



**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN OBRAS CIVILES**

“Estudio de deformaciones de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante modelos numéricos: Caso de estudio Cerro Maule, Comuna de Puerto Saavedra.”

CÉSAR JOAQUÍN ENRIQUE SALAZAR MARTÍNEZ

2019



**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN OBRAS CIVILES**

“Estudio de deformaciones de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante modelos numéricos: Caso de estudio Cerro Maule, Comuna de Puerto Saavedra.”

**TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

**Profesor Guía : Ivo Fustos Toribio
Profesor Co-guía : Mauricio Hermosilla Sotomayor**

CÉSAR JOAQUÍN ENRIQUE SALAZAR MARTÍNEZ

2019

**ESTUDIO DE DEFORMACIONES DE LADERAS ASOCIADAS A EVENTOS
HIDROMETEOROLÓGICOS MEDIANTE MODELOS NUMÉRICOS: CASO DE
ESTUDIO CERRO MAULE, COMUNA DE PUERTO SAAVEDRA.**

CÉSAR JOAQUÍN ENRIQUE SALAZAR MARTÍNEZ

IVO FUSTOS TORIBIO
Profesor Guía

MAURICIO HERMOSILLA SOTOMAYOR
Profesor Co-guía

PABLO MORENO YAEGER
Académico Evaluador

MARCELO SOMOS VALENZUELA
Académico Evaluador

**Calificación trabajo escrito :
Calificación examen :
Calificación final :**

“Dedicado a mi familia y a mi gran amor Constanza”

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer el apoyo financiero durante las campañas en terreno del proyecto Fondecyt 11180500 en el cual está enmarcada la presente tesis.

A mi profesor guía Ivo Fustos Toribio, por su buena disposición ante cualquier inquietud por muy pequeña que fuese, por su paciencia, confianza y buena onda que siempre entregó y que fue clave para que este proyecto se pudiera desarrollar de la mejor manera posible.

Al profesor Mauricio Hermosilla, mi profesor Co-guía durante este trabajo, muchas gracias por sus consejos, recomendaciones y buena disposición para resolver dudas que permitieron enfocar bien este trabajo.

Al equipo del laboratorio de mecánica de suelos del departamento de Obras Civiles, Wilson y don Teo, que siempre con buena disposición y estuvieron dispuestos a enseñar y resolver dudas para poder realizar los ensayos.

Agradezco el apoyo de MIDAS por facilitarme el acceso a GTS-NX, en especial al Mauro Rangel impulsor de las gestiones y a Lucero Cruz por su apoyo en la modelación numérica, programas académicos como este, permiten el acceso a herramientas de gran potencial.

A mis amigos durante este todo el proceso universitario, quienes han sido un apoyo fundamental en todo momento, esta etapa en la universidad no hubiese sido lo mismo sin ellos.

A mi novia Constanza, quien ha sido un pilar fundamental en todo este proceso, siempre con una palabra de apoyo y alguna locura que hacía romper mi esquema y sacarme una sonrisa, gracias por tu amor y comprensión, gracias por cuidarme siempre he impulsarme a cumplir mis metas, Te amo.

Finalmente, agradecer a mi familia por el apoyo incondicional durante toda mi vida, en especial a mis padres, por todo el esfuerzo que han hecho para que junto con mis hermanos podamos salir adelante y ser mejores personas. Espero algún día poder retribuirles todo lo que me han entregado.

RESUMEN

El proyecto de título presenta un estudio de la zona Cerro Maule, ubicada en la comuna de Puerto Saavedra donde se han producido numerosas remociones en masa en el borde costero. Debido a esto se realizó un análisis detallado de la zona enfocándose en los aspectos fundamentales de la Ingeniería Civil con énfasis en la geotecnia y la modelación numérica, teniendo como objetivo comprender el efecto de los agentes hidrometeorológicos asociado a las precipitaciones en las deformaciones de laderas, integrando las propiedades geomecánicas de la zona.

Para llevar a cabo lo propuesto se realizó una caracterización geotécnica de la zona a través de exploraciones en terreno, extracción de muestras que fueron ensayadas en laboratorio y revisión de antecedentes bibliográficos. Junto con esto, se llevó a cabo un levantamiento topográfico para generar un modelo digital de elevación lo que sumado a un análisis de datos de la estación meteorológica de Puerto Saavedra permitieron obtener todos los parámetros de entrada para la implementación de un modelo de elementos finitos que se utilizó para cuantificar valores de deformación asociado a distintos eventos de precipitación.

En relación con esto, los principales resultados de esta investigación señalan que los eventos de precipitación prolongados, pero de menor intensidad tienen un mayor efecto en las deformaciones, debido a las condiciones geotécnicas de la zona, en donde la permeabilidad juega un rol fundamental favoreciendo la escorrentía superficial ante eventos de gran intensidad y corta duración. Respecto a esto, los resultados sugieren que las precipitaciones producen una reactivación de la ladera propiciando los procesos de remoción en masa. De acuerdo con esto, a partir del modelo numérico se evidenciaron pequeñas deformaciones sobre una falla encontrada en terreno, las que finalmente podrían llevar al colapso por acumulación de esfuerzos causando caídas repentinas de material, tal y como se ha registrado en la zona.

De esta manera, este proyecto de título ha logrado ser una contribución a la comprensión de estos fenómenos teniendo en cuenta los factores hidrometeorológicos como desencadenantes. Sin embargo, puede refinarse integrando metodologías referentes a suelos parcialmente saturados que puedan tener en cuenta la lluvia antecedente en la zona. Finalmente, este proyecto abre una nueva línea de trabajo dentro de la Ingeniería Civil para estudios geotécnicos asociados a procesos de remoción en masa en zonas costeras del Centro-Sur de Chile mediante un enfoque interdisciplinario.

Palabras clave: Elementos Finitos, Precipitación, Deformación, Modelación, Geotecnia.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Página
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Hipótesis de trabajo	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES GENERALES	4
2.1 Remociones en masa	4
2.1.1 Caída de rocas	4
2.1.2 Deslizamientos	5
2.1.3 Extensiones laterales	5
2.1.4 Volcamiento	6
2.2 Factores que afectan la estabilidad de laderas	7
2.2.1 Factores pasivos	7
2.2.2 Factores activos	8
2.3 Métodos de análisis numérico	9
2.3.1 Método de equilibrio limite (MEL)	9
2.3.2 Método de diferencias finitas (MDF)	10
2.3.3 Método de elementos finitos (MEF)	10
2.4 Precipitaciones y su efecto en las deformaciones de laderas	12
CAPÍTULO 3. ZONA DE ESTUDIO	17
3.1 Características generales	17
3.2 Características geomorfológicas	18
3.3 Características geológicas	19
3.4 Uso de suelos	21
3.5 Remociones en masa en la zona de estudio	21
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	23
4.1 Exploración geotécnica de la zona de estudio	23
4.2 Propiedades geomecánicas	24
4.3 Modelo topográfico	24
4.4 Eventos de precipitación	26
4.5 Método de elementos finitos para análisis de deformaciones	28
4.5.1 Generalidades	28
4.5.2 Discretización del dominio	29

4.5.3 Funciones de forma	30
4.5.4 Modelo constitutivo	31
4.5.5 Formulación del método de elementos finitos	34
4.6 Fenómeno de infiltración por precipitaciones	35
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	40
5.1 Exploración geotécnica	40
5.2 Parámetros geomecánicos	46
5.3 Modelo topográfico	47
5.4 Eventos de precipitación	48
5.5 Modelo numérico	50
5.5.1 Eventos de precipitación prolongada de baja intensidad	51
5.5.2 Eventos de precipitación intensa de corta duración	53
5.5.3 Eventos de baja precipitación	55
5.5.4 Comparación valores de deformación para los distintos eventos	57
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	58
6.1 Factor geotécnico.	58
6.2 Factor hidrometeorológico	60
6.3 Dinámica de los procesos de remoción en masa en la zona de estudio	62
6.4 Perspectivas a futuro y propuestas de mejora	64
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	65
7.1 Conclusiones	65
7.2 Recomendaciones	66
NOMENCLATURA	67
REFERENCIAS	68
ANEXOS	74
ANEXO A Descripción ensayos geotécnicos	74
A.1 Extracción de muestras	74
A.2 Ensayos geotécnicos	74
A.2.1 Clasificación de suelos	74
A.2.2 Corte directo	77
A.2.3 Determinación de la densidad.	82
ANEXO B: Análisis datos de precipitación	83
ANEXO C: Distribución de suelos derivados de cenizas volcánicas.	89
ANEXO D: Modelos de deformación	90
ANEXO E. Levantamiento topográfico	92

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 4.1. Detalles estación meteorológica utilizada. Elaboración propia.	27
Tabla 4.2. Parámetros del modelo de Mohr-Coulomb. Elaboración propia.	33
Tabla 5.1. Perfil Estratigráfico. Elaboración propia.	42
Tabla 5.2. Ubicación de extracción de muestras . Elaboración propia.	44
Tabla 5.3. Parámetros geomecánicos de la zona de estudio, obtenido a través de ensayos geotécnicos y estimaciones. Elaboración propia.	46
Tabla 5.4. Umbrales críticos en relación con los eventos de precipitación. Elaboración propia.	48
Tabla 5.5. Criterios establecidos para elegir los eventos de precipitación. Elaboración propia.	48
Tabla 5.6. Resultados deformación máxima para los eventos de precipitación de tipo estratiforme. Elaboración propia.	51
Tabla 5.7. Resultados deformación máxima para los eventos de precipitación de tipo convectiva. Elaboración propia.	53
Tabla 5.8. Resultados deformación máxima para los eventos de baja precipitación. Elaboración propia.	55
Tabla A.1. granulometría de las muestras 1 y 2. Elaboración propia.	75
Tabla A.2. Límites de consistencia y clasificación USCS de las muestras. Elaboración propia.	77
Tabla A.3. Propiedades físicas probetas muestra 1. Elaboración propia.	78
Tabla A.4. Parámetros geo mecánicos muestra 1. Elaboración propia.	78
Tabla A.5. Propiedades físicas probetas muestra 2. Elaboración propia.	80
Tabla-A.6. Parámetros geo mecánicos muestra 2. Elaboración propia.	80
Tabla A.7 Propiedades de las muestras ensayadas. Elaboración propia.	82
Tabla B.1. Tabla de frecuencia precipitación diaria de la estación meteorológica Puerto Saavedra. Elaboración propia.	83
Tabla B.2. Tabla de frecuencia en relación con la duración de cada evento. Elaboración propia	84
Tabla B.3. Tabla de frecuencia precipitación acumulada en cada evento. Elaboración propia.	85
Tabla E.1. Detalles puntos de control GPS. Elaboración propia	92

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1. Esquema de caída de rocas y diferentes mecanismos de movimiento de los bloques. Modificado de Movimiento en Masa Región Andina (GEMMA, 2007).	4
Figura 2.2. Esquema deslizamiento traslacional y rotacional. Modificado de Movimiento en Masa Región Andina (GEMMA, 2007).	5
Figura 2.3. Esquema de extensión lateral, según Varnes (1978). Modificado de Movimientos en Masa Región Andina (GEMMA, 2007).	6
Figura 2.4. Esquema de volcamientos. Modificado de Movimientos en Masa Región Andina (GEMMA, 2007).	6
Figura 2.5. Esquema de análisis por el método de Fellenius (Bojorque, 2011).	10
Figura 2.6: Efectos del agua en los procesos de remoción en masa. a) cuando no hay agua, la fricción entre las partículas de suelo en la pendiente se mantienen en su lugar. b) Cuando el suelo está saturado, los granos son separados y la fricción se reduce, permitiendo que el suelo se mueva pendiente abajo (Tarbuck y Lutgens, 2005).	13
Figura 2.7. Esquema de una ladera bajo precipitación (Aristizábal <i>et al.</i> , 2010).	14
Figura 2.8. Relación entre precipitaciones y deslizamientos en Hong Kong. (Brand, 1985).	16
Figura 3.1. Fotografía Cerro Maule desde la costa, obtenida a partir de vuelo en dron. Elaboración propia	19
Figura 3.2: Geología de la zona de estudio, extracto de (SERNAGEOMIN, 2003).	20
Figura 3.3. Remociones en masa en la zona de estudio. a) remoción en el sector playa maule año 2018. (www.biobiochile.cl); b) remoción en el camino del Cerro Maule año 2017. (www.redemergencia.cl); c) remoción en el sector de boca Budi. (www.emol.cl); d) remoción en el camino de Cerro Maule año 2019. Elaboración propia.	22
Figura 4.1. Ubicación puntos de control en la zona a mapear. Elaboración propia.	25
Figura 4.2: Ubicación de la estación meteorológica de Puerto Saavedra. Elaboración propia.	27
Figura 4.3. Elemento del tipo hexaedro de segundo orden. (MIDAS, 2019).	30
Figura 4.4: Elemento de tipo tetraedro de segundo orden. (MIDAS, 2019).	31
Figura 4.5: Relación esfuerzo-deformación según el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. (MIDAS, 2019).	32
Figura 4.6: Componentes fases del suelo. (Yoshimi y Osterberg, 1963).	36
Figura 4.7: Contenido volumétrico de agua versus presión de poros. (Ng y Shi, 1998).	37
Figura 4.8: Conductividad hidráulica versus presión de poros. (Ng y Shi, 1998).	38
Figura 5.1: Estratos Cerro Maule. Elaboración propia.	40
Figura 5.2. Discretización estimada de los estratos. Elaboración propia.	41
Figura 5.3: Ubicación de la falla y los puntos de extracción de muestras en la zona de estudio. Elaboración propia.	43
Figura 5.4: Falla en el borde del acantilado, con intrusiones arcilla con consistencia blanda y alto contenido de agua. Elaboración propia.	44
Figura 5.5. Fotografía muestra 1, ubicación: 38°49'01.7"S – 73°24'01.7". Elaboración propia.	45
Figura 5.6. Zona critica debido a las particularidades identificadas en ella. Elaboración propia.	45
Figura 5.7. Modelo digital de elevación, obtenido a través del procesamiento de imágenes obtenidas por dron. Elaboración propia.	47
Figura 5.8. Evento de precipitación prolongado de baja intensidad. Elaboración propia.	49
Figura 5.9. Evento de precipitación intenso de corta duración. Elaboración propia.	49
Figura 5.10. Evento de baja precipitación. Elaboración propia.	49
Figura 5.11. Discretización modelo de elementos finitos. Elaboración propia.	50
Figura 5.12. Modelo de deformación, evento de precipitación prolongada. Elaboración propia.	52

Figura 5.13. Modelo de deformación, evento intenso de corta duración. Elaboración propia.	54
Figura 5.14. Modelo de deformación, evento de baja precipitación. Elaboración propia.	56
Figura 5.15. Comparación entre deformación intensidad y precipitación acumulada. Elaboración propia.	57
Figura 6.1. Presión de poro en condiciones de precipitación. Elaboración propia.	59
Figura 6.2. Esquema básico infiltración. a) precipitación menor a la capacidad de infiltración. b) precipitación intensa mayor a la capacidad de infiltración, se produce escorrentía superficial (Schaetzel y Anderson, 2005).	61
Figura 6.3. Retroceso progresivo del Cerro Maule a través de los años (Google Earth). Elaboración propia.	63
Figura A.1. Fotografía muestra 1. Elaboración propia.	74
Figura A.2. Distribución granulométrica para las muestras 1 y 2. Elaboración propia	75
Figura A.3. Determinación del límite plástico. Elaboración propia.	76
Figura A.4. Determinación del límite líquido mediante la cuchara de Casagrande. Elaboración propia.	76
Figura A.5. Carta de plasticidad para la clasificación de suelos finos. Elaboración propia.	76
Figura A.6. Equipo de ensayo de corte directo utilizado. Elaboración propia.	77
Figura A.7. Variación del esfuerzo de corte con la deformación unitaria. Elaboración propia.	78
Figura A.8. Deformación vertical durante la aplicación del esfuerzo de corte. Elaboración propia.	79
Figura A.9. Envolvente de falla para determinar el Angulo de fricción y la cohesión. Elaboración propia.	79
Figura A.10. Variación del esfuerzo de corte con la deformación unitaria. Elaboración propia.	80
Figura A.11. Deformación vertical durante la aplicación del esfuerzo de corte. Elaboración propia.	81
Figura A.12. Envolvente de falla para determinar el Angulo de fricción y la cohesión. Elaboración propia.	81
Figura A.13. Muestras de suelo con parafina. Elaboración propia.	82
Figura A.14. Muestras de suelo sumergidas. Elaboración propia.	82
Figura C.1. Distribución de suelos derivados de materiales volcánicos zona centro-sur de Chile, sobre la base del mapa original de C.S. Wright 1965 (Suelos Volcánicos de Chile,1985).	89
Figura E.1. Toma de puntos de control en la zona de estudio utilizando el GPS de precisión Emild Reach RS. Elaboración propia.	92
Figura E.2. Plan de vuelo del dron Inspire II. Elaboración propia.	93

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Descripción del problema

Los procesos de remoción en masa provocados por efectos hidrometeorológicos están siendo cada vez más frecuentes en el mundo, causando graves daños a la población y su infraestructura, lo que dificulta el desarrollo económico de los países (Hidalgo *et al.*, 2017). El nivel de impacto que causan estos fenómenos varía considerablemente de acuerdo con las condiciones geológico-geotécnicas locales y la vulnerabilidad socioeconómica (Harp *et al.*, 2009). Se estima que el 14% de las pérdidas económicas y el 0.53% de las muertes por desastres causados por fenómenos naturales están relacionados con remociones en masa (Hidalgo y Vega, 2014). Por este motivo investigaciones relacionadas con estos procesos han sido tema de gran interés para la comunidad científica en el último tiempo.

En este ámbito, destacan estudios realizados en la zona centro sur de Chile por Fustos *et al.* (2018), donde se han observado movimientos a través de series temporales InSAR y productos de precipitación satelital. En estos estudios se aprecian deformación en las laderas, que se producen durante la temporada de lluvias o después de una precipitación intensa. Debido a esto se plantea que las deformaciones son provocadas por la variabilidad hidrológica estacional. En la región Andina Mergili *et al.* (2014) estudian las causas, las características y los impactos de los procesos de remoción en masa y sus resultados indican que, a pesar de la alta actividad sísmica en la zona, esta no tiene un papel predominante como factor desencadenante y son las precipitaciones las que tienen un mayor efecto en estos procesos.

Por otra parte, Sepúlveda y Petley (2015) han dejado en manifiesto la baja capacidad que hay en Sudamérica para entender estos fenómenos, a pesar de la frecuencia con la que estos se producen, principalmente debido al déficit de investigación que existe a nivel local. Esto ha sido expuesto en su estudio de remociones en masa provocados por precipitaciones, haciendo énfasis en que una mayor comprensión de estos en la región, podría reducir significativamente las pérdidas que estos ocasionan (Sepúlveda y Petley, 2015).

En relación con esto, en los ambientes costeros los procesos de remoción en masa han sido un problema importante desde la perspectiva de los peligros geológicos y geotécnicos (Sepúlveda *et al.*, 2011). Sin embargo, en las zonas costeras del centro sur de Chile los estudios de remociones se han centrado en los factores sísmicos como desencadenantes donde destacan estudios de Davis y Karzulovic (1963), Antinao y Gosse (2008), Bray y Frost (2010) y Mardones y Rojas (2012),

todos ellos relacionados a procesos ocurridos posterior a grandes terremotos, dejando como factor secundario el efecto de los eventos hidrometeorológicos como gatillantes.

Estos procesos, dependiendo del tipo de movimiento y sus factores asociados, pueden presentar etapas que duran horas, días e inclusive años (Zhou *et al.*, 2013). En consecuencia, son sistemas geomecánicos complejos de estudiar. En este ámbito numerosos softwares de ingeniería han contribuido a este tipo de estudios basándose en un planteamiento fisicomatemático del problema. Generalmente se utilizan métodos numéricos, siendo uno de los más utilizados el método de elementos finitos. Este método se ha utilizado ampliamente en la resolución de problemas de Ingeniería Geotécnica y en relación con los procesos de remoción en masa destacan los estudios de Savage *et al.* (2000), Crosta *et al.* (2003) y Moayedi *et al.* (2011).

Siguiendo esta línea, el proyecto de titulación estudiará el sector conocido como Cerro Maule ubicado en la comuna de Puerto Saavedra, Región de La Araucanía. Esta zona en los últimos años ha sufrido remociones en masa importantes de los que se han documentado procesos de dimensiones moderadas y deformaciones del tipo grietas (Páez y Jara, 2010). Estos eventos progresivos han afectado parte del camino del Cerro Maule que conecta el sector Boca Budi con Puerto Saavedra, el cual se mantiene cerrado desde 2015, mientras que los más reciente han afectado a la playa Maule en julio de 2018 y el restaurante Boca Budi en junio de 2019, ambos muy concurridos por turistas y habitantes del sector. Todo esto tiene un impacto directo en las actividades económicas de la zona, en las obras construidas por el hombre, la conectividad y el peligro asociado a la pérdida de vidas humanas. Teniendo en cuenta esto, se realizará un análisis detallado de la zona enfocándose en fundamentos de la Ingeniería Civil con énfasis en la geotecnia y la modelación numérica, con el objetivo de comprender el efecto que tienen las precipitaciones y las características geomecánicas de la zona en las remociones en masa que se han producido y de esta forma contribuir al entendimiento de estos fenómenos en las zonas costeras del centro sur de Chile.

1.2 Hipótesis de trabajo

Las características geomecánicas de la zona junto con aspectos hidrometeorológicos podrían estar controlando los procesos de remoción en masa en el sector del Cerro Maule.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Comprender el efecto de las precipitaciones en las deformaciones de las laderas ubicadas en el Cerro Maule integrando las propiedades geomecánicas de la zona.

1.3.2 Objetivos Específicos

- OE1: Recopilar antecedentes mediante campañas de exploración geotécnica para la extracción de muestras representativas.
- OE2: Determinar y estimar las propiedades geomecánicas de los materiales involucrados mediante bibliografía y ensayos geotécnicos debidamente normados.
- OE3: Obtener un modelo digital de elevación (MDE) representativo de la topografía de la zona de estudio.
- OE4: Cuantificar valores de deformación asociado a distintos eventos de precipitaciones.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES GENERALES

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1 Remociones en masa

Las remociones en masa son procesos de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o flujos, en distintas proporciones, generados por distintos factores (Varnes, 1978). Algunos movimientos en masa, como la reptación de suelos, son lentos, a veces imperceptibles y difusos, en tanto otros, pueden desarrollar velocidades altas y pueden definirse con límites determinados por la superficie de rotura (GEMMA, 2007). Las principales clasificaciones utilizan como parámetros el tipo de movimiento y el tipo de material transportado o el contenido de agua presente. De esta manera, existe una gran cantidad de procesos de remoción en masa, sin embargo, se enunciarán aquellas que son más relevantes.

2.1.1 Caída de rocas

La caída es un tipo de movimiento en el cual los bloques rocosos se sueltan y se deslizan pendiente abajo, sin que a lo largo de esta superficie ocurran desplazamientos cortantes apreciables. Una vez desprendido, el material cae desplazándose principalmente por el aire rodando y rebotando como se observa en la **Figura 2.1**. Durante la caída, el material puede adquirir grandes velocidades, abarcando una amplia área a los pies de la ladera, lo que se acrecienta si se suma una cantidad importante de material aportado (Varnes, 1978).

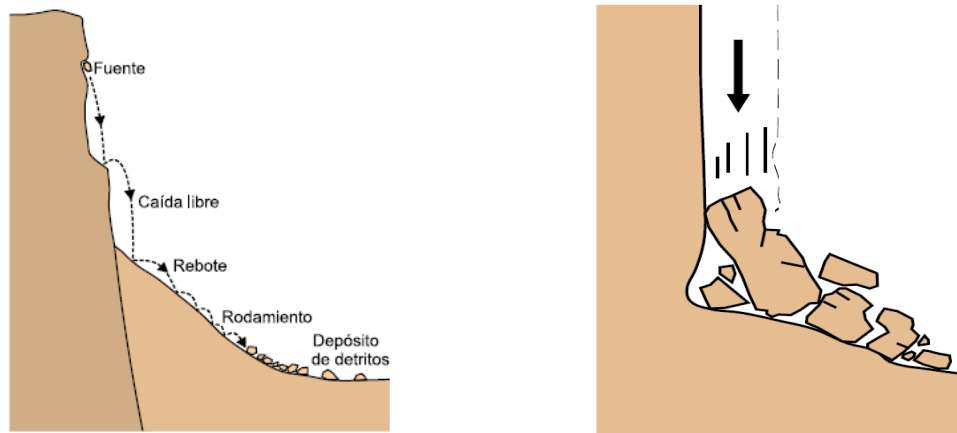


Figura 2.1. Esquema de caída de rocas y diferentes mecanismos de movimiento de los bloques. Modificado de Movimiento en Masa Región Andina (GEMMA, 2007).

2.1.2 Deslizamientos

Corresponde a un movimiento ladera debajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante. Según Varnes (1978) los movimientos más comunes que presentan los deslizamientos son, traslacionales y rotacionales.

Los movimientos traslacionales (**Figura 2.2 a.)** son un tipo de deslizamiento en donde la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada. En este tipo de movimiento el desplazamiento ocurre a lo largo de discontinuidades como fallas, diaclasas o planos de estratificación (Cruden y Varnes, 1996). Por otra parte, en los deslizamientos rotacionales (**Figura 2.2 b.)** la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla cóncava., la superficie de ruptura se puede desarrollar a lo largo de planos de plegamiento o por la intersección de varias discontinuidades (Hutchinson, 1988) y se generan principalmente en suelos con cohesión y roca intensamente meteorizada (Lara y Sepúlveda, 2008).

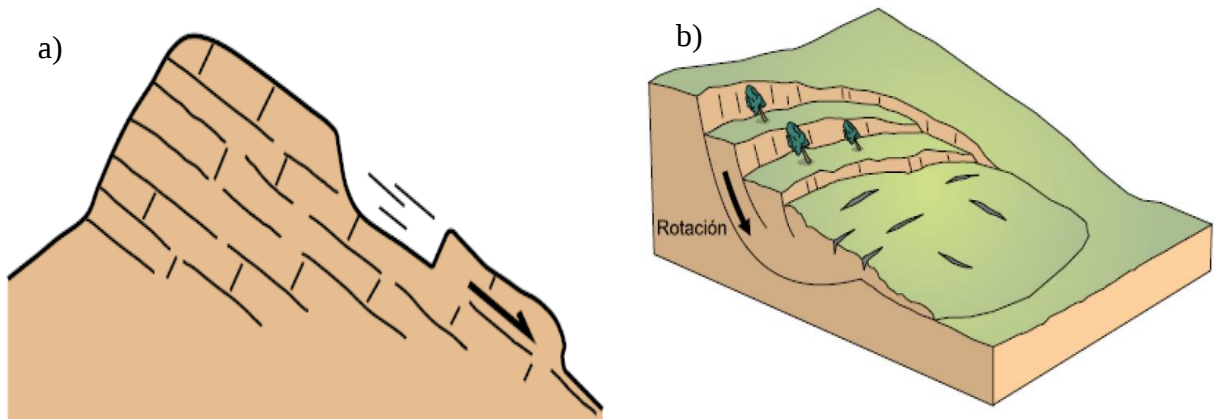


Figura 2.2. Esquema deslizamiento a) traslacional y b) rotacional. Modificado de Movimiento en Masa Región Andina (GEMMA, 2007).

2.1.3 Extensiones laterales

La extensión lateral o propagación es un tipo de movimiento en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna del material. Los bloques rocosos o las masas de suelo se mueven lentamente producto de la pérdida de resistencia del material subyacente. Las extensiones laterales se dan en laderas poco pronunciadas pudiendo ser muy extensos como se

observa en la **Figura 2.3**. En estos casos se observa influencia de extrusión lateral de arcillas blandas y húmedas, bajo el peso de masas de suelo superiores (Varnes, 1978).

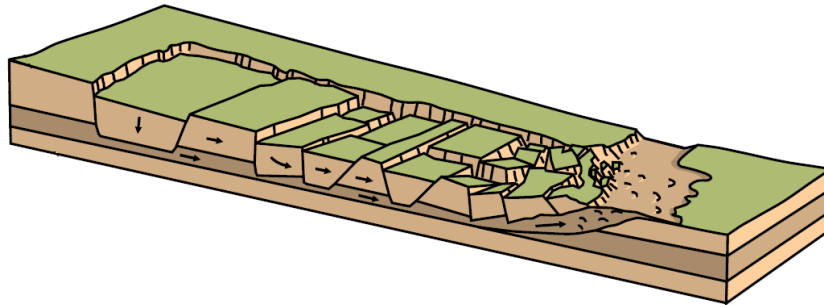


Figura 2.3. Esquema de extensión lateral, según Varnes (1978). Modificado de Movimientos en Masa Región Andina (GEMMA, 2007).

2.1.4 Volcamiento

Desprendimientos de uno o varios fragmentos de roca o suelo, donde existe una rotación hacia adelante alrededor de un punto en la parte inferior como se observa en la **Figura 2.4**. Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978). Lo que lo distingue de una caída es que en la superficie de ruptura se genera cizalle, característica que lo hace ser catalogado por autores como deslizamiento (Goodman, 1989).

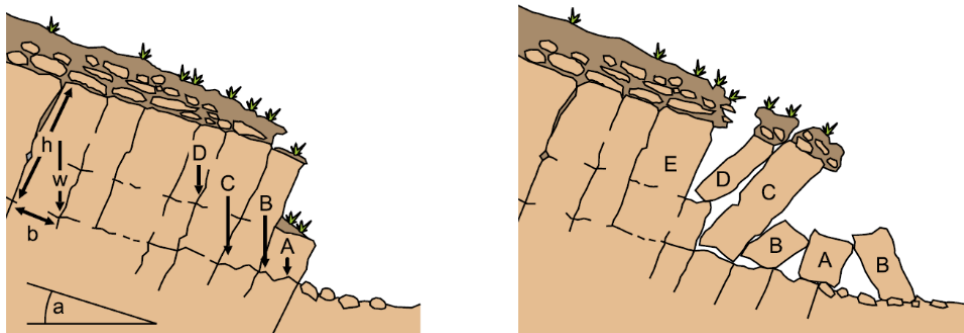


Figura 2.4. Esquema de volcamientos. Modificado de Movimientos en Masa Región Andina (GEMMA, 2007).

2.2 Factores que afectan la estabilidad de laderas

Los procesos de remoción en masa son generalmente complejos y están condicionados por una gran cantidad de factores que actúan entre ellos para definir un comportamiento (Hauser, 1993), estos factores se dividen en activos y pasivos.

2.2.1 Factores pasivos

Estos factores corresponden a aquellos que generan una situación potencialmente inestable y se refieren a las propiedades intrínsecas de los materiales naturales como lo son:

- **Geología y geotecnia:** Las características de los materiales presentes en una ladera como, composición, humedad, permeabilidad, densidad, etc. Son factores que pueden producir una inestabilidad en las laderas. El tipo de litología, las estructuras presentes, el grado de meteorización de las rocas y suelos, son factores que hacen variar la resistencia del macizo, condicionando el comportamiento mecánico de estos materiales al ser movilizados (Lara y Sepúlveda, 2008).
- **Hidrología e hidrogeología:** La red de drenaje, nivel freático y la infiltración, condicionan los procesos de remoción en masa ya que están directamente relacionados con la incorporación de agua en los suelos o macizos rocosos lo que provoca una disminución en los esfuerzos resistentes, aumento en las presiones de poros e incremento en los esfuerzos de corte por el aumento de peso del terreno, estos factores además pueden variar de acuerdo a la topografía y a las condiciones de meteorización del suelo (Pathak y Nilsen, 2004).
- **Geomorfología:** Dentro de los rasgos más influyentes que condicionan los procesos de remoción en masa se encuentran, la topografía, pendientes, dirección de pendientes, altura de las laderas y su extensión, cambios en estas características pueden generar inestabilidad en las laderas, favoreciendo el desarrollo de deformaciones (Pospescu, 2002). Por otra parte, las condiciones geomorfológicas son esenciales para análisis de procesos de remoción en masa, ya que la geomorfología refleja los procesos que están ocurriendo sobre la ladera, así como también los que han ocurrido en el pasado (Aristizabal y Yokota, 2006).

2.2.2 Factores activos

En cuando a los factores activos, estos están asociados a factores externos que actúan sobre el suelo modificando sus características de equilibrio incrementando los esfuerzos o reduciendo la resistencia de los materiales involucrados (Wieczorek, 1996) . Entre los factores activos más comunes se encuentran:

- **Factores antrópicos:** Las actividades humanas tienen una gran influencia sobre el comportamiento de una ladera ya que induce cambios en el medio ambiente como el uso de las tierras, la práctica de la agricultura, la construcción de carreteras, entre otros factores que son determinantes en los procesos de remoción en masa (Lara y Sepúlveda, 2008).
- **Sismos:** La sismicidad es un fenómeno común en Chile y su efecto asociado a los procesos de remoción en masa tiene relación con el cambio temporal en el régimen de esfuerzos provocados por las aceleraciones propias del movimiento sísmico (Molina, 2016). Esto provoca aumento en los esfuerzos cortante, la disminución de la resistencia por aumento en las presiones de poros y la deformación, además en el caso de suelos granulares saturados, se puede producir fallas por licuación (González, 2002).
- **Factores hidrometeorológicos:** El clima y en particular las precipitaciones juegan un rol determinante en los procesos de remoción en masa los cuales se encuentran relacionados con su intensidad, duración y distribución (González, 2002). De esta forma, precipitaciones de poca intensidad en periodos prolongados de tiempo y precipitaciones de gran intensidad en periodos cortos de tiempo podrían desencadenar eventos de remociones en masa en zonas donde el escenario sea favorable para ello. En el desarrollo de esta investigación se estudiará las deformaciones de las estructuras de suelo asociadas a las precipitaciones, que tienen como resultado el aumento del contenido de humedad y en la presión de poros lo que finalmente conduce a una disminución de la resistencia al corte del suelo y al desarrollo de deformaciones (Garcia *et al.*, 2012).

2.3 Métodos de análisis numérico

Los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento fisicomatemático, en el que intervienen las fuerzas resistentes (factores pasivos) y las fuerzas actuantes (factores activos), los cuales determinan el comportamiento y condiciones de estabilidad de una ladera (Lara y Sepúlveda, 2008). La génesis de estos métodos consiste en seleccionar las ecuaciones constitutivas adecuadas en función de los parámetros físicos conocidos que controlan el comportamiento de los materiales, para que a partir de estos se pueda definir un estado de estabilidad (Zuluaga, 2016).

Teniendo en cuenta esto, es necesario entender que la implementación de un modelo numérico supone una conceptualización de la ladera y de los mecanismos elementales que controlan la inestabilidad, que son representaciones idealizadas de cómo se moverá el material durante la carga (Hutchison, 1988). Para representar adecuadamente los movimientos que se producen en las pendientes en los modelos matemáticos es necesario incluir características esenciales como la geometría local y la estructura interna de la ladera incluyendo estratificación y discontinuidades, características geotécnicas relacionadas con las propiedades físicas e hidromecánicas del material y las variables de control asociadas a los factores desencadenantes (Van Asch *et al.*, 2007).

El grado en el que se capturen estas características de la zona, determinarán el enfoque de la modelación basado en la física que se utilizara (Van Asch *et al.*, 2007). En este ámbito existe una gran cantidad de metodologías para la modelación matemática que son esenciales para este tipo de análisis ya que en general los mecanismos de falla que se producen en los procesos de remoción en masa son complejos y difíciles de abordar. A continuación, se describen brevemente algunos de los métodos clásicos utilizados mayoritariamente.

2.3.1 Método de equilibrio límite (MEL)

Los métodos de equilibrio límite consideran la masa potencial de falla como un cuerpo libre y aplican ecuaciones de equilibrio global. Esta teoría ha sido implementada en el método del talud infinito (Taylor, 1948), el método de la cuña (Sherad y Col., 1963), el método ordinario (Fellenius, 1922), entre otros. La mayoría de estos métodos dividen la masa de suelo en un número finito de dovelas para luego plantear las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y/o momentos aplicadas a cada dovela (**Figura 2.5**), de esta forma es posible obtener un factor de seguridad, que es una relación entre las fuerzas resistentes y las solicitantes (Bojorque, 2011). Una de las limitaciones de este método es que no permite evaluar las condiciones de tensión en la ladera o talud, por lo tanto, no

es posible reproducir el rol fundamental de las deformaciones en los movimientos de ladera (Griffiths y Lane, 1999).

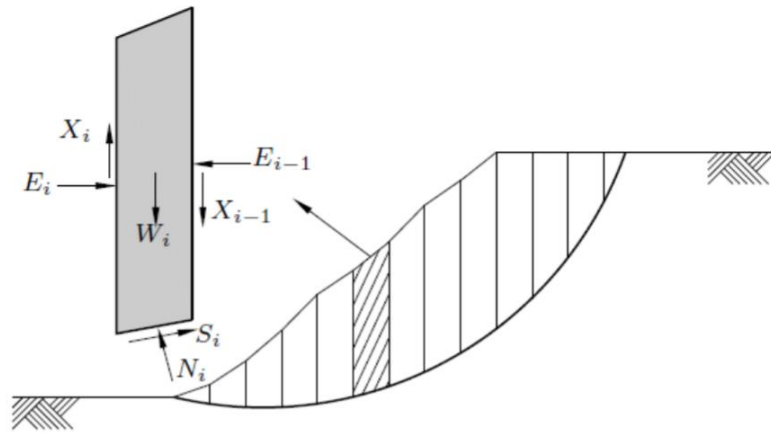


Figura 2.5. Esquema de análisis por el método de Fellenius (Bojorque, 2011).

2.3.2 Método de diferencias finitas (MDF)

En el método de diferencias finitas, los materiales son representados por zonas que forman una malla de acuerdo con la geometría, condicionadas por una relación esfuerzo-deformación. El método se basa en el esquema de cálculo de Lagrange, el cual permite modelar deformaciones de gran escala de los materiales (Alfaro, 2013). El esquema general del análisis se basa en el reequilibrio del sistema y el estudio de las condiciones de falla, el método transforma un conjunto de ecuaciones en ecuaciones de matrices para cada elemento, relacionando fuerza con desplazamientos en los nodos (Alfaro, 2013). Este método puede ser utilizado en análisis de esfuerzo-deformación, análisis de estabilidad de taludes, análisis de flujo de agua, consolidación, entre otros.

2.3.3 Método de elementos finitos (MEF)

El método de elementos finitos es un método numérico que permite obtener una solución de ecuaciones diferenciales que definen un cuerpo, en términos generales lo que hace es dividir la masa de suelo en unidades discretas más pequeñas llamadas elementos, estos elementos se interconectan en sus bordes y nodos predefinidos (Cascini *et al.*, 2014). El método utilizado es la formulación de desplazamientos que presenta los resultados en forma de esfuerzos y

desplazamientos en los puntos nodales con una validez local (Smith *et al.*, 2013). La condición de falla que se obtiene es progresiva en donde todos los elementos fallan simultáneamente.

Los elementos finitos pueden ser usados para evaluar remociones con diversas posibilidades de falla, donde las propiedades de los suelos y condiciones de frontera se pueden suponer. Por otra parte, en los casos prácticos, existe una dificultad para definir la relación esfuerzo – deformación debido a lo complejo que es describir los suelos en estos términos, Sin embargo, este método es uno de los más versátiles para realizar análisis de deformaciones, el cual se profundizara en la sección 4.3.

A continuación, se presentan las principales ventajas y desventajas del método (Beer y Watson, 1992).

2.3.3.1 Ventajas

- Se puede considerar el comportamiento no lineal de los materiales en la totalidad del dominio analizado.
- Es posible modelar la secuencia de excavación incluyendo la instalación de refuerzos y sistemas de estructura de soporte.
- Los detalles estructurales de juntas o fisuras cercanas pueden modelarse utilizando una técnica de homogenización.
- Se puede introducir un comportamiento de los materiales con base en el tiempo.
- Se puede emplear una formulación convencional de deformaciones para la mayoría de las posibilidades de carga.
- Se han desarrollado formulaciones especiales para incluir el análisis del agua subterránea
- Existe mucha experiencia sobre el uso de estos modelos y los programas de software han sido actualizados teniendo en cuenta esas experiencias.

2.3.3.2 Desventajas

- Generalmente los sistemas de ecuaciones son muy grandes, por lo tanto, se requieren tiempos de cálculo prolongados y ordenadores con altas capacidades de memoria.
- La totalidad del volumen del dominio analizado tiene que discretizar el espacio.
- Algunos modelos requieren de algoritmos sofisticados de acuerdo con el tipo de material constitutivo utilizado.

- Algunos de los parámetros de entrada de los modelos constitutivos no se miden normalmente (pruebas de laboratorio y/o de campo), por lo que se requiere el uso de correlaciones y valores típicos que se encuentran en la literatura.

2.4 Precipitaciones y su efecto en las deformaciones de laderas

El agua es uno de los factores más relevantes asociado a los procesos de remoción en masa, debido a que la mayoría de estos ocurren después de periodos de precipitación (Hidalgo *et al.*, 2017). En este sentido, el agua producto de las precipitaciones ejerce presiones de poro sobre las partículas de suelo, lo cual disminuye la tensión efectiva y, en consecuencia, la resistencia al corte de la ladera. Esto en base al principio de tensiones efectivas, formulado por Karl Terzagui (1920) en donde se afirma que el comportamiento del suelo está gobernado por tensiones efectivas y no por totales.

Otro aspecto importante a tener en cuenta, son las discontinuidades o fallas en el terreno, estas pueden actuar como conductores de agua y activadores de las presiones de poro (Lara y Sepúlveda, 2008), además el agua al hacerse presente dentro de una junta provoca la meteorización de las paredes conjuntas, debilitándolas y permitiendo que se depositen materiales blandos dentro de esta, lo que puede activar procesos de remoción en masa (Suarez, 2009).

Entre los diversos factores que afectan el comportamiento de laderas relacionados con la presencia de agua, se pueden identificar por ejemplo, la lubricación, que ocurre principalmente a lo largo de fracturas o planos de estratificación en rocas o suelos estratificados (Wu, 2003), este efecto reduce la resistencia a lo largo de discontinuidades, en suelos arcillosos y se debe a que la presencia de agua produce una repulsión entre las partículas. Otro efecto importante es el aumento en el peso del suelo provocado por la saturación del material y los efectos de la erosión producto de la escorrentía superficial, que provoca desprendimiento o arrastre depósito de las partículas de suelo por acción del agua, modificando el relieve y los esfuerzos que puede producir la activación de un deslizamiento.

En cuanto al mecanismo de generación inducido por el efecto de la lluvia, este generalmente se encuentra determinado por la saturación y aumento del nivel freático. El agua infiltrada desestabiliza el talud ya que aumenta las presiones de poro y sube el nivel freático lo que disminuye la resistencia al corte del suelo, esto dependerá de la intensidad y duración de las precipitaciones y de la permeabilidad de los materiales en la **Figura 2.6** se presenta un esquema de los efectos del

agua en los procesos gravitacionales), en este ámbito, estudios realizados por Rahardjo *et al.* (2007) proponen que las propiedades del suelo y la intensidad de las precipitaciones son los principales factores condicionantes de procesos de remoción en masa, mientras que la ubicación inicial del nivel freático y la geometría desempeñan un papel secundario.

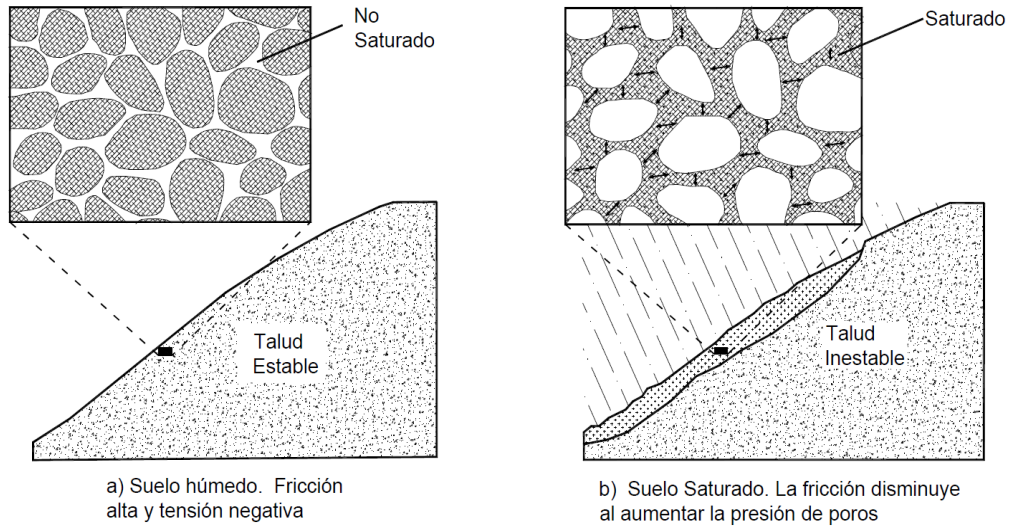


Figura 2.6: Efectos del agua en los procesos de remoción en masa. a) cuando no hay agua, la fricción entre las partículas de suelo en la pendiente se mantienen en su lugar. b) Cuando el suelo está saturado, los granos son separados y la fricción se reduce, permitiendo que el suelo se mueva pendiente abajo (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Todos estos factores asociados a las propiedades del suelo y a las precipitaciones generan cambios en el comportamiento de una ladera relacionado con el contenido de agua, el grado de saturación, la permeabilidad, la densidad (Wang y Huang, 2006); la disminución de la cohesión efectiva, aumento en la presión de poros y el desarrollo de deformaciones y desplazamientos (Qi y Huang, 2004). Por lo tanto, la disminución de las fuerzas resistentes (cohesión y la succión mátrica) y el aumento de las fuerzas actuantes (presión de poros y la densidad de una ladera) durante la infiltración por precipitaciones pueden causar una disminución de la estabilidad y aumento en las deformaciones. En la **Figura 2.7** se presenta un esquema de los principales factores mencionados anteriormente con relación a los efectos de una ladera frente a las precipitaciones (P) y las variables hidrológicas - geotécnicas que influyen en los procesos de remoción en masa: intensidad (I), contenido volumétrico de agua (θ), Presión de poros (ψ^+), succión (ψ^-), permeabilidad (k), peso del suelo (W), vegetación (V), infiltración (I_n), pendiente de la ladera (β), resistencia al corte (τ), profundidad (Z), espesor suelo saturado (h).

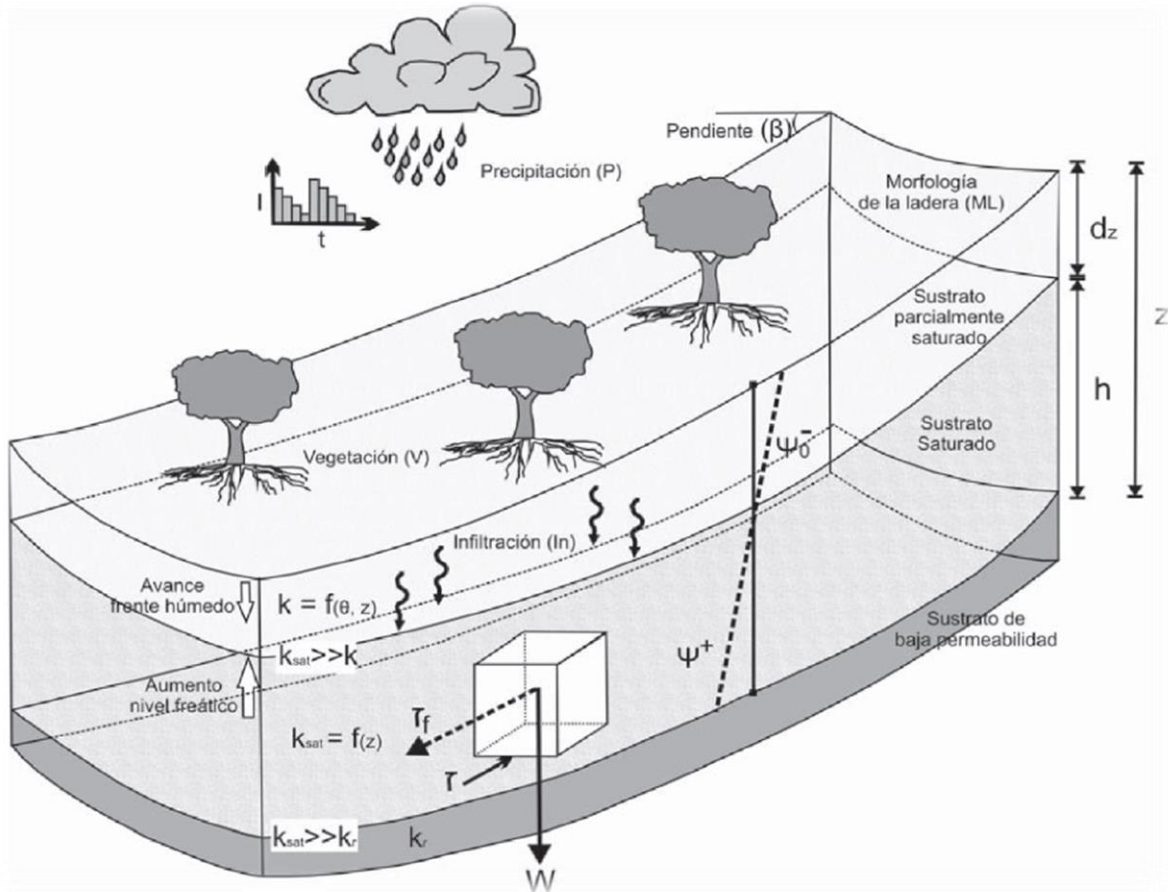


Figura 2.7. Esquema de una ladera bajo precipitación (Aristizábal *et al.*, 2010).

En relación con esto, es importante destacar que para que se produzcan estos cambios en el suelo el tiempo requerido es variable y como se mencionó anteriormente dependerá de la permeabilidad de los materiales. En los suelos con permeabilidad alta los cambios pueden ocurrir en pocos minutos, donde las presiones de poro pueden ascender de forma acelerada debido a una lluvia de gran intensidad. Por otra parte, en los suelos con permeabilidades bajas, los cambios son más lentos, aunque en ocasiones estas masas de suelo pueden tener una permeabilidad secundaria alta debido a la presencia de grietas, fisuras o lentes de materiales de diferente permeabilidad, estas variaciones en la permeabilidad muchas veces controlan la localización de la ocurrencia de remociones en masa, lo que explica de cierta forma el carácter aleatorio en la distribución de remociones sobre una misma ladera aparentemente homogénea (Reid, 1997).

Teniendo en cuenta esto, los eventos lluviosos se pueden clasificar en dos tipos, precipitaciones convectivas relacionadas a eventos de gran intensidad pero de corta duración (Bluestein, 1993), que afectan principalmente a suelos con alta permeabilidad (arenas y gravas) y precipitaciones estratiformes que corresponden a eventos de menor intensidad pero de mayor duración (Bluestein, 1993) en comparación con las convectivas y afectan principalmente a suelos de baja permeabilidad.

Cuando se consideran eventos de precipitación de gran intensidad y de corta duración, si la infiltración efectiva acumulada y la profundidad de infiltración son pequeñas, generalmente se pueden presentar remociones superficiales (Au, 1998), principalmente debido al incremento de la humedad del suelo y el incremento de la zona saturada provocado por la precipitación, las cuales generan una reducción de los esfuerzos resistivos por aumento en las presiones de poro (Fustos *et al.*, 2017).

Por otro lado, si la infiltración es suficiente para causar aumentos en el nivel freático se producirán remociones en masa profundas (Huang *et al.*, 2006). Además, se deben considerar otros factores que afectan a la estabilidad de laderas bajo el efecto de la infiltración por precipitaciones, como, por ejemplo: el nivel de agua subterránea, la vegetación, la profundidad de las capas impermeables, la cantidad de agua precedente y la anisotropía de la penetración del agua en el suelo.

En cuanto a los estudios relacionados a deformaciones de laderas provocadas por eventos hidrometeorológicos extremos, existe una gran cantidad de antecedentes aportados por distintos autores como Fustos *et al.* (2018); Aristazábal *et al.* (2010); Rahardjo *et al.* (2007); entre otros. Los cuales en general han observado que estos procesos están directamente relacionados a las precipitaciones, siendo uno de los principales factores desencadenantes en la ocurrencia de procesos de remoción en masa.

Esta relación entre las precipitaciones y las deformaciones o remociones que se producen en laderas es una realidad conocida, sin embargo, resulta difícil definir umbrales de precipitación que provoquen estos fenómenos debido a las características geológicas y geotécnicas de cada zona de estudio. Por lo tanto, para realizar una estimación de estos umbrales se requiere datos de precipitación y registros de remociones con alta frecuencia que permitan la realización de análisis estadísticos para cada zona de estudio (Lara, 2007).

En este ámbito, uno de los casos más estudiados de la relación entre precipitaciones y remociones en masa es el de Hong Kong, donde se tienen registros de intensidades de lluvia y ocurrencia de remociones en un largo período (Brand, 1985). En la **Figura 2.8** se muestran dos fechas de lluvias intensas el 12 de junio de 1966 y el 17 de octubre de 1978. Las lluvias acumuladas en 24 horas fueron muy similares en las dos fechas, sin embargo, en 1966 se presentaron gran cantidad de remociones, muertos y pérdidas materiales, mientras que en 1978 solo se presentó una remoción. Debe tenerse en cuenta que en Hong Kong la mayoría de los suelos son residuales provenientes de la meteorización de granitos. La permeabilidad de estos suelos es relativamente alta, por lo que se requieren precipitaciones instantáneas muy intensas para generar presiones de poro de gran magnitud, teniendo en cuenta esto resulta indispensable un buen estudio de las condiciones geológicas de la zona que se quiere estudiar.

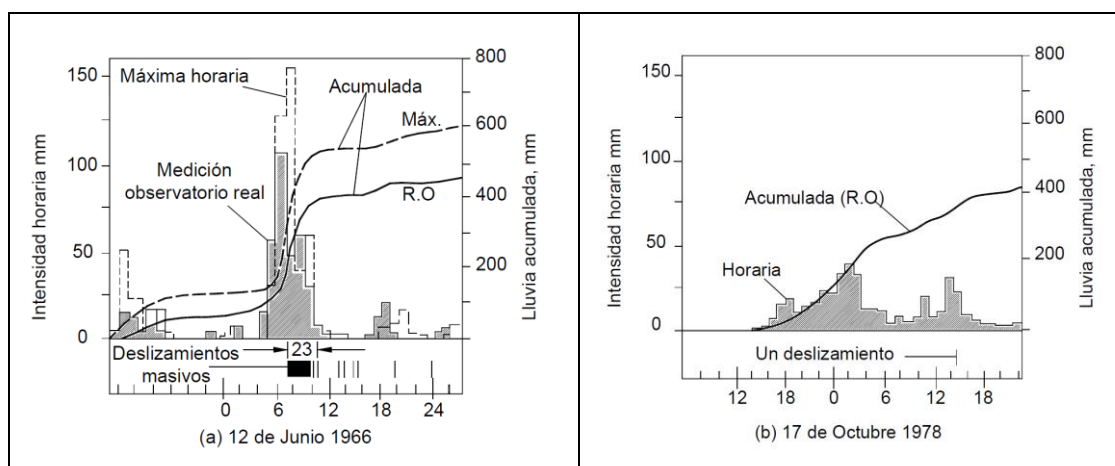


Figura 2.8. Relación entre precipitaciones y deslizamientos en Hong Kong. (Brand, 1985).

Por otra parte, en relación con los ambientes costeros, las remociones en masa pueden ser un problema importante desde la perspectiva de los peligros geológicos y geotécnicos (Sepúlveda *et al.*, 2011). En este ámbito en las zonas costeras del centro sur de Chile los estudios de remociones se han centrado en los factores sísmicos como desencadenantes donde destacan estudios de Davis y Karzulovic (1963), Antinao y Gosse (2008), Bray y Frost (2010) y Mardones y Rojas (2012), todos ellos relacionados a procesos ocurridos posterior a grandes terremotos. Sin embargo, el efecto de los eventos hidrometeorológicos como factores gatillantes no toma mayor relevancia, debido a esto es importante estudiar el impacto de estos, como detonantes de procesos de remociones en masa que permitan comprender de mejor forma estos fenómenos en zonas costeras.

“Estudio de deformaciones de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante modelos numéricos: Caso de estudio Cerro Maule, Comuna de Puerto Saavedra.”

CAPÍTULO 3

ZONA DE ESTUDIO

CAPÍTULO 3. ZONA DE ESTUDIO

3.1 Características generales

La zona de estudio se ubica en la costa de la Región de La Araucanía entre los $38^{\circ}48'58''$ y $38^{\circ}49'15''$ de latitud sur y los $73^{\circ}24'00''$ y $73^{\circ}23'42''$ de longitud oeste (**Figura 3.1**), sector conocido como Cerro Maule en la comuna de Puerto Saavedra. Esta zona se encuentra inserta en un ecosistema litoral asociado a la depresión intermedia, diferenciándose dos cuencas hidrográficas: los ríos Budi e Imperial, además, posee un borde costero con incipientes llanuras litorales (Molina *et al.*, 2018).

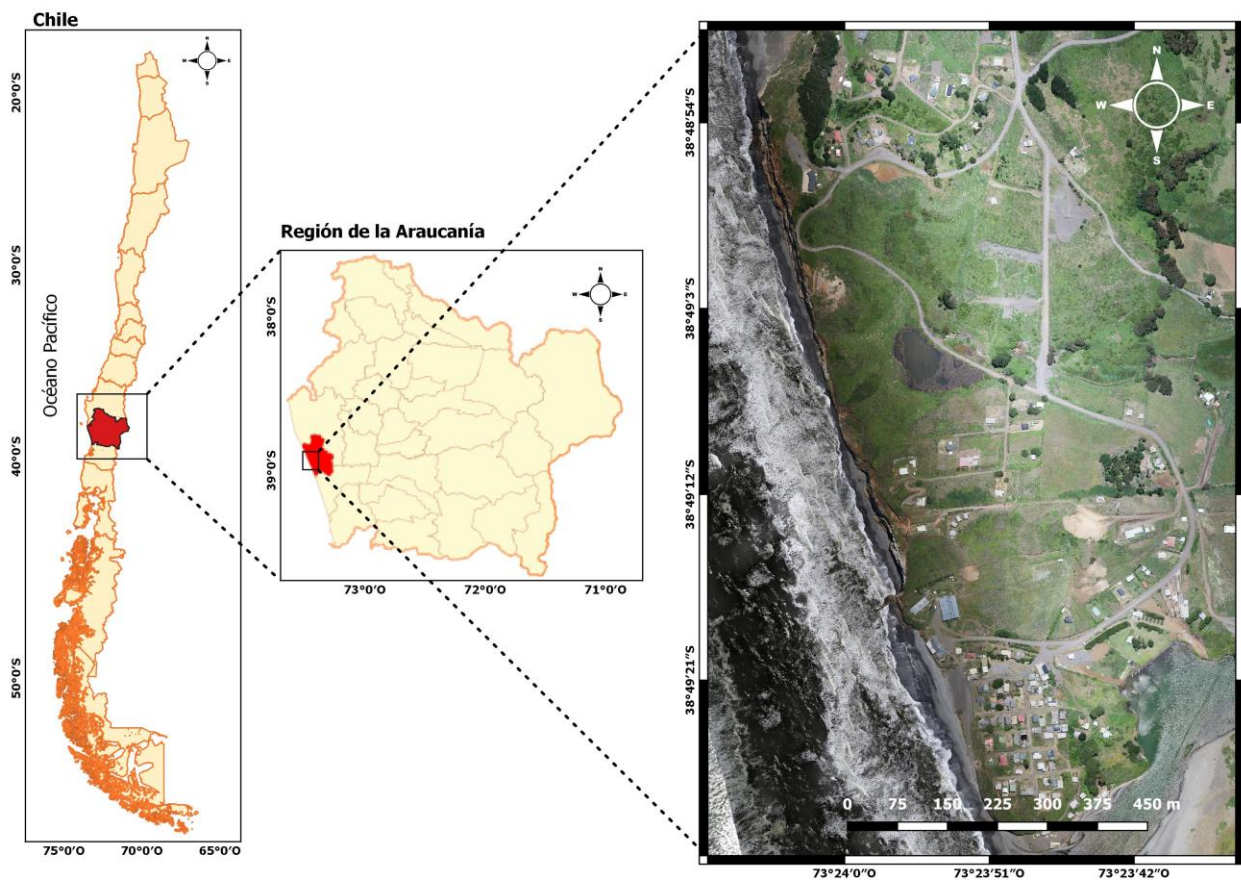


Figura 3.1. Mapa de la zona de estudio, obtenido a través del procesamiento de imágenes aéreas proporcionadas por el dron Inspire II en campaña previa de levantamiento topográfico.
Elaboración propia.

El clima en la zona se define por estar dentro de la ecorregión valdiviana, como un bioclima de tipo templado hiperocénico. De acuerdo con la clasificación de Köppen, el clima es de tipo Cfb, es decir oceánico con influencia mediterránea, siendo templado húmedo de verano fresco con precipitaciones que oscilan entre 1200 – 1400 [mm] y temperaturas estables con una media anual de 11.5 °C (Saavedra, 2011). El sistema natural tiene una alta susceptibilidad a la erosión asociado a las distintas actividades antrópicas en el área y a la condición natural de los suelos. Debido a esto los procesos de erosión del manto lineal, solifluxión y remoción en masa son evidentes en la sedimentación según las observaciones realizadas por Álvarez (1999) a orillas del lago Budi.

3.2 Características geomorfológicas

Morfológicamente, el área se caracteriza por ser una zona de contacto entre la Cordillera de la Costa y el mar, la cual ha sido modelada por las características del clima, suelo, vegetación, acción de agentes erosivos, sistemas fluviales y actividades antrópicas, lo que ha generado una diversidad de paisajes (Peña *et al*, 2014). Por otra parte, antecedentes relevantes destacan que esta zona, comprende una franja de unos 10 km. de ancho que incluye todo el Lago Budi y Puerto Saavedra. Consiste en estratos perfectamente horizontales de areniscas conglomerados y lutitas. Tiende a formar acantilados verticales de gran altura (**Figura 3.2**), lo que permite su fácil estudio e identificación (Lomnitz, 1968).

La zona en general presenta un relieve variado con alturas que van desde los 0 a 80 m.s.n.m. aproximadamente, principalmente debido a la composición del Cerro Maule en donde se presenta la mayor altitud la cual disminuye gradualmente hacia el sector de Boca Budi (dirección S-E). En el borde costero se hacen presentes acantilados verticales de gran altura con pendientes suaves hacia el interior, otro aspecto importante de la zona es que se ubica entre dos cuerpos de agua de relevancia en el sector que son el Río Imperial y el lago Budi, además dentro de la zona se encuentra una pequeña laguna en la depresión intermedia entre Cerro Maule y Boca Budi la que se puede apreciar en la **Figura 3.1**.



Figura 3.2. Fotografía Cerro Maule desde la costa, obtenida a partir de vuelo en dron.

Elaboración propia

3.3 Características geológicas

La zona de estudio según la carta geológica de Chile (**Figura 3.3**) pertenece a la época geológica del Pleistoceno que corresponden a secuencias sedimentarias marinas litorales o fluviales estuarinas: coquinas, conglomerados coquináceos, areniscas y conglomerados dispuestos en niveles aterrazados emergidos (SERNAGEOMIN, 2003), según Peña *et al.* (2006) los suelos de la zona corresponden a formaciones de origen fluvio-marino además de depósitos arcillosos estratificados.

Por otra parte, Claudia Rapimán (2007) en su trabajo de título, presenta una caracterización del estrato basal de la columna estratigráfica del Cerro Maule correspondiente al estrato sedimentario a nivel del mar y en el eje vertical, hasta una altura aproximada de 1,5 [m]. Los resultados de la clasificación de suelos (USCS) realizada determinaron principalmente composiciones de arcillas inorgánicas de plasticidad media (CL) y arenas finas mal graduadas con predominio de un tamaño (SM).

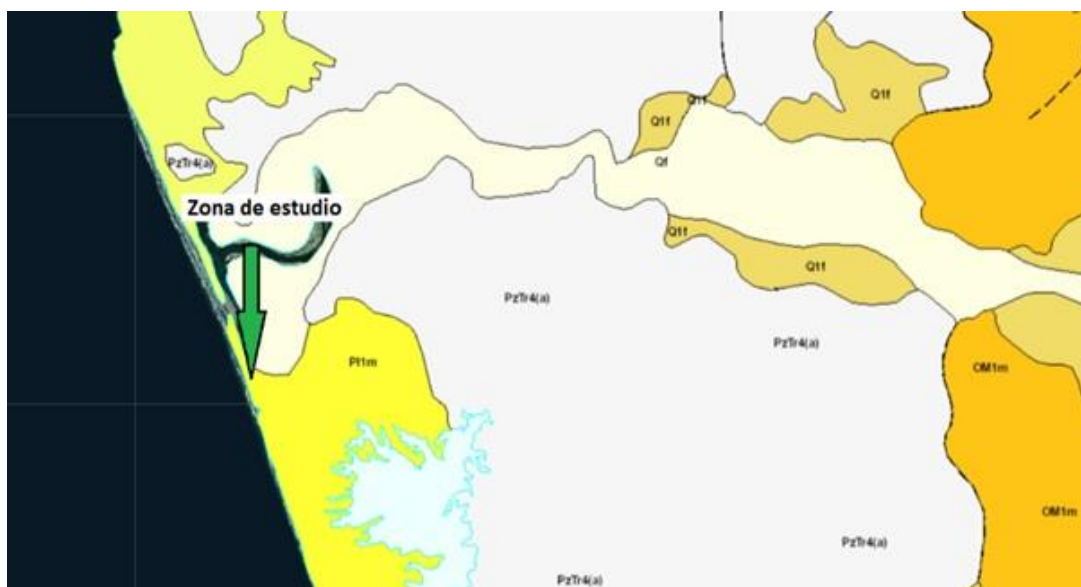


Figura 3.3:Geología de la zona de estudio, extracto de (SERNAGEOMIN, 2003).

En cuanto al contexto tectónico, el sector de Cerro Maule se encuentra en una zona geodinámicamente activa debido a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, es así como en zonas entre Puerto Saavedra y Chiloé (38.7° S – 43.4° S) y la vertiente oriental de la cordillera de la costa y la depresión intermedia, han experimentado una subsidencia debido a su lejanía de la fosa. Estos cambios verticales del terreno generan variaciones importantes en el relieve (Quezada *et al*, 2012).

Respecto a lo antes mencionado, observaciones realizadas días después del terremoto del 27 de febrero de 2010 por el personal del SERNAGEOMIN dan cuenta de la presencia de grietas en el sector con una gradualidad creciente hacia el borde o margen del acantilado, estas grietas poseen espaciamientos de hasta 40 [cm] y saltos verticales hasta 14 [cm], de manera individual, con descensos y leves rotaciones de los bloques situados hacia la pendiente del talud las cuales constituyen un peligro latente de ocurrencia de remociones en masa, que se podrían producir por nuevos movimientos sísmicos o por periodos de precipitaciones intensas (Duhart, 2010).

3.4 Uso de suelos

El sector Maule, se caracteriza por la concentración de un gran número tanto de viviendas de descanso particulares, como de cabañas para arriendo y hospedajes, que sumado a la existencia de equipamientos comerciales y de esparcimiento orientado al turismo, la definen como el punto de actividad turística de mayor diversidad y número de servicios de la localidad. El sector Maule, desde su formación ha evidenciado un crecimiento espontáneo donde se encuentran edificaciones que se fundan sobre arenas de origen eólico, que a su vez están depositadas sobre areniscas finas profundamente meteorizadas (Páez y Jara, 2010)

En el sector Boca Budi, se concentra una actividad turística menos masiva ya que principalmente se registra un uso residencial de segunda vivienda. Las viviendas de veraneo, emplazadas en la pendiente aprovechando las posibilidades de vistas al mar, son construcciones de mayor calidad que las del sector Maule. Aquí predomina el uso residencial particular de las villas Miramar, Las Dunas, los Cipreses, así como el hotel y restaurant que propicia la mayor cantidad de visitantes transitorios al lugar (OPPTA, 2012).

3.5 Remociones en masa en la zona de estudio

La zona de estudio en los últimos años ha sufrido remociones en masa importantes lo que la hace ser un sector en constante dinamismo generando incertidumbre en las autoridades frente al peligro asociado a estos fenómenos. Uno de los procesos que se han documentado corresponden a remociones de dimensiones moderadas y deformaciones del tipo grietas (Páez y Jara, 2010) que ocurrieron posterior al terremoto del 27 de febrero de 2010 lo que ha dejado al macizo fracturado y susceptible a nuevos procesos de remoción en masa.

Por otra parte, se han presentado eventos progresivos se han llevado parte del camino del Cerro Maule que conecta el sector Boca Budi con Puerto Saavedra como se observa en la **Figura 3.4 b)** y d), el cual se mantiene cerrado desde agosto de 2017 afectando la conectividad de la zona. Mientras que los más reciente han afectado a la playa Maule el pasado 17 de julio de 2018 y el emblemático restaurante Boca Budi el 6 de junio de 2019, los que se pueden apreciar en la **Figura 3.4 a) y c)**, ambos sectores muy concurridos por turistas y habitantes del sector.



Figura 3.4. Remociones en masa en la zona de estudio. a) remoción en el sector playa maule año 2018. (www.biobiochile.cl); b) remoción en el camino del Cerro Maule año 2017. (www.redemergencia.cl); c) remoción en el sector de boca Budi. (www.emol.cl); d) remoción en el camino de Cerro Maule año 2019. Elaboración propia.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

Se realizaron terrenos exploratorios de la zona de estudio con el objetivo de contar con antecedentes que permitieron delimitar zonas críticas e identificar sitios de extracción de muestras que fueron ensayadas en laboratorio, lo que junto con bibliografía especializada permitieron obtener una estratigrafía detallada de la zona con la correspondiente determinación de los parámetros geotécnicos. Luego se llevó a cabo un levantamiento topográfico para generar el modelo digital de elevación, posterior a ello se realizó un análisis de los datos de la estación meteorológica de Puerto Saavedra con el objetivo de seleccionar los eventos de precipitación que se estudiaron.

Con estos parámetros de entrada, se utilizó un modelo de elementos finitos en el software GTS-NX para cuantificar valores de deformación asociado los efectos de la infiltración por precipitaciones y de esta forma comprender los procesos de remoción en masa que han ocurrido en la zona del Cerro Maule. Estos procedimientos se describen con más detalle a continuación.

4.1 Exploración geotécnica de la zona de estudio

Se realizaron visitas a terreno con el objetivo de hacer un reconocimiento detallado de la zona que permitió contar con los antecedentes geotécnicos necesarios para entender la génesis del problema y el posible efecto de las precipitaciones en los procesos de remoción en masa. Durante estas exploraciones en la zona del Cerro Maule, se observaron las laderas del borde costero en su parte inferior y superior que permitieron definir las principales unidades y estratos de suelo superficiales.

Por otra parte, a partir de los terrenos de exploración geotécnica se identificaron puntos críticos en la zona que permitieron enfocar el estudio y definir los puntos de extracción de muestras. Luego, se realizó la campaña de extracción de muestras inalteradas bajo las indicaciones de la norma NCh1508of 2014, entendiéndose como muestras inalteradas aquellas en las que se conserva la estructura y la humedad que tiene el suelo en el lugar donde se obtiene. Para ello se ubicaron los puntos de extracción identificados en el terreno de exploración. Se extrajeron muestras de suelo inalteradas formando un cubo de aproximadamente 30 [cm] de lado, tamaño suficiente para realizar los ensayos de laboratorio debidamente normados descritos en el siguiente subcapítulo.

4.2 Propiedades geomecánicas

Para determinar las propiedades geomecánicas y la composición de los suelos críticos que condicionan las remociones en masa en la zona, se realizaron ensayos de corte directo, densidad, humedad y clasificación de suelos según la U.S.C.S. que permite la clasificación desde el punto de vista ingenieril de las muestras extraídas. Estos parámetros se utilizaron como datos de entrada para la parametrización del modelo de deformación. Para llevar a cabo los ensayos de laboratorio realizados se siguieron estrictamente los procedimientos indicados en la normativa vigente para cada uno, la descripción de estos se presenta en el anexo A.

Por otra parte, la identificación de todos los estratos constituyentes del Cerro Maule resultó compleja debido a la dificultad geográfica que representa de la extracción de muestras de cada uno de los estratos y la peligrosidad asociada debido a la alta probabilidad de la ocurrencia de remociones en masa. Por lo tanto, se realizó una identificación visual de los parámetros geomecánicos y en base a bibliografía especializada estos fueron estimados teniendo en cuenta todas las particularidades de los estratos presentes en la zona.

4.3 Modelo topográfico

La topografía de la zona de estudio se obtuvo mediante fotogrametría utilizando el dron Inspire II. Esta técnica permite hacer reconstrucciones de terrenos y medidas a partir de imágenes aéreas proporcionadas por dron con el objetivo principal de convertir los datos bidimensionales en modelos digitales tridimensionales de alta resolución espacial (Sánchez, 2007).

Para el uso de esta técnica primero se define la zona en la que se realizara el levantamiento, esto se lleva a cabo generando un polígono sobre la zona de estudio utilizando la aplicación móvil DroneDeploy donde también se realizó el segundo paso, que consiste en generar el plan de vuelo el que se puede observar en detalle en la **Figura E.2** del Anexo E.

El plan de vuelo se determina en función del propósito en el que se utilizaran las fotografías aéreas, las consideraciones que se deben tener en cuenta son, la altura del vuelo sobre el plano de referencia, debido a que a mayor altura se necesitan menos imágenes para cubrir la zona a mapear, sin embargo, la calidad del mapa disminuye. Por el contrario, a menor altura se necesitará una mayor cantidad de imágenes para cubrir la zona, dando como resultado una mayor resolución del modelo final. Otro punto importante es la separación entre líneas de vuelo lo que genera los solapes entre fotografías consecutivas, mientras mayor sea este, mejor será la calidad final del mapeo (Sánchez, 2007).

Un paso que se debe realizar antes de iniciar el vuelo consiste en ubicar los puntos de control dentro de la zona que se va a mapear (**Figura 4.1**) y georreferenciarlos, para ello se utilizó el GPS Emild Reach RS + receptor RTK GNSS con precisión centimétrica, esto permitió conocer con exactitud la localización en donde se han tomado cada imagen del vuelo, en el Anexo E se muestra en detalle las coordenadas de cada punto medido y su error asociado. Este punto es importante para asegurar la precisión de las reconstrucciones debido a que los dispositivos GPS de los drones sufren ciertos errores (Perdomo *et al*, 2015).

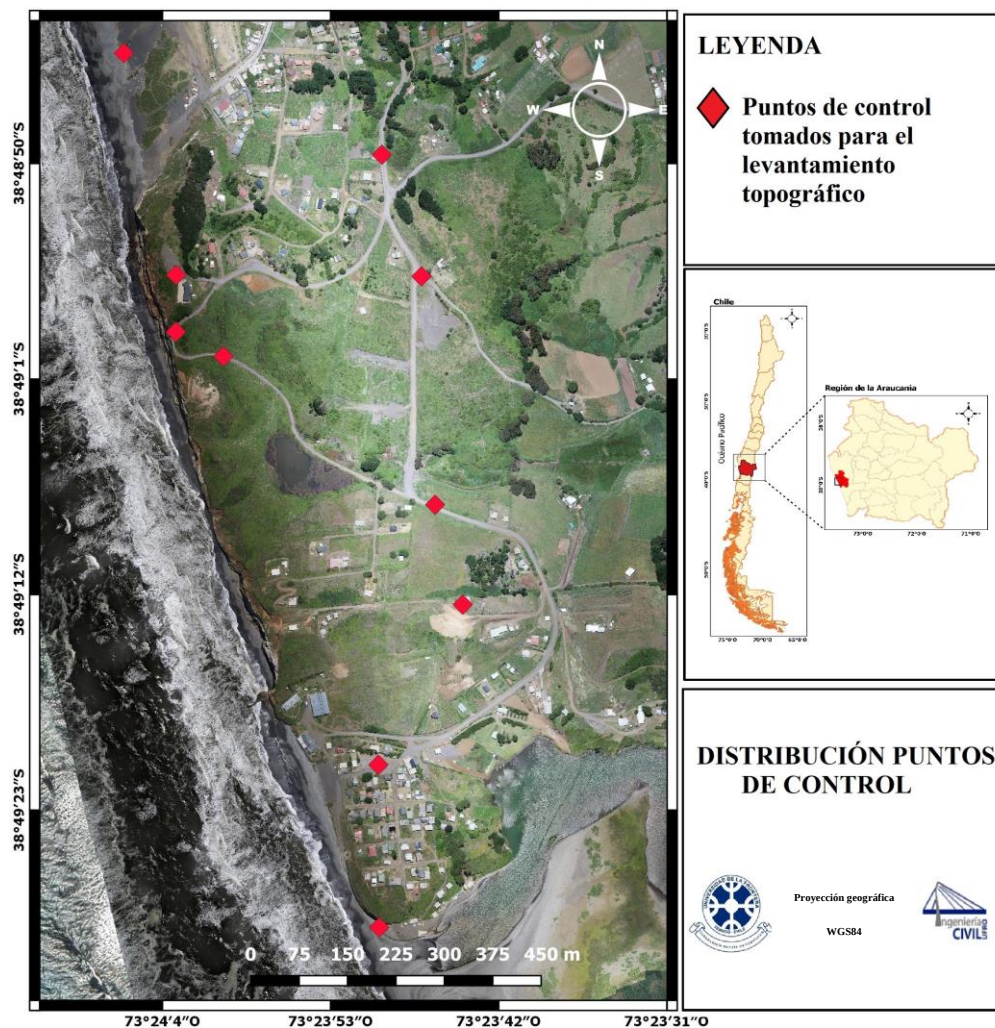


Figura 4.1. Ubicación puntos de control en la zona a mapear. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta todos los antecedentes mencionados, se realizó un vuelo a 200 [m] de altura sobre una superficie total de 180 hectáreas que tomó un tiempo de 59 minutos registrando un total de 950 fotografías. Luego, para el procesamiento de las imágenes obtenidas, se utilizó el software Agisoft PhotoScan versión 1.4, software de escritorio que realiza un proceso de restitución de las imágenes por coincidencia espacial entre los elementos representados en cada imagen. De esta forma fue posible visualizar las fotografías obtenidas en altura y la composición de la representación espacial de los objetos proyectados en superficie generando modelos 3D con el cual se obtuvo el modelo digital de elevación con una resolución de 5 cm por píxel, el que posteriormente se exportó al software Qgis versión 3.4 para generar las curvas de nivel en formato DXF, formato admisible por el software GTS-NX que finalmente permitió establecer la representación topográfica de la zona de estudio.

4.4 Eventos de precipitación

Se cuantificaron valores de deformación de la zona de estudio a partir de un modelo de elementos finitos en el software GTS-NX donde se consideraron como parámetros de entrada distintos eventos de precipitaciones en base a los datos de la estación meteorológica ubicada en Puerto Saavedra la cual se encuentra a 2,7 [km] de distancia de la zona de estudio (**Figura 4.2**). Esto con el objetivo de evaluar si los procesos de remoción en masa tienen relación con eventos hidrometeorológicos asociados a precipitaciones.

En la **Tabla 4.1** se muestra el detalle de la estación meteorológica que se utilizó, la cual cuenta con 38 años de datos con un 2,34% de datos faltantes. Para realizar el estudio de distintos eventos de precipitación y a modo de simplificación se consideraron los datos faltantes de la estación como días sin precipitación. Considerando un evento desde el día en que inicia la precipitación hasta que termina, a excepción de los eventos de precipitación prolongada donde también se consideró la intermitencia en un evento, es decir, días en los que no precipita también se consideraron dentro de un evento con un máximo de tres días sin precipitación. Además, para todos los eventos no se considera la variabilidad temporal dentro del día.

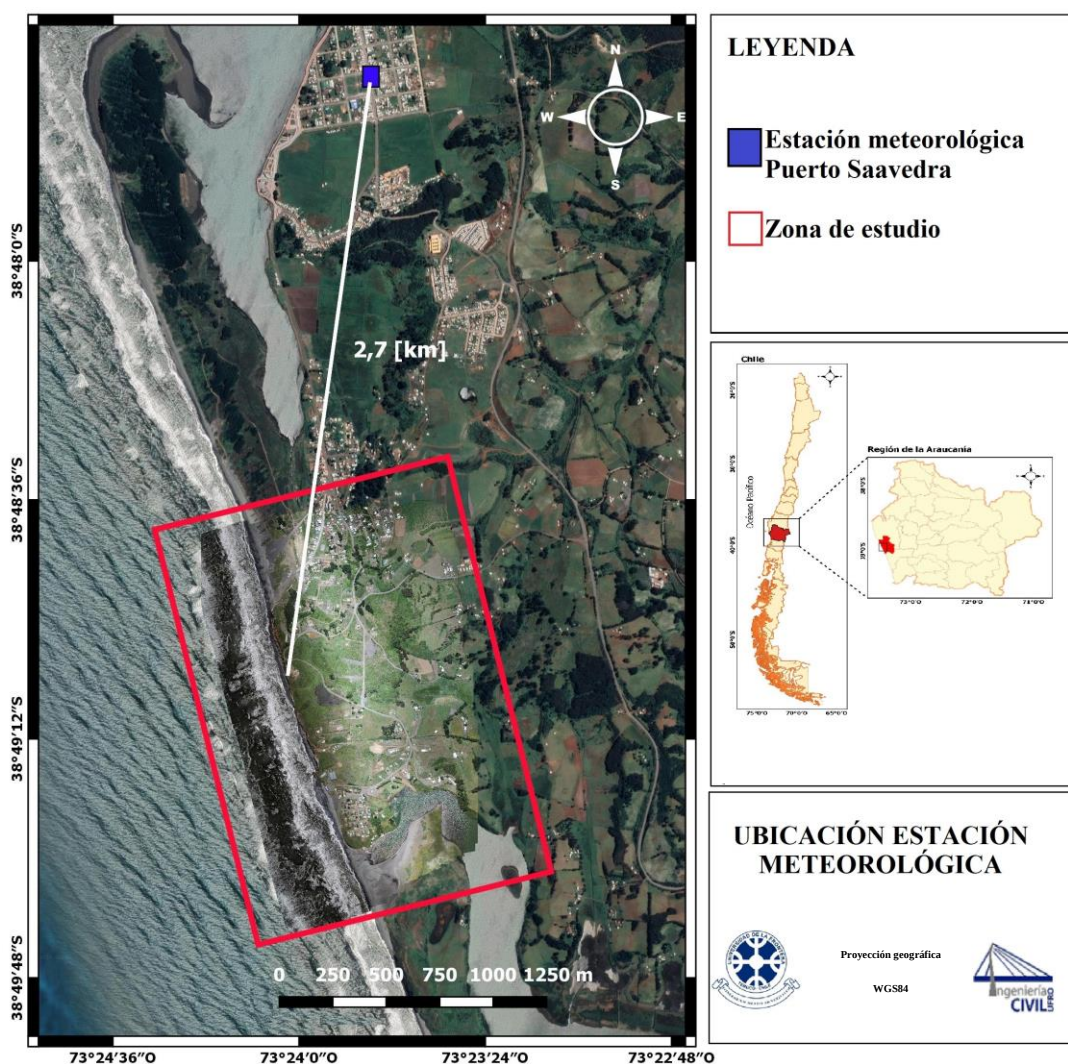


Figura 4.2: Ubicación de la estación meteorológica de Puerto Saavedra. Elaboración propia.

Tabla 4.1. Detalles estación meteorológica utilizada. Elaboración propia.

Detalle de estación	
Nombre	Puerto Saavedra
Altitud	5 [m]
Latitud	38°47'35''
Longitud	73°23'45''
Estado	Vigente
Fecha inicio	01/01/1979

Los datos de la estación se obtuvieron del explorador climático online del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR2, <http://explorador.cr2.cl/>) los cuales se exportaron a una hoja Excel en donde se realizó el análisis de los datos. Para evaluar el efecto de los distintos tipos de precipitación se estudiaron eventos de precipitación extrema asociado a precipitaciones convectivas de corta duración, pero mayor intensidad y precipitaciones estratiformes asociado a precipitaciones prolongadas, pero de menor intensidad (Rojas, 2016), finalmente y a modo de establecer una comparación se estudiaron también eventos de baja precipitación.

La clasificación de un evento como extremo, asociado a un evento convectivo, estratiforme o de baja precipitación, depende de la condición climática de cada zona de estudio, en este ámbito los eventos extremos según el IPCC (2012) se definen como la ocurrencia de un valor de una variable meteorológica o climática por sobre un umbral cercano al extremo superior del rango de valores observados de dicha variable. Luego, existen dos formas de definir un evento como extremo (Rojas, 2016):

- Según su umbral relativo, menor al 10%, 5% o 1% o mayor al 90%, 95% o 99%.
- Según un umbral absoluto específico, valores mayores o menores a un valor fijo de una variable.

En base esto, para este estudio se definió una condición extrema como el umbral relativo mayor al 95%, por lo tanto, los parámetros para elegir los eventos se basaron en el estudio de los datos de la estación meteorológica de Puerto Saavedra, en donde se tuvieron en cuenta aspectos como la precipitación diaria, la duración de cada evento y la precipitación acumulada de cada evento.

4.5 Método de elementos finitos para análisis de deformaciones

4.5.1 Generalidades

Los procesos de remoción en masa se pueden interpretar como movimientos de dos etapas, en la primera etapa se producen pequeñas deformaciones imperceptibles (Velázquez y Gómez-Sal, 2007), esta etapa puede durar horas, días e inclusive años (Zhou *et al.*, 2013) dependiendo del tipo de movimiento y sus factores asociados como la precipitación, la pendiente, la litología y la hidrogeología de la zona. Posterior a esto se presenta la segunda etapa en donde puede existir una fase de rotura que se caracteriza por la formación de una superficie de falla la cual puede estar controlada por la geología del terreno, provocando movimientos que pueden ser lentos hasta extremadamente rápidos.

Para poder estudiar estos sistemas geomecánicos complejos (Van Asch *et al.*, 2007), numerosos softwares de ingeniería utilizan métodos numéricos basados en la discretización del espacio, siendo uno de los modelos numéricos más importante el modelo de elementos finitos (MEF), para el caso del presente trabajo se utilizó el software GTS-NX 2019 (v1.1), programa de cálculo por elementos finitos orientado al análisis de diversos problemas en geotecnia, incluyendo cimentaciones profundas, sistemas complejos de túneles, análisis de infiltraciones, estabilidad de taludes, etc. El programa realiza el análisis de elementos finitos en 3D de las pendientes proporcionando resultados mucho más precisos, permitiendo además modelar topografías complejas gracias a su interfaz CAD. Con esto es posible lograr una representación real de los deslizamientos que no es posible determinar con análisis en 2D. Un aspecto importante del software GTS-NX es que permite realizar análisis de infiltración y estabilidad, con lo que es posible evaluar el cambio en las presiones de poro, y en consecuencia en los esfuerzos, provocado por las precipitaciones.

La metodología en la cual se fundamenta el método de los elementos finitos consiste en subdividir un medio continuo en pequeños elementos que se conectan a través de sus nodos. Cada elemento entrega una solución a la ecuación de desplazamiento con una validez local obteniendo el desplazamiento al interior de cada nodo (Smith *et al.*, 2013). Se basa en la integración de ecuaciones diferenciales que resultan de la aplicación de modelos de comportamiento físico de cada problema en particular, los cuales son alimentados con parámetros representativos de la caracterización físico-mecánico de cada uno de los elementos de tamaño finito en los que se divide un medio continuo. El resultado de tal integración parcial de cada elemento es luego aplicado al ensamble de todos ellos para obtener las ecuaciones globales que van a servir para obtener los desplazamientos de los nodos, y a partir de estos obtener las cantidades secundarias que representan los esfuerzos tensoriales y las deformaciones unitarias que se derivan de tales tensores.

4.5.2 Discretización del dominio

Para aplicar el método de elementos finitos, como se mencionó anteriormente, se realiza una subdivisión del medio continuo aplicando un criterio práctico denominado discretización, esto permite limitar el modelo físico que representa la situación real la cual cuenta con infinitos grados de libertad, de esta forma se consigue un modelo matemático válido que se le ajuste, brindándole al problema una solución posible con un número finito de grados de libertad. Aplicando este criterio se logra llegar de un medio continuo a varias subdivisiones finitas conformadas por regiones pequeñas denominadas elementos.

Programas de gran potencial que aplican el método de elementos finitos como GTS-NX, permite simplificar el trabajo del ingeniero al generar automáticamente la malla de elementos finitos (MIDAS, 2019). Para este caso la malla de la zona de estudio consiste en una discretización del medio a partir de elementos híbridos que consisten en elementos del tipo hexaedro (**Figura 4.3**) y tetraedros (**Figura 4.4**) de segundo orden (20 y 10 nodos respectivamente), esta configuración permite representar de mejor forma la superficie compleja que se requiere modelar.

4.5.3 Funciones de forma

Las funciones de forma definen la geometría y los campos de desplazamiento de cada elemento. La función básica de un campo de desplazamiento se aplica igualmente al campo de presión de poros en un elemento de filtración (MIDAS, 2019). Las funciones de forma dimensional se expresan mediante el sistema de referencia adimensional (ξ, η, ζ) .

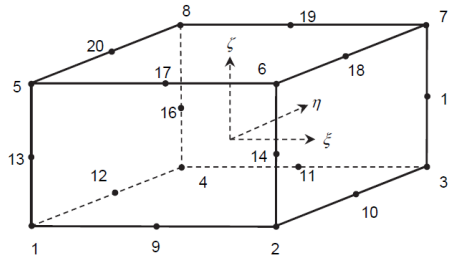


Figura 4.3. Elemento del tipo hexaedro de segundo orden. (MIDAS, 2019).

Por lo tanto, los desplazamientos se calculan a partir de elementos mediante el sistema de referencia local (ξ, η, ζ) con las siguientes funciones de forma asociadas a elemento del tipo hexaedro:

Hexaedro de 20 nodos (4.1)

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta)(\xi_i \xi + \eta_i \eta + \zeta_i \zeta - 2) , i = 1, 2, 3, \dots, 8$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \xi^2)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta) , i = 9, 11, 17, 19$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \eta^2)(1 + \xi_i \xi)(1 + \zeta_i \zeta) , i = 10, 12, 18, 20$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \zeta^2)(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta) , i = 13, 14, 15, 16$$

Por otra parte, las funciones de forma asociadas al elemento de tipo tetraedro (**Figura 4.4**) son las siguiente:

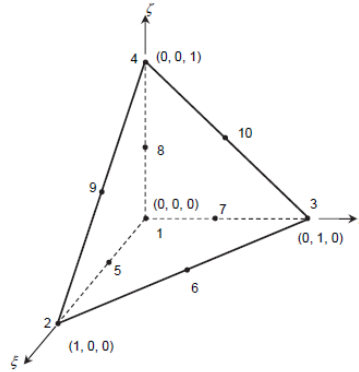


Figura 4.4: Elemento de tipo tetraedro de segundo orden. (MIDAS, 2019).

Tetraedro de 10 nodos

(4.2)

$$N_1 = 2(1 - \xi - \eta - \zeta) \left(\frac{1}{2} - \xi - \eta - \zeta \right)$$

$$N_6 = 4\xi\eta$$

$$N_2 = 2\xi \left(\xi - \frac{1}{2} \right)$$

$$N_7 = 4\eta(1 - \xi - \eta - \zeta)$$

$$N_3 = 2\eta \left(\eta - \frac{1}{2} \right)$$

$$N_8 = 4\zeta(1 - \xi - \eta - \zeta)$$

$$N_4 = 2\zeta \left(\zeta - \frac{1}{2} \right)$$

$$N_9 = 4\xi\zeta$$

$$N_5 = 4\zeta(1 - \xi - \eta - \zeta)$$

$$N_{10} = 4\eta\zeta$$

La integración numérica es indispensable para aplicar las funciones de forma anteriores al proceso de formulación descrito en la sección 4.5.5. El análisis numérico es necesario para calcular la matriz de rigidez, la matriz de masa, el vector de carga, la fuerza interna del elemento, entre otros. Donde GTS NX utiliza el método de integración numérica de la cuadratura gaussiana (MIDAS, 2019).

4.5.4 Modelo constitutivo

Luego de la creación de la malla de elementos finitos y la delimitación de cada uno de los estratos constituyentes de la zona de estudio, el siguiente paso a seguir es la asignación de propiedades específicas a cada uno de los materiales, para ello se debe utilizar un modelo constitutivo, el cual representa el comportamiento de un material en términos de relaciones empíricas, semi- empíricas y/o teóricas.

A lo largo de los años, se han propuesto diversas teorías que representan el comportamiento de distintos suelos, dentro de los más conocidos están los modelos de Tresca, Von Mises, la Teoría de Mohr-Coulomb y la teoría del estado crítico, en donde las tres primeras han sido descritas por Bishop (1966) y la teoría de estado crítico por Schifield y Wroth (1968) y Muir Wood (1991).

Es importante entender que el modelo constitutivo que se escoja debe representar el comportamiento in situ reportado por instrumentos de medición ad hoc, de cada suelo durante todas sus fases de análisis. Incorporar un sistema de monitoreo permanente en la zona de estudio que permita verificar las deformaciones de tal forma de ajustar un modelo constitutivo para cada suelo es complejo y costoso, debido a estas limitaciones se optó por utilizar el modelo de Mohr-Coulomb, uno de los más utilizados en la mayoría de los problemas prácticos que implican la resistencia del suelo debido a su fácil implementación y a la confiabilidad de sus resultados (Smith, 2014).

4.5.4.1 Modelo de Mohr-Coulomb

El modelo de Mohr-Coulomb es considerado una aproximación de primer orden al comportamiento no lineal del suelo, es un modelo elasto-plástico perfecto desarrollado a partir de la composición de la ley de Hooke y la forma generalizada del criterio de falla de Mohr-Coulomb.

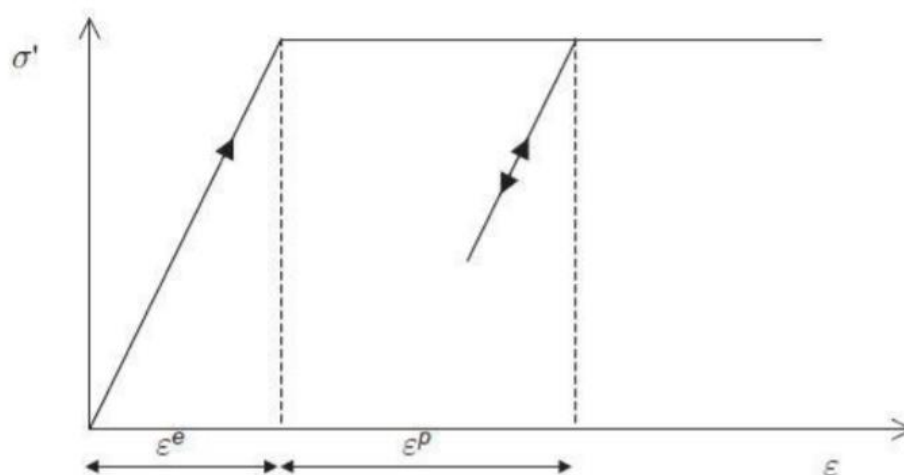


Figura 4.5: Relación esfuerzo-deformación según el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. (MIDAS, 2019).

El modelo define la relación esfuerzo-deformación de tipo elasto-plástica como se muestra en la **Figura 4.5**, donde en términos generales se establece un comportamiento elástico hasta alcanzar un punto de falla, a partir del cual el suelo experimenta deformaciones plásticas, el criterio de falla se puede definir en términos de esfuerzos principales según la *ecuación 4.3*. Por otra parte, y a diferencia de otros materiales como el acero, los suelos tienen poca resistencia a la tensión, y en la mayoría de los casos la falla está definida por esfuerzos de corte (Cubillos, 2017). Mohr-Coulomb establece la resistencia al corte de un material según la *ecuación 4.4*.

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\sin\phi - c \cdot \cos\phi = 0 \quad (4.3)$$

$$\tau = \sigma \cdot \tan(\phi) + c \quad (4.4)$$

Donde

- σ_1 : Esfuerzo principal mayor
- σ_3 : Esfuerzo principal menor
- c : Cohesión
- ϕ : Angulo de fricción interna
- τ : Esfuerzo de corte

De esta forma, la formulación del modelo exige seis parámetros básicos de entrada: el módulo de Young E , la relación de Poisson ν , la resistencia por cohesión del suelo c , el ángulo de fricción interna ϕ , el ángulo de dilatancia ψ , y el peso unitario γ (**Tabla 4.2**). En general estos parámetros son sencillos de obtener en laboratorio, y por lo demás, existe un amplio conocimiento en cuanto a ellos en la literatura especializada (Ruiz *et al.*, 2009).

Tabla 4.2. Parámetros del modelo de Mohr-Coulomb. Elaboración propia.

Parámetro	Nombre
ϕ	Angulo de fricción interna
c	Cohesión
ψ	Angulo de dilatancia
E	Módulo de elasticidad
ν	Razón de Poisson
γ	Peso unitario

4.5.5 Formulación del método de elementos finitos

Aplicando las relaciones esfuerzo-deformación desde el principio del trabajo virtual debido al estrés en forma variacional y utilizándolo como una condición de restricción se obtiene el principio Hu-Washizu (Hu, 1955; Washizu, 1955) que puede expresarse de la siguiente manera.

$$\delta G_{ext} = \int_{\Omega} (\nabla \delta u)^T \sigma + \delta \varepsilon^T (\sigma(\varepsilon) - \sigma) + \delta \sigma^T (\nabla u - \varepsilon) d\Omega \quad (4.5)$$

Donde

- δG_{ext} : Trabajo virtual debido a una fuerza externa.
- u : Desplazamiento.
- σ : Esfuerzo.
- ε : Deformación.
- $\sigma(\varepsilon)$: Esfuerzo, calculado a partir de la deformación.
- ∇ : Operador de la relación esfuerzo-deformación.

La ecuación 4.5 es la forma más general que incluye la ecuación de equilibrio, la ecuación constitutiva y la condición de compatibilidad. Si se supone que la ecuación constitutiva siempre satisface la relación de esfuerzo-deformación, se obtiene el principio de Hellinger-Reissner (MIDAS, 2019) de la siguiente manera:

$$\delta G_{ext} = \int_{\Omega} (\nabla \delta u)^T \cdot \sigma + \delta \sigma^T \cdot (\nabla u - \varepsilon(\sigma)) d\Omega \quad (4.6)$$

Donde

- $\varepsilon(\sigma)$: Deformación, calculada a partir del esfuerzo

Asumiendo que la relación entre ε y ∇u se satisface con condiciones adicionales adecuadas, la ecuación se convierte en el principio general del trabajo virtual:

$$\delta G_{ext} = \int_{\Omega} (\nabla \delta u)^T \cdot \sigma(u) d\Omega \quad (4.7)$$

Si se limita la región de integración como elemento único para aplicar el principio del trabajo virtual en el método de los elementos finitos y se interpola el desplazamiento u como una función de forma dentro de un solo elemento resulta siguiente ecuación:

$$u^h = N \cdot d^e \quad (4.8)$$

Donde

- N : Función de forma
 d^e : Grados de libertad del nodo

Luego, utilizando la relación deformación-desplazamiento $\varepsilon^h = \nabla u^h = B d^e$, el principio de trabajo virtual para todo el elemento puede expresarse de la siguiente manera:

$$\delta G_{ext} = \delta d^T F \left[\sum \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{B} \, d\Omega \right] d = \delta d^T K d \quad (4.9)$$

Donde

- D : Matriz de relación esfuerzo-deformación
 B : Matriz de desplazamiento nodal

En el análisis lineal, la matriz de rigidez total “ K ” es independiente de los grados de libertad del nodo “ d ”, y la rigidez de los elementos individuales K^e puede expresarse de la siguiente manera:

$$K^e = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{B} \, d\Omega \quad (4.10)$$

La construcción de la matriz de elasticidad local es altamente dependiente de la parametrización del medio, para lo cual se determinaron los parámetros geotécnicos mediante ensayos de laboratorio debidamente normados y bibliografía especializada descritos en la sección 4.2.

4.6 Fenómeno de infiltración por precipitaciones

Al infiltrarse el agua en el suelo, se forma inicialmente un frente húmedo que avanza aproximadamente paralelo a la superficie del terreno, a una velocidad que depende de la permeabilidad, del grado de saturación y de la porosidad del material. Este frente húmedo puede alcanzar una superficie crítica en poco tiempo, dependiendo de la fracturación y el grado de saturación. Para comprender el proceso de avance de este frente húmedo es necesario entender algunos conceptos básicos del flujo en un suelo parcialmente saturado. El suelo está compuesto por tres fases que consisten en partículas de suelos sólidas, agua y aire, a continuación, se presentan algunos aspectos básicos referentes a estas fases constituyentes del suelo las cuales se esquematizan en la **Figura 4.6**.

- Fase Solida: compuesta por partículas sólidas cuyas propiedades más importantes son el tamaño, la forma, la textura y la composición química. Estas propiedades son responsables del comportamiento característico del suelo.
- Fase Liquida: compuesta por el agua y las sales disueltas en ella. Esta fase se divide en tres tipos: agua absorbida, agua capilar y agua gravitacional.
- Fase gaseosa: compuesta por aire y vapor de agua, el aire que se encuentra en el suelo está relacionado con el contenido de agua o el grado de saturación de este.

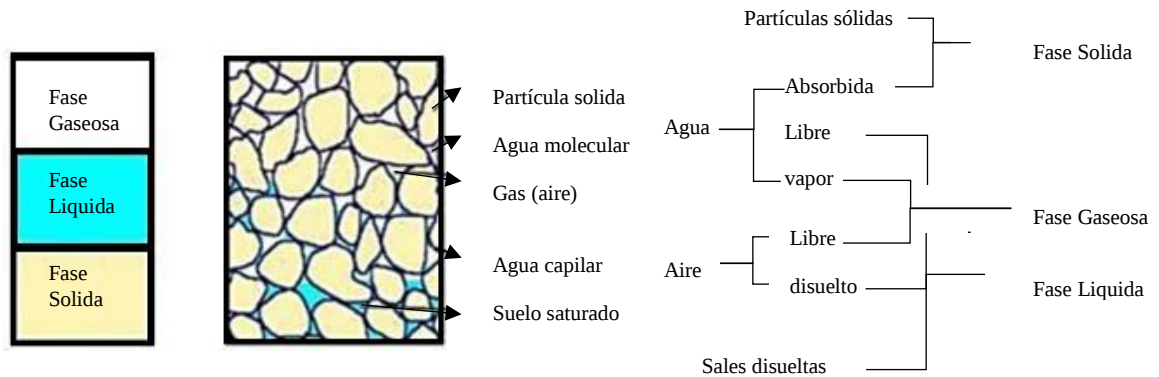


Figura 4.6: Componentes fases del suelo. (Yoshimi y Osterberg, 1963).

La diferencia entre los suelos saturados y los suelos parcialmente saturados es que en estado saturado los vacíos entre las partículas de suelo se llenan con agua lo que produce presiones de poro positiva, en cambio en el estado parcialmente saturado una parte de los espacios vacíos se llena con aire lo que provoca presiones de poro negativas (López y Mendoza, 2016). Por otra parte, en suelos saturados se asume que el coeficiente de permeabilidad es constante, por el contrario, en suelos parcialmente saturados, el coeficiente de permeabilidad es en función del contenido de agua. La ecuación que rige el comportamiento del flujo de agua en tres dimensiones en un elemento de suelo parcialmente saturado es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(kx \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(ky \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(kz \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q = \left(\frac{\partial \theta_w}{\partial t} \right) \quad (4.11)$$

Donde:

- h : Altura hidráulica total con respecto al sistema de referencia utilizado.
 k_x, k_y y k_z : Conductividad hidráulica.
 Q : Flujo aplicado en la frontera (precipitación)
 θ_w : Contenido volumétrico de agua.

La ecuación 4.11 muestra que la suma de cambio en las tasas de flujo, más la infiltración es igual al cambio de volumen de agua, en donde la cantidad de agua dentro del suelo depende de la presión de poros y las características de retención de humedad de la estructura de suelo (**Figura 4.7**).

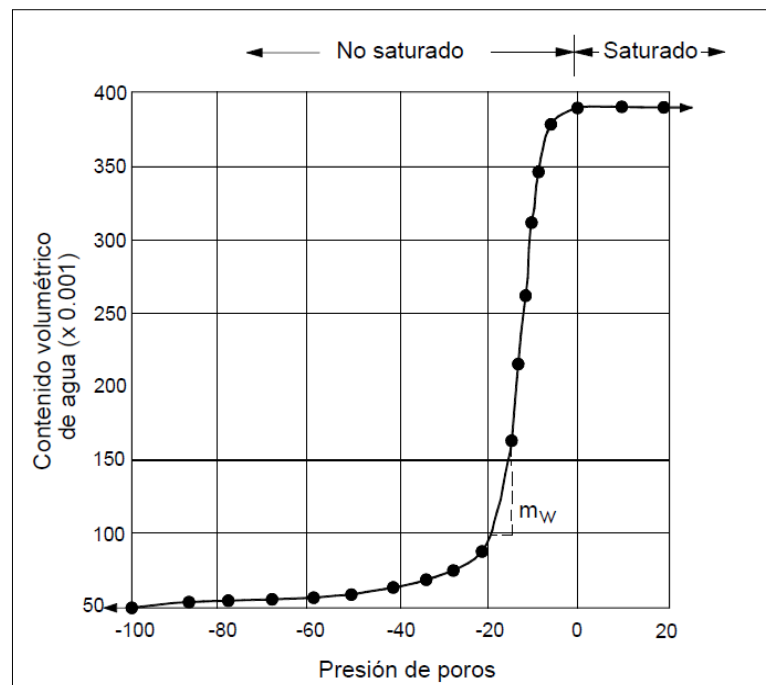


Figura 4.7: Contenido volumétrico de agua versus presión de poros. (Ng y Shi, 1998).

Por otra parte, y como se mencionó anteriormente, en el flujo en suelos parcialmente saturados, la conductividad hidráulica depende del contenido de agua en el suelo. Generalmente, se asume que el agua fluye a lo largo de una red de conductos interconectados, por lo tanto, a medida que el contenido de agua aumenta, el número de conductos aumenta mejorando la capacidad del suelo para conducir agua, debido a esto la conductividad hidráulica alcanza un valor máximo cuando el suelo se satura totalmente, por el contrario, al disminuir el contenido de agua, la capacidad del suelo para conducir agua disminuye y desaparece gradualmente. Como existe una relación entre el contenido de agua y la presión de poros, la conductividad hidráulica también es una función de la presión de poros, como se indica en la **Figura 4.8**.

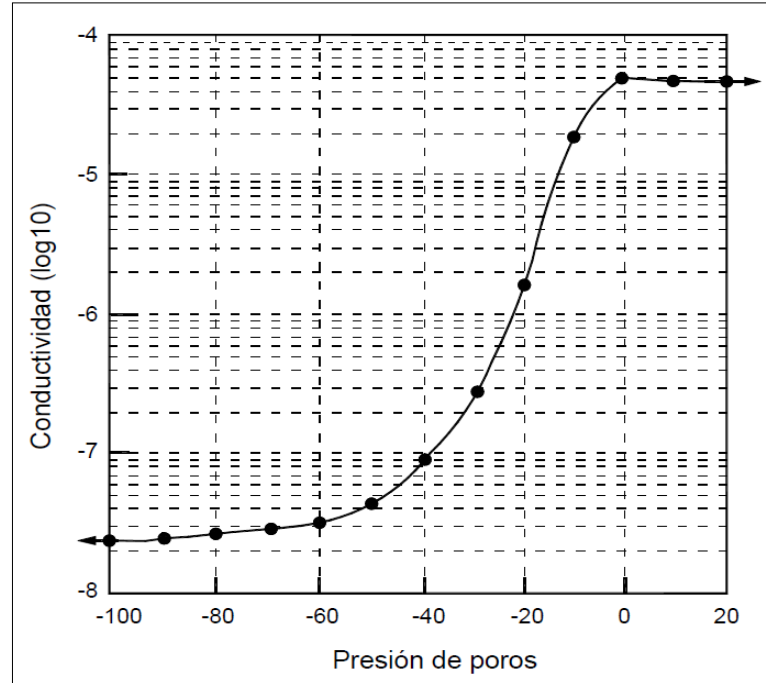


Figura 4.8: Conductividad hidráulica versus presión de poros. (Ng y Shi, 1998).

Para un elemento del suelo isotrópico no-saturado, un cambio en el contenido volumétrico de agua puede relacionarse con un cambio en la presión de poros, por medio de la expresión:

$$\partial \theta_w = m_w \partial u_w \quad (4.12)$$

Donde:

- u_w : Presión de poros.
- m_w : Pendiente de la relación entre el contenido de agua volumétrico y la presión de poros.

Finalmente, reemplazando esta ecuación en 4.11 se obtiene la ecuación de flujo no saturado:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q = m_w \quad (4.13)$$

En cuanto al uso del método del elemento finito para solucionar problemas de flujo en suelos parcialmente saturados. Dentro de cada elemento finito se asume que la carga hidráulica varía linealmente, y mediante el enfoque variacional se resuelve la ecuación planteada. Es decir, la solución de esta ecuación en un determinado dominio se sustituye por la obtención de un mínimo de una función asociada a dicha ecuación y definida en el mismo dominio. Con estas bases, se establecen sistemas de ecuaciones lineales homogéneos (López, 2014).

Estos sistemas se solucionan numéricamente determinando la carga hidráulica en los nodos de la malla de elementos finitos donde no se conocía. Igualmente, proporciona valores nodales de la función de corriente, y otros resultados asociados al flujo de agua como gradientes hidráulicos, velocidades de flujo, presión de poro, grado de saturación, gasto de infiltración, entre otros (López, 2014). Como datos para obtener la solución mediante el método del elemento finito, se requiere definir: geometría, condiciones de frontera y las propiedades hidráulicas de los materiales.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1 Exploración geotécnica

En esta etapa fue posible identificar la composición y mineralogía de los estratos identificados también por Rapimán (2007), los que corresponden a estratos sedimentarios marinos dispuestos en niveles aterrazados como se observa en la **Figura 5.1**. La zona está compuesta principalmente por arenas finas fuertemente cementadas, arcillas inorgánicas de plasticidad media y conglomerados (A partir de este punto se define el termino arcilla desde el punto de vista ingenieril como: un material natural de grano fino que muestra plasticidad cuando es mezclado con cierto contenido de agua y que además tiene baja permeabilidad. Clasificado según la U.S.C.S.). Por otra parte, estos depósitos sedimentarios se encontraban alterados debido a distintos factores como el oleaje, las precipitaciones que erosionan el suelo a nivel superficial y factores antrópicos.



Figura 5.1: Estratos Cerro Maule. Elaboración propia.

“Estudio de deformaciones de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante modelos numéricos: Caso de estudio Cerro Maule, Comuna de Puerto Saavedra.”

En este punto, además, se identificaron suelos con posible origen volcánico los cuales no se comportan como los suelos clásicos presentes en la literatura convencional. Estos suelos constituyen una extensa formación situada en la cordillera misma y en los lugares sometidos directamente a la acción de los volcanes. Entre los 38° y 47° latitud Sur componen una superficie prácticamente continua. Se estima que estas depositaciones ocupan aproximadamente 432.000 [ha] entre la VII y X región (Suelos Volcánicos de Chile, 1985), en la **Figura C.1** del Anexo C se muestra la distribución de este tipo de suelos en el centro-sur de Chile.

Particularmente, en la zona de estudio se identifica un estrato de arenisca fuertemente cementada color gris conocida como Cancagua (H3 según Tabla 5.1). Teniendo en cuenta todos los antecedentes mencionados anteriormente se definió el perfil estratigráfico de la zona de estudio el cual se presenta en la **Tabla 5.1**. en base a la discretización estimada de los estratos constituyentes del Cerro Maule que se presentan en la **Figura 5.2**.

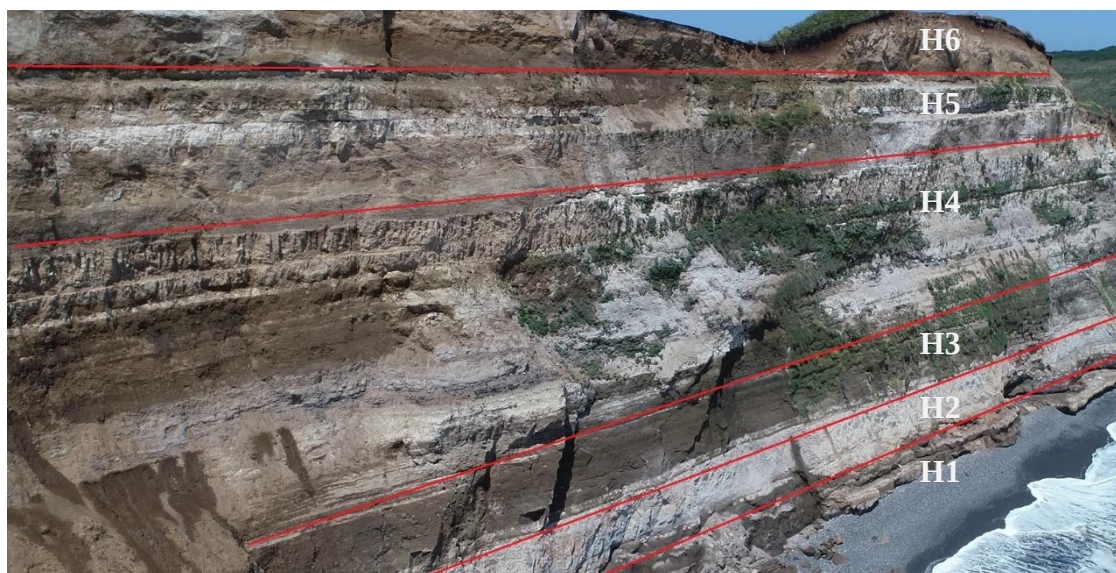


Figura 5.2. Discretización estimada de los estratos. Elaboración propia.

Tabla 5.1. Perfil Estratigráfico. Elaboración propia.

Profundidad		Horizonte	H1	H2	H3	H4	H5	H6
		Desde m.	0	4	8	19	39	51
		Hasta m.	4	8	19	39	51	64
Granulometría	Fracción menor a 3"	Grava %	-	-	-	-	-	-
		Arena%	60	-	70	-	-	-
		Fino %	40	100	30	100	100	100
Color estado natural			Café claro con tonos naranjos	Blanco con tonos café claro	Gris con tonos café oscuro	Café claro con tonos blancos	Café claro	Café con tonos naranjos
Olor suelo natural			Natural	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural
Plasticidad			Nula	Media	Media	Media	Media	Media
Graduación			Mal graduado	Bien graduado	Bien graduado	Bien graduado	Mal graduado	Mal graduado
Angulosidad de las partículas			sub angulosa	sub angulosa	sub angulosa	sub angulosa	sub angulosa	sub angulosa
Contenido de humedad			Húmeda	Húmeda	Húmeda	Húmeda	Húmeda	Húmeda
Consistencia			-	Firme	-	Firme	Firme	Firme
Compacidad			Densa	-	Densa	-	-	-
Estructura			Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
Cementación			Fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte
Origen			Natural	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural
Materia orgánica o raíces			Sin raíces	Sin raíces	Sin raíces	Sin raíces	Sin raíces	Sin raíces
Tipo estimativo de suelo según USCS			SM-ML	CL	SM	CL	ML	CL

Sumado a lo anterior, los terrenos de exploración permitieron identificar fallas en la parte superior de la ladera que se ubica en Cerro Maule y que se pueden observar en la **Figura 5.4**. Estas fueron medidas con brújula y presentaron una dirección de N23W corregido por declinación magnética (7°E para esta ubicación), además se constató una clara alineación con el borde de la carretera que une Puerto Saavedra con Boca Budi como se muestra en la **Figura 5.3**, en cuanto al manto de la falla, este resultó ser de 74° con respecto a la horizontal en dirección Este.

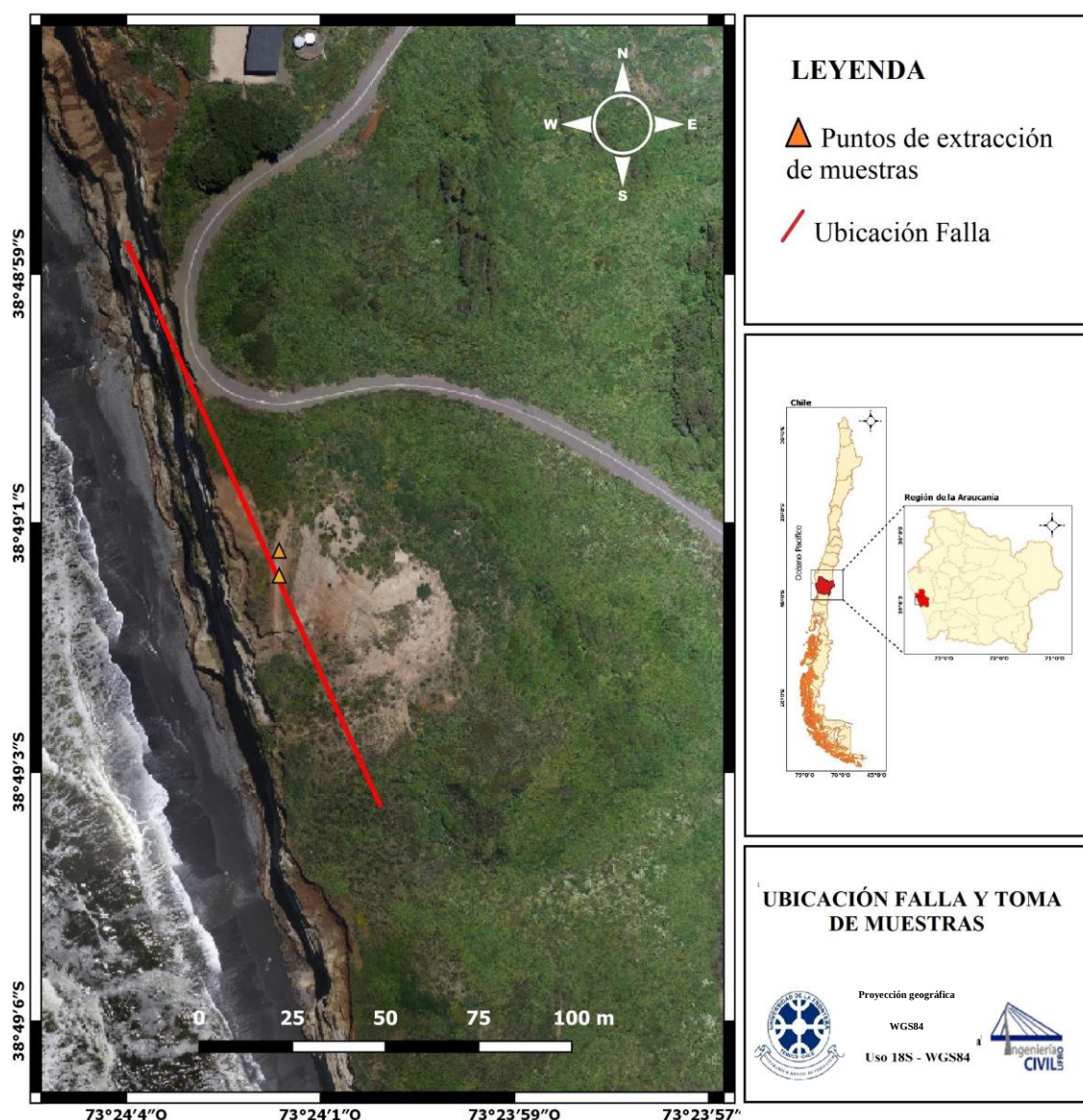


Figura 5.3: Ubicación de la falla y los puntos de extracción de muestras en la zona de estudio.
Elaboración propia.

Por otra parte, las fallas que se observaron en la zona de estudio contenían arcillas de consistencia blanda asociadas a la alteración que produce la falla (**Figura 5.4**). Esta arcilla además presentaba un alto contenido de agua, a diferencia del material de las paredes colindantes lo que podría sugerir que este tipo de discontinuidades actúan como conductores de agua. Todo esto genera un precedente de lo que podría estar generando los procesos remociones en masa, lo que permite enfocar el estudio en una zona crítica, la cual se muestra en la **Figura 5.6**.

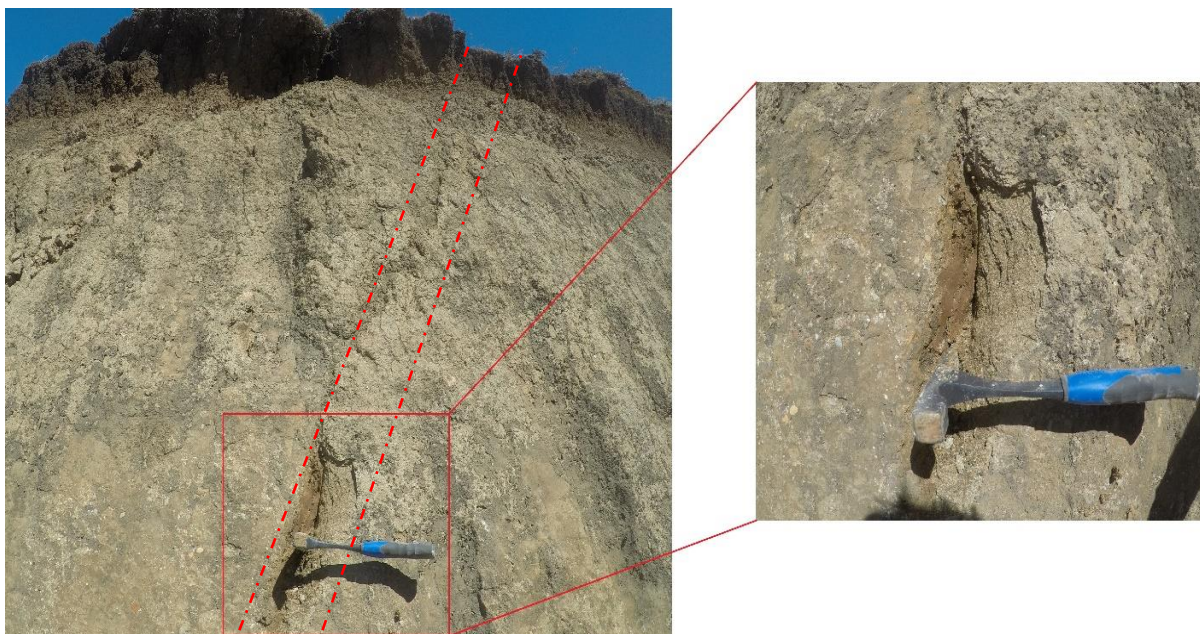


Figura 5.4: Falla en el borde del acantilado, con intrusiones de arcilla con consistencia blanda y alto contenido de agua. Elaboración propia.

Finalmente, a través de las observaciones realizadas se definieron los puntos de extracción de muestras que se pueden ver en la **Figura 5.3** y en mayor detalle su ubicación en la **Tabla 5.2**. Esta se enfocó en la zona donde se identificó la falla, la cual es el antecedente más importante de la evidencia de los procesos de remoción en masa en la zona, por lo tanto, caracterizar el material depositado dentro de la falla y el material colindante resultan de vital importancia para la posterior parametrización del modelo de deformación. De esta manera se trabajó en terreno para extraer muestras inalteradas (entendiéndose como muestras inalteradas aquellas en las que se conserva la estructura y la humedad que tiene el suelo en el lugar donde se obtiene) formando un cubo de 30 [cm] de lado como se muestra en la **Figura 5.5**.

Tabla 5.2. Ubicación de extracción de muestras . Elaboración propia.

Id	Latitud	Longitud
Muestra 1	38°49'01.7"S	73°24'01.7"W
Muestra 2	38°49'01.8"S	73°24'01.8"W



Figura 5.5. Fotografía muestra 1, ubicación: $38^{\circ}49'01.7''\text{S}$ – $73^{\circ}24'01.7''$. Elaboración propia.



Figura 5.6. Zona crítica en la que se enfoca el estudio. Elaboración propia.

“Estudio de deformaciones de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante modelos numéricos: Caso de estudio Cerro Maule, Comuna de Puerto Saavedra.”

5.2 Parámetros geomecánicos

En la **Tabla 5.3** se observan los resultados de los parámetros geomecánicos de cada estrato constituyente del Cerro Maule necesarios para la parametrización del modelo. Estos fueron obtenidos a partir de ensayos geotécnicos debidamente normados y estimaciones en base a bibliografía especializada. En general en la zona existe presencia de arenas finas, limos y arcillas en donde los estratos base presentan una cementación fuerte relacionada con la compactación que proporciona el mismo peso de la ladera debido a eso son los valores crecientes en profundidad (desde H6 a H1) de los parámetros como el módulo de elasticidad, por otra parte, en base a las observaciones realizadas descritas en sección 4.1. se considera que H3 corresponde a suelos de composición volcánica.

Tabla 5.3. Parámetros geomecánicos de la zona de estudio, obtenido a través de ensayos geotécnicos y estimaciones. Elaboración propia.

Propiedades	H1	H2	H3	H4	H5	H6	Falla
Elasticidad (E) [Ton/m ²]	190000	120000	165000	50000	10000	5000	1000
Coefficiente de Poisson	0,3	0,3	0,3	0,3	0,31	0,32	0,35
peso unitario [γ] [Ton/m ³]	2,05	1,85	1,75	1,76	1,59	1,56	1,43
peso unitario saturado [γ _s] [Ton/m ³]	2,2	2,05	1,88	1,95	1,75	1,72	1,65
Cohesión [c] [Ton/m ²]	30	15	25	15	7,2	6	4,1
Angulo de fricción [φ]	40°	25°	32°	25°	28°	27°	24°
Permeabilidad [k] [m/s]	1 · 10 ⁻⁸	1 · 10 ⁻⁹	1 · 10 ⁻⁶	1 · 10 ⁻⁹	1 · 10 ⁻⁷	1 · 10 ⁻⁷	1 · 10 ⁻⁹
Consistencia	-	Muy firme	-	Muy firme	Firme	Firme	Firme
Compacidad	Densa	-	Densa	-	-	-	-
Cementación	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Débil
Tipo estimativo de suelo según USCS	SM-ML	CL	SM	CL	ML	CL	CH

5.3 Modelo topográfico

En la **Figura 5.7** se observan los resultados del modelo digital de elevación construido a partir del procesamiento de 950 imágenes obtenidas por el dron, el modelo tiene una resolución de 5 [cm] lo que es una reproducción del terreno mucho más precisa que los modelos de elevación digital disponibles en la web. La zona presenta un relieve variado y en general pendientes abruptas asociado a los acantilados del borde costero, la altura máxima es de 73,94 [m] la cual se presenta en la zona del Cerro Maule disminuyendo hacia el sector Boca Budi (dirección N-W a S-E).

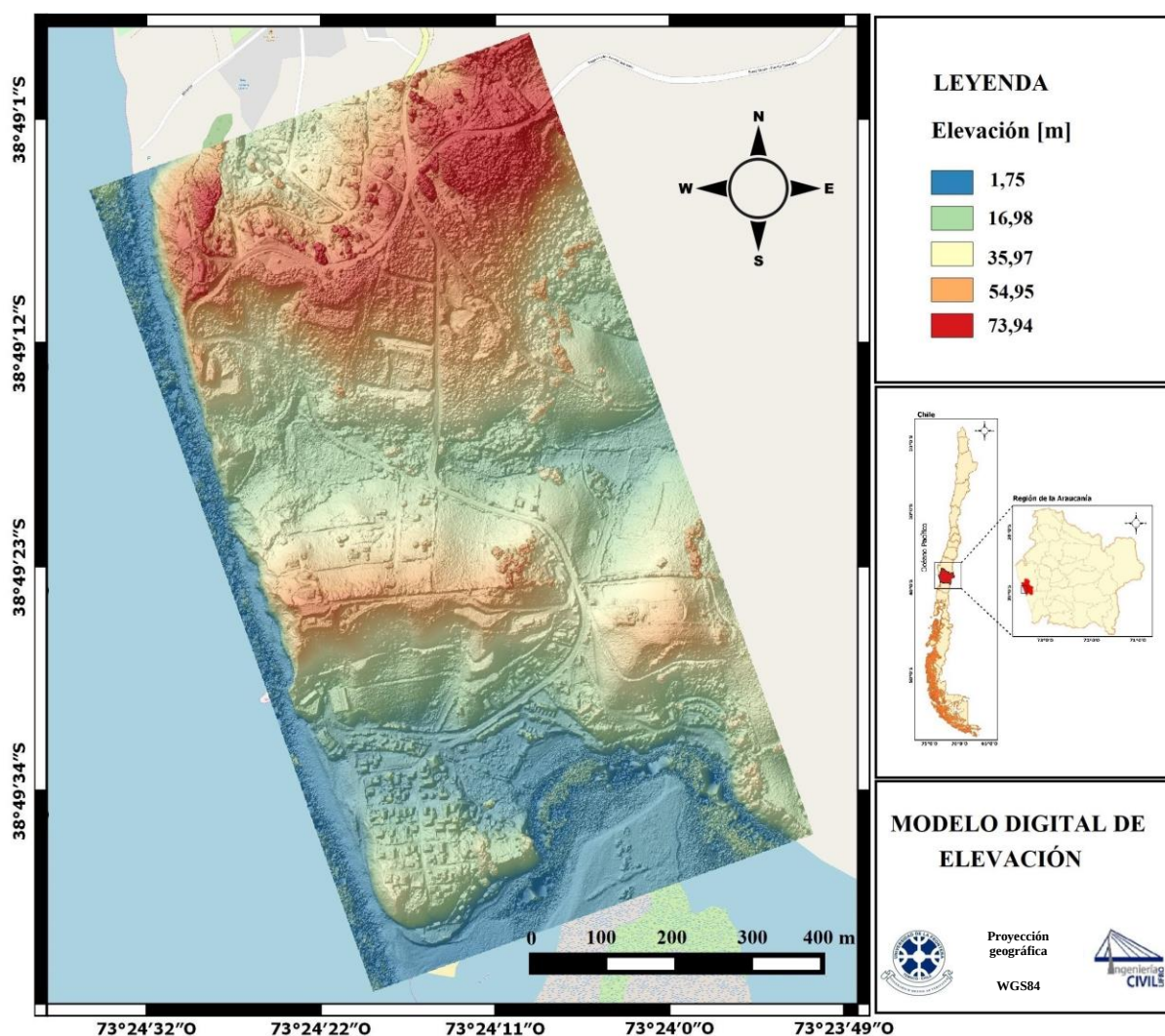


Figura 5.7. Modelo digital de elevación, obtenido a través del procesamiento de imágenes obtenidas por dron. Elaboración propia.

5.4 Eventos de precipitación

En base al procedimiento descrito en la sección 4.4 de la metodología se obtienen los umbrales relativos mayor al 95% del total de los datos estudiados de la estación meteorológica de Puerto Saavedra en relación con los aspectos de precipitación diaria, duración de cada evento y precipitación acumulada en cada evento los que se muestran en la **Tabla 5.4**.

Tabla 5.4. Umbrales críticos en relación con los eventos de precipitación. Elaboración propia.

Precipitación diaria	Duración del evento	Precipitación acumulada
30 [mm]	7 [días]	90 [mm]

A partir de estos umbrales críticos se definieron las consideraciones que se utilizaron para elegir los eventos de precipitación que se estudiaron los que se presentan en la **Tabla 5.5**.

Tabla 5.5. Criterios establecidos para elegir los eventos de precipitación. Elaboración propia.

Consideraciones	Evento intenso	Evento Prolongado	Evento de baja precipitación
Precipitación acumulada del evento	Mayor a 90 [mm]	Mayor a 90 [mm]	Menor a 30 [mm]
Duración del evento	Menor a 6 [días]	Mayor a 7 [días]	Mayor a 3 [días]
Precipitación límite en un día	Mayor a 30 [mm]	Menor a 20 [mm]	Menor a 15 [mm]

Las tablas de frecuencia que se utilizaron para el análisis de los datos de la estación meteorológica a partir de los cuales se determinaron los criterios de elección de los eventos se pueden ver en detalle en el Anexo B. Con estos criterios se procuró homogeneizar los casos de análisis con el objetivo de seleccionar bajo los parámetros establecidos eventos que sean representativos de los patrones identificados, en base a esto se escogieron cinco eventos de cada tipo que fueron utilizados como parámetros de entrada en el modelo de elementos finitos. A continuación, en las **Figuras 5.8 a 5.10** se presenta un evento de cada tipo (prolongado de baja intensidad, intenso de corta duración y evento de baja precipitación) que se estudió y en el anexo B muestran los demás eventos.

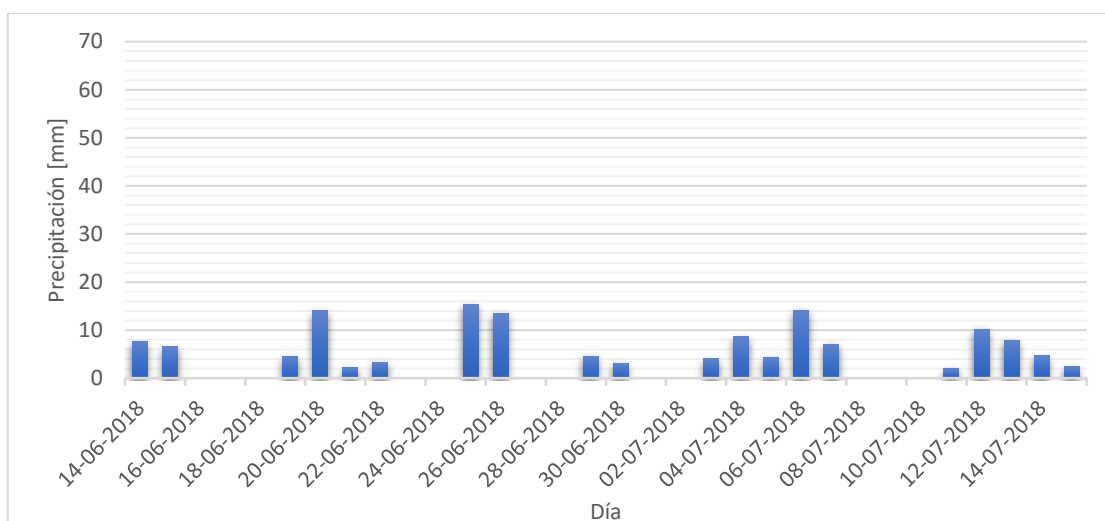


Figura 5.8. Evento de precipitación prolongado de baja intensidad. Elaboración propia.

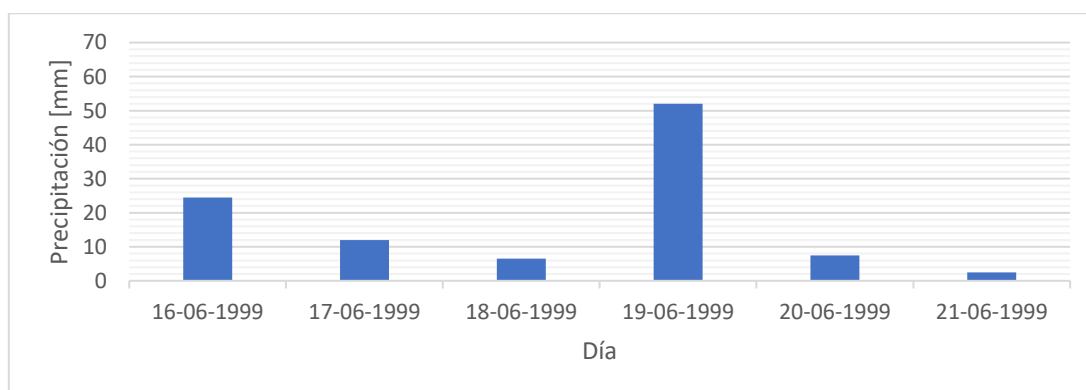


Figura 5.9.Evento de precipitación intenso de corta duración. Elaboración propia.

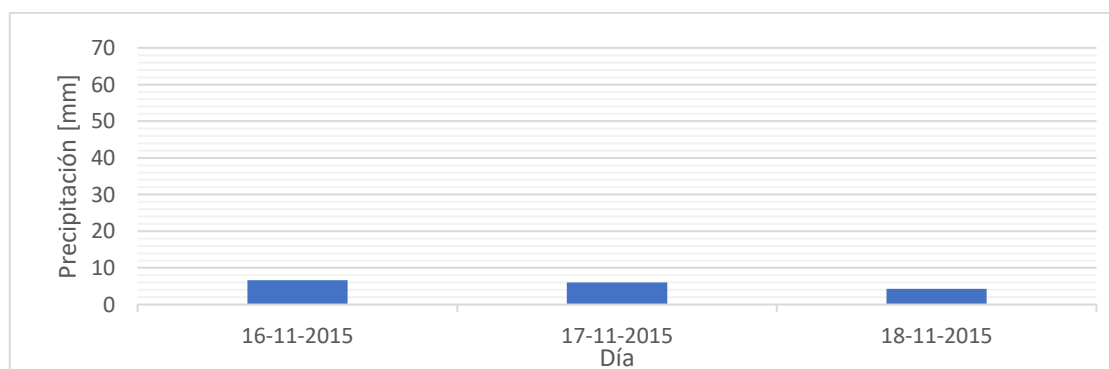


Figura 5.10. Evento de baja precipitación. Elaboración propia.

“Estudio de deformaciones de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante modelos numéricos: Caso de estudio Cerro Maule, Comuna de Puerto Saavedra.”

5.5 Modelo numérico

En la **Figura 5.11** se muestra la discretización del modelo de elementos finitos realizada en el software GTS-NX la cual consta de elementos del tipo hexaedros y tetraedros de segundo orden, la parametrización del modelo se realiza en base a los parámetros presentados en la sección 5.1 y 5.2 referentes a las propiedades geomecánicas y la topografía, en donde es posible observar se representan seis estratos principales junto con la falla encontrada en la zona de estudio.

En las siguientes subsecciones se presenta el campo de desplazamiento obtenido en la zona de estudio a partir del este modelo de elementos finitos y se describen los resultados para un evento de cada tipo, ya que en general los eventos con las mismas características tienen un comportamiento similar, lo que se puede comprobar en las Figuras del Anexo D donde se presentan los resultados obtenidos para todos los eventos estudiados.

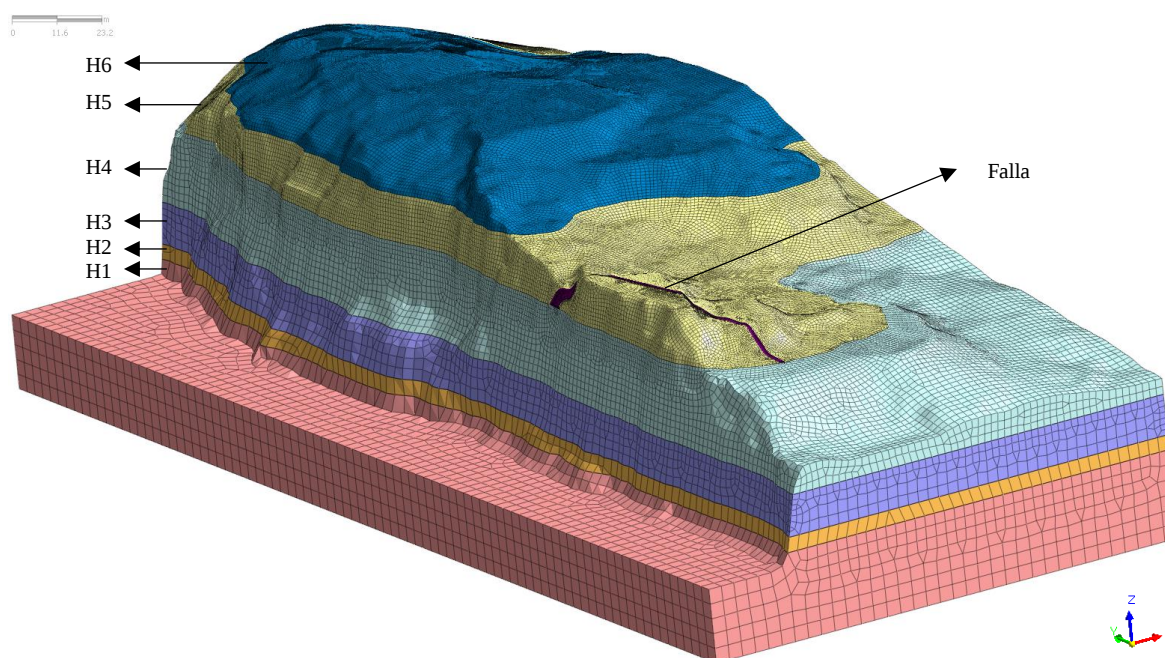


Figura 5.11. Discretización modelo de elementos finitos. Elaboración propia.

5.5.1 Eventos de precipitación prolongada de baja intensidad

En la **Figura 5.12** se observa el caso correspondiente a un evento de precipitación prolongado de baja intensidad. En la figura se puede apreciar que las deformaciones se concentran en el borde de la ladera en la zona donde se encontró la falla (mencionada en la sección 4.1), específicamente la localización de estas deformaciones es en la zona “A” (**Figura 5.12**) de donde se ubica dicha discontinuidad, en dirección hacia la costa (dirección Oeste) con un valor máximo 1,38 [mm], estas deformaciones disminuyen abruptamente a la derecha esta falla (sector “B”) hacia el interior, donde la ladera permanece estable y sin deformaciones al igual que en la zona superior de la ladera (sector “C”).

En la **Tabla 5.6** se presentan los resultados de deformación máxima obtenidas para todos los eventos de precipitación prolongada de baja intensidad representados en el modelo numérico, las cuales en promedio presentan deformaciones máximas de 1,35 [mm]. En general la magnitud y localización de las deformaciones para este tipo de eventos es similar, todas concentradas en una superficie plana de deslizamiento como lo que se observa en el sector “A” de la **Figura 5.12** presentándose una condición estable y sin deformaciones en los sectores “B” y “C” lo que también se puede ver en más detalle para los demás eventos en las figuras del Anexo D.

Tabla 5.6. Resultados deformación máxima para los eventos de precipitación de tipo estratiforme. Elaboración propia.

ID	Fecha	Deformación Max. [mm]
1	jun-90	1,43
2	jun-09	1,29
3	jun-12	1,36
4	jul-15	1,30
5	jun-18	1,38

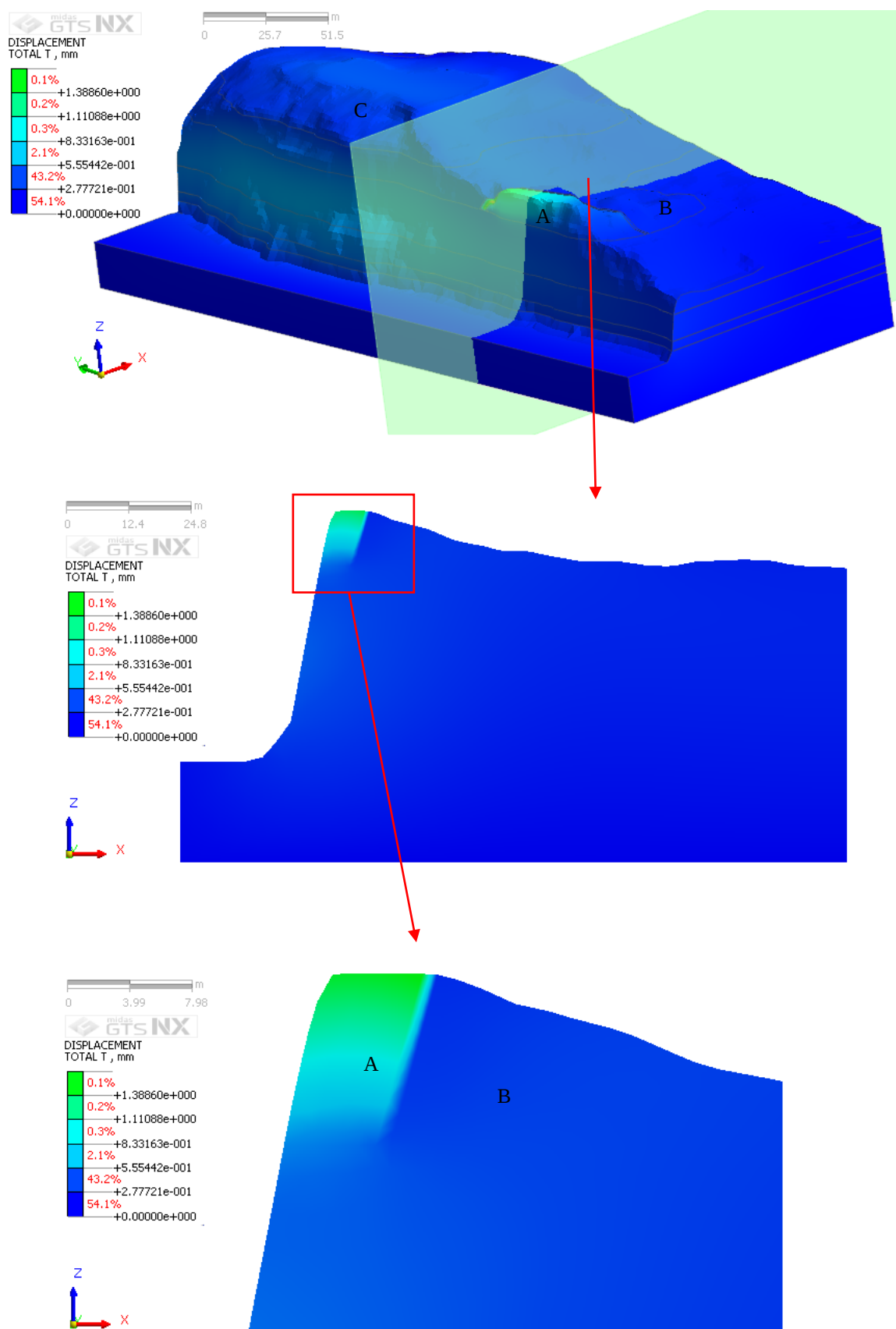


Figura 5.12. Modelo de deformación, evento de precipitación prolongada. Elaboración propia.
 “Estudio de deformaciones de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante
 modelos numéricos: Caso de estudio Cerro Maule, Comuna de Puerto Saavedra.”

5.5.2 Eventos de precipitación intensa de corta duración

Durante los eventos de precipitación intensa de corta duración representados en la **Figura 5.13** las deformaciones al igual que en el caso anterior se localizan a la izquierda de donde se ubica la falla en el borde la ladera (sector “A”), sin embargo, el área afectada es ligeramente menor pero igualmente, en dirección hacia la costa (dirección Oeste) con un valor máximo de 0,97 [mm], presentándose una condición estable y sin deformaciones hacia el interior y en la zona superior de la ladera referentes a los sectores “B” y “C” respectivamente.

En la **Tabla 5.7** se presentan los resultados de obtenidos para los eventos de precipitación intensa de corta duración representados en el modelo numérico las cuales en promedio tienen deformaciones máximas de 0,94 [mm]. La localización de las deformaciones producidas por este tipo de eventos, similar al caso anterior se ubican en la superficie de deslizamiento que proporciona la falla encontrada en terreno (sector “A”), sin embargo, la magnitud de estas deformaciones disminuye 0,41 [mm] promedio, en comparación con los eventos de precipitaciones prolongadas, por otra parte, para todos estos casos se presenta una condición estable y sin deformaciones en los sectores “B” y “C” lo que se puede observar con mayor detalle en las figuras del Anexo D.

Tabla 5.7. Resultados deformación máxima para los eventos de precipitación de tipo convectiva.
Elaboración propia.

ID	Fecha	Deformación Max [mm]
1	abr-80	1,02
2	ene-00	0,89
3	jun-99	0,97
4	jun-10	0,94
5	abr-18	0,91

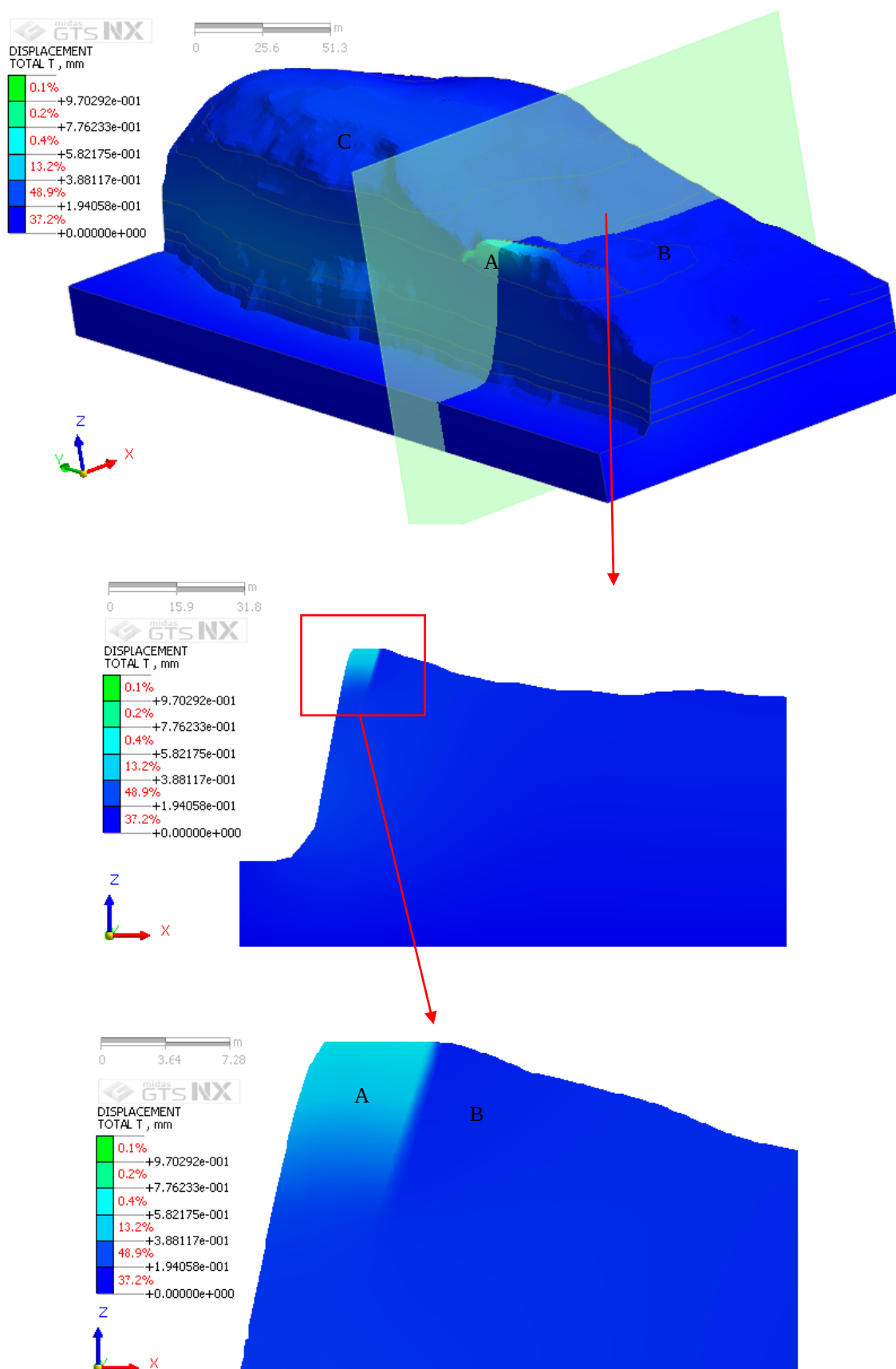


Figura 5.13. Modelo de deformación, evento intenso de corta duración. Elaboración propia.

“Estudio de deformaciones de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante modelos numéricos: Caso de estudio Cerro Maule, Comuna de Puerto Saavedra.”

5.5.3 Eventos de baja precipitación

En el caso de los eventos de baja precipitación, las deformaciones son casi imperceptibles como se aprecia en la **Figura 5.14** en el cual se observan deformaciones máximas de 0,28 [mm] en dirección hacia la costa (dirección Oeste) concentradas en la parte superior del sector “A” a la izquierda de la falla. Estas leves deformaciones se presentan sobre un área afectada mucho menor en comparación con los dos casos anteriores. Para el resto de la zona, en la derecha de la falla (sector “B”) y en la parte superior de la ladera (sector “C”) la condición es estable y sin deformaciones.

En la **Tabla 5.8** se presentan los resultados de deformación máxima obtenido para los eventos de baja precipitación representados en el modelo numérico las cuales en promedio tienen un desplazamiento máximo de 0,29 [mm]. Para todos los eventos analizados la ubicación de las deformaciones es similar siendo estas mínimas y concentradas en el sector “A”, se resalta la poca incidencia de este tipo de precipitaciones en la zona donde además no se presentan deformaciones hacia el interior de la ladera y en la parte superior, sector “B” y “C” respectivamente.

Tabla 5.8. Resultados deformación máxima para los eventos de baja precipitación. Elaboración propia.

ID	Fecha	Deformación Max [mm]
1	abr-83	0,31
2	mar-85	0,28
3	may-92	0,30
4	sept-08	0,27
5	nov-15	0,29

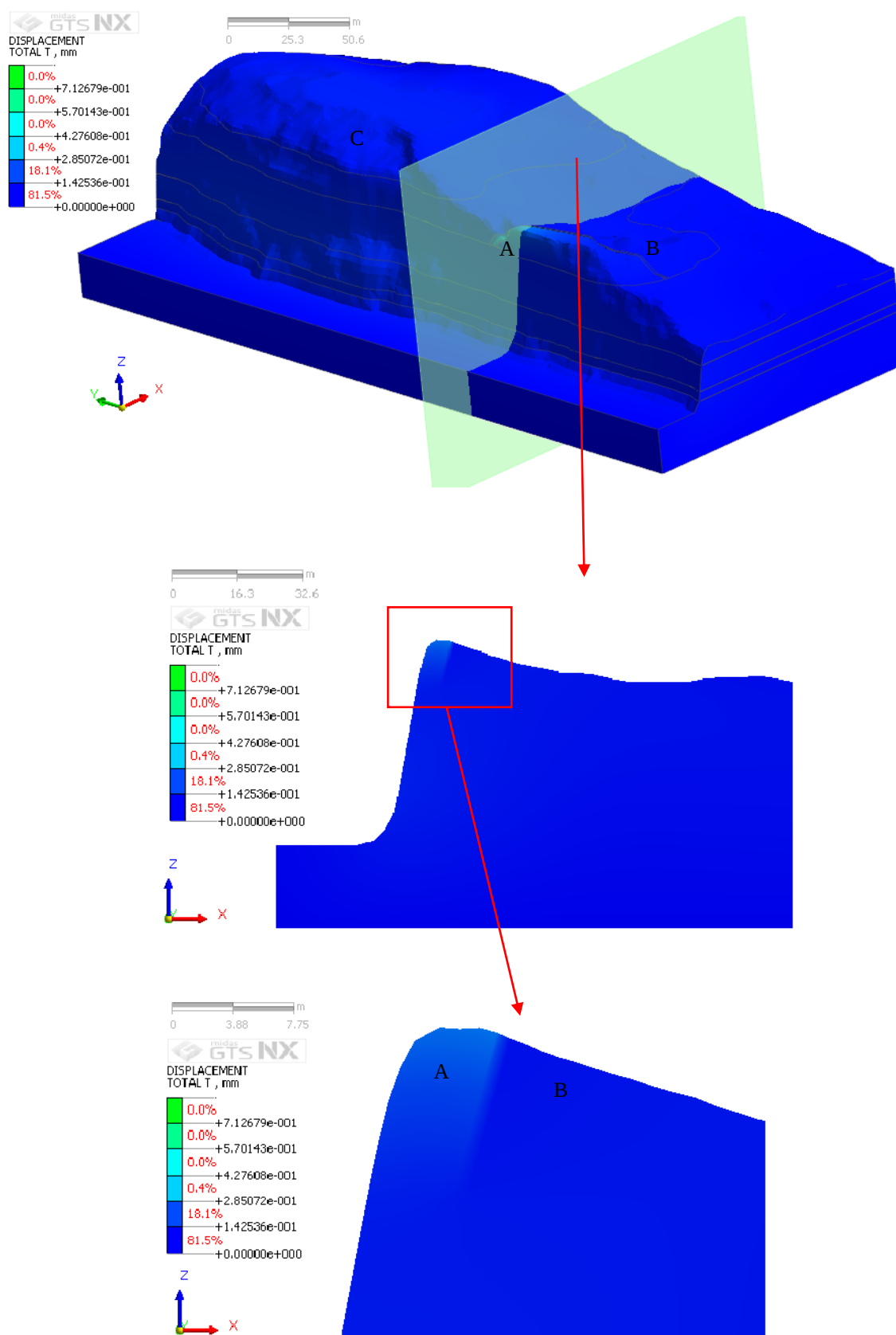


Figura 5.14. Modelo de deformación, evento de baja precipitación. Elaboración propia.

“Estudio de deformaciones de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante modelos numéricos: Caso de estudio Cerro Maule, Comuna de Puerto Saavedra.”

5.5.4 Comparación valores de deformación para los distintos eventos

En la **Figura 5.15** se presentan los resultados promedio de deformación obtenidos para los distintos casos estudiados, donde se compara la intensidad (cuadrados) y la precipitación acumulada (triángulos) con las deformaciones (eje x), en general se observa que las precipitaciones prolongadas de baja intensidad producen deformaciones mayores en comparación con los eventos de precipitación intensa de corta duración pese a tener similares niveles de precipitación acumulada, en este punto la disparidad radica en la intensidad de los eventos donde en promedio se presentan diferencias de 8 [mm/día] aproximadamente. En los casos de baja precipitación se puede ver una clara diferencia en cuando a las deformaciones que estos producen en comparación con los dos tipos de eventos antes mencionados, por otra parte, se observa una intensidad similar entre los eventos de precipitación prolongada y los de baja precipitación, sin embargo, la lluvia acumulada es mucho mayor en el primer caso.

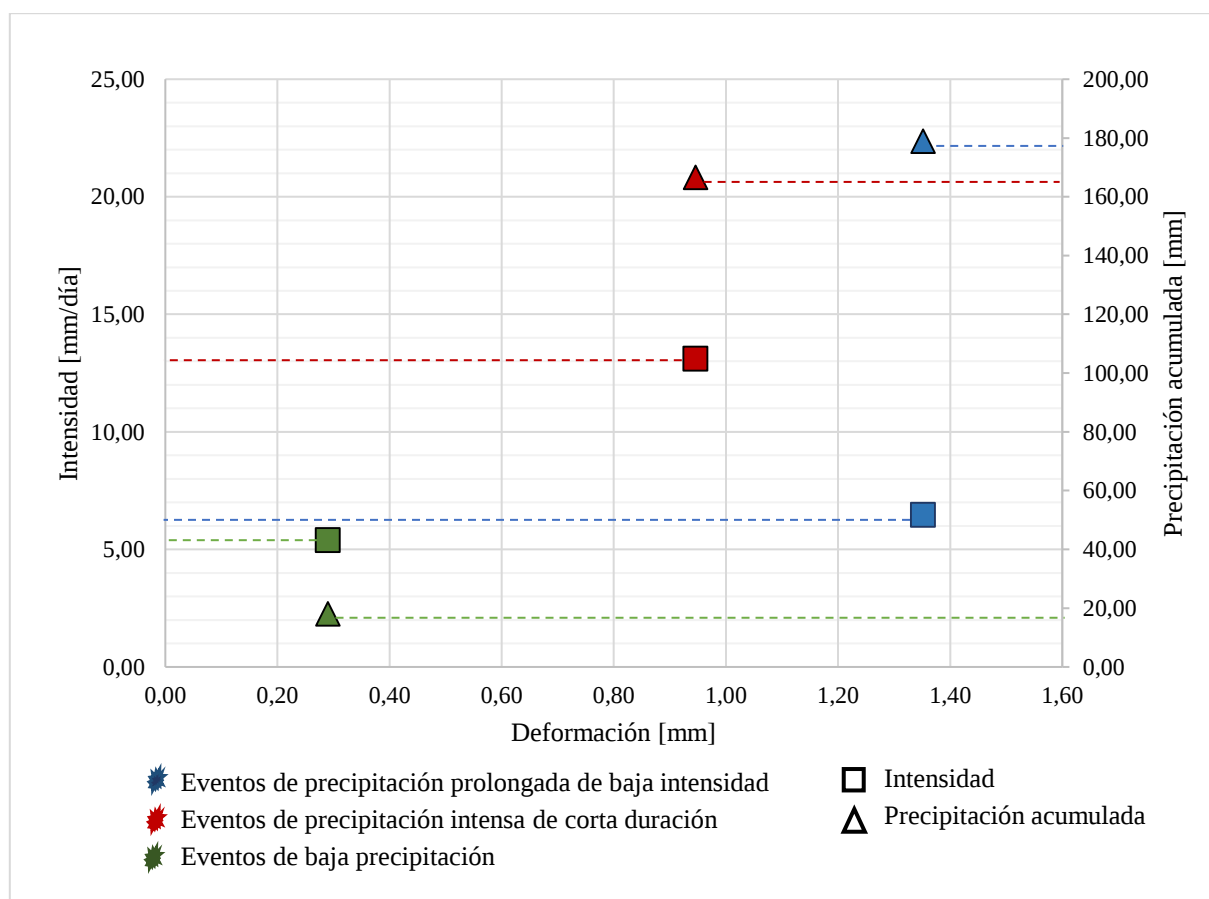


Figura 5.15. Comparación entre deformación intensidad y precipitación acumulada. Elaboración propia.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

El modelo numérico permitió cuantificar la deformación de la ladera estudiada a partir de la integración de propiedades geométricas de la superficie proporcionadas por el modelo digital de elevación, las propiedades geomecánicas estimadas y medidas en laboratorio y los eventos de precipitación analizados a partir de los datos de la estación meteorológica de Puerto Saavedra. Cumpliendo a cabalidad con cada uno de los objetivos específicos planteados lo que a su vez permite alcanzar el objetivo general de este estudio referente a comprender el efecto de las precipitaciones en las deformaciones de las laderas ubicadas en el Cerro Maule.

6.1 Factor geotécnico.

La ubicación espacial de las deformaciones obtenidas para todos los casos analizados, se concentran en el borde del acantilado, en donde la falla encontrada en terreno actúa como superficie de deslizamiento como se observa en **la Figura 5.12, 5.13 y 5.14**. Esta fina capa de material arcilloso (Se define el termino arcilla desde el punto de vista ingenieril como: un material natural de grano fino que muestra plasticidad cuando es mezclado con cierto contenido de agua y que además tiene baja permeabilidad. Clasificado según la U.S.C.S.) presente entre estos estratos de mayor competencia es una superficie plana de debilidad lo que queda en evidencia a partir de los ensayos de resistencia (corte directo) realizados a las muestras extraídas en terreno, donde los parámetros de resistencia de la arcilla presente en la falla corresponden a $\phi = 24^\circ$ y $c = 4,1 [Ton/m^2]$ mientras que el estrato colindante a esta falla $\phi = 28^\circ$ y $c = 7,2 [Ton/m^2]$.

Por otra parte, este tipo de discontinuidades generalmente funcionan como conductores de agua lo que produce el aumento en las presiones de poro y en consecuencia una disminución en los esfuerzos efectivos (Aristazábal *et al.*, 2010). Esto concuerda con la humedad determinada en laboratorio, en donde el suelo arcilloso dentro de esta discontinuidad presentó una humedad de 60,43% y el material de las paredes colindantes 36,62%, lo que, además, es consistente con el modelo numérico (**Figura 6.1**) en donde es posible observar el aumento en la saturación lo que se refleja con el incremento en la presión de poros en el interior de la falla debido a los efectos de la precipitación. Esto está propiciando el desarrollo de deformaciones debido a la disminución de los esfuerzos efectivos y al efecto de lubricación que proporciona la arcilla presente dentro de esta falla.

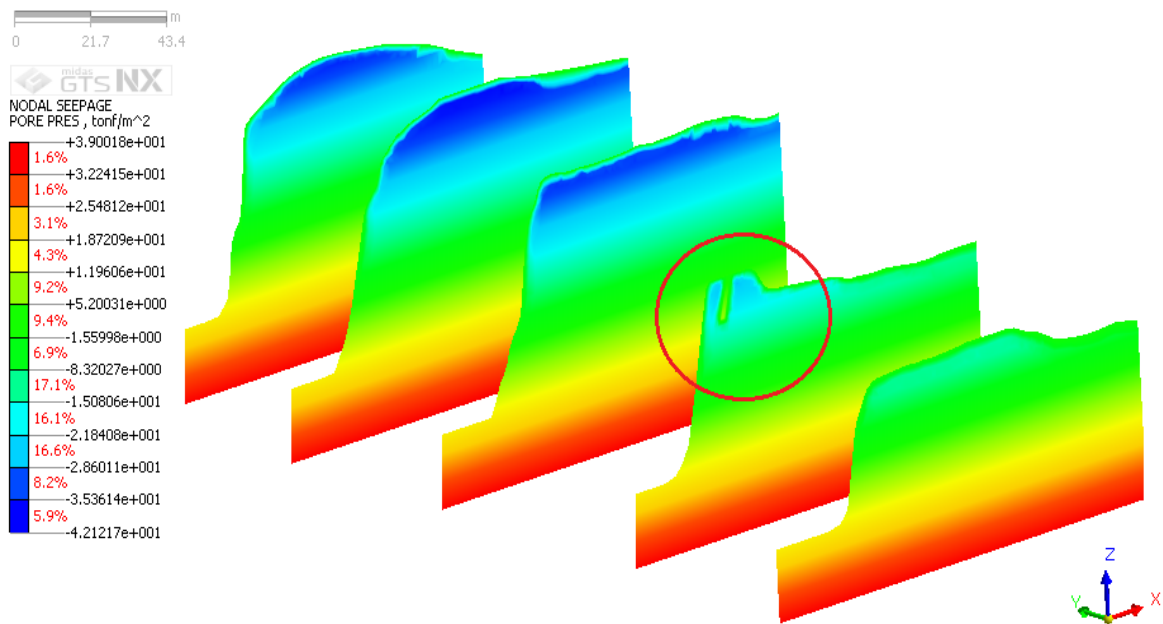


Figura 6.1. Presión de poro en condiciones de precipitación. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en terreno y a partir del modelo de deformación sugieren que la discontinuidad encontrada en Cerro Maule actúa como superficie de falla. Esto es consistente con lo que plantea Gokceoglu *et al.* (2000), el cual ha mostrado resultados similares en laderas altamente susceptibles a fallar debido principalmente a discontinuidades y topografías abruptas. Ambos factores mencionados por este autor se hacen presente en la zona de estudio lo que reafirma este planteamiento. En este ámbito es posible afirmar que las condiciones geomecánicas del macizo son un factor fundamental de los procesos de remoción en masa que ocurren en Cerro Maule por lo que su caracterización resulta fundamental para realizar un buen análisis.

En relación con las características geológicas de la zona, estas presentan una condición favorable para la ocurrencia de remociones en masa ante eventos de precipitación, ya que corresponden a suelos compuestos por depósitos sedimentarios meteorizados, con altos contenidos de arcillas (SERNAGEOMIN, 2003). Este tipo de suelos son altamente inestables en condiciones saturadas. Sin embargo, en condiciones secas pueden presentar altas resistencia. Debido a esto es importante tener en cuenta los cambios que pueda tener una ladera por los efectos de las lluvias de tal forma de estudiar los casos mas desfavorables que permitan implementar correctas medidas de mitigación.

6.2 Factor hidrometeorológico

Respecto a los eventos hidrometeorológicos asociados a las precipitaciones los resultados de deformación muestran que los procesos no son uniformes para los tres tipos de eventos analizados, esto se produce debido a la composición de los suelos de la zona, los cuales en sus estratos superficiales corresponden a arcillas y limos (De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (U.S.C.S)) según las exploraciones realizadas en terreno y la clasificación de suelos determinada en laboratorio que se describe en el Anexo A.

Este tipo de suelos tienen características impermeables, por lo tanto, tienen una baja capacidad de infiltración (Angelone *et al.*, 2006), lo que provoca que se vean afectados en mayor medida por eventos de precipitación prolongados de baja intensidad tal y como se ha evidenciado a partir del modelo numérico y que se puede observar en la **Figura 5.15**. Esto hace que aumente la saturación, el peso de la ladera, las presiones de poro y reduce la succión por el avance del frente húmedo. Debido a esto deformaciones máximas se producen por eventos de precipitación de menor intensidad, pero más prolongados en el tiempo similar a lo reportado por Rahardjo *et al.* (2007) y Setyo y Liao (2008) en estudios similares, por lo que los resultados del modelo numérico resultaron ser consistentes con este planteamiento.

En comparación con los eventos de precipitación intensa, estos provocaron deformaciones menores con diferencias en promedio de 0,41 [mm] lo que se explica con lo mencionado anteriormente, sobre la capacidad de infiltración del suelo, en donde se llega a un umbral en el que el suelo ya no es capaz de infiltrar el agua proveniente de las precipitaciones, luego lo que no se infiltra, fluye por la superficie como escorrentía superficial (**Figura 6.2**). Debido a esto a pesar de que la precipitación acumulada en los eventos intensos y los prolongados sea similar, no tienen el mismo efecto en la zona de estudio lo que se puede observar en la **Figura 5.15**, esto que está directamente relacionado con la distribución de las precipitaciones a lo largo de los días.

Estos resultados obtenidos a partir del modelo numérico, en donde los suelos de la zona se ven afectados en mayor medida por precipitaciones prolongadas en comparación con las precipitaciones intensas, concuerdan con lo propuesto por Gofar *et al.* (2008) quien estudio casos similares en dos laderas con suelos diferentes. Sus resultados mostraron que los suelos de grano grueso (arenas y gravas) son más influenciados por lluvias cortas e intensas, mientras que en suelos de grano fino (limo y arcillas) presentan mayor susceptibilidad ante precipitaciones de mayor duración, similar a lo que se observó a partir del modelo numérico desarrollado en este trabajo.

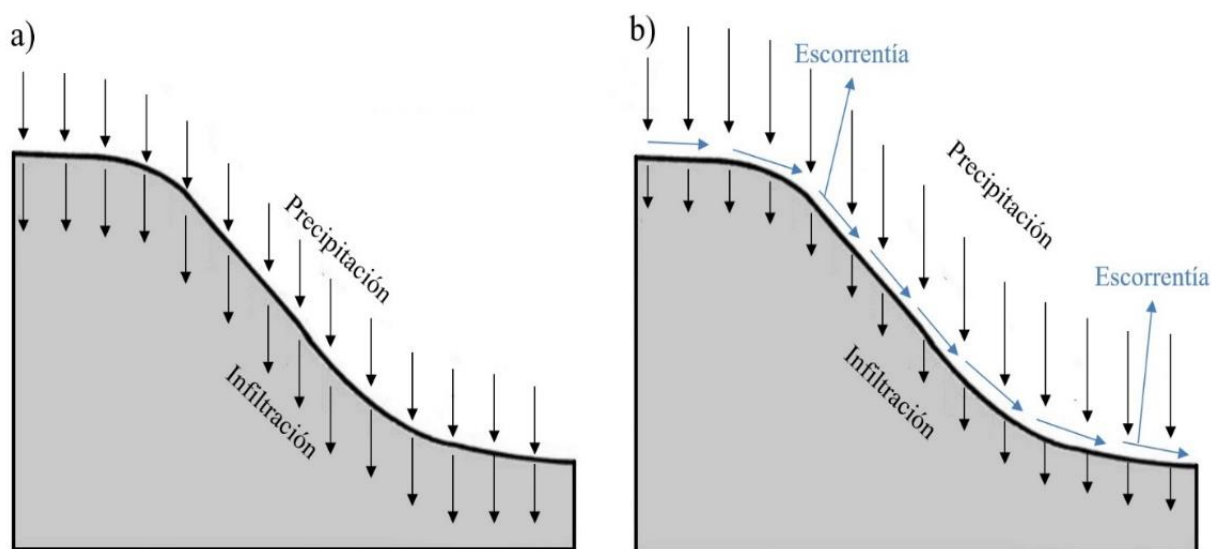


Figura 6.2. Esquema básico infiltración. a) precipitación menor a la capacidad de infiltración. b) precipitación intensa mayor a la capacidad de infiltración, se produce escorrentía superficial (Schaetzl y Anderson, 2005).

En este ámbito con el modelo numérico fue posible de representar este fenómeno, fijando condiciones límites de infiltración cuando se introducen distintas precipitaciones en la superficie del suelo (parámetro de entrada). De esta forma, si la intensidad de la precipitación es mayor que la capacidad de absorción del suelo, esta fluye a través de la superficie (escorrentía superficial) y el suelo solo infiltra lo que su capacidad de absorción le permite (Rahardjo *et al*, 2007; Tsaparas *et al.*, 2012). Por lo que, en este sentido el modelo ha logrado ser una correcta representación de la realidad permitiendo comprender este fenómeno.

En cuanto a los eventos de baja precipitación, estos fueron estudiados con el objetivo de establecer una comparación con los eventos extremos. En este ámbito, estos mostraron una respuesta casi nula de la ladera con respecto a las deformaciones (**Figura 5.14**), debido principalmente a las características de los suelos de la zona, que poseen baja permeabilidad y a la baja precipitación acumulada en estos eventos, lo que se puede observar en la **Figura 5.15**. Esto sugiere que los eventos hidrometeorológicos extremos asociados a las precipitaciones intensas y en mayor medida prolongadas, producen una activación de la ladera propiciando los procesos de remoción en masa en la zona.

6.3 Dinámica de los procesos de remoción en masa en la zona de estudio

Todos los antecedentes mencionados anteriormente permiten comprender la dinámica de los procesos que han ocurrido en la zona de estudio, de modo que, las condiciones geológicas y geomecánicas se potencian debido a las precipitaciones, lo que tiene diversas implicancias en relación con los factores desencadenantes de remociones en masa. En donde a partir del modelo numérico se evidencian pequeñas deformaciones (**Figura 5.12, 5.13 y 5.14**) sobre la falla encontrada en terreno, las que finalmente podrían producir el colapso por acumulación de esfuerzos, causando desprendimientos repentinos de material.

Este tipo de movimientos tiene relación con lo propuesto por Espinoza (2014) en donde se establece que un proceso remoción en masa se puede interpretar como movimientos de dos etapas. En la primera etapa se producen pequeñas deformaciones imperceptibles, esta etapa puede durar horas, días e inclusive años (Zhou *et al.*, 2013) dependiendo del tipo de movimiento y sus factores asociados como la precipitación, la pendiente, la litología, entre otros. Posterior a esto se presenta la segunda etapa en donde puede existir una fase de rotura que se caracteriza por la formación de una superficie de falla la cual puede estar controlada por la geología del terreno, provocando el colapso de la estructura de suelo.

Este planteamiento es consistente con las remociones en masa que se han producido en la zona de estudio, en donde los procesos han sido rápidos asociados a colapsos repentinos de la ladera. Además, en la zona no hay indicios de procesos lentos o remociones de tipo deslizamientos progresivos los cuales quedarían en evidencia en la superficie de la zona de estudio lo que hace reafirmar esta hipótesis.

Por otra parte, Oliva (2015) también propone que los movimientos de grandes masas de suelo en general se producen a lo largo de una superficie más o menos definida. En la mayoría de los casos dicha masa permanece intacta durante las primeras etapas, pero finalmente se produce el colapso a medida que el movimiento progresa debido a pequeñas deformaciones que se producen en el tiempo (Oliva, 2015). Todos estos antecedentes sugieren que las pequeñas deformaciones producidas por los distintos eventos de precipitación finalmente inducirán al colapso de las laderas lo que ha quedado en evidencia con el retroceso progresivo del Cerro Maule a través de los años lo que se puede ver en la **Figura 6.3** y en mayor detalle en la **Figura 6.4**.

En relación con esto, el modelo numérico permitió representar las pequeñas deformaciones que se manifiestan antes del colapso asociado a la primera etapa de los procesos de remoción en masa

según lo propuesto por Espinoza (2014) y Oliva (2015). Por otra parte, las deformaciones obtenidas a partir del modelo tendrían que, a futuro, ser validadas a través de un monitoreo continuo con instrumentación de precisión tales como GPS o series de tiempo InSAR. A pesar de eso y en base a todos los antecedentes generados en esta investigación, el modelo numérico ha representado de buena forma los procesos que se generan en la zona siendo consistente con las observaciones en terreno.



Figura 6.3. Retroceso progresivo del Cerro Maule a través de los años (Google Earth).
Elaboración propia.



Figura 6.4. A la izquierda situación año 2012 (Jara, 2012). A la derecha situación año 2019.
Elaboración propia.

“Estudio de deformaciones de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante modelos numéricos: Caso de estudio Cerro Maule, Comuna de Puerto Saavedra.”

6.4 Perspectivas a futuro y propuestas de mejora

Este proyecto ha estudiado los procesos de remoción en masa asociados a eventos hidrometeorológicos en ambientes costeros, los cuales habían sido analizados solo teniendo en cuenta los factores sísmicos como desencadenantes (Davis y Karzulovic, 1963; Antinao y Gosse, 2008; Bray y Frost, 2010; Mardones y Rojas, 2012). En este ámbito, el desarrollo del modelo numérico a partir de la integración de parámetros geomecánicos, topográficos e hidrometeorológicos ha permitido comprender correctamente los procesos que han ocurrido en la zona, sin embargo, ha futuro se podría realizar un análisis más robusto profundizando ciertos aspectos que no pudieron ser abordados en esta investigación.

En relación con esto, no se ha podido incorporar de forma precisa el efecto de la lluvia antecedente en los suelos, lo cual es un factor importante que predispone las condiciones de estabilidad de una ladera. Su influencia es difícil de cuantificar ya que depende de diferentes factores, entre ellos la heterogeneidad de los suelos y las variaciones locales del clima (Aristazábal *et al.*, 2010). Este problema ha sido observado por distintos autores (Rahardjo *et al.*, 2007; Lara y Sepúlveda, 2008; Crosta y Frattini, 2008; Garcia *et al.*, 2012; entre otros). Sin embargo, este aspecto podría ser mejorado integrando la metodología adoptada por López y Mendoza (2016), por lo que se sugiere su implementación a futuro.

Otro aspecto a mejorar, es la determinación exacta de todos los parámetros geomecánicos y la disposición (manteo) de los estratos constituyentes del Cerro Maule. Idealmente a partir sondajes y ensayos triaxiales que permitan el ajuste del perfil estratigráfico y de modelos constitutivos que sean representativos para cada tipo de suelo, acompañados instrumentos de medición precisa como GPS o InSAR, los que en conjunto permitan la calibración minuciosa del modelo numérico. Por otra parte, a futuro se propone evaluar el potencial expansivo que puedan tener las arcillas presentes dentro de las fallas encontradas en la zona, a través de ensayos de hinchamiento y análisis de difracción de rayos X (XRD) los cuales permitan conocer su comportamiento y composición mineralógica. Finalmente, es importante destacar que este proyecto abre una nueva línea de trabajo e investigación dentro de la Ingeniería Civil para estudios geotécnicos asociados a procesos de remoción en masa en zonas costeras.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

7.1 Conclusiones

En el desarrollo de esta investigación se estudió la zona del Cerro Maule en la comuna de Puerto Saavedra, donde se han producido numerosas remociones en masa en el borde costero. Debido a esto se realizó un análisis detallado de la zona enfocándose en los aspectos fundamentales de la Ingeniería Civil con énfasis en la geotecnia y la modelación numérica, teniendo como hipótesis de trabajo que estos procesos en la zona de estudio podrían estar controlados por las condiciones geotécnicas e hidrometeorológicas locales.

En relación con esto, los principales resultados y análisis expuestos en esta investigación señalan que los factores condicionantes, relacionados con las características geomecánicas de la zona asociadas a la falla encontrada en terreno y a la fina capa de arcilla en su interior, están funcionando como superficie de deslizamiento. Además, los depósitos sedimentarios meteorizados presentes en la zona son altamente inestables en condiciones de saturación, por lo tanto, las condiciones iniciales de la ladera tienen gran relevancia en estos fenómenos, por lo que resulta esencial una correcta identificación y caracterización de estos factores.

En cuanto a los agentes desencadenantes de remociones en masa, los eventos de precipitación prolongados, pero de menor intensidad tienen un mayor efecto en las deformaciones determinadas a partir del modelo numérico, debido a la permeabilidad de los suelos presentes, lo que produce escorrentía superficial ante eventos de gran intensidad y corta duración. Respecto a esto, se afirma que las precipitaciones provocan una reactivación de la ladera propiciando las remociones en masa. En este punto, a partir del modelo numérico, se evidenciaron pequeñas deformaciones sobre la falla encontrada, las que finalmente podrían llevar al colapso por acumulación de esfuerzos causando caídas repentinas de material, tal y como se ha registrado en la zona.

Estos antecedentes hacen que resulte importante realizar terrenos exploratorios detallados que permitan identificar todos los factores que puedan propiciar estos fenómenos, haciendo una identificación exhaustiva de las condiciones geológicas y geotécnicas locales, de la mano de topografía de alta resolución espacial, que en conjunto permitan caracterizar de forma precisa cada zona de estudio, ya que los factores desencadenantes tienen distinta implicancia sobre cada uno de los factores condicionantes relacionados a las remociones en masa. Lo anterior, permitió una correcta implementación del modelo numérico el cual ha representado de buena forma la realidad permitiendo una correcta interpretación de los resultados.

Las modelaciones realizadas con todos estos antecedentes recopilados en las distintas etapas de esta investigación permiten sostener que el modelo numérico realizado constituye una excelente herramienta para comprender los procesos de remoción en masa que han ocurrido en la zona. Sin embargo, aún los mejores modelos solo reproducen una visión generalizada de la realidad y su correcta interpretación requiere una comprensión detallada del modelo y de las características de cada zona de estudio mencionadas anteriormente.

Finalmente, es importante recalcar que esta investigación no pretende ser un modelo predictivo de procesos de remoción en masa, más bien contribuye a comprender estos fenómenos teniendo en cuenta los factores hidrometeorológicos como desencadenantes, por lo tanto, se ha logrado el objetivo propuesto para este trabajo. En este ámbito, el proyecto de titulación ha sentado un precedente en cuanto a estudios de remoción en masa asociado a eventos hidrometeorológicos en zonas costeras del centro sur de Chile. Sin embargo, a futuro puede ser mejorado incorporando ciertos aspectos como los efectos de la lluvia antecedente a nivel local, una caracterización profunda de todos los parámetros geotécnicos y la implementación de un monitoreo continuo de las deformaciones, los cuales en conjunto permitan un análisis robusto de estos procesos en la zona de estudio.

7.2 Recomendaciones

Respecto al uso del método de elementos finitos como herramienta de análisis, se recomienda realizar análisis de sensibilidad en cuanto al tamaño del elemento, la forma y la totalidad del espacio que se analiza ya que estas variaciones podrían producir diferencias en los resultados finales, por lo que es ideal buscar un modelo óptimo en estos aspectos.

En relación con la alta susceptibilidad de ocurrencia los procesos de remoción en masa en la zona de estudio, se recomienda a las autoridades, realizar una exploración exhaustiva en búsqueda de todas las fracturaciones que pueda tener el macizo, ya que podrían existir otras fallas rellenas de arcillas blandas que no son observables a simple vista en terreno, ya sea por vegetación, urbanización, imposibilidad de acceso u otros. Por lo tanto, pueden existir otros sectores cercanos al estudiado propensos a remociones, esto permitirá realizar una adecuada zonificación estableciendo limitaciones para futuras construcciones que finalmente eviten pérdidas económicas y humanas.

NOMENCLATURA

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
δG_{ext}	: Trabajo virtual debido a una fuerza externa.	—
u	: Desplazamiento.	[m]
σ	: Esfuerzo.	[kg/m ²]
ε	: Deformación.	[m]
$\sigma(\varepsilon)$	: Esfuerzo, calculado a partir de la deformación.	[kg/m ²]
∇	: Operador de la relación esfuerzo-deformación.	—
N	: Función de forma	—
d^e	: Grados de libertad del nodo	—
D	: Matriz de relación esfuerzo-deformación	—
B	: Matriz de desplazamiento nodal	—
h	: Altura hidráulica total con respecto al sistema de referencia.	[m]
k_x	: Conductividad hidráulica.	[m/s]
Q	: Flujo aplicado en la frontera (precipitación)	[m ³ /s]
θ_w	: Contenido volumétrico de agua.	—
u_w	: Presión de poros.	[kg/m ²]
m_w	: Relación entre el contenido de agua y la presión de poros.	—
ϕ	: Angulo de fricción interna	grados
c	: Cohesión	[kg/m ²]
ψ	: Angulo de dilatancia	grados
E	: Módulo de elasticidad	[kg/m ²]
γ	: Peso unitario	[kg/m ³]
ν	: Razón de Poisson	—
σ_1	: Esfuerzo principal mayor	[kg/m ²]
σ_3	: Esfuerzo principal menor	[kg/m ²]
τ	: Esfuerzo de corte	[kg/m ²]

REFERENCIAS

- Alfaro, A. (2013). Modelación numérica 3D para estabilización de taludes utilizando drenes subhorizontales. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Santiago.
- Angelone, S., Garibay, M., y Cauhapé, M. (2006). Geología y Geotecnia: Permeabilidad de suelos.
- Antinao, J., y Gosse, J. (2008). Large rockslides in the Southern Central Andes of Chile (32-34.5°S): Tectonic control and significance for Quaternary Landscape evolution. *Geomorphology* N°104, 117-133.
- Aristazábal, E., Martínez, H., y Vélez, J. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Academia Colombiana de Ciencias* 34 (131), 209-227.
- Aristizabal, E., y Yokota, S. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el valle de Aburra. *Revista de la Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia*.
- ASTM. (1998). ASTM D3080/D3080M-11 Método de ensayo estándar, ensayo de corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas drenadas. Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- Beer, G., y Watson, J. (1992). Introduction to finite and boundary element methods for engineers. New York: John Wiley y Sons.
- Bishop, A. (1966). The strength of soils as engineering materials. *Géotechnique*, 16, (2), 148-152.
- Bluestein, H. (1993). Synoptic - Dynamic meteorology in midlatitudes. Vol II, Observations and theory of weather systems. Oxford University Press.
- Bojorque, J. (2011). Métodos para el análisis de la estabilidad de pendientes. *Maskana*, Vol 2.
- Brand, E. (1985). Landslides in Hong Kong. Proceeding of the eighth southeast Asian geotechnical conference, (págs. 1-14). Kuala Lumpur.
- Bray, J., y Frost, D. (2010). Slope stability and landslides. Geo-Engineering Reconnaissance of the February 27, 2010 Maule, Chile Earthquake. Report of the National Science Foundation-Sponsored Geo-engineering Extreme Events Reconnaissance.
- Cascini, L., Cuomo, S., Pastor, M., Sorbino, G., y Piciullo, L. (2014). SPH run-out modelling of channelized landslides of the slow type. *Geomorphology*, 12.
- Crosta, G., y Frattini, P. (2008). Rainfall-induced landslides and debris flows. *Hydrological processes* 22, 473-477.
- Crosta, G., Imposimato, S., y Roddeman, D. (2003). Numerical modelling of large landslides stability and runout. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 523-538.
- Cruden, D., y Varnes, F. (1996). Landslide types and processes, en Turner, K., y Shuster, R.I., ed., *Landslides investigation and mitigation: Washington D.C., National Academy Press. Transportation Research Board Special Report 247*, 36-75.

- Cubillos, A. (2017). Método simplificado para estimar deformaciones cosísmicas permanentes en muros de tranques de relave Chilenos. Santiago, Chile: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Davis, S., y Karzulovic, J. (1963). Landslides of Lago Riñihue, Chile. Geological Society of America Bulletin, Vol. 53, N°6, 29-38.
- Duhart, P. (2010). Efectos Geológicos del Sismo del 27 de Febredo de 2010: Grietas en la Localidad de Puerto Saavedra, Region de La Araucania. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Espinoza, A. (2014). Implementation of LIDAR technology to evaluate deformation field induced by panel caving exploitation. Trabajo presentado en Caving 2014: Tercer congreso internacional de caving exploitation. Santiago de Chile.
- Fredlund, D., y Rahardo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. USA: John Wiley and Sons, Inc.
- Fustos, I. (2017). Estudio de deformaciones superficiales de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante modelos numéricos y sensores remotos: Caso de estudio en la ladera norte del Rio BioBio. Concepción.
- Fustos, I., Hermosilla, M., Moreno-Yaeger, P., y Abarca-del-Rio, R. (2018). Solifluction and complex movements observed from inSAR time series and satellite precipitation products: Cases over central south of Chile.
- Garcia, A., Riveros, J., y Builes, B. (2012). Influence of rainfall intensity on infiltration and deformation of unsaturated soil slopes. DYNA, 116-124.
- GEMMA. (2007). Movimientos en masa en la región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Estándares para movimientos en masa.
- Gofar, N., Lee, R., y Kassim, A. (2008). Response of Suction Distribution to Rainfall Infiltration in Soil Slope. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 13., 1-13.
- Gokceoglu, C., Sonmez, H., y Ercanoglu, M. (2000). Discontinuity controlled probabilistic slope failure risk maps of the altindan (settlement) region in turkey. Engineering Geology N° 55, 277-296.
- Gonzalez, C. (2012). Propiedades geomecánicas de dos suelos de origen volcánico. Santiago, Chile: Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería Mención Geotécnica.
- González, L. (2002). Ingeniería Geológica. Editorial Prentice Hall.
- Goodman, R. (1989). Introduction to Rock Mechanics 2nd Edition. New York: Wiley and Sons.
- Griffiths, D., y Lane, P. (1999). Slope stability analysis by finite elements. Geotechnique, 49(3), 387-403.
- Harp, E., Reid, M., McKenna, P., y Michael, J. (2009). Mapping of hazard from rainfall-triggered landslides in developing countries: examples from Honduras and Micronesia. Engineering Geology, in press.

- Hauser, A. (1993). Remociones en Masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago. Boletín N° 45, p. 7-29.
- Hidalgo, C., y Vega, J. (2014). Estimation of the threat of landslides triggered by earthquakes and rainfall (valle de Aburrá-Colombia). *Revista EIA* 11(22), 103-117.
- Hidalgo, C., Vega, J., y Parra, M. (2017). Effect of the Rainfall Infiltration Processes on the Landslide Hazard Assessment of Unsaturated Soils in Tropical Mountainous Regions. *Intechopen*.
- Hu, H. (1955). On some variational principles in the theory of elasticity and the theory of plasticity . *Scintia sinica* Vol. 4.
- Huang, W., Yang, S., y Zeng, S. (2006). Analysis on the influence of the rainfall infiltration on the stability of soil slope. *Sci-Tech Information Development y Economy* 16(5), 174-175.
- Hutchinson, J. (1988). Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation yo geology and hydrogeology. 5° International Conference on Landslides, (págs. 3-35). Lausanne.
- Hutchison, J. (1988). Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: *Proc. 5th int. symp. on landslides*, (págs. 3-31). Lausanne, Switzerland.
- INN. (1979). NCh 1517/1 of 1979 Mecánica de suelos - Límites de consistencia determinación del límite líquido. Santiago: Instituto Nacional de Normalización.
- INN. (1979). NCh 1517/2 of 1979 Mecánica de suelos - Límites de consistencia determinación del límite plástico. Santiago: Instituto Nacional de Normalización.
- INN. (2014). NCh 1508 of 2014 Geotecnia - Estudio de mecánica de suelos. Santiago: Instituto Nacional de Normalización.
- Jara C. (2012). Observaciones en Cerro Mirador, camino Puerto Saavedra- Boca Budi, Comuna de Saavedra.
- Lara, M. (2007). Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en quebrada San Ramon, Santiago oriente, Región Metropolitana. Santiago de Chile: Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias Mención Geología.
- Lara, M., y Sepúlveda, S. (2008). Remociones en Masa. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Lopez Acosta, N. (2014). Modelado numérico de problemas de flujo de agua. *Memorias XXVII reunion nacional de suelos e ingeniería geotécnica*. Puerto Vallarta, Mexico: Publicación SMIG.
- López, N., y Mendoza, J. (2016). Flujo de agua en suelos parcialmente saturados y su aplicación a la ingeniería geotécnica. Mexico D.F.: Instituto de Ingenieria UNAM.
- Mardones, M., y Rojas, J. (2012). Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27F de 201 en la franja costera de la Región del Biobío. Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57-74.

- Mergili, M., Marchant, C., y Moreiras, S. (2014). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 24 (2), 113-131.
- MIDAS. (24 de Marzo de 2019). MIDAS information technology Co. GTS-NX: Benchmarks and verifications, analysis reference, user manual. Obtenido de <http://midasgtsnx.com/support/manual.asp>
- Moayedi, H., Bujang, B., Ahmad, T., Asadi, A., Moayedi, F., y Mokhberi, M. (2011). Preventing landslides in times of rainfall: case study and FEM analyses. Disaster Prevention and Management Vol. 20 N°2, 115-124.
- Molina, C. (2016). Análisis de susceptibilidad de remociones en masa en las costas del Fiordo Comau, X region, Chile. Santiago, Chile: Memoria para optar al título de Geología.
- Molina, F., Constanzo, J., y Inostroza, C. (2018). Desastres naturales y territorialidad: el caso de los lafkenche de Saavedra. Revista de geografía Norte Grande, 189-209.
- Muir Wood, D. (1991). Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ng, C. W., y Shi, Q. (1998). Influence of rainfall intensity and duration on slope stability in unsaturated Soils. Quarterly Journal of Engineering Geology, 31, 105-113.
- Oliva, A. (2015). Estabilidad de taludes y laderas. Análisis cuantitativo y cualitativo. Mexico: Grupo ITEICO euroamericano.
- OPPTA, O. (2012). Cómo reciclar un territorio amenazado por el riesgo de catástrofes naturales. Temuco: Facultad de Arquitectura y Urbanismo Universidad Mayor de Chile.
- Páez, D., y Jara, C. (2010). Efectos Geológicos del Sismo 27 de Febrero de 2010: Complementos a las Observaciones en la Localidad de Puerto Saavedra, Region de la Araucania. Temuco.
- Pathak, S., y Nilsen, B. (2004). Probabilistic rock slope stability analysis for Himalayan condition. Bulletin of Engineering Geology and the Environment N° 63, 25-32.
- Peña Cortés, F., Limpert, C., Andrade, E., Hauenstein, E., Tapia, J., Bertrán, C., y Vargar-Chacoff, L. (2014). Dinamica Geomorfológica de la Costa de La Araucania. Revista de Geografía Norte Grande N°58.
- Peña Cortés, F., P. Gutierrez, G. Rebolledo, M. Escalona, E. Hauenstein, C. Beltran, . . . J. Tapia. (2006). Determinación del nivel de antropización de humedales como criterio para la planificación ecológica de la cuenca del lago Budi, IX Región de La Araucanía, Chile. Revista de Geografía Norte Grande, 75-91.
- Perdomo, C., Caicedo, J., Nuñez, N., Machado, D., Garcia, J., y Pineda, M. (2015). Establecimiento de puntos de control terrestre para la corrección planimétrica de imágenes tomadas por drones. 1er Congreso de Geomatica, VI jornada de geomatica. Caracas, Venezuela.
- Pérez García, N. (2008). Determinación de curvas características en suelos no saturados con seldas de presión. Queretaro, Mexico: Publicación técnica N° 313. Secretaria de comunicaciones y transporte, Instituto Mexicano de transporte.

- Pospescu, M. (2002). Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options. Keynote Lecture. Proceeding 3rd International Conference on Landslide, Slope Stability and Safety of Infra-Structures, (págs. 61-81). Singapore.
- Qi, G., y Huang, R. (2004). Study on slope displacements due to rainfall. Rock and soils mechanics 25(3), 379-382.
- Quezada, J., Jaque, E., Fernández, A., y Vásquez, D. (2012). Cambios en el relieve generados como consecuencia del terremoto Mw = 8,8 del 27 de febrero de 2010 en el centro-sur de Chile. Revista de Geografía Norte Grande, 35-55.
- Rahardjo, H., Ong, T., Rezaury, R., y Leong, E. (2007). Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall. Revista de ingeniería geotécnica y geoambiental 133(12).
- Rapiman, C. (2007). Caracterización del estrato basal de la columna estratigráfica del Cerro Maule, Puerto Saavedra. Temuco: Memoria para optar al título de Ingeniero Constructor. Facultad de Ingeniería y Ciencias. Universidad de la Frontera.
- Reid, E. (1997). Slope instability caused by small variations in hydraulic conductivity. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 717-725.
- Rojas, Y. (2016). Eventos extremos de precipitación diaria en Chile central. Concepción: Habilitación profesional para optar al título de Geofísica.
- Saavedra, P. (2011). Estudio de riesgo y actualización PRC de Puerto Saavedra. Etapa 4: Diagnóstico. Temuco: Universidad Mayor.
- Sánchez, J. A. (2007). Introducción a la fotogrametría. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Savage, W., Baum, R., Morrissey, M., y Arndt B.P. (2000). Finite-Element Analysis of the Woodway Landslide. U.S. Geological Survey.
- Schaetzl, R., y Anderson, S. (2005). Soil geomorphology and hidrology. En Soils genesis and geomorphology. New York EUA: Cambridge University.
- Schiffeld, A., y Wroth, C. (1968). Critical State Soil Mechanics. London: McGraw-Hill.
- Sepúlveda, S., y Petley, D. (2015). Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean. Natural Hazards and Earth System Sciences.
- Sepúlveda, S., Náquira, V., y Arenas, M. (2011). Susceptibility of coastal landslides and related hazards in the Chilean Patagonia: The case of Hornopirén (42°S). Investigación Geográfica - Santiago, Chile, 43., 35-46.
- SERNAGEOMIN. (2003). Mapa geológico de Chile. Santiago: Publicación geológica digital N°4.
- Setyo, R., y Liao, H. (2008). Analysis of rainfall-induced infinite slope failure during typhoon a hydrological-geotechnical model. Environ. Geol.
- Smith, I. (2014). Smith's Elements of Soil Mechanics, 9th Edition. John Wiley y Sons.
- Smith, I., Griffith, D., y Margetts, L. (2013). Programming the Finite Element Method, 5th Edition. Wiley.

- Suarez, J. (2009). Deslizamientos. Analisis geotécnico vol. 1. Bucaramanga: División de publicaciones Universidad Industrial de Santander (UIS).
- Tarbut, E., y Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física. Octava edición. Madrid: PEARSON Prentice Hall.
- Tosso, J. (1985). Suelos Volcánicos de Chile. Santiago, Chile.
- Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D., y Leong E.C. (2012). Controlling parameters for rainfall-induced landslides. Computers and Geotechnics, 1-27.
- Valdivia, P. (1993). Estudio estratigrafico sedimentologico de la secuencia miocena de Puerto Saavedra, IX Region de la Araucania, Chile (38°48' Lat.S.). Revista Frontera, 29-44.
- Van Asch, T., Van Beek, L., y Malet, J. (2007). Techniques, issues and advances in numerical modelling of landslide hazard. Bulletin de la Societe Geologique de France.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. In Landslides, Analysis and Control, Special Report N°176. Schuster, R.L., Krizek, R. J., edits. Trnsaportation Research Board, National Academy of Sciences. Washington D.C., 11-33.
- Velázquez, E., y Gómez-Sal, A. (2007). Environmental control of early succession on a large landslide in a tropical dry ecosystem. Casita Volcano Nicaragua, Biotropica 39(5), 601-609.
- Wang, J., y Huang, N. (2006). Realiability analysis of stability for unsaturated loess slopes under the condition of rainfall infiltration. Water power 32(10), 38-40.
- Washizu , K. (1955). On the variational principles of the elasticity, aeroelastic ans structural research laboratory. MIT, Technical report.
- Wieczorek, G. (1996). Landslide Triggering Mechanisms in Landslide - Investigation and Mitigation. Spetial Report 247. A. K. Turner y R. L. Schuster, Editores. Transportation Research Board. National Research Council, National Academic Press, Washington DC, USA, 76-90.
- Wu, Y. (2003). Mechanism analysis of hazards caused by the interaction between groundwater and geoenvironment. Environmental Geology 44, 811-819.
- Zhou, J., Cui, P., y Yang, X. (2013). Dynamic process analysis for the initiation and movement og the Donghekou landslide-debris flow triggered by the Wenchuan earthquake. Journal of Asian Earth Sciences 76, 7084.
- Zuluaga, D. (2016). Análisis de estabilidad de taludes 3D considerando los efectos de la infiltracion por precipitaciones. Ciudad de Mexico: Tesis para optar al grado de Maestro en Ingeniería.

ANEXOS

ANEXO A Descripción ensayos geotécnicos

A.1 Extracción de muestras

Se extrajeron dos muestras representativas de la zona crítica en donde se encontró la falla en el terreno exploratorio, la muestra 1 se encontraba ubicada en $38^{\circ}49'01.7''\text{S}$, $73^{\circ}24'01.7''\text{W}$ (**Figura A.1**) mientras que la muestra 2 fue extraída de $38^{\circ}49'01.8''\text{S}$, $73^{\circ}24'01.8''\text{W}$.



Figura A.1. Fotografía muestra 1. Elaboración propia.

A.2 Ensayos geotécnicos

Se realizan ensayos enfocados en la clasificación de suelos según (USCS) determinando los límites de consistencia y granulometría, por otra parte, también se realizan ensayos de corte directo para obtener propiedades geomecánicas a través del suelo.

A.2.1 Clasificación de suelos

A continuación, se entregan los resultados de los ensayos de laboratorio necesarios para realizar la clasificación de las muestras que incluyen granulometría y límites de Atterberg al suelo fino cuando corresponde, los procedimientos de ensayo se realizan siguiendo las indicaciones de las siguientes normas:

- Manual de Carreteras Vol. 8 sección 8.102, punto 8.102.1 Edición 2013: Método para determinar la granulometría.
- NCh 1517/1-79 “Límites de Consistencia Determinación del Límite Líquido”
- NCh 1517/2-79 “Límites de Consistencia Determinación del Límite Plástico”

Tabla A.1. granulometría de las muestras 1 y 2. Elaboración propia.

Abertura [mm]	Tamiz ASTM	% que pasa muestra 1	% que pasa muestra 2
100	(4")	100	100
80	(3")	100	100
63	(2 1/2")	100	100
50	(2")	100	100
40	(1 1/2")	100	100
25	(1")	100	100
20	(3/4")	100	100
12,5	(1/2")	100	100
10	(3/8")	100	100
5	(N.º 4)	100	99,7
2	(Nº10)	99,51	98,01
0,5	(Nº40)	96,63	90,73
0,08	(Nº200)	80,33	76,26

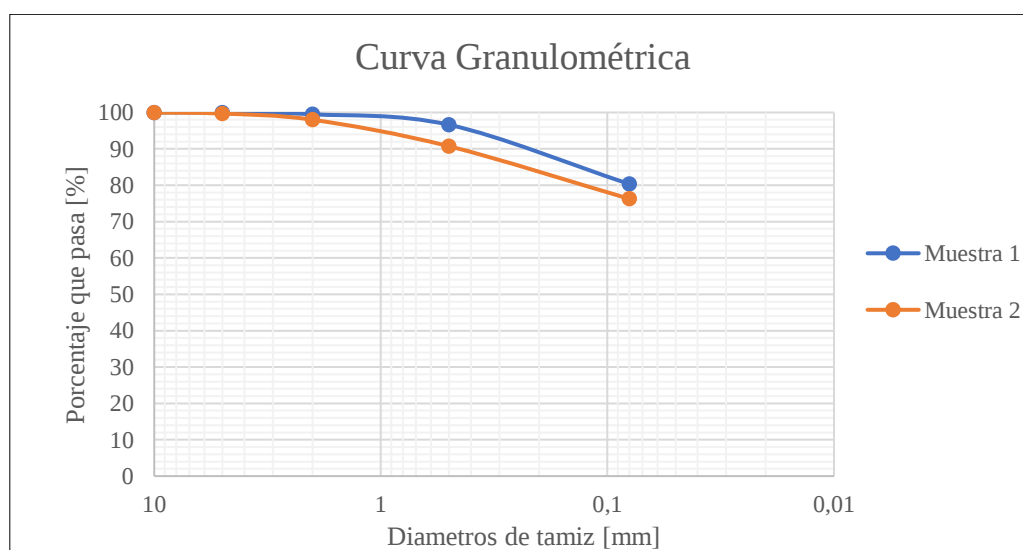


Figura A.2. Distribución granulométrica para las muestras 1 y 2. Elaboración propia

“Estudio de deformaciones de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante modelos numéricos: Caso de estudio Cerro Maule, Comuna de Puerto Saavedra.”

En la **Figura A.3** y **A.4** se muestran los instrumentos utilizados para determinar el límite plástico y el límite líquido respectivamente, mientras que en la **Figura A.5** se muestra la carta de plasticidad para ambas muestras. Finalmente, en la **Tabla A.2** se presentan los resultados de los límites de Atterberg y la clasificación USCS.



Figura A.3. Determinación del límite plástico. Elaboración propia.



Figura A.4. Determinación del límite líquido mediante la cuchara de Casagrande. Elaboración propia.

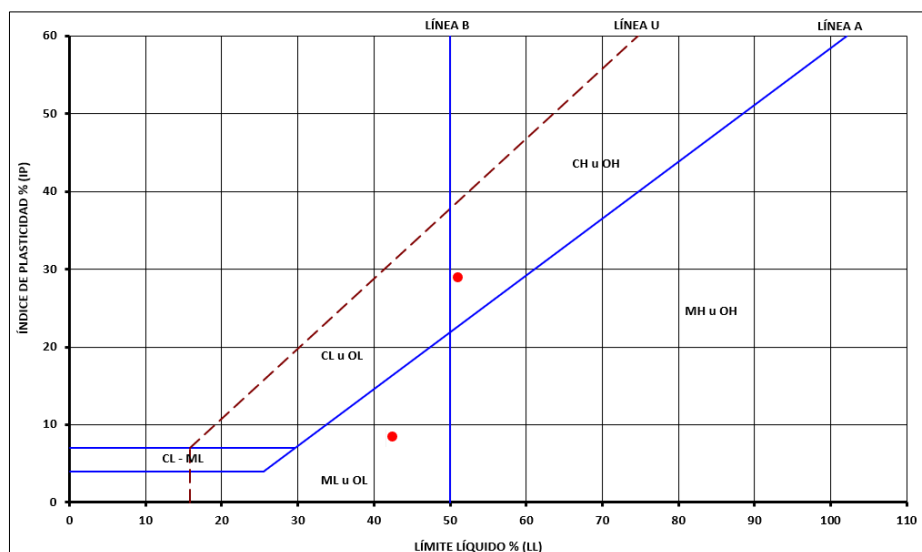


Figura A.5. Carta de plasticidad para la clasificación de suelos finos. Elaboración propia.

“Estudio de deformaciones de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante modelos numéricos: Caso de estudio Cerro Maule, Comuna de Puerto Saavedra.”

Tabla A.2. Límites de consistencia y clasificación USCS de las muestras. Elaboración propia.

Id	LL	LP	IP	Clasificación USCS
Muestra 1	51	22	29	CH
Muestra 2	43	35	8	ML

A.2.2 Corte directo

Corte directo de la forma consolidada drenada bajo las indicaciones de la Norma ASTM D3080M/D3080M-11. Este método de ensayo determina la capacidad de soporte al corte de suelo drenado consolidado. El ensayo se desarrolla deformando una probeta a una tasa de tensión controlada sobre un plano determinado por la configuración del aparato, se ensayarán tres probetas de cada muestra de suelo con tensiones de 0,8 0,4 y 0,2 [kg/cm²] para obtener la envolvente de falla que permite determinar la cohesión y el Angulo de fricción interna del suelo.

**Figura A.6.** Equipo de ensayo de corte directo utilizado. Elaboración propia.

A continuación, se presentan las tablas y figuras de los resultados obtenidos de las tres probetas ensayadas de las muestras 1 y 2.

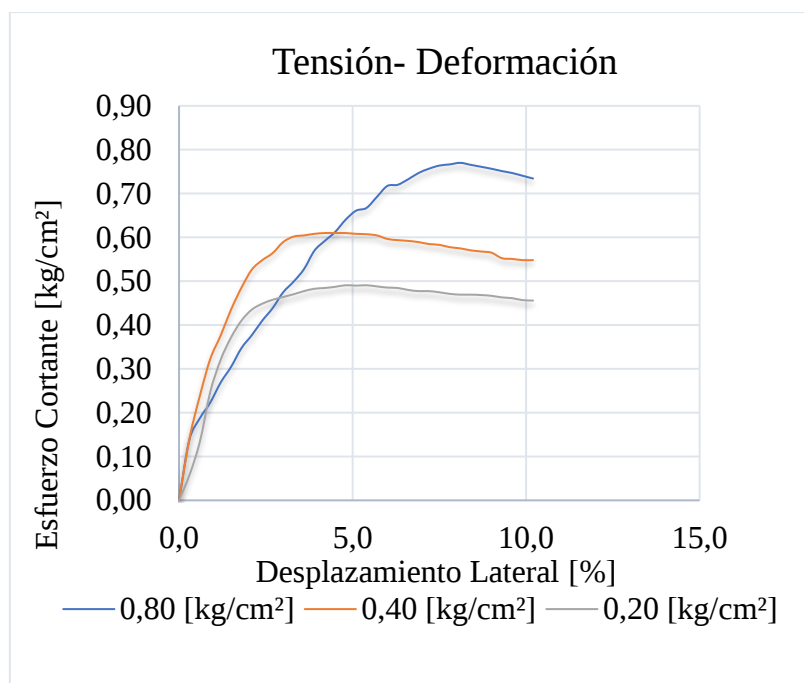
A.2.2.1 Muestra 1

Tabla A.3. Propiedades físicas probetas muestra 1. Elaboración propia.

Propiedades Físicas	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Humedad [%]	60,74	59,97	60,60
Peso unitario natural [g/cm ³]	1,43	1,44	1,44
Peso unitario seco [g/cm ³]	0,89	0,90	1,18
Peso unitario después de consolidación [g/cm ³]	1,48	1,49	1,48
Tasa de desplazamiento lateral utilizada [mm/min]	0,30	0,30	0,30
Desplazamiento lateral alcanzado [%]	10,20	10,20	10,20
Esfuerzo cortante máximo [kg/cm ²]	0,77	0,61	0,49
Esfuerzo normal [kg/cm ²]	0,80	0,40	0,20

Tabla A.4. Parámetros geo mecánicos muestra 1. Elaboración propia.

Parámetros geo mecánicos	
Cohesión [kg/cm ²]	0,41
Ángulo de fricción interna	24,5°

**Figura A.7.** Variación del esfuerzo de corte con la deformación unitaria. Elaboración propia.

“Estudio de deformaciones de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante modelos numéricos: Caso de estudio Cerro Maule, Comuna de Puerto Saavedra.”

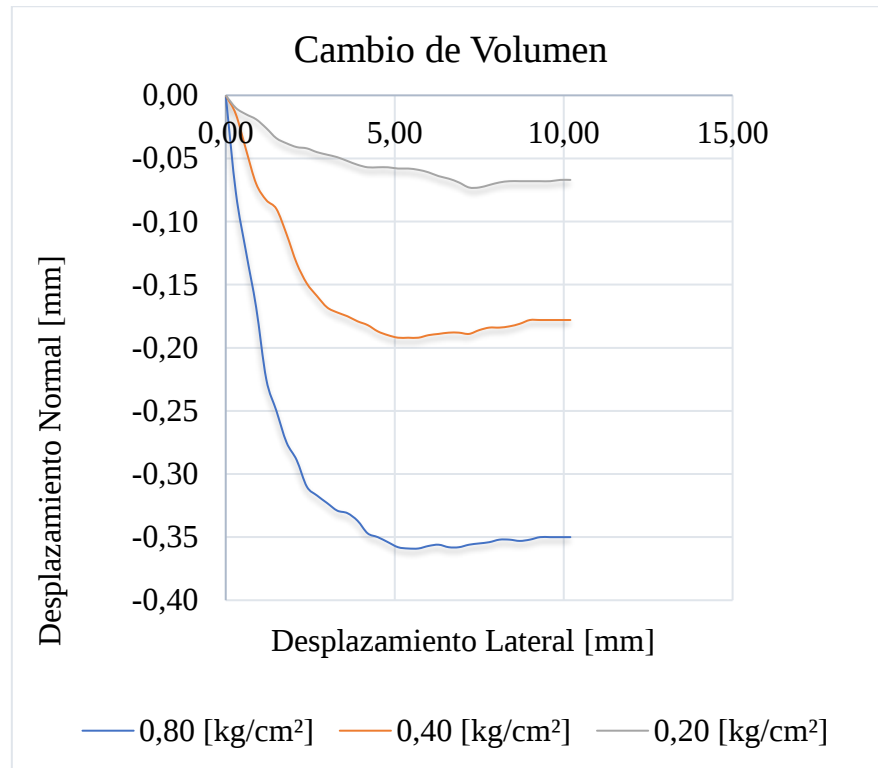


Figura A.8. Deformación vertical durante la aplicación del esfuerzo de corte. Elaboración propia.

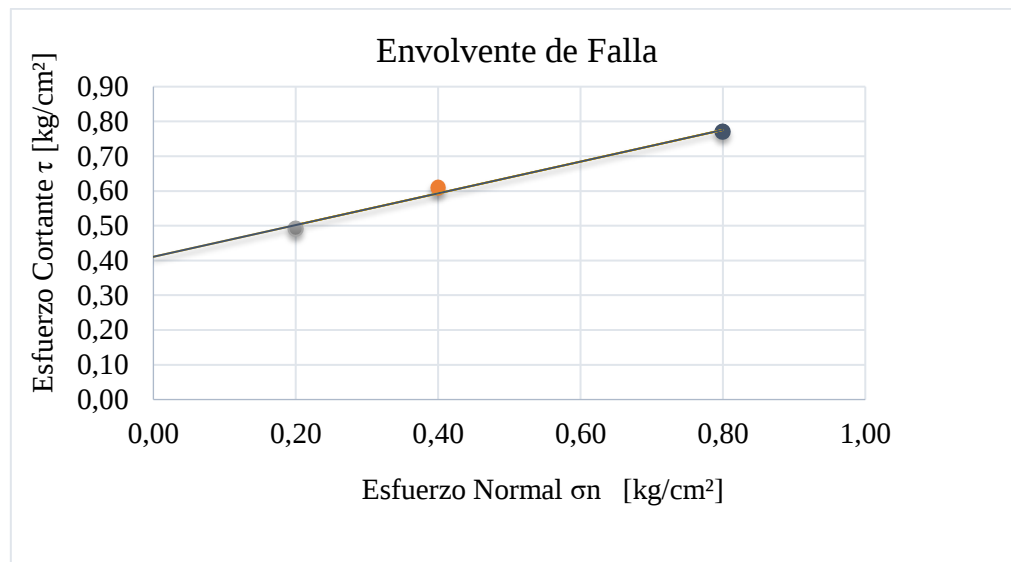


Figura A.9. Envolvente de falla para determinar el Angulo de fricción y la cohesión. Elaboración propia.

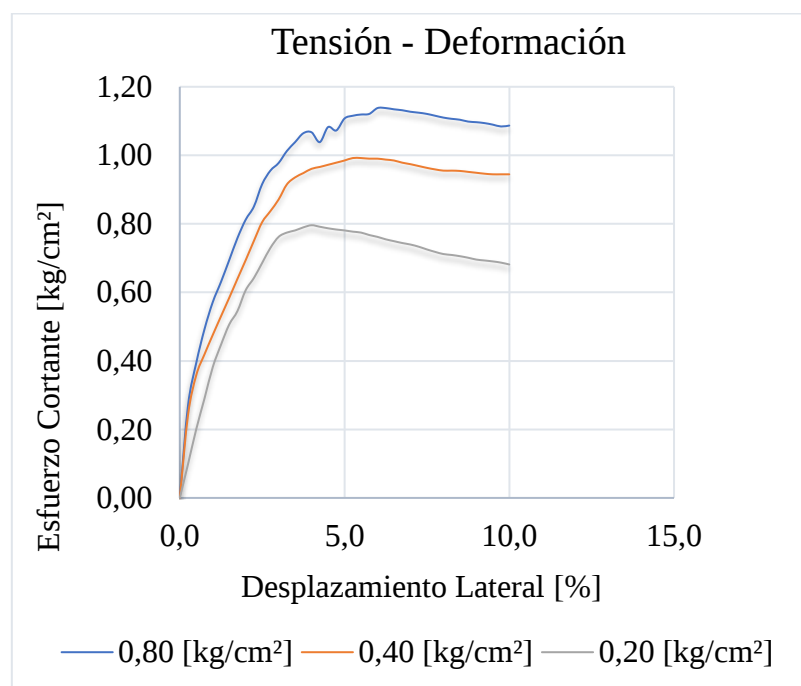
A.2.2.2 Muestra 2

Tabla A.5. Propiedades físicas probetas muestra 2. Elaboración propia.

Propiedades Físicas	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Humedad [%]	37,62	36,51	35,72
Peso unitario natural [g/cm ³]	1,53	1,57	1,59
Peso unitario seco [g/cm ³]	1,11	1,15	1,17
Peso unitario después de consolidación [g/cm ³]	1,59	1,54	1,60
Tasa de desplazamiento lateral utilizada [mm/min]	0,25	0,25	0,25
Desplazamiento lateral alcanzado [%]	10,00	10,00	10,00
Esfuerzo cortante máximo [kg/cm ²]	1,14	0,99	0,80
Esfuerzo normal [kg/cm ²]	0,80	0,40	0,20

Tabla-A.6. Parámetros geo mecánicos muestra 2. Elaboración propia.

Parámetros geo mecánicos	
Cohesión [kg/cm ²]	0,72
Ángulo de fricción interna	28,4°

**Figura A.10.** Variación del esfuerzo de corte con la deformación unitaria. Elaboración propia.

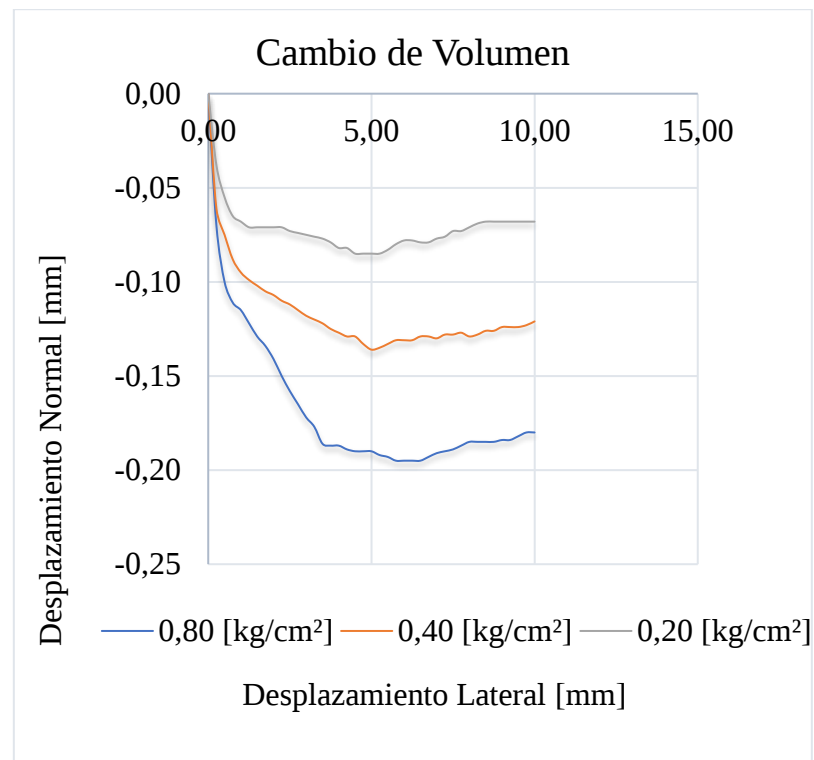


Figura A.11. Deformación vertical durante la aplicación del esfuerzo de corte. Elaboración propia.

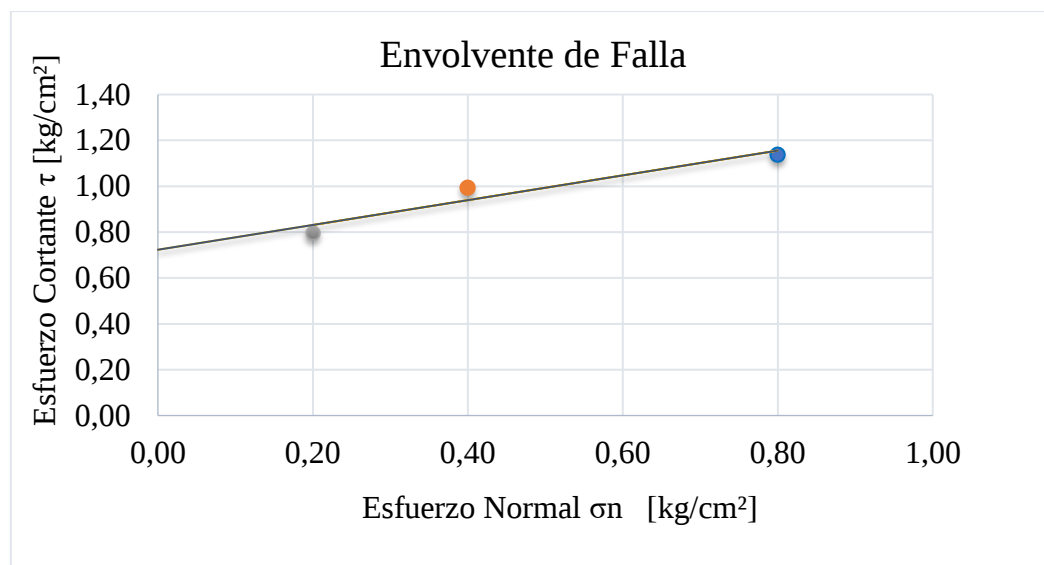


Figura A.12. Envolvente de falla para determinar el Angulo de fricción y la cohesión. Elaboración propia.

A.2.3 Determinación de la densidad.

Se determina la densidad de las partículas sólidas siguiendo las indicaciones de la norma NCh1532of1980. Las muestras de suelo fueron cubiertas con parafina para sellar todos los poros y así determinar su densidad a través de la diferencia de peso sumergido, sumado a esto se determina la relación de vacíos y el grado de saturación utilizando propiedades índices de mecánica de suelos.



Figura A.13. Muestras de suelo con parafina.
Elaboración propia.



Figura A.14. Muestras de suelo sumergidas.
Elaboración propia.

Tabla A.7 Propiedades de las muestras ensayadas. Elaboración propia.

Propiedades	Muestra 1	Muestra 2
Densidad de las partículas sólidas [Gs]	2,58	2,65
Peso unitario seco [g/cm^3]	0,85	1,01
Relación de vacíos [e]	2,03	1,62
Saturación [%]	76,8	58,8

ANEXO B: Análisis datos de precipitación**Tabla B.1.** Tabla de frecuencia precipitación diaria de la estación meteorológica Puerto Saavedra. Elaboración propia.

[	Clase	)	Frecuencia	% Relativa	% acumulado
1,0	5,0		1642	37,77%	37,77%
5,0	10,0		1193	27,44%	65,22%
10,0	15,0		633	14,56%	79,78%
15,0	20,0		359	8,26%	88,04%
20,0	25,0		208	4,78%	92,82%
25,0	30,0		116	2,67%	95,49%
30,0	35,0		82	1,89%	97,38%
35,0	40,0		38	0,87%	98,25%
40,0	45,0		30	0,69%	98,94%
45,0	50,0		16	0,37%	99,31%
50,0	55,0		18	0,41%	99,72%
55,0	60,0		5	0,12%	99,84%
60,0	65,0		0	0,00%	99,84%
65,0	70,0		2	0,05%	99,88%
70,0	75,0		2	0,05%	99,93%
75,0	80,0		0	0,00%	99,93%
80,0	85,0		2	0,05%	99,98%
85,0	90,0		0	0,00%	99,98%
90,0	95,0		0	0,00%	99,98%
95,0	100,0		1	0,02%	100,00%
Clase, precipitación en [mm]					

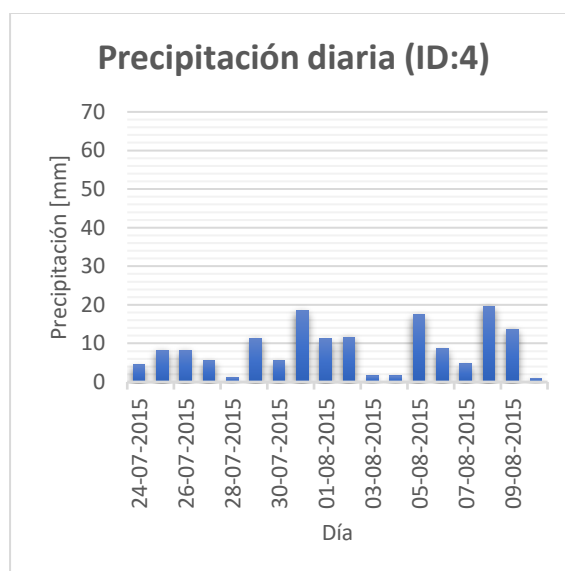
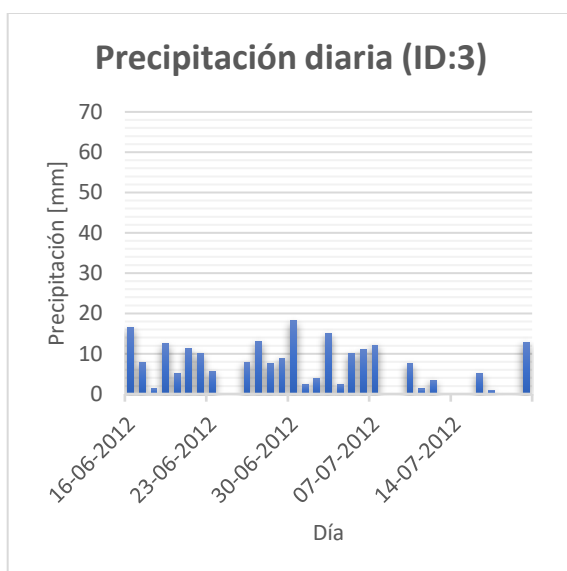
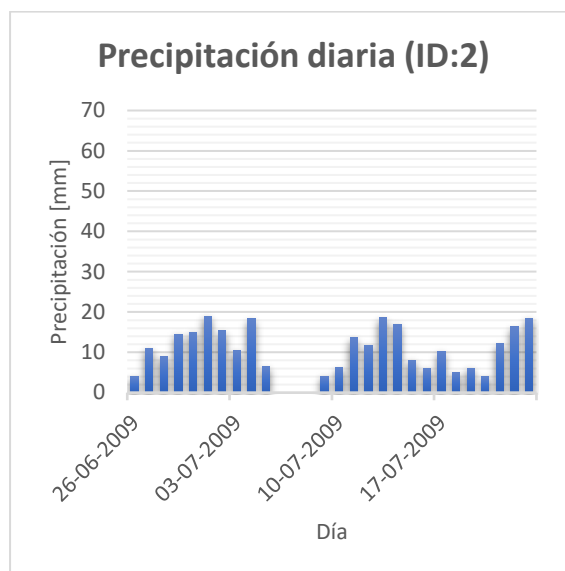
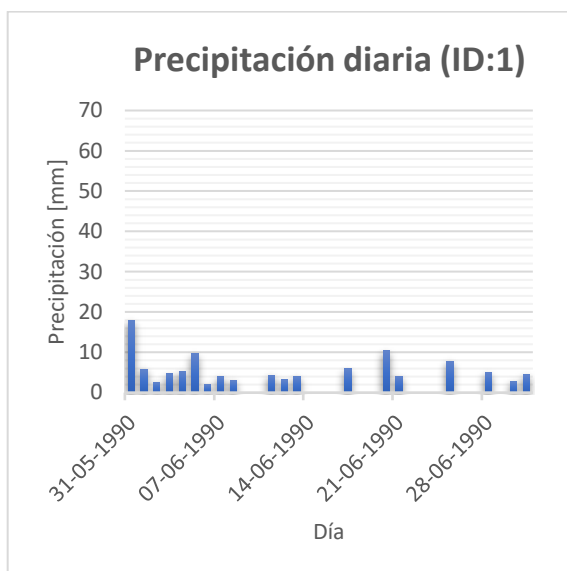
Tabla B.2. Tabla de frecuencia en relación con la duración de cada evento. Elaboración propia

días de precipitación	N° de Eventos	% relativo	% acumulado
1	794	45,79%	45,79%
2	393	22,66%	68,45%
3	194	11,19%	79,64%
4	134	7,73%	87,37%
5	73	4,21%	91,58%
6	49	2,83%	94,41%
7	32	1,85%	96,25%
8	16	0,92%	97,17%
9	15	0,87%	98,04%
10	7	0,40%	98,44%
11	4	0,23%	98,67%
12	4	0,23%	98,90%
13	1	0,06%	98,96%
14	1	0,06%	99,02%
15	2	0,12%	99,13%
16	2	0,12%	99,25%
17	3	0,17%	99,42%
18	2	0,12%	99,54%
19	3	0,17%	99,71%
20	1	0,06%	99,77%
21	1	0,06%	99,83%
22	2	0,12%	99,94%
23	1	0,06%	100,00%
Clase, precipitación en [mm]			

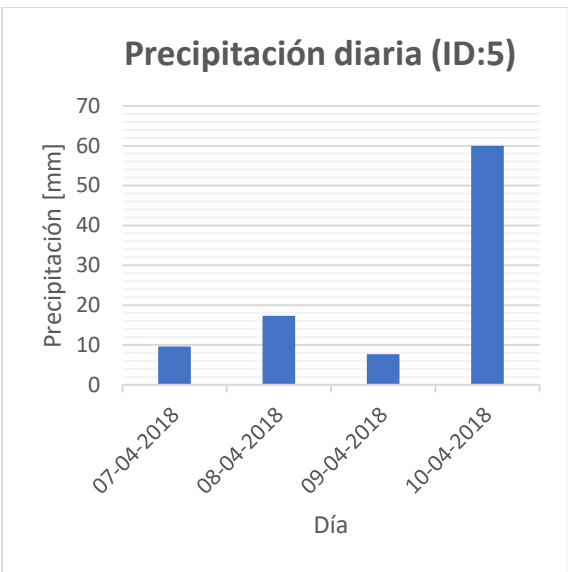
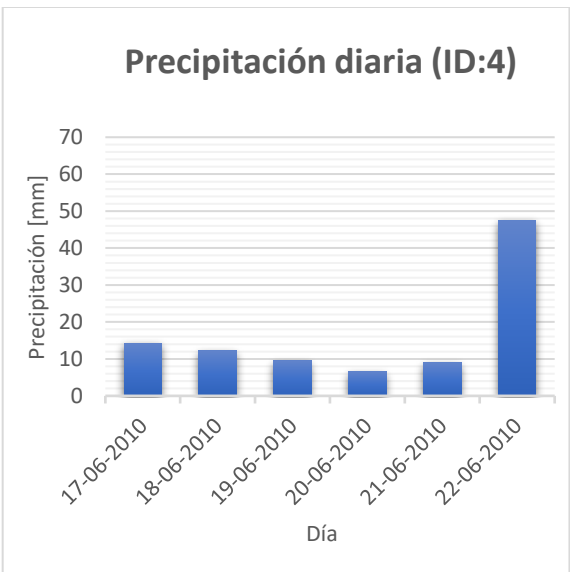
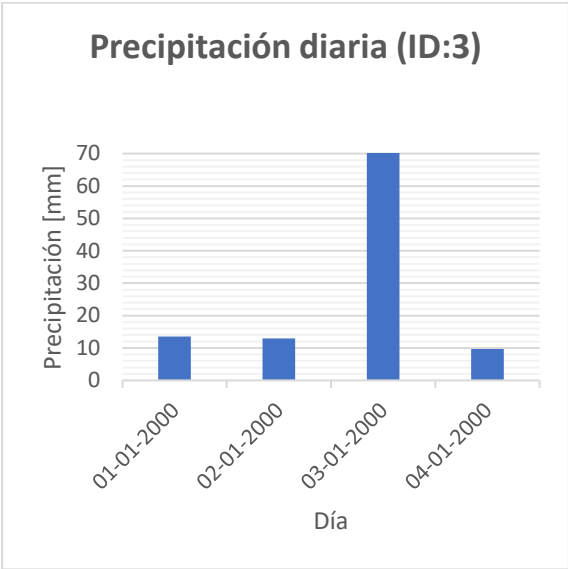
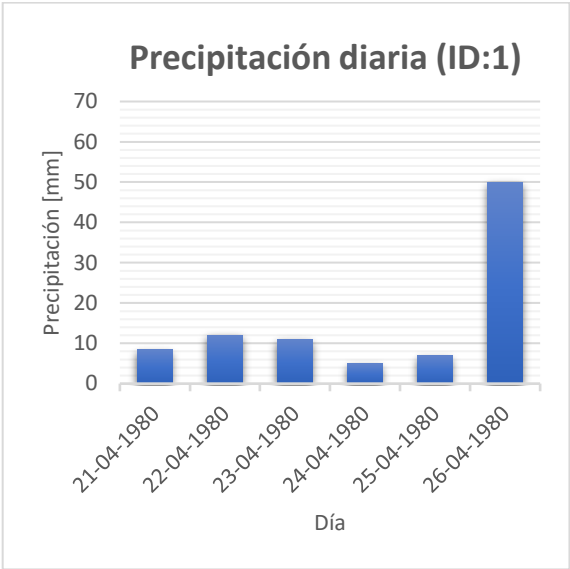
Tabla B.3. Tabla de frecuencia precipitación acumulada en cada evento. Elaboración propia.

[	Clase	)	Frecuencia	% relativa	% acumulado
1	30		1317	75,95%	75,95%
30	60		247	90,20%	14,24%
60	90		94	95,62%	5,42%
90	120		42	98,04%	2,42%
120	150		12	98,73%	0,69%
150	180		7	99,13%	0,40%
180	210		3	99,31%	0,17%
210	240		6	99,65%	0,35%
240	270		3	99,83%	0,17%
270	300		1	99,88%	0,06%
300	330		1	99,94%	0,06%
330	360		0	99,94%	0,00%
360	390		0	99,94%	0,00%
390	420		1	100,00%	0,06%
Clase, precipitación en [mm]					

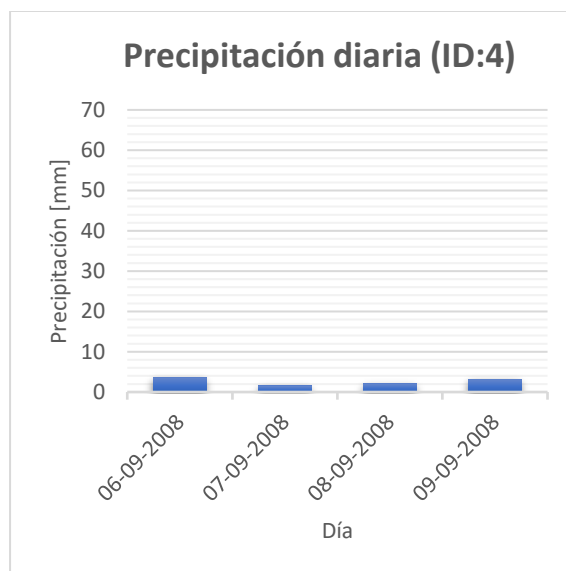
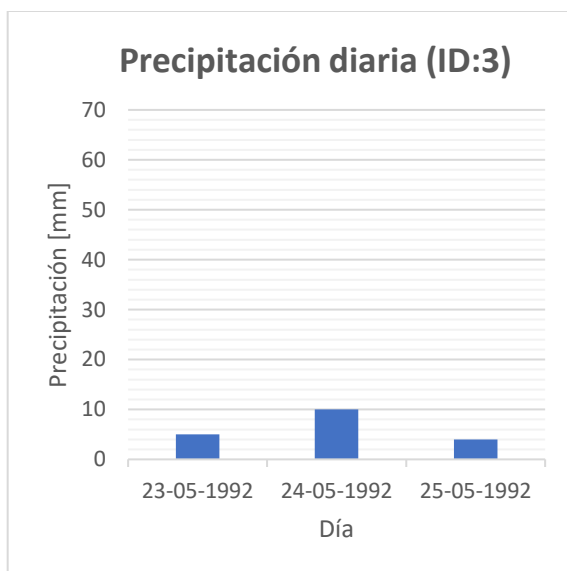
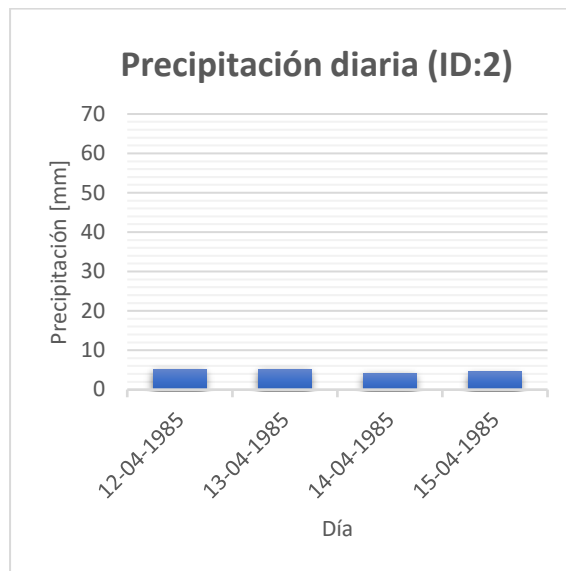
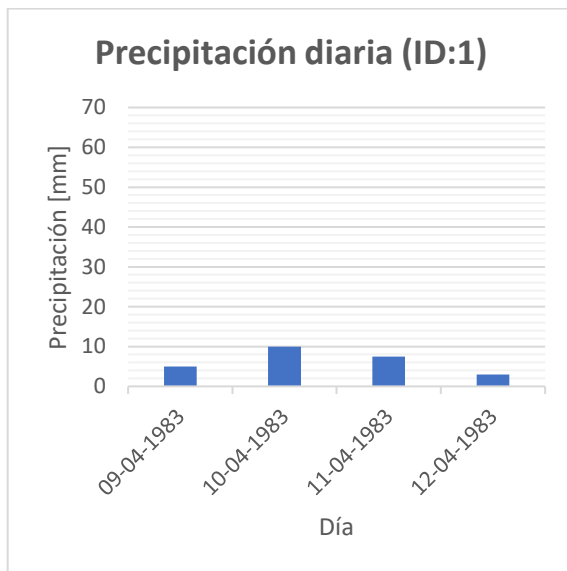
Eventos de precipitacion prolongada



Eventos de precipitación intensa



Eventos de baja precipitación



ANEXO C: Distribución de suelos derivados de cenizas volcánicas.

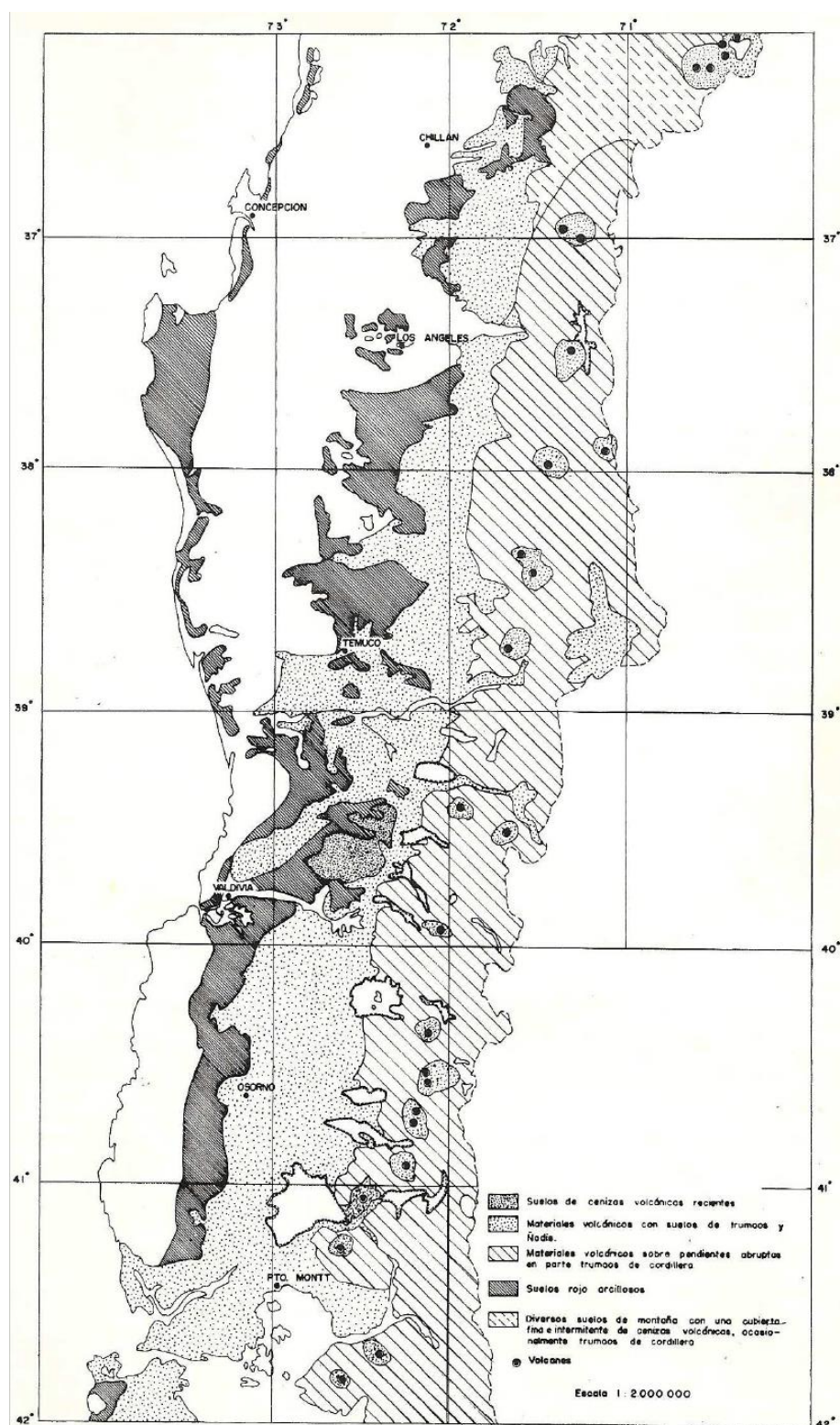
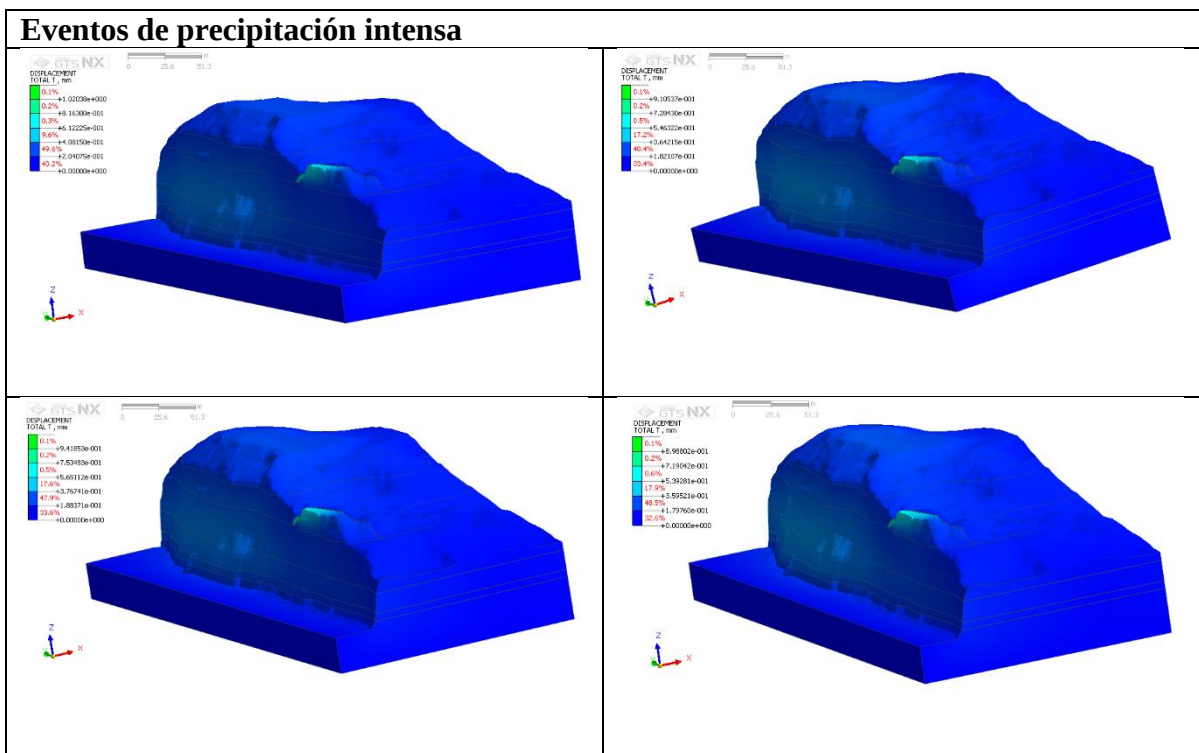
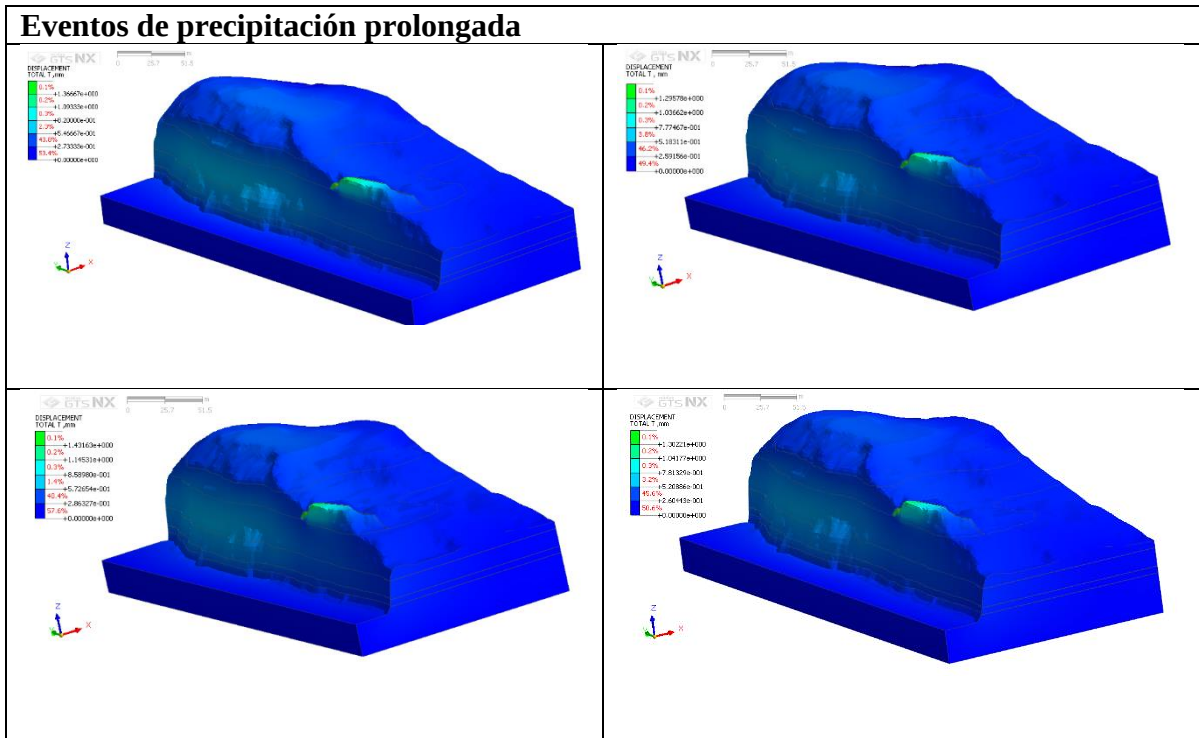


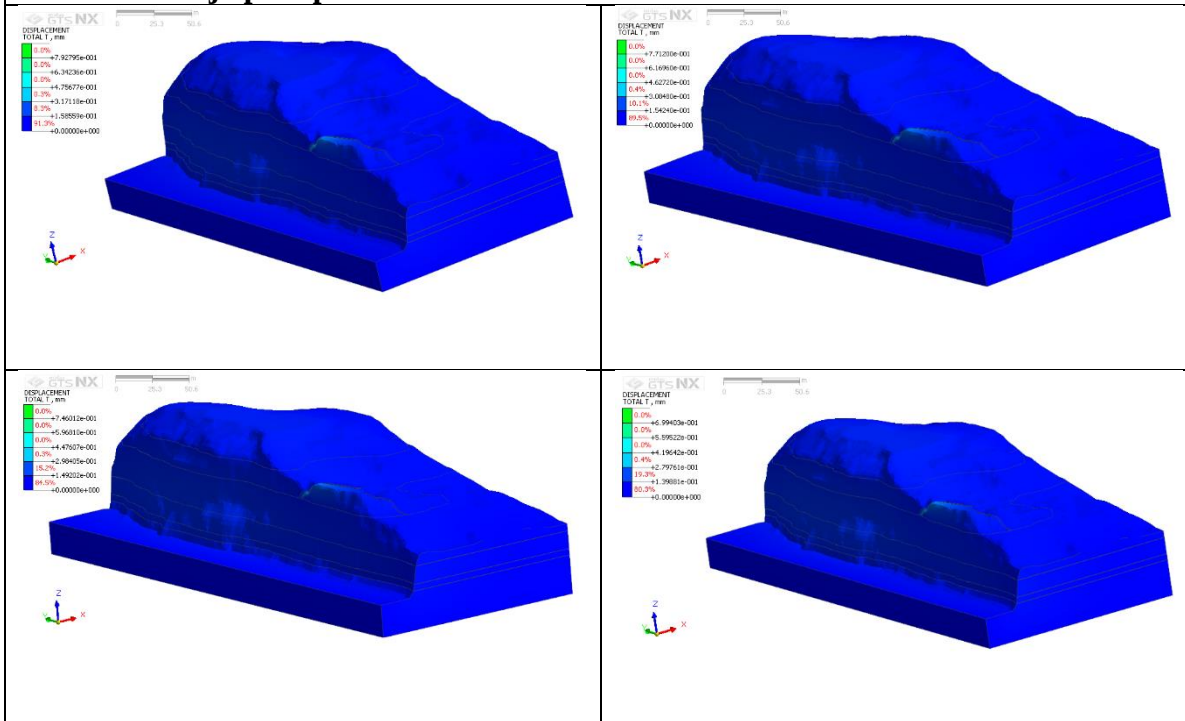
Figura C.1. Distribución de suelos derivados de materiales volcánicos zona centro-sur de Chile, sobre la base del mapa original de C.S. Wright 1965 (Suelos Volcánicos de Chile, 1985).

“Estudio de deformaciones de laderas asociadas a eventos hidrometeorológicos mediante modelos numéricos: Caso de estudio Cerro Maule, Comuna de Puerto Saavedra.”

ANEXO D: Modelos de deformación



Eventos de baja precipitación



ANEXO E. Levantamiento topográfico

Tabla E.1. Detalles puntos de control GPS. Elaboración propia

ID	Coordenadas UTM wgs84 18s		Elevación	Error		
	Norte	Este		Norte [m]	Este [m]	Elevación [m]
Punto 01	5702376,91	638840,06	66,30	0,17	0,11	0,10
Punto 02	5702352,83	638906,96	53,95	0,16	0,06	0,15
Punto 03	5702115,05	639239,57	34,70	0,07	0,03	0,07
Punto 04	5701705,48	639164,46	20,14	0,03	0,04	0,08
Punto 05	5701950,38	639260,48	63,92	0,02	0,03	0,09
Punto 06	5702470,47	639223,63	72,99	0,06	0,08	0,07
Punto 07	5702661,15	639171,84	72,16	0,05	0,06	0,17
Punto 08	5702821,90	638770,99	16,79	0,09	0,05	0,01
Punto 09	5702478,15	638844,48	82,14	0,08	0,10	0,68



Figura E.115. Toma de puntos de control en la zona de estudio utilizando el GPS de precisión Emild Reach RS. Elaboración propia.



Figura E.2. Plan de vuelo del dron Inspire II. Elaboración propia.