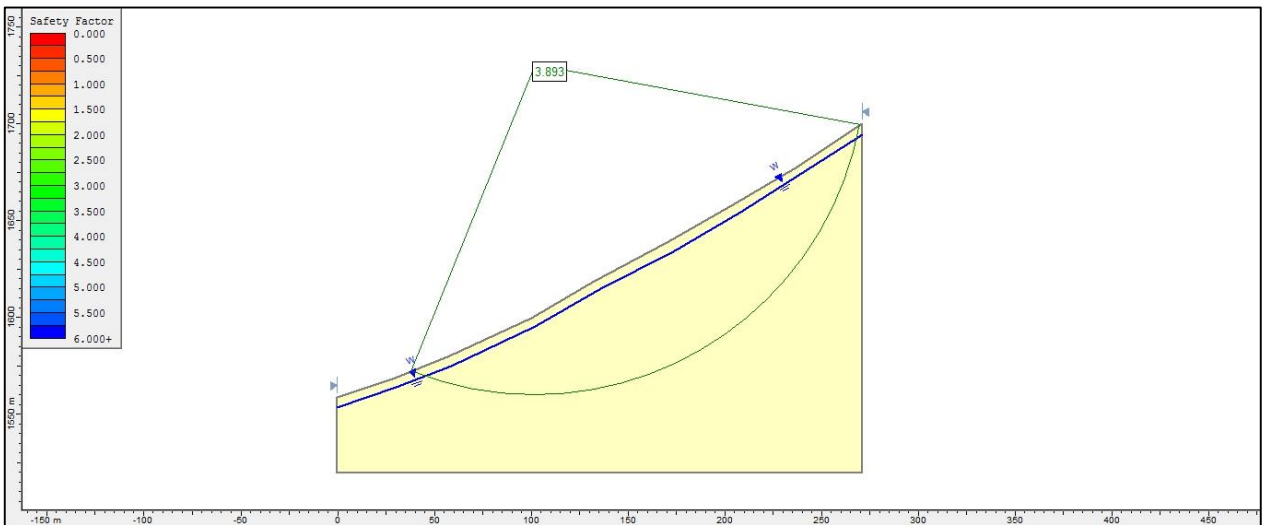


Figura 2.6 Unidad 82

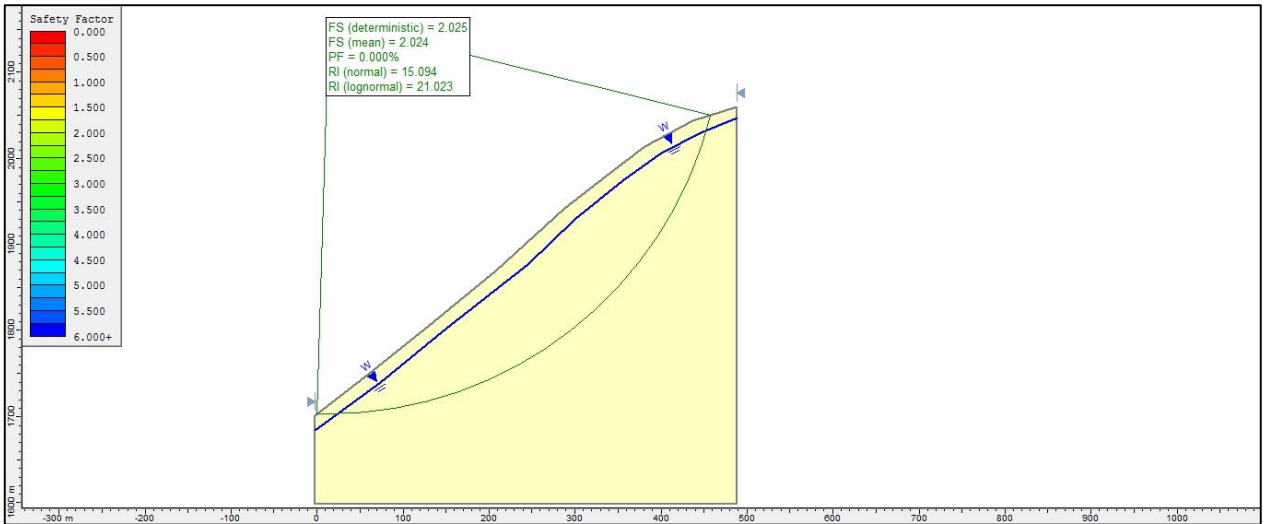


Figura 2.7 Unidad 83

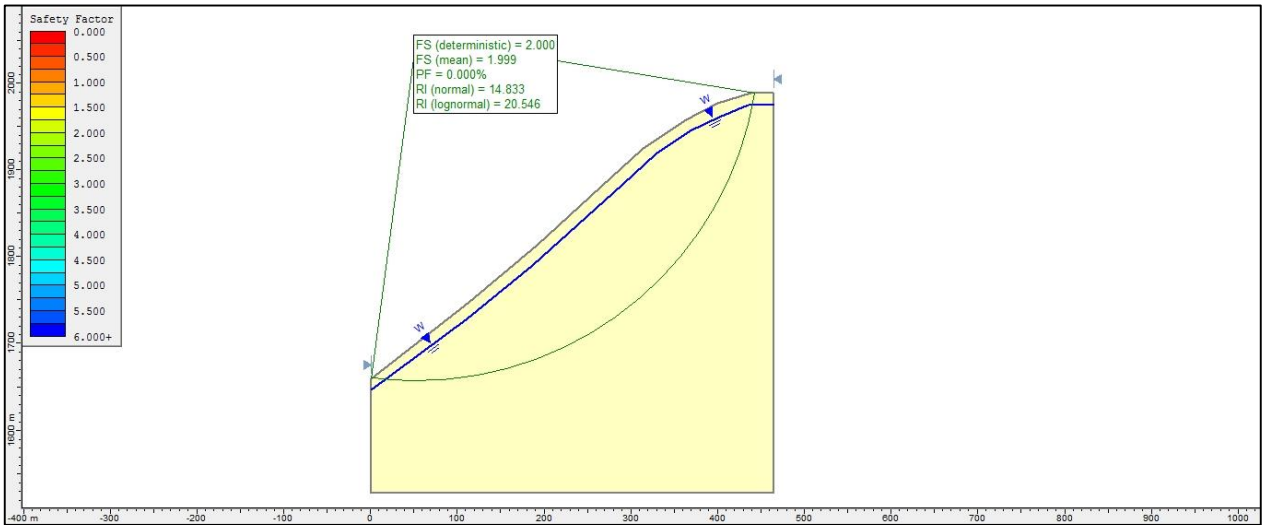


Figura 2.8 Unidad 84

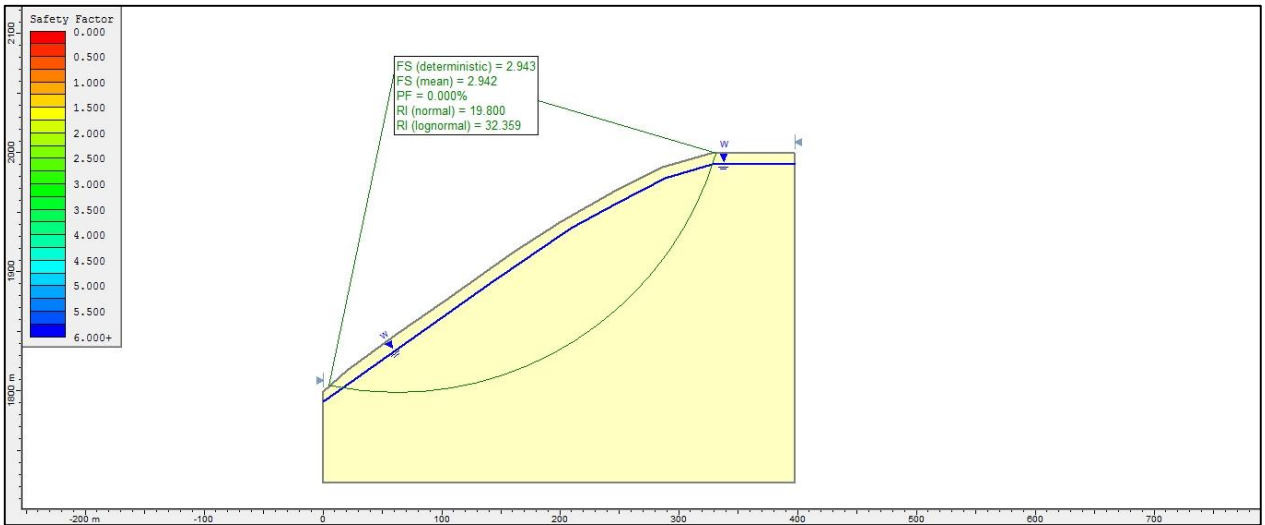


Figura 2.9 Unidad 85

-Caso sísmico-seco:

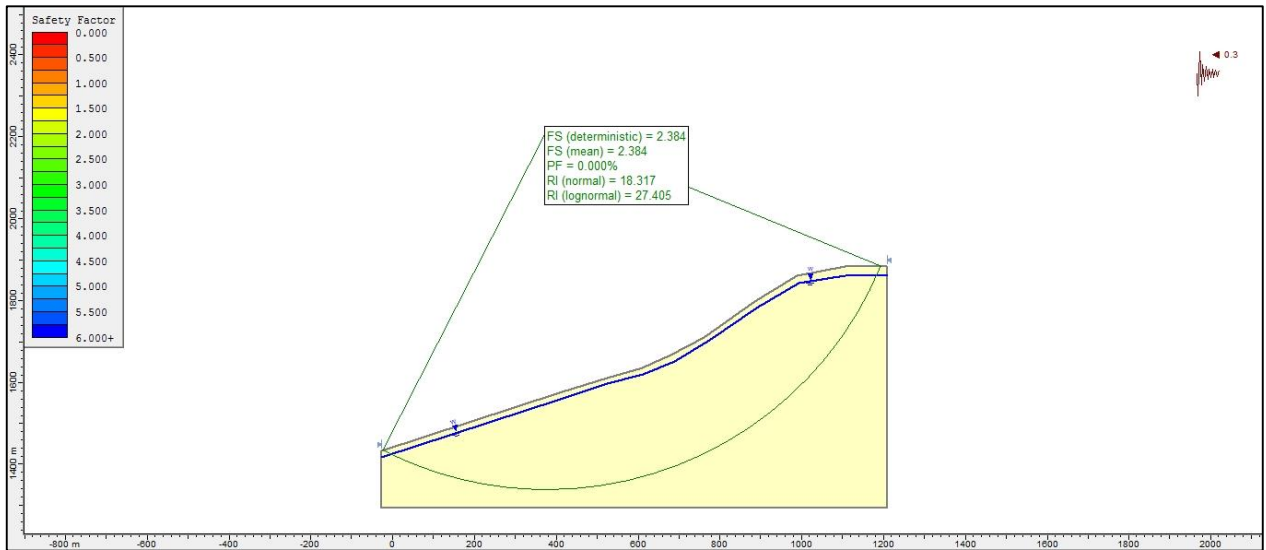


Figura 2.10 Unidad 22

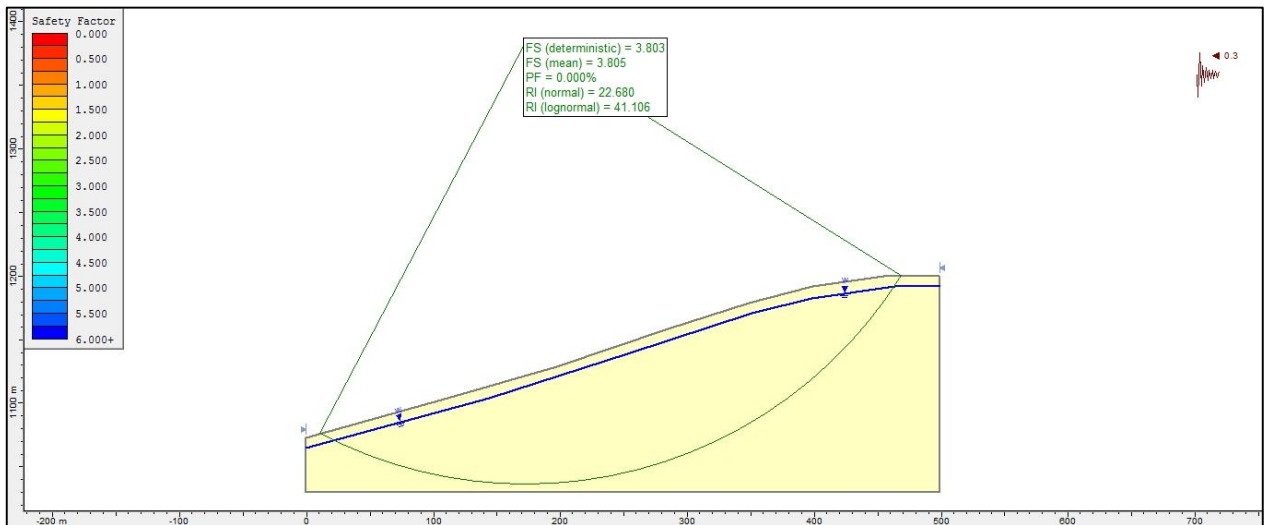


Figura 2.11 Unidad 25

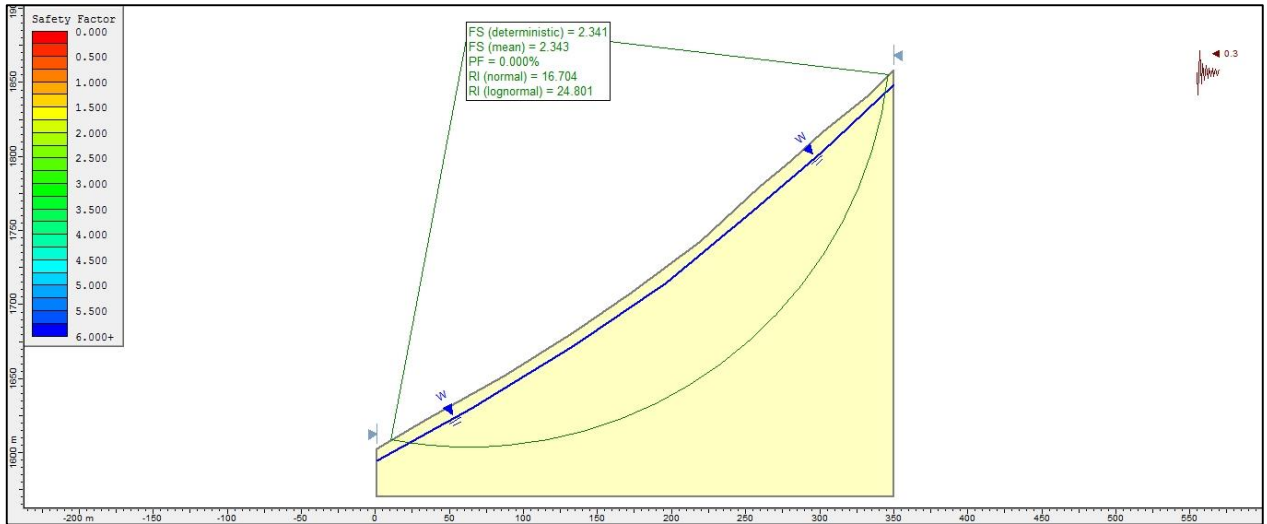


Figura 2.12 Unidad 63

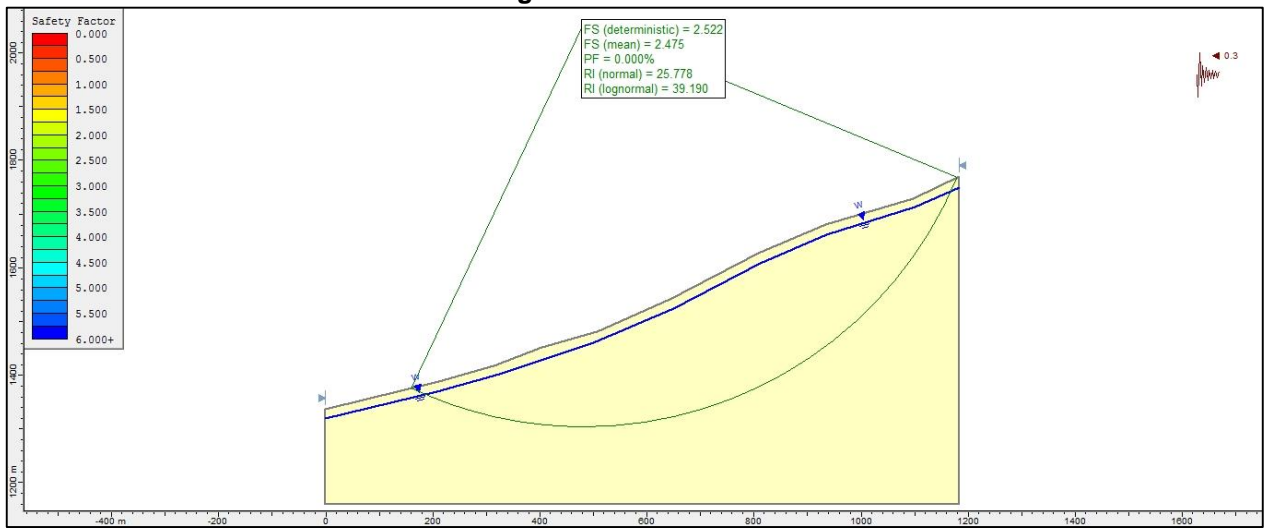


Figura 2.13 Unidad 76

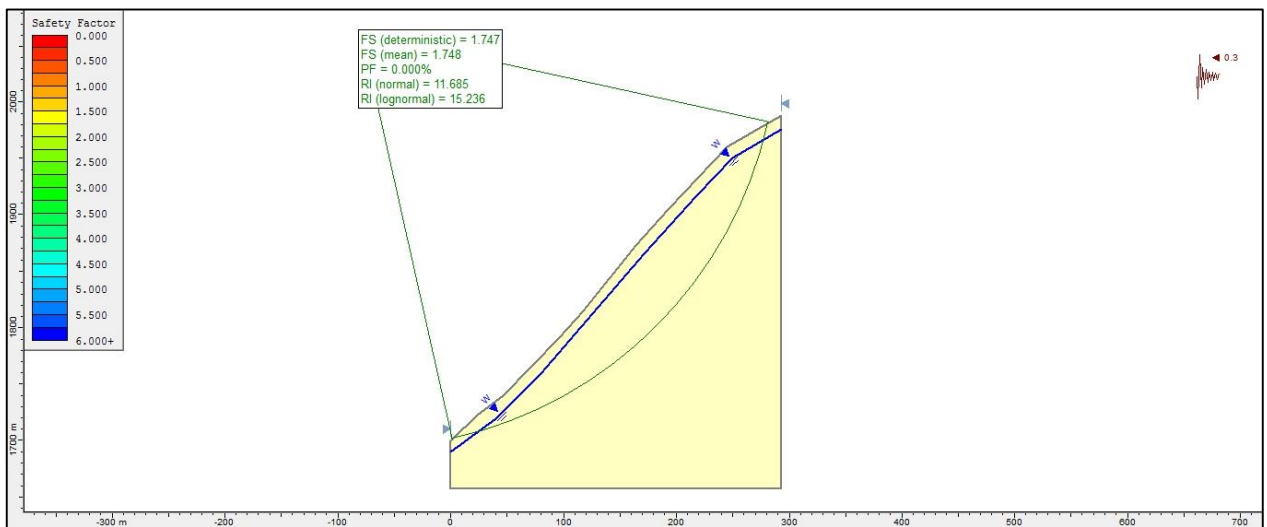


Figura 2.14 Unidad 80

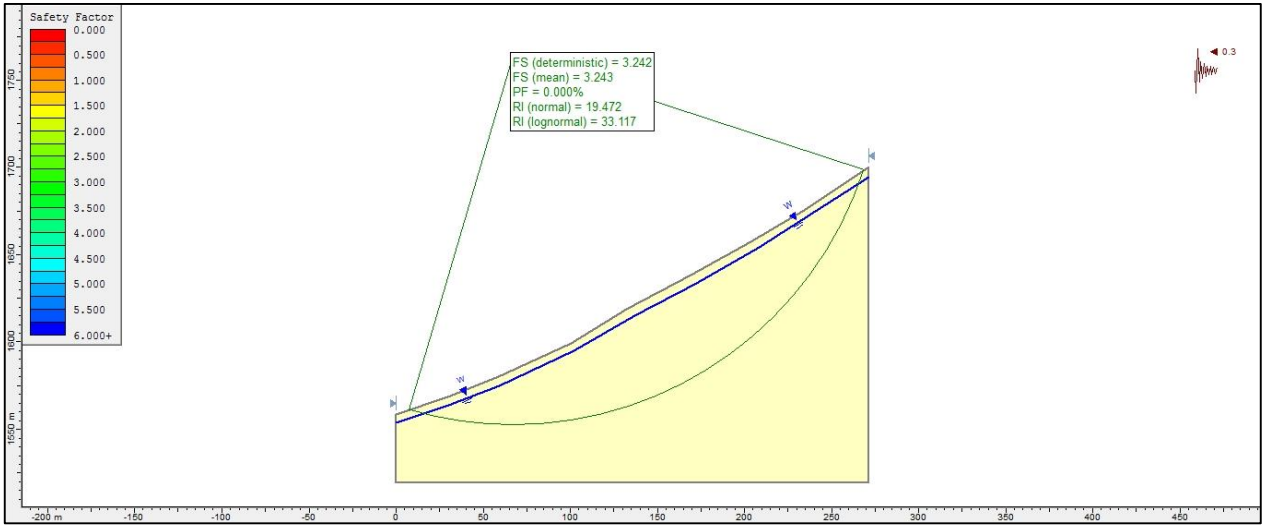


Figura 2.15 Unidad 82

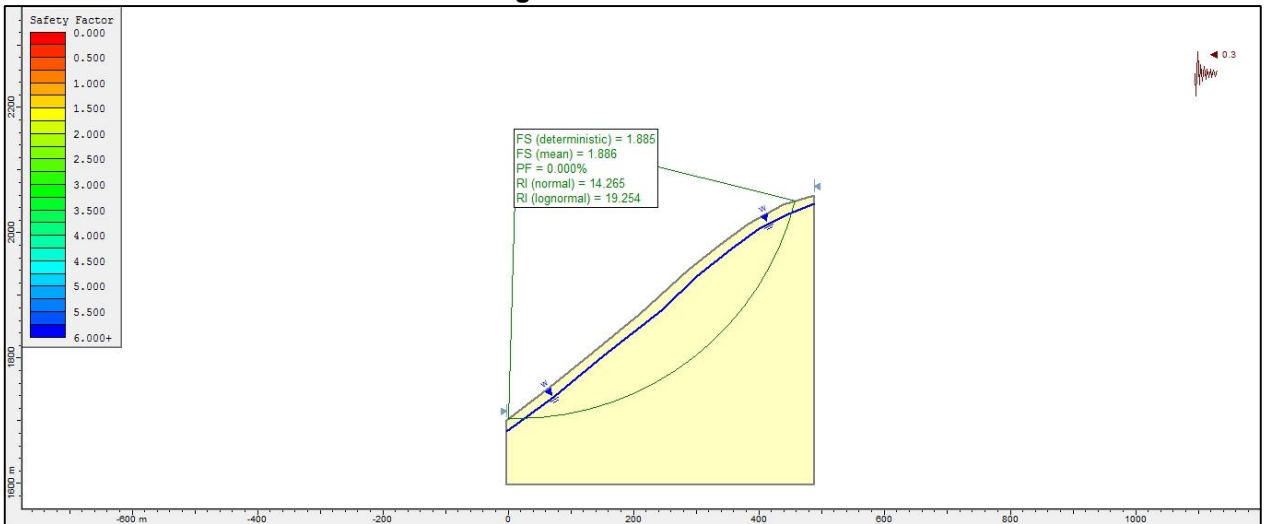


Figura 2.16 Unidad 83

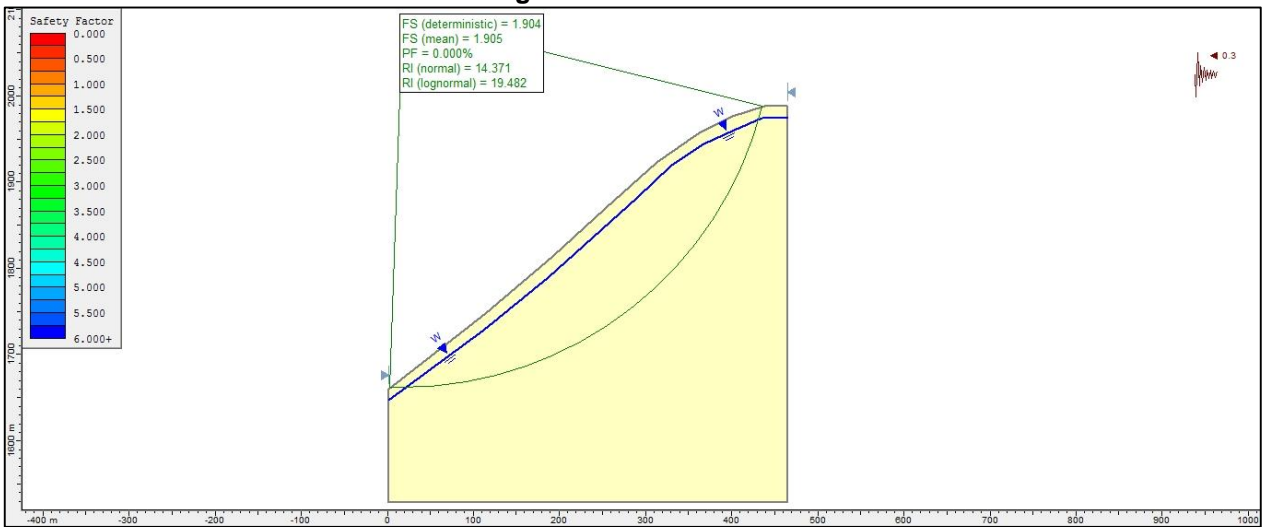


Figura 2.17 Unidad 84

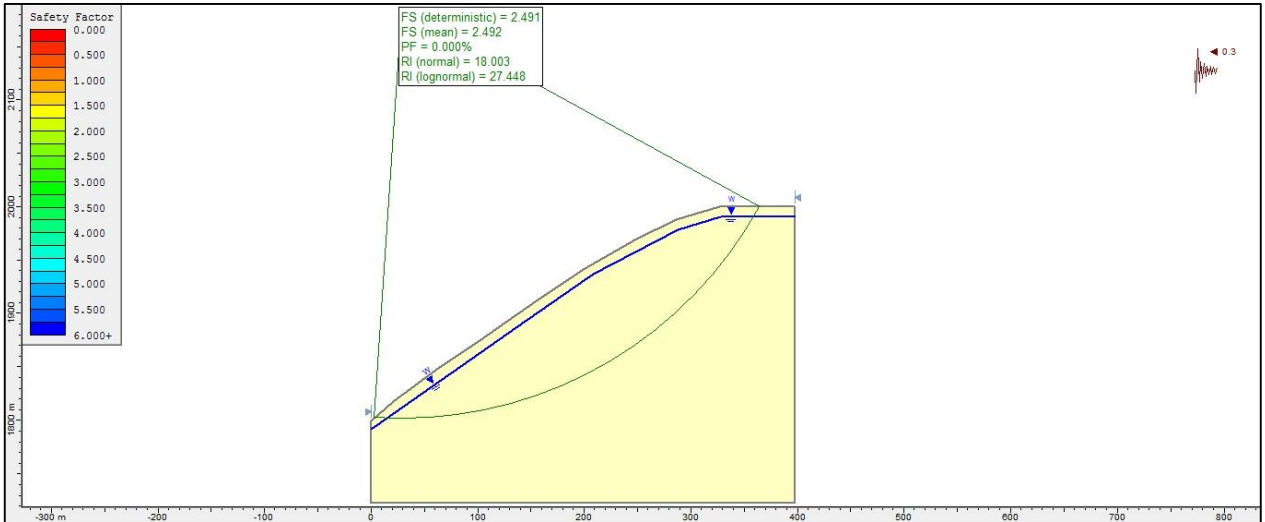


Figura 2.18 Unidad 85

-Caso sísmico-tormenta:

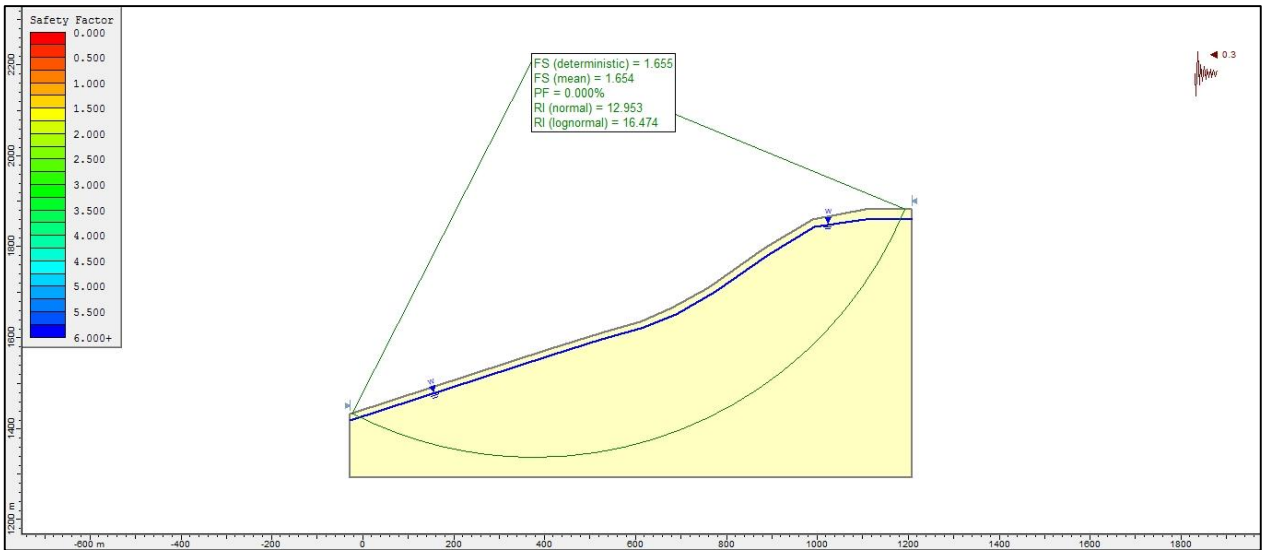


Figura 2.19 Unidad 22

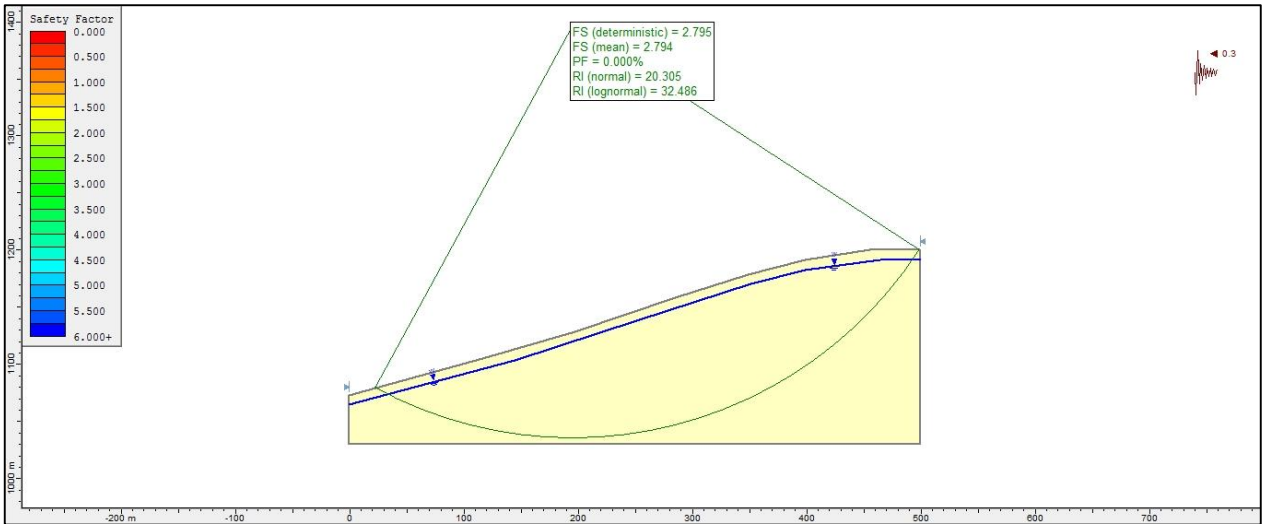


Figura 2.20 Unidad 25

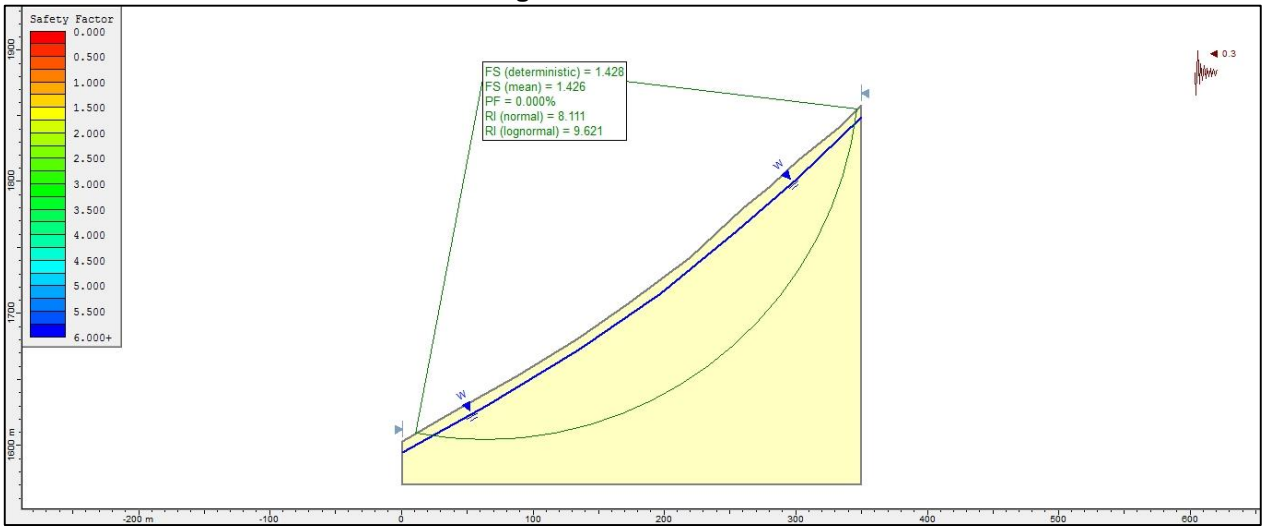


Figura 2.21 Unidad 63

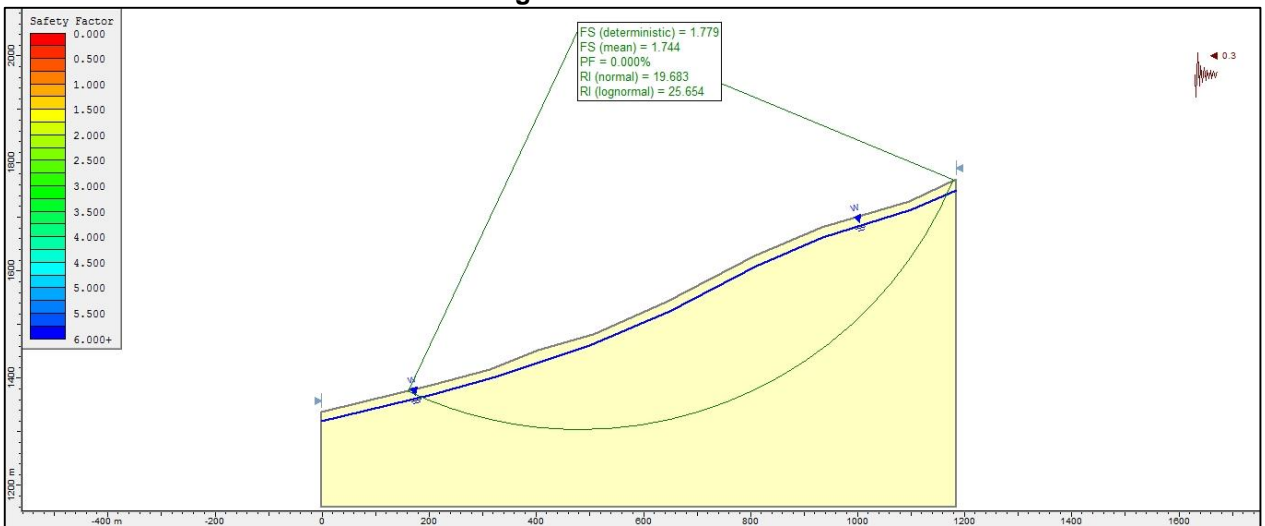


Figura 2.22 Unidad 76

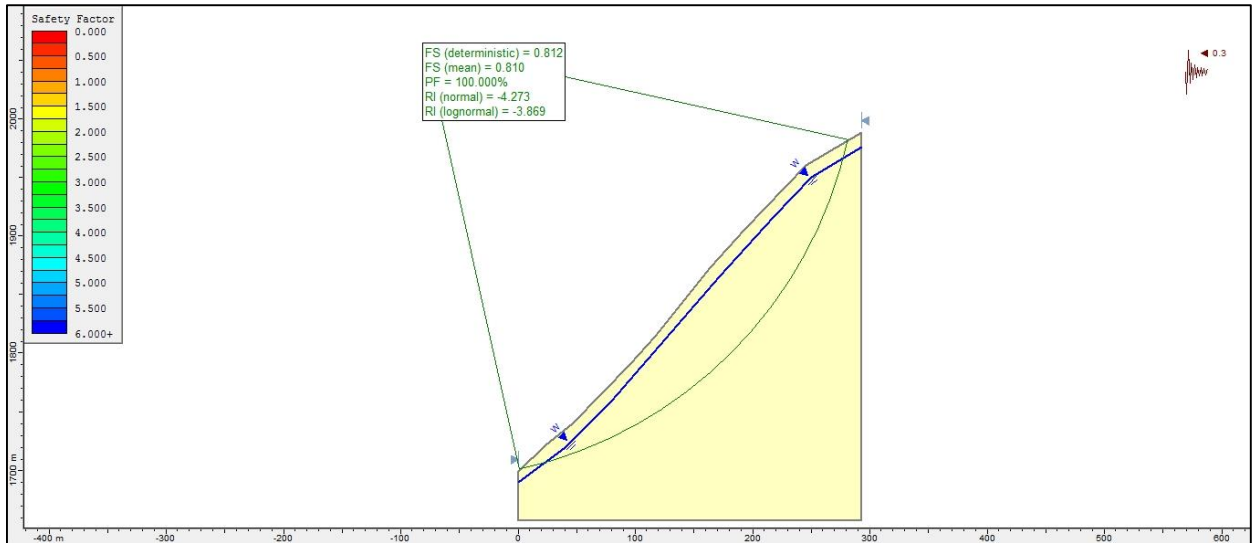


Figura 2.23 Unidad 80

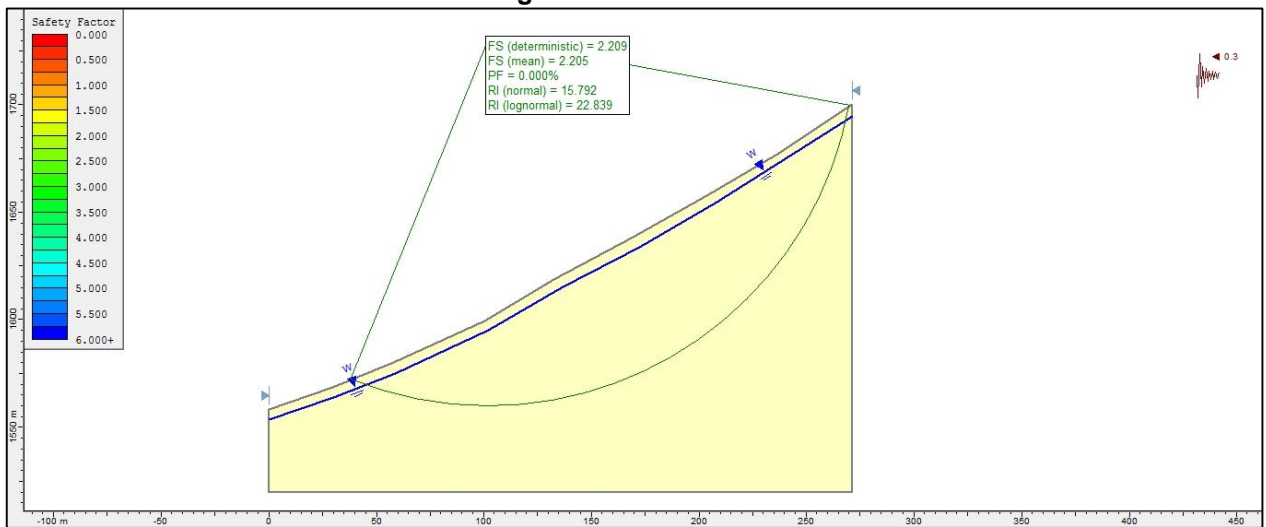


Figura 2.24 Unidad 82

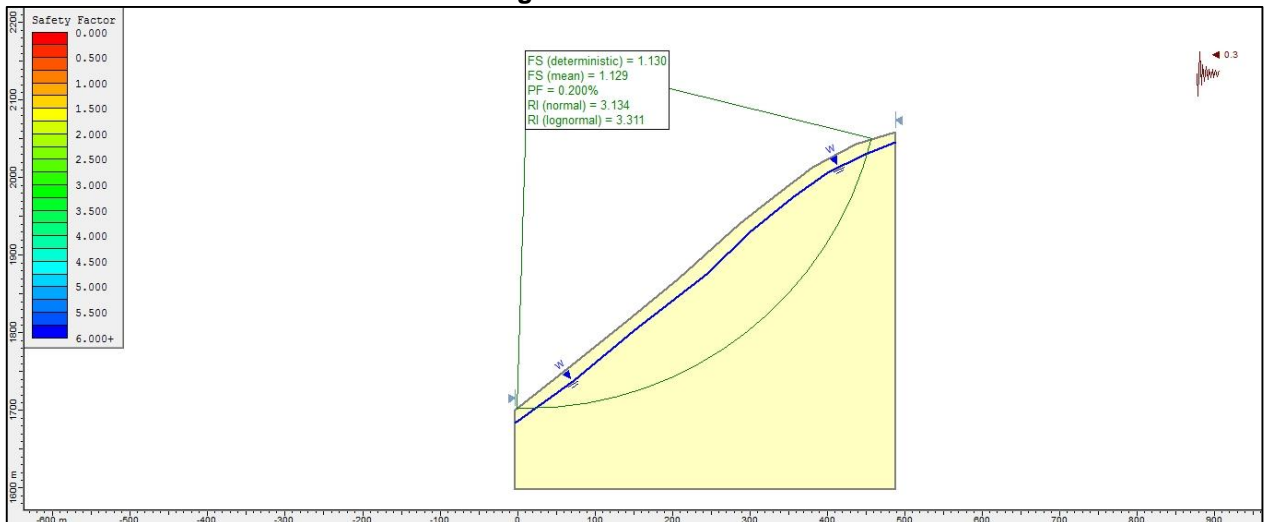


Figura 2.25 Unidad 83

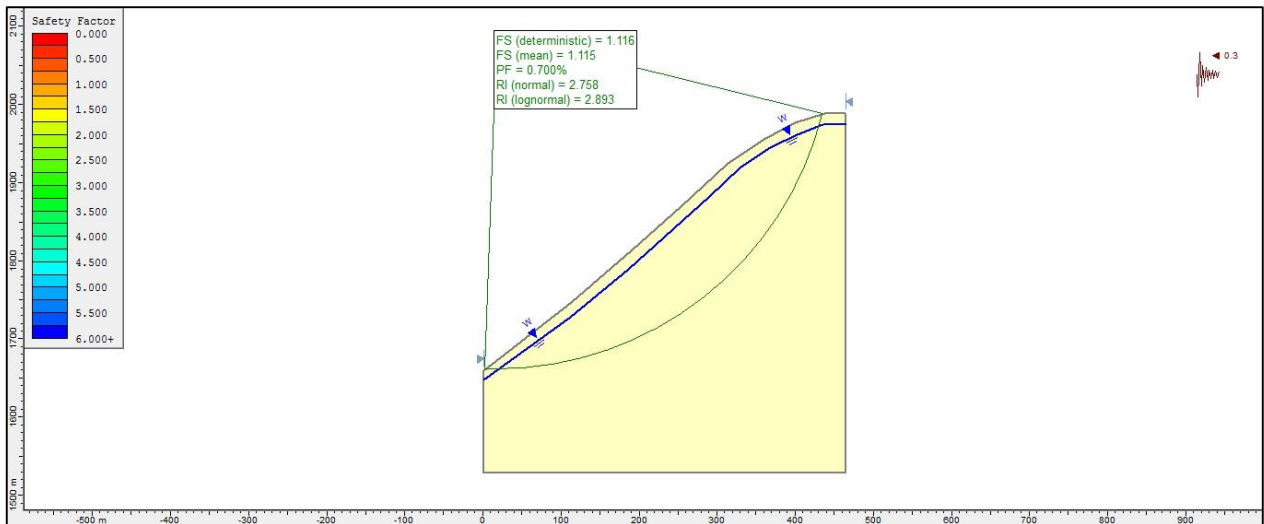


Figura 2.26 Unidad 84

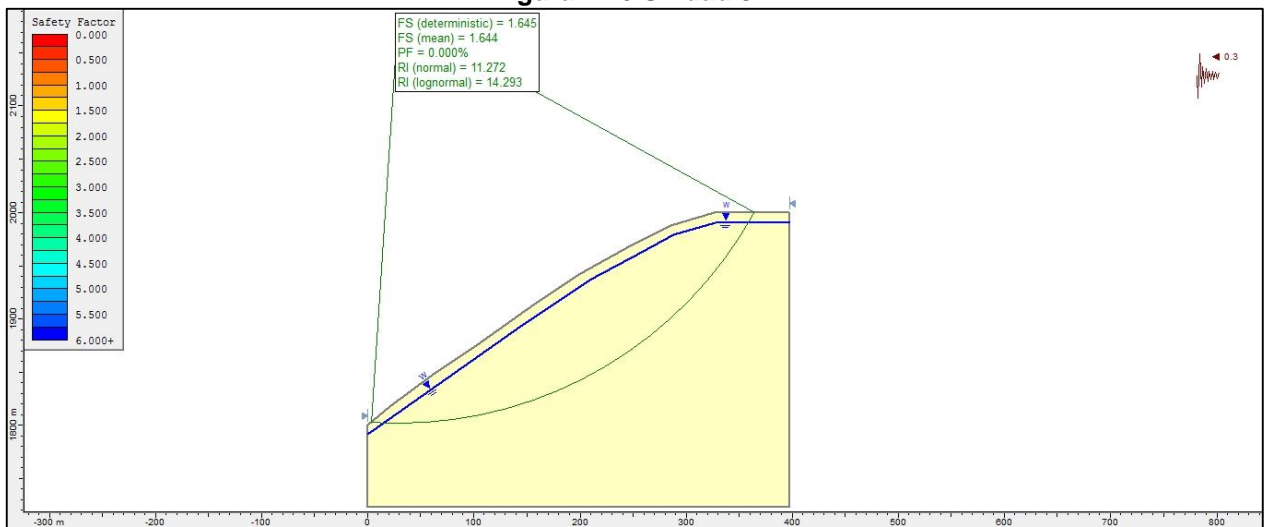


Figura 2.27 Unidad 85

2.2 Probabilidad de falla deslizamiento en bloque.

A continuación se muestran ilustraciones de los resultados de probabilidad de falla de los softwares SWEDGE y ROCPLANE. Son herramientas computacionales para evaluar tanto deslizamiento en cuña como planares. Las dos herramientas pueden trabajar con grietas de tensión, presión de agua, fuerzas externas (sísmicas) y soportes. Se diferencian en que Rocplane necesita la caracterización de una discontinuidad o un set mientras que Swedge necesita de dos discontinuidades o dos set para generar la cuña. Para caracterizar las discontinuidades se necesita su orientación y resistencia, además se necesita caracterizar las laderas con su orientación y altura.

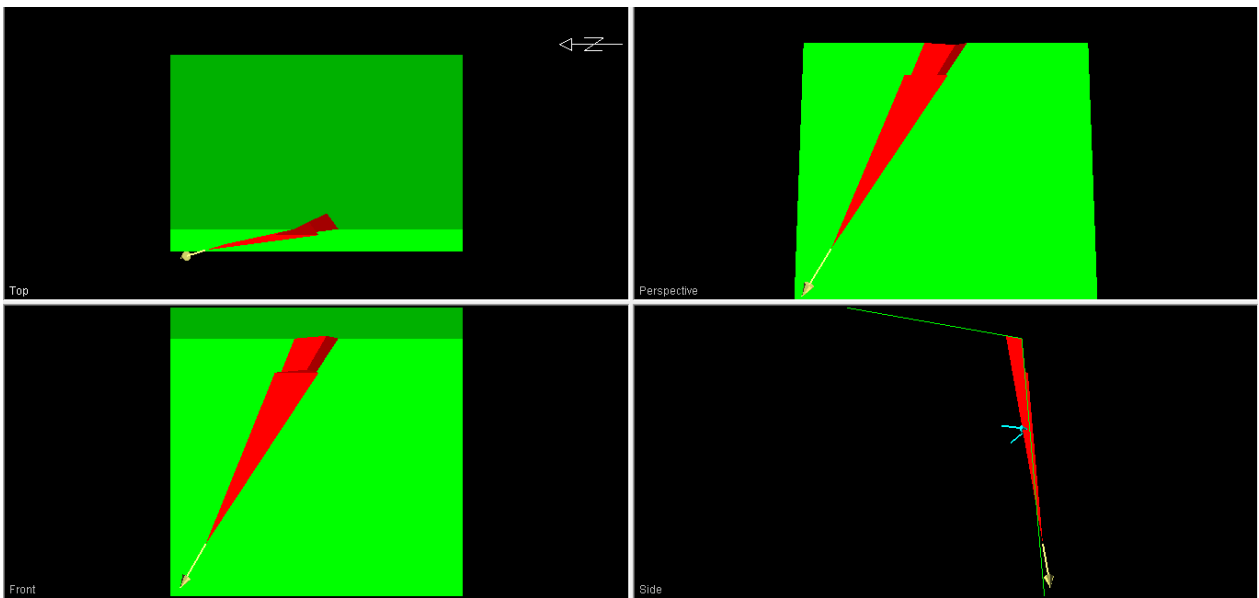


Figura 2.28 Deslizamiento en cuña.

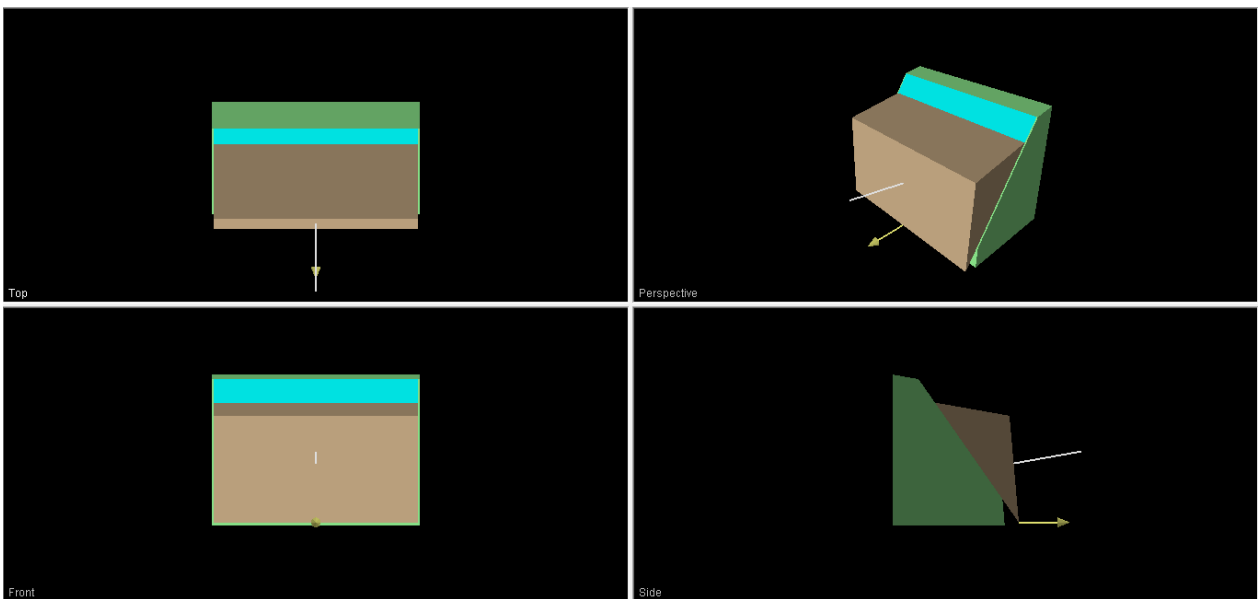


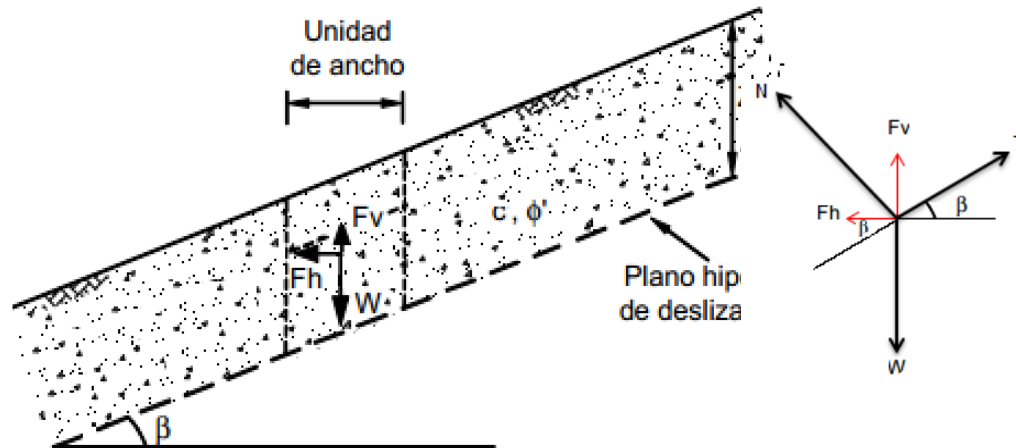
Figura 2.29 Deslizamiento plano.

2.3 Probabilidad de falla deslizamiento de suelos superficiales y flujos de detritos

Para obtener la PF se utiliza el modelo de ladera infinita utilizando el método estadístico de Montecarlo con el software Excel. A continuación se muestra el modelo de ladera infinita.

Para este tipo de modelo se asume que la falla o plano de debilidad es planar, paralela a la superficie del talud e infinita en extensión.

Configuración de esfuerzos: modelo de ladera infinita con componente sísmico



Análisis pseudo-Estático de un talud infinito

$$T = W \operatorname{sen} \beta - F_v \operatorname{sen} \beta + F_h \operatorname{cos} \beta = \text{Fuerzas actuantes}$$

$$N = W \operatorname{cos} \beta - F_v \operatorname{cos} \beta - F_h \operatorname{sen} \beta = \text{Fuerza normal}$$

ϕ = ángulo de fricción

β = pendiente de la ladera

W = peso

F_v = Fuerza sísmica vertical

F_h = Fuerza sísmica horizontal

$$FS = \frac{\text{fuerza resistente}}{\text{fuerza actuante}}$$

$$FS = \frac{c + N \tan \phi}{W \operatorname{sen} \beta - F_v \operatorname{sen} \beta + F_h \operatorname{cos} \beta}$$

$$FS = \frac{c + [(W - F_v) \operatorname{cos} \beta - F_h \operatorname{sen} \beta] \tan \phi}{(W - F_v) \operatorname{sen} \beta + F_h \operatorname{cos} \beta}$$

Siendo $c = 0$ y $F_v = K_v W$
 $F_h = K_h W$

$$FS = \frac{[(1 - K_v) \operatorname{cos} \beta - K_h \operatorname{sen} \beta] \tan \phi}{(1 - K_v) \operatorname{sen} \beta + K_h \operatorname{cos} \beta}$$

3 Evaluación de alcance caída de rocas.

En este caso se utilizó el software ROCFALL, herramienta computacional de análisis estadístico para evaluar trayectoria y alcance de una o más caídas desde una ladera. Incluyendo escenarios sísmicos y posibles mitigadores.

Los datos de ingreso son principalmente la geometría de la ladera, resistencia del material de la ladera, coeficiente de restitución del cual se compone la ladera, punto o zona de inicio de caídas de roca, tamaño de los bloques y su velocidad inicial, como opcional existen fuerzas externas (magnitud) y fuerzas sísmicas. El programa entrega el alcance de la caída, la energía cinética en cualquier punto de su trayectoria y la altura del rebote. A continuación se muestran los perfiles realizados para las unidades geomorfológicas susceptibles, bajo los escenarios sísmico y estático.

-Caso estático:

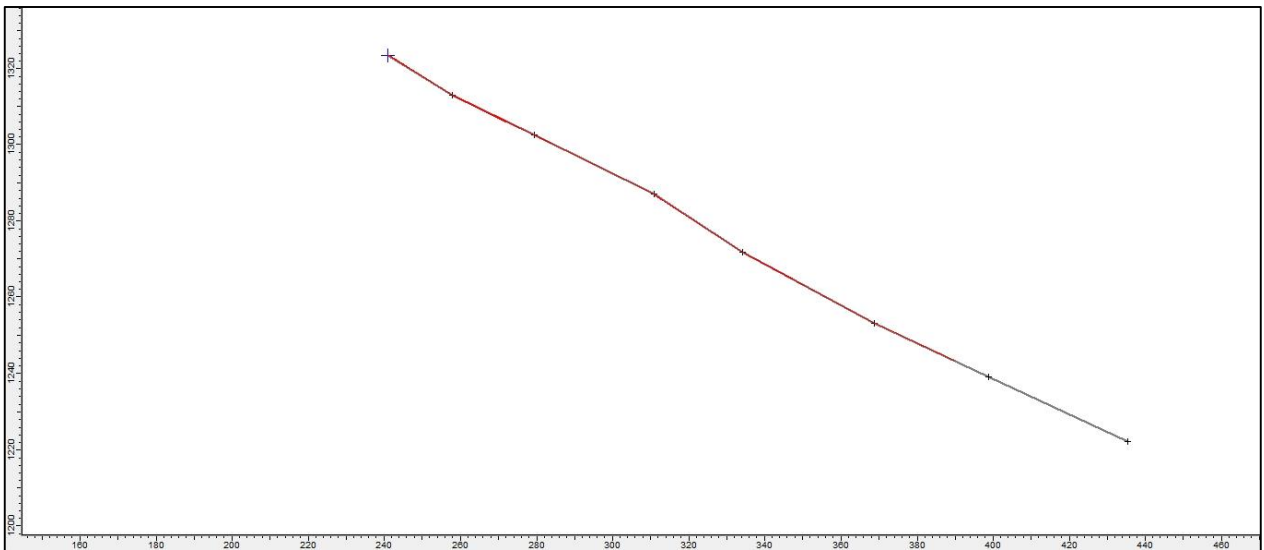


Figura 3.1 Unidad 5

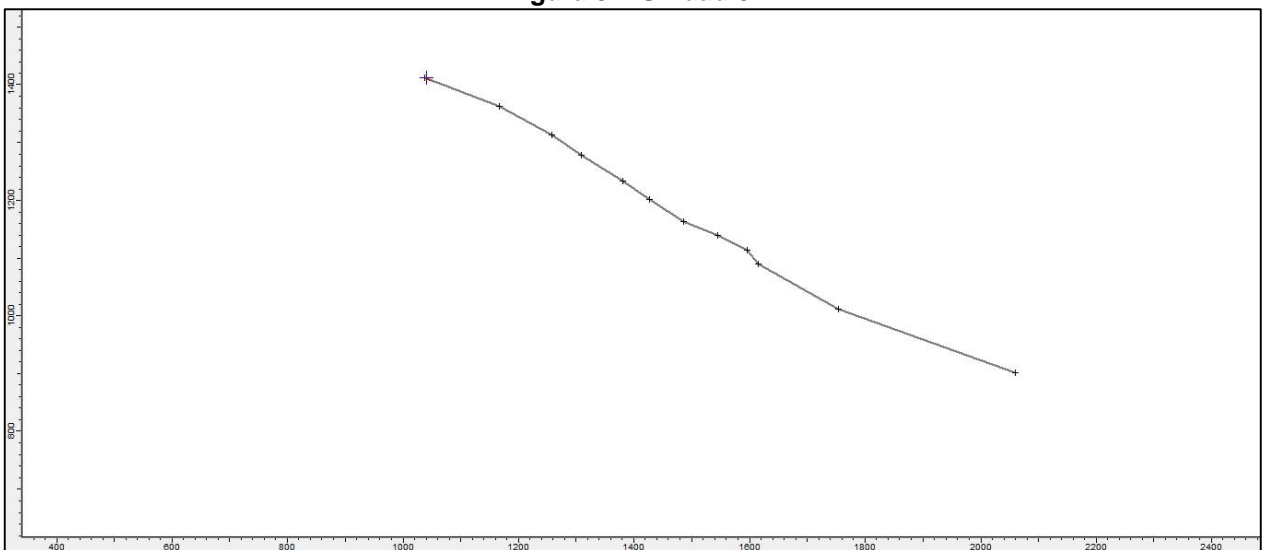


Figura 3.2 Unidad 9

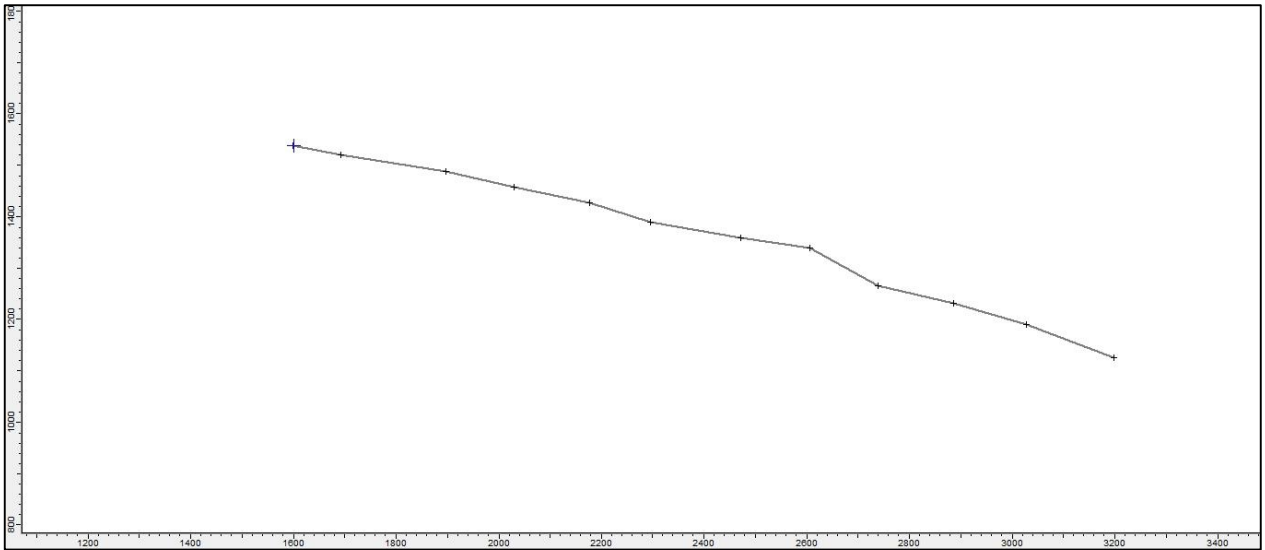


Figura 3.3 Unidad 10

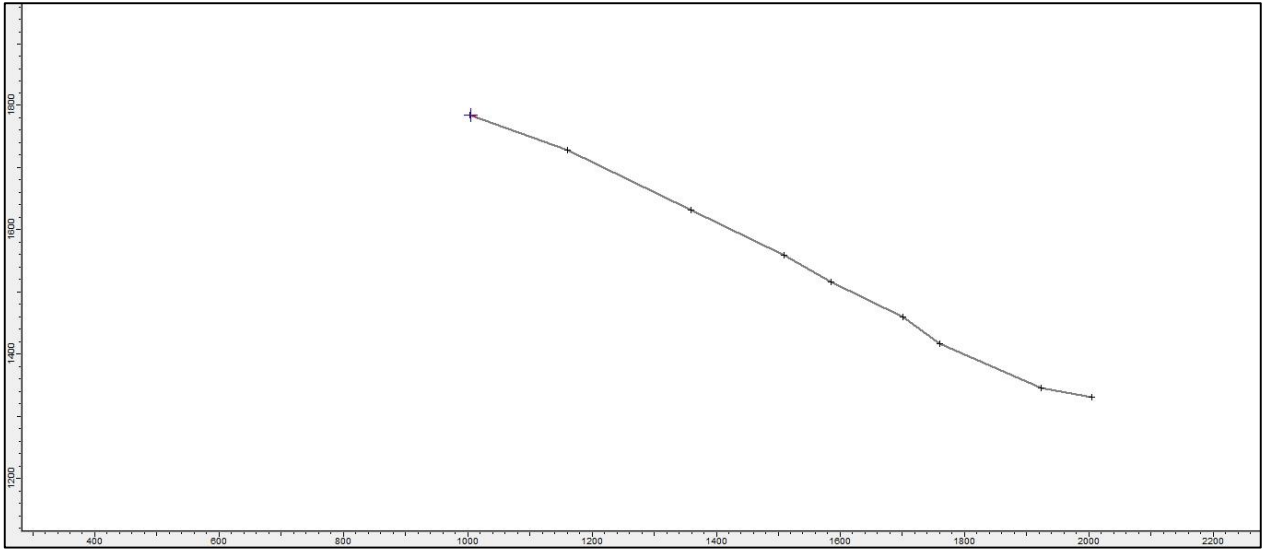


Figura 3.4 Unidad 11

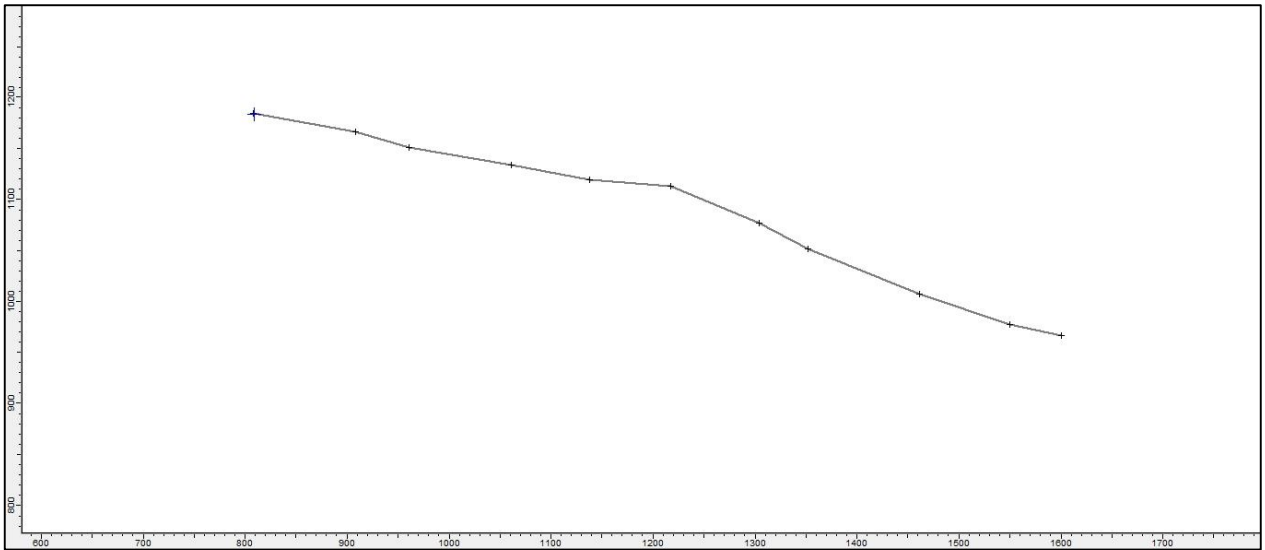


Figura 3.5 Unidad 12

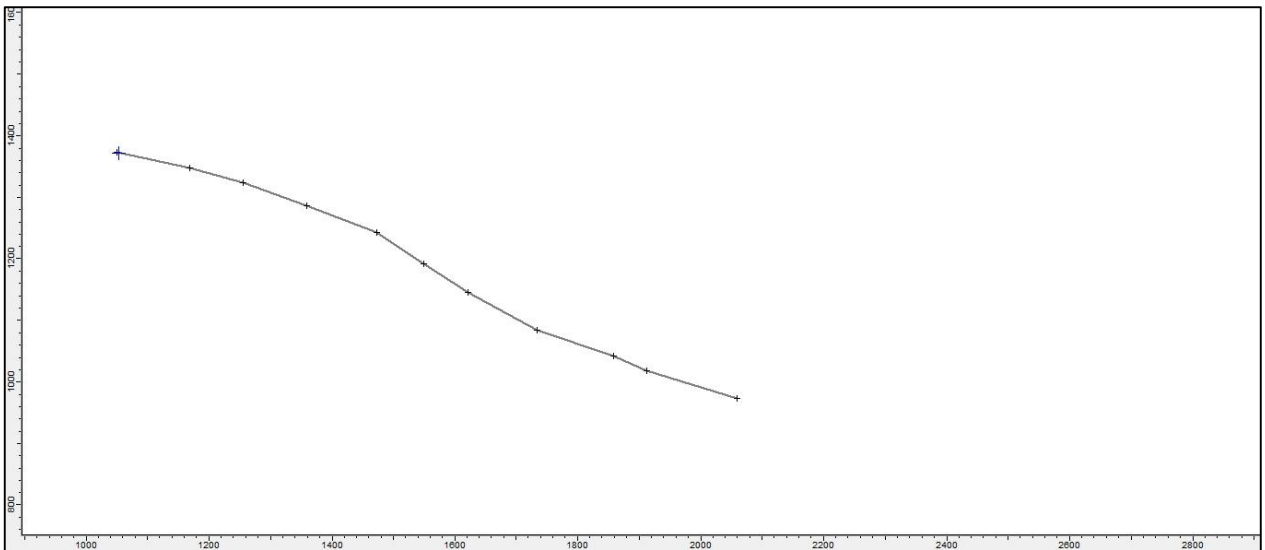


Figura 3.6 Unidad 13

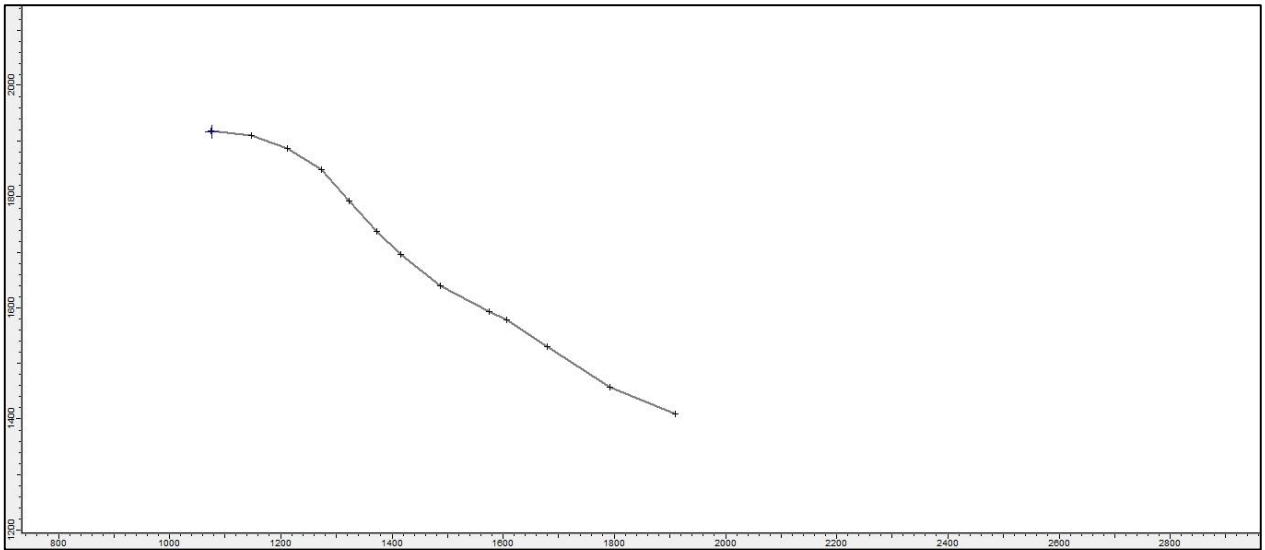


Figura 3.7 Unidad 22

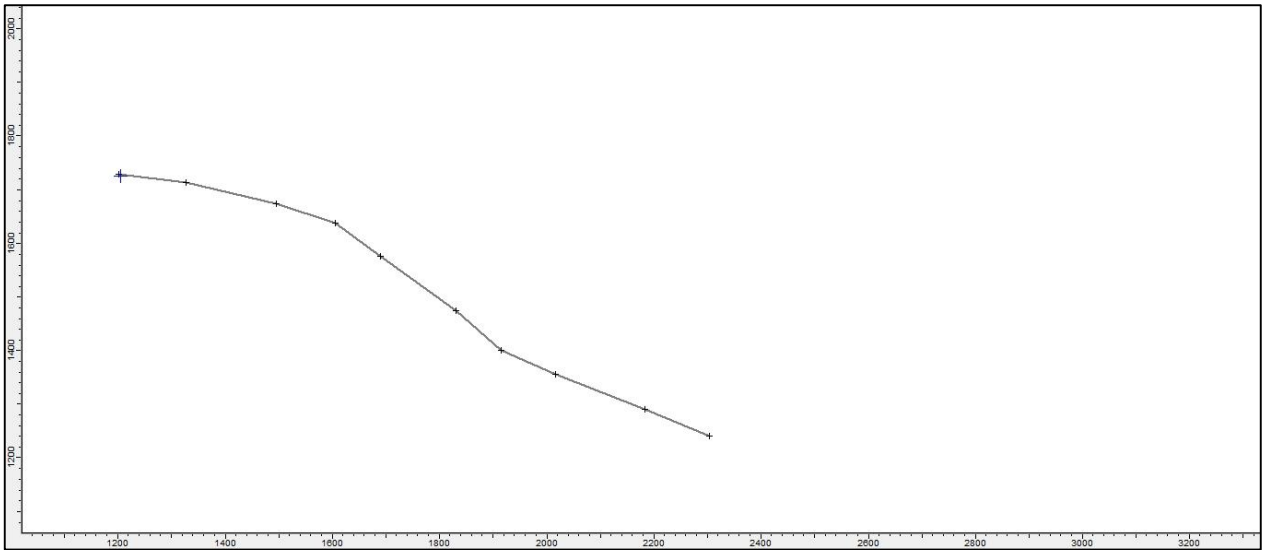


Figura 3.8 Unidad 23

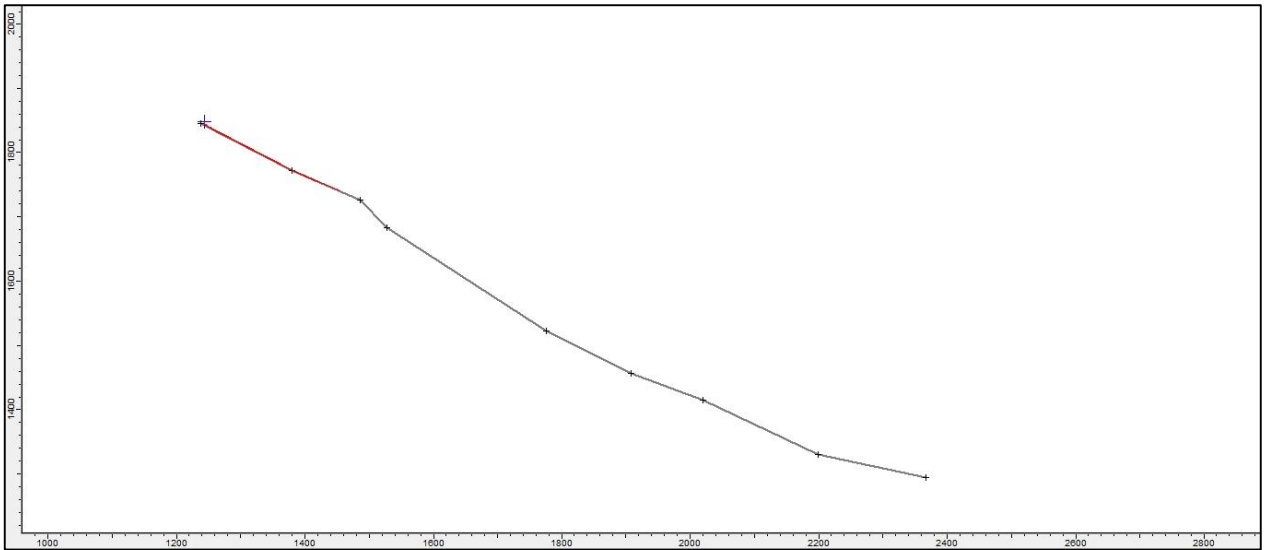


Figura 3.9 Unidad 24

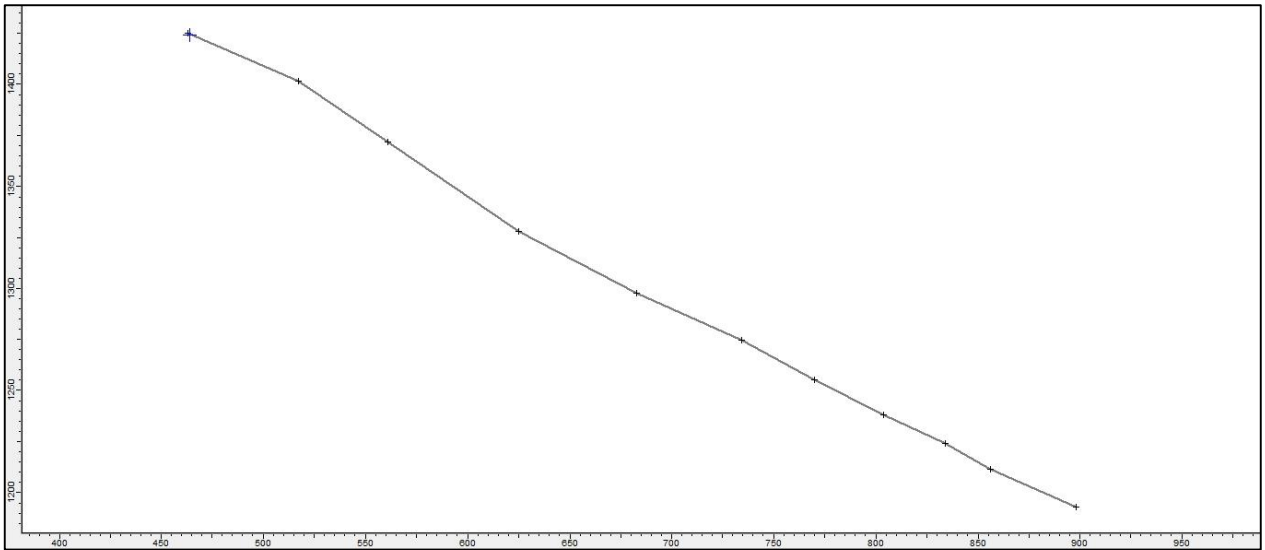


Figura 3.10 Unidad 25

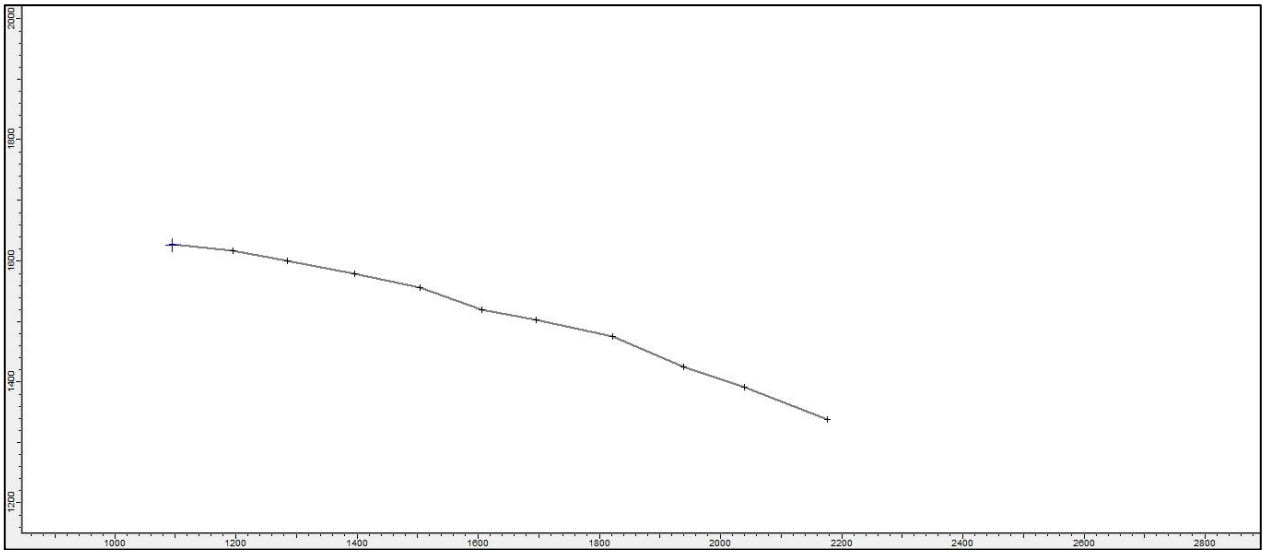


Figura 3.11 Unidad 28

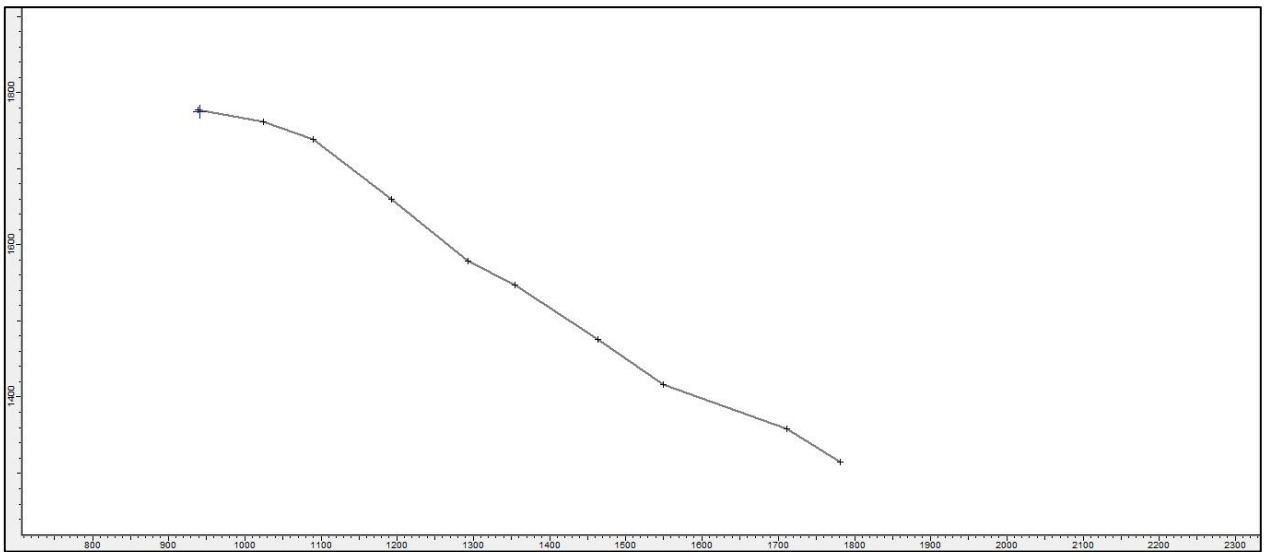


Figura 3.12 Unidad 33

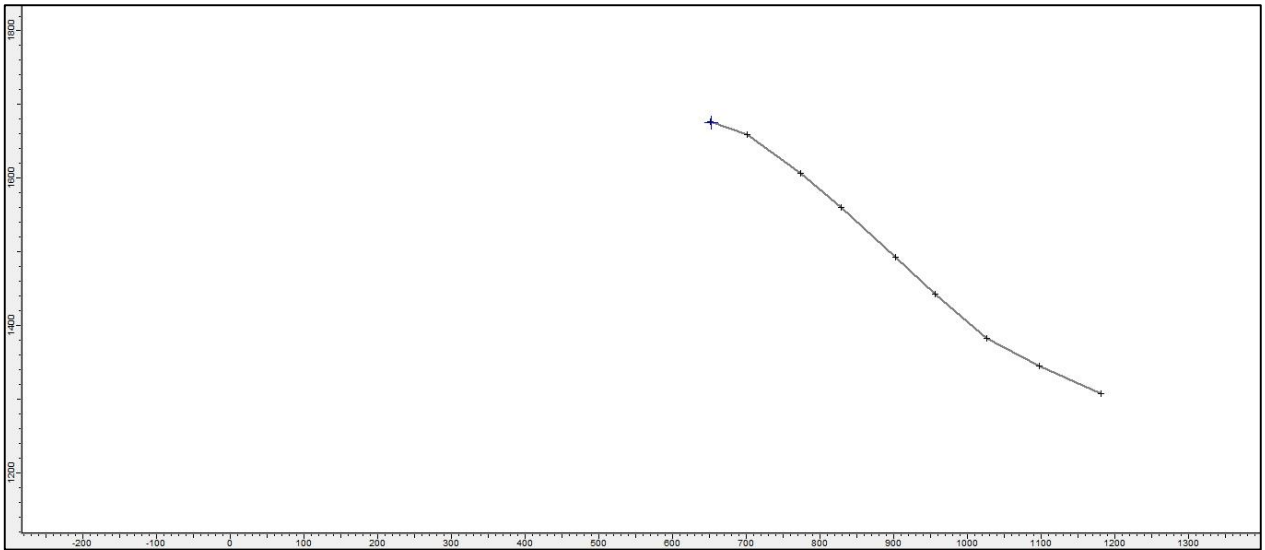


Figura 3.13 Unidad 34

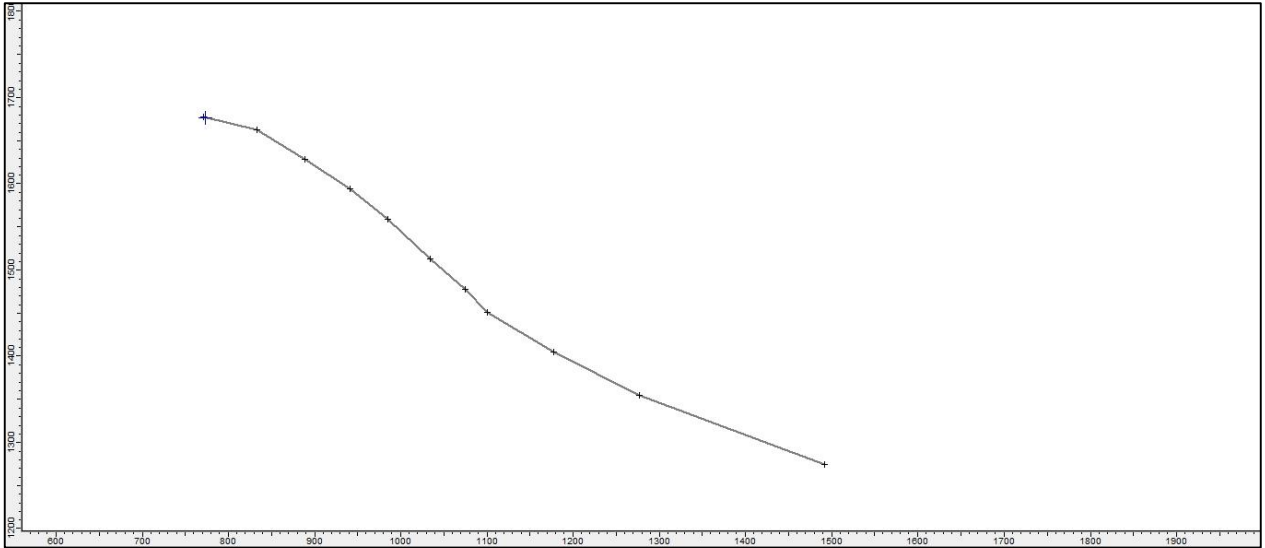


Figura 3.14 Unidad 35

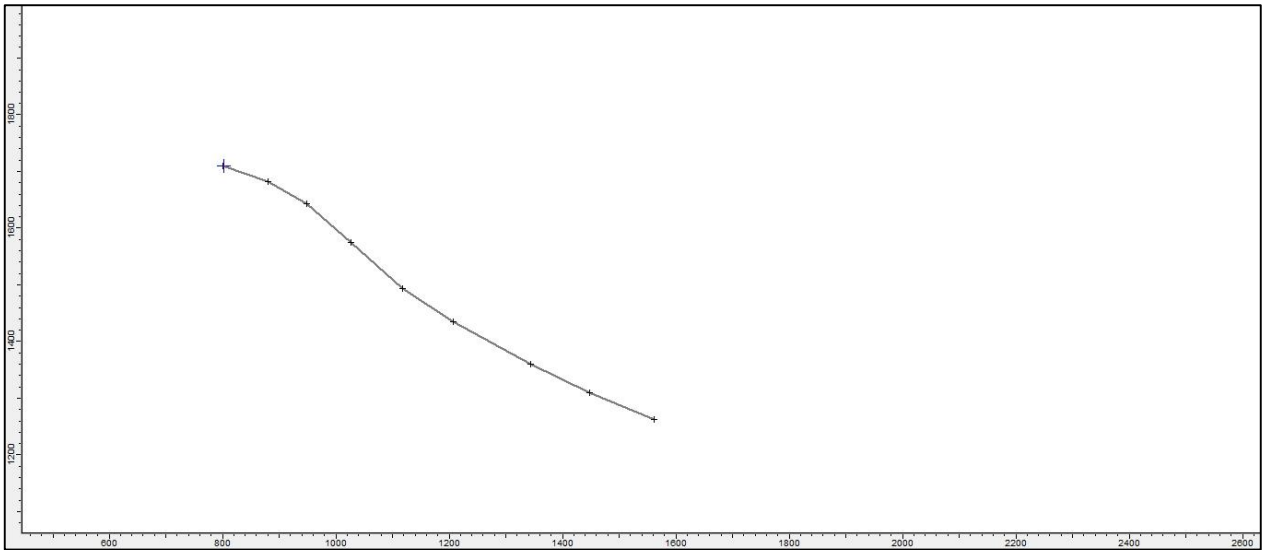


Figura 3.15 Unidad 36

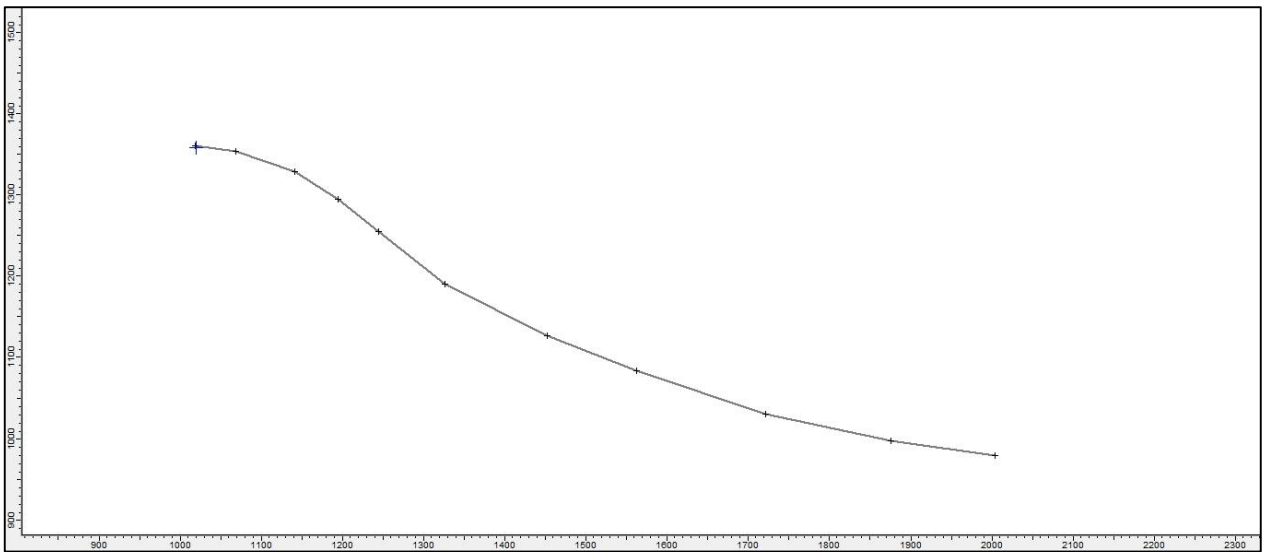


Figura 3.16 Unidad 37

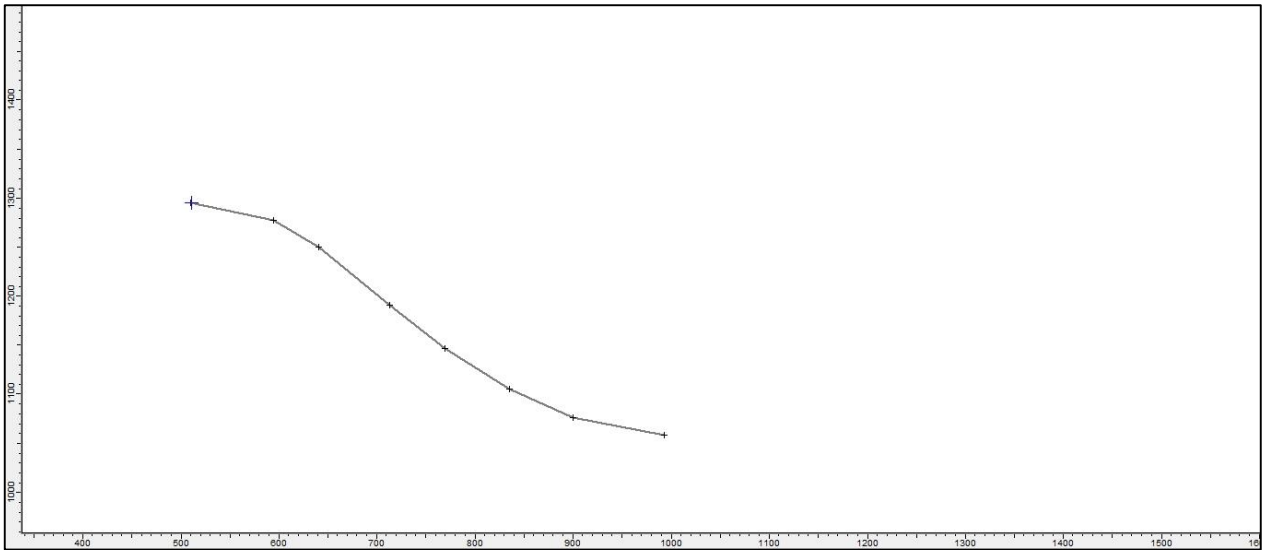


Figura 3.17 Unidad 38

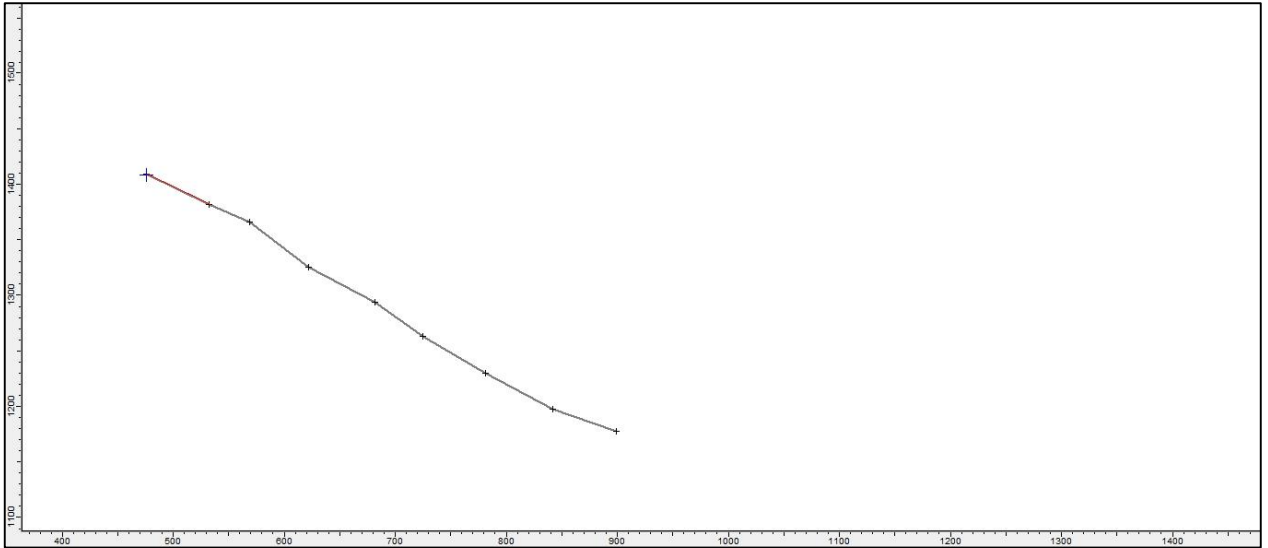


Figura 3.18 Unidad 55

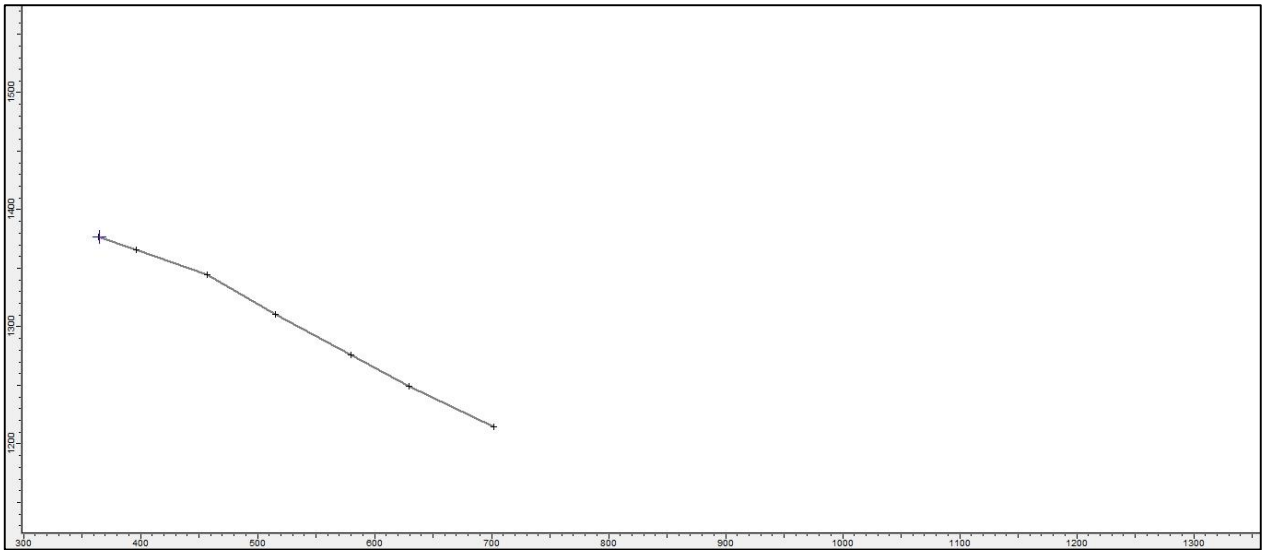


Figura 3.19 Unidad 56

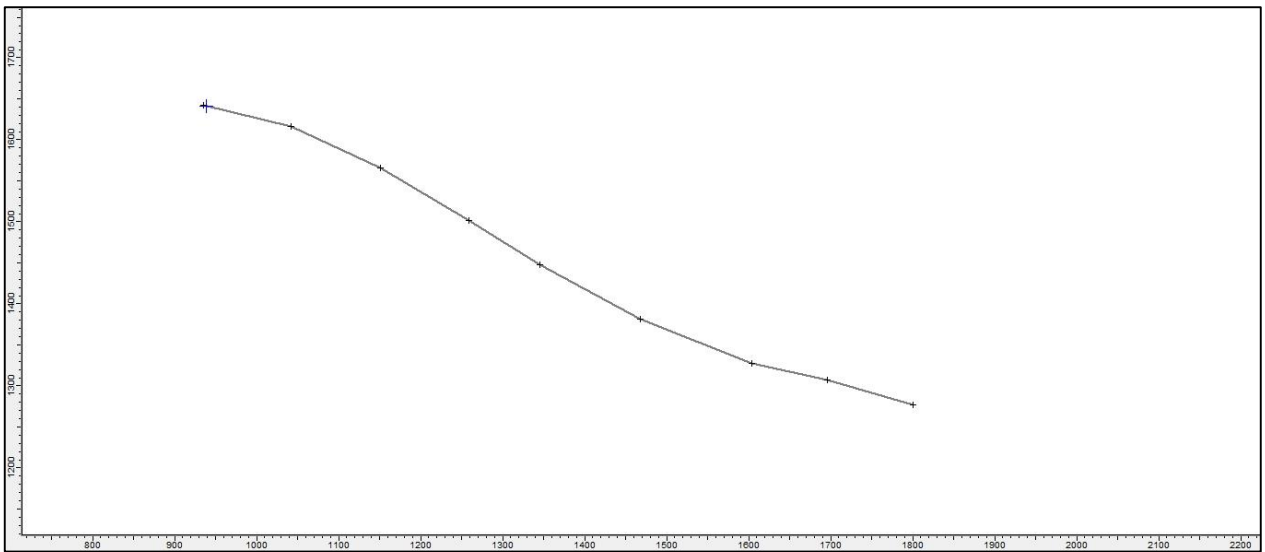


Figura 3.20 Unidad 58

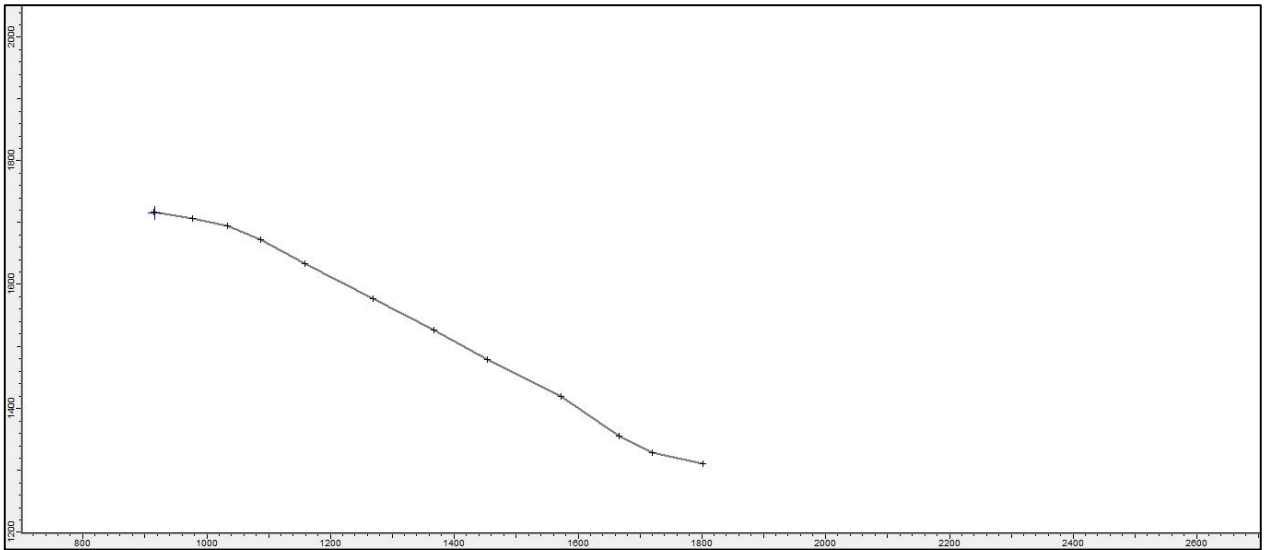


Figura 3.21 Unidad 59

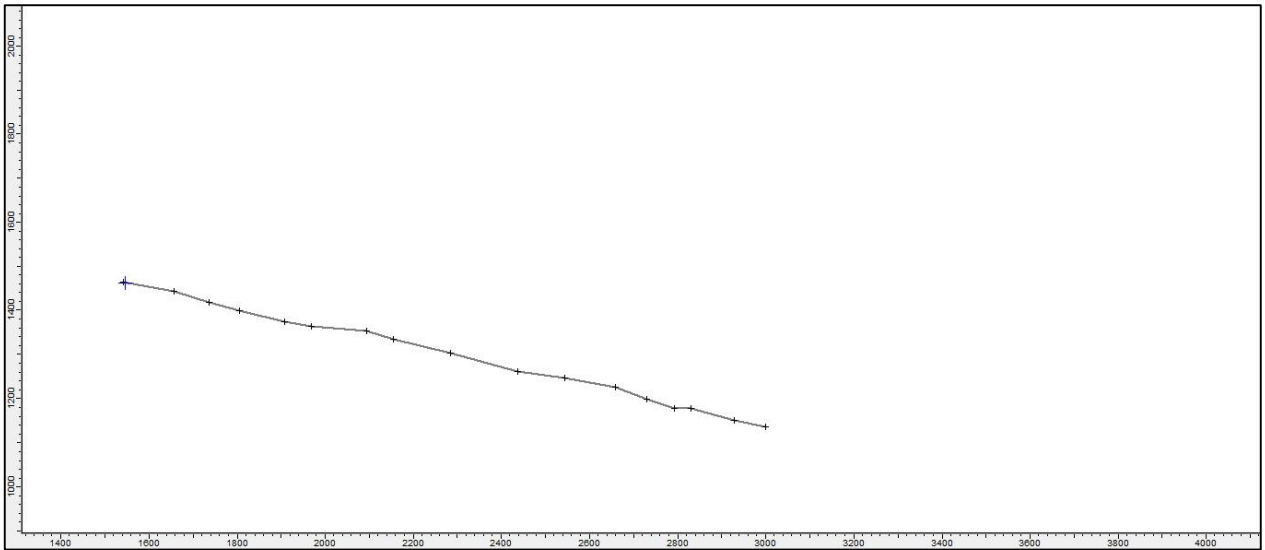


Figura 3.22 Unidad 60

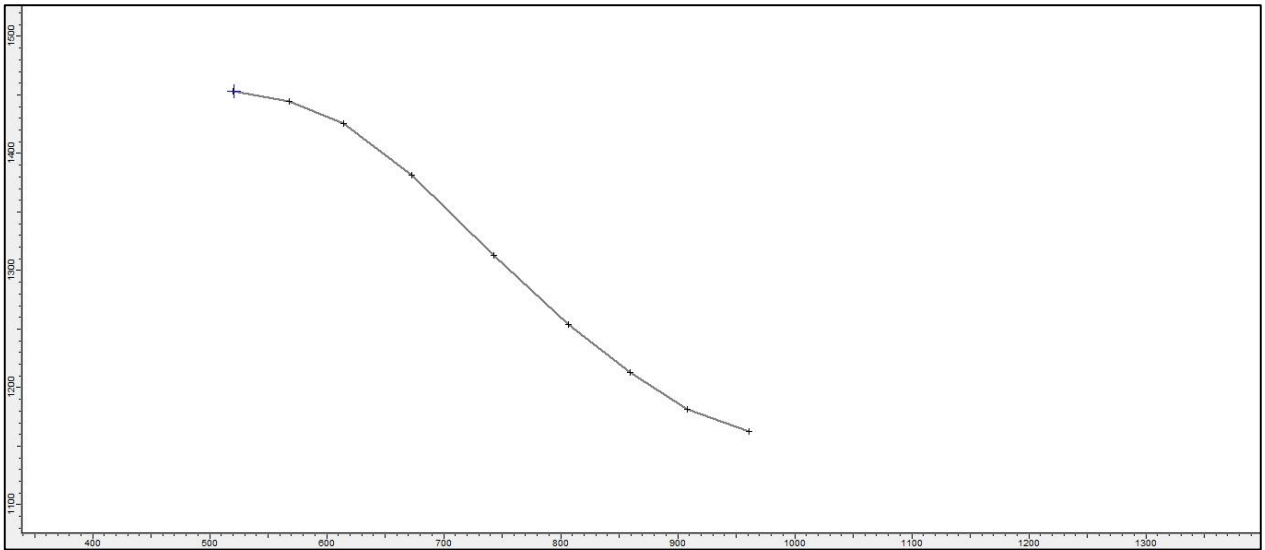


Figura 3.23 Unidad 61

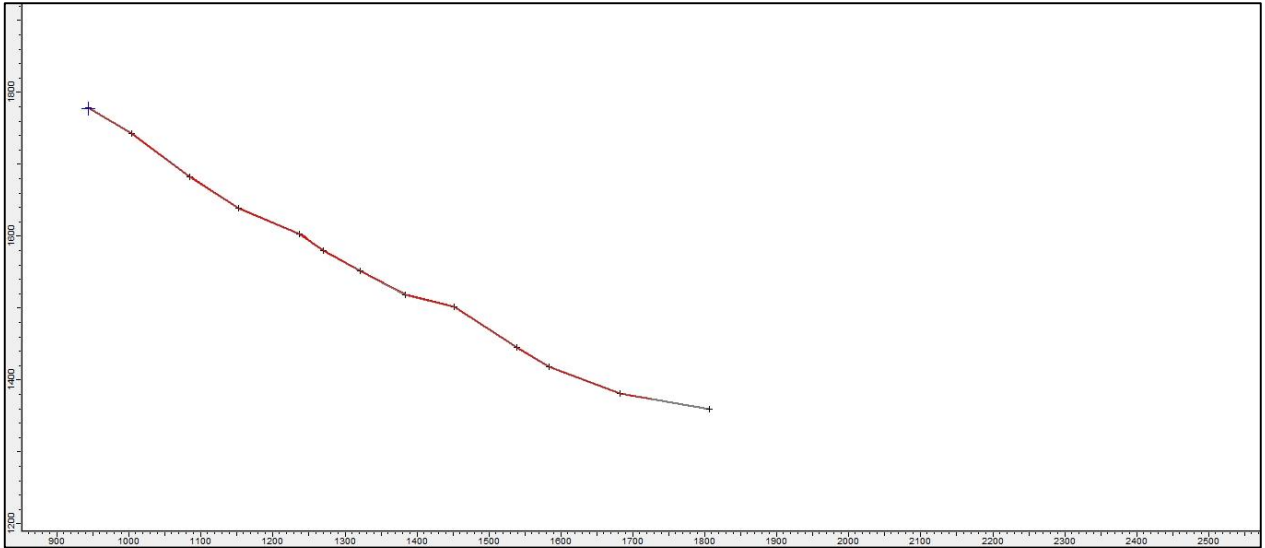


Figura 3.24 Unidad 62

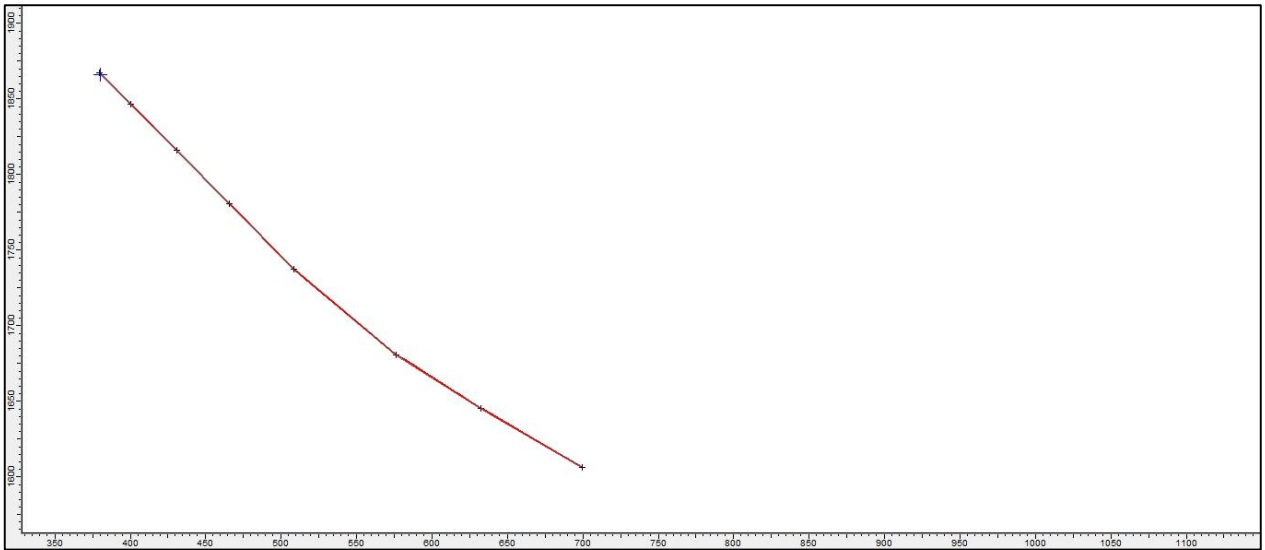


Figura 3.25 Unidad 63

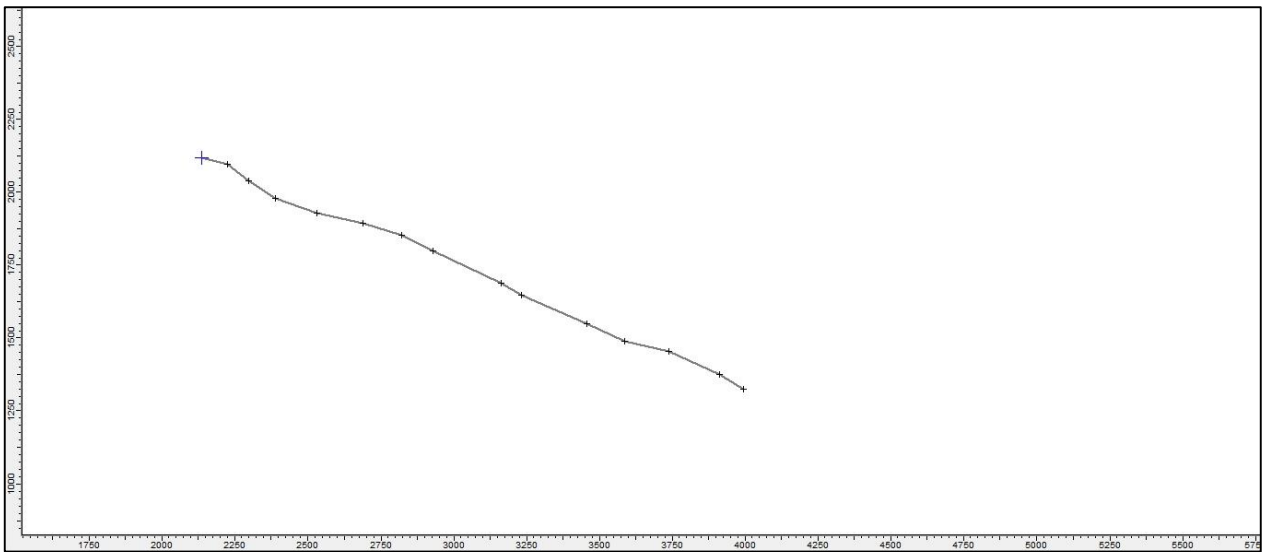


Figura 3.26 Unidad 66

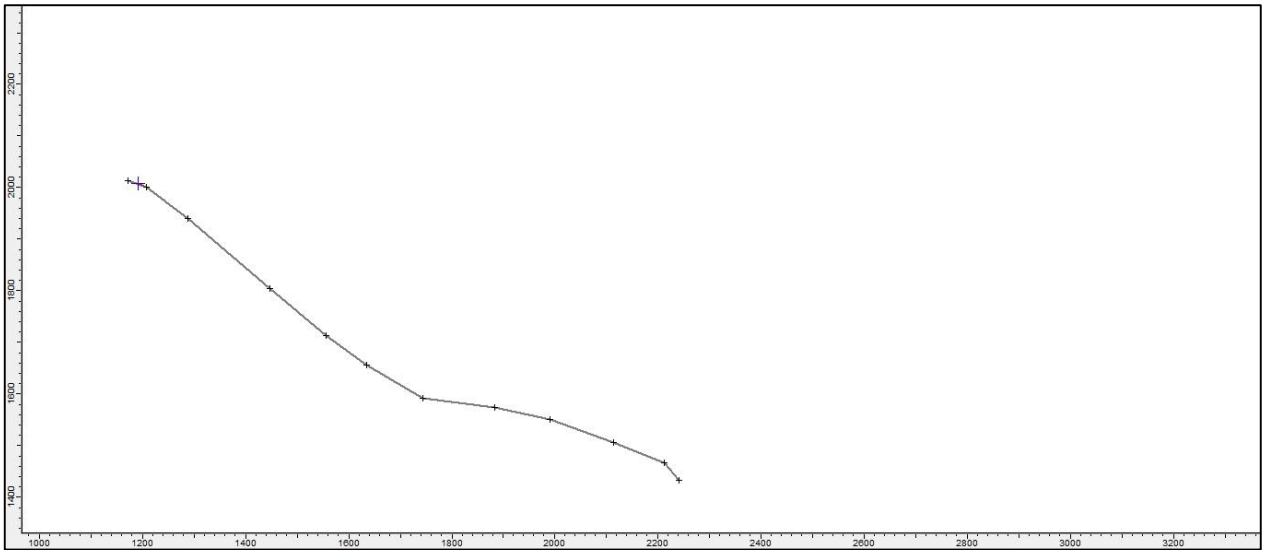


Figura 3.27 Unidad 67

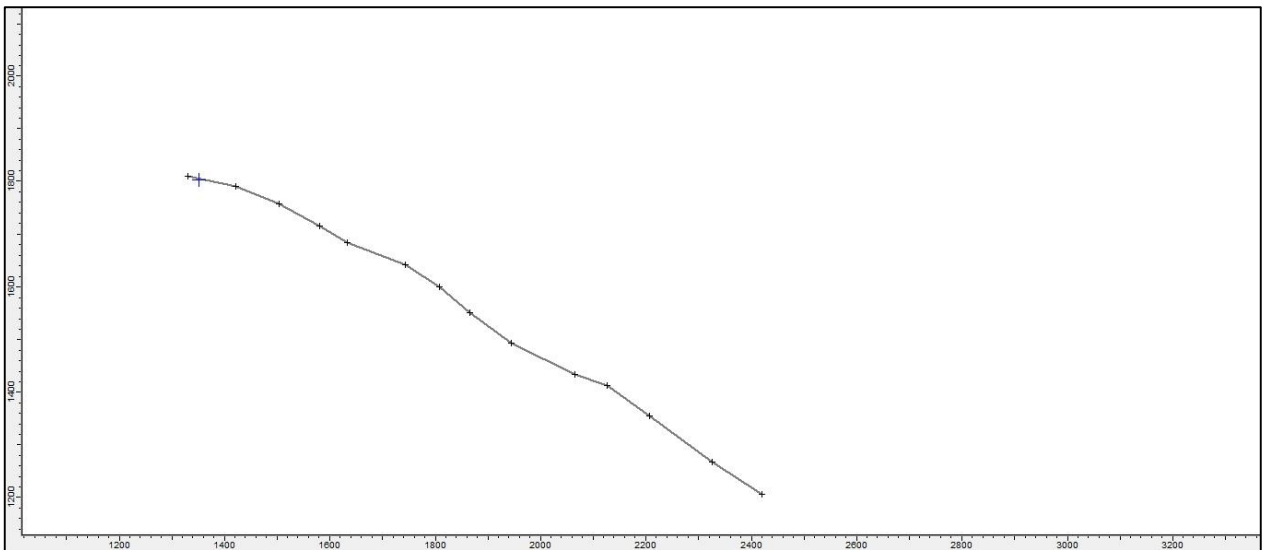


Figura 3.28 Unidad 69

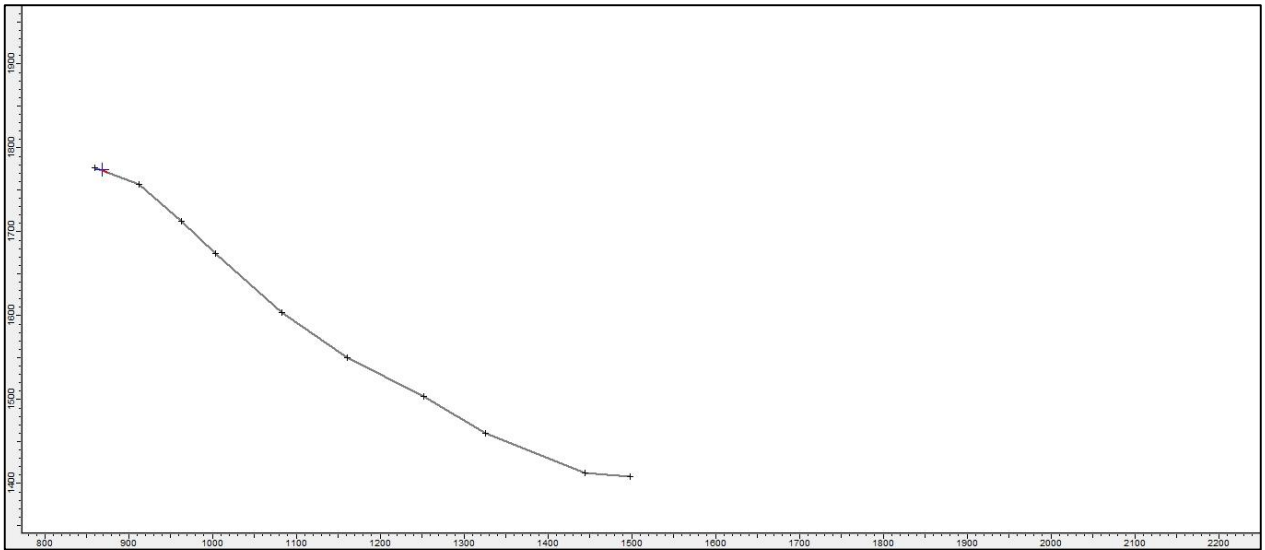


Figura 3.29 Unidad 70

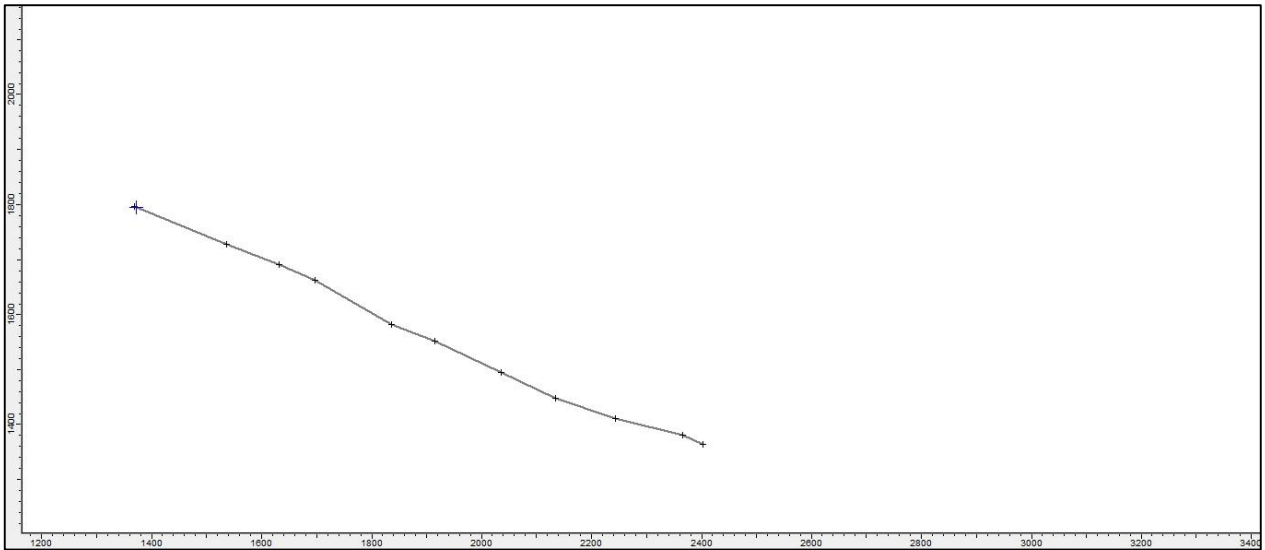


Figura 3.30 Unidad 76

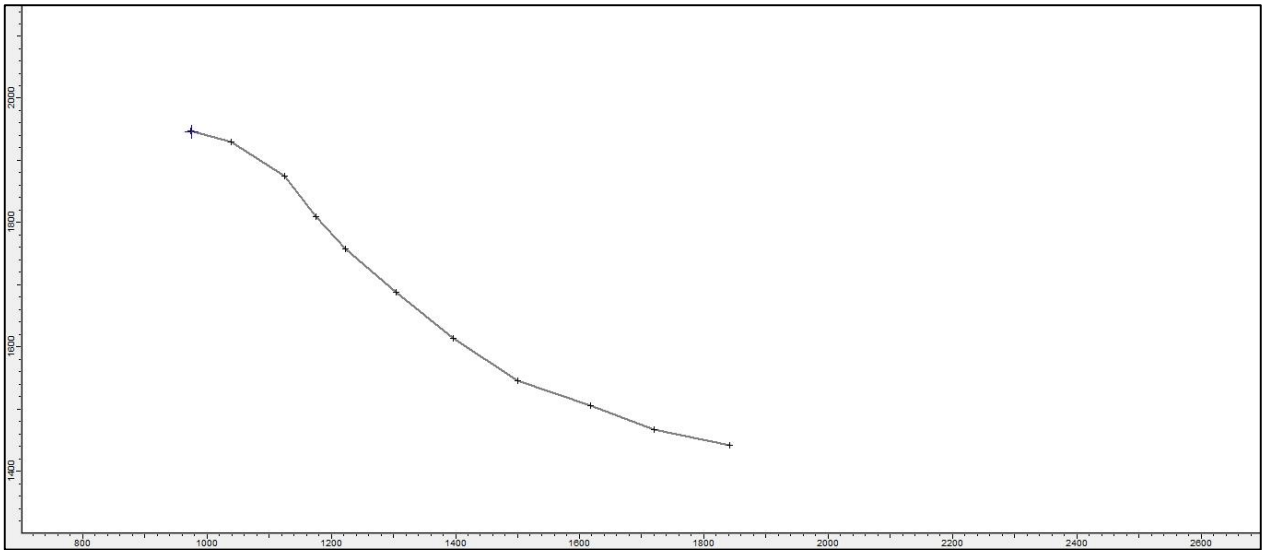


Figura 3.31 Unidad 77

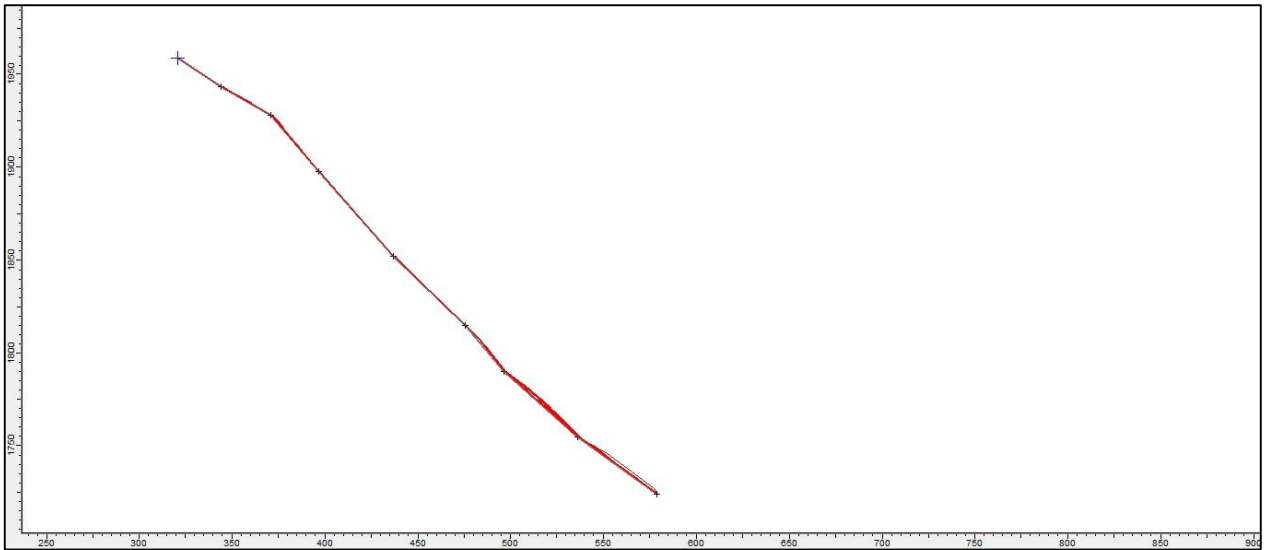


Figura 3.32 Unidad 80

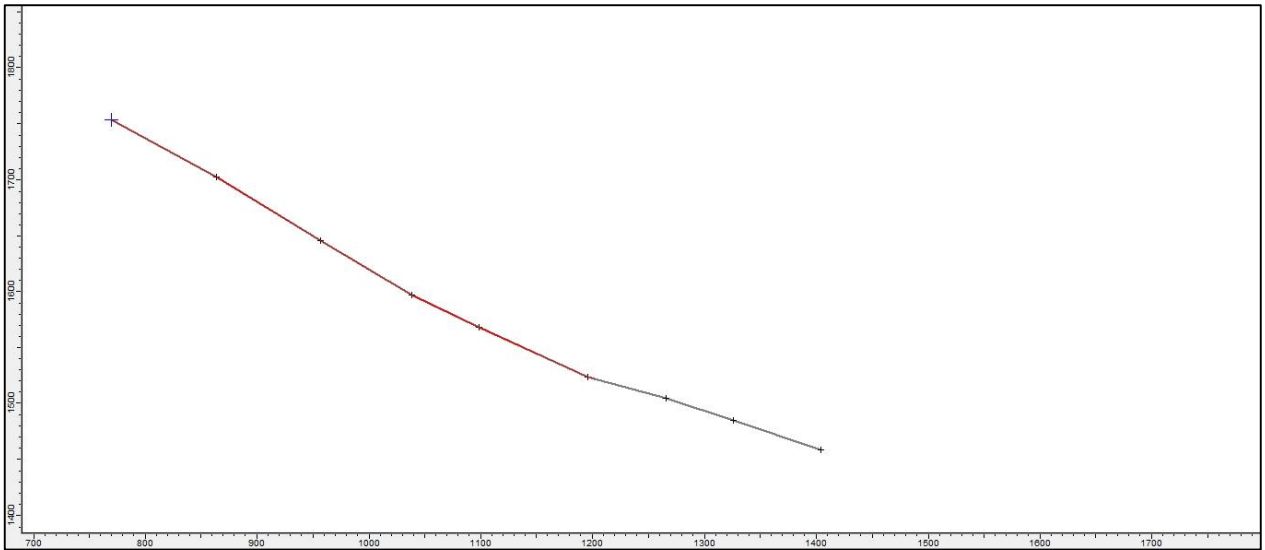


Figura 3.33 Unidad 81

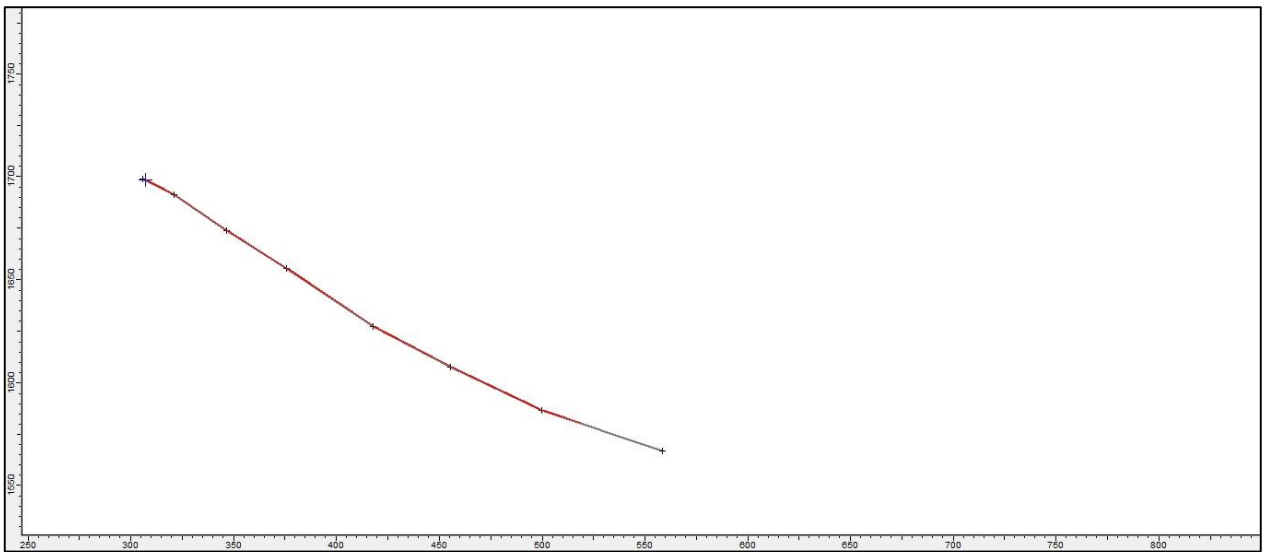


Figura 3.34 Unidad 82

-Caso sísmico:

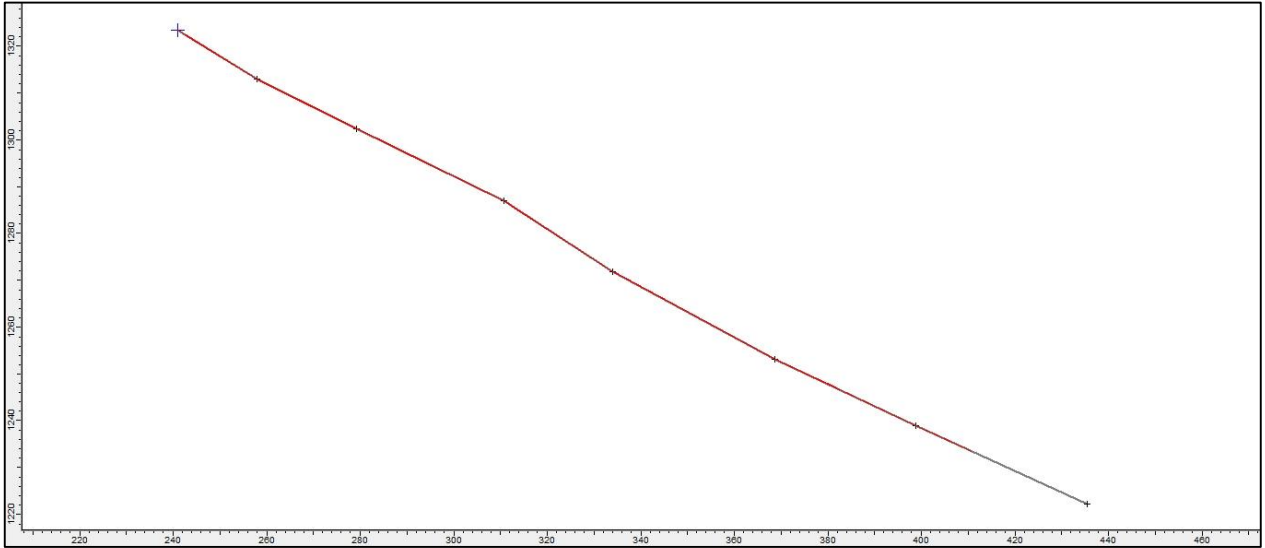


Figura 3.35 Unidad 5

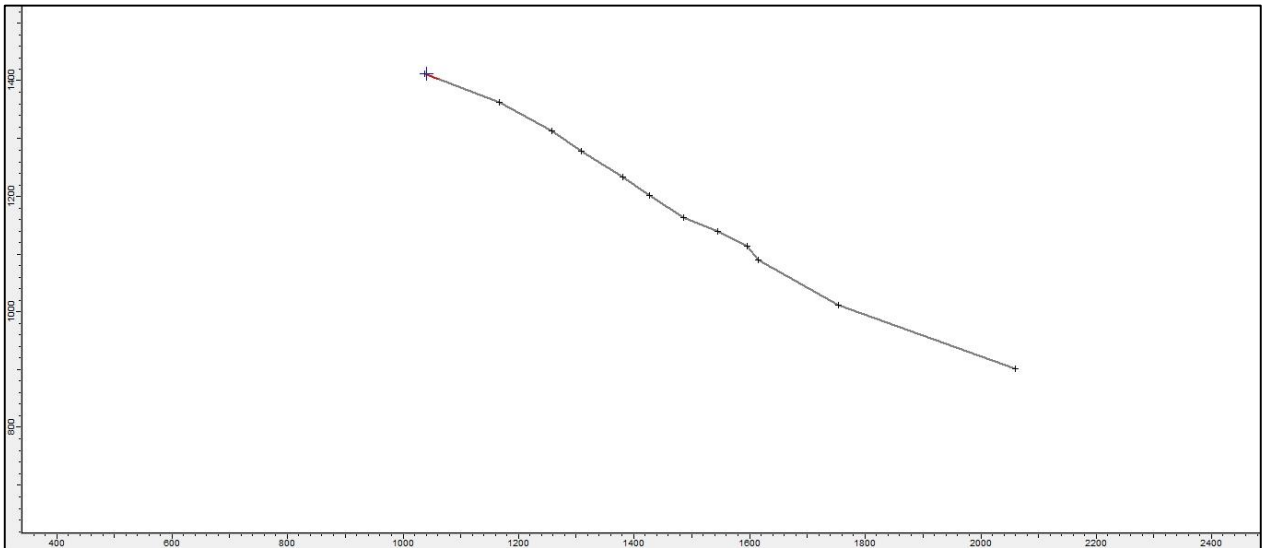


Figura 3.36 Unidad 9

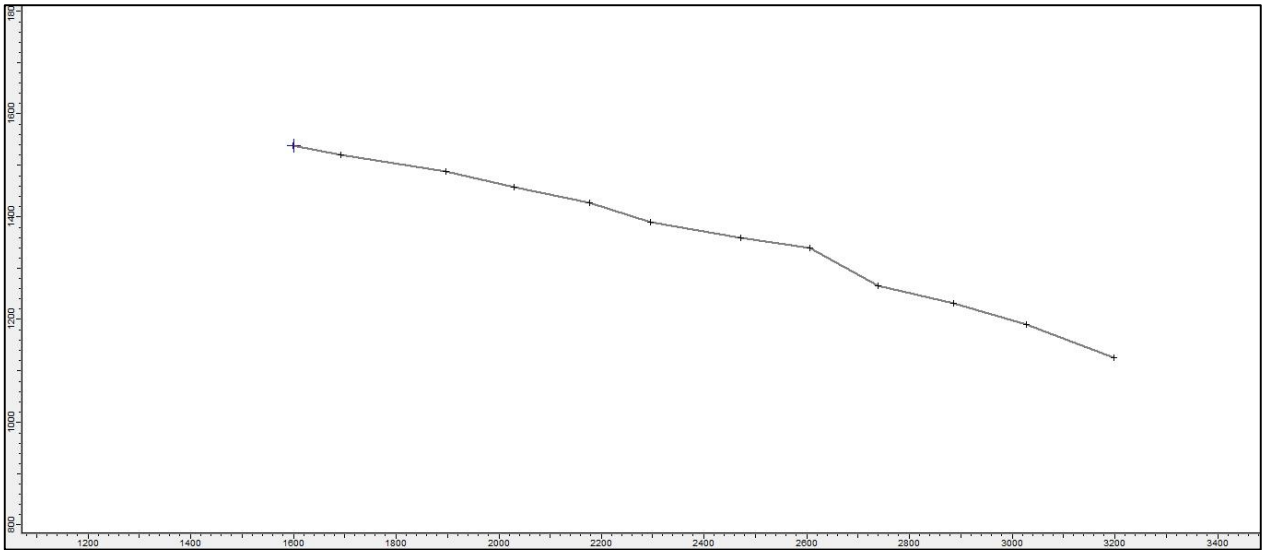


Figura 3.37 Unidad 10

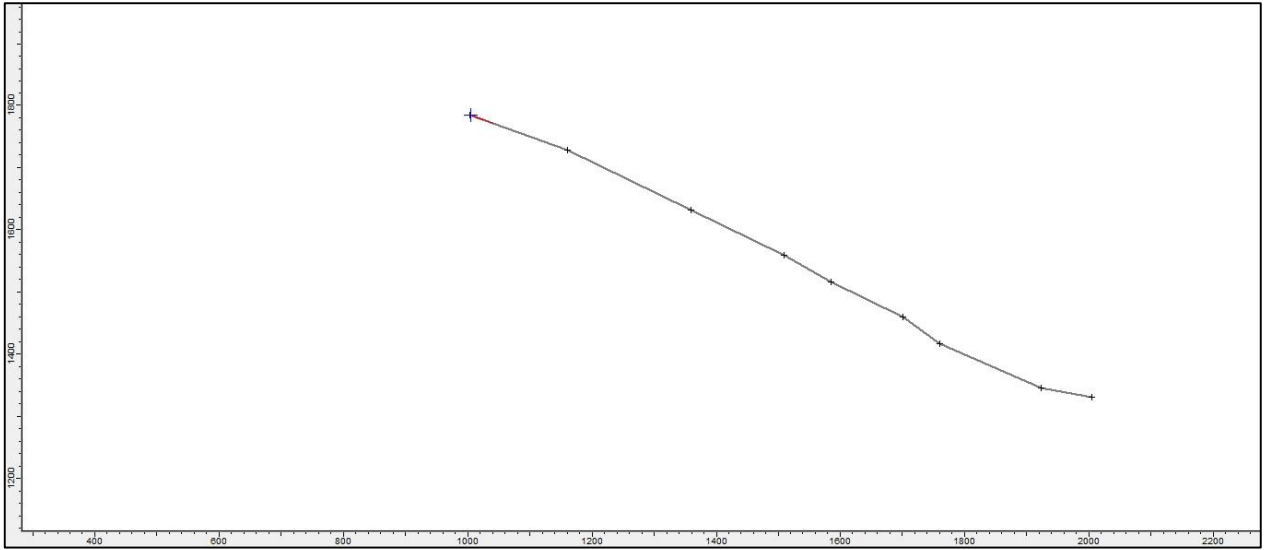


Figura 3.38 Unidad 11

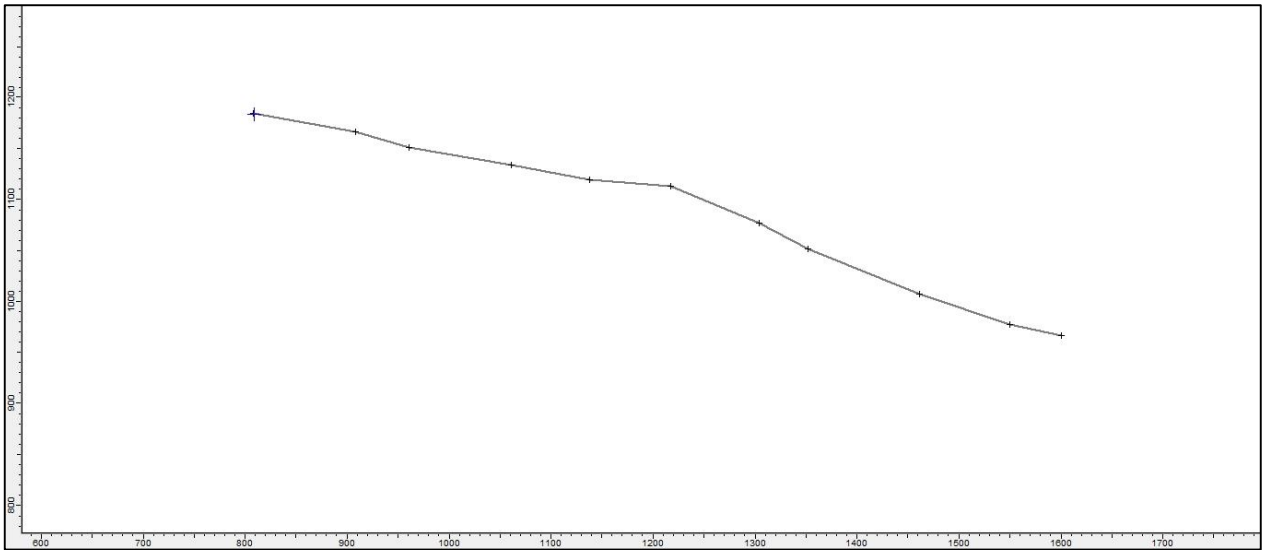


Figura 3.39 Unidad 12

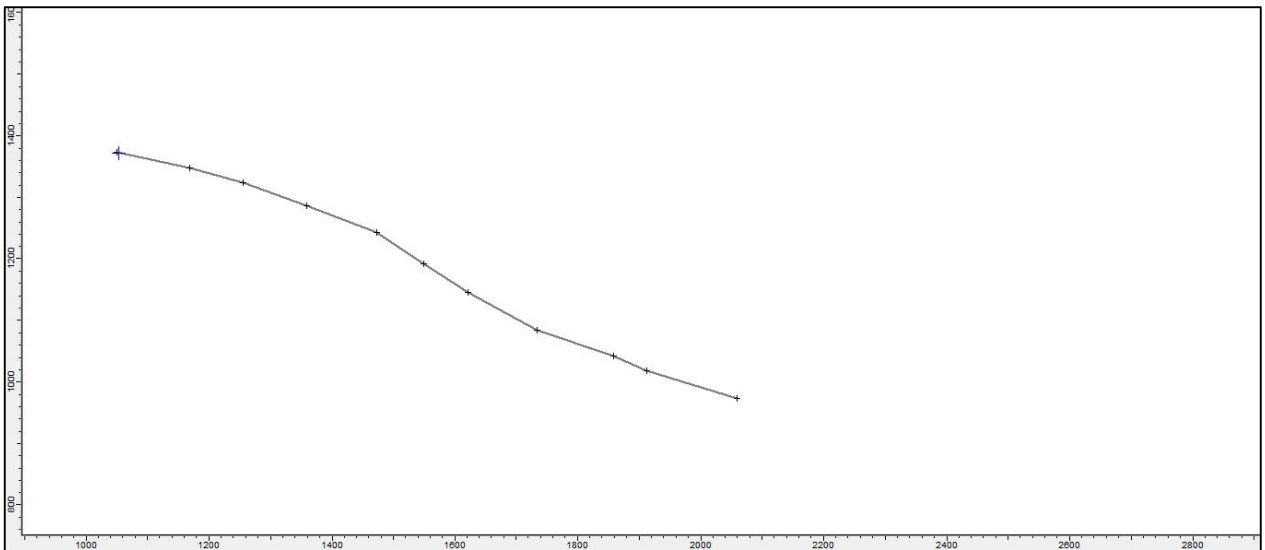


Figura 3.40 Unidad 13

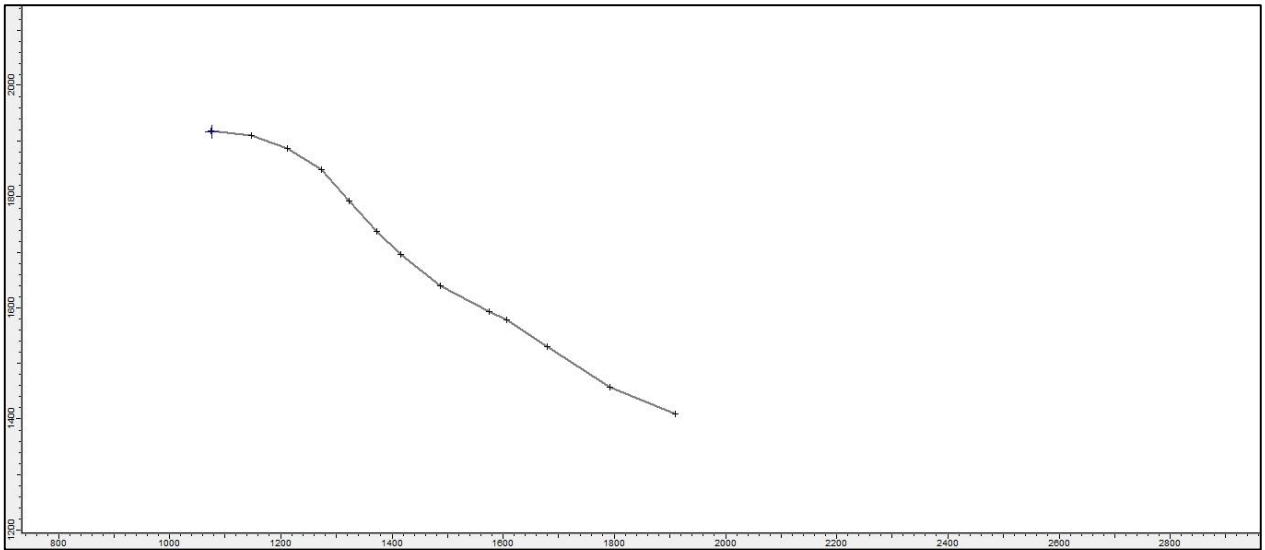


Figura 3.41 Unidad 22

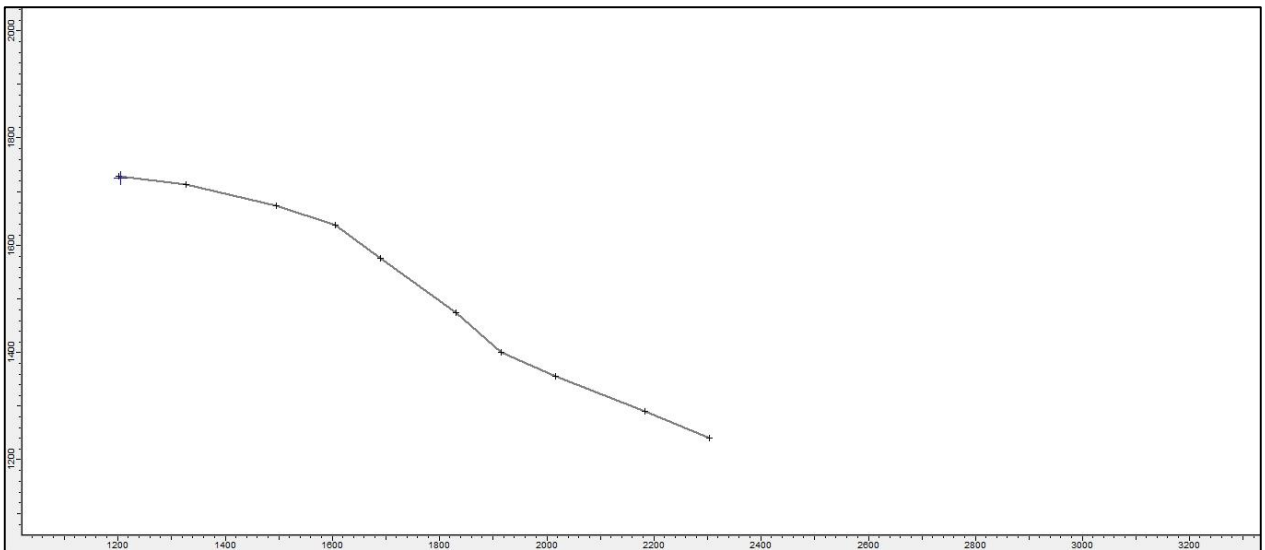


Figura 3.42 Unidad 23

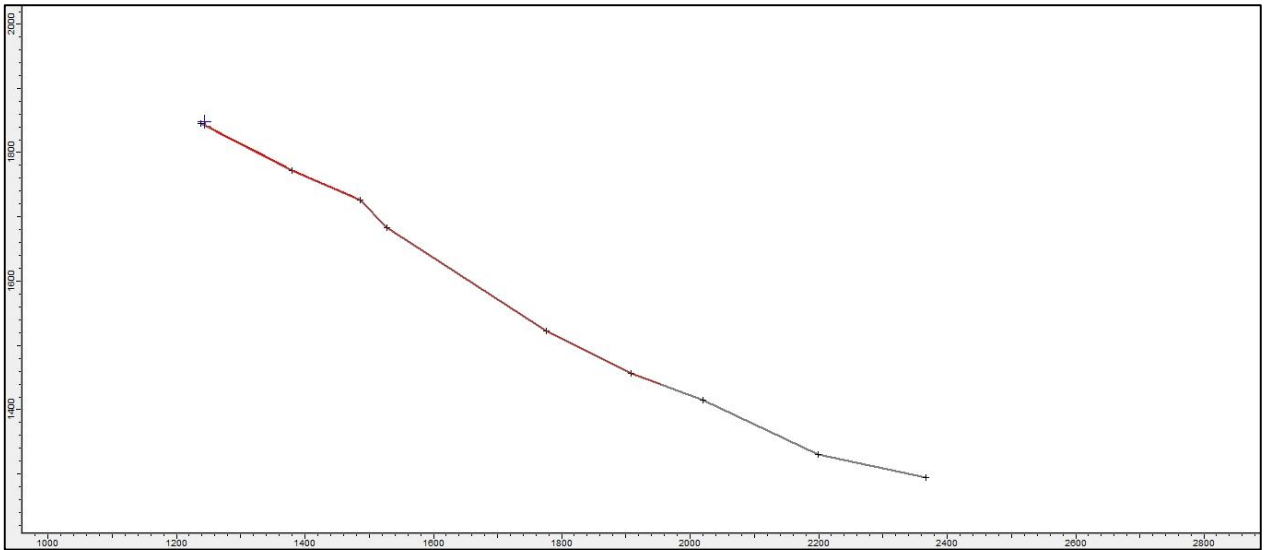


Figura 3.43 Unidad 24

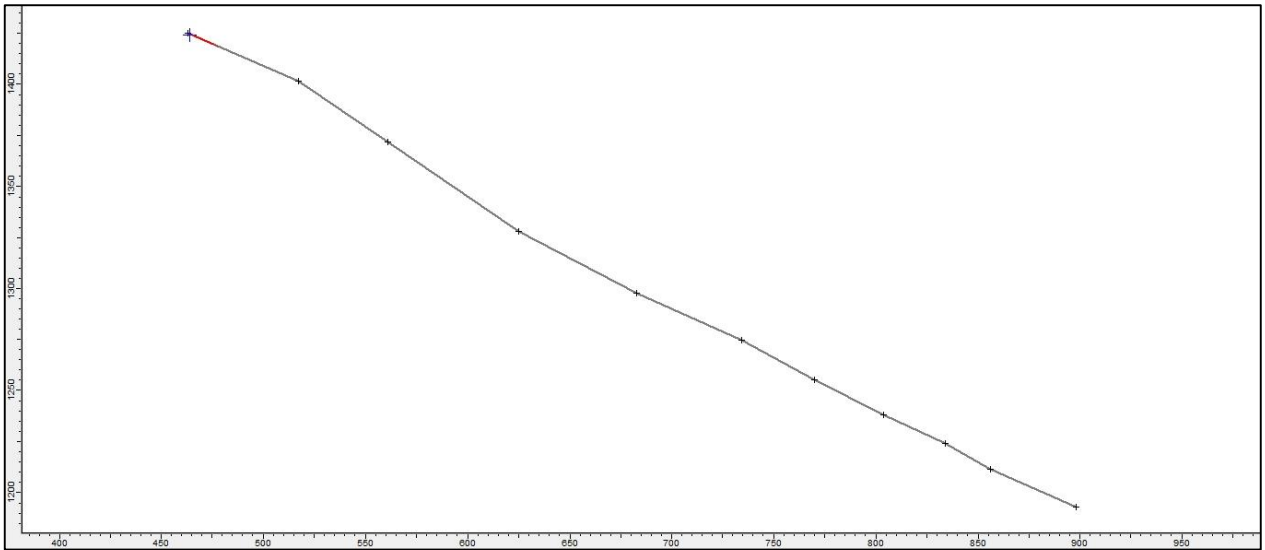


Figura 3.44 Unidad 25

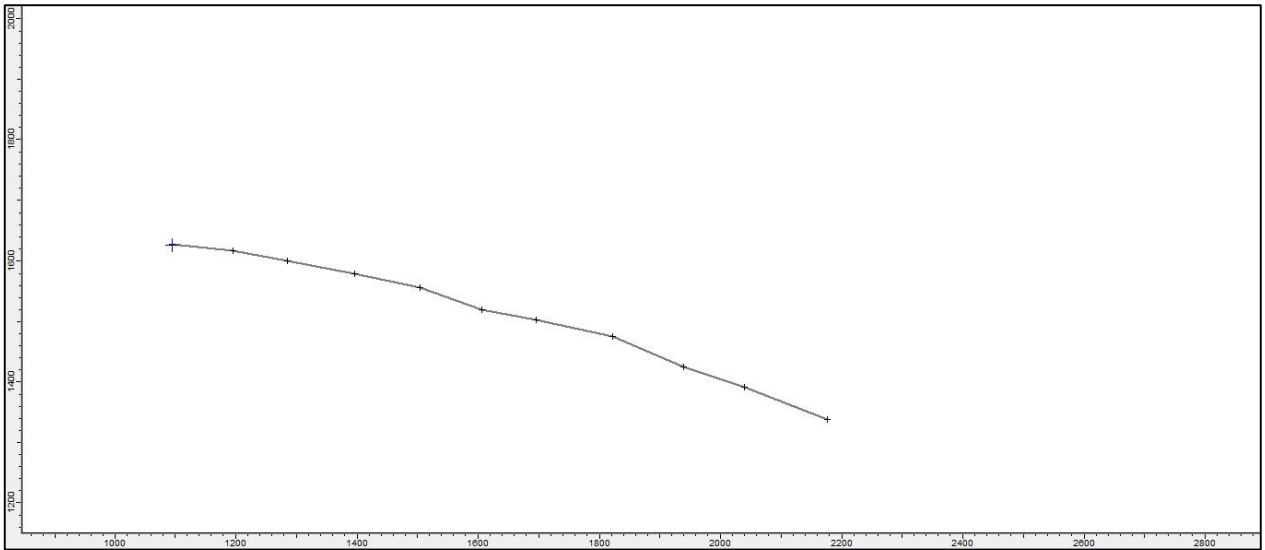


Figura 3.45 Unidad 28

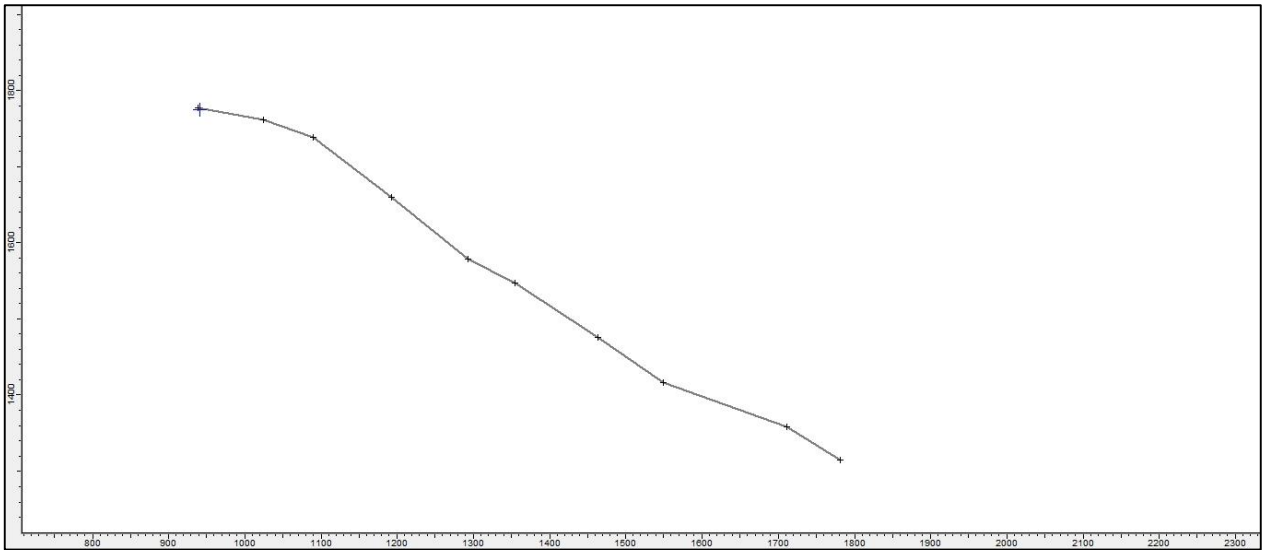


Figura 3.46 Unidad 33

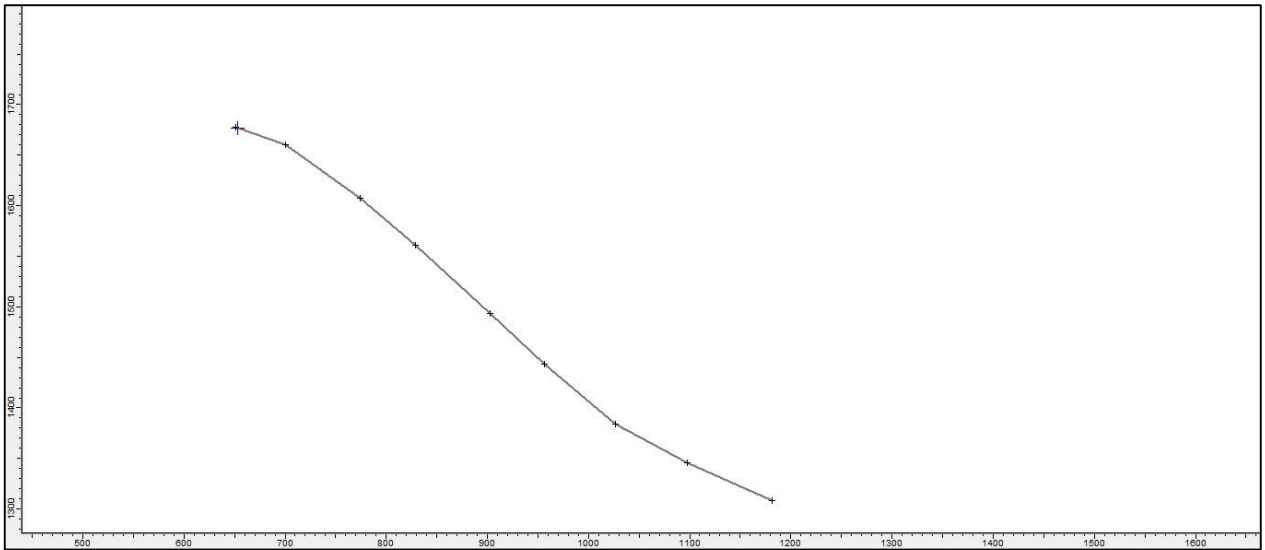


Figura 3.47 Unidad 34

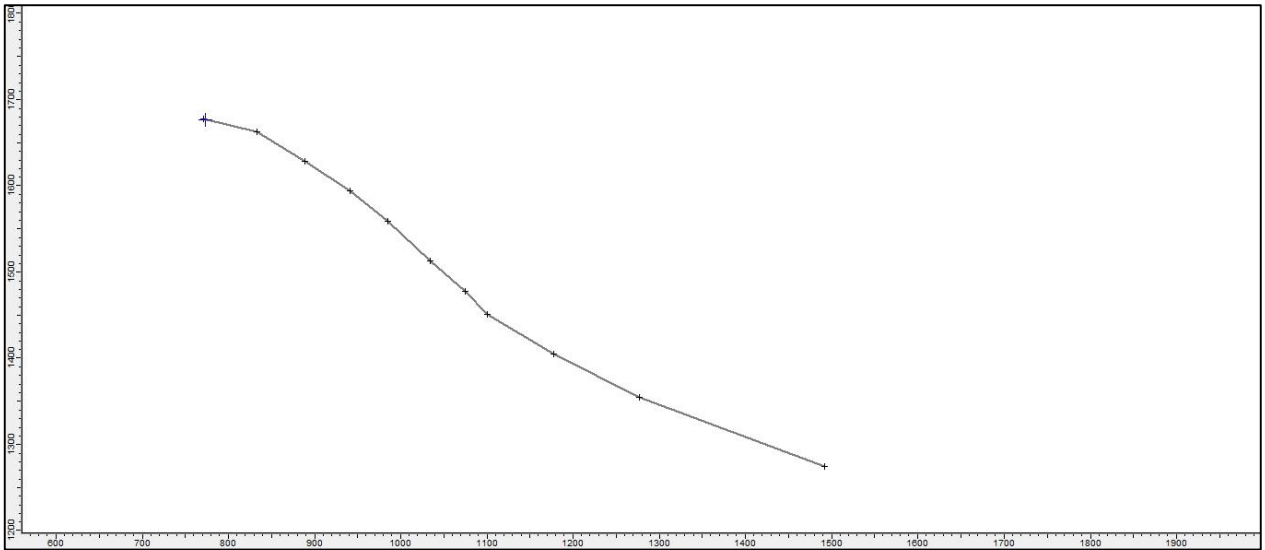


Figura 3.48 Unidad 35

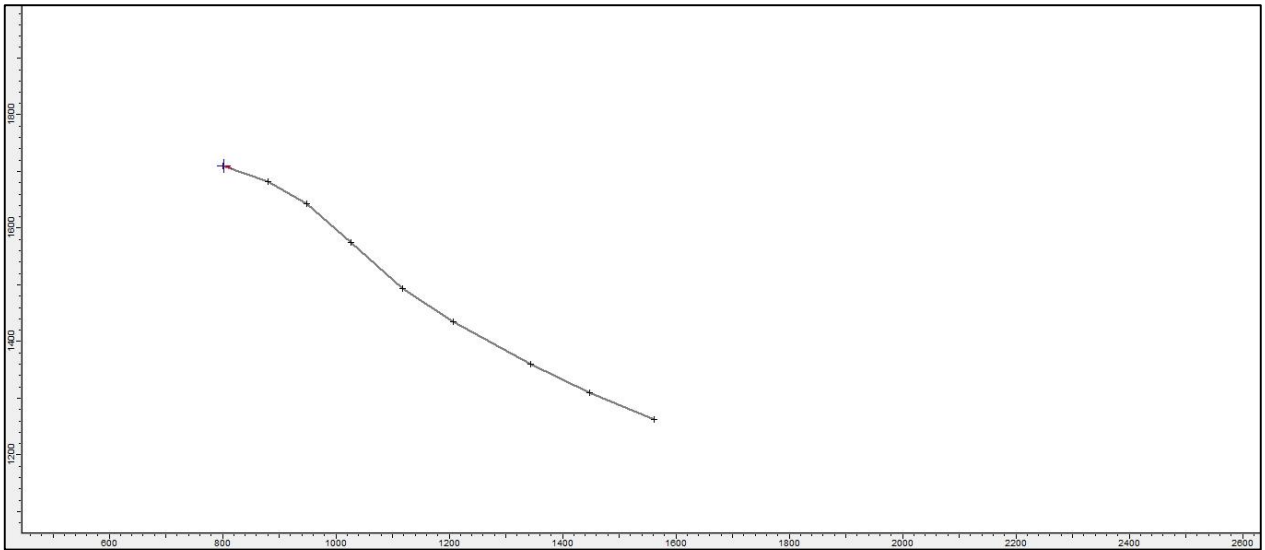


Figura 3.49 Unidad 36

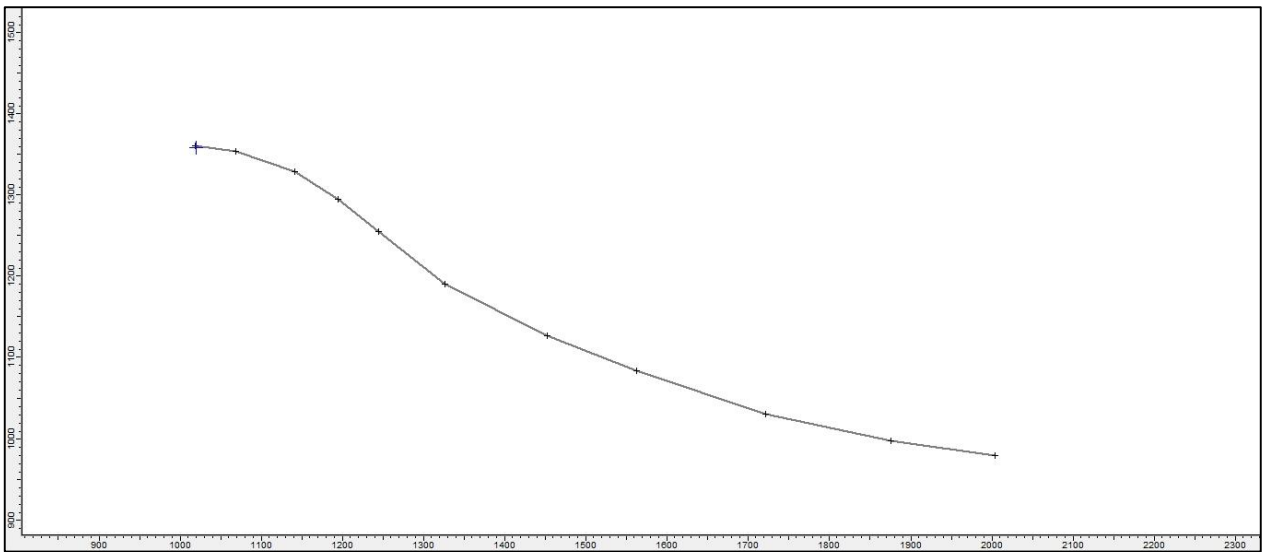


Figura 3.50 Unidad 37

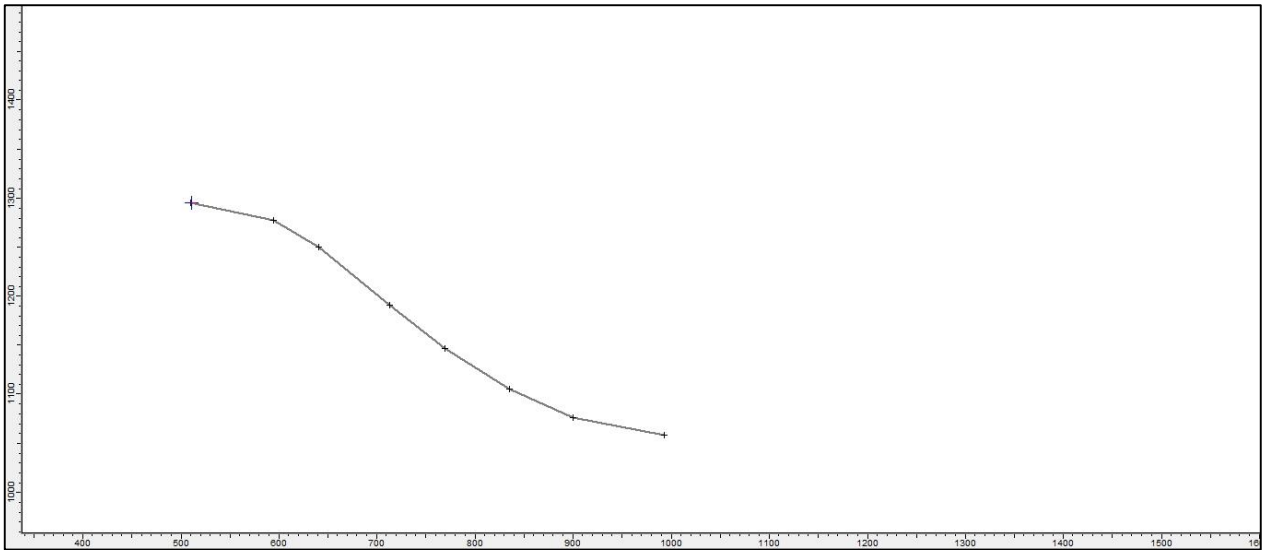


Figura 3.51 Unidad 38

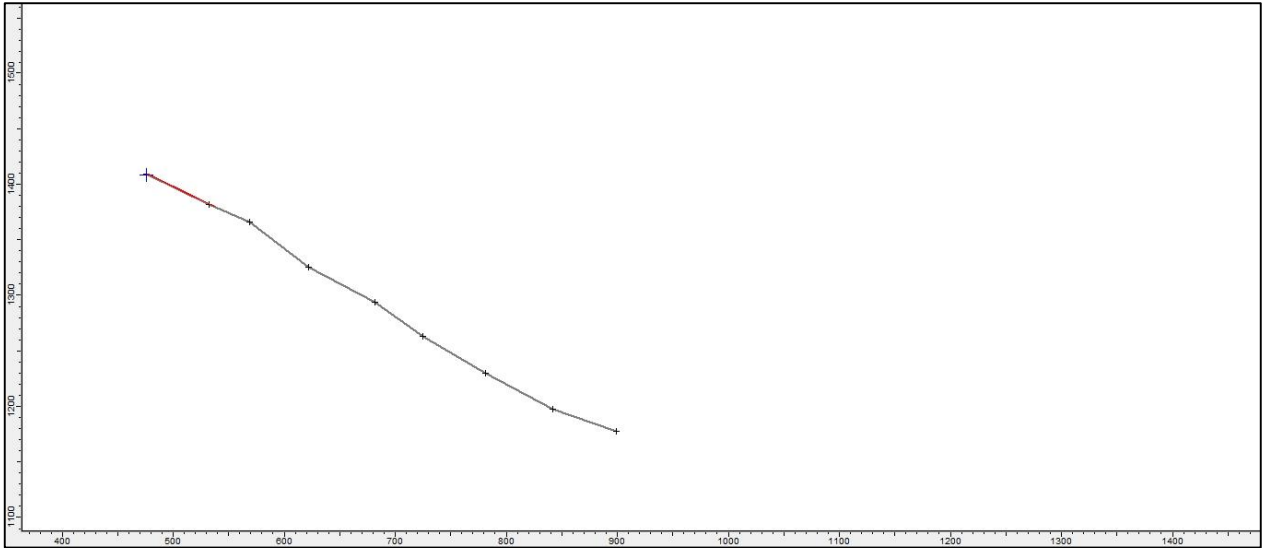


Figura 3.52 Unidad 55

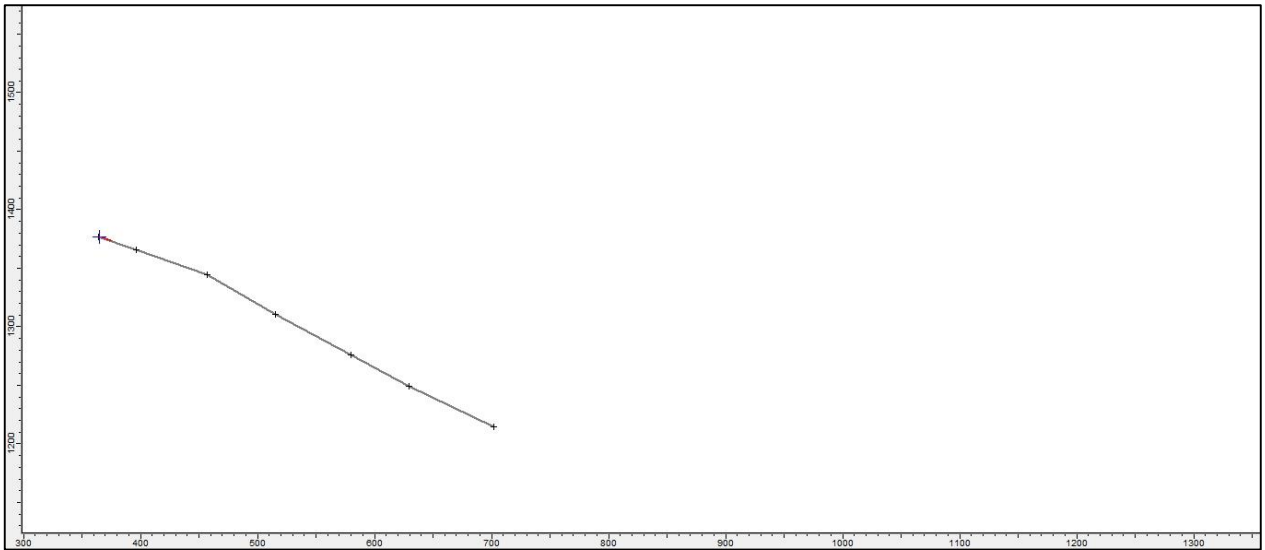


Figura 3.53 Unidad 56

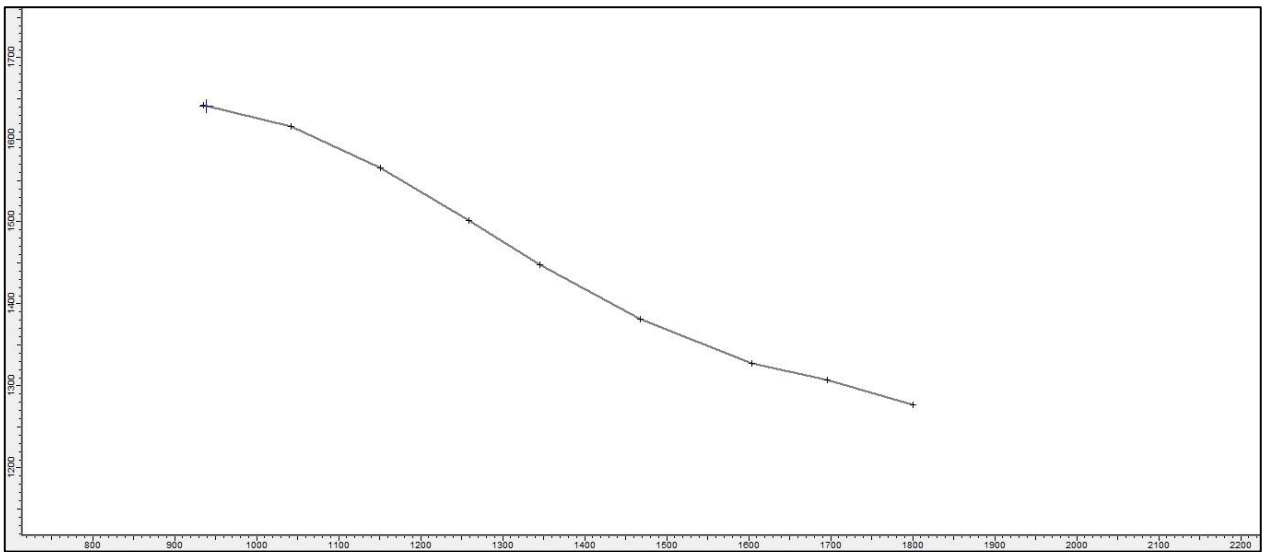


Figura 3.54 Unidad 58

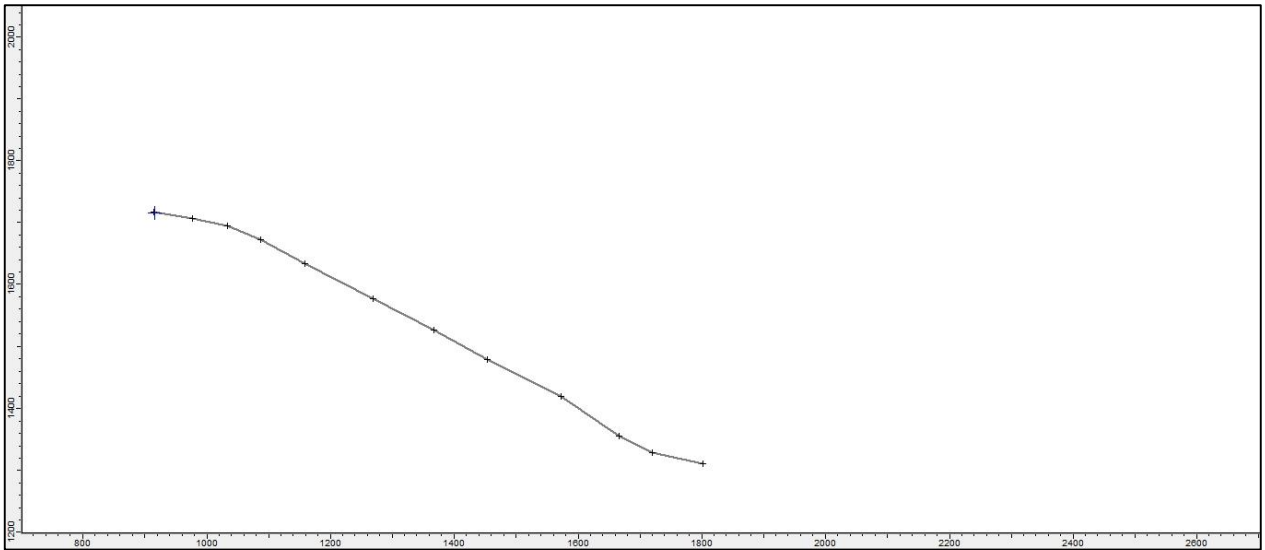


Figura 3.55 Unidad 59

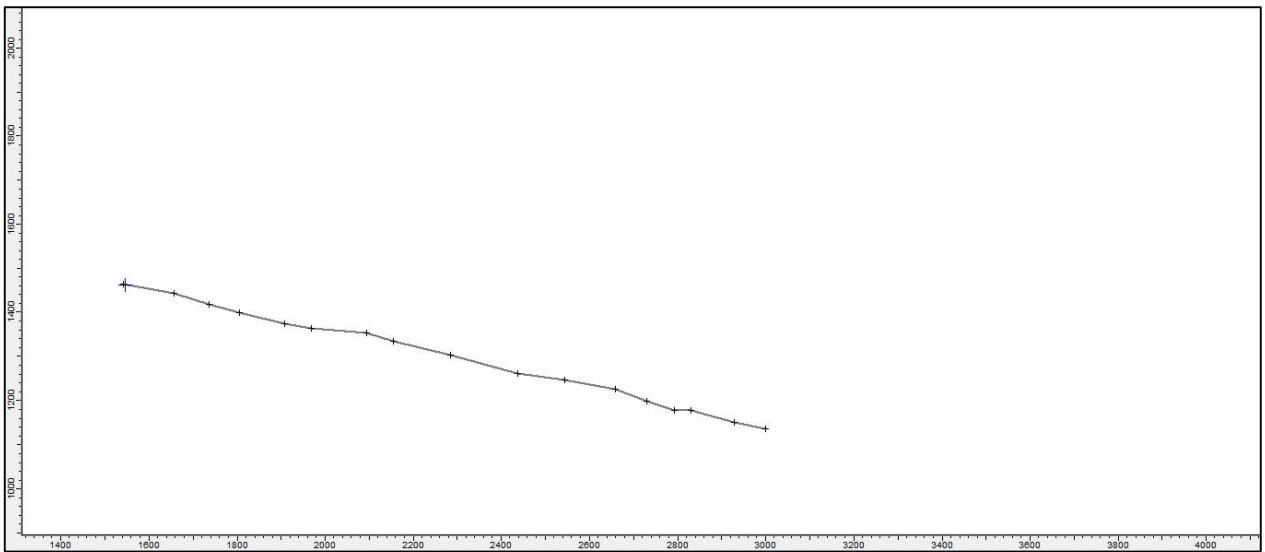


Figura 3.56 Unidad 60

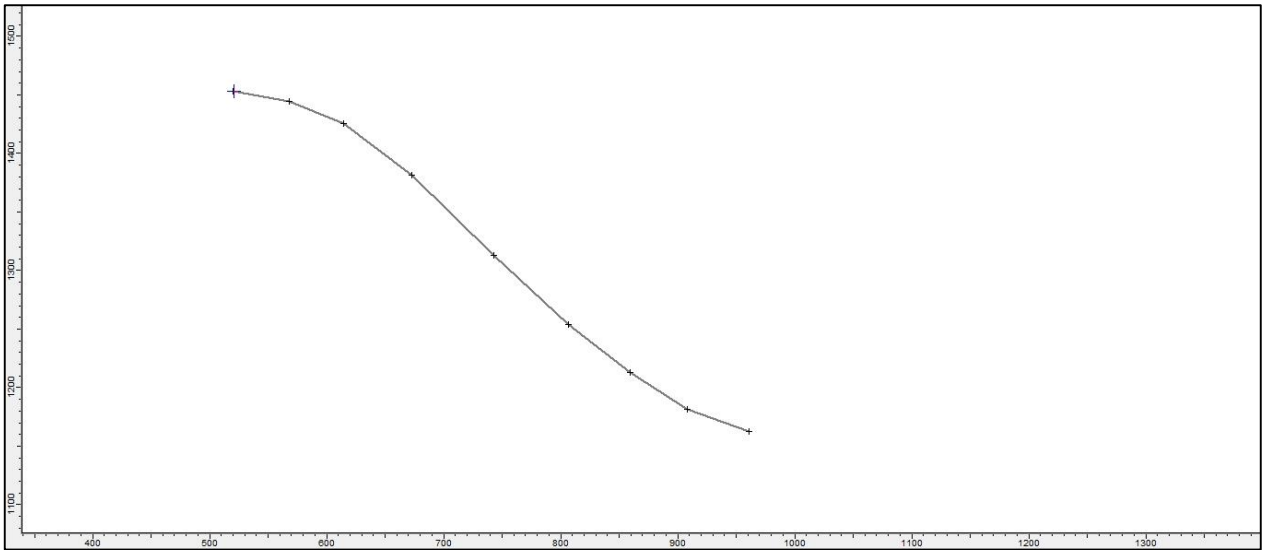


Figura 3.57 Unidad 61

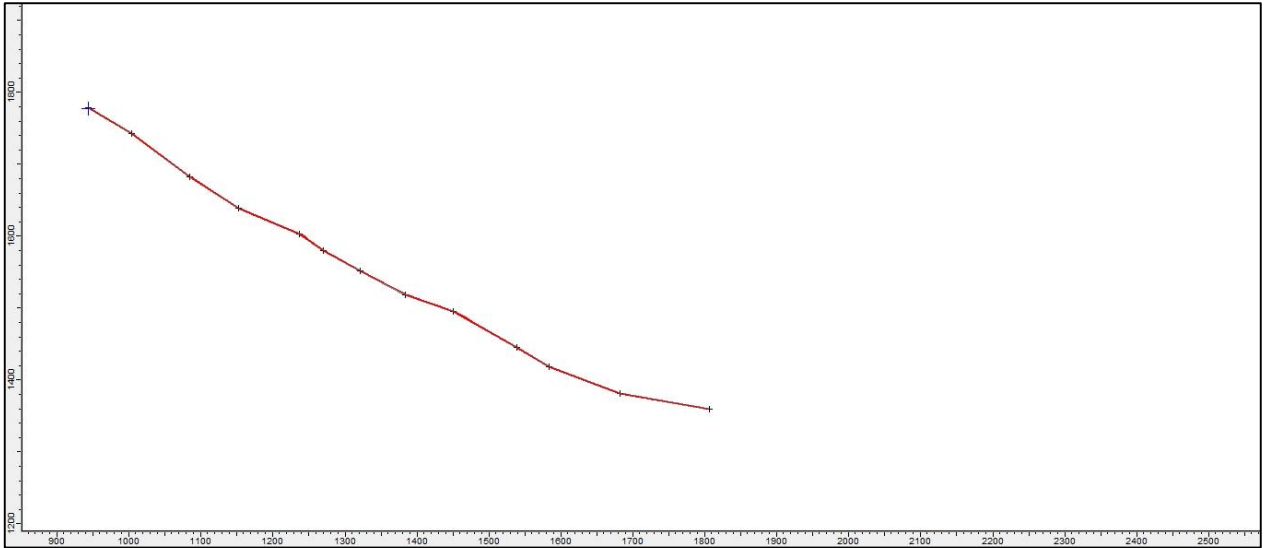


Figura 3.58 Unidad 62

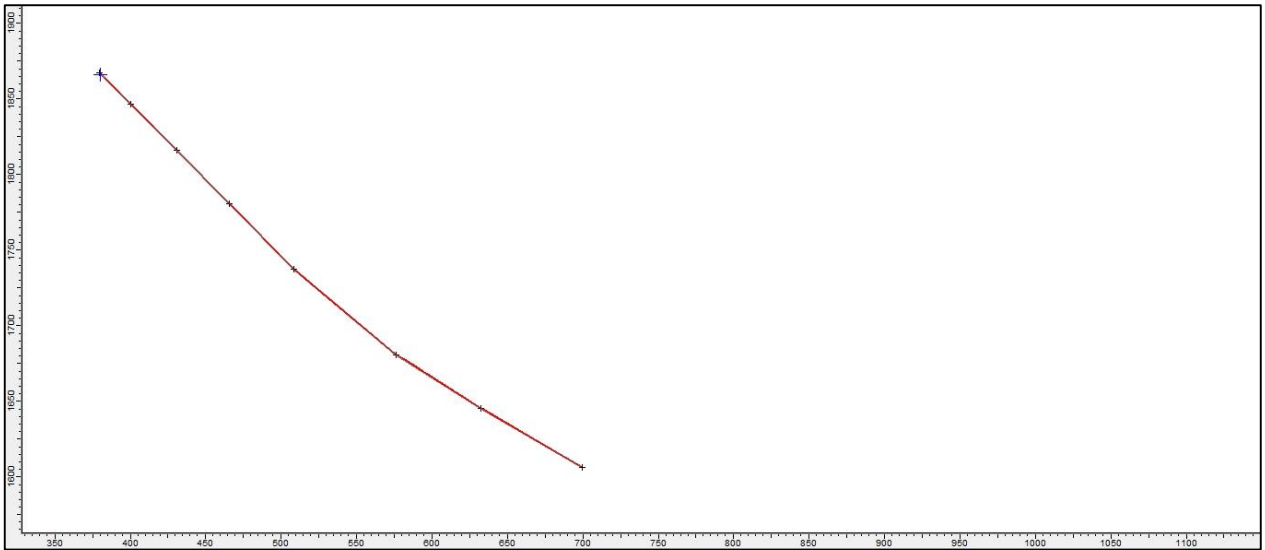


Figura 3.59 Unidad 63

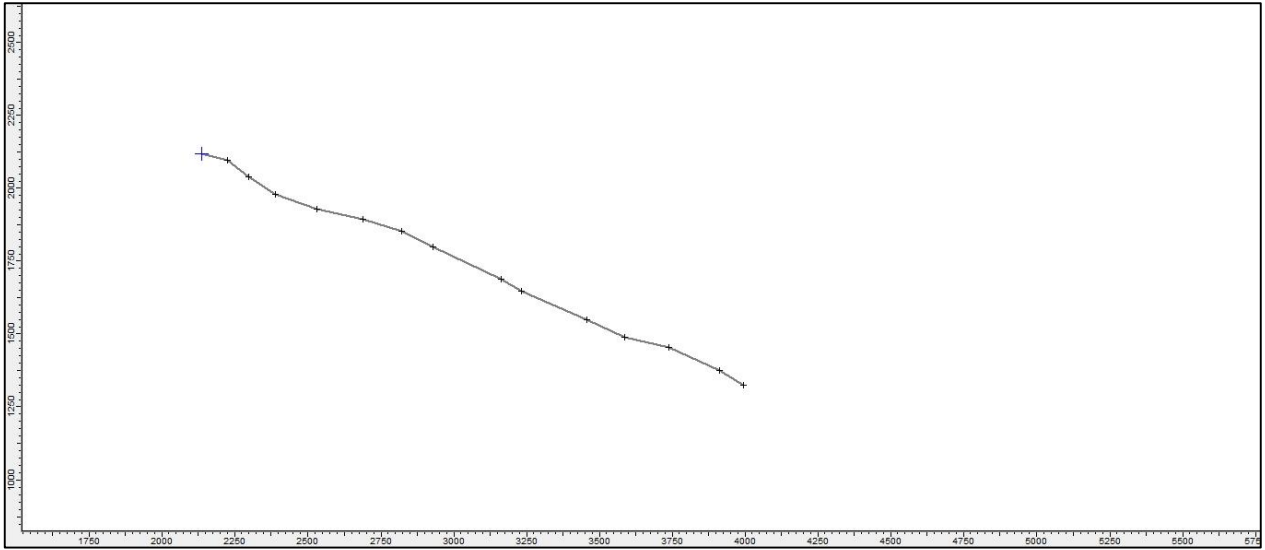


Figura 3.60 Unidad 66

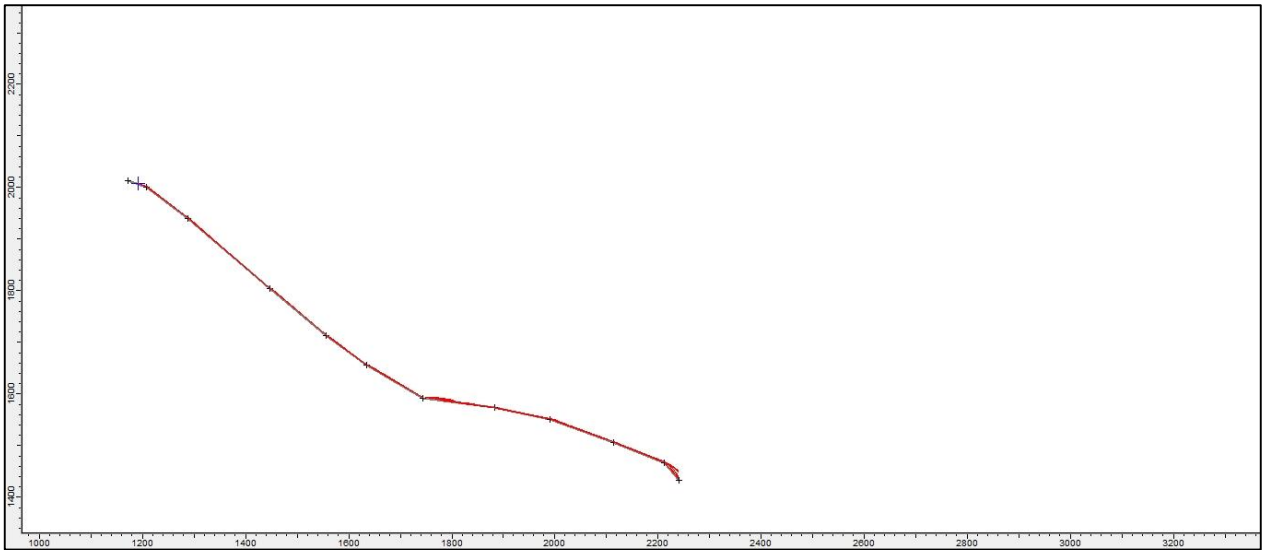


Figura 3.61 Unidad 67

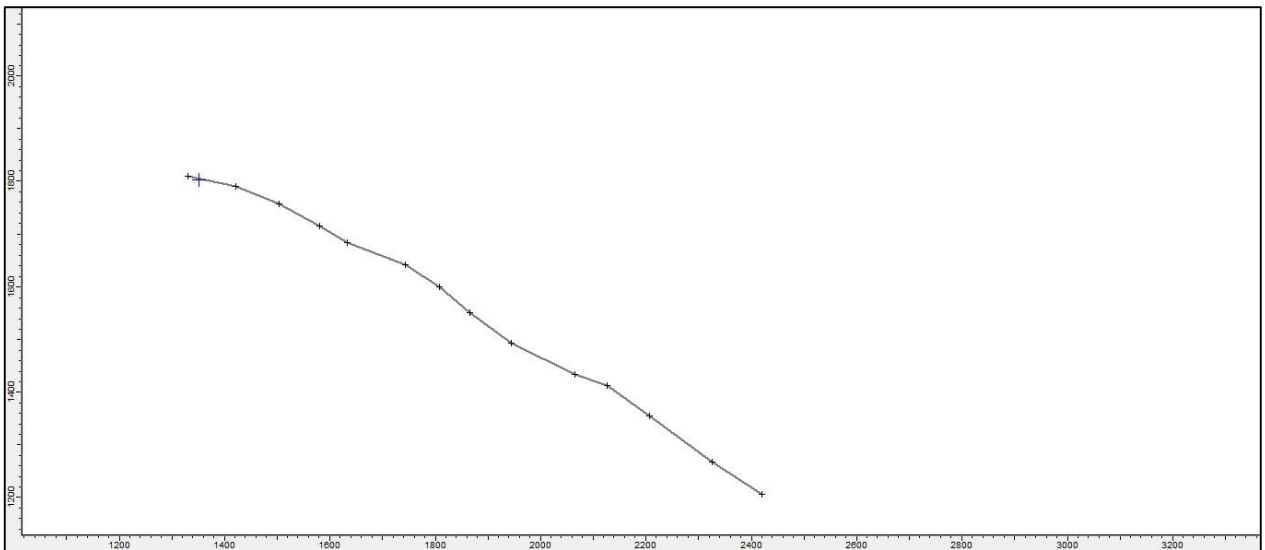


Figura 3.62 Unidad 69

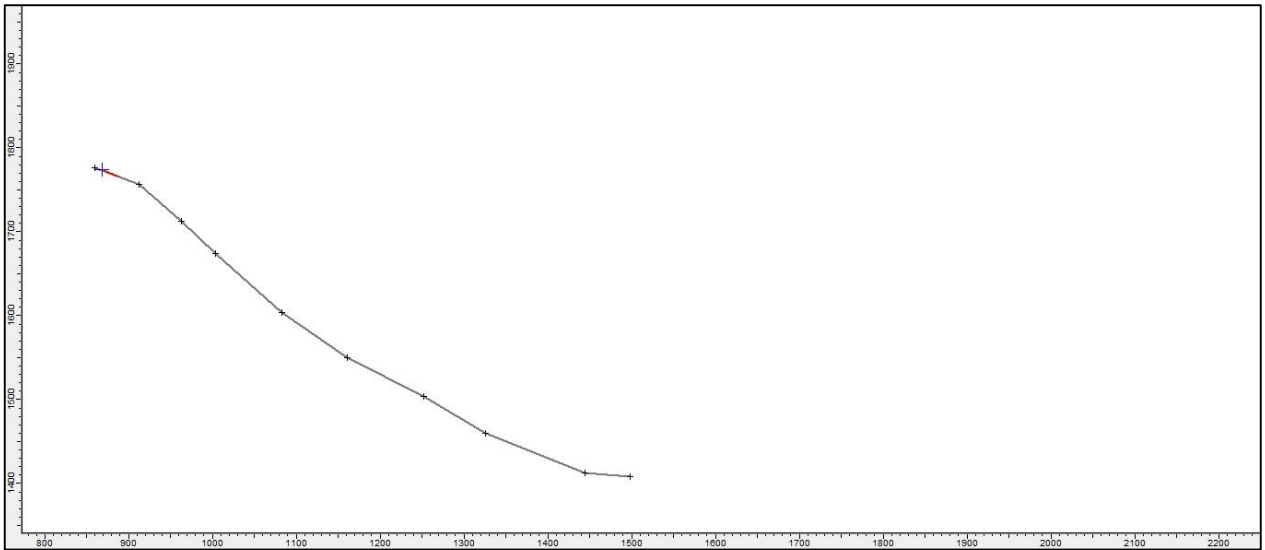


Figura 3.63 Unidad 70

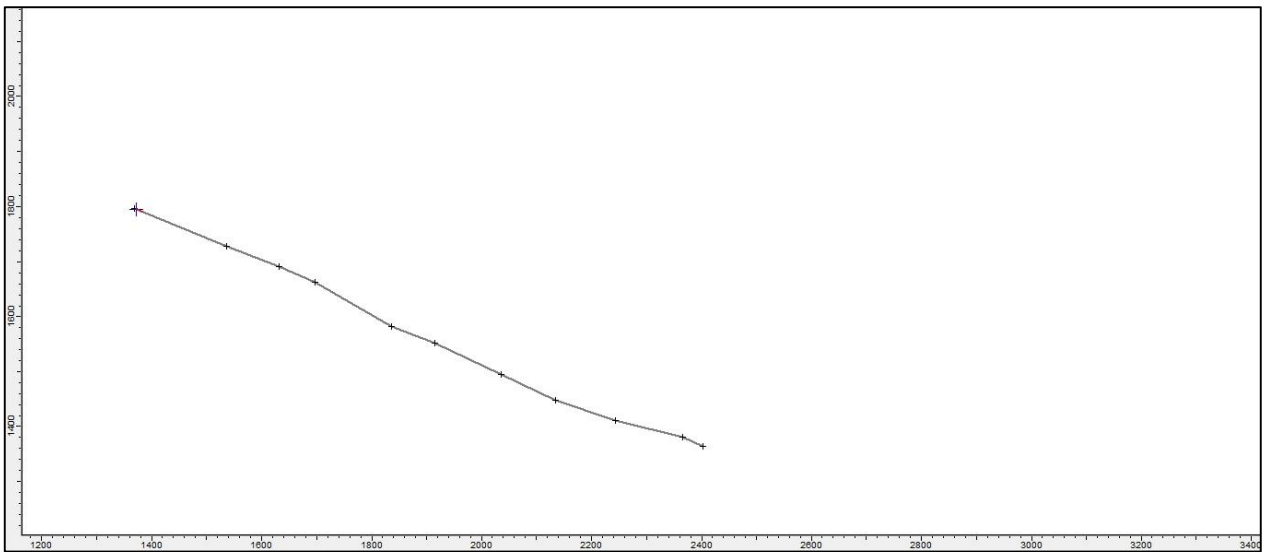


Figura 3.64 Unidad 76

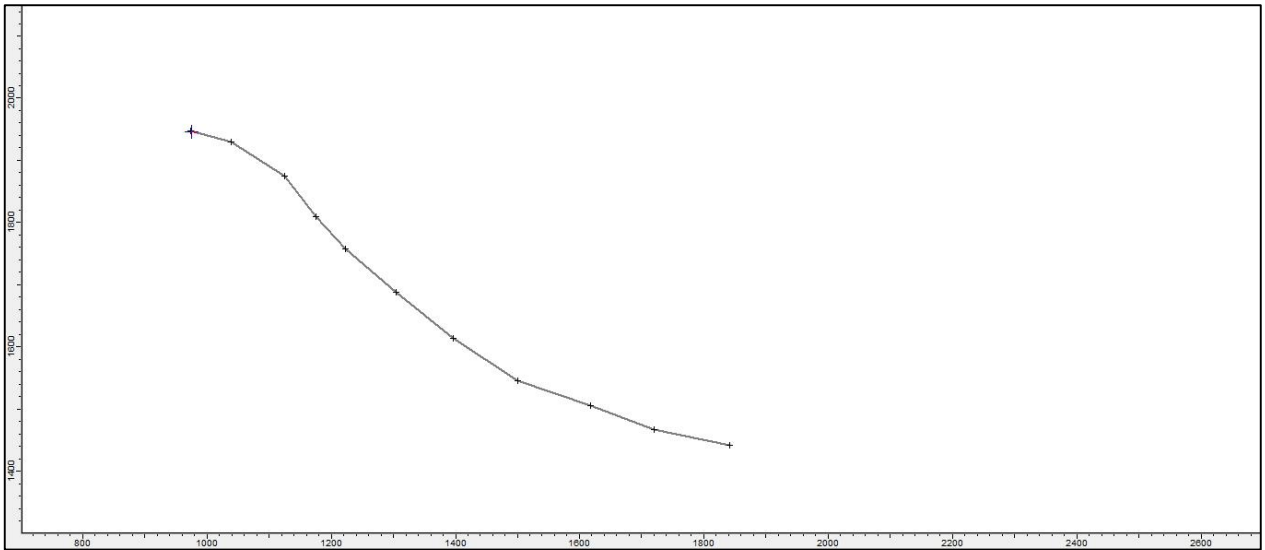


Figura 3.65 Unidad 77

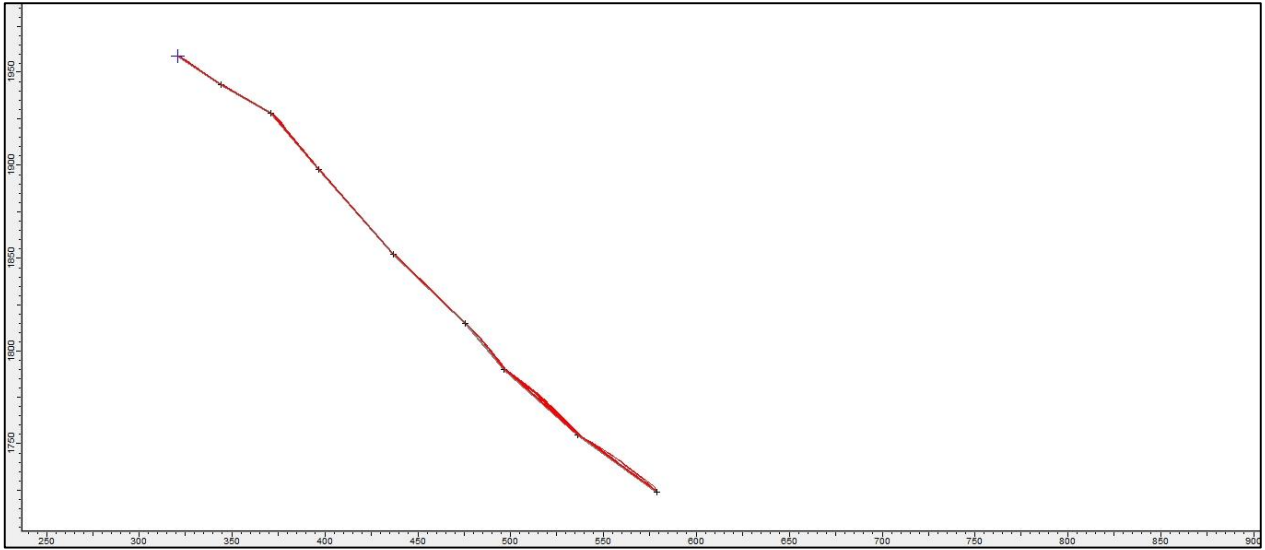


Figura 3.66 Unidad 80

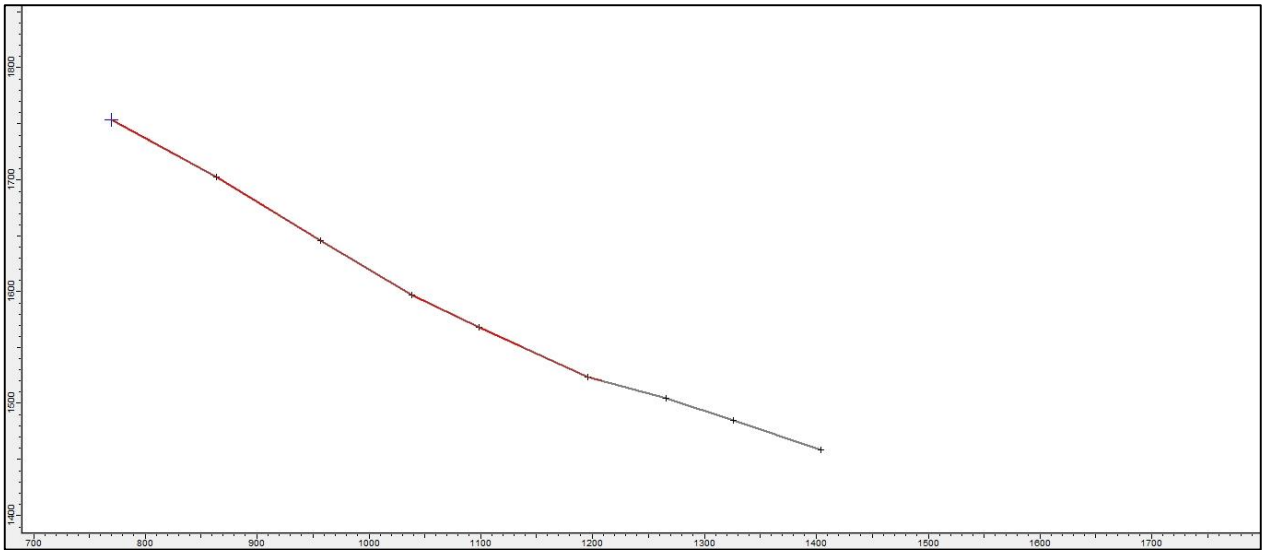


Figura 3.67 Unidad 81

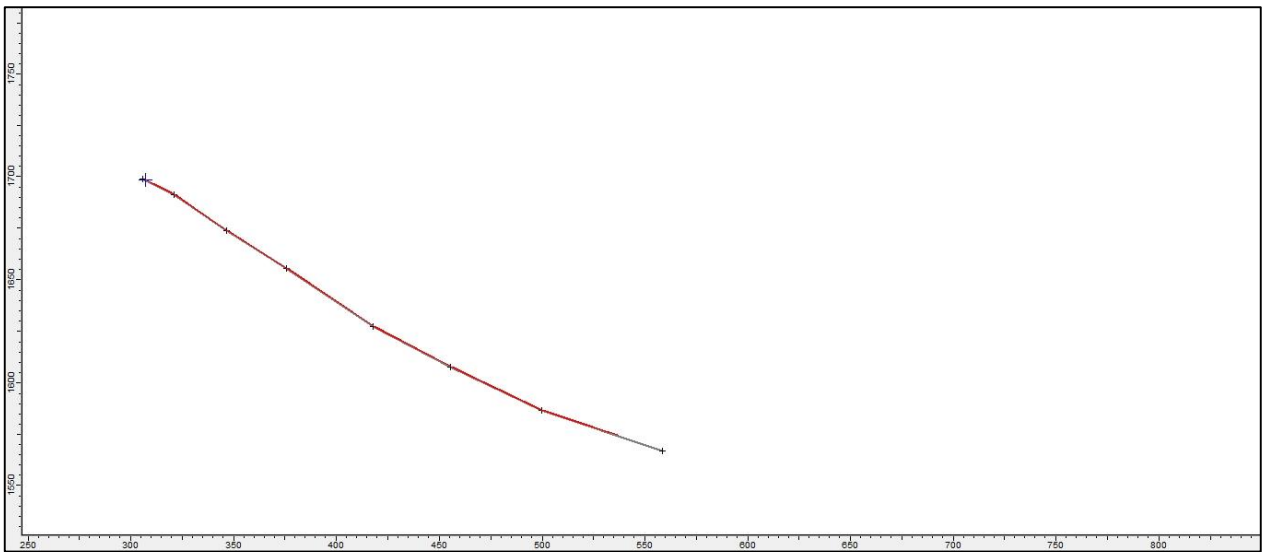


Figura 3.68 Unidad 82

4 Mapas peligro de remociones en masa.

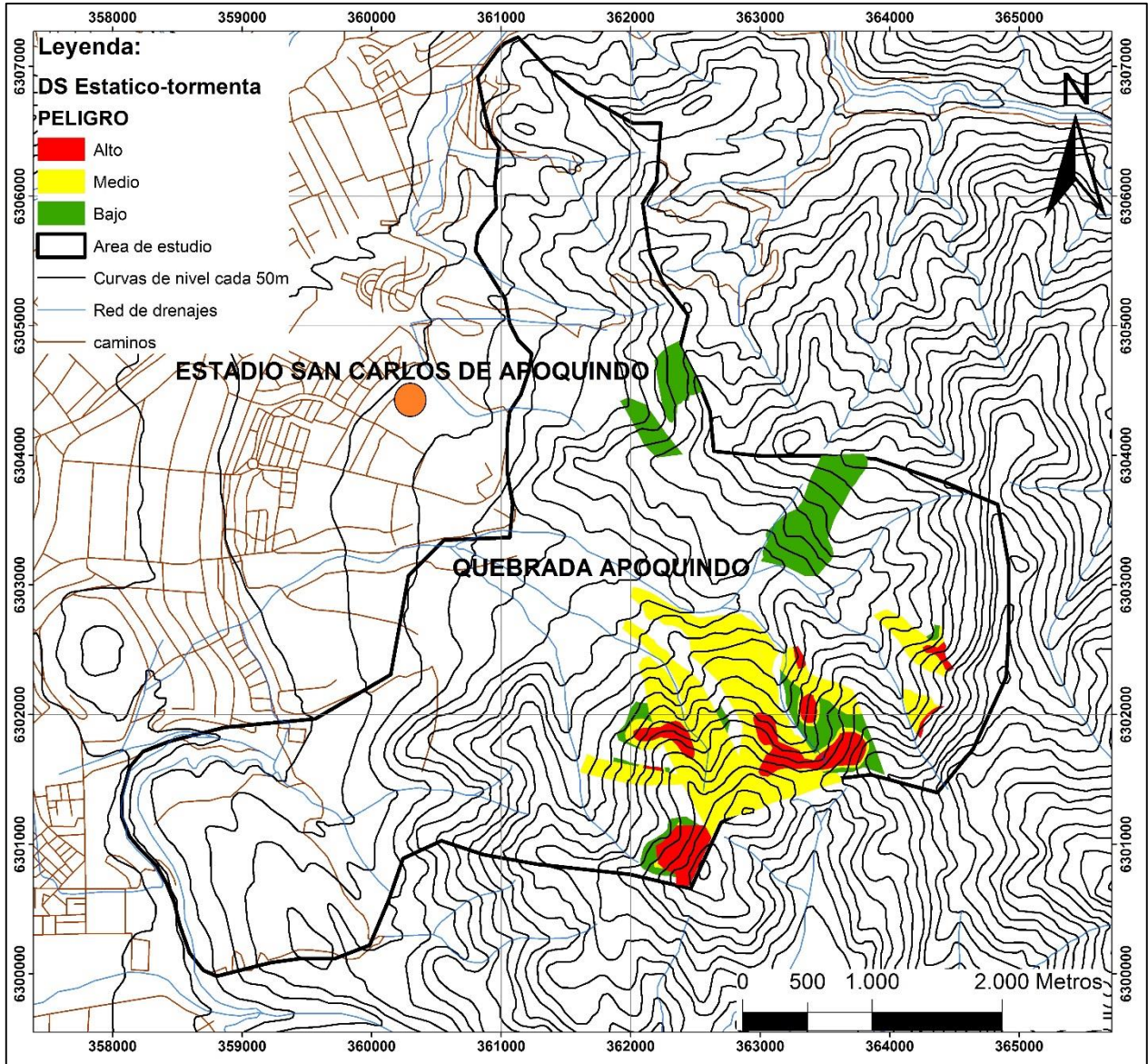


Figura 4.1 Mapa de peligro deslizamiento superficial de suelo, Quebrada de Apoquindo. Escenario estático-tormenta. Escala 1:20.000.

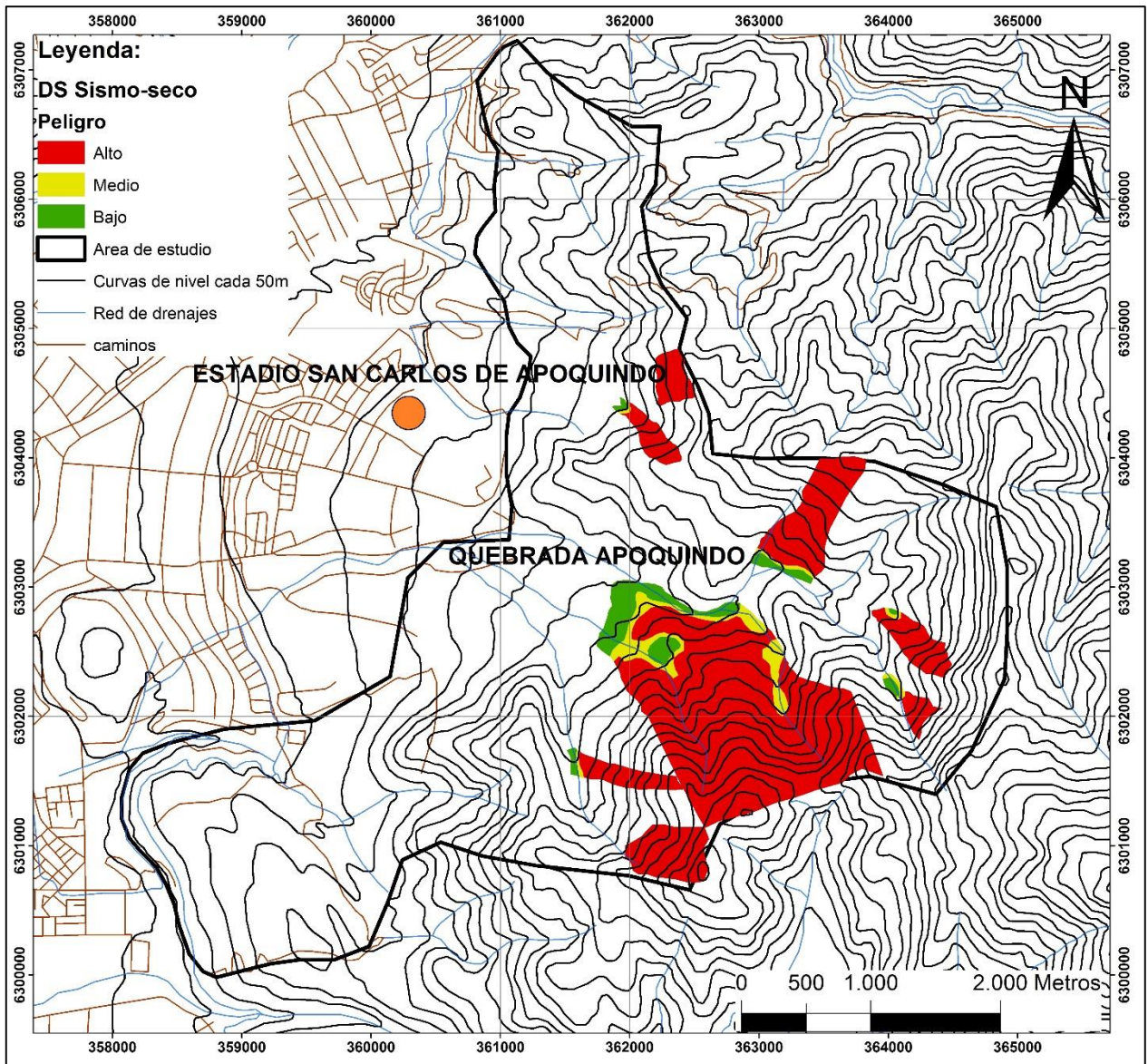


Figura 4.2 Mapa de peligro deslizamiento superficial de suelo, Quebrada de Apoquindo. Escenario sismo-seco. Escala 1:20.000.

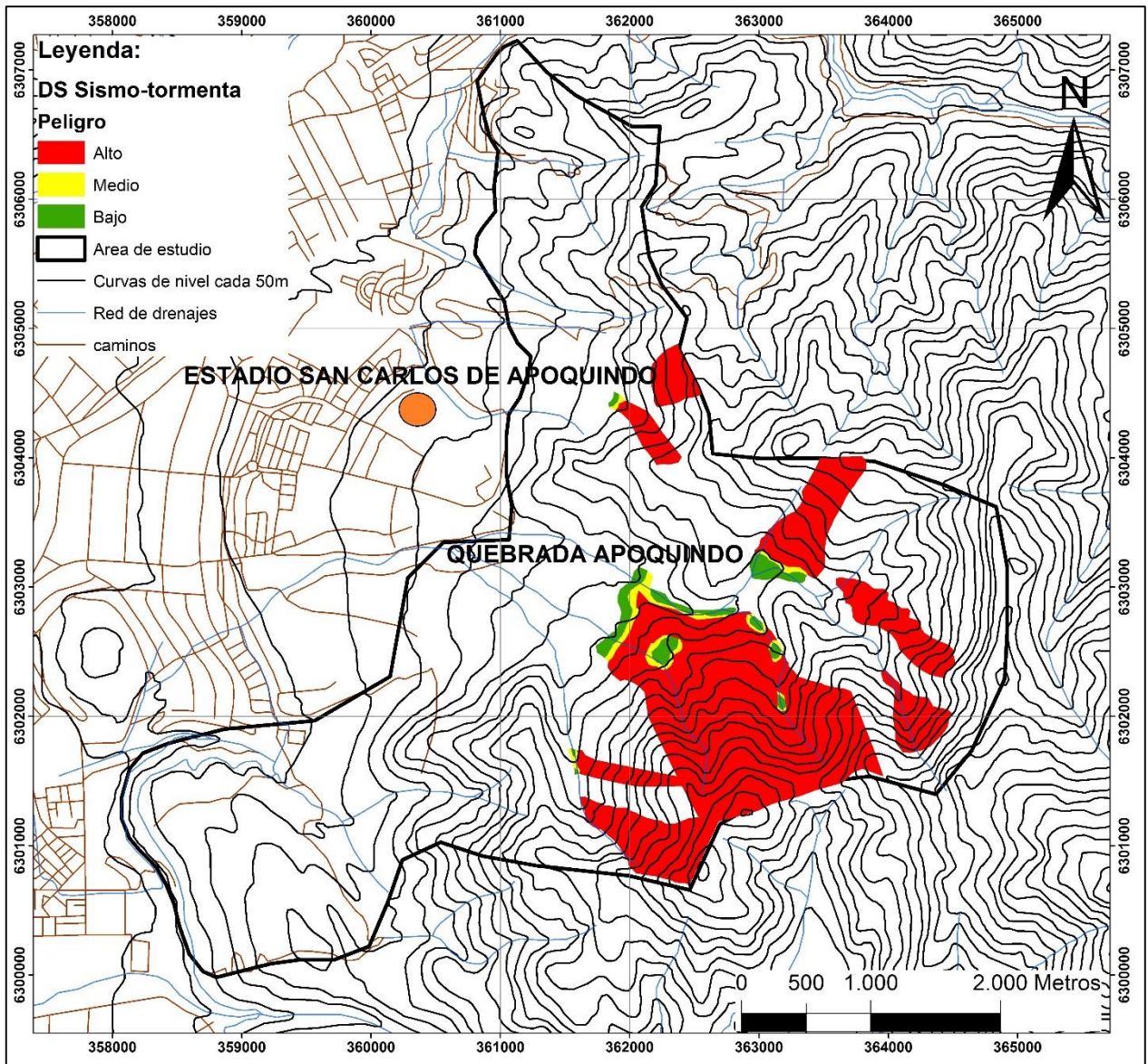


Figura 4.3 Mapa de peligro deslizamiento superficial de suelo, Quebrada de Apoquindo. Escenario sismo-tormenta. Escala 1:20.000.

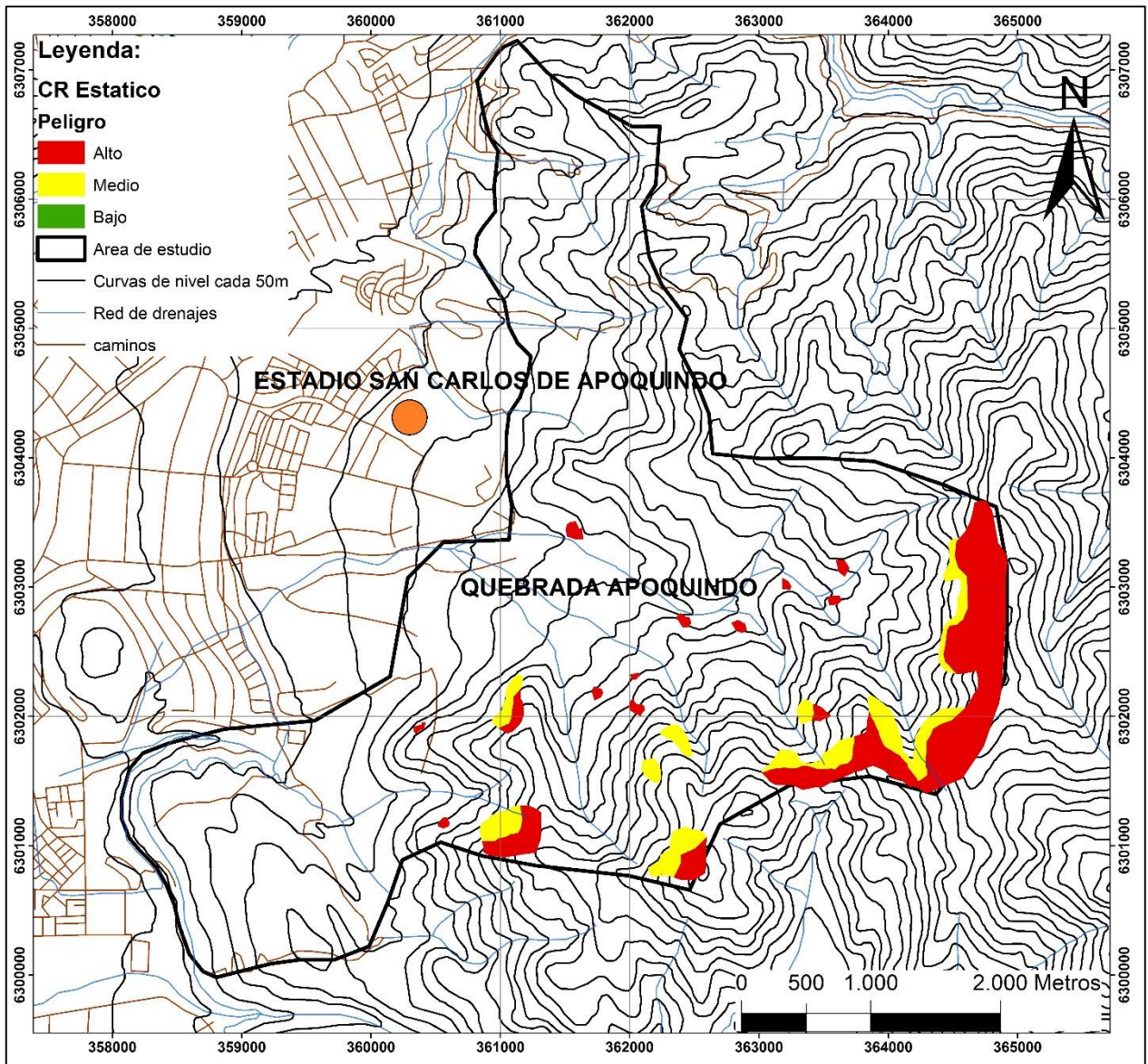


Figura 4.4 Mapa de peligro caída de rocas y deslizamiento en bloque de rocas, Quebrada de Apoquindo. Escenario estático. Escala 1:20.000.

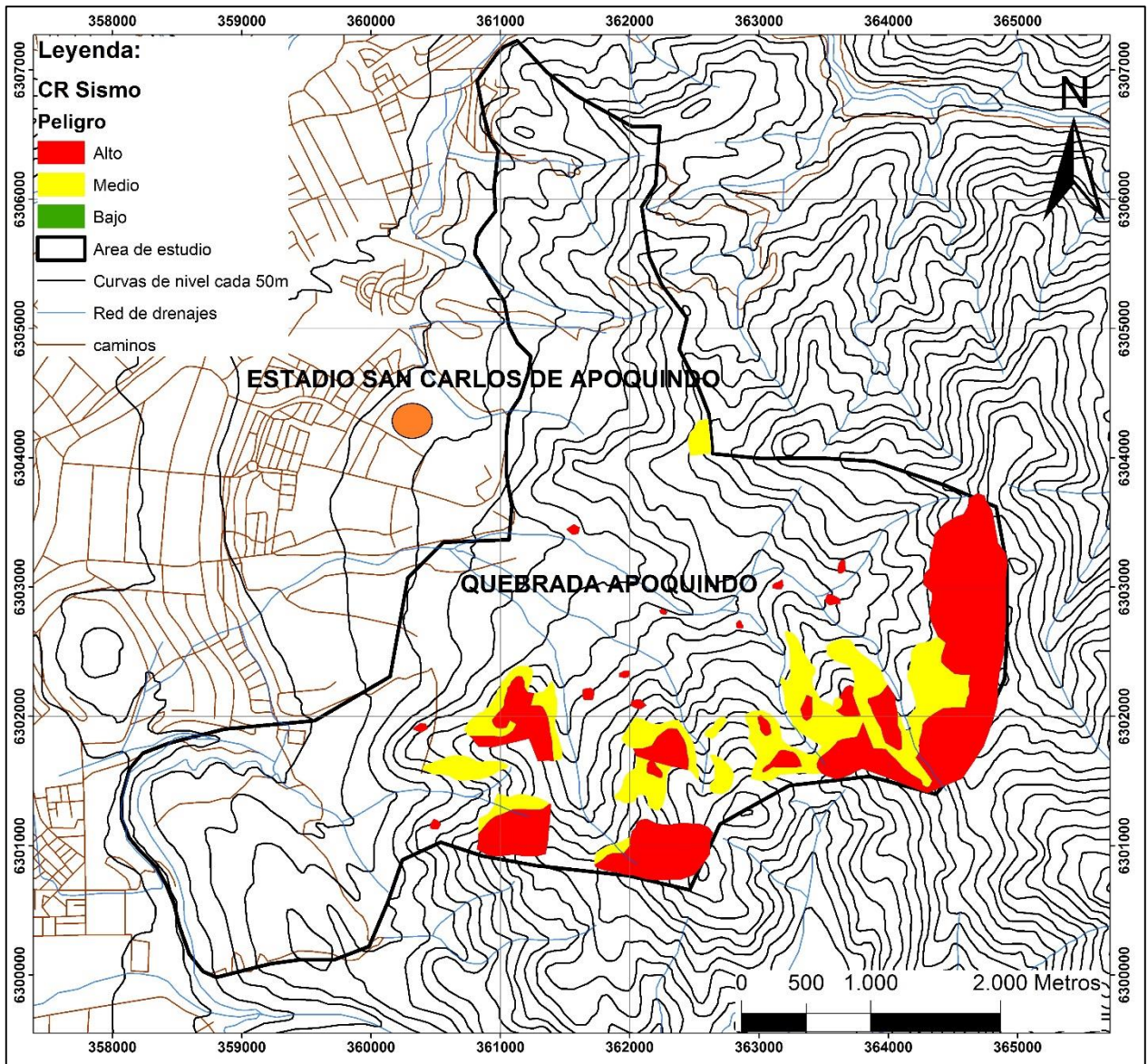


Figura 4.5 Mapa de peligro caídas de roca y deslizamiento en bloque de rocas, Quebrada de Apoquindo. Escenario sísmico. Escala 1:20.000.

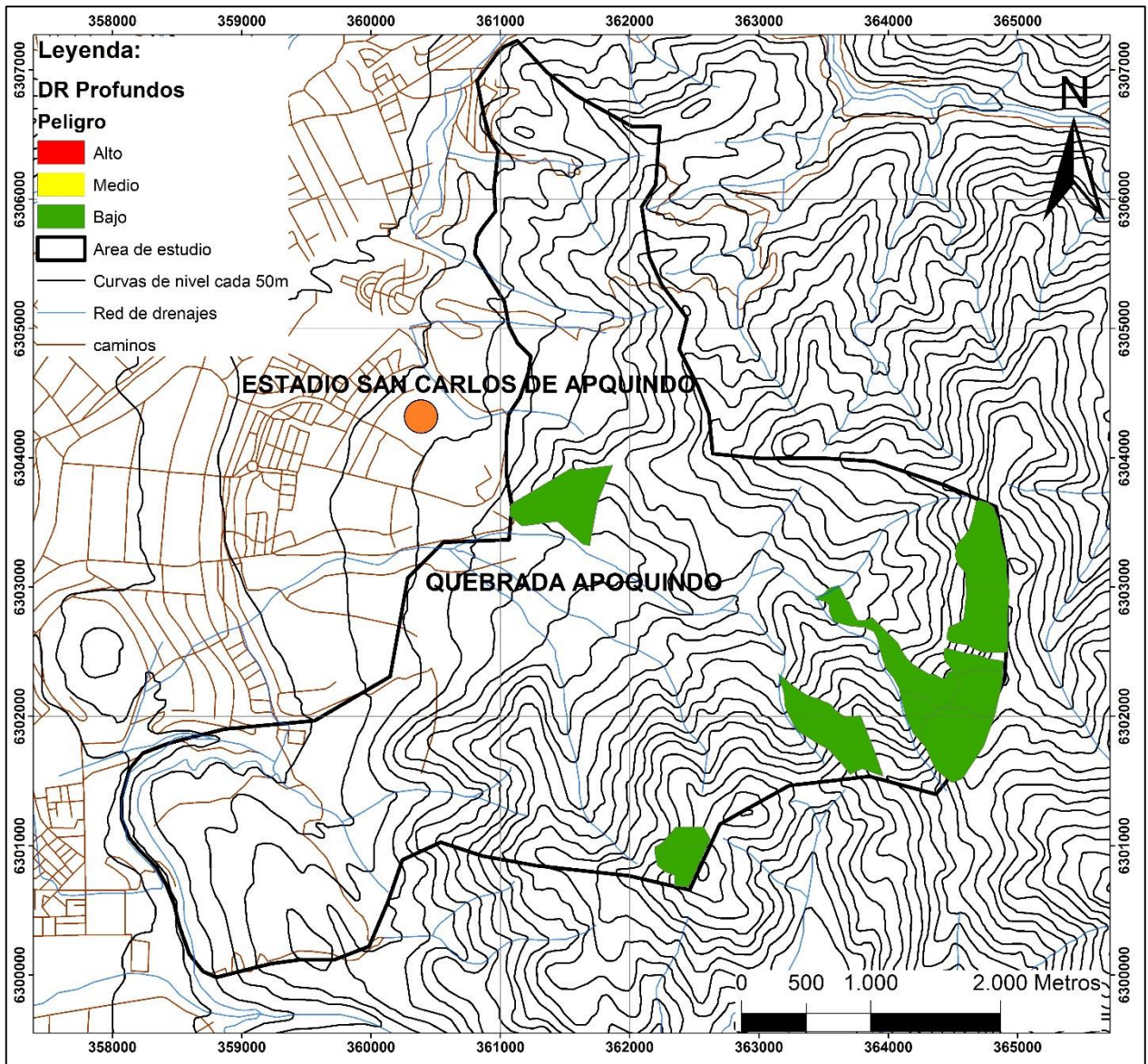


Figura 4.6 Mapa de peligro deslizamiento de roca rotacional profundos, Quebrada de Apoquindo. Escenario estático-tormenta y sísmico-seco. Escala 1:20.000.

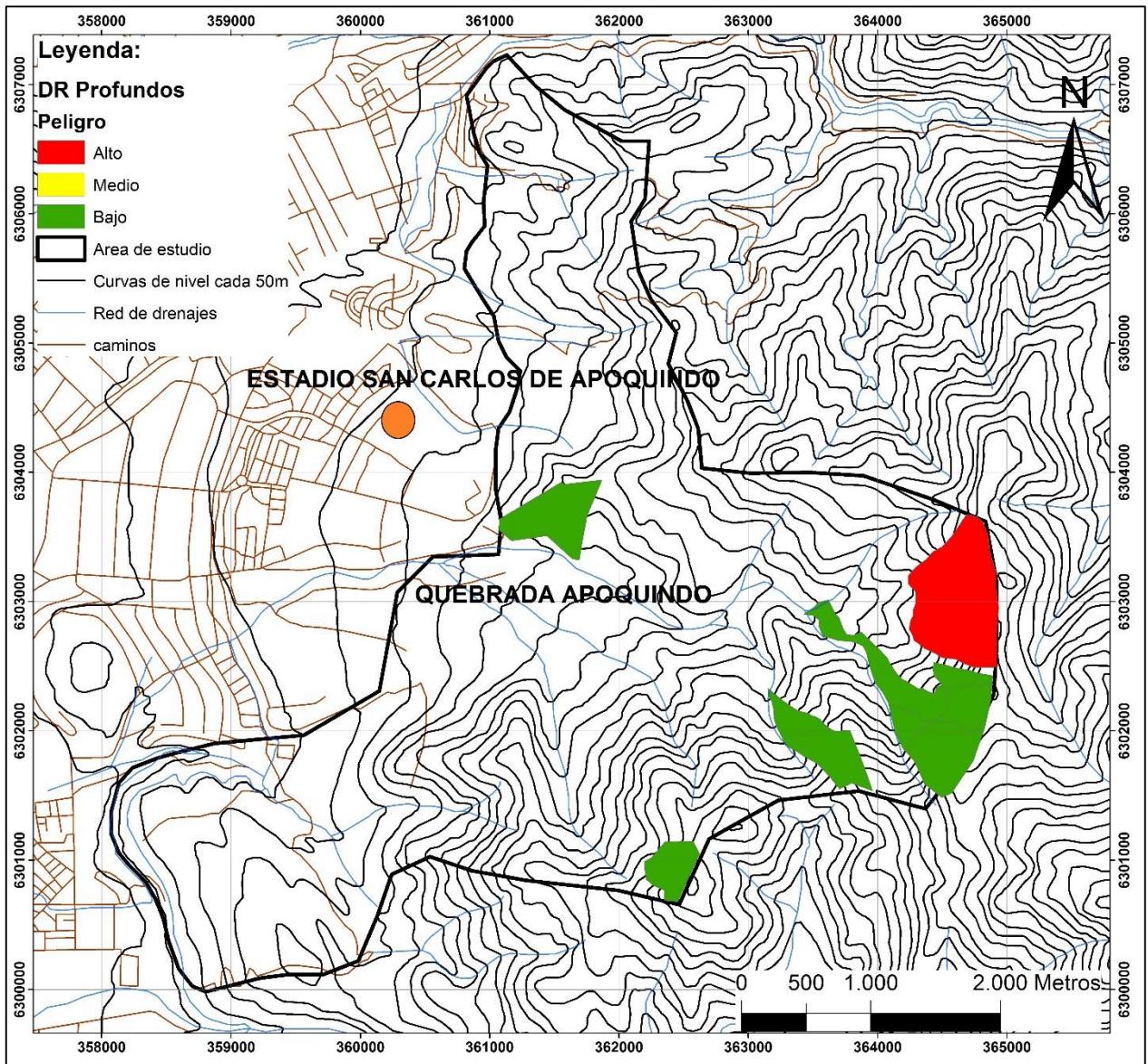


Figura 4.7 Mapa de peligro deslizamiento de rocas rotacional profundos, Quebrada de Apoquindo. Escenario sísmico-tormentas. Escala 1:20.000.

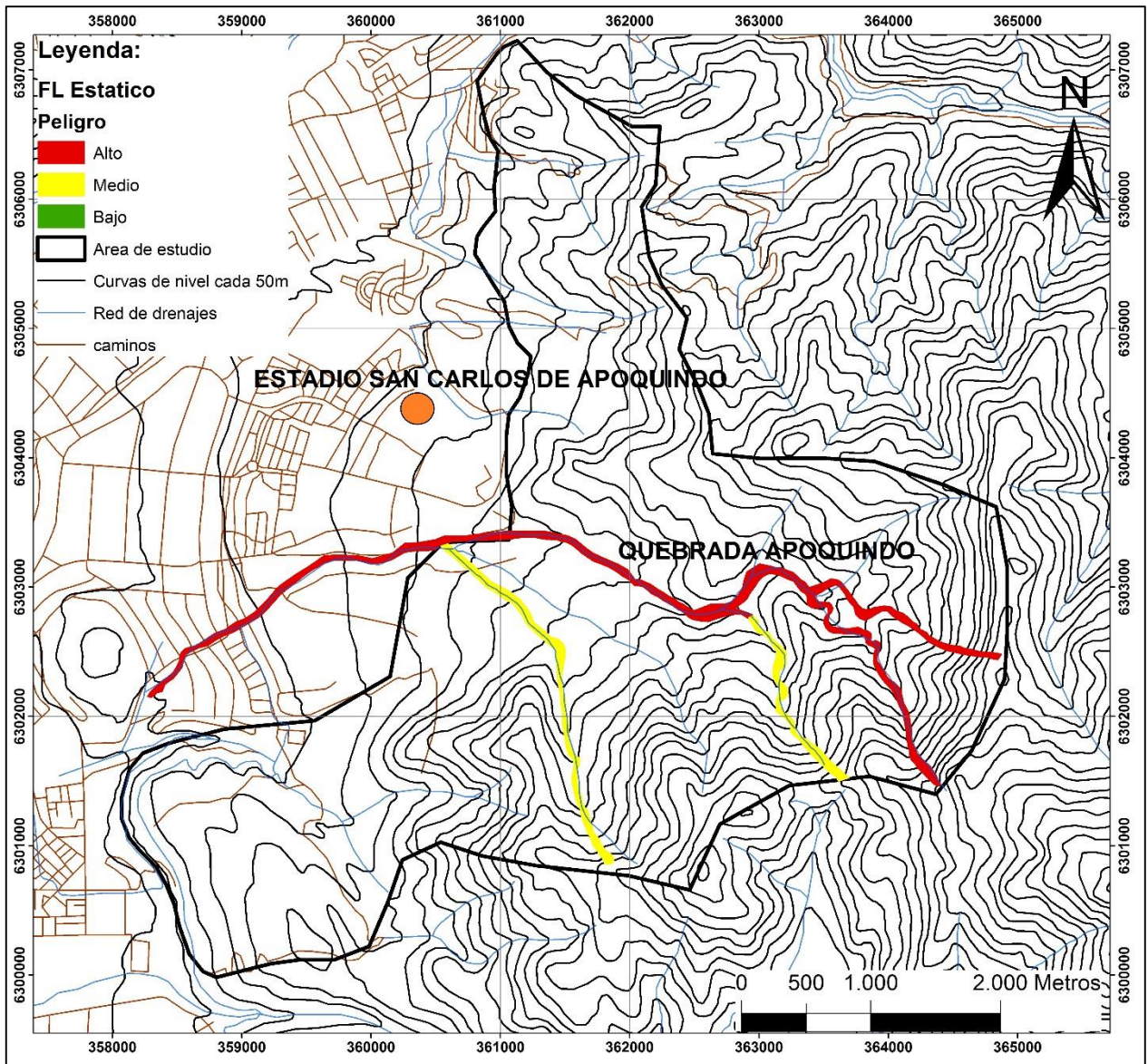


Figura 4.8 Mapa de peligro flujos de detritos, Quebrada de Apoquindo. Escenario estático-tormenta. Escala 1:20.000.

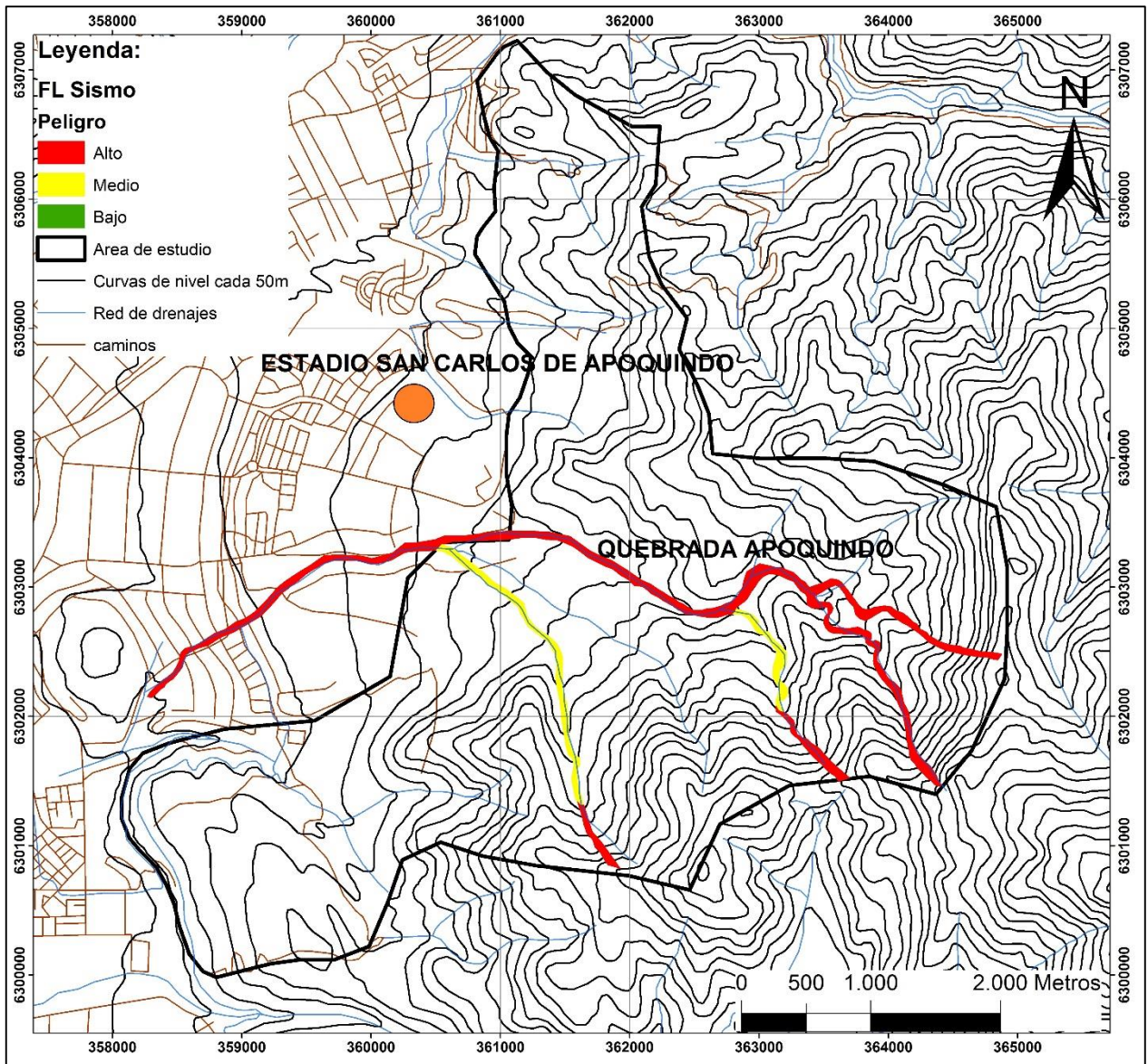


Figura 4.9 Mapa de peligro flujos de detritos, Quebrada de Apoquindo. Escenario sísmico-tormenta. Escala 1:20.000.