



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

**EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE PELIGRO DE REMOCIONES EN MASA EN LA
RUTA A-16, VÍA DE ACCESO PRINCIPAL A LA CIUDAD DE IQUIQUE
(REGIÓN DE TARAPACÁ)**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

ENRIQUE ARTURO OPAZO CASTRO

PROFESORA GUÍA:
MARÍA FRANCISCA FALCÓN HERNÁNDEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARISOL LARA CASTILLO
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

SANTIAGO DE CHILE
MARZO 2014

Resumen

La ciudad de Iquique se encuentra ubicada en la Planicie Litoral de la Región de Tarapacá, Chile. Se presenta limitada al Este por el Gran Escarpe Costero donde se emplaza la ruta A-16, vía de conexión con la ciudad de Alto Hospicio. La geología del Gran Escarpe Costero está compuesta por la Formación Punta Barranco, las Gravas de Alto Hospicio y depósitos eólicos, coluviales y aluviales. Lo afectan varias fallas como la Falla Cavancha y fallas del sector de Alto Hospicio, todas inversas, activas y de orientación Este-Oeste.

El contexto sísmico que afecta a la zona en cuanto a la alta probabilidad de producirse un terremoto de grandes proporciones y cómo afectaría éste a una de las principales vías de suministros y comunicación de la ciudad de Iquique, hacen necesario determinar el peligro asociado a remociones en masa, específicamente a las desencadenadas por sismos. Esto es básico para posteriormente determinar el riesgo asociado y las posibles medidas de mitigación que minimicen los daños. Para esto se profundiza en el análisis de las características geológicas y geomorfológicas de la zona de estudio y mediante distintas herramientas numéricas y computacionales se definen los sectores potencialmente afectados por remociones en masa. Además se incorpora el contexto sísmico, a través de distintos registros tanto históricos como recientes de aceleraciones verticales y horizontales.

El análisis culmina con la elaboración de mapas de susceptibilidad, los cuales representan la potencialidad de que la zona genere o sea afectada por remociones en masa, también se elaboran mapas de peligro, que representan el comportamiento de zonas susceptibles en un contexto sísmico. Junto con esto se estima la dimensión de las potenciales remociones en cuanto a su volumen, alcance y energía.

Agradecimientos

Para estos momentos culmines de mi paso por la Universidad sólo tengo palabras de agradecimientos a mis padres: Arturo Opazo y Elizabeth Castro, todos mis valores se los debo a ellos, sé que muchas personas han ayudado en este trabajo, algunos me conocen muy bien y otros no tanto, para los que me conocen ya un largo tiempo sabrán mi admiración por mis padres y entenderán que les debo todo a ellos, los que no me conocen les pido que entiendan la situación.

En esta etapa de memorista tuve sostén en la familia que he formado con mi amor Angella, esta memoria está dedicada a ti, a la Ari y a nuestro hermoso Salvador. Mi futuro y todo lo que he adquirido en estos años de estudio estará unido a ustedes igual como lo está hoy.

Tengo que mencionar a personas importantes en mi memoria a Francisca Falcón (SERNAGEOMIN) por su actitud y ganas de generar el proyecto, siempre dispuesta a ayudar, a Marisol Lara que por email me ayudó un montón en el aspecto metodológico, a Poblete gran compañero y amigo, leal y honesto como sólo Poblete puede serlo y al SERNAGEOMIN por darme apoyo económico e intelectual a través del terreno.

Les amo Anggie, Ari y Salvador

Tabla de Contenido

Resumen	i
Agradecimientos	ii
1. Introducción	1
1.1 Formulación del Estudio	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Metodología de Trabajo	4
1.3.1 Estudios Preliminares de Gabinete (G1)	4
1.3.2 Primera Fase de Terreno (T1).....	4
1.3.3 Trabajo de Gabinete (G2)	4
1.3.4 Segunda Fase de Terreno (T2).....	8
1.3.5 Laboratorio (L1)	8
1.3.6 Trabajo de Gabinete (G3)	8
1.3.6.1 Modelación para deslizamiento en suelo	9
1.3.6.1.1 Modelo numérico para deslizamiento superficial	9
1.3.6.1.2 Software para deslizamiento rotacional.....	9
1.3.6.2 Modelación para deslizamiento en roca.....	9
1.3.6.2.1 Software para deslizamientos planares.....	10
1.3.6.2.2 Software para deslizamientos en cuña.....	10
1.3.6.2.3 Análisis local de deslizamiento.....	10
1.3.6.3 Modelación para caídas de rocas	10
1.3.7 Trabajo de Gabinete (G4)	11
1.3.7.1 Alcance para deslizamiento de suelo.....	11
1.3.7.2 Alcance para deslizamiento de roca	12
1.3.7.3 Alcance de caídas de rocas.....	12
1.3.8 Trabajo de Gabinete (G5)	13
1.3.9 Trabajo de Gabinete (G6)	13
2. Marco Teórico.....	14
2.1 Remociones en masa.....	14
2.2 Remociones en masa desencadenadas por sismos	15
2.2.1 Caídas o desprendimientos de rocas (“falls”).....	17
2.2.2 Volcamientos (“topples”)	17
2.2.3 Deslizamientos (“Slides”)	18
2.2.3.1 Deslizamientos traslacionales.....	18
2.2.3.2 Deslizamientos Rotacionales ‘slumps’-.....	19
2.3 Factores condicionantes de remociones en masa	19

2.3.1	Geología y Geotecnia	20
2.3.2	Geomorfología	20
2.3.3	Actividad Antrópica	21
2.4	Monitoreo y Mitigación.....	21
3.	Antecedentes del área de estudio.....	24
3.1	Generalidades	24
3.2	Geomorfología de la ciudad de Iquique y Alto Hospicio	25
3.3	Geomorfología de la zona de estudio	26
3.4	Geología de la ciudad de Iquique y Alto Hospicio	27
3.5	Geología de la zona de estudio	30
3.5.1	Unidades de roca.....	30
3.5.1.1	Formación Punta Barranco.....	30
3.5.2	Depósitos sedimentarios.....	30
3.5.2.1	Gravas de Alto Hospicio (Depósito consolidado)	30
3.5.2.2	Depósitos Aluviales (Depósito no consolidado)	31
3.5.2.3	Depósitos Coluviales (Depósito no consolidado)	31
3.5.2.4	Depósitos Eólicos (Depósito no consolidado)	31
3.5.2.5	Depósitos aluviales activos (Depósito no consolidado).....	31
3.5.2.6	Depósitos Antrópicos (Depósito no consolidado).....	33
3.6	Estructuras	33
3.7	Estructuras menores.....	34
3.8	Geotecnia	35
3.8.1	Unidades de suelo	35
3.8.1.1	Duna Dragón	36
3.8.1.2	Planta Tratamiento y Caliche, Alto Hospicio	37
3.8.2	Unidades de roca.....	39
3.9	Sismicidad	41
3.9.1	Sismicidad reciente	42
3.9.2	Sismicidad Histórica.....	43
3.9.2.1	13 de agosto de 1868.....	43
3.9.2.2	9 de mayo de 1877.....	44
3.10	Antecedentes de caídas de roca y deslizamientos.....	46
3.11	Factores antrópicos.....	50
4.	Evaluación de susceptibilidad	51
5.	Evaluación de probabilidad de falla.....	57
5.1	Deslizamientos rotacionales de suelo.....	58
5.2	Deslizamientos traslacionales de suelo (superficiales)	59

5.3	Deslizamientos en roca	61
5.3.1	Zonas locales de deslizamiento de roca.....	63
5.4	Caídas de rocas	64
6.	Alcance de las remociones en masa.....	65
6.1	Deslizamientos rotacionales de suelo (profundos).....	65
6.2	Deslizamientos de suelo traslacional (superficial).....	65
6.3	Deslizamiento de roca en bloque.....	66
6.4	Caídas de rocas	66
7.	Peligro	67
8.	Discusiones	72
8.1	Respecto a la metodología	72
8.2	Respecto a las áreas de peligro.....	75
9.	Conclusiones	81
10.	Referencias.....	83
Anexos	I
1.	Mapa de pendientes para la zona de estudio.....	I
2.	Unidades geológicas de la zona de estudio	II
3.	Registro de acelerogramas.....	III
3.1	Terremoto de Tocopilla 2007.....	III
3.2	Terremoto de Tarapacá 2005.....	IV
4.	Registro de terremotos históricos	V
4.1	1513 y 1543	V
4.2	24 de noviembre de 1604.....	V
4.3	16 de septiembre de 1615.....	VI
4.4	13 de mayo de 1784.....	VI
4.4	Período entre 1513-2011.....	VII
5.	Análisis cinemático de deslizamiento en bloque.....	IX
6.	Unidades Geomorfológicas susceptibles a remociones en masa	XI
7.	Perfil de las unidades geomorfológicas	XV

Índice de Tablas

Tabla 1.1 : Desglose para cada factor condicionante en deslizamiento de roca (modificado de Lara, 2007)	5
Tabla 1.2 : Desglose para cada factor condicionante en caídas de roca (modificado de Lara, 2007)	6
Tabla 1.3 : Desglose de los factores condicionantes de deslizamiento de suelo (modificado de Lara, 2007)	7
Tabla 1.4 : Relación entre probabilidad numéricas y cualitativas de generación de Fenómenos de Remoción en masa (Lara, 2007)	9
Tabla 1.5 : Relación entre probabilidad de generación de deslizamientos en bloque y pendientes (Lara, 2007)	10
Tabla 1.6 : Relación entre probabilidades de generación de caídas de rocas y pendientes (Keefer, 1984)	11
Tabla 1.7 : Relación entre probabilidades de alcance de deslizamiento y pendientes (Lara, 2007)	12
Tabla 1.8 : Relación entre probabilidades de alcance de caídas de rocas y pendientes (Lara, 2007)	12
Tabla 1.9 : Matriz de combinaciones para definir el Grado de Peligro Geológico Global (Lara, 2007)	13
Tabla 2.1 : Clasificación de Remociones en Masa (Varnes, 1978)	14
Tabla 2.2 : Clasificación de remociones en masa basada en generación por sismos (modificada de Keefer, 1984)	15
Tabla 2.3 : Abundancia de eventos de remoción en masa generadas por sismos (Keefer, 1984)	16
Tabla 2.4 : Tipos de remociones en masa generadas por sismos	16
Tabla 2.5 : Factores condicionantes relevantes para cada tipo de remoción en masa (Hauser, 1993)	19
Tabla 3.1 : Sets estructurales de la zona de estudio	34
Tabla 3.2 : Propiedades índice suelos calicata Iquique – Cerro Dragón (Idiem, 2010)	36
Tabla 3.3 : Estado Compacidad, Densidad Relativa (DR) suelos calicata Iquique – Cerro Dragón (Idiem, 2010)	36
Tabla 3.4 : Estratigrafía Calicata Alto Hospicio – Planta Tratamiento (Idiem, 2010)	37
Tabla 3.5 : Propiedades índice suelos calicata Alto Hospicio – Planta Tratamiento (Idiem, 2010)	38
Tabla 3.6 : Estratigrafía Calicata Alto Hospicio – Caliche (Idiem, 2010)	38
Tabla 3.7 : Propiedades índice de suelos calicata Alto Hospicio – Caliche (Idiem, 2010)	38
Tabla 3.8 : Caracterización Geotécnica del macizo rocoso, RQD	40
Tabla 3.9 : Caracterización Geotécnica del macizo rocoso, Puntuación para RMR y GSI	40
Tabla 3.10 : Aceleraciones máximas horizontales y verticales del Terremoto de Tocopilla 2007 (RENADIC – UCH)	42
Tabla 3.11 : Aceleraciones máximas horizontales y verticales del Terremoto de Tarapacá 2005 (RENADIC – UCH)	43
Tabla 3.12 : Catastro de remociones en masa con sus respectivas coordenadas	47
Tabla 4.1 : $IS \geq 50$ para deslizamiento rotacional	51
Tabla 4.2 : $IS \geq 50$ para deslizamiento de suelos traslacionales	51
Tabla 4.3 : $IS \geq 50$ para deslizamientos de roca en bloque	54
Tabla 4.4 : $IS \geq 50$ para caídas de rocas	54
Tabla 5.1 : Aceleración horizontal y vertical del escenario sísmico asumido	57
Tabla 5.2 : Aceleraciones máximas del Terremoto del Maule y comparación con el escenario asumido	58

Tabla 5.3 : Parámetros geotécnicos para suelo profundos y su desviación estándar.....	58
Tabla 5.4 : Factor de seguridad y Probabilidad de falla para deslizamientos rotacionales (profundos).....	59
Tabla 5.5 : Parámetros geotécnicos para suelo superficiales y su desviación estándar.....	60
Tabla 5.6 : Factor de seguridad y Probabilidad de falla para deslizamientos de suelo traslacionales.....	60
Tabla 5.7 : Probabilidad de generación de deslizamientos en roca para cada zona estructural según el tipo de deslizamiento.....	62
Tabla 5.8 : Probabilidad de generación de deslizamiento en roca para cada unidad geomorfológica según el tipo de deslizamiento.....	63
Tabla 5.9 : Parámetros geotécnicos para roca y su desviación estándar.....	63
Tabla 5.10 : Factor de seguridad y Probabilidad de falla para taludes locales con y sin protección de shotcrete.....	64
Tabla 5.11 : Probabilidad de generación de deslizamiento en bloque para taludes locales con o sin protección de shotcrete.....	64
Tabla 6.1 : Volúmenes deslizados en un escenario sísmico.....	65
Tabla 6.2 : Pendientes críticas de alcance para deslizamientos traslacionales en un escenario sísmico.....	65
Tabla 6.3 : Datos utilizados para caídas de rocas en Rocfall.....	66
Tabla 6.4 : Coeficientes de restitución empleados en la modelación de Rocfall.....	66

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1.1 : Ubicación de la zona de estudio, en recuadro rojo la zona de estudio	1
Ilustración 2.1: (a) Caídas de roca (b) Deslizamientos (c) Volcamiento (toppling).....	14
Ilustración 2.2 : Formas de movimiento para caídas de rocas. Izquierda: Proyecto Multinacional andino, 2007 Derecha: Modificado de Hoek, 2000.....	17
Ilustración 2.3 : Esquema de toppling (Proyecto Multinacional andino, 2007)	18
Ilustración 2.4 : Esquema de deslizamiento traslacional. (Corominas Dulcet y García Yagué 1997).	18
Ilustración 2.5 : Partes de un deslizamiento (Varnes, 1978).....	19
Ilustración 2.6 : Shotcrete y anclajes como medidas de mitigación.	22
Ilustración 2.7 : Malla para mitigación de deslizamiento de roca tipo planar y cuña	22
Ilustración 2.8: Malla estilo cortina para mitigación de caídas de roca	23
Ilustración 2.9 : Barrera dinámica para mitigación de caídas de roca.....	23
Ilustración 3.1 : Esquema morfoestructural del área de Iquique (Marquardt et al., 2008)	24
Ilustración 3.2 : Acantilado activo del norte de Iquique, e Inactivo al este de la ciudad.	26
Ilustración 3.3 : Arriba, Gran Escarpe Costero que limita la ciudad de Iquique, curvas de nivel cada 20m. Abajo, imagen satelital de la ruta A-16 (Google Earth)	27
Ilustración 3.4 : Geología delas ciudades de Iquique y Alto Hospicio, en recuadro rojo zona de estudio (Marquardt, et al., 2008)	29
Ilustración 3.5 : Mapa Geológico de la zona de estudio (Modificado de Marquardt, 2008)	32
Ilustración 3.6 : Mapa morfoestructural, Ciudad de Iquique y Alto Hospicio (Marquardt et al (2005)).....	33
Ilustración 3.7 : Fallas en la zona del ZigZag.	34
Ilustración 3.8 : Posición A, B, C y D de la obtención de datos	35
Ilustración 3.9 : Ubicación de Calicata Iquique – DunaDragón y sus coordenadas (Idiem, 2010)	36
Ilustración 3.10 : Granulometría calicata Iquique – Cerro Dragón (Idiem, 2010)	37
Ilustración 3.11 : Ubicación Calicatas efectuadas en Alto Hospicio y sus coordenadas. Izquierda: Caliche, Derecha: Planta Tratamiento (Idiem, 2010)	37
Ilustración 3.12 : Granulometría calicata, Izquierda: Alto Hospicio – Planta Tratamiento, Derecha: Alto Hospicio – Caliche (Idiem, 2010) (Idiem, 2010)	38
Ilustración 3.13 : Talud del punto B en donde se muestran los dos dominios de calidad del macizo rocoso.....	39
Ilustración 3.14 : Dominio 2 del macizo rocoso	40
Ilustración 3.15 : Fuentes sismogénicas basadas en sismos mayores a $M = 5$ entre 1911-2013 (1911-1976 sismos obtenidos del catálogo SISRA y 1977-2013 del catálogo ISC) ver Anexo B.6.....	41
Ilustración 3.16 : Izquierda, distribución de sismos mayores a $M = 5$ entre 1911-2013 en la Región de Tarapacá (1911-1976 sismos obtenidos del catálogo SISRA y 1977-2013 del catálogo ISC). Derecha, Zonas sísmicas para el Norte de Chile (NCh 433, of. 96.).....	41
Ilustración 3.17 : Datos del terremoto de Tocopilla 2007 (RENADIC – UCH). Magnitud e intensidades por localidad.....	42
Ilustración 3.18 : Datos del terremoto de Tarapacá 2005 (RENADIC – UCH). Magnitud e intensidades por localidad	43
Ilustración 3.19 : Mapa de isosistas, Terremoto de Arica 1868. (SISRA, Kausel, 1983);.....	44
Ilustración 3.20 : Mapa de isosistas, Terremoto de Iquique 1877 (Kausel, 1985).....	45
Ilustración 3.21 : Daños generados por el terremoto de Junio del 2005 (ONEMI, 2009)	46
Ilustración 3.22 : imagen de desprendimientos de roca en los cerros de Iquique, terremoto de Junio del 2005.	46
Ilustración 3.23 : Posición de los distintos puntos de obtención de datos en la zona de estudio (Ver Tabla 3.12).....	47

Ilustración 3.24 : Zonas de generación de remociones en masa (los números en la esquina superior están asociados a la Tabla 3.12 e ilustración 3.20).....	48
Ilustración 3.25 : Zonas de alcance de caídas de rocas (los números en la esquina superior están asociados a la Tabla 3.12 e ilustración 3.20).....	49
Ilustración 3.26 : Factores antrópicos que afectan la zona de estudio (obtenidas de http://urbatoriumiquique.blogspot.com (izquierda) y en terreno).....	50
Ilustración 3.27 : Shotcrete y mallas como medidas de mitigación.....	50
Ilustración 4.1 : Unidades Geomorfológicas de la zona de estudio	52
Ilustración 4.2 : Índice de susceptibilidad - Deslizamientos de suelo.....	53
Ilustración 4.3 : Índice de susceptibilidad - Deslizamiento de roca en bloque	55
Ilustración 4.4 : Índice susceptibilidad - Caídas de rocas	56
Ilustración 7.1 : Mapa de Peligro de deslizamiento de suelo rotacional. Escenario sísmico	68
Ilustración 7.2 : Mapa de Peligro de deslizamiento de suelo traslacional, Escenario sísmico....	69
Ilustración 7.3 : Mapa de Peligro de deslizamiento de roca en bloque.	70
Ilustración 7.4 : Mapa de Peligro de caídas de rocas, Escenario sísmico.	71
Ilustración 8.1 : Relación entre IS y Peligro para deslizamientos de suelo rotacional.....	75
Ilustración 8.2 : Relación entre IS y Peligro para deslizamientos de suelo traslacional	76
Ilustración 8.3 : Distribución de IS en deslizamientos de suelo	76
Ilustración 8.4 : Relación entre IS y Peligro para deslizamientos de roca en bloque	77
Ilustración 8.5 : Distribución de IS en deslizamientos de roca en bloque	77
Ilustración 8.6 : Relación entre IS y Peligro para caídas de roca	78
Ilustración 8.7 : Distribución de IS en caídas de roca.....	78
Ilustración 8.8 : Disposición de los perfiles (generación, alcance y energía) en el mapa de Peligro de caídas de rocas.....	80
Ilustración 8.9 : Perfil (Abajo: generación y alcance, Arriba: energía) de las unidades geomorfológicas 4 y 75. En el anexo 7 se muestran todos los perfiles (En azul se presenta la generación y en rojo el alcance)	80

1. Introducción

1.1 Formulación del Estudio

Las ciudades Iquique y Alto Hospicio permanecen en constante amenaza de remociones en masa, en particular de caídas de rocas debido al contexto geológico y geomorfológico donde se emplazan. Iquique se presenta limitado al Este por el Gran Escarpe Costero que por su topografía es condicionante fundamental para procesos de remoción en masa, afectando la población en general y principalmente a una de sus vías de acceso, la ruta A-16. Entre los eventos con mayor probabilidad de ocurrencia se encuentran caídas de rocas y deslizamientos tanto de suelo como de roca, que pueden ser desencadenados por terremotos. Por otra parte, existe un alto riesgo sísmico en la zona por la presencia de una Laguna Sísmica (GAP), por lo tanto se espera próximamente un terremoto de gran magnitud que estabilice y libere la energía acumulada por el proceso de subducción.

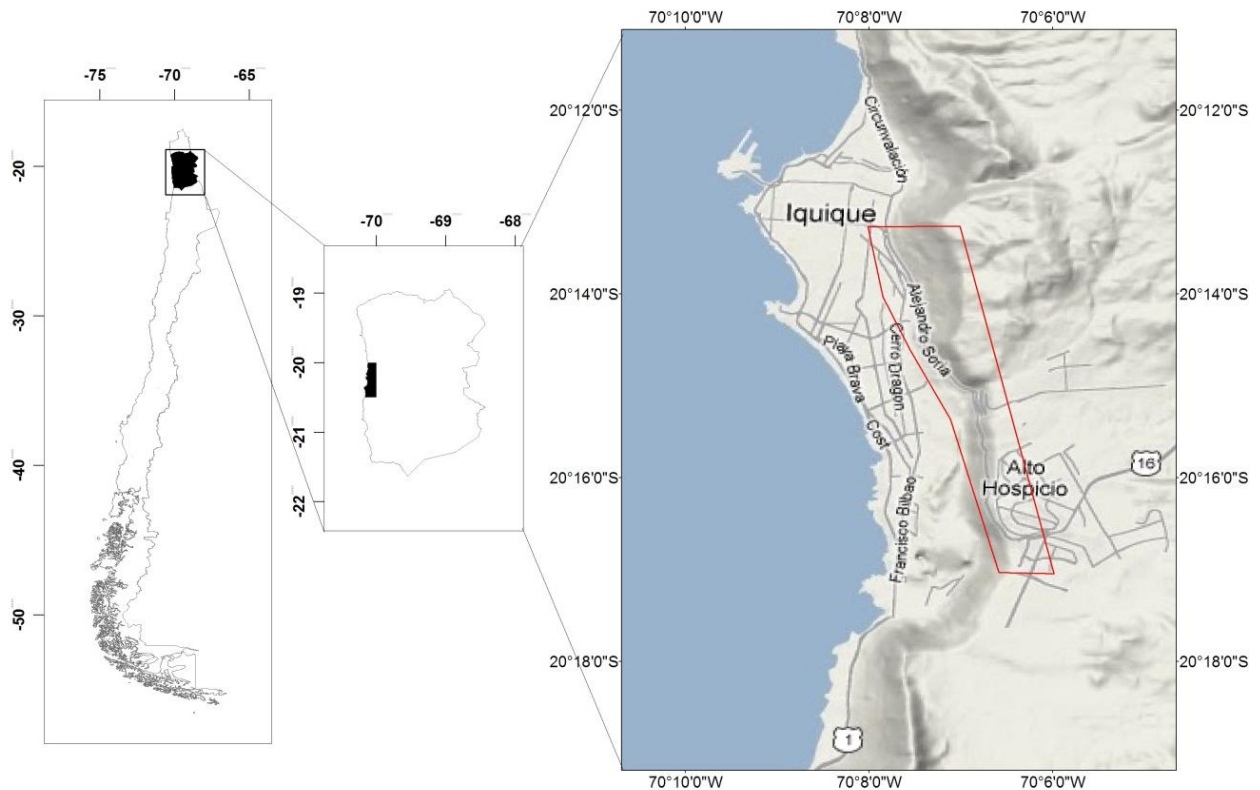


Ilustración 1.1 : Ubicación de la zona de estudio, en recuadro rojo la zona de estudio

Iquique y Alto Hospicio se ubican en la Región de Tarapacá, Chile, entre latitudes 20°09'-20°21'S y longitud 70°04'-70°09'O, la cual limita al norte con la XV Región de Arica y Parinacota, al sur con la II Región de Antofagasta, al Este con la República de Bolivia y al Oeste con el océano Pacífico (Ilustración 1.1). En particular la ruta A-16 se emplaza en el Gran Escarpe Costero que limita a la ciudad de Iquique por el oriente y hacia el sureste se presenta la gran duna Cerro Dragón santuario de la naturaleza. La ciudad de Iquique está expuesta a deslizamientos de suelo o roca y caídas de rocas, si bien la ciudad de Iquique está propicia a diferentes peligros geológicos desencadenados por terremotos como tsunamis y procesos de licuefacción, el estudio se enfoca en los peligros geológicos que dañarían la ruta A-16 vía de acceso principal a la ciudad de Iquique, parte valiosa y a la vez vulnerable, la cual es comunicación con ciudades vecinas, Existe otra vía de acceso a la ciudad de Iquique, ésta conecta la costa de Iquique con la ciudad de Tocopilla.

En el presente estudio se aborda con profundidad algunos requerimientos expresados por el SERNAGEOMIN en la carta geológica de las ciudades de Iquique y Alto Hospicio (Marquardt et al., 2008), y el Estudio fundado de Riesgo: Plan Regulador Costero Región de Tarapacá comunas de Iquique, Alto Hospicio y Huara (Fock et al., 2010), estos requerimientos comprenden una caracterización precisa del peligro de remociones en masa en la zona y sus posibles mitigaciones. Para objeto del estudio se puntualiza en la ruta A-16 vía que une Iquique y Alto Hospicio, que se emplaza como límite Oriental de la ciudad. Tanto para el plano regulador en las zonas expuestas como para la planificación del Ordenamiento Territorial de la ciudad de Iquique y Alto Hospicio es relevante conocer el alcance y la magnitud que pueden tener eventos de remociones en masa. Para el caso particular la vía de acceso es fundamental para el flujo comercial y comunicacional, por lo que un posible escenario de generación de cualquier evento o desencadenante de remociones en masa dañaría en forma importante la ciudad dejándola aislada.

Este estudio busca realizar una evaluación del peligro de remociones en masa al que se encuentra expuesta la ciudad de Iquique, en particular una de las vías de acceso de la ciudad ya que es fundamental para la comunicación y obtención de suministros en período de catástrofe producida por terremotos de gran magnitud.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es evaluar el peligro de remociones en masa, desencadenadas principalmente por eventos sísmicos de gran magnitud en la ruta A-16,

Objetivos específicos en la zona de estudio a desarrollar para obtener el objetivo general

- Definir los factores que condicionan la ocurrencia de los diversos fenómenos de remoción en masa conocidos en el marco de un terremoto de gran magnitud como desencadenante.
- Caracterizar y cartografiar la geología del sector oriente de la ciudad de Iquique donde se emplaza la ruta A-16.
- Realizar una caracterización geológica-geotécnica de suelos y rocas involucrados en la generación de los procesos de remoción en masa.
- Identificar en el área de estudio zonas susceptibles de generar deslizamientos y/o caídas de rocas.
- Determinar los factores condicionantes de las remociones estudiadas, las probabilidades de falla asociadas y el alcance que tendrían, bajo un escenario sísmico.
- Realizar mapas de peligro para cada tipo de remoción en masa que permitan mostrar gráficamente los resultados obtenidos.

1.3 Metodología de Trabajo

La metodología utilizada se basa en el trabajo hecho por Lara (2007) en donde unifica metodologías cualitativas y cuantitativas para la evaluación de peligro geológico de remociones en masa, la cual se modificó debido al contexto sísmico y medioambiental de la zona en estudio. La metodología utilizada presentó 9 etapas, las cuales desarrollaron: trabajo en terreno, en gabinete y en laboratorio.

1.3.1 Estudios Preliminares de Gabinete (G1)

La primera parte consistió en definir la escala y el nivel de detalle más adecuado para cumplir el objetivo. Luego se realizó una minuciosa revisión de material bibliográfico que consistió en un catastro de eventos ocurridos en la zona y una recolección de, geología, geomorfología, características geotécnicas, hidrogeología e hidrología, sismicidad, actividad antrópica y antecedentes históricos de la zona de estudio.

1.3.2 Primera Fase de Terreno (T1)

El terreno consistió en la caracterización de unidades de roca y suelo, mediante mapeo geológico, geomorfológico y estructural añadiendo observaciones de hidrología e hidrogeología, clasificación geotécnica de propiedades in-situ y condiciones antrópicas. El Anexo A.1 muestra en detalle el modelo de caracterización.

1.3.3 Trabajo de Gabinete (G2)

Trabajo de gabinete desarrollado con la información obtenida en la primera fase de terreno, consistió en dividir la zona de estudio en unidades diferenciadas por características geológicas y geomorfológicas. A cada unidad se evaluó el grado de susceptibilidad de remociones en masa tanto para caídas de rocas como para deslizamiento de suelo y roca, para esto se utilizaron las tablas 1.1, 1.2 y 1.3 donde se ponderaron los factores condicionantes de cada unidad. Las unidades en que el índice de susceptibilidad (IS) fue mayor o igual a 50 se consideraron zonas susceptibles de generación de remociones en masa.

Se suprimieron las condicionantes de clima-vegetación para todas las remociones en masa analizadas en este estudio, debido a que estos factores no son preponderantes para la evaluación de susceptibilidad en esta zona en particular. Se adoso el puntaje restante principalmente a las condiciones geotécnicas y antrópicas de cada unidad, esta modificación busca adecuar la metodología a una zona desértica, con baja variabilidad climática, alto riesgo sísmico y urbanizada.

Para el caso de deslizamiento de roca y caídas de roca la ponderación máxima de sus factores condicionantes fueron: Geomorfología (pendientes de ladera) 35%, Geología-Geotecnia 35 %. Antrópico (desestabilización de laderas) 15%, Antecedentes declarados 15%. En la Tabla 1.1 y 1.2 se presenta el desglose de los factores condicionantes para deslizamiento de roca y caída de roca.

Tabla 1.1 : Desglose para cada factor condicionante en deslizamiento de roca (modificado de Lara, 2007)

Factores condicionantes aplicados por Lara (2007)				Modificaciones	
Factor	Especificaciones	Rangos	%	Consideraciones	%
Pendientes de ladera (f ₁)	Promedio de la unidad	15°-20°	11%	Se decidió no modificar los porcentajes de este factor debido a que se consideró que mantiene la misma preponderancia tanto en la zona de la quebrada San Ramón, Lara (2007), como en sectores aledaños a la ciudad de Iquique	11%
		20°-25°	15%		15%
		25°-30°	20%		20%
		30°-40°	25%		25%
		40°-60°	30%		30%
		>40°	35%		35%
Características geológicas-geotécnicas del material (f ₂)	Su generación se ve favorecida por alto grado de fracturamiento, alta meteorización y presencia de agua en el macizo. La orientación de fracturas permitirán identificar el tipo de deslizamiento: deslizamiento plano (superficie de deslizamiento en el sentido de la ladera), cuña (por intersección de estructuras) o toppling (fracturas opuestas al sentido de la ladera). Puede considerarse valores bajos de RMR (<30) -modificado según orientación de estructuras de laderas- como indicativo aproximado de condiciones muy favorables para generación de deslizamientos	muy favorable	35%	Se decidió no modificar los porcentajes de este factor debido a que se consideró que mantiene la misma preponderancia tanto en la zona de la quebrada San Ramón, Lara (2007), como en sectores aledaños a la ciudad de Iquique	35%
		favorable	28%		28%
		medianamente favorable	18%		18%
		poco favorable	11%		11%
		muy poco favorable	4%		4%
Acumulación de nieve (f ₃)	Según estacionalidad	siempre	5%	Se suprimió este factor debido a que la ciudad de Iquique no presenta este tipo de condición climática	0%
		estacional	2%		
		esporádico	1%		
		nula	0%		
Desestabilización artificial de laderas (f ₄)	Por ejemplo cortes artificiales de laderas, construcción de terraplenes, etc.	importante	10%	Se aumentaron los porcentajes debido a que en la zona de estudio existe una alta desestabilización de ladera por la construcción de rutas y caminos de acceso, por lo que este factor antrópico es fundamental para la determinación de susceptibilidad de deslizamientos de roca	15%
		poco importante	5%		8%
		no observado	0%		0%
Deslizamientos declarados en la ladera (f ₅)	Información escrita y/u observación de escarpes y superficies de deslizamiento	presente	15%	Para este factor se considera la misma preponderancia que en la zona de la quebrada de San Ramón, Lara (2007), por lo que no se modificó	15%
		sin antecedentes	5%		5%
		no observado	0%		0%
Tipo de material (f ₆)	En este caso, el material suelo no está en estudio, por lo tanto pondera por 0 al resto de los factores. Suelo muy superficial en unidades mapeadas como roca no se considera.	suelo	0	Sin modificar	
Roca (cobertura aproximada <1m-1,5m de suelo)	1				

Tabla 1.2 : Desglose para cada factor condicionante en caídas de roca (modificado de Lara, 2007)

Factores condicionantes aplicados por Lara (2007)				Modificaciones	
Factor	Especificaciones	Rangos	%	Consideraciones	%
Pendientes de ladera (f ₁)	Promedio de la unidad	15°-20°	4%	Se decidió no modificar los porcentajes de este factor debido a que se consideró que mantiene la misma preponderancia tanto en la zona de la quebrada San Ramón, Lara (2007), como en sectores aledaños a la ciudad de Iquique	4%
		20°-25°	10%		10%
		25°-30°	18%		18%
		30°-40°	25%		25%
		40°-60°	32%		32%
		>40°	35%		35%
Características geológicas-geotécnicas del material (f ₂)	Será más favorable a medida que presente estructuras subverticales en el macizo, alta frecuencia de fracturas y orientación de fracturas en el sentido de la ladera. Se consideran además los factores generadores de deslizamientos de roca.	muy favorable	35%	Se decidió no modificar los porcentajes de este factor debido a que se consideró que mantiene la misma preponderancia tanto en la zona de la quebrada San Ramón, Lara (2007), como en sectores aledaños a la ciudad de Iquique	35%
		favorable	24%		24%
		medianamente favorable	15%		15%
		poco favorable	9%		9%
		muy poco favorable	3%		3%
Acumulación de nieve (f ₃)	Asociados al proceso de hielo/deshielo que contribuyen en las caídas de rocas debido a la generación de esfuerzos en tracción en la roca.	estacional	10%	Se suprimió este factor debido a que la ciudad de Iquique no presenta este tipo de condición climática	0%
		siempre	4%		
		esporádico	2%		
		nula	0%		
Desestabilización artificial de laderas (f ₄)	Por ejemplo cortes artificiales de laderas, construcción de terraplenes, etc.	importante	5%	Se aumentaron los porcentajes debido a que en la zona de estudio existe una alta desestabilización de ladera por la construcción de rutas y caminos de acceso, por lo que este factor antrópico es fundamental para la determinación de susceptibilidad de deslizamientos de roca	15%
		poco importante	3%		8%
		no observado	0%		0%
Caídas de roca declaradas en la ladera (f ₅)	Presencia de bloques caídos	presente	15%	Para este factor se considera la misma preponderancia que en la zona de la quebrada de San Ramón, Lara (2007), por lo que no se modificó	15%
		no observado	0%		0%
Tipo de material (f ₆)	En este caso, el material suelo no está en estudio, por lo tanto pondera por 0 al resto de los factores. Suelo muy superficial en unidades mapeadas como roca no se considera.	suelo	0	Sin Modificar	
		Roca (cobertura aproximada <1m-1,5m de suelo)	1		

Índice de susceptibilidad para deslizamientos en roca y caídas de roca: $IS_{DR} = \left(\sum_{i=1}^5 f_i \right) \cdot f_6$

Para el caso de deslizamiento en suelo las ponderaciones máximas de los distintos factores condicionantes fueron: Geomorfología (pendientes de laderas) 40%, Geología-Geotecnia (características geológicas-geotécnicas, condiciones de humedad y saturación) 30%, Antrópico (desestabilización artificial de laderas) 15% y Antecedes de remoción (deslizamientos declarados) 15%. En la Tabla 1.3 se presenta el desglose de cada factor con las respectivas modificaciones.

Índice de susceptibilidad para deslizamientos en suelo: $IS_{DS} = \left(\sum_{i=1}^9 f_i \right) \cdot f_{10}$

Tabla 1.3 : Desglose de los factores condicionantes de deslizamiento de suelo (modificado de Lara, 2007)

Factores condicionantes aplicados por Lara (2007)				Modificaciones	
Factor	Especificaciones	Rangos	%	Consideraciones	%
Pendientes de ladera (f ₁)	Promedio de la unidad	15°-20°	9%	Se aumentaron los porcentajes debido a que la geomorfología de la zona de estudio es factor fundamental para la determinación de susceptibilidad de deslizamientos en suelo, en desmedro de otras condicionantes de tipo climáticas	12%
		20°-25°	15%		20%
		25°-30°	21%		28%
		30-40°	26%		35%
		>40°	30%		40%
Exposición al sol (f ₂)	Para el caso de Chile central, alta exposición: laderas mirando al N, al estar expuestas al Sol todo el año. Parcial: laderas mirando al E-W. Baja: laderas mirando al S.	alta	5%	Se suprimió el porcentaje debido a que este factor no es preponderante para la determinación de susceptibilidad de deslizamientos en suelo en la zona de estudio. Este factor consiste en cómo afecta el Sol en deshielos y vegetación.	0%
		parcial	3%		
		baja	1%		
Características geológicas-geotécnicas del material (f ₃)	Condiciones muy favorables para generación de deslizamiento son, entre otros, baja densidad (<1,6-1,8 KN/m ³), baja resistencia, alta cantidad de material fino en su composición (>50%); además de la estructura y estratificación del suelo. La generación de material removible a partir de roca se ve favorecido por la alta meteorización y alteración.	muy favorable	20%	Se decidió no modificar los porcentajes de este factor debido a que se consideró que mantiene la misma preponderancia tanto en la zona de la quebrada San Ramón como en sectores aledaños a la ciudad de Iquique	20%
		favorable	14%		14%
		medianamente favorable	10%		10%
		poco favorable	6%		6%
		muy poco favorable	2%		2%
Condiciones de humedad y saturación (f ₄)	Considerar: (1) Capacidad de saturación por abajo (profundidad del nivel freático) y por arriba (infiltración por precipitación). (2) Capacidad de almacenaje de agua en la estructura de suelo (asociado a presencia de niveles impermeables). Saturación y mayor almacenaje favorecen generación de deslizamientos. La relación (profundidad N.F./espesor de suelo) cercana a 0 indica condiciones muy favorables de generación, ~0,5 es favorable.	muy favorables	10%	Se decidió no modificar los porcentajes de este factor debido a que se consideró que mantiene la misma preponderancia tanto en la zona de la quebrada San Ramón como en sectores aledaños a la ciudad de Iquique	10%
		favorable	7%		7%
		poco favorables	3%		3%
		sin antecedentes	2%		2%
Acumulación de nieve (f ₅)	Según estacionalidad	siempre	5%	Se suprimió este factor debido a que la ciudad de Iquique no presenta este tipo de condición climática	0%
		estacional	2%		
		esporádico	1%		
		nula	0%		
Cobertura vegetal (f ₆)	Densidad en la ladera	nula a baja	5%	Se suprimió este factor debido a que la ciudad de Iquique no presenta vegetación de manera considerable.	0%
		moderada	2%		
		alta	0%		
Desestabilización artificial de laderas (f ₇)	Por ejemplo cortes artificiales de laderas, construcción de terraplenes, etc.	importante	10%	Se aumentaron los porcentajes debido a que en la zona de estudio existe una alta desestabilización de ladera por la construcción de rutas y caminos de acceso, por lo que este factor antrópico es fundamental para la determinación de susceptibilidad de deslizamientos de suelo	15%
		poco importante	5%		8%
		no observado	0%		0%
Deslizamientos declarados en la unidad geomorfológica (f ₈)	Información escrita y/u observación de escarpes y superficies de deslizamiento	presente	10%	Para este factor se consideró la misma preponderancia que en la zona de la quebrada de San Ramón por lo que no se modificó	10%
		sin antecedentes	3%		3%
		no observado	0%		0%
Deslizamientos declarados en la unidad geomorfológica de suelo (f ₉)	Información escrita y/u observación de escarpes y superficies de deslizamiento	presente	5%	Para este factor se considera la misma preponderancia que en la zona de la quebrada de San Ramón por lo que no se modificó	5%
		sin antecedentes	2%		2%
		no observado	0%		0%
Tipo de material (f ₁₀)	En este caso, el material roca no está en estudio, por lo tanto pondera 0 al resto de los factores	suelo	1	Sin Modificación	
		Roca (cobertura aproximada <1m-1,5m de suelo)	0		

1.3.4 Segunda Fase de Terreno (T2)

Terreno en el cual se obtuvo un mapeo estructural (Anexo A.2) en unidades críticas que cumplan la condición de susceptibilidad hecha en el trabajo de gabinete (G2), el mapeo estructural consistió en mediciones de discontinuidades en lugares puntuales, determinando sets de discontinuidades para el posterior desarrollo de la metodología. Además se efectuó una caracterización y observación de los distintos taludes locales que presentaron algunas unidades.

1.3.5 Laboratorio (L1)

En esta parte se obtuvo material de laboratorio en donde se determinaron propiedades geotécnicas de las rocas y suelos de la zona de estudio, principalmente granulometría, densidad, plasticidad y resistencia, esta información es de gran importancia para los modelos de estabilidad que requirió el estudio, existen valores típicos para suelos y roca los cuales se muestran en el Anexo A.3.

1.3.6 Trabajo de Gabinete (G3)

Esta tercera parte de gabinete contempló la determinación de probabilidades de falla para las unidades geomorfológicas que cumplan la condición de susceptibilidad, se evaluó mediante herramientas numéricas y computacionales, con las cuales posteriormente se determinó el peligro de cada tipo de remoción en masa. Las distintas herramientas utilizadas requirieron datos de entrada asociados al escenario sísmico asumido, como también la topografía y las características geotécnicas de suelos y rocas. Con respecto al escenario sísmico asumido, se determinaron las aceleraciones verticales y horizontales que afectarían a la zona en cuestión, mediante el historial de registros de aceleraciones sísmicas (grandes terremotos que afectaron la región estudiada) y la Norma Sísmica Chilena, NCh 433.Of96.

Se realizó una relación entre el valor numérico de las probabilidades de falla y la probabilidad cualitativa del origen de una remoción, debido a la necesidad de una comparación entre distintos valores entregados por las herramientas computacionales. La tabla 1.7 está determinada por el factor de seguridad asociado, ya que éste deber ser igual o menor a 1 para que la ladera sea inestable, los análisis probabilísticos muestran que probabilidades mayores a 50% tienen un factor de seguridad asociado igual o menor a 1, por lo tanto la probabilidad numérica mayor a 50% es asociada a una alta probabilidad de generación de remoción en masa. Para cada tipo de remociones en masa la evaluación de probabilidades de fallas se realizó mediante distintas herramientas computaciones o numéricas (Anexo B).

Tabla 1.4 : Relación entre probabilidad numéricas y cualitativas de generación de Fenómenos de Remoción en masa (Lara, 2007)

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

1.3.6.1 Modelación para deslizamiento en suelo

Se determinaron dos tipos de deslizamiento en suelo a evaluar: deslizamiento traslacional (superficial) y deslizamiento rotacional (profundo)

1.3.6.1.1 Modelo numérico para deslizamiento superficial

El modelo aplicado a este tipo de deslizamiento es de ladera infinita (Anexo B.1), el cual tiene como característica un suelo con espesor mucho menor comparado con la extensión de la ladera, con esto se determinó para cada unidad geomorfológica el factor de seguridad asociado. Se calculó la probabilidad de falla mediante una modelación Montecarlo, en la cual se asignaron a cada variable una distribución estadística representativa.

1.3.6.1.2 Software para deslizamiento rotacional

Para este tipo de remociones en masa se utilizó el Software Slide 5.0 de Rocscience (Anexo B.2), el cual utiliza el método de tajadas para obtener el factor de seguridad y la probabilidad de falla. Esta herramienta requiere de un perfil representativo de la unidad geomorfológica, valores numéricos de las propiedades de los materiales y las fuerzas externas de la situación sísmica asumida.

1.3.6.2 Modelación para deslizamiento en roca

Como primer paso, se realizó un análisis cinemático de las laderas mediante los sets estructurales obtenidos en la segunda fase de terreno, para cada punto de obtención de datos se estudiaron cinemáticamente deslizamientos planares, en cuña y toppling (Anexo B.3). Esta parte del análisis se desarrolló mediante el software DIPS de Rocscience, por el cual se determinó para cada unidad geomorfológica el cumplimiento de las condiciones cinemáticas para cada tipo de deslizamiento en roca, dependiendo de este cumplimiento se procedió a la modelación.

1.3.6.2.1 Software para deslizamientos planares

Se utilizó el Software Rocplane de Rocscience (Anexo B.4), el cual utiliza la geometría de la ladera, las propiedades de los materiales y la orientación de las estructuras, entrega el factor de seguridad y las probabilidades de falla asociadas a deslizamientos planos de las estructuras

1.3.6.2.2 Software para deslizamientos en cuña

Se utilizó el Software Swedge de Rocscience (Anexo B.4), el cual utiliza la geometría de la ladera, las propiedades de los materiales y la orientación de las estructuras que generan la cuña que flora en la ladera, entrega el factor de seguridad y las probabilidades de falla asociadas a deslizamientos en cuña.

1.3.6.2.3 Análisis local de deslizamiento

Este análisis buscó determinar deslizamientos locales que no fueron analizados debido a que el método anterior toma geometrías representativas de las unidades geomorfológicas, por lo tanto zonas locales con alta pendiente fueron incluidas mediante este proceso. Se utilizaron las pendientes de talud mínimas necesarias para la generación de deslizamientos en roca (para planos, cuña y toppling), obtenidas a través del análisis cinemático previo. A esta pendiente se le llamó pendiente crítica ($\beta_{\text{crítico}}$), y se le asociaron rangos de probabilidad cualitativa de generación de deslizamientos en bloque basados en bibliografía y experiencia en terreno. Las pendientes locales fueron evaluadas con respecto a la relación que se muestra en la tabla 1.7.

Tabla 1.5 : Relación entre probabilidad de generación de deslizamientos en bloque y pendientes (Lara, 2007).

Probabilidad de generación de deslizamientos en bloque	Variación máxima de la pendiente local (β) con respecto a la pendiente crítica ($\beta_{\text{crítico}}$)
Baja	$\beta_{\text{crítico}} - 15^\circ < \beta < \beta_{\text{crítico}} - 10^\circ$
Media	$\beta_{\text{crítico}} - 10^\circ < \beta < \beta_{\text{crítico}} - 5^\circ$
Alta	$\beta_{\text{crítico}} - 5^\circ < \beta$

1.3.6.3 Modelación para caídas de rocas

Esta modelación se basó en los análisis de los deslizamientos en bloque y en la presencia de discontinuidades observadas en terreno, por lo tanto se utilizarán los mismos factores de seguridad y probabilidades de falla obtenidos en el análisis anterior. Con respecto a presencia de discontinuidades pero que no cumplen con condiciones cinemáticas de deslizamientos se aplicaron criterios de pendientes en que se pueden generar caídas de rocas (Keefer, 1984),

Tabla 1.6 : Relación entre probabilidades de generación de caídas de rocas y pendientes (Keefer, 1984)

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

Es importante añadir que por registros históricos y comportamiento de las laderas en sismos de mediana magnitud los rangos de pendiente en situación sísmica fueron modificados disminuyéndose en 10°, por lo tanto para pendientes mayores a 45° se le relacionó una alta probabilidad de generación, de esta forma los rangos describen el contexto de caídas de rocas observadas en terreno.

1.3.7 Trabajo de Gabinete (G4)

Esta parte del trabajo se encargó de determinar el alcance que tendría la remoción en masa en caso de desencadenarse. Así como para la evaluación de probabilidad de falla se distinguió entre tipos de remociones en masa, ocurrió lo mismo para su alcance. Sin embargo, el alcance también puede afectar a varias unidades geomorfológicas ya que el alcance de una unidad geomorfológica puede traspasar sus límites y afectar a otra. Para esto se utilizaron distintas herramientas tanto numéricas como computacionales así como cualitativas, los datos para dicha evaluación fueron obtenidos a través de información de laboratorios, observación en terreno y bibliografía de trabajos anteriores.

1.3.7.1 Alcance para deslizamiento de suelo

Para este tipo de alcance se distinguieron entre deslizamientos masivos y deslizamientos superficiales. Los primeros fueron determinados mediante el volumen deslizado y criterios geomorfológicos (topografía), por lo tanto su alcance dependió del lugar que ocuparía el material deslizado. Los segundos se determinaron a partir del modelo de ladera infinita definiendo un ángulo crítico ($\beta_{\text{crítico}}$) para que deslice, lo que significa que su factor de seguridad sea igual a 1, para laderas que se encontraron debajo de la unidad en estudio y que tengan una pendiente cercana a la crítica se determinaron zonas de alcances de deslizamiento según el siguiente criterio.

Tabla 1.7 : Relación entre probabilidades de alcance de deslizamiento y pendientes
(Lara, 2007).

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

1.3.7.2 Alcance para deslizamiento de roca

Se utilizó el mismo criterio para deslizamientos de suelo masivos, en donde se involucró el volumen deslizado y espacio a utilizar mediante criterios geomorfológicos, principalmente en el caso de deslizamiento de roca tienen como lugar de alcance el pie del talud de donde se generó.

1.3.7.3 Alcance de caídas de rocas

Se determinó el alcance de caídas de rocas mediante el software Rocfall, el cual entregó la distancia total recorrida de la roca al caer, este recorrido se tomó como una probabilidad alta de alcance. Para su utilización se necesitó un perfil topográfico representativo de la unidad geomorfológica estudiada junto con características de la roca. Para sectores que no estuvieron en el recorrido entregado por Rocfall se estimó una probabilidad de alcance de acuerdo al análisis de pendientes como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 1.8 : Relación entre probabilidades de alcance de caídas de rocas y pendientes
(Lara, 2007).

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

La tabla 1.8 fue modificada en -5° para la probabilidad baja, media y alta debido a que la situación sísmica asumida es de mayor magnitud a la del estudio que entregó estos rangos. Por lo tanto, la velocidad inicial y la energía cinética de las caídas de rocas son mayores, por lo que las pendientes para su estabilización son menores.

1.3.8 Trabajo de Gabinete (G5)

En esta parte del trabajo se caracterizó el contexto sísmico al que se enfrenta la zona de estudio, lo que conllevó un estudio en detalle de los terremotos recientes e históricos que ocurrieron en el Norte de Chile.

1.3.9 Trabajo de Gabinete (G6)

Última parte de la metodología, en el cual se reunieron para todos los tipos remociones en masa y unidades geomorfológicas estudiadas, los resultados de probabilidad de falla, alcance de la remoción en masa y ocurrencia del terremoto.

Se definió el Grado de Peligro Global que correspondió a la combinación de probabilidad de falla y alcance de la remoción en masa. Las dos probabilidades tuvieron como división tres grados: alto, medio y bajo, esto se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1.9 : Matriz de combinaciones para definir el Grado de Peligro Geológico Global (Lara, 2007).

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

2. Marco Teórico

2.1 Remociones en masa

El fenómeno de remoción en masa se entiende como un movimiento que por gravedad genera el descenso de un volumen de material conformado por roca, suelo o por ambos (Cruden, 1991). Existen muchas clasificaciones de remociones en masa, Varnes (1978) basado en el tipo de movimiento y en la naturaleza de material involucrado definió la siguiente clasificación.

Tabla 2.1 : Clasificación de Remociones en Masa (Varnes, 1978)

Tipo de movimiento		Tipo de material	
		Roca	Suelo
Caída		Roca	Suelo
Toppling			
Deslizamiento	Rotacional		
	Traslacional		
Extensiones laterales			
Flujos			
Complejos			

El tipo de material involucrado se diferencia entre: rocas, masa firme que estaba intacta, in situ antes de comenzar el movimiento, suelos: detritos (20-80% partículas mayores a 2mm) y barro o tierra (mayor a 80% menores a 2mm). La siguiente figura muestra los tipos de movimientos asociados a remociones en masa.

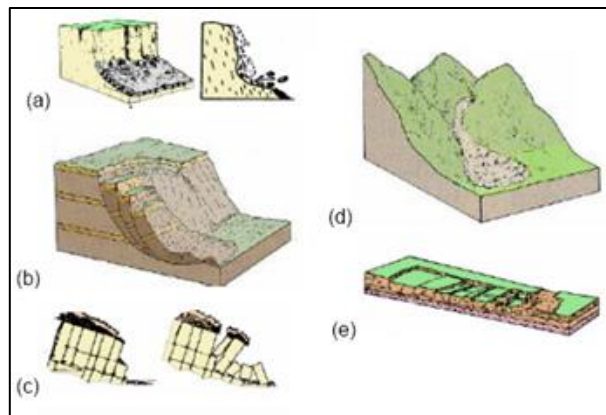


Ilustración 2.1: (a) Caídas de roca (b) Deslizamientos (c) Volcamiento (toppling)

En este estudio se abordan específicamente remociones en masa desencadenadas por sismos, estos procesos afectan a material rocoso o suelo que se desprenden de una ladera de alta pendientes a través de una superficie donde no se genere cizalle, puede ocurrir en suelos cohesivos o bloques de roca. Los desprendimientos son controlados por discontinuidades presentes en la roca y con laderas abruptas o de alta pendiente (Soeters & Westen, 1996). Otro proceso ocurrido por sismos es el de deslizamientos de masas de suelo o roca, los cuales son determinados por superficies de cizalle definidas, generando movimiento ladera abajo.

2.2 Remociones en masa desencadenadas por sismos

Según Keefer (1984) existen 14 tipos de remociones inducidos por sismos agrupados en 3 conjuntos: 1.- Deslizamientos “Coherentes”: Slumps (deslizamientos rotacionales) de roca o suelo; deslizamientos en bloque, 2.- Deslizamientos “Disgregados” (disrupted): Caídas de bloques, deslizamientos traslacionales, avalanchas de roca o

Tabla 2.2 : Clasificación de remociones en masa basada en generación por sismos (modificada de Keefer, 1984)

Tipo de remoción	Velocidad	Profundidad
Caídas de roca	Extremadamente rápido (>3 m/s)	Superficiales (<3 m)
Deslizamientos de roca	Rápido a extremadamente rápido (1,5 m/día - >3 m/s)	Superficiales (<3 m)
Avalanchas de roca	Extremadamente rápido (>3 m/s)	Profundos (>3 m)
Caídas de suelo	Extremadamente rápido (>3 m/s)	Superficiales (<3 m)
Suelo perturbado	Moderado a rápido (1,5 m/mes - 0,3 m/min)	Superficiales (<3 m)
Avalanchas de suelo	Muy rápido a extremadamente rápido (0,3 m/min - >3 m/s)	Superficiales (<3 m)
Subsidencias de roca	Lento a rápido (1,5 m/año - 0,3 m/min)	Profundos (>3 m)
Deslizamientos de roca en bloque	Lento a rápido (1,5 m/año - 0,3 m/min)	Profundos (>3 m)
Subsidencias de suelo	Lento a rápido (1,5 m/año - 0,3 m/min)	Profundos (>3 m)
Deslizamientos de suelo en bloque	Lento a rápido (1,5 m/año - 0,3 m/min)	Profundos (>3 m)
Flujos lentos de tierra	Muy lento a moderado (0,6 m/año - 1,5 m/día)	Generalmente superficiales, ocasionalmente profundos
Extensiones laterales de suelo	Muy rápido (0,3 m/min - 3 m/s)	Variable
Flujos rápidos de suelo	Muy rápido a extremadamente rápido (0,3 m/min - >3 m/s)	Superficiales (<3 m)
Deslizamientos subacuáticos	Generalmente rápidos a extremadamente rápidos (~1,5 m/día - >3 m/s)	Variable

Las remociones en masa más comunes generadas por sismos son caídas de rocas, deslizamientos disgregados de suelo y deslizamientos de rocas (Keefer, 1984; Rodríguez et al.,

1999), los cuales son abordados con detalle en este estudio. Aunque los más dañinos son flujos de suelo y avalanchas de roca.

Las aceleraciones producidas por sismos generan inestabilidad debido a cambios en el régimen de esfuerzos tanto normales como de corte que desarrollan en la ladera. Basado en 40 terremotos históricos Keefer (1984) estableció abundancias de remociones en masa generados por sismos.

Tabla 2.3 : Abundancia de eventos de remoción en masa generadas por sismos (Keefer, 1984)

Abundancia de eventos	Tipos de eventos
Muy abundante (>100.000, en 40 terremotos)	Caídas de roca, deslizamientos de suelo desagregado, deslizamientos de roca
Abundante (10.000 a 100.000, en 40 terremotos)	Extensiones laterales de suelo, subsidencias de suelo, deslizamientos de suelo en bloques, avalanchas de suelo
Moderadamente común (1.000 a 10.000, en 40 terremotos)	Caídas de suelo, flujos rápidos de suelo, subsidencias de roca
No común	Deslizamientos bajo agua, flujos lentos de suelo, deslizamientos de roca en bloque, avalanchas de roca

Keefer (1984) mediante observaciones de remociones en masa generadas por sismos, estableciendo distancias máximas de 50 km entre el foco del sismo y zonas de ocurrencia de caídas de rocas y deslizamientos disgregados. Autores como Rodríguez et al. (1999) actualizaron umbrales mediante la ampliación de la fuente de datos de remociones desencadenadas por sismos con que Keefer (1984) contaba.

Tabla 2.4 : Tipos de remociones en masa generadas por sismos

Magnitudes mínimas aproximadas (M_L) según Keefer (1984)	Magnitudes mínimas aproximadas (M_L) según Rodríguez <i>et al.</i> (1999)	Tipo de remoción en masa
4,0	5,5	Caídas de rocas, deslizamientos de roca, caídas de suelo, deslizamientos desmembrados de suelo
4,5	5,5	Subsidencias de suelo, deslizamiento de suelo en bloques
5,0	6,5	Subsidencias de roca, deslizamientos de roca en bloque, flujos lentos de tierra, extensiones laterales de suelo, flujos rápidos de suelo, deslizamientos submarinos
6,0	6,5	Avalanchas de roca
6,5	6,0	Avalanchas de suelo

2.2.1 Caídas o desprendimientos de rocas (“falls”)

Según Varnes (1978), las caídas de rocas corresponden a un tipo de movimiento en masa en donde uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie se genere desplazamiento cortante apreciable. El material desprendido se desplaza en caída libre efectuando golpes, rebotes y rodamiento. El movimiento no es macizo ni del tipo flujo, existiendo interacción mecánica entre fragmentos individuales y su trayectoria, aunque no entre fragmentos en movimiento. El material en movimiento adquiere una alta energía cinética, abarcando una amplia área a los pies de la ladera.

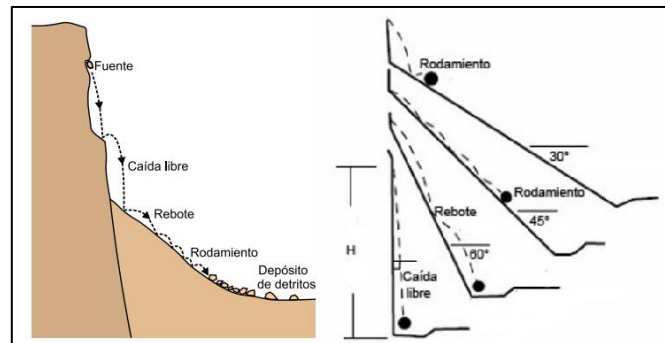


Ilustración 2.2 : Formas de movimiento para caídas de rocas.
Izquierda: Proyecto Multinacional andino, 2007 Derecha: Modificado de Hoek, 2000.

Las caídas de rocas se originan por cambios en los esfuerzos actuantes sobre la roca, para efectos de este estudio los principales eventos que presentan estos cambios son meteorización de la roca y sismos. La principal responsable de la generación de caídas de rocas es la geometría de la ladera, ésta debe contener laderas altas de pendientes pronunciadas y donde el macizo rocoso este fracturado.

2.2.2 Volcamientos (“topples”)

Se denomina toppling a un tipo de movimiento en masa en donde un bloque de roca o suelo rota hacia adelante (hacia fuera de la ladera) alrededor de un pivote de giro en su parte inferior separándose del macizo. Derivan en desprendimientos o deslizamientos según la geometría de la ladera. Pueden variar de extremadamente lentos (mayor a 16 mm/año) a extremadamente rápidos, a veces acelerando durante el movimiento, estos movimientos ocurren por la acción de la gravedad, por empujes de la unidad adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978)

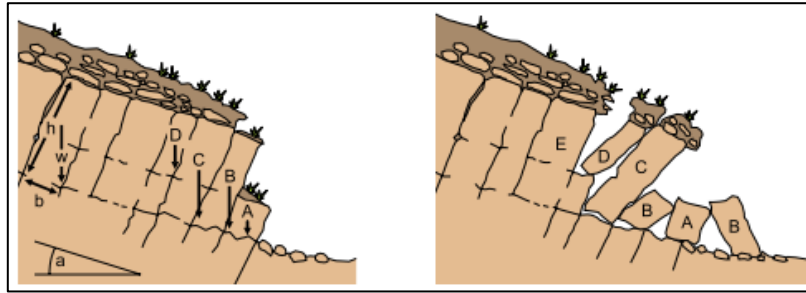


Ilustración 2.3 : Esquema de toppling (Proyecto Multinacional andino, 2007)

2.2.3 Deslizamientos (“Slides”)

Movimiento lateral abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre generalmente a lo largo de una superficie de falla o de una zona de bajo espesor donde presenta una gran deformación cortante, Este no se desarrolla en toda la superficie de ruptura, sino que comienza en fallas locales en las cuales se forma el escarpe principal, a menudo grietas de tensión son determinantes para deslizamientos. Según Varnes (1978), los deslizamientos se clasifican mediante la forma de la superficie de falla por la cual se desplaza el material, existiendo dos tipos: traslacionales y rotacionales, existiendo también deslizamientos compuestos en donde conviven fallas curvas y planares.

2.2.3.1 Deslizamientos traslacionales

Masa que se desliza sobre una superficie aproximadamente plana, sin o con poca componente de rotación. Relativamente más superficiales que deslizamientos rotacionales. Generalmente controlados por discontinuidades o zonas más débiles. Un subtipo son deslizamientos en bloque, en que la masa deslizada (usualmente roca o suelo cementado) consiste en una sola unidad que se desplaza.

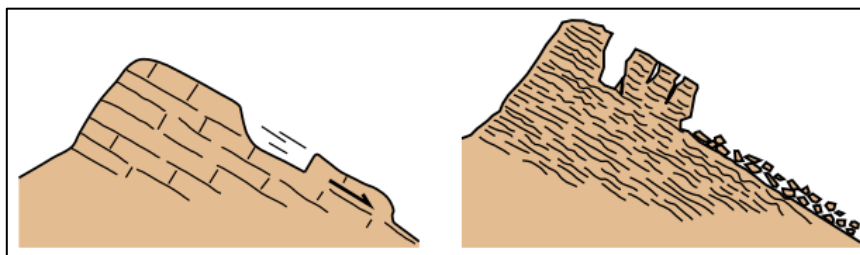


Ilustración 2.4 : Esquema de deslizamiento traslacional. (Corominas Dulcet y García Yagué 1997).

2.2.3.2 Deslizamientos Rotacionales ‘slumps’-

Masa que desliza sobre una superficie de fractura circular. Generalmente en materiales homogéneos. Suelen presentar un escarpe en la cabecera que puede ser subvertical. Puede ser rotacional simple, múltiple o sucesivo. Cuando son profundos se les suele llamar ‘deep-seated slides’.

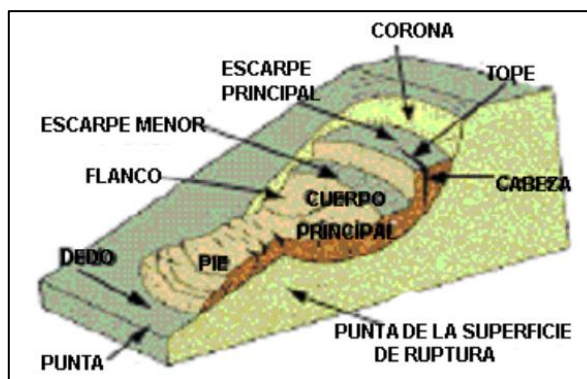


Ilustración 2.5 : Partes de un deslizamiento (Varnes, 1978)

2.3 Factores condicionantes de remociones en masa

Los factores condicionantes son los generadores de una potencial inestabilidad, actúan controlando la susceptibilidad de una zona propensa a desarrollar fenómenos de remociones en masa. Estos factores son diversos y tienen distintos grados de influencia dependiendo del tipo de evento. Lara (2009) generó un desglose detallado de cada factor condicionante para cada tipo de remoción que está incluido en la metodología de este estudio.

Tabla 2.5 : Factores condicionantes relevantes para cada tipo de remoción en masa (Hauser, 1993)

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

2.3.1 Geología y Geotecnia

Para la categoría de Geología y Geotecnia es importante determinar en términos geotécnicos: el tipo de depósito, el material que lo compone, su densidad, plasticidad, humedad, permeabilidad, y en términos geológicos: litología, estructuras, alteración y meteorización. El tipo de depósito puede indicar la posibilidad de movilización, por ejemplo depósitos aluviales, coluviales, escombros de faldas o antiguos deslizamientos son susceptibles a movilización y/o removilización (Hauser, 1997), debido a que las condiciones geotécnicas como densidad, granulometría, entre otras, son propicias para remociones gatilladas por sismos, por otro lado, depósitos densos, arcillosos y rocosos con escasas fracturas son menos favorables (Jacoby, 2001). La composición y granulometría son determinantes en la resistencia del material y su estabilidad en laderas, su grado de cohesión será influenciada por la plasticidad y humedad. Es posible que suelos finos con poco espesor y alta cohesión - principalmente arcillas- sea superficie potencial de deslizamiento, dando una alta susceptibilidad a los suelos sobreyacentes. La densidad es determinante para la resistencia al cizalle, suelos más densos entregarán resistencias mayores de las que alcanzarían a tener suelos sueltos (Lambe & Whitman, 1972). Según Jacoby (2001) la litología influirá en la resistencia a la meteorización y alteración de la roca. Minerales propios de alteraciones hidrotermales, acelerarían el proceso de meteorización, lo que podría disminuir la resistencia, expansividad y/o aumentaría la porosidad, entre otros. La caracterización estructural es fundamental para la generación de material detrítico o bloques, que quedarían expuestos a ser removilizados. Estructuras como planos de estratificación, sets de diaclasas, grietas de tensión y fallas son las más comunes para generación de deslizamientos o caídas rocas, ya que independizan el bloque susceptible a ser removido por vibraciones sísmicas, por lo tanto es necesario caracterizarlas en cuanto a su abertura, relleno y rugosidad.

2.3.2 Geomorfología

La geomorfología es fundamental y determinante en la susceptibilidad de remociones. Rasgos como la topografía, pendientes de laderas, altura de las laderas, cambios fuertes de pendientes de las laderas y la extensión afectan directamente la velocidad, energía y volumen de las remociones en masa que puedan originarse. La modificación de la geomorfología puede hacer de una ladera estable una ladera inestable (Popescu, 2002).

En términos de deslizamientos de suelo según Lambe & Whitman (1972) si la ladera tiene un mayor ángulo que el ángulo de fricción interna del suelo entonces existe inestabilidad. La geometría de la ladera afecta directamente a las fuerzas resistentes y las solicitantes,

también para que alguna remoción se genere debe existir material susceptible a ser movilizados como antiguos deslizamientos, depósitos coluviales, entre otros, los cuales si se presentan sueltos son propensos a generar remociones.

En un contexto sísmico de intensidades mayores a IV, Keefer (1984) señala que ángulos mayores a 15° en laderas son susceptibles a generar deslizamientos de suelos traslaciones, para deslizamientos rotacionales se necesitan ángulos de taludes mayores a 10°. En cambio para deslizamientos en roca se necesitan laderas con ángulos mayores a 35°, para un contexto sísmico se necesitarían ángulos mayores a 15°. Para caídas de rocas o desprendimientos los taludes deben ser mayores a 40°, pueden desarrollarse también desprendimientos de suelo a partir de material arenoso o gravoso levemente cementado o arcillas no compactas.

2.3.3 Actividad Antrópica

La actividad antrópica es una de las principales contribuyentes a la desestabilización de laderas, disminuyendo artificialmente la resistencia del material, contribuyendo con material para ser movilizado por futuros eventos. Excavaciones, rellenos, construcción de estructuras, urbanización, cambios en el uso del suelo, extracción de áridos y acumulación de escombros son las principales actividades antrópicas que aumentarían la susceptibilidad de remociones en masa. Faenas mineras u otras que desarrollen sismicidad inducida para su producción, influyen directamente en la desestabilización de laderas adyacentes, ya que vibraciones sísmicas constantes provocarían una disminución en la resistencia de depósitos o macizos rocosos.

2.4 Monitoreo y Mitigación

Los principales objetivos del monitoreo de remociones en masa son: caracterizar en forma y profundidad la masa deslizada, estimar su dimensión, determinar distribuciones y tasas de desplazamiento, instalar sistemas de alerta y controlar la efectividad de las medidas de mitigación. Estos se llevan a cabo por una variedad de instrumentos. Para deslizamientos superficiales, existen equipos topográficos que utilizan mediciones progresivas en puntos de referencia (estables), otros como los medidores de rotación (Tiltmeter) miden rotación de puntos superficiales, el GPS diferencial mide satelitalmente la masa deslizada mediante coordenadas. Para mediciones de desplazamiento interno, existen Inclínómetros que consisten en una sonda con un sensor que mide el grado de inclinación a distintas profundidades, para esto se necesita una perforación o sondaje en la zona susceptible. Para mediciones de desplazamiento, extensómetros que se basan en mediciones de disminución o aumento del largo de una vara sostenida por dos puntos anclados en una perforación de sondaje.

La mitigación de remociones en masa involucra dos aspectos fundamentales que afectan la estabilización de zonas susceptibles, uno de ellos es el factor ambiental que involucra cargas naturales y artificiales, sismicidad, clima, volcanismo, y el otro es un factor geológico-geotécnico en donde interviene la topografía y las propiedades del material. Existen varias medidas de mitigación una de ellas es la estabilización de laderas que consta de cuatro ejes importantes: evitar el problema, reducir fuerzas desestabilizadoras, aumentar fuerzas estabilizadoras y aumentar la resistencia. En términos de evitar el problema como posibilidades se puede relocalizar la obra potencialmente afectada, retirar total o parcialmente materiales inestables –suelos superficiales, bloques o rocas-. Para reducir fuerzas desestabilizadoras se intervienen las pendientes u orientación del talud, se construyen bermas, se disminuye el peso usando materiales livianos (terraplenes). En el caso de aumentar fuerzas estabilizadoras se usa contrafuertes al pie de la ladera rellenos de roca o material grueso, estructuras de retención como muros, gaviones, etc. Para aumentar la resistencia interna se utiliza el reforzamiento del suelo y muros de contención con geotextiles, barras o cables que se introducen en el suelo, cubiertas vegetales, pernos de anclaje, shotcrete, malla, etc.



Ilustración 2.6 : Shotcrete y anclajes como medidas de mitigación.



Ilustración 2.7 : Malla para mitigación de deslizamiento de roca tipo planar y cuña

Con respecto a caídas de rocas las medidas de mitigación pueden ser mallas (como por ejemplo mallas tipo cortina) y barreras de contención (rígidas o dinámicas) .

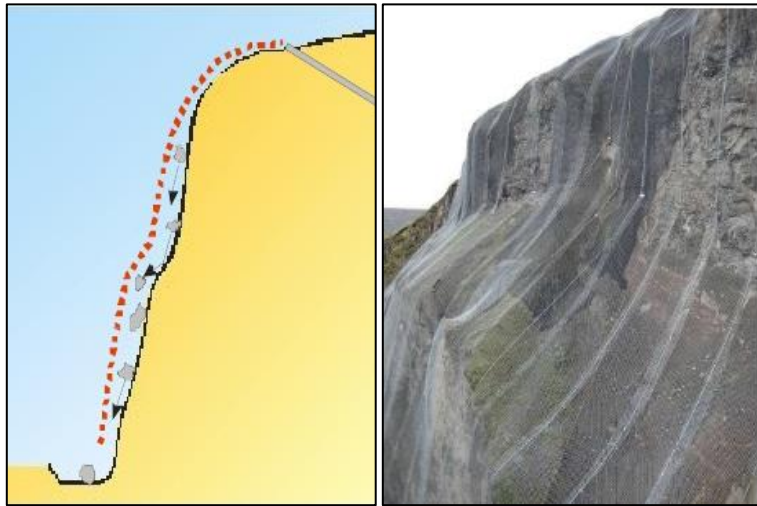


Ilustración 2.8: Malla estilo cortina para mitigación de caídas de roca

Las barreras rígidas son soluciones para caídas de rocas menores con poca energía, ya que pueden romperse y no frenar el bloque, mientras que la barreras dinámicas son flexibles y absorben energía, existen para distintas magnitudes de impacto.



Ilustración 2.9 : Barrera dinámica para mitigación de caídas de roca

3. Antecedentes del área de estudio

3.1 Generalidades

En la zona de estudio se reconocen dos unidades morfoestructurales paralelas entre sí y de orientación N-S (Ilustración 3.1).

La Planicie Litoral, formada por transgresiones y regresiones del mar, donde se desarrollan terrazas de hasta 300 m de altura máxima y escalones de diversa longitud, interrumpidos por el Gran Escarpe Costero.

La Cordillera de la Costa, que constituye un macizo o cadena montañosa regular que, alcanza 1500 m s.n.m y un ancho promedio de 30 km, su borde occidental es el Gran Escarpe Costero, que la separa de las planicies litorales desarrolladas al pie de esta cordillera (Paskoff, 1978-1979).



Ilustración 3.1 : Esquema morfoestructural del área de Iquique (Marquardt et al., 2008)

3.2 Geomorfología de la ciudad de Iquique y Alto Hospicio

La zona de estudio corresponde a un sector del Gran Escarpe Costero, rasgo morfoestructural en el cual se construyó la Ruta A-16 conexión principal entre Iquique y Alto Hospicio. El Gran Escarpe Costero es un acantilado abrupto situado en el borde occidental de la Cordillera de la Costa, el cual se extiende por más de 1000 km y de manera casi continua entre Arica y Taltal (Paskoff, 1978-1979). Es el rasgo morfoestructural más importante que define el contexto general de toda la costa del Norte de Chile, alcanzando un desnivel promedio de 1000m.

En términos de su formación, el sector de Iquique es un punto de inflexión con respecto al estilo de erosión. Desde Iquique hacia el Norte el estilo erosivo lo determina la acción de las olas mostrando un acantilado activo, mientras que desde Iquique hacia el sur la erosión se genera por deslizamientos, desprendimientos u otros procesos de remociones en masa (Tolorza et al., 2009) (Ilustración 3.2), este último es el sector que contiene nuestra área de estudio.

La Planicie litoral está definida entre el acantilado del Gran Escarpe Costero y la línea de costa, es el rasgo morfoestructural en la que yace la ciudad de Iquique. La Planicie Litoral está formada por terrazas marinas de abrasión y cubiertas por depósitos marino-litorales, aluviales, coluviales, eólicos y de remociones en masa entre otros.

Con respecto al origen y evolución del Gran Escarpe Costero todavía está en discusión, para esto hay por lo menos tres importantes postulados: El primero, sugiere actividad tectónica caracterizada por zonas de fallas normales de orientación N-S y manteos hacia el occidente (Brüggen et al., 1950; Armijo et al., 1990). El segundo, propone exclusivamente la abrasión marina a partir del Plioceno (Mortimer et al., 1972). Por último, se postula un efecto combinado entre actividad de fallas durante el Mio-Plioceno y un posterior retroceso por la acción del mar durante el Plio-Cuaternario (Paskoff, 1978-1979; Rutland, 1971).

Iquique está completamente limitado por el Gran Escarpe Costero Al norte el Gran Escarpe Costero coincide con la línea de costa generando un cierre de la ciudad impidiendo la comunicación con otras localidades. Hacia el sur, en cambio, se desplaza hacia el este alejándose de la línea de costa, transformándose en un acantilado inactivo (Ilustración 3.2).



Ilustración 3.2 : Acantilado activo del norte de Iquique, e Inactivo al este de la ciudad.

3.3 Geomorfología de la zona de estudio

La zona de estudio, específicamente la Ruta A-16 se enmarca en el Gran Escarpe Costero. El área de estudio alcanza una superficie ca. 7,38 km² y está limitada por el norte por el cerro “La Cruz” (540 m s.n.m), por el este por el cerro Aldea (741 m s.n.m) al sur por el sector sur de Alto Hospicio (527 m s.n.m) y por el Oeste con la ciudad de Iquique (Ilustración 3.3). En el sector de Alto Hospicio la cordillera de la costa se presenta como una meseta con suave pendiente, con una cota de alrededor de 450-550 m s.n.m.

La extensión del Gran Escarpe Costero en la zona de estudio abarca aproximadamente 8,5 km, se dispone con un sentido Noroeste-Sureste en el sector Norte, con pendientes entre 30° a 42° en los sectores de mayor altura (parte superior) y 18° a 30° en los sectores de menor altura (parte inferior), en el sector Sur, el Gran Escarpe Costero se dispone en sentido Norte-Sur y presenta la mayor concentración de pendientes en torno a los 40°, también presenta las pendientes más altas de la zona de estudio y se encuentran en los sectores de mayor altura. En el plano local debido a la construcción de caminos y la propia ruta A-16 (con su alternativa, el camino Zigzag) se desarrollan taludes con pendientes entre 80 y 90°.

La información puede observarse con mayor detalle en el mapa de pendientes en el Anexo 1.

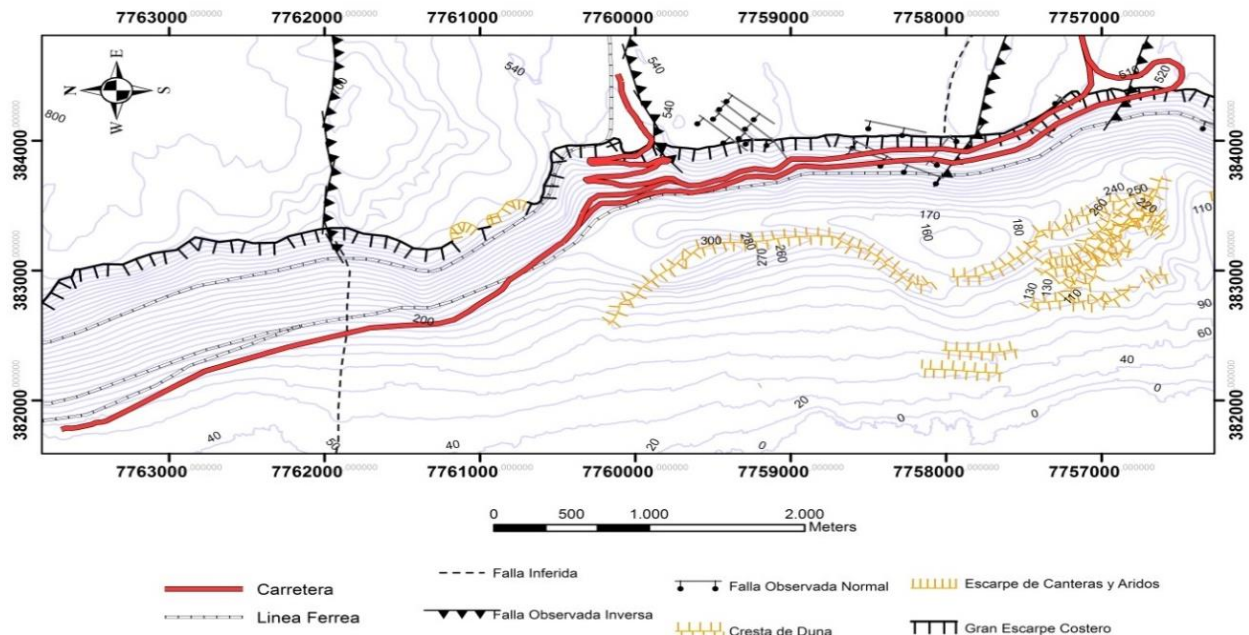


Ilustración 3.3 : Arriba, Gran Escarpe Costero que limita la ciudad de Iquique, curvas de nivel cada 20m. Abajo, imagen satelital de la ruta A-16 (Google Earth)

3.4 Geología de la ciudad de Iquique y Alto Hospicio

En el área de la ciudad de Iquique y Alto Hospicio existen dos dominios morfoestructurales importantes la Planicie Litoral y la Cordillera de la Costa. La Formación Punta Barranco (Ilustración 3.4) es una de las unidades litoestratigráficas más antiguas desarrollada durante el Jurásico Medio y Superior y se presenta en los dos dominios morfoestructurales, ésta consiste en rocas volcánicas, subvolcánicas y volcanoclásticas de composición andesítico-basáltico a dacítica y presenta intrusiones de cuerpos subvolcánicos (diques y filones mantos) (Cecioni y García, 1960; Marquardt et al., 2008). Se encuentra afectada por estructuras como diaclasas, pliegues y zonas de fallas a nivel local y global, lo que

provoca una mala calidad del macizo rocoso generando material detrítico en gran parte de las faldas del sector del Gran Escarpe Costero. En discordancia angular y de erosión sobre las rocas volcánicas se encuentran secuencias de gravas, arenas y limos de origen aluvial de clima árido a semiárido.

La Formación Huantajaya (Ilustración 3.4) también es una de las unidades más antiguas, Jurásico Medio y Superior, y se presenta principalmente en la Cordillera de la Costa. Se engrana hacia el oeste con la Formación Punta Barranco. Consiste en rocas sedimentarias calcáreas y clásticas de origen marino (Bajociano – Kimmeridgiano (?)) (Thomas, 1970; Marquardt et al., 2008).

La Formación Punta Barranco y la Formación Huantajaya son remanentes de cuencas extensionales o transtensionales, en parte inundadas por el mar, y representan la asociación de engrane entre un sistema de arco de islas volcánicas y la cuenca de trasarco desarrolladas durante el Jurásico Medio y Superior (Marquardt et al., 2008).

Diorita Esmeralda, Granodiorita Punta Negra, Diorita Guantaca y el Granito Molle (Ilustración 3.4) conforman las raíces del arco magmático en el período Jurásico Medio y Superior, mientras que en el Jurásico Superior y en los inicios del Cretácico inferior se desarrollaron algunos centros magmáticos aislados que generaron cuerpos subvolcánicos (diques y filones manto) y Pórfidos Hipabisales que intruyeron las unidades estratigráficas y plutónicas del Jurásico Medio a Superior.

Las Gravas de alto Hospicio y Depósitos aluviales (Ilustración 3.4) consisten en secuencias de gravas, arenas y limos con características de ambiente aluvial en un clima árido o semiárido desarrolladas en el Mioceno (existe un hiato que abarca desde el Cretácico hasta el Oligoceno) en un contexto de discordancia angular y de erosión sobre todas las unidades del Mesozoico. Existen Depósitos marinos (desarrollados principalmente en la Planicie Litoral), son secuencias sedimentarias fosilíferas de ambiente marino litoral que consisten en coquinas y arenas que en algunos sectores fueron cubiertos por depósitos eólicos y aluviales y también por depósitos coluviales (Marquardt et al., 2008). Los depósitos eólicos del cerro Dragón corresponden a un gran volumen de arenas litorales expuestas después de un periodo de alzamiento de la Plataforma Costera a tasas de 0,2 a 0,3 m/ka y de cambios eustáticos producto de procesos climáticos globales. Estos volúmenes de arenas litorales fueron transportados por el viento originando la Gran Duna del Cerro Dragón.

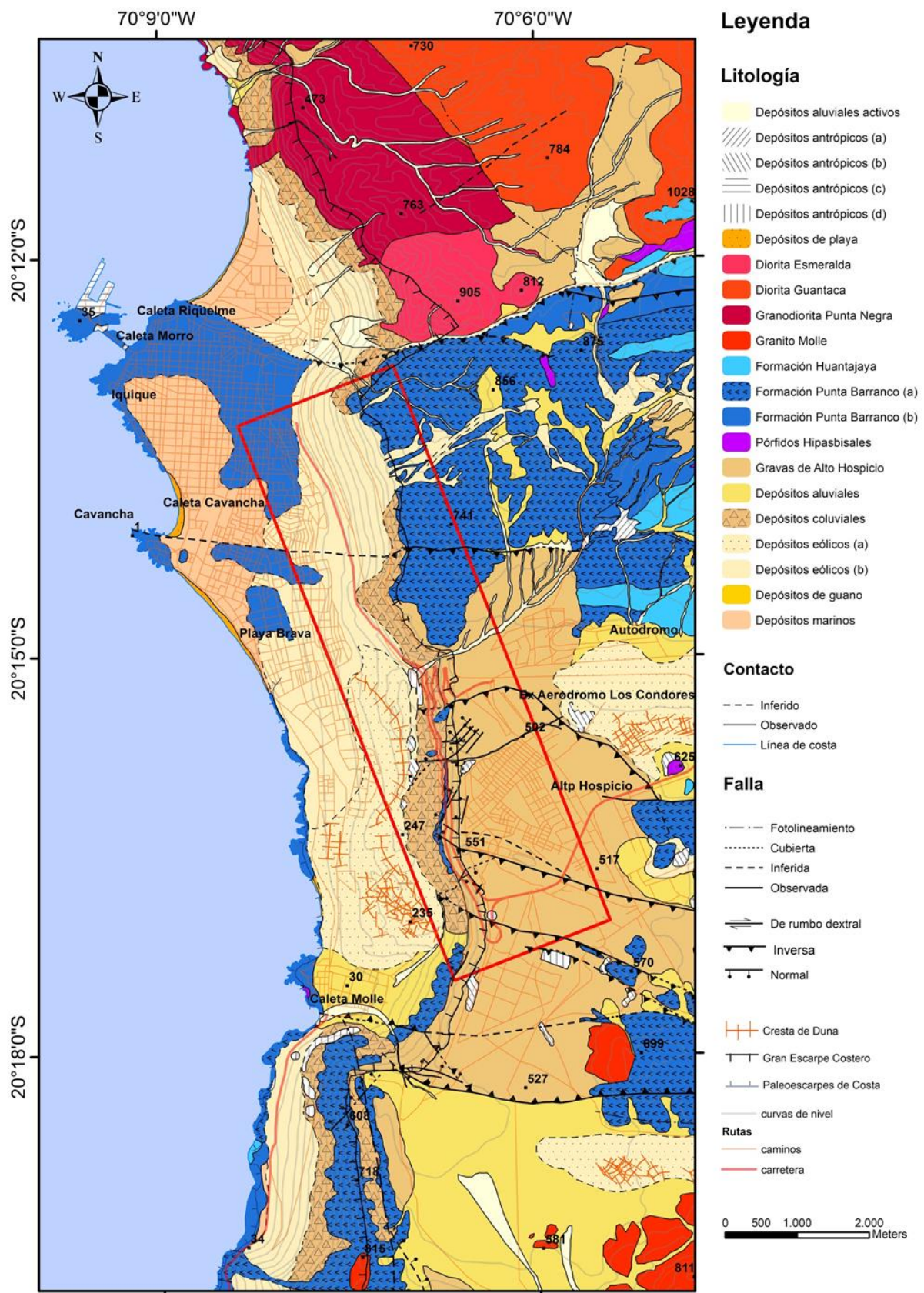


Ilustración 3.4 : Geología de las ciudades de Iquique y Alto Hospicio, en recuadro rojo zona de estudio (Marquardt, et al., 2008)

3.5 Geología de la zona de estudio

Las fuentes bibliográficas para la geología local fueron Marquardt et al., (2008) y Thomas (1970). **La escala de trabajo fue de 1:20.000.** También se recurrió a fotogeología y visitas a terreno, la zona de estudio cubre un área aproximada de 19,23 km². En el Anexo 2 se muestran ilustraciones de cada una de las unidades.

3.5.1 Unidades de roca

3.5.1.1 Formación Punta Barranco

Esta formación constituye el sustrato rocoso de toda la zona y aflora de manera importante en la parte superior de la misma. Agrupa una secuencia de rocas volcánicas, piroclásticas, subvolcánicas y volcanoclásticas de color gris-oscuro a pardo-rojizo de hasta ca. 1000 m de espesor (se calcula en sector aledaño al área de estudio). Esta unidad es intruida por filones mantos o diques porfíricos a afaníticos, de composición andesítica a granítica, en gran parte de sus afloramientos (Ilustración 3.5). La unidad presenta estratificación de rumbo Este-Oeste a Nornoreste-Sursuroeste, con manteos hasta 30° hacia el Norte y el Oeste. Los afloramientos se presentan moderada a fuertemente fracturados. Las fracturas tienden a ser planares a levemente sinuosas, de moderada rugosidad a rugosas.

3.5.2 Depósitos sedimentarios

3.5.2.1 Gravas de Alto Hospicio (Depósito consolidado)

Las Gravas de altos Hospicio limitan al oeste con la Formación Punta Barranco a lo largo del Gran Escarpe Costero (aproximadamente 6,8 km² en la zona de estudio) (Ilustración 3.5). Corresponde a una secuencia de gravas bien consolidadas y areniscas de origen fluvial, con algunas intercalaciones de cenizas de caída y cenizas retrabajadas. Existen secuencias de limos con niveles evaporíticos que engranan lateralmente con las gravas. La unidad sobreyace en discordancia angular a la Formación Punta Barranco. En algunos sectores distales a la zona de estudio se observan espesor de casi 200 m. La unidad es cubierta parcialmente por depósitos aluviales, en paraconcordancia y en leves discordancias angulares, también es cubierta por depósitos aluviales activos en discordancia de erosión. La secuencia es matriz soportada de arena gruesa y, en menor proporción, niveles de gravas clastosoportadas y niveles de arenas gruesas. Una de las principales características de la secuencia de gravas y arenas, es la fuerte cementación producida por la formación de halita. La unidad presenta

estratificación de rumbo Este-Oeste a Noreste-Suroeste, con manteos de 10 y 5° hacia el Sur y 20° al Norte.

3.5.2.2 Depósitos Aluviales (Depósito no consolidado)

Unidad que rellena depresiones en la Cordillera de la Costa (pequeña área de la zona de estudio 0,09 km² aproximadamente), se dispone en discordancia levemente angular a las Gravas de Alto Hospicio. Está cubierta parcialmente por depósitos eólicos y por depósitos aluviales activos y engrana con depósitos coluviales. La unidad consiste en una secuencia de arenas gruesas y medias con algunos niveles de limo y menor contenido de gravas y bloques.

3.5.2.3 Depósitos Coluviales (Depósito no consolidado)

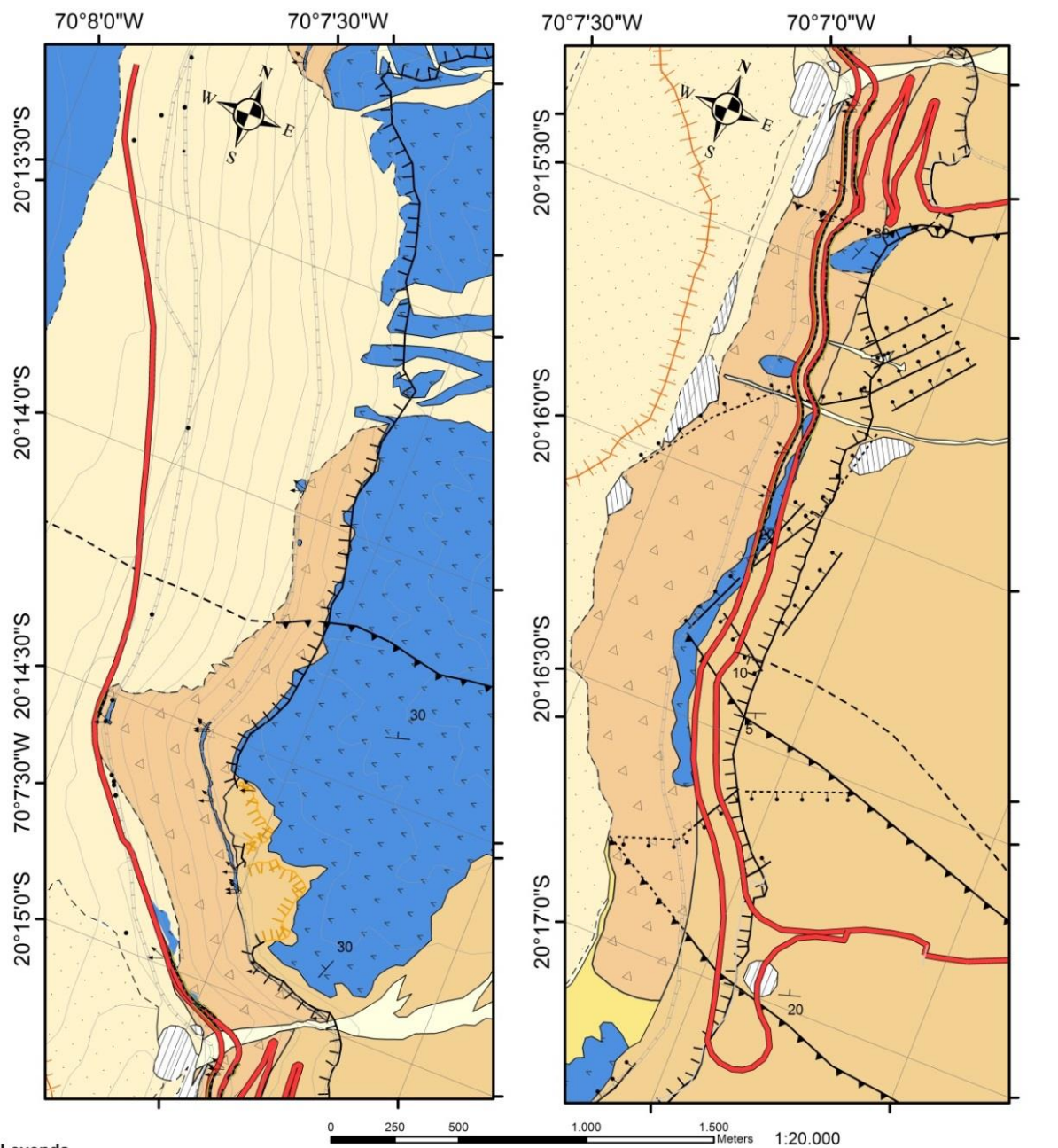
Los Depósitos Coluviales consisten en bloques, gravas y arenas polimícticas, material subanguloso provenientes de transporte gravitacional y aluvial. Comprenden un área de 2,26 km² aproximadamente en la zona de estudio, cubren los faldeos de cerros y zonas de pie de falda de laderas. Son depósitos no consolidados de espesores menores a 2 m, aunque a medida que aumenta la pendiente de los cerros o del Gran Escarpe Costero los espesores aumentan.

3.5.2.4 Depósitos Eólicos (Depósito no consolidado)

Los depósitos eólicos cubren parcialmente la Formación Punta Barranco, depósitos aluviales y engranan parcialmente con depósitos coluviales. Consiste en sedimentos finos transportados por el viento, constituyendo arenas no consolidadas y bien seleccionadas, de granulometría media a fina. La unidad está diferenciada mediante su morfología en: Formadores de dunas, acumulados en la Planicie Litoral, siguen la misma orientación que tiene El Gran Escarpe Costero, y Mantos de arenas, que cubren zonas del Gran Escarpe Costero y de la Cordillera de la Costa y gran parte de los depósitos coluviales.

3.5.2.5 Depósitos aluviales activos (Depósito no consolidado)

Los depósitos aluviales activos consisten en bloques, gravas, arenas y limos que se acumulan: en abanicos aluviales activos, en las laderas de los cerros, en zonas en que la geomorfología permite el transporte de esporádicos episodios de escorrentía superficial, y cubren unidades subyacentes.



Legenda

- Alcance de caída de roca
- ▼ Generación de caída de roca
- Sin alcance de caída de roca
- Obras de protección
- ⊥ Cresta de Duna
- ⊥⊥⊥ Escarpe de Canteras y Áridos
- ⊥⊥⊥ Gran Escarpe Costero
- Camino sin Pavimento
- Carretera
- Línea Ferrea
- - - Contacto Inferido
- Contacto Observado
- Jmspd - Formación Punta Barranco (Bajociano-Kimmeridiano?)**
(a) Lavas, diques y filones mantos andesíticos basálticos de olivino y piroxeno y andesitas
- Jmspd - Formación Punta Barranco (Bajociano-Kimmeridiano?)**
(b) Brechas volcánicas andesíticas, areniscas, conglomeraos y tobas
- MPah - Gravas de Alto Hospicio (Mioceno-Plioceno)**
Bloques, gravas, arenas, limos y arcillas semiconsolidadas, de origen aluvial con intercalaciones de ceniza.
- PPla - Depósitos aluviales (Plioceno Superior-Pleistoceno)**
Bloques, gravas, arenas y limos con ocasionales intercalaciones de cenizas, disecados por depósitos aluviales actuales (Ha).
- PIHc - Depósitos Coluviales (Pleistoceno-Holoceno)**
Bloques, gravas y arenas depositados hacia el pie de laderas de alta pendiente, donde pueden constituir conos coluviales.
- Ha - Depósitos aluviales activos (Holoceno)**
Bloques, gravas, arenas y limos que se acumulan en el fondo de las quebradas, en abanicos aluviales y en laderas de cerros
- Han - Depósitos antrópicos**
(b) Vertedero
- Han - Depósitos antrópicos**
(d) Residuos inorgánicos de labores mineras o de obras civiles
- PIHe - Depósitos eólicos (Pleistoceno-Holoceno)**
(a) Arenas formadores de dunas lineares (Cerro Dragón), transversales y estelares
- PIHe - Depósitos eólicos (Pleistoceno-Holoceno)**
(b) Mantos de arena intercalados o que cubren depósitos coluviales.
- Plm - Depósitos marinos (Pleistoceno)**
Conglomerados, areniscas calcáreas y coquinas preservadas en una sucesión de terrazas de abrasión marina y cordones litorales.
- - - Falla Inferida
- ▼▼▼ Falla Cubierta Inversa
- ▼▼▼ Falla Inferida Inversa
- Falla Cubierta Normal
- ▼▼▼ Falla Observada Inversa
- ▼▼▼ Falla Observada Normal

Ilustración 3.5 : Mapa Geológico de la zona de estudio (Modificado de Marquardt, 2008)

3.5.2.6 Depósitos Antrópicos (Depósito no consolidado)

Corresponden a depósitos de la actividad humana debido a que la zona de estudio se encuentra en un contexto urbanizado. Se ha diferenciado entre (b) vertedero o basural y (d) depósito de acumulación de roca de origen principalmente minero, entre los cuales destacan los desmontes con material estéril y la acumulación de áridos para la construcción de obras civiles.

3.6 Estructuras

Estructuralmente, el área de la ciudad de Iquique y Alto Hospicio forma parte del Sistema de Fallas Atacama (SFA) (SFA, Arabasz, 1971; Naranjo, 1987). La subducción controla la tectónica del lugar generando alzamiento de la costa, a tasas de 0,2 a 0,3 m/ka, generando reactivaciones inversas en el sistema de fallas (Marquardt et al., 2008). La mayor parte de las estructuras mayores se califican como fallas inversas con orientación Este-Oeste, variando a Noreste-Suroeste, que en el mapa de Norte a Sur son Falla Cavancha, Falla de la ruta A-616 (Ilustración 3.6), Falla del sector de Alto Hospicio. La Falla Cavancha tiene una orientación E-W y se infiere una prolongación por el centro de la ciudad. La Falla de la ruta A-616, aparece en una de las curvas del camino antiguo (Zigzag) que une la ciudad de Iquique con Alto Hospicio en donde se observa al basamento Jurásico cabalgando sobre las Gravas de Alto Hospicio a través de un plano de orientación N27°O y manto 30°SO. En la Ilustración 3.7 se observa la culminación de esta falla en superficie con un anticlinal asimétrico vergente hacia el norte. Se presenta Fallas Normales de orientación NE-SO que afectan directamente a las Gravas de Alto Hospicio en el Gran Escarpe Costero parte donde se emplaza la ruta A-16.

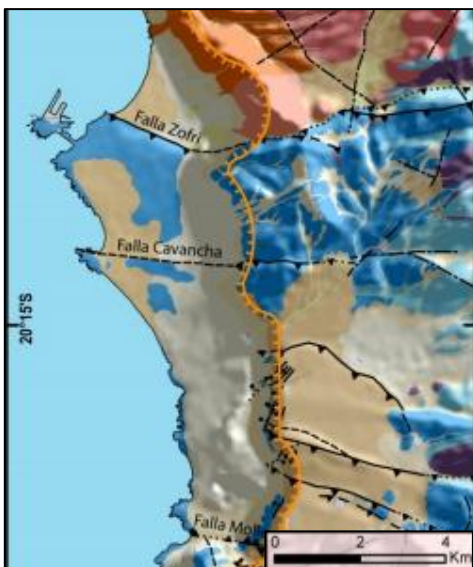
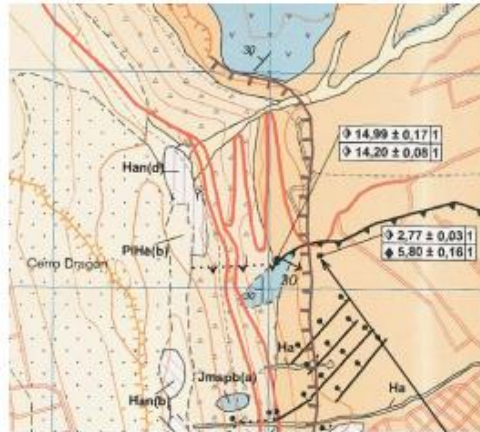


Ilustración 3.6 : Mapa morfoestructural, Ciudad de Iquique y Alto Hospicio (Marquardt et al (2005))



Vista en Google Earth, desde el oeste, de la Falla de la Ruta A-616



Vista hacia al sureste del plano de la falla

Ilustración 3.7 : Fallas en la zona del ZigZag.

3.7 Estructuras menores

Las estructuras se midieron en 4 lugares (Ilustración 3.8) que definieron sets estructurales con orientación Este-Oeste y Noroeste-Sureste. En general corresponde a estructuras medidas en taludes, Estas estructuras presentan direcciones principales Norte-Sur y Noroeste-Sureste, más adelante se entregan mayores detalles de las estructuras.

Tabla 3.1 : Sets estructurales de la zona de estudio

ZONA	N° SET	DIP (°)	DIPDIR (°)
A	1	45	289
	3	50	130
	4	85	230
B	1	45	220
	2	30	210
C	1	30	210
	2	40	50
D	1	88	180
	2	30	255
	3	60	70

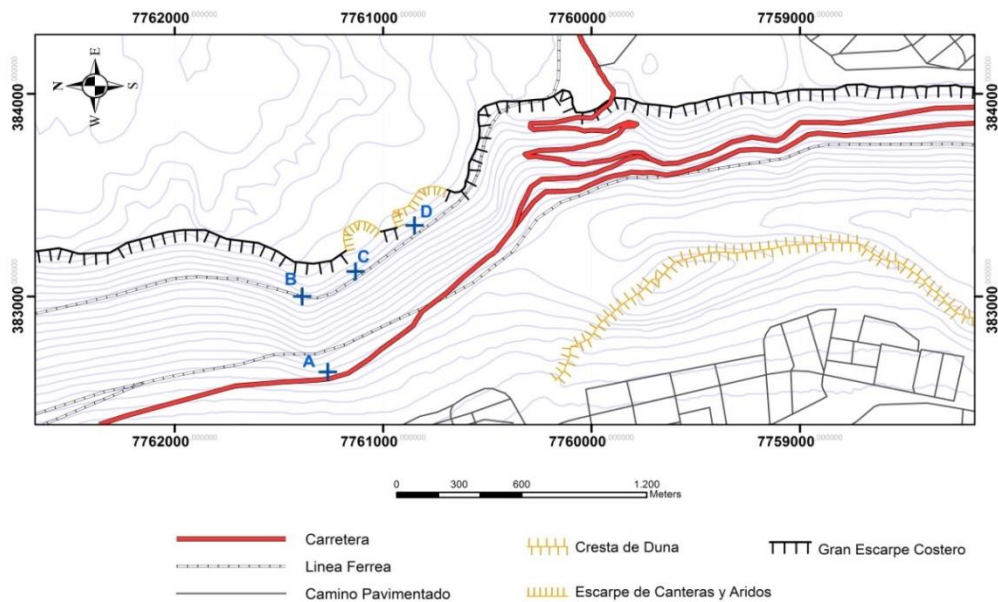


Ilustración 3.8 : Posición A, B, C y D de la obtención de datos

3.8 Geotecnia

La caracterización y propiedades geotécnicas para suelo y roca han sido obtenidas mediante el trabajo en terreno y bibliografía (específicamente el Informe: Lineamientos para determinación de colapsabilidad de suelos por disolución de sales, 2010 realizado por el Idiem).

3.8.1 Unidades de suelo

Los suelos que se encuentran en la zona de estudio se clasifican desde el punto de vista geotécnico en tres grupos: Suelos arenosos con material fino que no supera el 6,7%, suelos areno limosos con un porcentaje de finos entre 16,1 y 18,6% y también suelos areno limosos pero con un mayor porcentaje de fino entre un 27,4 y 34,7%.

Los suelos arenosos definen principalmente las unidades de depósitos eólicos. En superficie muestran una compacidad baja, aumentando de manera notable a mayor profundidad. Los suelos areno limosos definen las Gravas de Alto Hospicio hasta los 3 m con baja cantidad de finos, presenta una alta compacidad provocada por la cementación a causa de sales, lo mismo ocurre para los suelos areno limosos con una cantidad media de finos. Esto permite comprender la generación de taludes de alta pendiente incluso subverticales. Dada la bibliografía se obtuvieron tres puntos de muestra para suelo, en donde se desarrollaron calicatas para obtener las distintas propiedades.

3.8.1.1 Duna Dragón



Ilustración 3.9 : Ubicación de Calicata Iquique – Duna Dragón y sus coordenadas (Idiem, 2010)

La estratigrafía entregada por el Idiem mostró en un espesor de 3 m, arena media a fina de origen eólico, color café claro, compacidad baja en superficie, aumentando con la profundidad, humedad baja a nula, estructura homogénea, contenido de finos bajo a nulo, no se detectó nivel freático.

Tabla 3.2 : Propiedades índice suelos calicata Iquique – Cerro Dragón (Idiem, 2010)

Prof. muestreo [m]	Clas. USCS	Gs	Gs suelo lixiviado	% finos bajo malla 200	LL / LP / IP	Dens. Seca [t/m ³]	Hum. Nat. [%]
1,00 – 1,10	SP	2,72	2,73	1,5	NP	-	-
1,50 – 1,65	SP	2,71	2,68	1,9	NP	1,54	1,1
2,00 – 2,15	SP	2,75	2,72	1,8	NP	1,49	7,2
2,50 – 2,65	SP-SM	2,72	2,73	6,7	NP	1,59	0,6
3,00 – 3,15	SP	2,71	2,69	1,7	NP	1,87	2,1

Nota: No fue posible tomar la densidad seca y la humedad a 1,00m debido al cierre del volumen de arena requerido por método del cono de arena para determinación de densidad in situ.

Tabla 3.3 : Estado Compacidad, Densidad Relativa (DR) suelos calicata Iquique – Cerro Dragón (Idiem, 2010)

Prof. muestreo [m]	Clasificación USCS	DR [%]
1,00 – 1,10	SP	-
1,50 – 1,65	SP	8,3
2,00 – 2,15	SP	-
2,50 – 2,65	SP-SM	27,3
3,00 – 3,15	SP	114,8

Nota: No se presenta la DR a la cota 1,00m debido a que no fue posible obtener la densidad in-situ. Asimismo, tampoco se presenta la DR a los 2,50m debido a que la densidad in situ obtenida en terreno resulta menor a la densidad mínima, originando un valor negativo. Físicamente, esto indica que a esta cota la arena se encuentra suelta.

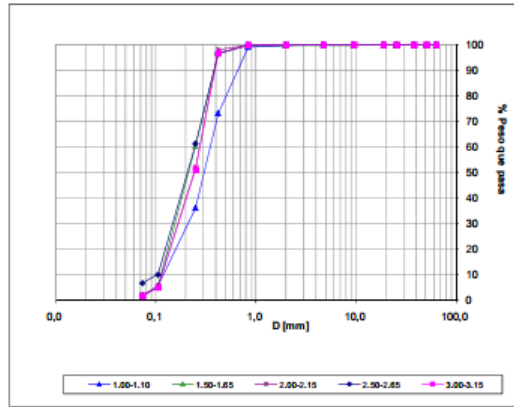


Ilustración 3.10 : Granulometría calicata Iquique – Cerro Dragón (Idiem, 2010)

3.8.1.2 Planta Tratamiento y Caliche, Alto Hospicio

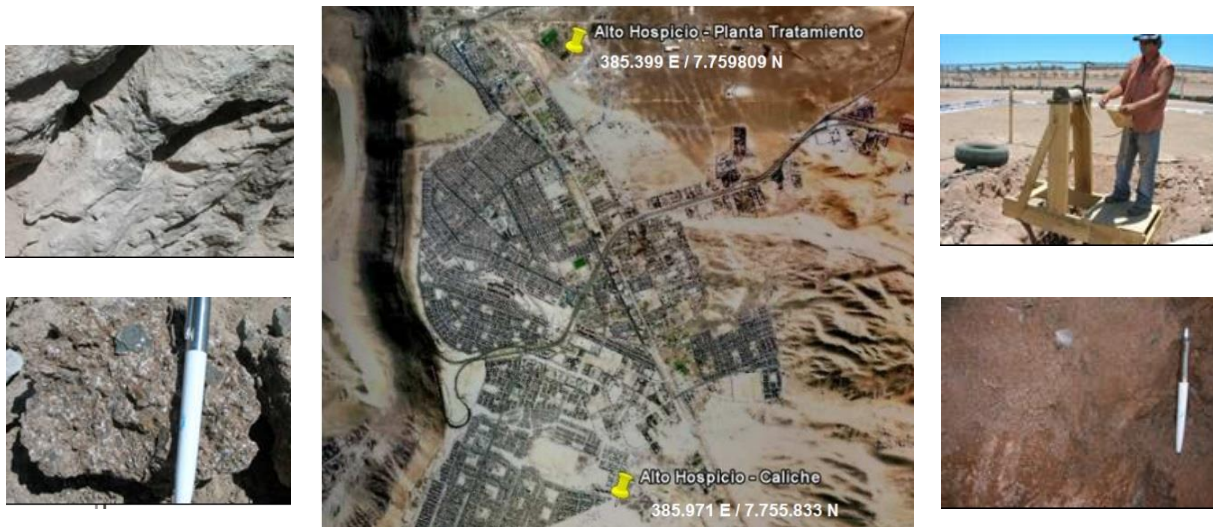


Ilustración 3.11 : Ubicación Calicatas efectuadas en Alto Hospicio y sus coordenadas. Izquierda: Caliche, Derecha: Planta Tratamiento (Idiem, 2010)

Tabla 3.4 : Estratigrafía Calicata Alto Hospicio – Planta Tratamiento (Idiem, 2010)

<u>Horizonte</u> N°	<u>Cotas Límites</u> (m)	<u>Espesor</u> (m)	<u>Descripción</u>
1	0.00 – 0.10	0.10	Arena limosa color café, compacidad baja, graduación uniforme, estructura homogénea, humedad nula.
2	0.10 – 0.40	0.30	Arena media a gruesa color café claro, compacidad alta por cementación causada por sales, estructura homogénea, humedad baja, plasticidad nula, gradación uniforme.
3	0.40 – 0.48	0.08	Lente de sal de color blanco cristalizado.
4	0.48 – 1.55	1.07	Arena gruesa color café, mal graduado, compacidad alta por cementación causada por sales, estructura homogénea, humedad baja a nula, plasticidad nula. Entre 1.50m y 1.55m se observa un lente de sal cristalizada.
5	1.55 – 3.00	1.45	Arena gruesa color café, compacidad alta por cementación causada por sales, estructura homogénea, mal graduado, humedad media a baja.

Tabla 3.5 : Propiedades índice suelos calicata Alto Hospicio – Planta Tratamiento (Idiem, 2010)

Prof. muestra [m]	Clas. USCS	Gs	Gs suelo lixiviado	% finos bajo malla 200	LL / LP / IP	Dens. Seca [t/m ³]	Hum. Nat. [%]
0,50	SM	2,77	2,71	18,6	NP	2,13	0,54
1,00	SM	2,72	2,69	16,9	NP	2,15	0,65
1,50	SM	2,77	2,69	18,2	NP	2,01	0,68
2,00	SM	2,76	2,70	16,1	NP	1,96	0,43
2,50	SM	2,73	2,70	17,7	NP	2,03	1,13
3,00	SM	2,75	2,69	17,2	NP	1,99	1,04

Tabla 3.6 : Estratigrafía Calicata Alto Hospicio – Caliche (Idiem, 2010)

Horizonte N°	Cotas Límites (m)	Espesor (m)	Descripción
1	0.00 – 0.10	0.10	Arena limosa color café, compacidad baja, estructura homogénea, humedad nula, gradación uniforme, plasticidad de los finos baja a nula.
2	0.10 – 0.15	0.05	Lente de sal de color blanco cristalizado.
3	0.15 – 1.80	1.65	Arena gruesa color café, mal graduado, compacidad muy alta por fuerte cementación causada por sales, estructura heterogénea, humedad nula, plasticidad nula. Se observan gravas y gravillas de hasta 2" de cantos angulares. Al final del pozo se encuentran clastos tipo roca, imposibilitando continuar con los métodos manuales.

Tabla 3.7 : Propiedades índice de suelos calicata Alto Hospicio – Caliche (Idiem, 2010)

Prof. muestreo [m]	Clas. USCS	Gs	Gs suelo lixiviado	% finos bajo malla 200	LL / LP / IP	Dens. Seca [t/m ³]	Hum. Nat. [%]
0,50	SM	2,79	2,74	27,4	NP	2,26	0,35
1,00	SM	2,78	2,68	34,7	NP	2,24	0,23
1,50	SM	2,83	2,68	27,5	NP	2,26	2,19

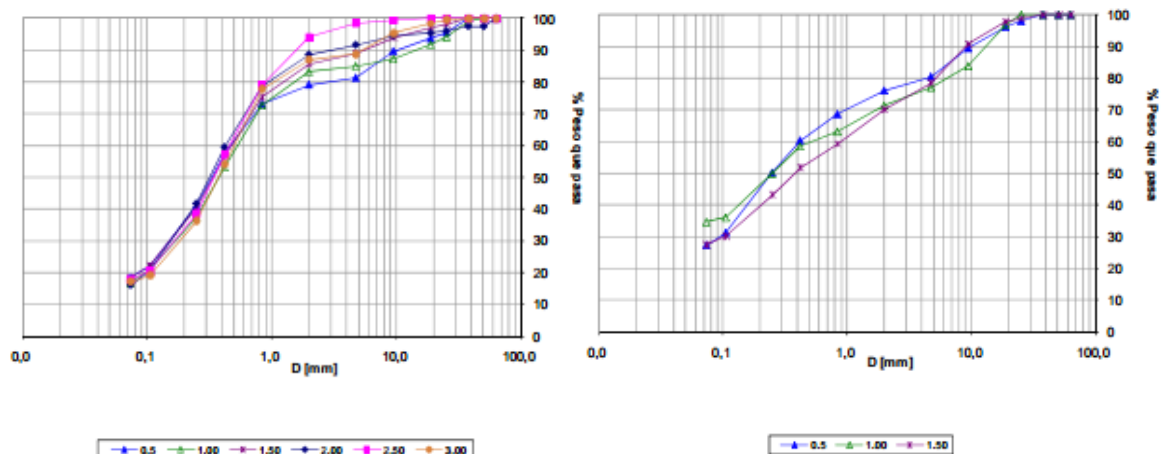


Ilustración 3.12 : Granulometría calicata, Izquierda: Alto Hospicio – Planta Tratamiento, Derecha: Alto Hospicio – Caliche (Idiem, 2010) (Idiem, 2010)

3.8.2 Unidades de roca

Se realizó una caracterización geotécnica del macizo rocoso (Formación Punta Barranco) a través de observación en terreno. Esta caracterización consistió en la obtención de parámetros para determinar la calidad del macizo rocoso como RQD, RMR y GSI. El RQD nos muestra la calidad del macizo rocoso mediante el número de discontinuidades por unidad de volumen. El RMR toma en cuenta características tales como resistencia uniaxial, incluye el RQD, espaciamiento de discontinuidades, condición de discontinuidades, condición de aguas subterráneas además de correcciones que dependen de la orientación de las discontinuidades con el talud generado. El GSI es el parámetro medido sólo a través de terreno en donde toma como dato primordial las estructuras que se desarrollan y la condición del frente expuesto.

El macizo rocoso presenta dos dominios claros de configuración de estructuras menores principalmente diaclasas, estos dominios se desarrollan en los cuatros puntos de obtención de datos. El primer dominio se presenta muy fracturado contiene discontinuidades con separación centimétrica, con relleno blando, con longitudes menores a 1m, ligeramente rugosas, moderadamente alteradas. El segundo dominio contiene discontinuidades con separación centimétrica, ligeramente rugosas y bordes duros, longitudes desde 1 a 5 m, ligeramente alterados y presenta de entre 2 a 3 sets de discontinuidades. Los dos dominios se enmarcan en un ambiente seco.

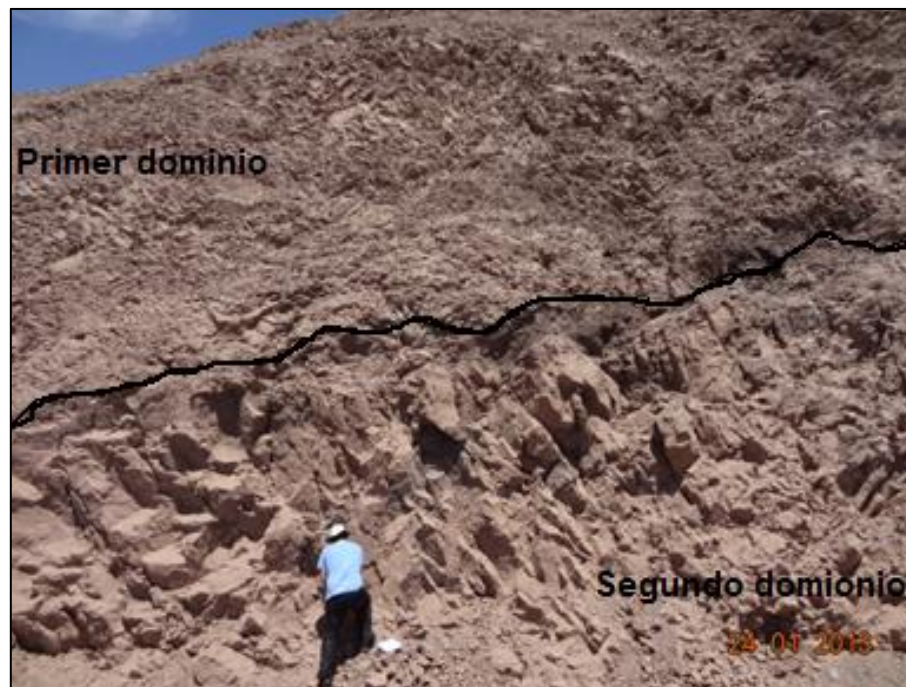


Ilustración 3.13 : Talud del punto B en donde se muestran los dos dominios de calidad del macizo rocoso



Ilustración 3.14 : Dominio 2 del macizo rocoso

Tabla 3.8 : Caracterización Geotécnica del macizo rocoso, RQD

	Dominio 1	Dominio 2
Jv (discontinuidades/m3)	25	8
RQD	32,5	88,6

Tabla 3.9 : Caracterización Geotécnica del macizo rocoso, Puntuación para RMR y GSI

	Dominio 1	Dominio 2
R1 (Resistencia a la roca sana)	9	9
R2 (RQD)	8	15
R3 (separación de discontinuidades)	8	10
R4 (estado de diaclasas)	10	25
R5 (Presencia de agua)	15	15
RMR	50	74
Longitud de la discontinuidad	4	2
Apertura	0	1
Rugosidad	3	3
Relleno	2	4
Alteración	3	5
Corrección por orientación	-25	-25
RMR Corregido	37	64
Clase	IV	II
Calidad	Mala	Buena
GSI	35-40	50-60

3.9 Sismicidad

Chile está caracterizado por la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana (Continente Americano), la sismicidad se desarrolla por la interacción entre estas placas acumulando esfuerzos los cuales se liberan generando sismos. La condición de borde de subducción deforma la corteza continental causando el relieve montañoso específicamente evidenciado en la Cordillera de los Andes. Es posible definir cuatro fuentes sismogénicas de borde de subducción (Ilustración 3.15) : sismos "outer-rise" (A), que ocurren costa afuera de la fosa oceánica, sismos interplaca (B), generalmente compresionales, sismos intraplaca oceánica (C), generalmente tensionales, sismos intraplaca continental (D), asociados a la deformación continental.

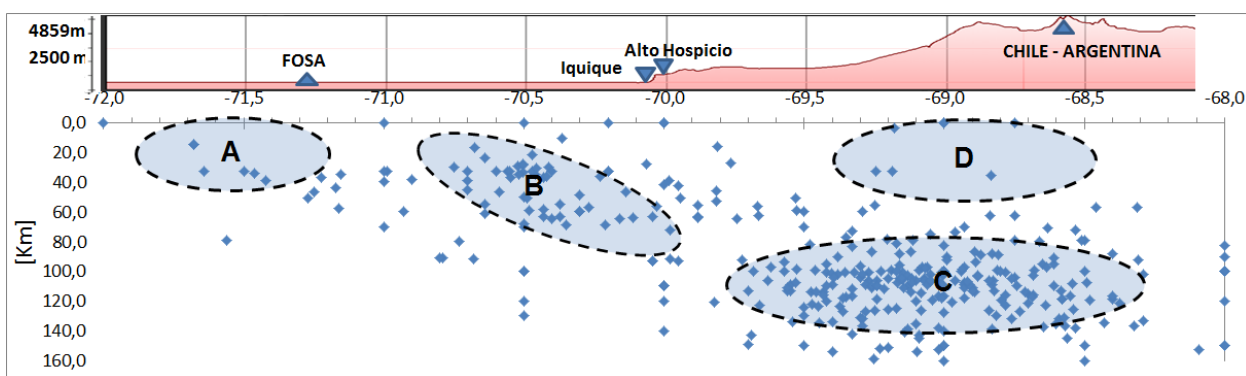


Ilustración 3.15 : Fuentes sismogénicas basadas en sismos mayores a M = 5 entre 1911-2013 (1911-1976 sismos obtenidos del catálogo SISRA y 1977-2013 del catálogo ISC) ver Anexo B.6

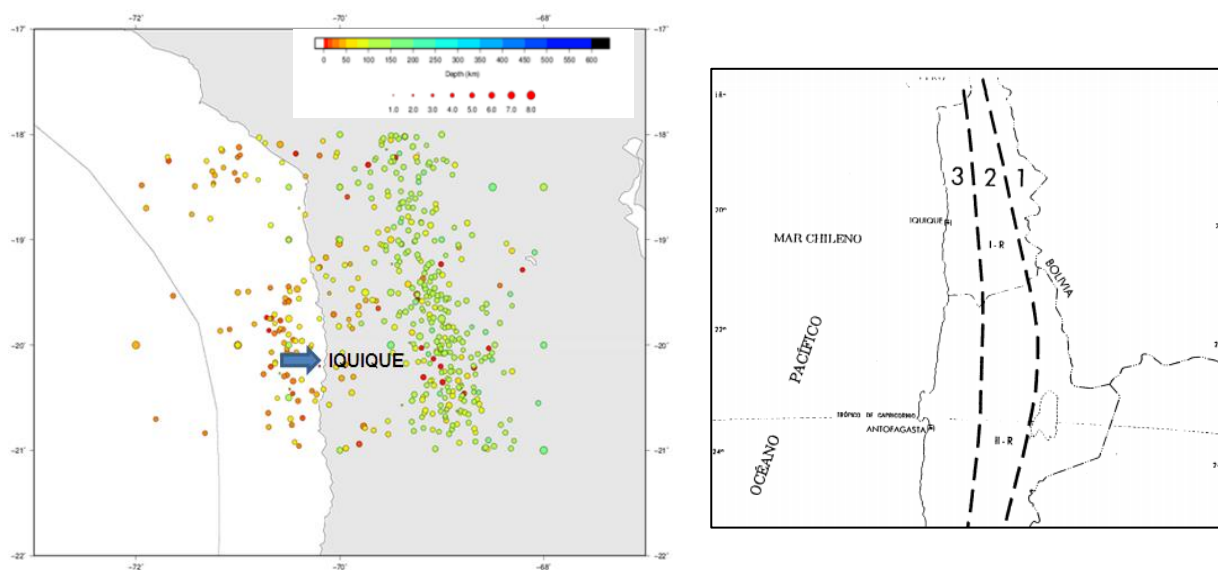


Ilustración 3.16 : Izquierda, distribución de sismos mayores a M = 5 entre 1911-2013 en la Región de Tarapacá (1911-1976 sismos obtenidos del catálogo SISRA y 1977-2013 del catálogo ISC). Derecha, Zonas sísmicas para el Norte de Chile (NCh 433, of. 96.)

La zona de estudio se enmarca dentro de una zona sísmica de subducción definida como zona 3, asociada a aceleraciones sísmicas máximas de 0,4 según norma NCH 433, of. 96 (Ilustración 3.16).

3.9.1 Sismicidad reciente

Los dos últimos grandes sismos que afectaron de manera importante a la ciudad de Iquique son:

- 14 de Noviembre del 2007, de magnitud 7.7 la profundidad del mecanismo focal es de 37,6 km ubicado aproximadamente a 40 km al Sureste de Tocopilla.
- 13 de Junio del 2005, de magnitud 7.9 con profundidad de 11 km aproximadamente a 41 km del Sur de Chiapa.

Se pueden observar los registros de acelerogramas para cada terremoto en el Anexo 3.

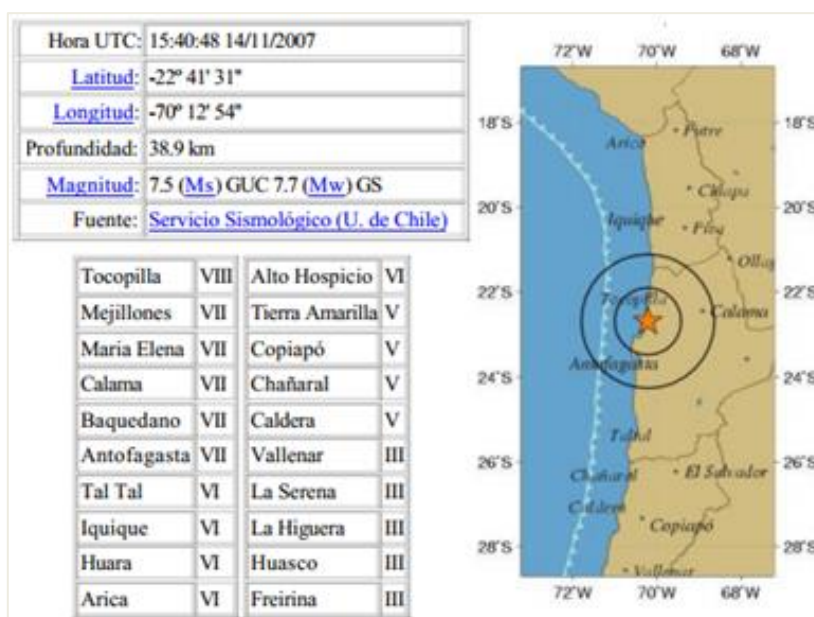


Ilustración 3.17 : Datos del terremoto de Tocopilla 2007 (RENADIC – UCH). Magnitud e intensidades por localidad.

Tabla 3.10 : Aceleraciones máximas horizontales y verticales del Terremoto de Tocopilla 2007 (RENADIC – UCH)

estación	Aceleración Máxima Horizontal (g)	Aceleración Máxima Vertical (g)
Iquique Hospital	0.07	0.04
Iquique Escuela Chipana	0.12	0.06
Punta Patache	0.08	0.06
Calama	0.09	0.10
Tocopilla SQM	0.41	0.27
Mejillones	0.42	0.36
San Pedro de Atacama	0.07	0.04

Hora UTC:	22:44:33.54 13/6/2005
Latitud:	-19° 54' 10"
Longitud:	-69° 7' 40"
Profundidad:	111 Km
Magnitud:	7.9 (M _w) NEIC 7 (M _b) NEIC
Fuente:	NEIC (Geological Survey USA)

Iquique	VI-VII	El Salvador	IV-V
Tocopilla	VI	Copiapó	IV
Calama	V-VI	Caldera	IV
Arica	V	Antofagasta	III-IV
Chañaral	IV-V		



OBSERVACIONES: Se reportan 11 muertos, 182 heridos y 72 viviendas destruidas en el área afectada.

Ilustración 3.18 : Datos del terremoto de Tarapacá 2005 (RENADIC – UCH). Magnitud e intensidades por localidad

Tabla 3.11 : Aceleraciones máximas horizontales y verticales del Terremoto de Tarapacá 2005 (RENADIC – UCH)

Localidad	Estación	Azimut	Aceleraciones máximas (g)					
Pisagua (I Región)	2 – SMA-1	210	Long.	0.303	V	0.286	Trans.	0.435
Iquique (I Región)	1 – Etna	0	NS	0.264	V	0.255	Trans.	0.252
	2 – SMA-1	270	Long.	0.216	V	0.114	Trans.	0.195
	3 – SMA-1	270	Long.	0.242	V	0.157	Trans.	0.276

3.9.2 Sismicidad Histórica

Se destacan 2 terremotos históricos importantes, otros sismos de importancia se muestran en el Anexo 4.

3.9.2.1 13 de agosto de 1868

Terremoto con posterior tsunami ocurrido en el Sur del Perú y Norte de Chile ocurrido a las 16:45 horas –que dejó al barco Watere 800 m tierra adentro-. Arica nuevamente destruida con daños mayores en Pisagua e Iquique. El terremoto tiene asignada las siguientes coordenadas epicentrales: 17.7° S, 71.60° W, estimando una profundidad de 10 kilómetros y una magnitud $M = 8.8$ a partir de una completa lista de intensidades de Mercalli Modificadas reportadas (Comte et al., 1988). Los reportes indican que se perdieron alrededor de trescientas vidas en Iquique, el terremoto fue devastador y el maremoto subió más de diez metros destruyó los edificios principales del puerto, las máquinas condensadoras de agua, los almacenes de salitre y el muelle, llegando a cuantificar más de cien casas destruidas (Urrutia. Lanza, 1993)

3.9.2.2 9 de mayo de 1877

Terremoto y tsunami catastrófico que afectó al Norte de Chile a las 20:30 horas las mayores intensidades se registraron entre Iquique y Antofagasta, con Tocopilla totalmente destruida, las variaciones del nivel del mar variaron entre 10 y 15 metros. Las coordenadas del epicentro son 21.0° S, 70.3°W con una magnitud de $M = 8.8$ y un largo de ruptura de 400 km. (Comte, et al., 1988). En Iquique el sismo duró alrededor de 2 minutos, empezando con un ruido sordo y prolongado terminando con un movimiento que no dejaba mantenerse en pie. Hubo un importante daño en las construcciones civiles tanto de material liviano como sólido, luego, el maremoto arrasó con gran parte de la ciudad desde La Puntilla hasta el sector de El Morro, murieron alrededor de 30 personas, la población se salvó huyendo hacia los cerros, en la época Iquique tenía nueve mil doscientos habitantes (Urrutia, Lanza, 1993).

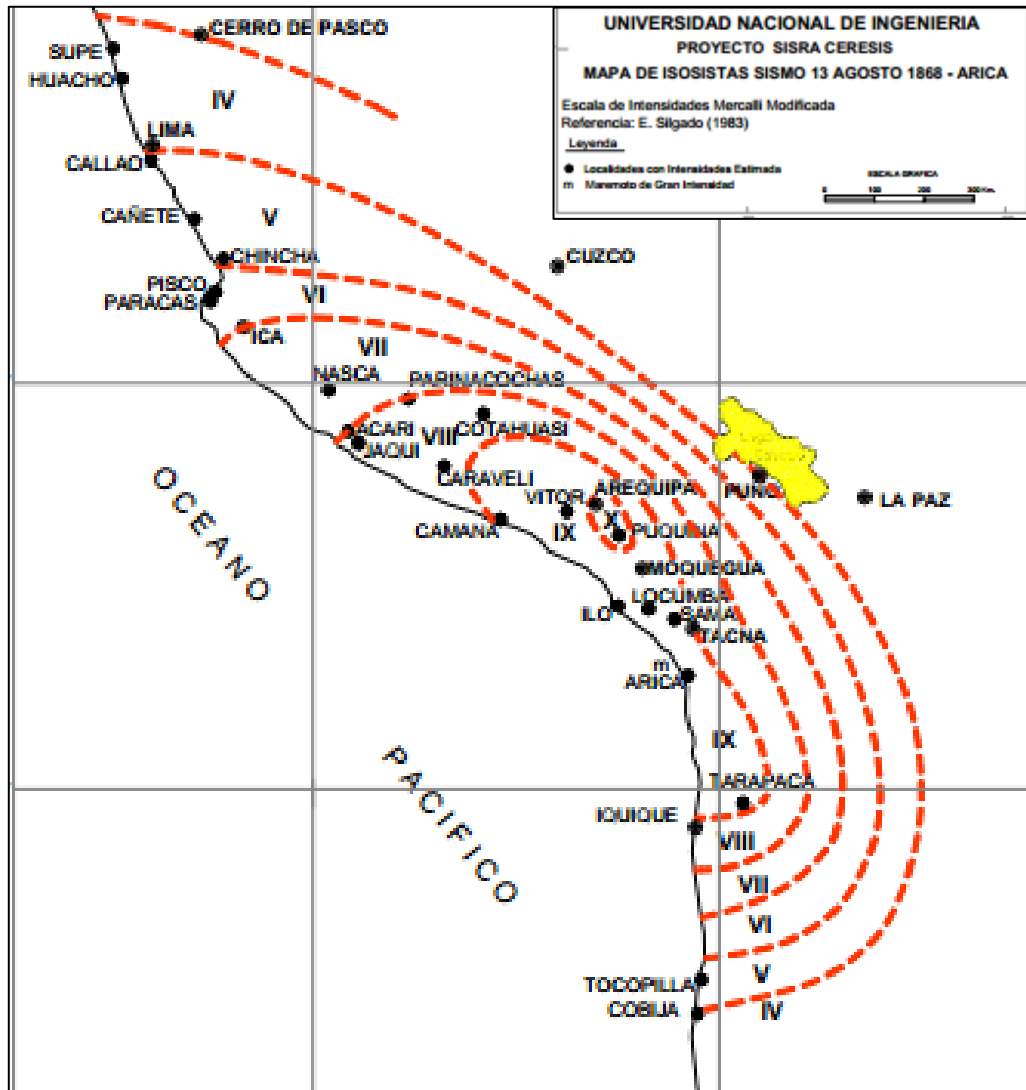


Ilustración 3.19 : Mapa de isosistas, Terremoto de Arica 1868. (SISRA, Kausel, 1983);

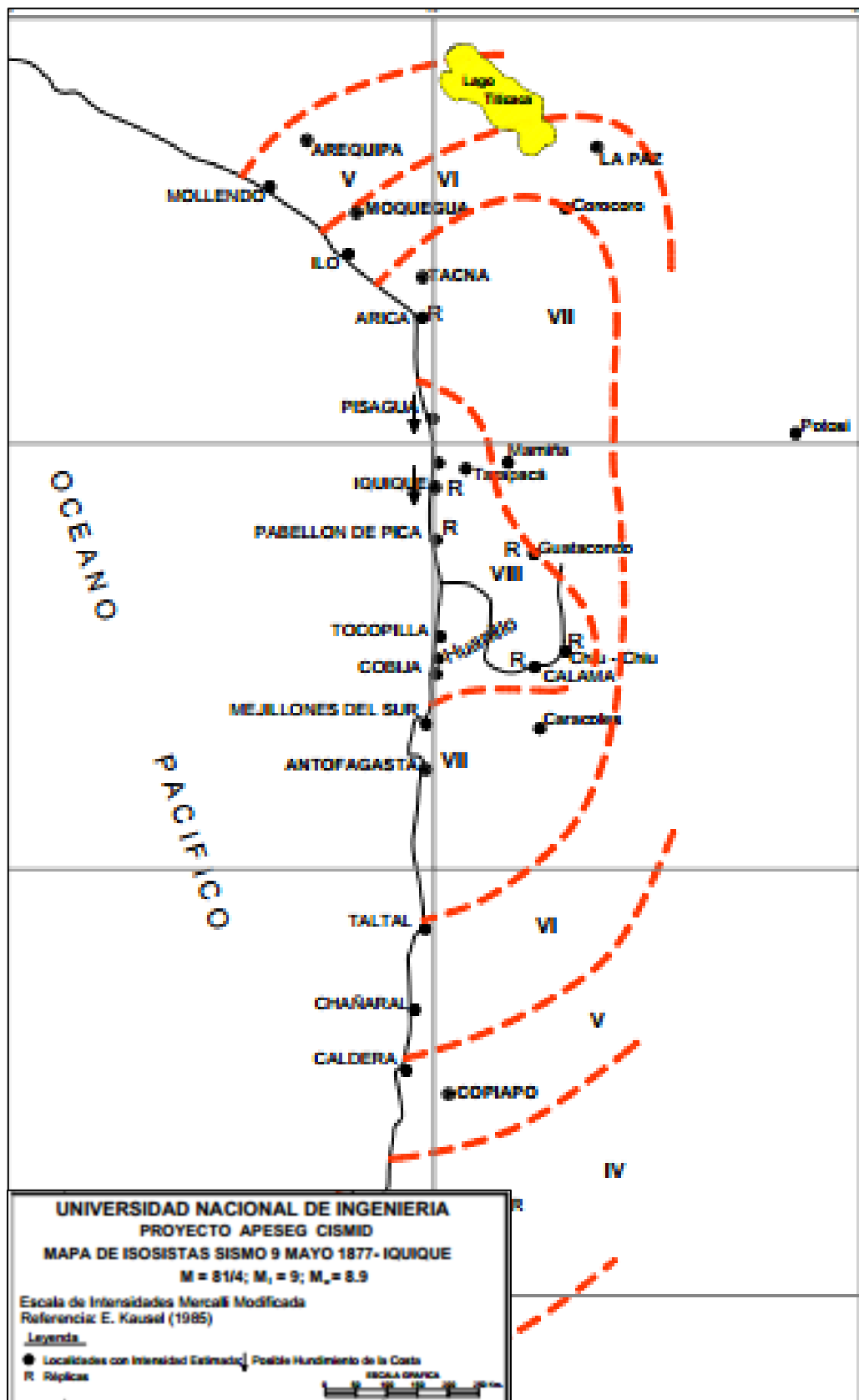


Ilustración 3.20 : Mapa de isosistas, Terremoto de Iquique 1877 (Kausel, 1985)

3.10 Antecedentes de caídas de roca y deslizamientos

El terremoto del lunes 13 de junio del 2005 es el más dañino de los últimos años, fallecieron 6 personas producto de deslizamientos de tierra y roca en la ladera del cerro, la ruta A-16 presentó variados cortes producto de rodados y derrumbes de la ladera.

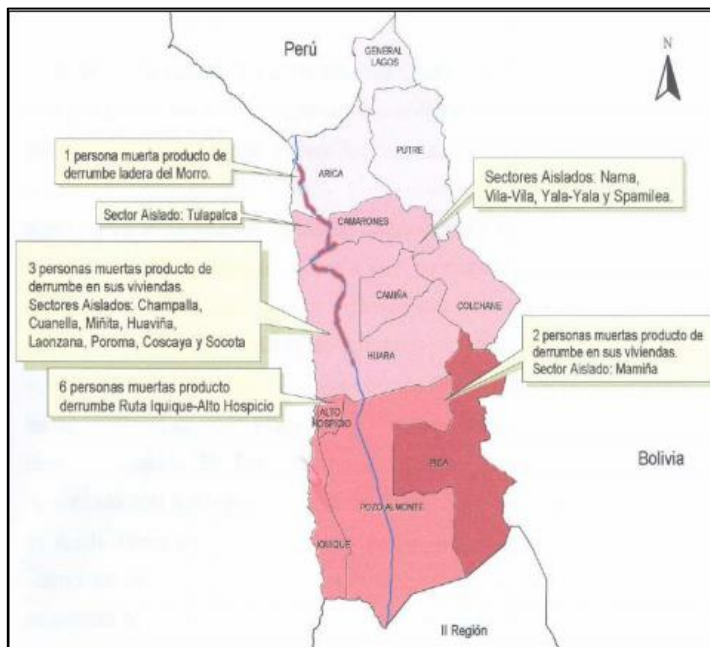


Ilustración 3.21 : Daños generados por el terremoto de Junio del 2005 (ONEMI, 2009)



Ilustración 3.22 : imagen de desprendimientos de roca en los cerros de Iquique, terremoto de Junio del 2005.

Se realizó un catastro de caídas de roca en la zona de estudio (Tabla 3.12 e Ilustración 3.23) el cual se complementó con registros de publicaciones periodísticas. Además de las caídas de rocas desencadenadas por eventos sísmicos se encontraron zonas de canteras de extracción de áridos que a través de su proceso productivo dejan restos de rocas de gran tamaño, las cuales presentan inestabilidad desarrollando una zona generadora de caídas de rocas.

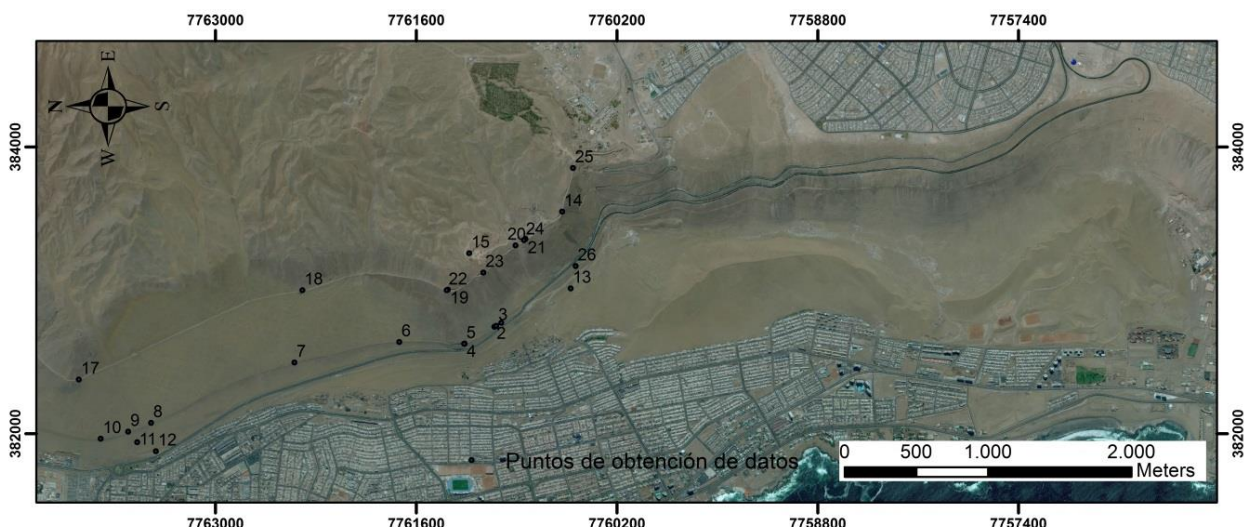


Ilustración 3.23 : Posición de los distintos puntos de obtención de datos en la zona de estudio (Ver Tabla 3.12).

Tabla 3.12 : Catastro de remociones en masa con sus respectivas coordenadas

N°	Coordenadas		OBSERVACIÓN
	N	E	
1	7761007	382773	Flujo detrítico y caída de roca
2	7761055	382746	Se observan varios depósitos de flujos detríticos mal seleccionados
3	7761042	382752	Grieta
4	7761262	382628	Afloramiento de roca
5	7761265	382627	Estructuras en el macizo rocoso 45/280 Y 60/260 (DIP/DIP DIRECTION)
6	7761718	382639	Alcance de caída de roca (hasta 1 m ³)
7	7762449	382496	Caída de rocas (alóctonas) alto redondeamiento y esfericidad
8	7763449	382075	Retroexcavadora sacando material coluvial y eólico en la base del talud
9	7763609	382014	Caída de rocas de 50 cm2 y 30 cm de alto
10	7763800	381965	Zonas de generación y alcance de caídas de rocas
11	7763546	381941	Zona de extracción de áridos, sólo coluvios no existe afloramiento de roca
12	7763415	381878	Caída de roca (coluvial), volumen 40x60x40 cm generada por extracción de áridos
13	7760523	383013	Tubería que suministran el agua en Iquique amenazada por caída de rocas
14	7760583	383548	Generación de caída de roca en la ruta
15	7761231	383258	Afloramiento de ceniza entre depósitos aluviales y coluviales
16	7764653	382889	Antigua cantera, punto de generación de remociones en masa
17	7763953	382377	Caída de roca, afloramiento en la parte alta
18	7762394	383000	Afloramiento roca Formación Punta Barranco, caída de roca
19	7761379	383004	Zona de generación de caída de roca
20	7760908	383313	Zanja o plano de debilidad, punto de deslizamiento de suelo
21	7760838	383358	Formación Punta Barraco, Gravas de Alto Hospicio y cenizas
22	7761388	383000	Datos de set de diaclasas 45/220, 30/210, 40/260 (DIP/DIP DIRECTION)
23	7761132	383123	Datos de set de diaclasas 30/210, 40/50 (DIP/DIP DIRECTION)
24	7760849	383350	Toma de datos de set diaclasa 88/180, 30/255, 60/70 (DIP/DIP DIRECTION)
25	7760507	383853	caída de depósitos coluviales de 3 m de ancho
26	7760488	383169	Generación de remociones en masa y alcance a la ruta A-16

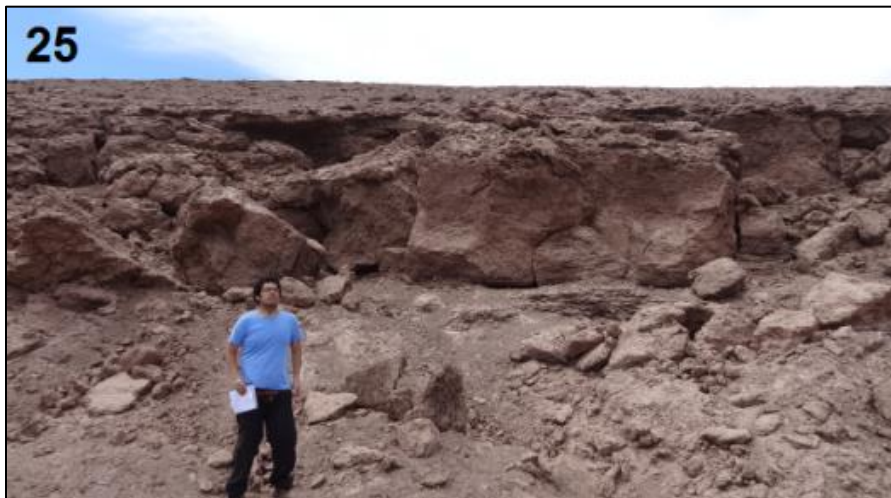


Ilustración 3.24 : Zonas de generación de remociones en masa (los números en la esquina superior están asociados a la Tabla 3.12 e ilustración 3.20)



Ilustración 3.25 : Zonas de alcance de caídas de rocas (los números en la esquina superior están asociados a la Tabla 3.12 e ilustración 3.20)

3.11 Factores antrópicos

Existe en la zona de estudio una gran intervención antrópica, las principales intervenciones comprenden las rutas de conexión entre Alto Hospicio e Iquique entre ellas destaca la ruta A-16 y el ZigZag (ruta alternativa) (Ilustración 3.26), además se encuentran caminos realizados para la construcción de líneas férreas y conexión con canteras.



Ilustración 3.26 : Factores antrópicos que afectan la zona de estudio (obtenidas de <http://urbatoriumiquique.blogspot.com> (izquierda) y en terreno)

Otro factor importante a considerar son los ductos alimentadores de agua potable que se ubican al norte del ZigZag y que conducen hasta los estanques ubicados al norte del Cerro Dragón el único suministro de Iquique y se encuentran sin ninguna protección (Ilustración 3.25, foto 13 y 14). Para efectos de fortalecer las medidas de seguridad y prevenir derrumbes el ministerio de obras públicas instaló mallas con hormigón proyectado (shotcrete), la ubicación de estas obras se observa en la Ilustración 4.3. Desafortunadamente estas medidas de mitigación se instalaron solamente en los taludes donde afloraba roca y quedaron sin mitigación los depósitos no consolidados como la unidad Gravas de Alto Hospicio.



Ilustración 3.27 : Shotcrete y mallas como medidas de mitigación

4. Evaluación de susceptibilidad

Para la evaluación de susceptibilidad se utilizaron los antecedentes del área de estudio presentado en el capítulo anterior. Para este efecto, la zona de estudio se dividió en 139 unidades geomorfológicas (Ilustración 4.1) utilizando el software ArcMap 10. Para la posterior realización de mapas de susceptibilidad y peligro se suprimieron sectores de las unidades que presentaron pendientes menores a 10°. El mapa de pendientes utilizado para esta etapa se presenta en el Anexo 1.

Se determinaron los índices de susceptibilidad (IS) para deslizamientos de suelo, deslizamientos de rocas y caídas de rocas utilizando las tablas 1.2, 1.4 y 1.6. La puntuación de cada unidad geomorfológica se presenta en el Anexo C.1.

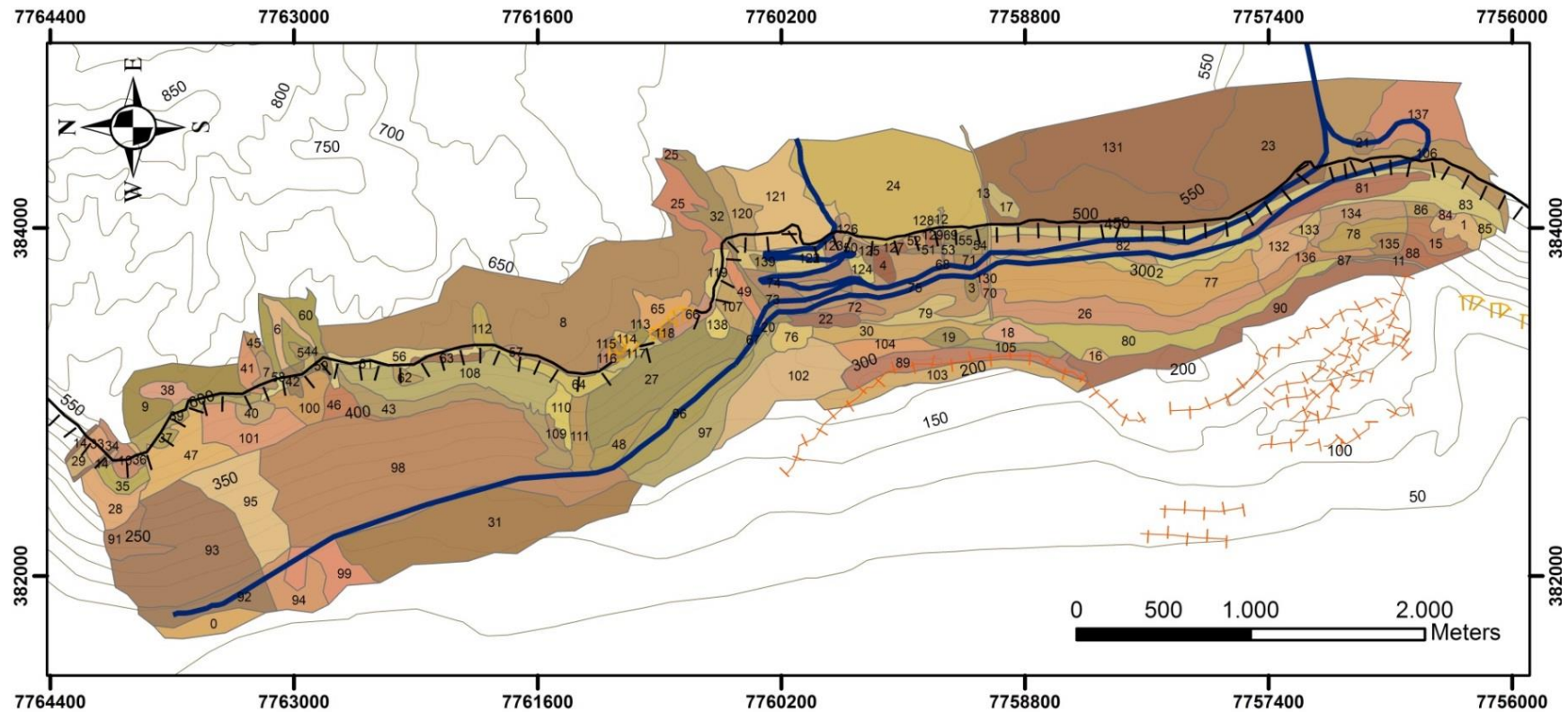
A continuación se presentan las unidades que obtuvieron IS mayor o igual a 50 para cada una de las remociones estudiadas. Es importante señalar que para deslizamientos de suelo (Ilustración 4.2), se distinguió entre dos tipos: deslizamiento rotacional (profundo) y deslizamiento traslacional (superficial), existiendo zonas de rocas que presentan suelo superficial desarrollado principalmente por la erosión propia del acantilado costero.

Tabla 4.1 : IS \geq 50 para deslizamiento rotacional

Unidad	IS	Unidad	IS
50	65	83	65
51	57	118	57
53	57	119	57
54	50	122	65
55	58	123	57
66	65	129	50
81	72	139	72
82	72		

Tabla 4.2 : IS \geq 50 para deslizamiento de suelos traslacionales

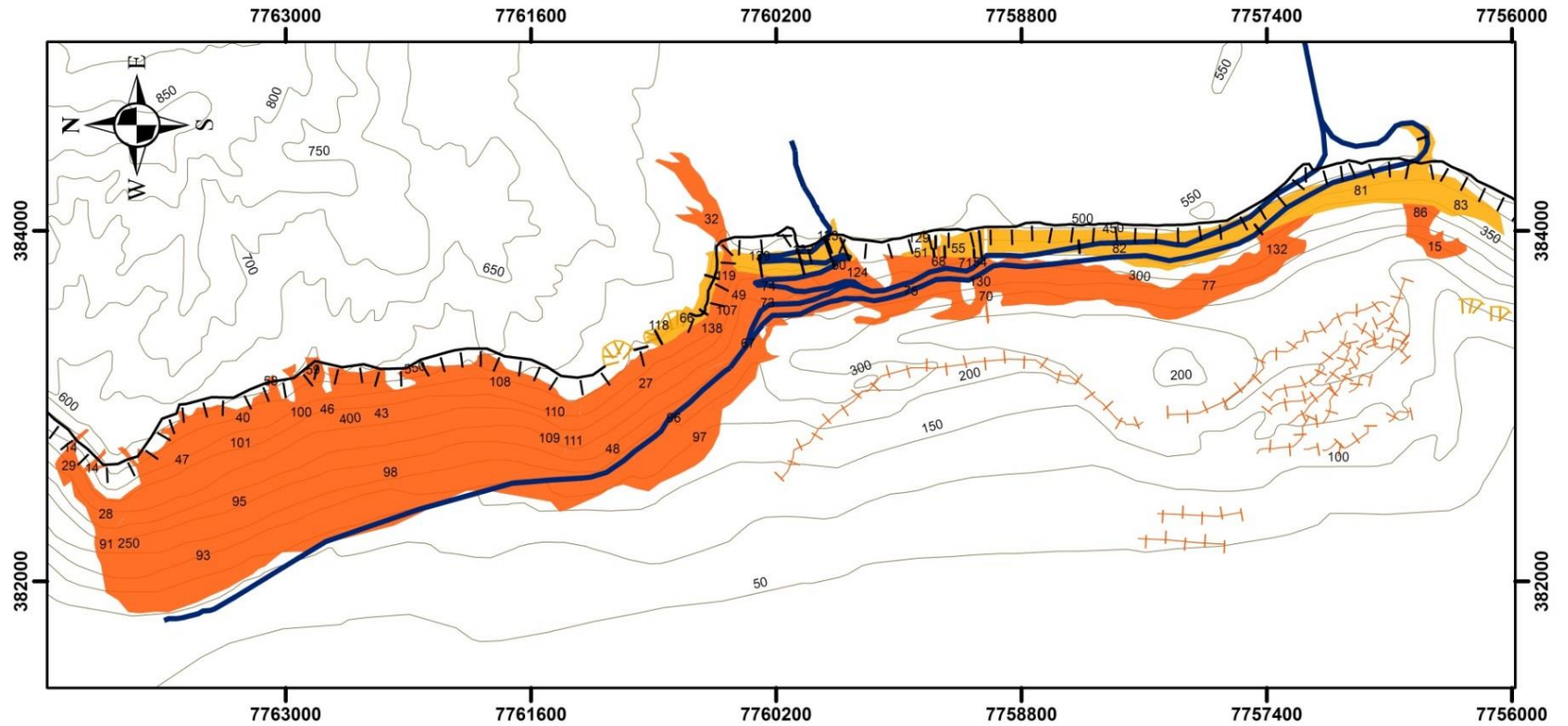
Unidad	IS	Unidad	IS	Unidad	IS	Unidad	IS
14	73	48	54	75	61	101	58
15	58	49	54	77	61	108	61
27	61	58	51	86	51	107	61
28	61	59	51	91	66	109	58
29	61	67	54	93	51	110	61
32	66	68	66	95	51	111	61
40	58	70	66	96	66	124	61
43	73	71	54	97	53	130	61
46	59	73	54	98	51	132	54
47	58	74	54	100	58	138	54



Legenda

- +—+— Cresta de Duna
- ||||| Escarpe de Canteras y Aridos
- ||| Gran Escarpe Costero
- Carretera
- Curvas de nivel cada 50m
- Unidades Geomorfológicas

Ilustración 4.1 : Unidades Geomorfológicas de la zona de estudio



Leyenda

—+— Cresta de Duna

||||| Escarpe de Canteras y Aridos

TTT Gran Escarpe Costero

— Carretera

— Curvas de nivel cada 50m

Deslizamiento de suelo (IS) - Rotacional

50 - 75

Deslizamiento de suelo (IS) - Traslacional

50 - 75

Ilustración 4.2 : Índice de susceptibilidad - Deslizamientos de suelo

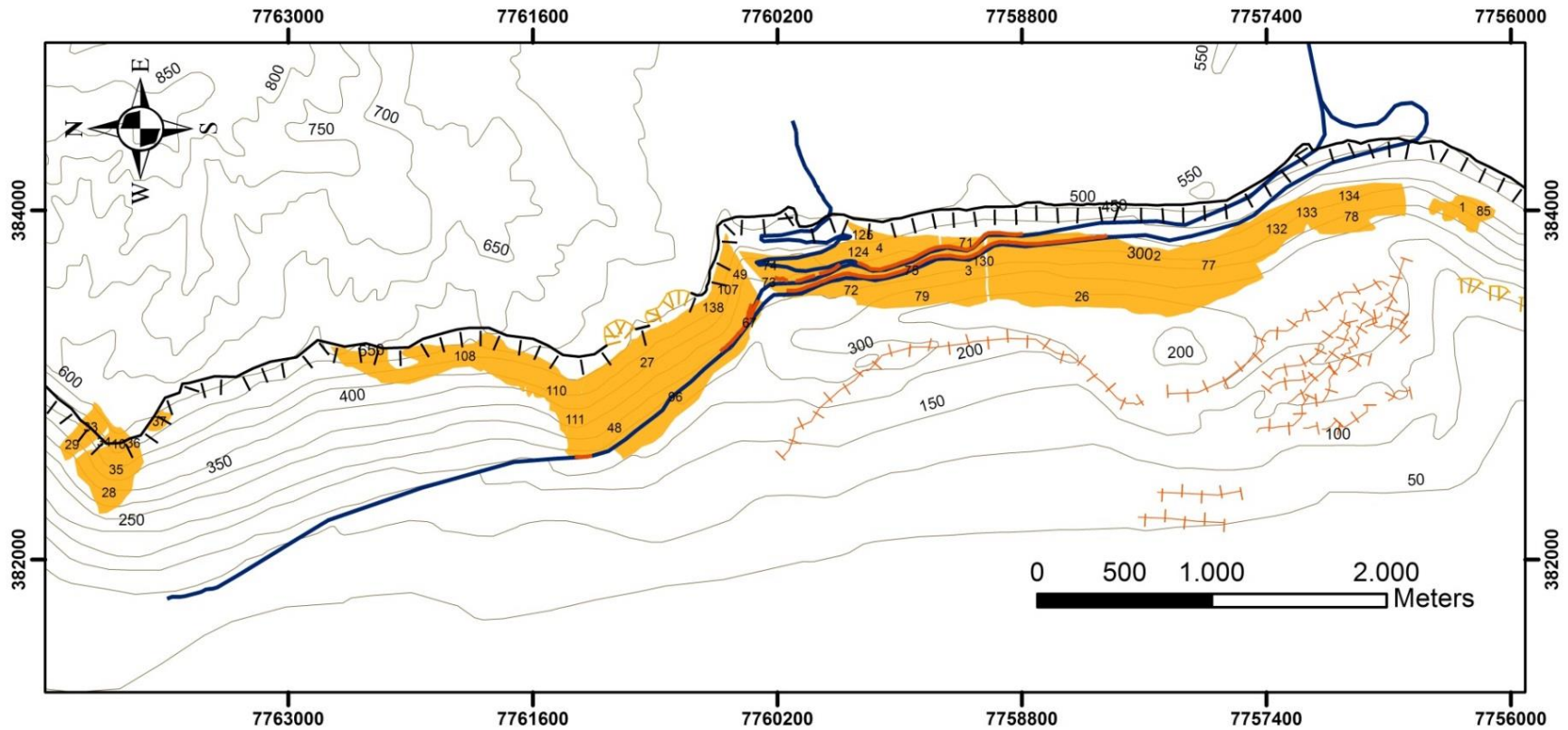
Tabla 4.3 : IS \geq 50 para deslizamientos de roca en bloque

Unidad	IS	Unidad	IS	Unidad	IS	Unidad	IS
1	53	34	53	74	63	111	68
2	68	35	61	75	68	124	68
3	68	36	56	77	68	125	53
4	61	37	53	78	53	130	68
10	56	48	63	79	56	132	61
26	51	49	63	85	61	133	56
27	68	67	63	96	63	134	56
28	68	71	63	107	68	138	63
29	68	72	56	108	68		
33	53	73	63	110	68		

Tabla 4.4 : IS \geq 50 para caídas de rocas

Unidad	IS	Unidad	IS	Unidad	IS	Unidad	IS
2	64	50	72	75	79	120	54
3	64	53	64	77	79	121	54
4	57	54	57	78	64	122	72
10	50	55	65	79	65	123	64
14	64	61	57	81	79	124	79
26	57	62	57	82	79	129	57
27	79	63	57	83	72	130	79
28	79	66	72	85	57	132	72
29	79	67	72	106	54	133	65
32	57	70	57	107	64	134	65
35	57	71	72	108	79	135	57
36	50	72	65	110	79	137	54
48	57	73	72	111	79	138	72
49	72	74	72	119	64	139	79

Las unidades con IS superior o igual a 50 expuestas en la tablas anteriores, se les evaluó su probabilidad de falla, y se les determinó el acance de la posible remoción. En el Anexo 6 se muestran imágenes de las unidades seleccionadas.



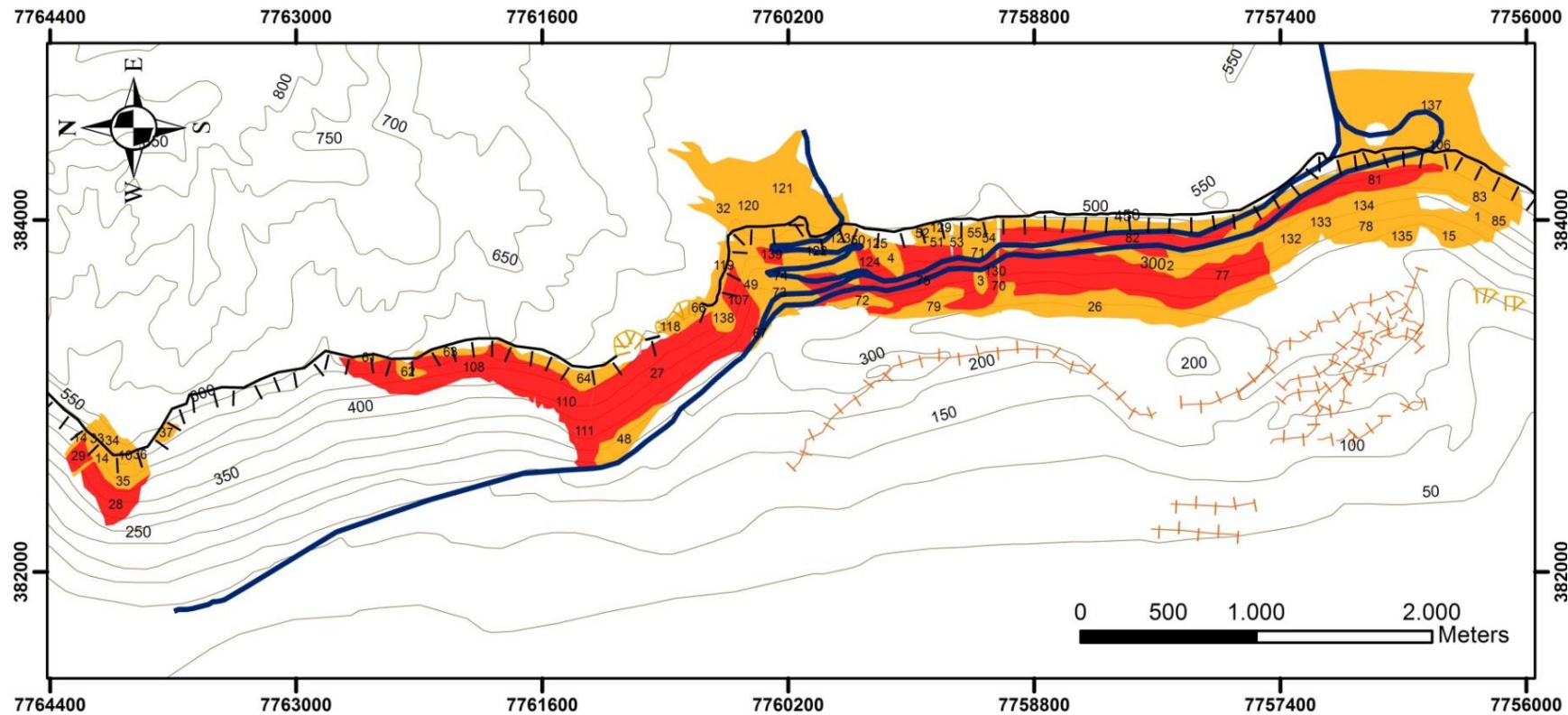
Legenda

-  Shotcrete - malla
-  Cresta de Duna
-  Escarpe de Canteras y Aridos
-  Gran Escarpe Costero
-  Carretera
-  Curvas de nivel cada 50m

Deslizamiento de roca (IS)

 50 -75

Ilustración 4.3 : Índice de susceptibilidad - Deslizamiento de roca en bloque



Legenda

- +—+— Cresta de Duna
- ||||| Escarpe de Canteras y Aridos
- |||| Gran Escarpe Costero
- Curvas de nivel cada 50m
- Carretera

Caída de roca (IS)

- 50 - 74
- 75 - 100

Ilustración 4.4 : Índice susceptibilidad - Caídas de rocas

5. Evaluación de probabilidad de falla

Se realizaron análisis computacionales y numéricos para determinar el factor de seguridad (FS) y la probabilidad de falla (PF) para cada unidad geomorfológica que cumplió la condición de susceptibilidad, esto se aplicó a cada caso de remociones en masa estudiadas en un escenario estático y sísmico.

Se asumió un escenario sísmico representado por aceleraciones tanto horizontales como verticales. Para la aceleración horizontal se tomó en cuenta tanto la Norma NCh 433 Of.96, como los registros de los terremotos de Tarapacá 2005 y Tocopilla 2007, para la aceleración vertical sólo se tomaron en cuenta los datos de los terremotos nombrados anteriormente, ya que la Norma Chilena no toma en cuenta aceleraciones verticales. Los valores expuestos en la Tabla 5.1 son los que describen el escenario sísmico asumido, éstos se basan en las distintas aceleraciones generadas por los Terremotos de Tocopilla y Tarapacá en las localidades más cercanas a sus epicentros y es el que se aplicó para la obtención de probabilidad de generación de deslizamientos de suelo (superficial y profundo), roca y caídas de rocas.

Tabla 5.1 : Aceleración horizontal y vertical del escenario sísmico asumido

Aceleración Vertical	0,27 g
Aceleración Horizontal	0,4 g

El terremoto asumido puede compararse con el Terremoto del Maule ocurrido el 27 de Febrero del 2010, el cual presentó una magnitud de 8.8 y un epicentro a 23Km al Sur Oeste de la localidad de Cobquecura (VII Región), las mayores aceleración fueron registradas por estaciones ubicadas en la ciudad de Angol (Tabla 5.2). Las aceleraciones entregadas por el Terremoto del Maule son muy superiores a las aceleraciones del escenario asumido para este trabajo, pero generalmente en los estudios de peligro de remociones en masa no se utilizan las máximas aceleraciones sino un porcentaje de ellas. En este caso particular, las aceleraciones impuestas tanto verticales como horizontales son alrededor de un 40% de las aceleraciones mayores registradas en el Terremoto del Maule.

Tabla 5.2 : Aceleraciones máximas del Terremoto del Maule y comparación con el escenario asumido

	Terremoto Del Maule (M= 8.8)	% del Escenario sísmico asumido con respecto al Terremoto del Maule
Aceleración Vertical	0,681 g	40%
Aceleración Horizontal	0,928 g	43%

Por lo tanto, lo asumido como escenario sísmico es completamente factible ya que se argumenta en registros de Terremotos cercanos a la zona de estudio, aunque menores en magnitud y también se justifica con el Terremoto del Maule, ya que las aceleraciones del escenario sísmico impuesto son alrededor de un 40% de las de dicho Terremoto, lo que es cercano a lo aplicado generalmente para este tipo de estudio.

La caracterización geotécnica fue determinada en el caso de suelo mediante los datos del informe Idiem, para el caso de rocas la caracterización fue determinada mediante descripción en terreno y muestras de mano. Además para los dos casos las descripciones se corroboraron a través del mapa geológico de Marquardt, et al. (2008).

5.1 Deslizamientos rotacionales de suelo

Se analizó cada unidad geomorfológica susceptible a deslizamientos rotacionales mediante el software SLIDE. Las laderas estudiadas corresponden a suelos de espesor mayor a 4 m sin nivel freático, el detalle del análisis se presenta en el Anexo C.2.

Para este tipo de remoción se tomó en cuenta las Gravas de Alto Hospicio, los datos entregados en la tabla 5.3 se aplicaron para obtener tanto el factor de seguridad y probabilidad de fallas de la unidades en que se encuentran las gravas, el ϕ y c fueron definidos mediante características similares de otros depósitos en la literatura, sólo el peso específico fue obtenido directamente de los datos recopilados. Se aplicó distribución Normal y desviaciones estándar (Tabla 5.3) en las distintas variables para obtener la probabilidad de falla.

Tabla 5.3 : Parámetros geotécnicos para suelo profundos y su desviación estándar

	ϕ [°]	c [kPa]	γ [N/m ³]
Gravas de Alto Hospicio	38	20	18,582
σ	3	3	0,5

La mayor parte de las unidades geomorfológicas presentó condiciones para deslizamientos rotacionales en una situación sísmica, en cambio para la situación estática todas las unidades presentan una probabilidad de fallar muy baja o nula. Las unidades se

ubican principalmente en el Sureste de la zona de estudio, en las partes más altas del Escarpe Costero, afecta directamente a la ruta A-16.

Tabla 5.4 : Factor de seguridad y Probabilidad de falla para deslizamientos rotacionales (profundos)

Unidad	IS	Situación estática		Situación sísmica	
		FS	PF (FS <= 1) [%]	FS	PF (FS <= 1) [%]
50	65	2.337	0	1.263	0.9
51	57	1.951	0	1.080	17.8
53	57	1.827	0	0.999	48.5
54	50	2.345	0	1.230	1.8
55	58	1.746	0	0.925	80.5
66	65	1.707	0	0.849	98.3
81	72	1.349	0.1	0.838	98.8
82	72	1.254	1.4	0.777	100
83	65	1.285	0	0.787	99.6
118	57	2.102	0	1.102	14
119	57	1.414	0	0.862	95.3
122	65	1.773	0	0.942	75.2
123	57	1.646	0	0.945	70
129	50	2.225	0	1.146	6.9
139	72	1.249	0.9	0.777	100

5.2 Deslizamientos traslacionales de suelo (superficiales)

Se determinó el factor de seguridad y la probabilidad de falla para cada unidad susceptible a deslizamientos traslacionales, se utilizó el modelo de Montecarlo para ladera infinita con 1,5 m como espesor máximo, las condiciones de pendientes, cohesión y ángulos de fricción, corresponden a los representativos de cada unidad. Se asumieron los casos de situación estática y situación sísmica, las dos en condiciones secas debido al clima presente. El detalle se presenta en el Anexo C.3

Se tomaron en cuenta los depósitos coluviales, eólicos y aluviales y se definieron los parámetros geotécnicos que se muestran en la tabla 5.5, el ángulo de fricción (ϕ), la cohesión (c) y peso específico (Y) fueron homologados con depósitos de las mismas características, sólo el peso específico de depósitos eólicos fue obtenido directamente mediante la densidad que entregó el informe del Idiem para las calicatas desarrolladas en el Cerro Dragón. Se aplicó distribución Normal y desviaciones estándar (Tabla 5.5) en las distintas variables para obtener la probabilidad de falla.

Tabla 5.5 : Parámetros geotécnicos para suelo superficiales y su desviación estándar

	ϕ [°]	c [kPa]	γ [kN/m ³]
Depósitos coluviales	30	15	15
Depósitos eólicos	30	5	15,86
Depósitos aluviales	30	10	15
σ	5	1	0,5

Tabla 5.6 : Factor de seguridad y Probabilidad de falla para deslizamientos de suelo traslacionales

Unidad	IS	Situación estática		Situación sísmica	
		FS	PF (FS <= 1) [%]	FS	PF (FS <= 1) [%]
14	73	1,589	0	0,877	70
15	58	1,722	0	0,923	60
27	61	1,492	0	0,762	83
28	61	1,428	0	0,740	85
29	61	1,485	0	0,760	81
32	66	2,013	0	1,012	41
40	58	1,318	0	0,740	80
43	73	1,726	0	0,885	64
46	59	1,873	0	0,930	59
47	58	1,662	0	0,865	68
48	54	1,818	0	0,864	70
49	54	1,826	0	0,867	70
58	51	1,963	0	0,956	54
59	51	2,087	0	0,989	49
67	54	1,748	0	0,844	74
68	66	1,830	0	0,957	53
70	66	1,937	0	0,990	47
71	54	1,718	0	0,835	75
73	54	1,712	0	0,833	76
74	54	1,778	0	0,853	74
75	61	1,524	0	0,773	82
77	61	1,511	0	0,769	83
86	51	1,995	0	1,007	42
91	66	1,732	0	0,887	65
93	51	2,191	0	1,016	45
95	51	2,188	0	1,015	46
96	66	2,114	0	0,997	47
97	53	3,583	0	1,276	15
98	51	2,219	0	1,023	43
100	58	1,602	0	0,844	70
101	58	1,523	0	0,817	73
107	61	1,453	0	0,749	84
108	61	1,488	0	0,761	84
109	58	1,548	0	0,826	72
110	61	1,461	0	0,752	85
111	61	1,555	0	0,783	80
124	61	1,480	0	0,758	84
130	61	1,442	0	0,745	85
132	54	1,446	0	0,746	86
138	54	1,769	0	0,850	73

Los resultados mostraron una alta cantidad de unidades con condiciones de desarrollar deslizamientos superficiales en la situación sísmica asumida (Tabla 5.6). Se distribuyen en todo el escarpe costero siendo los sectores más elevados los con menor factor de seguridad lo que conlleva una alta probabilidad de generación de deslizamientos superficiales. Con respecto a la ruta A-16, ésta es afectada principalmente en el Norte y Centro de su emplazamiento.

5.3 Deslizamientos en roca

Los deslizamientos en roca se diferencian entre masivos o en bloque, la zona estudiada presenta rocas con alto nivel de fractura por lo tanto, todas las unidades que presentaron condiciones de susceptibilidad a deslizamientos de roca fueron analizadas con un enfoque de deslizamiento en bloque. Las condiciones de fracturamiento y calidad del macizo rocoso hacen poco factible la generación de deslizamientos rotacionales.

Se realizó un análisis cinemático para las cuatro zonas estructurales (datos obtenidos en la segunda fase de terreno) utilizando un ángulo de fricción (ϕ) de 40° , registrando un ángulo crítico para cada tipo de deslizamiento –planar, cuña o toppling- ver Anexo 5, en este modelo no se distingue entre situación sísmica o estática. Se obtuvieron rangos de pendientes a las cuales se les asignó una probabilidad de generación (Ver Tabla 5.8).

A modo de ejemplo (color gris en la Tabla 5.8), si alguna unidad geomorfológica presenta una zona estructural A con un tipo de deslizamiento planar y su pendiente representativa supera los 40° entonces tiene una alta probabilidad de generación de deslizamiento planar, si la pendiente está entre los 35° y 40° tendrá una probabilidad media y si está entre los 30 y 35° se le asignará una probabilidad baja, para la pendiente menor a 30° su probabilidad de generación será nula.

El análisis cinemático arrojó ángulos críticos de pendiente para cada zona estructural, todos estos ángulos supera los 40° , siendo las zonas A y B posibles generadoras de deslizamientos planares y en cuña, y las zonas C y D posibles generadoras de deslizamientos en toppling (Tabla 5.8).

Tabla 5.7 : Probabilidad de generación de deslizamientos en roca para cada zona estructural según el tipo de deslizamiento

Zona estructural	Tipo de deslizamiento	Ángulo crítico (°)	Variaciones de pendientes locales (°)	Probabilidad de generación
A	Deslizamiento plano	45	$30 < \beta < 35$	Baja
			$35 < \beta < 40$	Media
			$40 < \beta$	Alta
	Cuña	43	$28 < \beta < 33$	Baja
			$33 < \beta < 38$	Media
			$38 < \beta$	Alta
B	Deslizamiento plano y Cuña	42	$27 < \beta < 32$	Baja
			$32 < \beta < 37$	Media
			$37 < \beta$	Alta
C	Toppling	40	$25 < \beta < 30$	Baja
			$30 < \beta < 35$	Media
			$35 < \beta$	Alta
D	Toppling	60	$45 < \beta < 50$	Baja
			$50 < \beta < 55$	Media
			$55 < \beta$	Alta

Se procedió a determinar qué zonas estructurales son aplicables a cada unidad geomorfológica, y si estas unidades presentan pendientes representativas que cumplan las condiciones expuestas en la Tabla 5.7.

La tabla 5.8 muestra las probabilidades de generación asignadas a cada unidad geomorfológica, los distintos tipos de deslizamientos de roca en bloque posibles y la pendiente representativa de la unidad la cual cumplió con las condiciones cinemáticas. Además, presenta la zona estructural que domina la unidad.

Las unidades con mayor probabilidad de generación de deslizamientos en roca se presentaron principalmente en el sector centro y sur de la zona de estudio, el análisis en términos generales arrojó probabilidades bajas a media, por lo que a escala de la unidad existe probabilidad de generación de deslizamiento de roca en bloque.

Tabla 5.8 : Probabilidad de generación de deslizamiento en roca para cada unidad geomorfológica según el tipo de deslizamiento

Unidad	Pendiente media β (°)	Tipo de deslizamiento	Zona estructural	Probabilidad
28 - 33 -35	35	Plano y cuña	A y B	Media
110	34			
37 - 108 - 124	33			
111	32			
34	31			
36	30			
67	29			Baja
10	27			
1	35			
107 - 125 - 130 - 132	34	Toppling	C y D	Alta
3 - 27 - 29 -75 -77	33			Media
2 - 85 - 4	31			
71 - 73 - 133	29			Baja
49 - 72 - 74 - 134 138	28			
79	27			
26	25			

5.3.1 Zonas locales de deslizamiento de roca

Debido a la ruta A-16 y caminos que se presentan en la zona de estudio, existen taludes a nivel local de gran pendiente que condicionan a las unidades geomorfológicas, para evaluar de mejor forma este contexto se realizaron análisis locales de deslizamientos en bloques.

Estos análisis se desarrollaron en los Software's Rocplane y Swedge, los datos necesarios para la modelación se obtuvieron de la caracterización del macizo rocoso, lo que permitió mediante la literatura homologar parámetros geotécnicos para las discontinuidades presentes en la Formación Punta Barranco (Tabla 5.9), además la rugosidad de las discontinuidades obtenida en terreno determinó la variable "waviness" que se aplica en Rocplane, software para deslizamiento planar de roca. En el Anexo C.4 se muestra los análisis desarrollados a través de los Software's Rocplane y Swedge en los cuales se definió el talud y las discontinuidades representativas de cada zona estructural, obteniendo el factor de seguridad y la probabilidad de falla (tabla 5.10).

Tabla 5.9 : Parámetros geotécnicos para roca y su desviación estándar

	ϕ [°]	c [t/m ²]	Y [t/m ³]
Formación Punta Barranco	41	1,5	2,6
σ	2	0,5	-

Además se evaluó en los Software's una situación sísmica con shotcrete, esta situación se presenta en sectores de protección de la ruta A-16.

Tabla 5.10 : Factor de seguridad y Probabilidad de falla para taludes locales con y sin protección de shotcrete

Zona estructural	Tipo de deslizamiento	Situación Estática		Situación Sísmica		Situación Sísmica con shotcrete	
		FS	PF [%]	FS	PF [%]	FS	PF [%]
A	Deslizamiento plano	1,357	0	0,67	100	-	-
	Cuña	1,45	0	0,764	99,6	1,242	4,8
B	Deslizamiento plano	1,467	0	0,726	100	-	-
	Cuña	1,605	0	0,99	44,6	1,419	0
D	Cuña	2,013	0	1,124	10,8	1,384	0

Los resultados muestran que existe en sectores no protegidos por shotcrete una alta probabilidad de falla para las distintas zonas estructurales, mientras que los sectores con shotcrete se mitigan completamente estos efectos. La situación estática es completamente estable.

Tabla 5.11 : Probabilidad de generación de deslizamiento en bloque para taludes locales con o sin protección de shotcrete

Unidad	Tipo de deslizamiento	Tipo de taludes locales	Probabilidad
49 - 71	Toppling	Taludes locales con shotcrete	Nula
67 - 124	Plano y cuña		
2 - 3 - 4 - 27	Toppling	Taludes con y sin shotcrete	Alta
72 - 73 - 74 - 75			
77 - 79 - 107 - 125			
130 - 132 - 133 - 134			
28 - 48 - 96			
108 - 110 - 111	Plano y cuña		

5.4 Caídas de rocas

Las caídas de rocas siguen el mismo análisis de deslizamiento de roca en bloque, debido a que el principal generador de caídas de rocas es la Formación Punta Barraco, el análisis contempla un estudio cinemático a nivel de unidad geomorfológica como a nivel local, para el caso del estudio taludes locales. A estos resultados se le han agregado zonas locales de caídas de rocas registradas en terreno y sectores que presenten ángulos mayores a 30° que representen posibles zonas de caídas de rocas, esto se explica con mayor detalle en la metodología. Las unidades geomorfológicas que presentan estas condiciones son 14-15-48-50-51-53-55-62-63-64-66-70-78-81-82-83-106-118-119-122-135-139. Se presentan los datos en detalle en el anexo C.5.

6. Alcance de las remociones en masa

6.1 Deslizamientos rotacionales de suelo (profundos)

El alcance para este tipo de remoción en masa se estimó mediante el volumen deslizado y criterios geomorfológicos, los volúmenes se obtuvieron mediante el peso del material deslizado obtenido en el programa SLIDE y su densidad.

Tabla 6.1 : Volúmenes deslizados en un escenario sísmico

Unidad	Volumen deslizado [m ³]	Unidad	Volumen deslizado [m ³]
50	523	83	22
51	175	118	459
53	284	119	27
54	152	122	1342
55	1376	123	1476
66	88	129	359
81	37	139	77
82	24		

El material deslizado cubrirá según lo analizado un gran parte de la ruta A-16, principalmente la parte sur de la ruta, ver Anexo C.2.

6.2 Deslizamientos de suelo traslacional (superficial)

Para este caso se utilizó el modelo de ladera infinita, la pendiente crítica que se muestra en la Tabla 6.2 se obtuvo mediante el factor de seguridad, pendientes mayores a la pendiente crítica generan factores de seguridad menores a 1, otorgando una situación inestable. Por lo tanto, zonas dentro de la unidad que presente pendientes menores a la crítica son sectores de alcance de deslizamientos, ver Anexo C.4.

Tabla 6.2 : Pendientes críticas de alcance para deslizamientos traslacionales en un escenario sísmico

Unidad	Pendiente crítica	Unidad	Pendiente crítica	Unidad	Pendiente crítica	Unidad	Pendiente crítica
14	28	48	20	75	20	101	24
15	28	49	20	77	20	107	20
27	20	58	24	86	28	108	20
28	20	59	24	91	24	109	24
29	20	67	20	93	24	110	20
32	28	68	28	95	24	111	20
40	24	70	28	96	24	124	20
43	24	71	20	97	24	130	20
46	24	73	20	98	24	132	20
47	24	74	20	100	24	138	20

6.3 Deslizamiento de roca en bloque

El alcance asociado a deslizamiento de roca en bloque fue determinado no más allá de la zona de generación, debido a que las mayores probabilidades de generación se presentan en taludes locales los cuales contienen en su pie zonas con pendiente baja, lo que entrega estabilidad para contener el movimiento de la remoción.

6.4 Caídas de rocas

Esta etapa se realizó mediante el software Rocfall y criterios de ángulos para alcance de caídas de rocas, el cual fue modificado debido a los antecedentes de caídas de rocas obtenidos en terreno. Los resultados mostraron una gran cantidad de unidades geomorfológicas con una alta probabilidad de alcance, estas probabilidades mostraron que el alcance no sólo abarca el nivel local sino que también a la unidad en su conjunto, debido a las altas pendientes que cubren gran parte de la zona de estudio. La modelación de las caídas de rocas en Rocfall constó de los datos que se muestran en la Tabla 6.3 que caracterizan las rocas y la Tabla 6.4 muestra las características del relieve. El alcance de caídas de rocas afecta específicamente a la sector central y sur de la ruta A-16, lo que genera un alto grado de peligro en esas zonas. Además para el escenario sísmico asumido se determinó el alcance y la energía cinética que produciría dicho alcance con velocidad inicial horizontal de 3,92 m/s y vertical de 2,65 m/s. Los resultados entregaron que las caídas de rocas presentan recorridos que afectan directamente la ruta A-16 con energía cinética entre 6000 y 15000 J (Ver Anexo C.5),

Tabla 6.3 : Datos utilizados para caídas de rocas en Rocfall

Volumen [m3]	0,064
Peso [Kg]	166,4
Densidad [Kg/m3]	2600
Velocidad inicial horizontal [m/s]	3,92
Velocidad inicial vertical [m/s]	2,65

Tabla 6.4 : Coeficientes de restitución empleados en la modelación de Rocfall

	Restitución Normal	Restitución Tangencial
Carretera (ruta A-16)	0,400	0,900
Suelo	0,393	0,567
Shotcrete	0,453	0,737
Talud cubierto	0,320	0,820
Afloramiento de roca	0,350	0,850

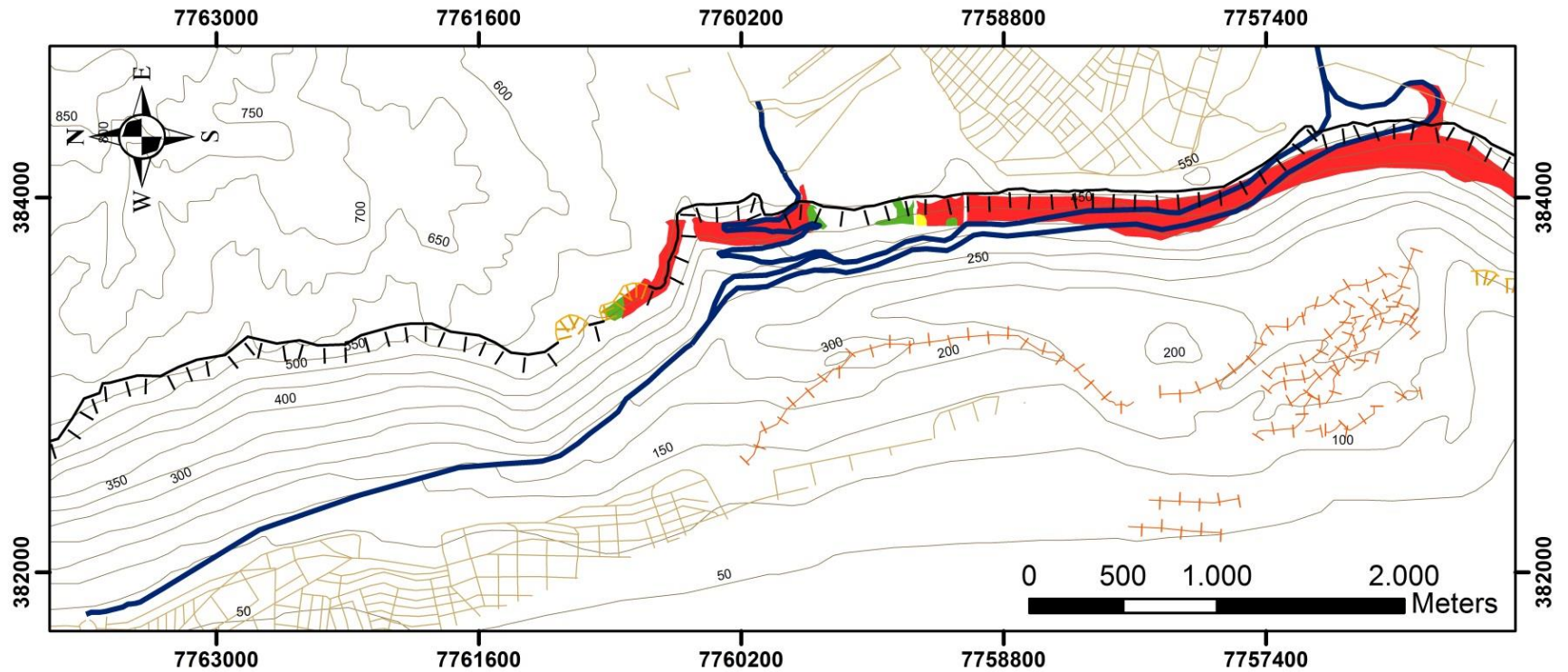
7. Peligro

El peligro de remociones en masa se obtuvo mediante la combinación de la probabilidad de falla y el alcance de la posible remoción. Se realizó un mapa de peligro para cada tipo de remoción en masa en el escenario sísmico asumido, caracterizado por aceleraciones horizontales (0,4 g) y verticales (0,27 g) que buscan modelar un terremoto de magnitud mayor a 8.

Se observa que los grados medios y altos de peligro de deslizamientos de suelos profundos (Ilustración 7.1) se concentran en la parte sur del escarpe costero, afectando directamente a la parte superior de la ruta Zig-Zag –ruta alternativa- y el sector sur de la ruta A-16. El sector norte del escarpe costero presenta una zona de peligro nulo en términos de deslizamientos profundos (rotacionales). Por otro lado, el peligro de deslizamiento de suelo superficial (Ilustración 7.2) se distribuye a lo largo de todo el escarpe costero, en el norte y centro de la zona de estudio, el peligro disminuye a medida que la cota de curvas de nivel baja, en la zona del ZigZag y sur de ella, el peligro de deslizamientos superficiales se mantiene alto, este tipo de remoción en masa es la única que afecta el sector norte de la ruta A-16.

Para el caso de deslizamiento de roca en bloque (Ilustración 7.3), en términos generales, los grados de peligro son entre bajo y medio. Los de grado medio se distribuyen en toda la zona, mientras que los grados bajos de peligro se concentran desde el ZigZag al sur, existen zonas de alto peligro principalmente en sectores localizados producto de taludes generados por factores antrópicos como la ruta que conecta Iquique con Alto Hospicio u otras.

Las caídas de rocas son el principal tipo de remoción que afecta a la zona, por lo que presenta una gran cantidad de unidades geomorfológicas con alto peligro (Ilustración 7.4). Estas unidades de alto peligro se distribuyen por toda la zona de estudio y afecta sectores importantes de la ruta A-16, esto debido a que el sector presenta altas pendientes y sectores de desestabilización de laderas en donde se exponen alimentadores de caídas de rocas los que se gatillan mediante un escenario sísmico como el que se ha asumido.



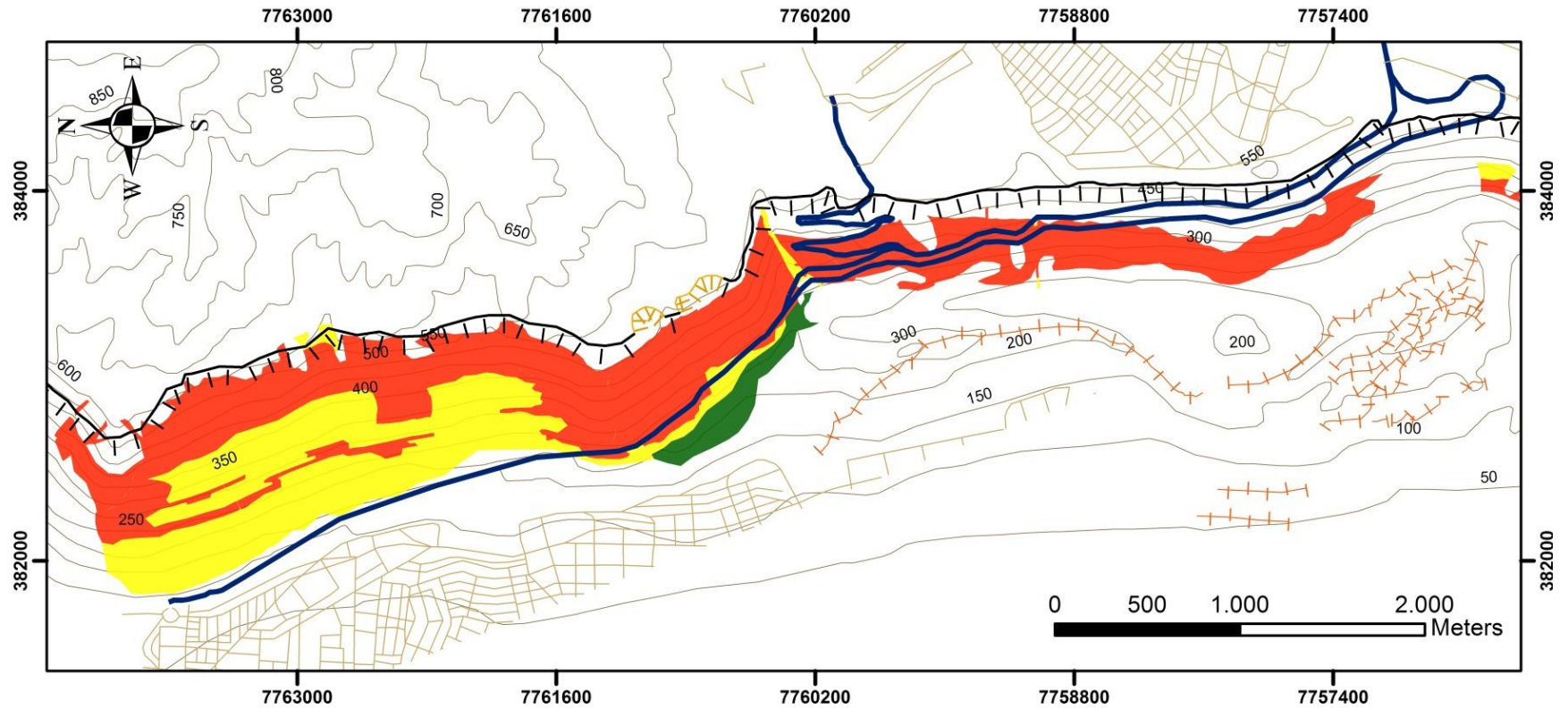
Leyenda

- +—+— Cresta de Duna
- ||—||— Escarpe de Canteras y Aridos
- |—|—|— Gran Escarpe Costero
- Carretera
- Camino Pavimentado
- Curvas de nivel cada 50m

Grado de Peligro (Deslizamiento Rotacional)

- Bajo
- Medio
- Alto

Ilustración 7.1 : Mapa de Peligro de deslizamiento de suelo rotacional. Escenario sísmico



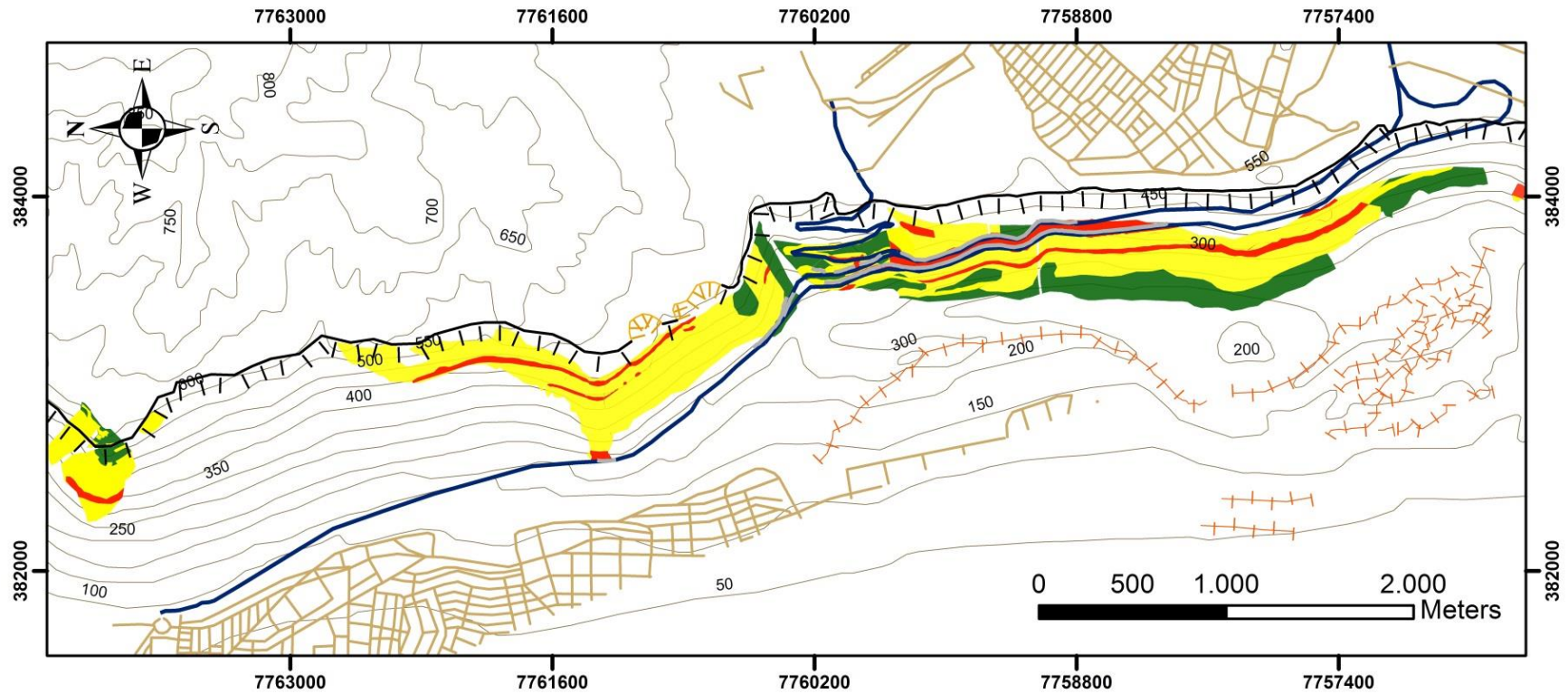
Leyenda

- +—+— Cresta de Duna
- ||||| Escarpe de Canteras y Aridos
- TTT Gran Escarpe Costero
- Curvas de nivel cada 50m
- Carretera
- Camino Pavimentado

Grado de Peligro

- Bajo
- Medio
- Alto

Ilustración 7.2 : Mapa de Peligro de deslizamiento de suelo traslacional, Escenario sísmico.



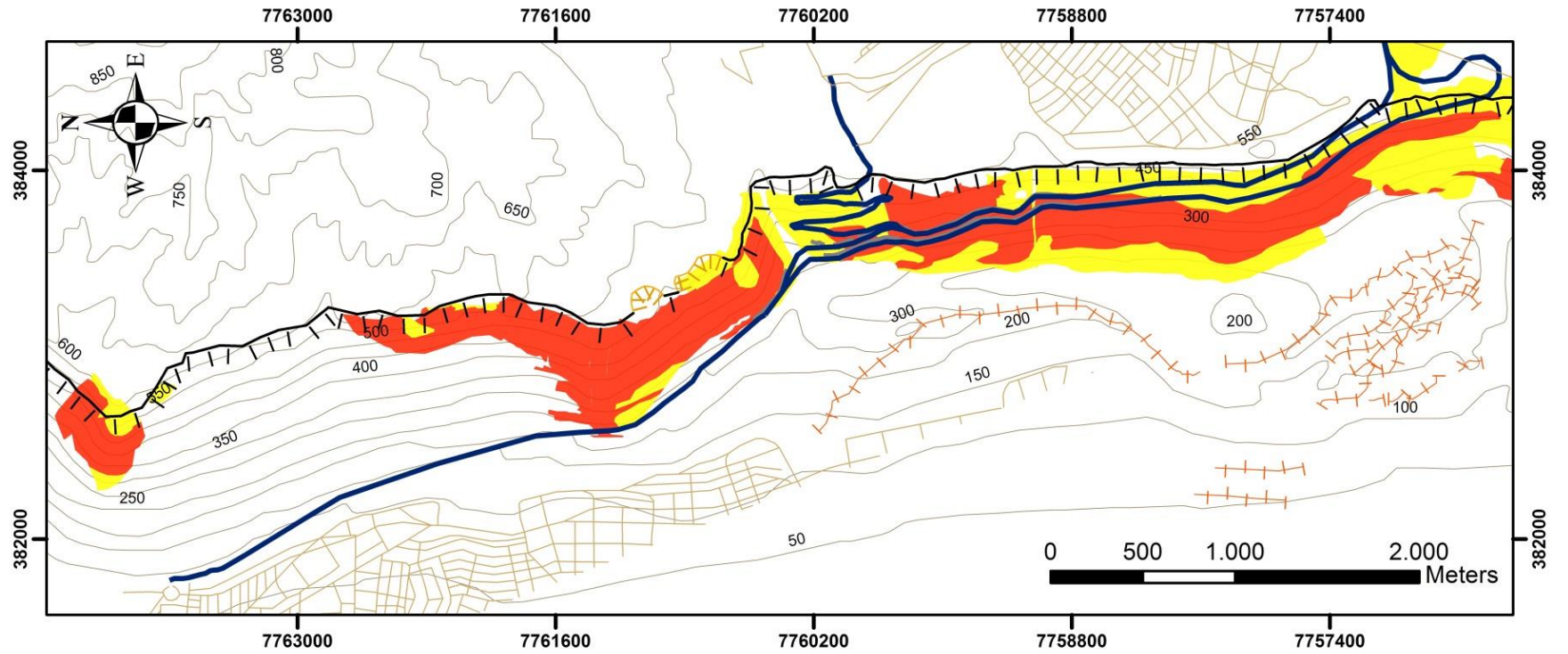
Leyenda

- +— Cresta de Duna
- ||||| Escarpe de Canteras y Aridos
- ||| Gran Escarpe Costero
- Carretera
- Camino Pavimentado
- Shotcrete - malla
- Curvas de nivel cada 50m

Grado de Peligro

- Bajo
- Medio
- Alto

Ilustración 7.3 : Mapa de Peligro de deslizamiento de roca en bloque.



Leyenda

- +—+— Cresta de Duna
- ||||| Escarpe de Canteras y Aridos
- ||| Gran Escarpe Costero
- Carretera
- Camino Pavimentado
- Shotcrete - malla
- Curvas de nivel cada 50m

Grado de Peligro

- Medio
- Alto

Ilustración 7.4 : Mapa de Peligro de caídas de rocas, Escenario sísmico.

8. Discusiones

8.1 Respecto a la metodología

La metodología constó de dos etapas fundamentales, una de ellas es la determinación de zonas de susceptibilidad de remociones en masa y la otra es la evaluación de peligro para cada tipo de remoción en masa. Estas etapas pueden ser divididas en términos de objetivos del trabajo a realizar, por lo que para determinar las zonas de susceptibilidad se necesitó información global como la geología básica, estructuras mayores y condiciones climáticas, en cambio para evaluar el peligro se necesitó información en detalle de cada unidad a estudiar como relieve representativo y estructuras menores que afecten al material. Esto se verificó directamente en los dos terrenos que propuso la metodología, la fase I de terreno busca un enfoque global de la zona de estudio como caracterización de la geología, en tanto la fase II de terreno busca caracterizar en detalle las estructuras que determinan la probabilidad de falla, parte fundamental para la evaluación del peligro geológico.

Para realizar el mapa de susceptibilidad de cada remoción en masa se necesitó definir unidades, las cuales presentan en común características geomorfológicas (pendientes, orientación de laderas) y características geológicas (tipo de material o tipo de depósito). Se definieron 139 unidades geomorfológicas a una escala de 1:20000 las cuales agilizaron la aplicación de las tablas de susceptibilidad y los distintos Software's para la obtención de probabilidad de falla.

Las tablas de puntuación para la evaluación de susceptibilidad de remoción en masa (Tabla 1.2, 1.4 y 1.6) se definieron mediante la recopilación bibliográfica y experiencia en el trabajo sobre peligro geológico de Sepúlveda (1998) y Lara (2007), siendo modificadas para objetos del estudio por lo observado en terreno. La modificación constó en aumentar la ponderación para las condicionantes de geomorfología, geología, geotecnia, desestabilización de laderas y antecedentes previos suprimiendo condicionantes de clima y vegetación debido a la nula vegetación presente y la poca variabilidad climática de la zona, ya que no se presentan lluvias y/o tormentas.

Se determinó a $IS=50$ como índice de susceptibilidad crítico, mediante la ponderación de los más importantes factores condicionantes (geomorfología, geotecnia y geología, factor antrópico) y a la calibración con remociones en masa ya declaradas. Si bien los factores condicionantes más importantes presentaban sumatorias mayores a 50 en unidades que

mostraban caídas de rocas y deslizamientos de suelo superficial previos, también existen unidades geomorfológicas con índices de susceptibilidad en torno a 50 que no presentan remociones declaradas pero podrían desencadenar remociones en un sismo de gran magnitud, por esto se decidió mantener como valor crítico el valor 50 y no aumentarlo.

La evaluación de peligro para todos los tipos de remociones en masa, fue realizada en un escenario sísmico asumido asociándolo a aceleraciones registradas en los últimos grandes terremotos que afectaron a la zona (terremotos de magnitud 7.7 y 7.9, Tocopilla y Tarapacá respectivamente) y a valores entregados por la Norma Chilena de Sismicidad. Aunque estos valores son conservadores con respecto al terremoto pronosticado para la zona norte de Chile que liberaría la laguna sísmica (terremoto de magnitud 8.8 y 8.7 como los ocurridos en 1868 y 1877), por lo que el estudio no se encuentra en el peor caso debido a que no hay registros de aceleraciones verticales y horizontales para esa magnitud en la zona. Además en el caso de caídas de rocas se determinaron velocidades iniciales que adquirirían componente vertical y horizontal. El escenario asumido comprende una componente vertical de aceleración 0,27 g la cual en 1s de tiempo de aceleración entregó una velocidad de 2,65m/s, para el caso de la componente horizontal la aceleración es de 0,4 g lo que entregó una velocidad de 3.92m/s, estas velocidades fueron aplicadas en el software Rocfall para determinar el recorrido de las caídas de rocas. El escenario asumido comparado con el último gran Terremoto que sacudió a Chile (Terremoto del Maule de magnitud 8.7) sería cercano a un 40% en términos de ponderación de aceleraciones, lo que es concordante con lo que se aplica generalmente en este tipo de estudios en donde se utiliza un porcentaje entre 40-50% de las aceleraciones más altas.

La obtención de información sobre la geotecnia de los materiales y una mayor definición de las pendientes en las que se emplazan le otorgan al estudio un enfoque cuantitativo. Se decidió realizar un exhaustiva recopilación de material en este sentido ya que el presupuesto con que constaba el estudio no resistía una vía independiente de tomas de muestras y ensayos de laboratorio pertinentes, la información recopilada fue principalmente a través de estudios geotécnicos realizados por el Idiem en la zona. Se realizó el mapeo estructural en detalle en donde se podía acceder mediante caminos y rutas, no pudiendo desarrollarse en sectores de poca accesibilidad debido al alto flujo de vehículos a gran velocidad que habitualmente mantiene la ruta A-16 y a la prohibición de acceso a la ruta ZigZag por remodelación, por lo que el mapeo está bien ejecutado principalmente en la zona centro-norte de la zona de estudio. Debido a lo anterior la obtención de probabilidades de falla para unidades que no fueron caracterizadas apropiadamente fueron extrapoladas mediante criterios geológicos-

geomorfológicos y ubicación espacial de parámetros de otras unidades o parámetros promedios. La falta de datos de ensayos específicos para la zona, como la resistencia en las discontinuidades del macizo rocoso y la resistencia del suelo, son las principales limitante para determinar satisfactoriamente la probabilidad de falla en cada caso, el otro limitante es la topografía de las unidades debido a las herramientas disponibles, se proyectaron pendientes en base a un relieve con cotas de nivel cada 10m (modelo de pendientes desarrollado en ArcGis), y para taludes locales principalmente generados por efectos antrópicos se definieron mediante el trabajo en terreno e imágenes satelitales.

La relación entre probabilidades numéricas y cuantitativas de generación de remociones en masa expresadas en la metodología (Tabla 1.7) se argumenta por la equivalencia que tienen las probabilidades cercanas al 50% con los factores de seguridad cercanos a 1 que indican el “borde” de la estabilidad siendo estos dos factores inversamente proporcionales: a medida que aumenta la probabilidad de generación de remoción por sobre el 50%, disminuye el factor de seguridad haciéndolo menos estable y viceversa, esto nos indica que probabilidades que superan el 50% presentan una alto grado de generación de remociones.

Se decidió realizar estudios locales para deslizamientos en bloque y caídas de roca debido a taludes generados por la construcción de caminos para la industria de extracción de áridos, por la ruta A-16 y por la ruta ZigZag, camino alternativo para llegar desde Iquique a Alto Hospicio. Estos estudios están suscritos a ciertos criterios cinemáticos de deslizamiento, donde se obtuvieron ángulos de taludes críticos asociados a cada zona estructural definida en el mapeo estructural de detalle (Tabla 1.8), para el caso de caídas de rocas se asociaron pendientes críticas basadas en la bibliografía existente, Keefer (1984) (Tabla 1.9). Este último caso fue modificado debido a las condiciones observadas en terreno, ya que el escenario sísmico asumido es más agresivo que el propuesto en las relaciones de probabilidad de generación de caídas y pendientes de laderas tomados de la metodología de Lara (2007).

La metodología aplicada evalúa el peligro de remociones en masa en la zona, dicha evaluación es base para una realización de proyectos de ordenamiento territorial, urbanización y mitigación de daños en obras civiles, por lo que se hizo un especial énfasis en los estudios locales para deslizamientos en bloque y caídas de roca, y con esto se intentó adecuarla y ser una efectiva base de estudio para el posible riesgo que tengan tanto las obras públicas de la ciudad de Iquique como su vía acceso.

8.2 Respecto a las áreas de peligro

Como primera etapa del estudio se realizó una evaluación de susceptibilidad a escala de las unidades geomorfológicas definidas, es importante señalar que algunas unidades presentan antecedentes de remociones pero estas son muy puntuales y no son representativas de la unidad geomorfológica por lo que no se tomaron en cuenta como unidades susceptibles a remociones en masa.

Otro de los aspectos fundamentales de estudio es el puntaje de corte del índice de susceptibilidad que se estimó en 50, se realizó para cada unidad una comparación entre el índice de susceptibilidad y el peligro asociado a la unidad. A continuación se presentan las comparaciones para cada tipo de remoción en masa evaluadas.

Para deslizamientos en suelos rotacionales se pudo observar que todas las unidades susceptibles presentan peligro, aunque la mayor parte de las unidades con IS mayor a 55 presentan alto peligro de deslizamiento, el peligro bajo se concentra en unidades con IS entre 50-55 siendo una excepción la unidad 50 que presenta un IS=65, por lo tanto el umbral de IS es aplicable a este tipo de remoción en masa. Si el IS crítico fuera mayor a 50 se perderían unidades que presentan bajo peligro y si este fuera menor a 50 probablemente se agregarían unidades con peligro casi nulo o simplemente nulo.

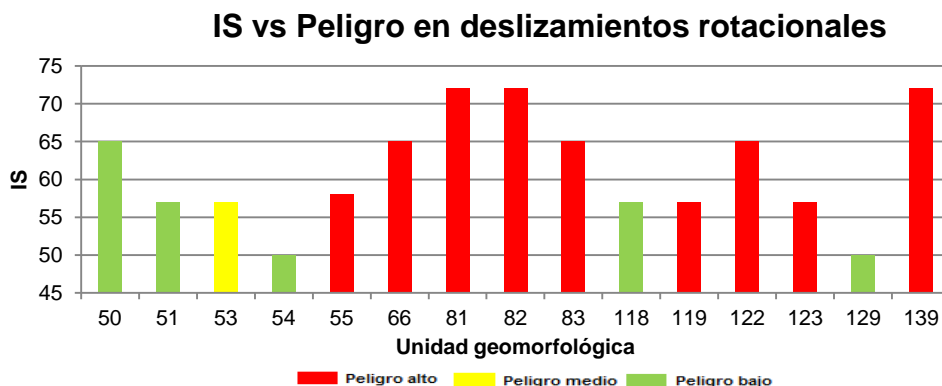


Ilustración 8.1 : Relación entre IS y Peligro para deslizamientos de suelo rotacional

En deslizamientos traslacionales de suelo se observó una gran cantidad de unidades susceptibles y una gran parte de ellas presentan un alto peligro de deslizamiento, la mayor parte de unidades que bordean el IS crítico presentan peligro medio y bajo, por lo tanto es probable que si IS crítico fuera mayor, quedaría una gran cantidad de unidades de alto peligro de deslizamiento dejando fuera peligros medios. En cambio si el IS crítico baja existe una alta probabilidad que se sumen unidades con peligros medios y bajos, aunque por la tendencia

mostrada presentarían menos unidades con peligro nulo en comparación con deslizamientos profundos, lo que nos lleva a sugerir que el valor crítico del IS es más sensible en deslizamientos superficiales que profundos. Esto último es el resultado de la variabilidad de sus factores condicionantes, para el caso de deslizamientos de suelo profundo existe sólo un tipo de material (Gravas de Alto Hospicio), mientras que para deslizamientos de suelo superficial contempla varios tipos de depósitos (eólico, coluvial, aluvial, etc.), a esto se agrega que los deslizamientos de suelo superficial se distribuyen en toda el área de la zona de estudio por lo que se evalúan distintos tipo de pendientes, no así en deslizamientos de suelo profundo que se concentran en el sector Sur con una alta pendiente pero poco variable.

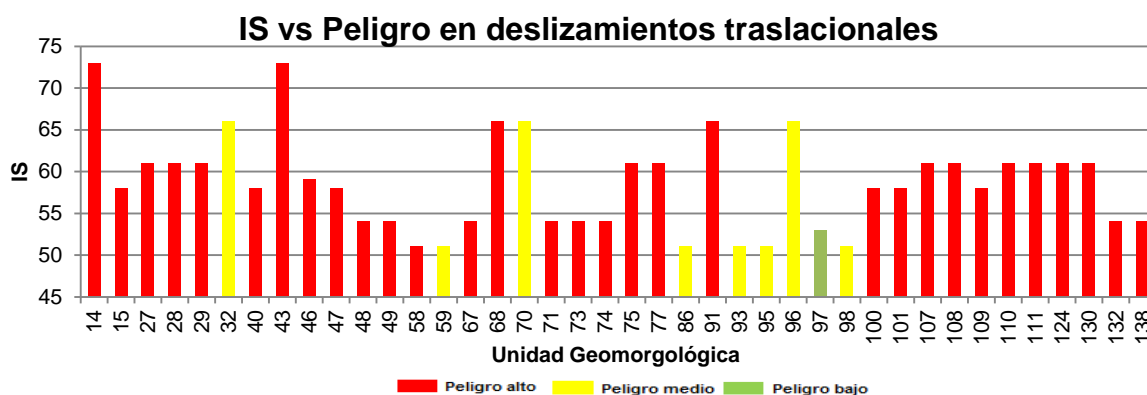


Ilustración 8.2 : Relación entre IS y Peligro para deslizamientos de suelo traslacional

Según los resultados existe un 36% de un total de 139 unidades (Ilustración 8.3) que presentaron IS menor que 50 para deslizamientos de suelo tanto superficial como profundo, las cuales no fueron analizadas en términos de peligro por el umbral impuesto. Por lo expuesto anteriormente y las complicaciones del IS crítico, este porcentaje de unidades podrían presentar algún grado de peligro, principalmente si estas unidades presentaran características de deslizamiento superficial.

Distribución de unidades con respecto al IS para deslizamientos en suelo

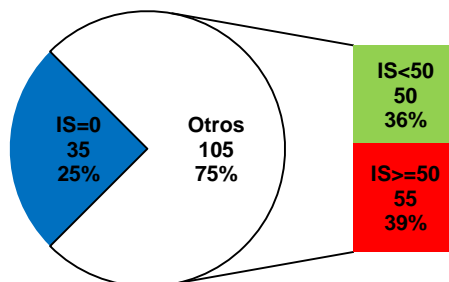


Ilustración 8.3 : Distribución de IS en deslizamientos de suelo

Para deslizamientos de roca en bloque se observó que todas las unidades susceptibles muestran peligro medio o bajo salvo la unidad 1 que por su pendiente representativa cumple completamente los criterios cinemáticos asociados a la evaluación de probabilidad de falla aunque no presenta deslizamientos declarados ni factores antrópicos que otorgaran un IS más alto, por lo tanto, las unidades con alto IS son principalmente por el factor antrópico (cambios abruptos de pendientes debido caminos alternativos y la ruta A-16). Estudios de peligro local mostraron que gran cantidad de estas unidades presentan taludes locales que cumplen con los criterios cinemáticos, pero a escala de la unidad el peligro es medio o bajo. Para este caso el IS crítico es bastante sensible, al aumentarlo suprimiría la única unidad que presenta un alto peligro, si disminuyera es posible que se sumen unidades con peligro nulo y bajo ya que los peligros medios presentan IS superior a 50.

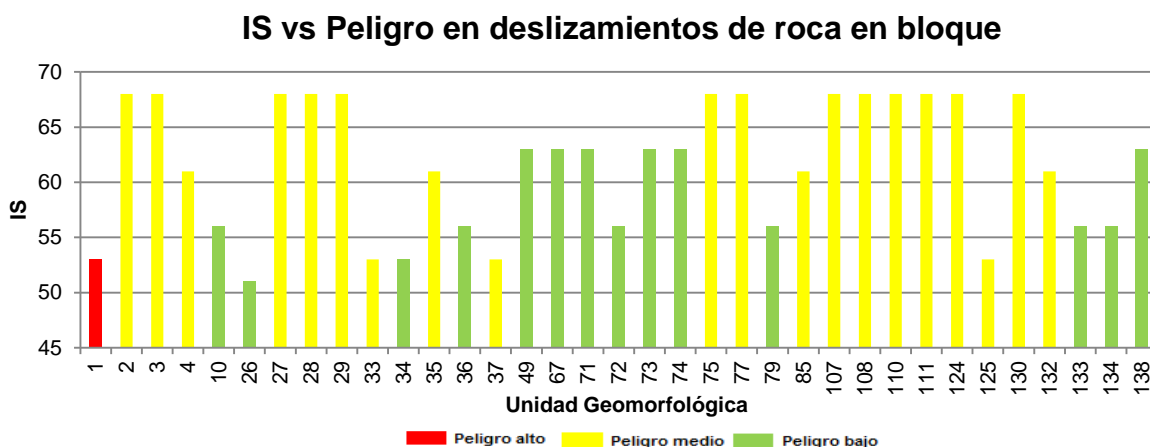


Ilustración 8.4 : Relación entre IS y Peligro para deslizamientos de roca en bloque

Distribución de unidades con respecto al IS para deslizamientos de roca en bloque

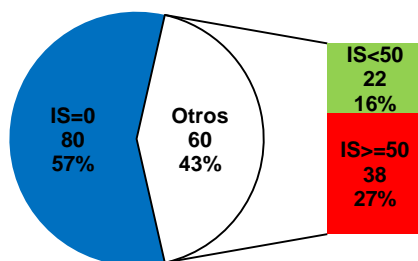


Ilustración 8.5 : Distribución de IS en deslizamientos de roca en bloque

De las unidades presentes en el área de estudio sólo un 27% de ellas cumplen los criterios de susceptibilidad para deslizamientos de roca en bloque, en tanto un 16% presentan condiciones susceptibles para este tipo de remoción en masa pero con valores menores al umbral.

impuesto (IS=50) por lo que fueron descartados (Ilustración 8.5). Es posible que algunas de ellas presenten peligro aunque este sólo fuese de grado bajo, esto nos indica que el umbral impuesto es satisfactorio para el contexto geológico de la zona.

En el caso de caídas de roca, las unidades susceptibles presentaron una distribución equitativa tanto en peligro alto como medio (Ilustración 8.6), este tipo de remoción mostró la mayor cantidad de unidades de alto peligro geológico debido a que su alcance es preponderante a la hora de evaluarlo, es posible que para este caso el umbral de IS debiera ser menor ya que unidades con IS=50 presentaron un alto peligro de caída de roca, esto corresponde a que existen pendientes representativas de la unidad o pendientes locales propias de la unidad que propician caídas de rocas. Se debiera hacer un estudio de generación y alcance de caídas de roca en las unidades que presentan índice de susceptibilidad entre 30 y 50.

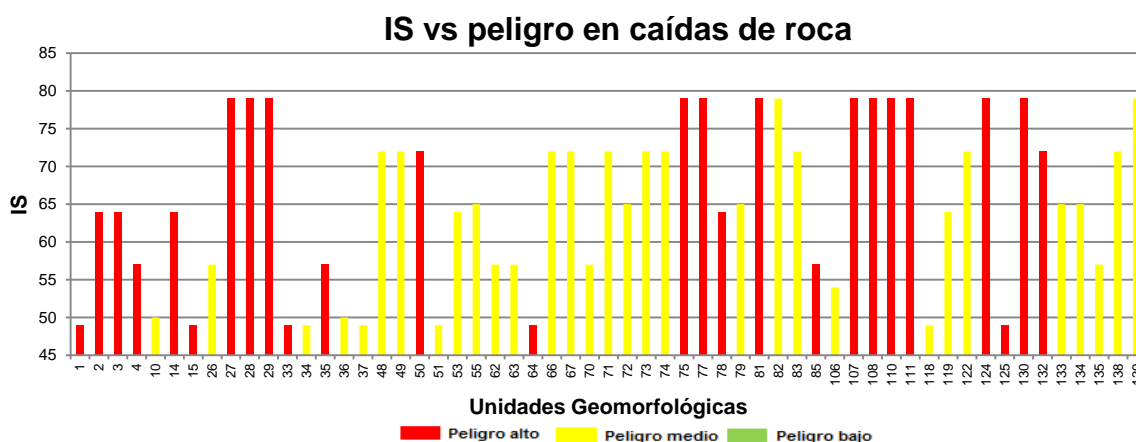


Ilustración 8.6 : Relación entre IS y Peligro para caídas de roca

Distribución de unidades con respecto al IS para caídas de roca

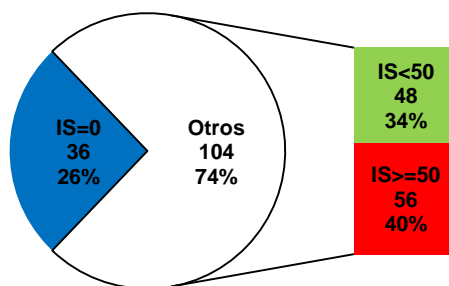


Ilustración 8.7 : Distribución de IS en caídas de roca

Existe un 34% de todas las unidades geomorfológicas que presentan un IS de caídas de roca menor a 50 que podrían presentar peligro, debido a lo expuesto anteriormente con respecto al umbral del IS para caídas de rocas. Este tipo de remoción en masa es la que se desencadenaría con mayor frecuencia puesto que presenta la mayor cantidad de unidades con peligro alto y medio.

Las comparaciones realizadas entre IS y el peligro además del análisis de IS crítico fueran realizadas en un contexto sísmico de gran magnitud y no es comparable con otros contextos y zonas.

Para el caso de caídas de rocas se realizó un enfoque particular, el cual consistió en obtener mediante el software Rocfall el recorrido y energía que contienen las posibles rocas caídas. Se contemplaron rocas de 166 Kg (Volumen = $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$) que fueran desestabilizadas por velocidades iniciales provocadas por el escenario sísmico asumido. Se definieron nueve perfiles (Ilustración 8.9 los demás perfiles se encuentran en el Anexo 7) que cubren el área de mayor peligro de caídas de roca y que afectan a la ruta A-16. Esta ruta contempla en algunos sectores mitigación para deslizamientos de bloques y caídas de roca, aunque si bien por los estudios realizados el shotcrete y malla puesto en los taludes mitiga completamente los deslizamientos en bloques y en parte las caídas de rocas, en la ruta no existe mitigación para deslizamientos de suelo superficiales y profundos.

Las caídas de rocas presentan recorridos que afectan directamente la ruta A-16 con energía cinética entre 6000 y 15000 J. Algunos perfiles presentan cercas que en la modelación (Rocfall - caso hipotético) protegen a la ruta A-16, lo cual es incierto puesto que las características de las cercas y mallas (modeladas) no son comparables a la realidad, ya que no existen mayores detalles de cuál es la resistencia de ellas, además, estas obras de protección son rígidas y no dinámicas por lo que no se adecúan a las distintas energías que tengan las rocas en caída.

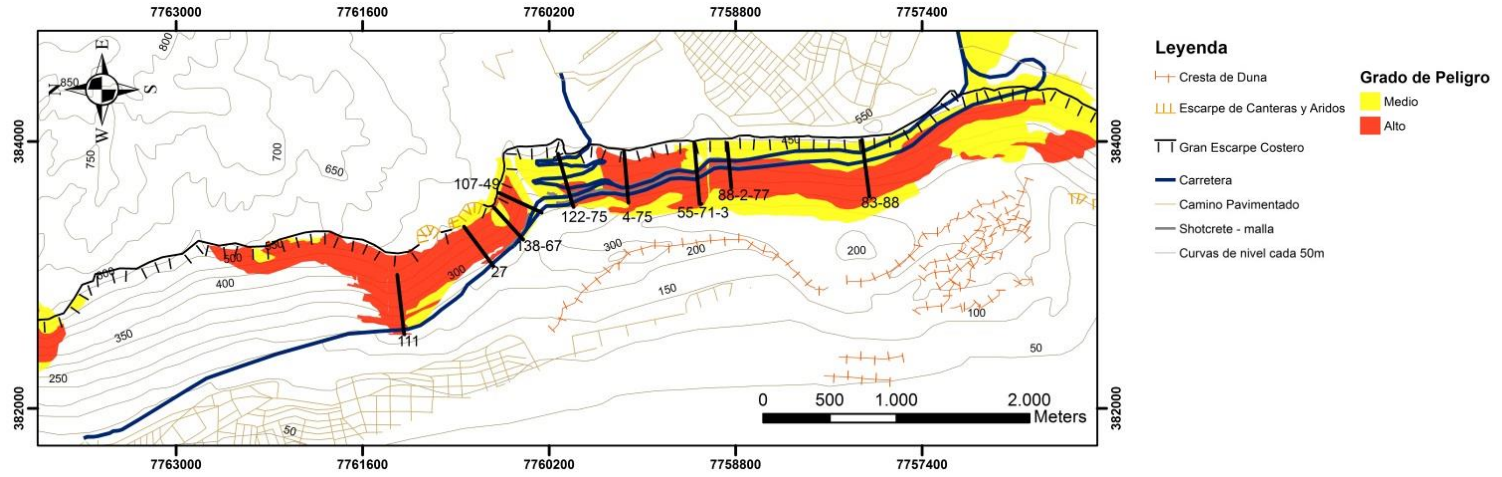


Ilustración 8.8 : Disposición de los perfiles (generación, alcance y energía) en el mapa de Peligro de caídas de rocas.

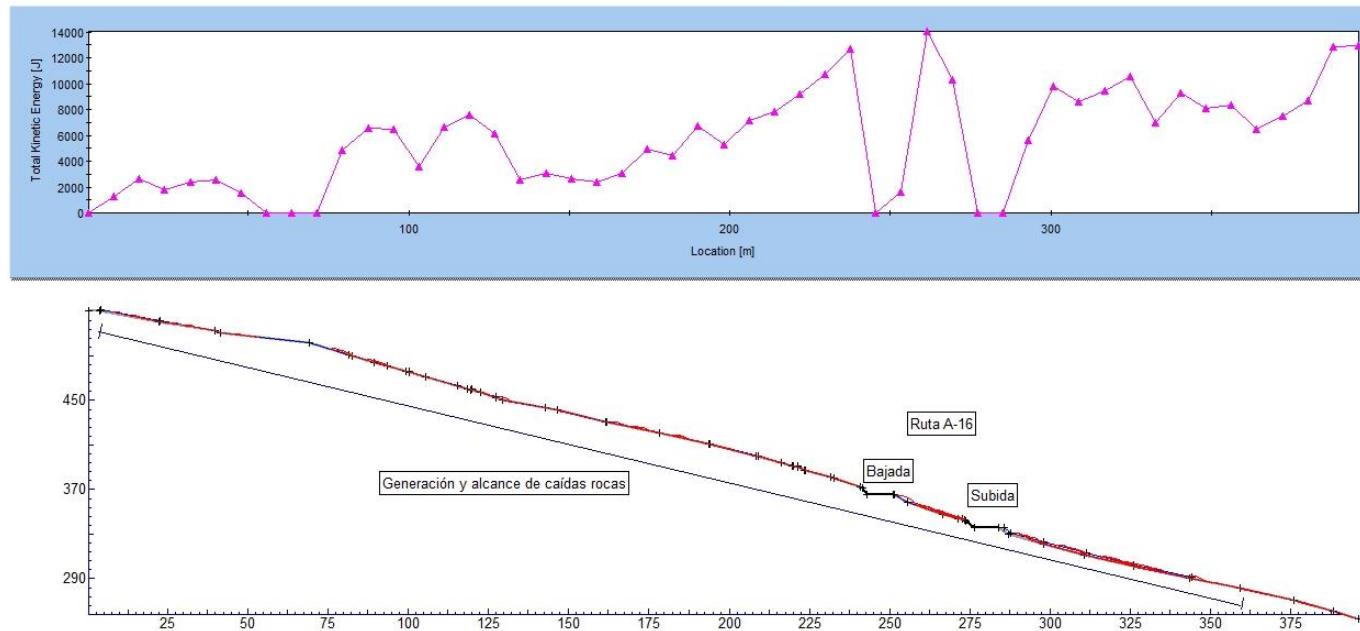


Ilustración 8.9 : Perfil (Abajo: generación y alcance, Arriba: energía) de las unidades geomorfológicas 4 y 75. En el anexo 7 se muestran todos los perfiles (En azul se presenta la generación y en rojo el alcance)

9. Conclusiones

Los factores más influyentes en la evaluación de susceptibilidad de remociones en masa son: geomorfología, características geológicas-geotécnicas y la desestabilización de laderas. En cuanto a la geomorfología, presenta altas pendientes que se distribuyen por todo el escarpe costero. Las características geológicas-geotécnicas en el caso de deslizamiento de roca en bloque, presentan estructuras menores desarrollando sets estructurales que satisfacen los criterios cinemáticos de deslizamiento y para el caso de deslizamientos en suelo la granulometría y composición de los depósitos. La desestabilización de laderas a través de la construcción de caminos, en específico la ruta A-16 y el desarrollo de la industria de áridos que ha generado varias canteras de extracción en la zona, hacen a esta zona en particular susceptibles a remociones en masa.

Los antecedentes de caídas de rocas declaradas son la base de la determinación del alto peligro de caídas de rocas en casi toda la zona del estudio, asumiendo que estas caídas fueron desencadenadas por un evento de menor magnitud al que se espera.

La geología de la zona de estudio presenta unidades de suelo, algunas de ellas depósitos jóvenes que cubren unidades de mayor edad geológica como las Gravas de Alto Hospicio y la única unidad de roca la Formación Punta Barranco. La composición granulométrica de los distintos suelos y el contexto geomorfológico explican el alto peligro de deslizamientos de suelo. Los depósitos jóvenes no consolidados (eólico, coluvial, aluvial, etc.) son los que presentan un alto peligro de deslizamientos superficiales de suelo (traslacionales), mientras las Gravas de Alto Hospicio que tienen mayor consolidación (gran cantidad de sales) presentan un alto peligro de deslizamientos profundos de suelo (rotacionales).

El factor antrópico es fundamental para el estudio a escala local, el desarrollo de caminos y rutas de paso entre Iquique y Alto Hospicio, generan taludes de altas pendientes, superiores a las representativas de las unidades. Estas condiciones locales satisfacen los criterios cinemáticos para deslizamientos de roca en bloque, además son preponderantes para la obtención de altas probabilidades de falla en deslizamientos de suelo.

Las obras de mitigación desarrolladas en la ruta A-16 (Ilustración 7.3), disminuyen considerablemente el peligro de deslizamientos de roca en bloque y en menor medida las caídas de roca. Estas obras consisten en shotcrete y mallas instalados en taludes donde aflora roca, aunque no cubren todos los sectores en donde se presenta peligro de remociones en masa. Existen zonas de alto peligro para deslizamientos de suelo superficial y profundo que no

presentan medidas de mitigación, sobre todo en los extremos norte y sur de la zona de estudio, esto afectaría considerablemente la ruta A-16.

El peligro de caídas de rocas se distribuye en toda la ruta A-16, algunas unidades no todas presentan obras de mitigación, aunque no se determina si éstas supriman el daño a la ruta, puesto que el escenario sísmico que se ha impuesto para este estudio es más severo al que se ha enfrentado la zona en los últimos años, por lo que no se tiene certeza en la respuesta de las mallas y cercas, a la velocidad y energía que tendrían las rocas en un escenario sísmico de mayor magnitud.

Se recomienda una campaña de muestreo geotécnico en las unidades de suelo para definir de forma concreta cómo afecta la componente salina en la resistencia para los distintos suelos, tanto en los depósitos como en Las Gravas de Alto Hospicio ya que esto afecta directamente en la alta probabilidad de generación de deslizamientos profundos y superficiales en la zona, dicho esto los resultados obtenidos para estas unidades presentan un alta peligrosidad.

Se deben desarrollar medidas de mitigación para las zonas donde existe peligro de deslizamientos de suelo profundo, preferentemente el sur de la ruta ya que presenta taludes de considerable altura debido a la propia construcción de la ruta. Se debe mitigar el peligro de deslizamientos superficiales que se concentran en el sector norte de la ruta. Además se recomienda caracterizar con mayor detalle los distintos alimentadores de caídas de rocas en las zonas susceptibles a este tipo de remoción y desarrollar un catastro de las rocas de mayor tamaño que afectarían a la ruta A-16. En el contexto actual, la ruta ZigZag está ampliándose, por lo que es importante reevaluar el peligro en esta zona ya que el proyecto podría cambiar considerablemente algunos taludes y el relieve, generando desestabilización para posibles deslizamientos y caídas de rocas. Se está contemplando desarrollar otra vía de acceso complementaria, por lo que se debiera desarrollar un estudio con las mismas características para la viabilidad de la ruta debido al contexto sísmico en que se enmarca.

Además, en un contexto más global que abarque a la ciudad de Iquique. Es importante señalar que el plano de zonas de seguridad en un eventual terremoto, sólo contempla el daño producido por el tsunami y no contempla las posibles remociones en masa que se desencadenarían. Por lo tanto, se sugiere revisar detalladamente la zona de seguridad de la ciudad de Iquique, en específico el sector oriente de ella ya que este sector es el que presenta mayor peligro de remociones en masa.

10. Referencias

- Arabasz, W.J. 1971. Geological and geophysical studies of the Atacama Fault Zone in Northern Chile. Ph. D. Thesis (unpublished), California Institute of Technology: 275p., 10 mapas.
- Armijo, R., Thiele, R. (1990) Active faulting in northern Chile; ramp stacking and lateral decoupling along a subduction plate boundary? *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 98, no.
- Börgel, R. 1983. Geografía de Chile, Tomo II: Geomorfología. Instituto Geográfico Militar: 182 p. Santiago.
- Brügger, J. (1950) Fundamentos de la Geología de Chile. Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile.
- Campo J., Comte D. "Distribución espacio-temporal del régimen de esfuerzos en el sur del Perú y Norte de Chile. Evidencias de una etapa de madurez terminal de un ciclo sísmico". *Sextas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*. Santiago, Chile. 1990.
- Campos, J. and Comte, D.: 1989, Distribución Espacio-Temporal del Régimen de Esfuerzos en el Sur del Perú y Norte de Chile: Evidencias de una Etapa de Madurez Terminal de un Ciclo Sísmico, 5as. *Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Agosto, 1989 Vol. 1, pp. 291-302.
- Carrizo, D.; Olivares, V.; González, G.; Dunai T.; Jensen, A.; Cortés, J. 2006. Relación entre los cambios climáticos globales post-24Ma y el proceso de desecación del desierto de Atacama. *XI Congreso Geológico Chileno, Acta Vol. 2*, p. 171 -174.
- Cecioni, G.; García, F. 1960. Observaciones geológicas en la Cordillera de la Costa de Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas. *Boletín N°6*. 28p. Santiago.
- Comte, D., Eisenberg, A., Pardo, M., 1988. Sismicidad y riesgo sísmico en el margen occidental de Sudamérica, entre los 16° - 22° latitud sur. En: Universidad de Chile, *Actas del V Congreso Geológico Chileno, tomo II*, Santiago: F227-F246.
- Corominas Dulcet, J., y García Yagué A., 1997, Terminología de los movimientos de ladera, en *Memorias, IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Granada, España, p. 1051-1072.
- Cruden, D., 1991. A simple definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. No. 43, p. 27-29.

- Dorbath, L., Cisternas, A., and Dorbath, C.: 1990, Quantitative assessment of great earthquakes in
- Dunai, T.; González, G.; Juez-Larre, J. 2005. Oligocene–Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion-sensitive landforms. *Geology* 33 (4): 321-324.
- Fock, A.; Rauld, R.; Muñoz, M. 2010. Estudio Fundado de Riesgo: Diagnóstico de Peligros Geológicos Costeros de la Intercomuna de Iquique, Alto Hospicio y Huara. Región de Tarapacá. Habiterra S.A
- Fuenzalida, H. 1966. Climatología. In *Geografía económica de Chile*, Primer apéndice, Corporación de Fomento de la Producción, p. 98-152.
- Hauser, A., 1993. Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 45, p. 7-29.
- Hauser, A., 1997. Los aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta: Un análisis crítico a cinco años del desastre. Boletín N° 49. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Idiem., 2010. Estudio de Mecánica de Suelos – Lineamientos para determinación de Colapsabilidad de Suelos Salinos por Disolución de Sales. Informe N° 612685 –A.
- Jacoby, D., 2001. Vulnerabilidad del sector urbano de La Reina frente a desbordes de la Quebrada de Ramón. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Kausel E.; Pardo, M.; Bannister, J.; Barrientos, S.; Alvear, L. 1985. Datos de hipocentros e intensidades, Chile. *In* Catálogo de terremotos para América del Sur (Askew, B.L.; Algermissen, S.T.; editor). Centro Regional de Sismología para América del Sur, Editorial Tarea, 5: 172 p. Lima.
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 95, p. 406-421.
- Lambe, W., Whitman, R., 1972. Mecánica de suelos. Instituto Tecnológico de Massachusetts, Editorial Limusa-Wiley S.A., 583 p.
- Lara, M., 2007. Metodología para la Evaluación y Zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, Mención Geología. Departamento de Geología. Universidad de Chile.
- Marquardt, C.; Marinovic, N.; Muñoz, V. 2008. Geología de las Ciudades de Iquique y Alto Hospicio, Región de Tarapacá. Escala 1:25.000. Servicio Nacional de Geología y

Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 133, 33 p., 1 mapa escala 1:25.000. Santiago.

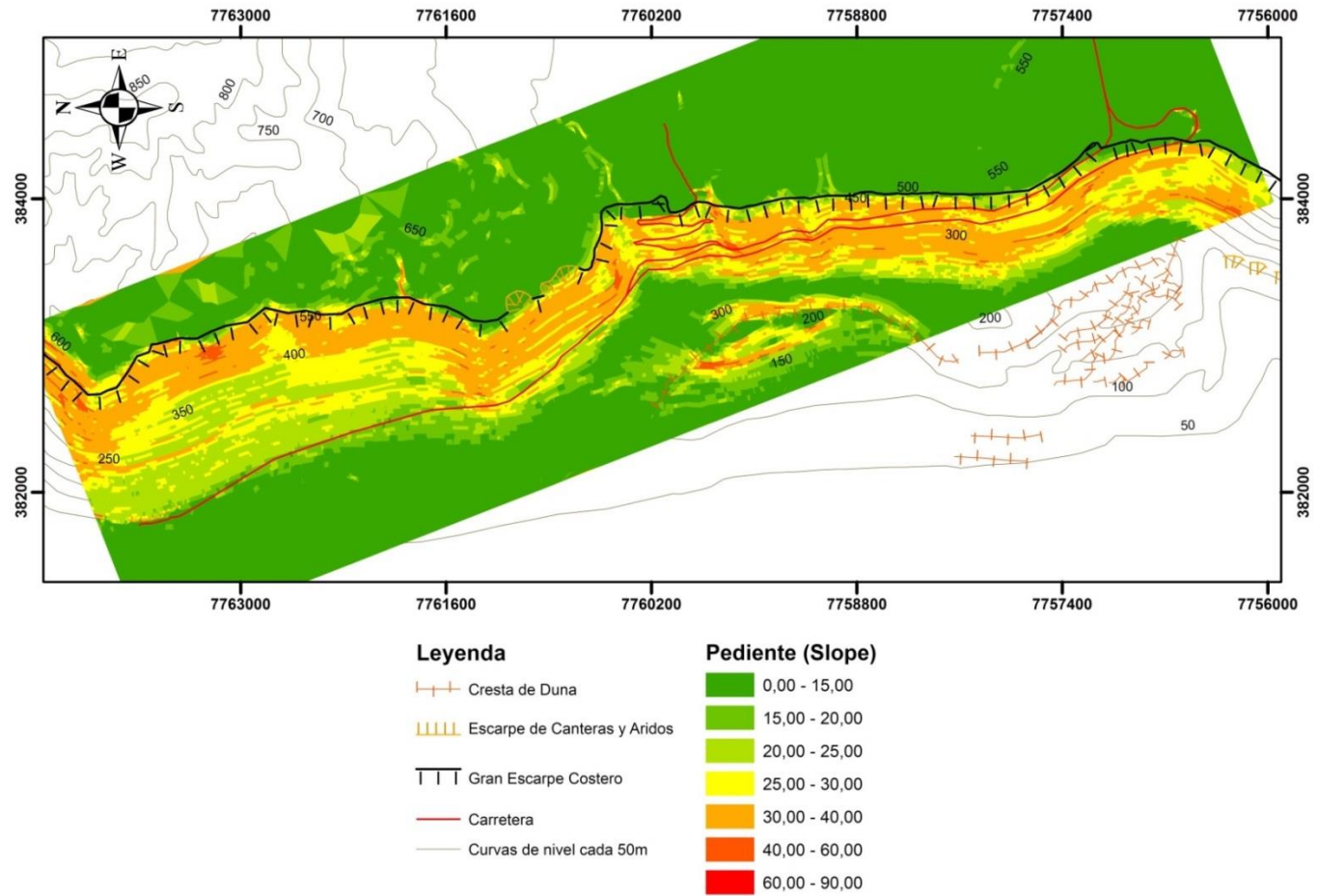
- Mortimer, C., Saric, N. (1972) Landform evolution in the coastal region of Tarapacá Province, Chile. *Rev. Geomorphol. Dyn.*, vol. 21(2), 162 – 170.
- Naranjo, J.A. 1987. Interpretación de la actividad Cenozoica superior a lo largo de la zona de Falla de atacama. *Revista Geológica de Chile* 31: 43-55.
- Oliver, G.; Renet J. P., 1976. Essai de Cartographie des Riques Liés A Des Mouvements de Terrain dans la Région de Saint-Martin-De-Belleville. *Bull. Liason Lab. P. et Ch.*, spécial, mars 1976, 40-55.
- ONEMI, Informe Consolidado N°3: Sismo Destructivo de Tarapacá, 13 de junio de 2005. Departamento de Protección Civil, Septiembre 2009.
- Paskoff, R. 1978-1979. Sobre la evolución geomorfológica del gran acantilado costero del Norte Grande de Chile. *Revista Norte Grande* 6: 7-22.
- Popescu, M.E., 2002. Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options. Keynote Lecture, Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures, Singapore, p. 61-81.
- Rech, J.; Currie, B.; Michalski, G.; Lafayette, W.; Cowan, A. 2006. Neogene climate change and uplift in the Atacama Desert, Chile. *Geology* 34 (9): 761-764.
- RENADIC, Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Rodriguez, C.E., Bommer, J.J. & Chandler, R.J., 1999. Earthquake-induced landslides: 1980-1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18, p.325-346.
- Rutland, R. (1971) Andean orogeny and ocean floor spreading. *Nature*, vol. 233, 254-255
- Rutllant, J.; Fuenzalida, H.; Torres, R.; Figueroa, D. 1998. Interacción océano-atmósfera-tierra en la Región de Antofagasta (Chile, 23°S): Experimento DICLIMA. *Revista Chilena de Historia Natural* 71: 405-427.
- Sepúlveda, S.A., 1998. Metodología para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Silgado, E.: 1985, Terremotos Destructivos en América del Sur 1513-1974, Proyecto SISRA 10, 1-328, CERESIS, Lima.
- Soeters, R. y Van Westen, C.J. (1996). "Slope instability recognition, analysis and zonation". In Turner, K. y Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*;

Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy Press, Washington DC, 129-177.

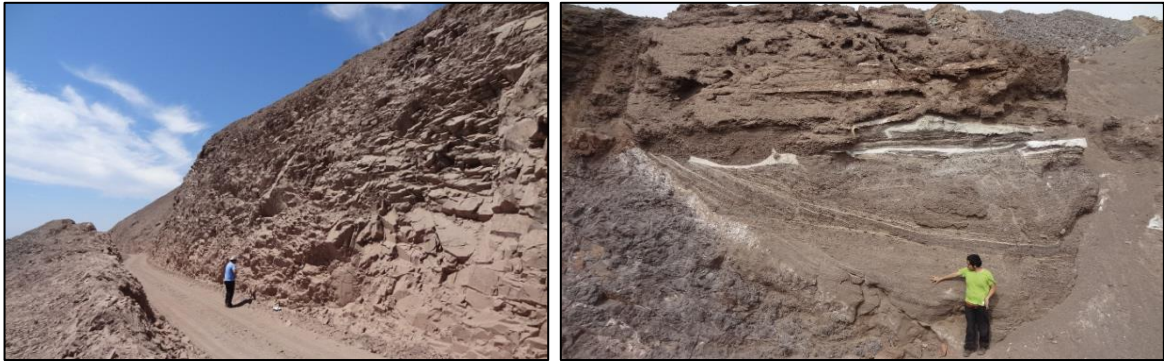
- Tadashi, A., 1995. Riesgos Geológicos Urbanos. In: Aspectos geológicos de protección ambiental. Repetto, F., Santiago, C., editores. UNESCO, Montevideo, Vol. 1, pp. 89-101.
- Thomas, A. (1970). Cuadrángulos Iquique y Caleta Molle, Provincia Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N°21 - 22, 2 mapas escala 1:50.000, 52p. Santiago.
- Urrutia, R. y Lanza, C., 1993. Catástrofes en Chile: 1541-1992. Ed. La Noria, Santiago
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In Landslides, Analysis and Control, Special Report N°176. Schuster, R.L., Krizek, R.J., edits. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., p.11-33
- Varnes, D.J., 1984. Landslide hazard zonation: A review of principles and practice. Natural Hazards 3, UNESCO, 63 p

Anexos

1. Mapa de pendientes para la zona de estudio



2. Unidades geológicas de la zona de estudio



Izquierda, Formación Punta Barranco. Derecha, Discordancia entre Gravas de Alto Hospicio (intercalaciones de ceniza volcánica) y Formación Punta Barranco

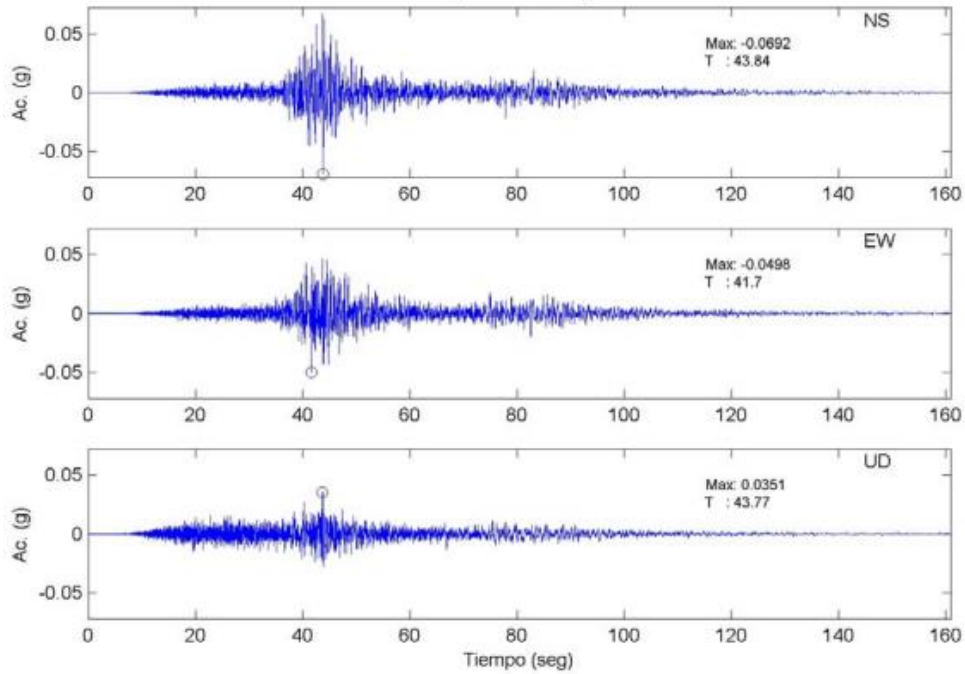


Depósitos eólicos. Izquierda: depósito en mantos. Derecha: depósito en dunas

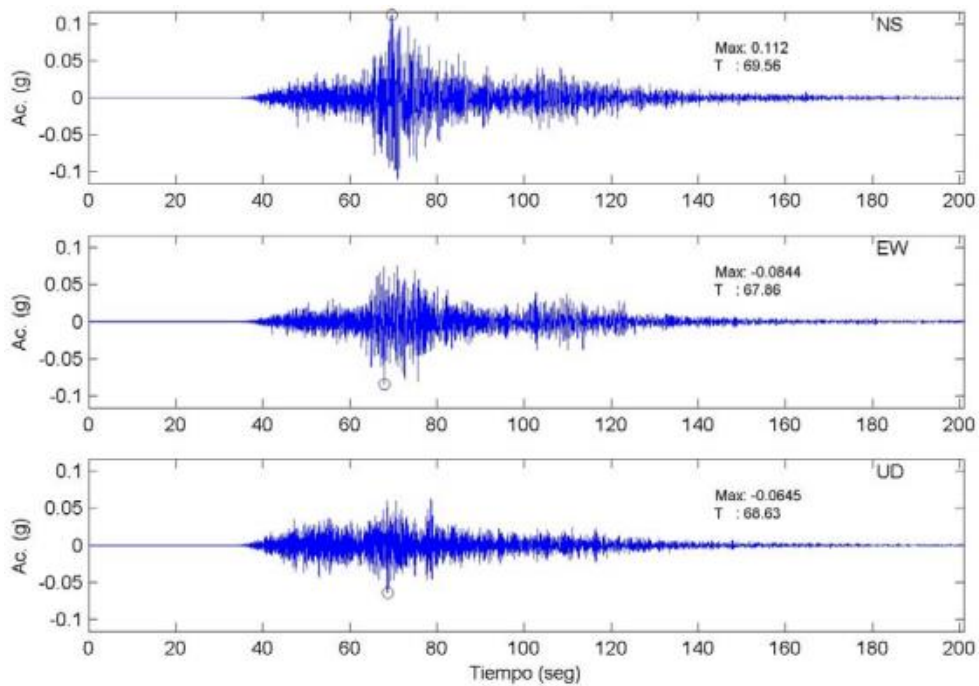
3. Registro de acelerogramas

3.1 Terremoto de Tocopilla 2007

Registro de aceleraciones en Iquique, Hospital de Iquique (RENADIC –UCH)

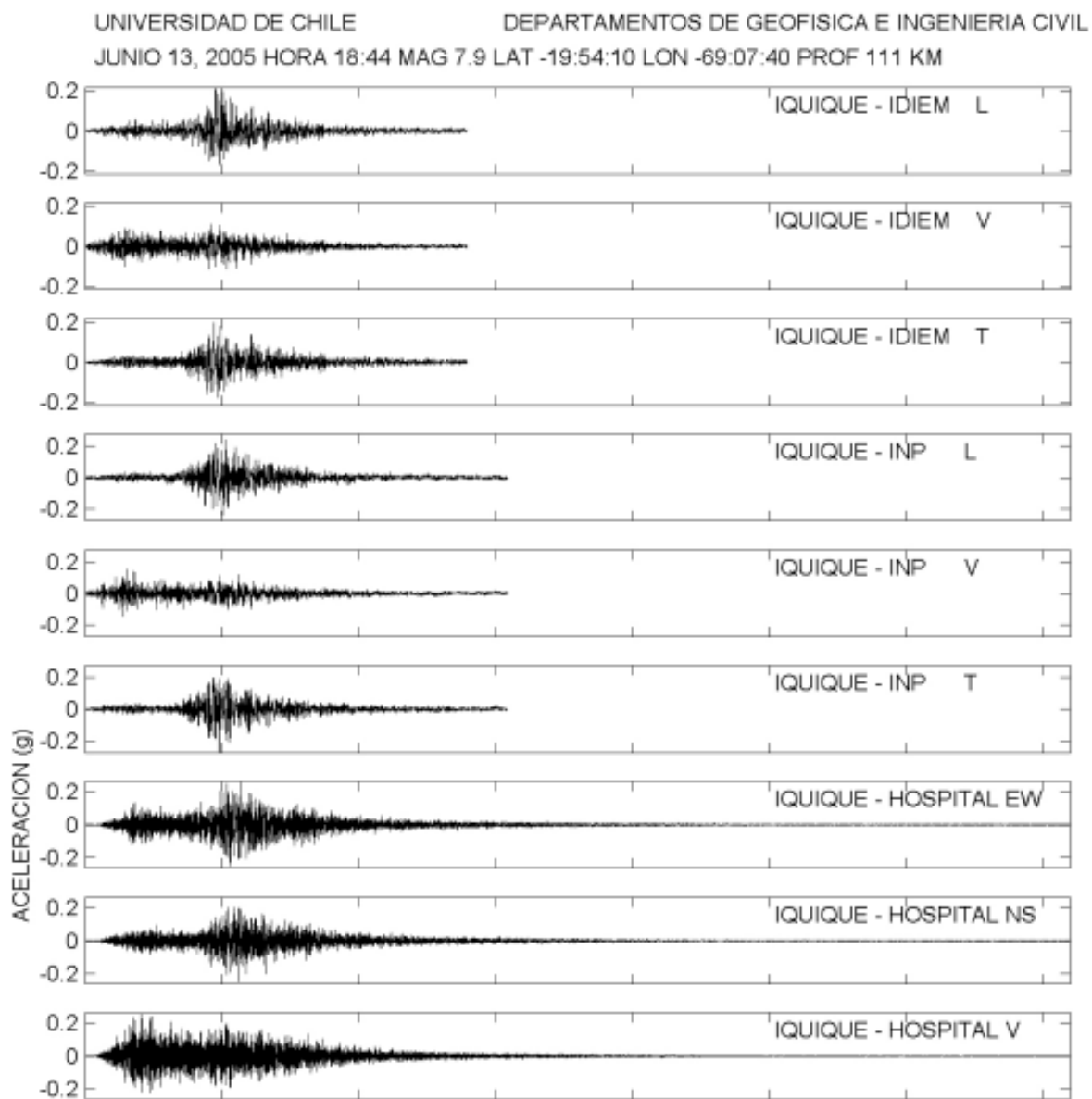


Registro de aceleraciones en Iquique, Escuela Pública Chipana (RENADIC –UCH)



3.2 Terremoto de Tarapacá 2005

Registro de aceleraciones en Iquique (RENADIC –UCH)



4. Registro de terremotos históricos

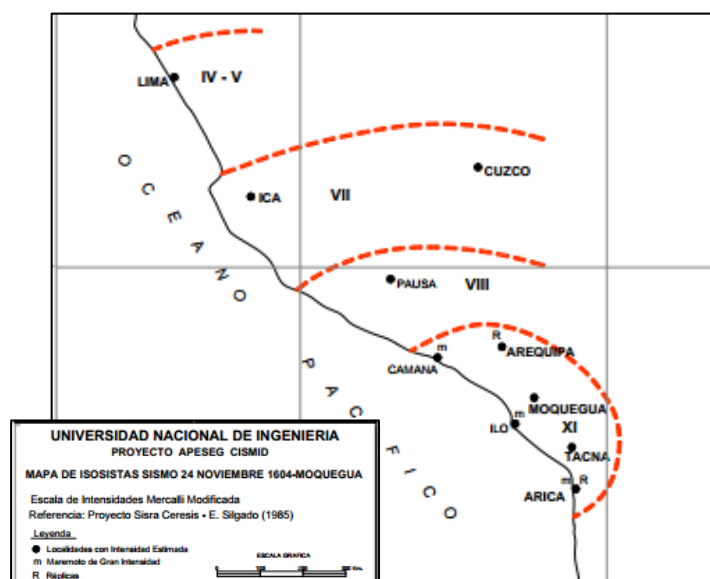
4.1 1513 y 1543

Los primeros registros de actividad sísmica a gran escala ocurren en los años 1513 y 1543 acompañado de grandes deslizamientos (registrados en Perú) y el mar sobrepasó en la misma época la línea de costa comentario tomado de los habitantes indígenas de la costa. Comte, D., Pardo, M., (1989) caracterizan estos sismos en cuanto a magnitud, largo de ruptura y ubicación aunque comentan que estos dos sismos poseen la más pobre información histórica pudiendo ser de magnitud mayor a la estimada.

4.2 24 de noviembre de 1604

Afectó considerablemente el Sur de Perú y el Norte de Chile. El más afectado fue la ciudad de Arica que fue destruido prácticamente en su totalidad. El terremoto dejó en el suelo a la ciudad y posteriormente el maremoto arrasó con todo a su paso, a lo que se tuvo que refundar la ciudad a los pies del Morro de Arica (Urrutia, Lanza, 1993). El terremoto se caracterizó con magnitud de $M_s = 8.7$, coordenadas $17.88^\circ S$, $70.94^\circ W$, un largo de ruptura de 400 km y una variación máxima del nivel del mar de 16 m en Arica (Comte, et al., 1988, SISRA, Dorbath, L., et al., 1989). Se estima que por generación de tsunamis no puede tener una profundidad mayor de 80km, asignándole un a profundidad superficial -sismo interplaca- de 10km (Comte, et al., 1988).

Mapa de isosistas del Terremoto de Moquegua 1604 (SISRA, Silgado, 1985))



4.3 16 de septiembre de 1615

“Un cuarto de hora antes del anochecer” un violento sismo derribó la mayor de parte de las obras civiles que se construyeron posterior al terremoto de 1604, aunque la destrucción fue de consideración no se registraron muertes (Urrutia, Lanza, 1993). Existen varias localizaciones para el terremoto no difiriendo de manera importante entre ellas, el catálogo de SISRA Perú le otorga 18.25° S, 71° W, mientras que SISRA Chile le otorga 18.50° S, 70.35° W, por último Comte et. al., 1989 le otorga 19.5° S, 70.5° W de ubicación magnitud $M = 7.9$ y 137 km de ruptura, se registró la presencia de un importante tsunami aunque menor que el producido en 1604 (Lockridge, 1985, Comte, et al., 1988), por lo tanto se estima una profundidad de mecanismo focal entre 10 y 20 km (Comte, et al., 1988),

4.4 13 de mayo de 1784

Sismo conocido como el gran Terremoto de Arequipa afectando localidades y poblados dentro de los 100 km de radio. El sismo se estimó en una magnitud de $M = 8.5$ ubicación 16.5° S y 72° W con una ruptura de 390 km no generando tsunami ya que el epicentro no fue costero (Comte, et al., 1988), SISRA Perú entrega una profundidad de foco de 40 km.

Mapa de isosistas del Terremoto de Arequipa 1784 (SISRA, Silgado, 1985)



4.4 Período entre 1513-2011

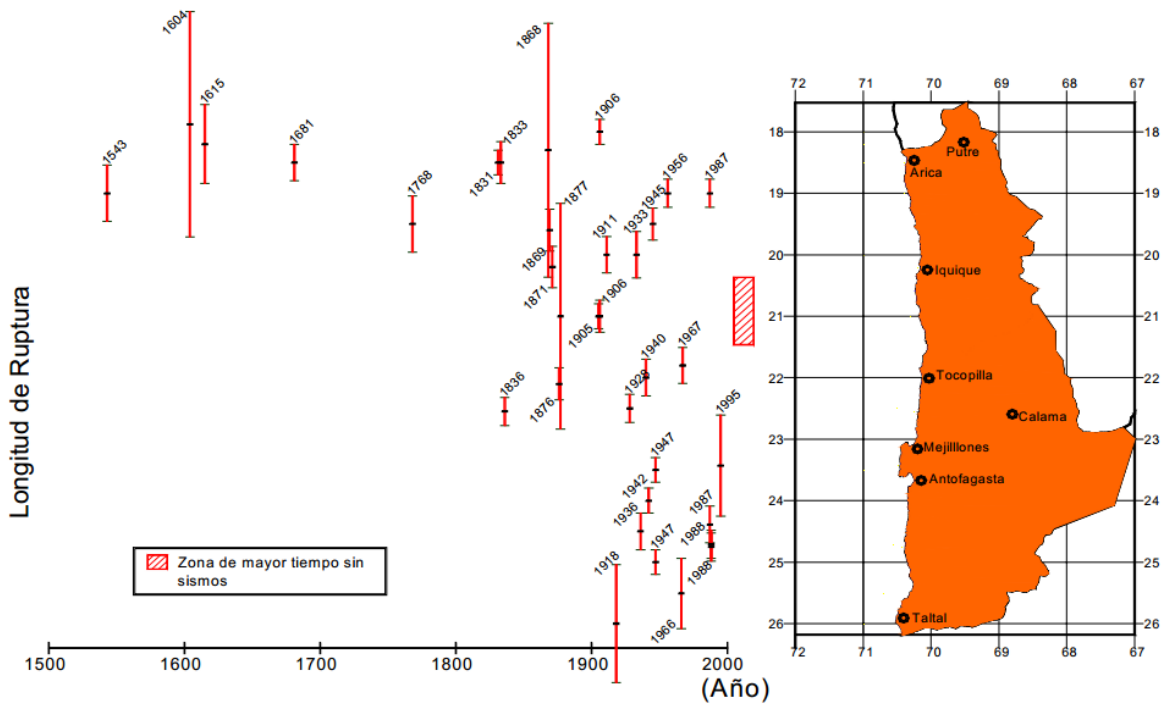
Sismos más importantes periodo 1513-1878 (Comte, et al., 1989)

Date (y m d)	Lat. (°S)	Long. (°W)	<i>MS(I)</i>	<i>mL</i>	<i>L</i> (km)
1513	17.2	72.3	>7.7		>100
1543	19.0	70.5	>7.7		>100
1582 01 22	16.6	71.6	7.9		137
1604 11 24	17.9	70.9	8.7	8.7	400
1615 09 16	19.5	70.5	7.9		137
1681 03 10	18.5	70.4	7.3		58
1687 10 21	17.0	72.0		8.0	150 (*)
1715 08 23	17.3	70.8	7.8	7.8	120
1725 01 08	16.4	71.6	7.1		44
<1768	20.5		>7.7		>100
1784 05 13	16.5	71.0	8.5	8.6	390
1821 07 10	16.1	73.0	7.0		38
1831 10 09	18.5	71.0	7.0		38
1833 09 18	19.0	71.0	7.4		67
1836 06 03	22.6	70.3	7.1		44
1868 08 13	17.7	71.6	8.8	8.8	500
1869 08 24	19.6	70.2	7.4		67
1870 04 22	22.5	68.9	7.5		- (**)
1871 10 05	20.2	70.2	7.4		67
1876 10 26	22.1	69.6	7.2		- (**)
1877 05 10	21.0	70.3	8.8	8.7	420
1878 01 23	19.9	69.5	7.3		- (**)

Sismos mayores M = 6.5 obtenidos del catálogo SISRA, periodo 1911-1976

Fecha	Hora	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (km)	Magnitud
15-09-1911	13:10:00	-20,000	-72,000	0,0	7,3
06-06-1915	21:29:00	-18,500	-68,500	160,0	7,6
25-08-1916	9:44:00	-21,000	-68,000	180,0	7,5
13-08-1920	2:03:00	-20,000	-68,000	150,0	6,5
20-10-1921	6:03:00	-18,500	-68,000	120,0	7
28-03-1922	3:57:00	-21,000	-68,000	90,0	7,2
03-10-1927	23:55:00	-21,000	-68,000	100,0	6,5
28-05-1931	3:15:00	-20,500	-70,500	120,0	6,5
23-02-1933	8:09:00	-20,000	-71,000	40,0	7,6
04-12-1934	17:24:00	-19,500	-69,500	130,0	6,9
23-12-1934	9:52:00	-21,000	-68,000	100,0	6,5
17-04-1938	14:39:00	-19,000	-69,500	60,0	6,5
14-03-1943	18:37:00	-20,000	-69,500	150,0	7,2
01-12-1943	10:34:00	-21,000	-69,000	100,0	7
26-07-1946	6:44:00	-19,750	-70,500	70,0	6,8
25-04-1949	13:54:00	-19,750	-69,000	110,0	7,3
24-05-1952	1:59:00	-20,500	-70,500	0,0	6,8
06-12-1955	4:31:00	-20,200	-70,200	0,0	6,8
08-01-1956	20:54:00	-19,000	-70,000	0,0	7,1
03-10-1956	8:18:00	-20,090	-69,380	90,0	6,5
11-07-1958	19:10:00	-21,000	-69,000	0,0	6,5
14-06-1959	0:12:00	-20,420	-69,000	83,0	7,4
09-07-1959	16:05:00	-20,500	-68,000	100,0	6,7
29-12-1962	10:41:00	-20,200	-70,300	49,0	6,8
30-11-1976	0:40:00	-20,580	-68,930	70,0	6,5

Esquema espacio-temporal de terremotos ocurridos en el norte grande de Chile
(Campo, J., Compte, D., 1990.)

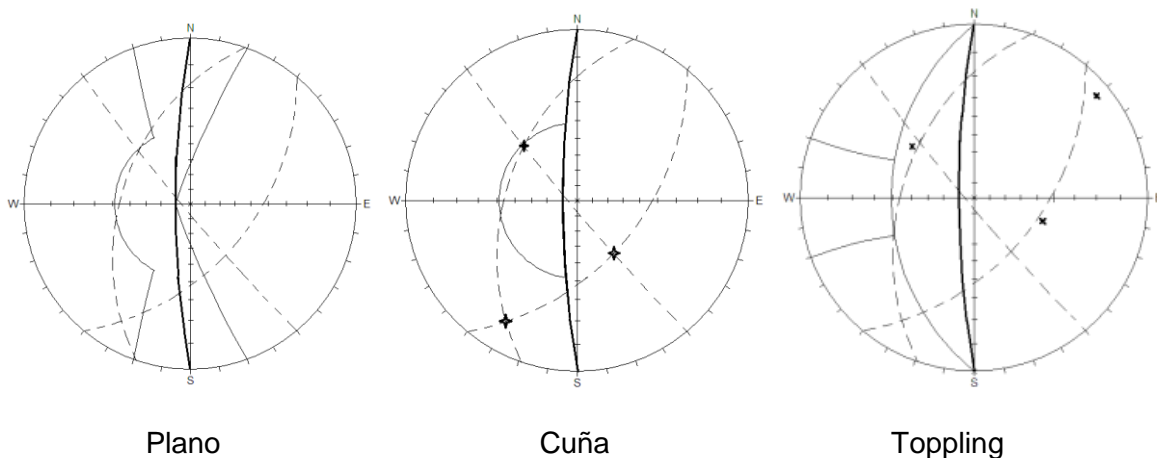


Sismos mayores $M = 6.0$ obtenidos del catálogo NEIC, periodo 1976-2013

Fecha	Hora	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad (km)	Magnitud
30-11-1976	00:40:57.80	-20.520	-68,919	82,0	6.5
26-05-1980	18:41:42.90	-19.364	-69,238	114,0	6.1
31-12-1982	03:47:28.51	-20.993	-68,464	118,0	6.0
25-02-1983	22:49:54.73	-18.268	-69,438	146,0	6.9
18-05-1985	16:59:13.87	-19.000	-69,053	109,8	6.0
08-08-1987	15:48:56.75	-19.022	-69,991	69,7	7.2
22-02-1988	19:13:17.74	-20.833	-69,785	70,3	6.7
05-04-1989	23:47:49.39	-20.857	-69,028	112,0	6.2
01-04-1997	18:33:32.20	-18.298	-69,526	113,8	6.2
01-04-1997	18:42:14.06	-18.351	-69,347	115,6	6.2
30-11-1999	04:01:53.22	-18.901	-69,171	128,1	6.6
24-07-2001	05:00:09.09	-19.448	-69,255	33,0	6.4
13-06-2005	22:44:33.90	-19.987	-69,197	115,6	7.8
04-02-2008	17:01:29.98	-20.166	-70,037	35,0	6.3
24-03-2008	20:39:07.63	-20.043	-68,963	120,0	6.2
17-04-2009	02:08:08.71	-19.584	-70,483	25,0	6.1
13-11-2009	03:05:57.22	-19.394	-70,321	27,0	6.5
06-05-2010	02:42:47.94	-18.058	-70,547	37,0	6.2
06-03-2011	12:31:59.78	-18.021	-69,362	118,0	6.3

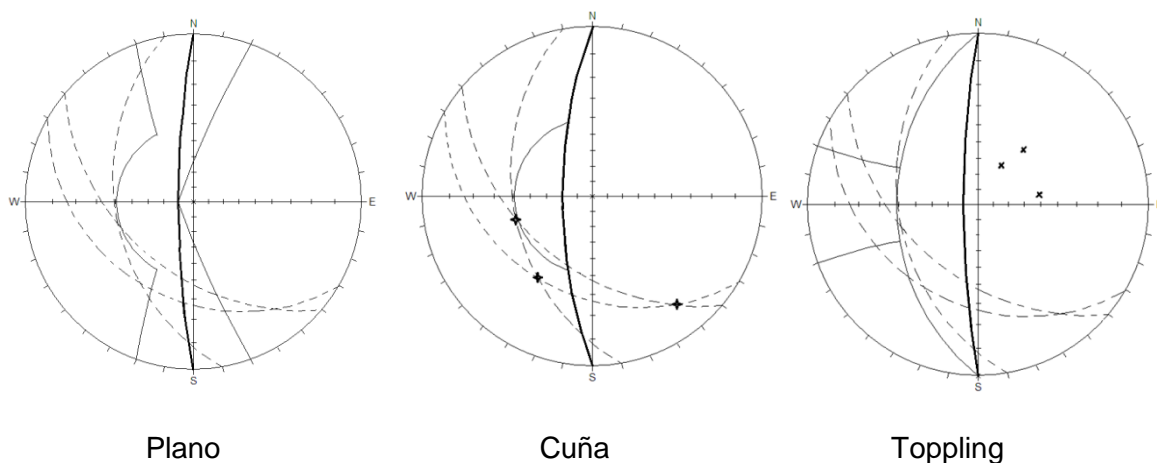
5. Análisis cinemático de deslizamiento en bloque

Representación estereográfica para la zona estructural A



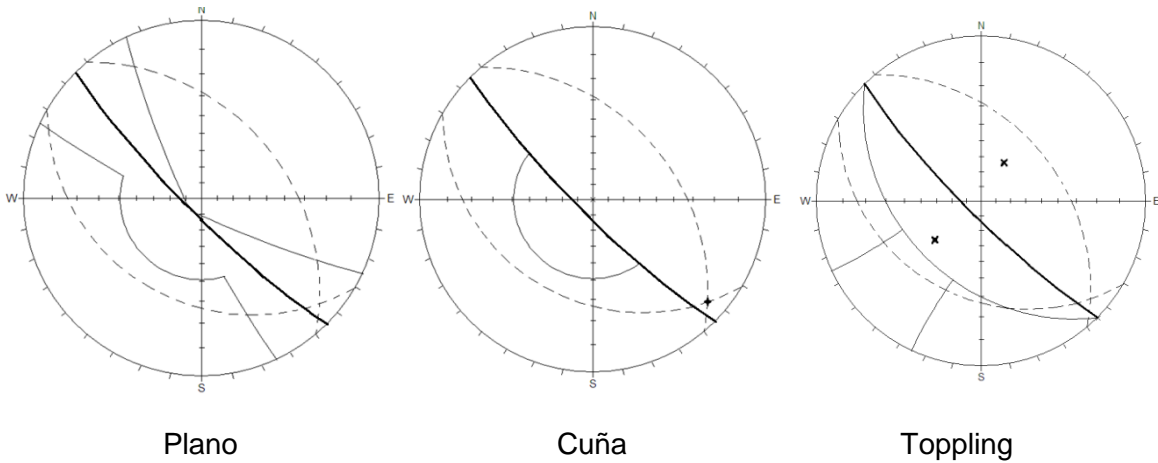
Se muestra en la representación que los sets estructurales de la zona A cumplen las condiciones para deslizamiento plano (específicamente sólo un set) y en cuña con un ángulo crítico de 45° y 43° respectivamente

Representación estereográfica para la zona estructural B



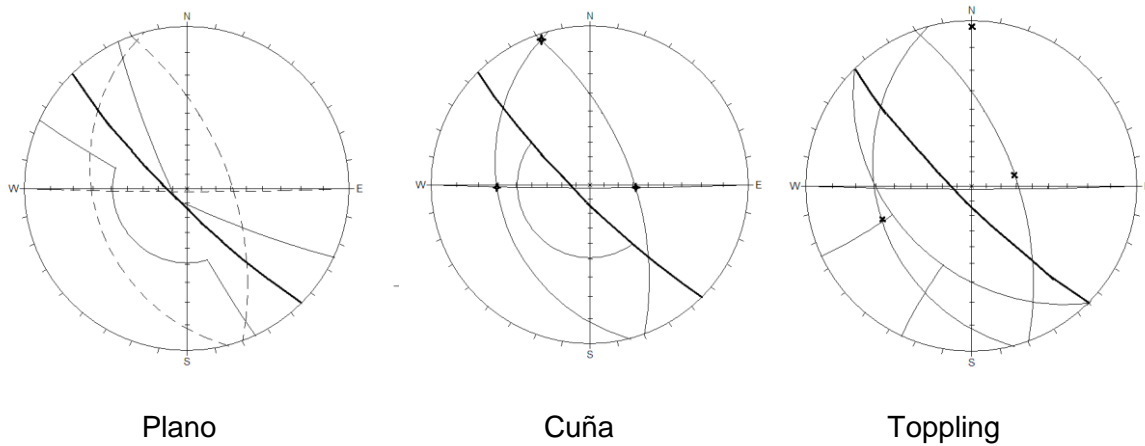
Se observa que sólo un set estructural cumple las condiciones de deslizamiento plano, existe una intersección de sets que cumple deslizamiento en cuña y ninguno cumple el deslizamiento en toppling, el ángulo crítico que cumple las condiciones es de 42° .

Representación estereográfica para la zona estructural C



Para la zona estructural C ningún set cumple las condiciones para los tres tipos de deslizamiento aunque un set se presenta en el límite de cumplimiento para deslizamiento toppling, este set igual se incluyó para determinar probabilidades de generación e deslizamiento con ángulo crítico de 40° .

Representación estereográfica para la zona estructural D



En esta zona estructural sólo se cumplen los criterios del deslizamiento en toppling con un ángulo crítico de 60° , ningún set estructural cumplió los criterios de deslizamiento planar o en cuña.

6. Unidades Geomorfológicas susceptibles a remociones en masa

Deslizamientos Rotacionales



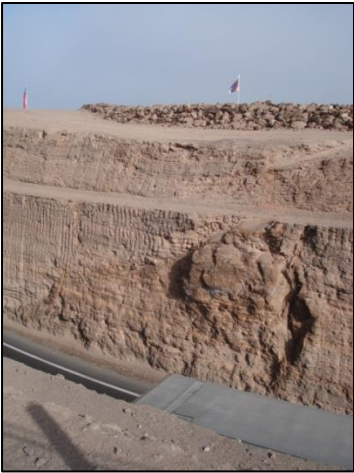
Unidad 81



Sector Norte de la Unidad 83



Unidad 82



Sector Sur de la Unidad 83

Deslizamientos Traslacionales



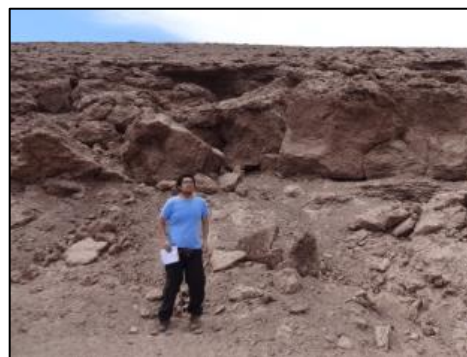
Unidad 27-138

Unidades 28, 91 y 93



Unidad 32

Unidad 98



Unidad 43

Unidad 49



Unidad 96

Deslizamiento de roca



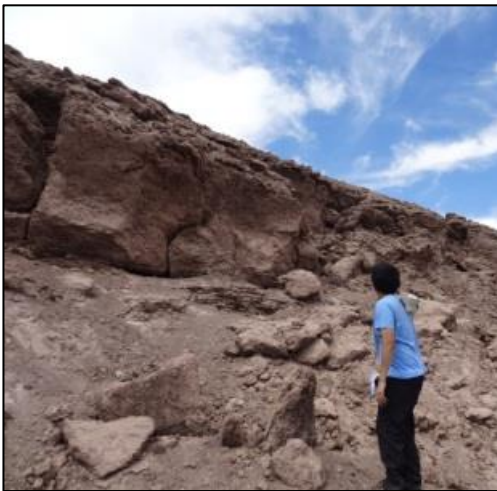
Unidad 3 (arriba), 75 (Centro) y 111 (Abajo)

Unidad 74 (Arriba) y 77 (Abajo)

Caídas de roca



Unidad 28



Unidad 49



Unidad 32

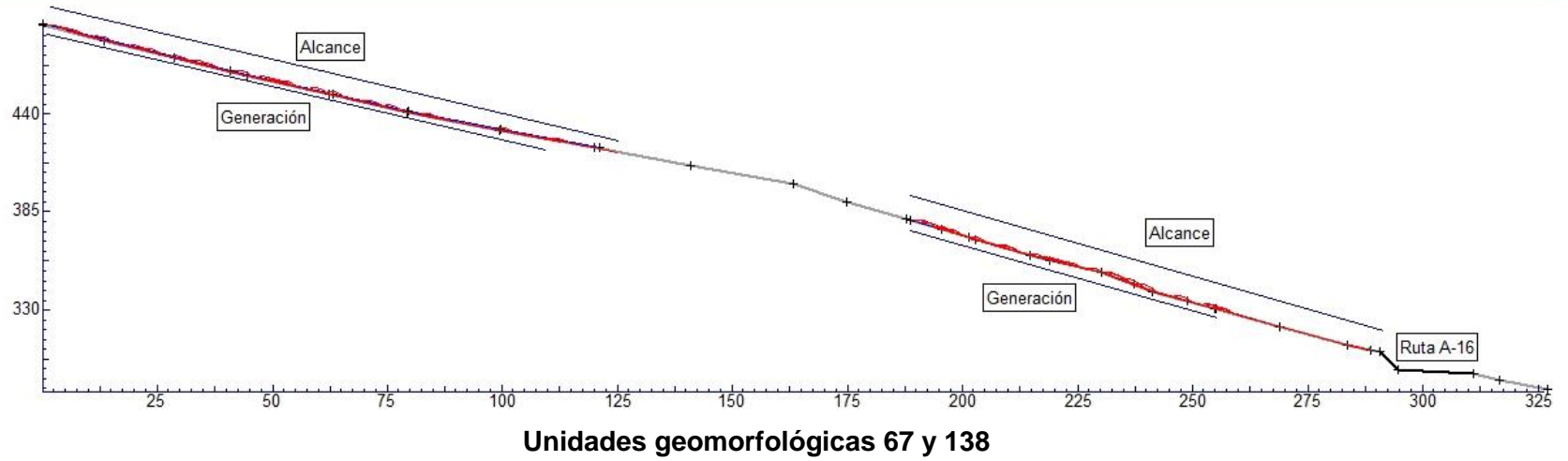
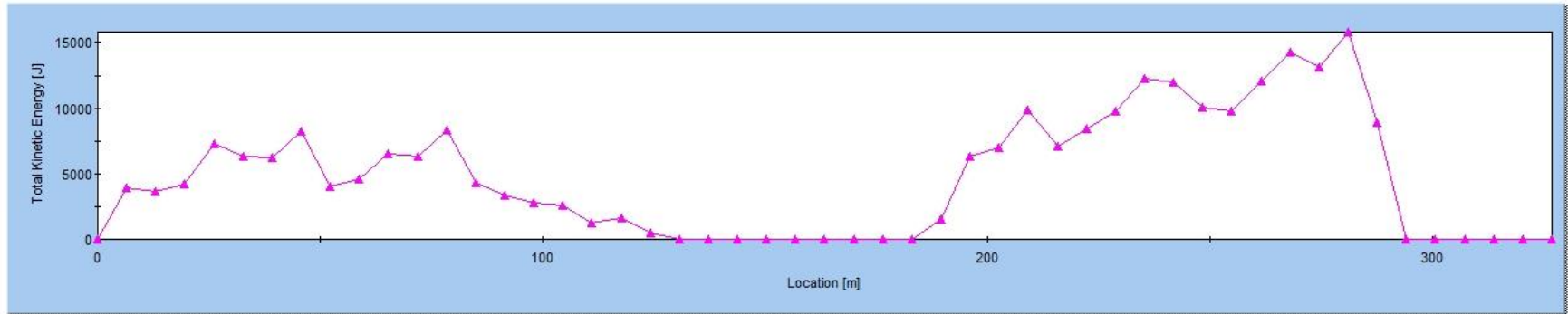


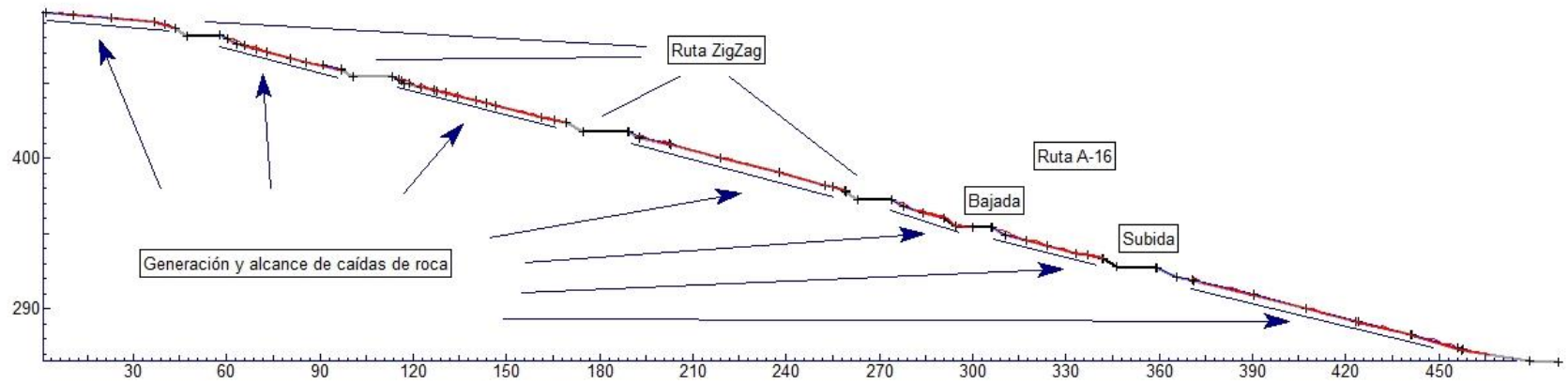
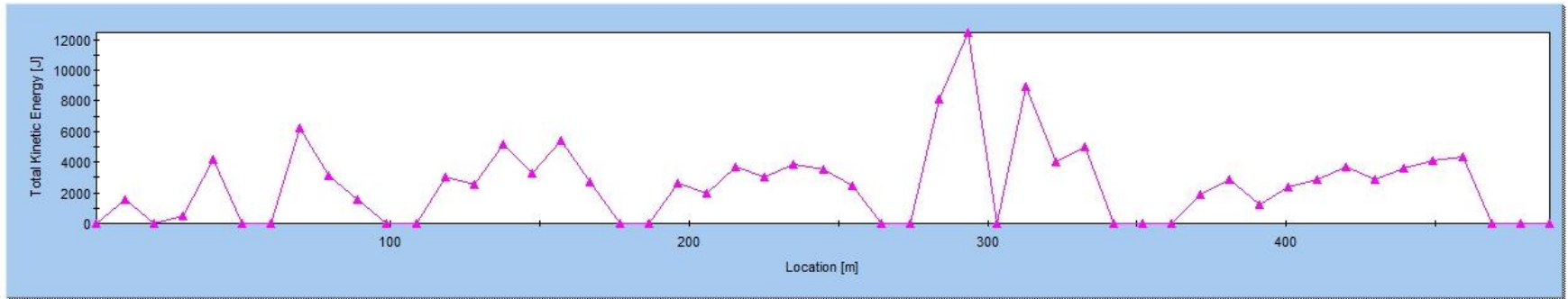
Unidad 97



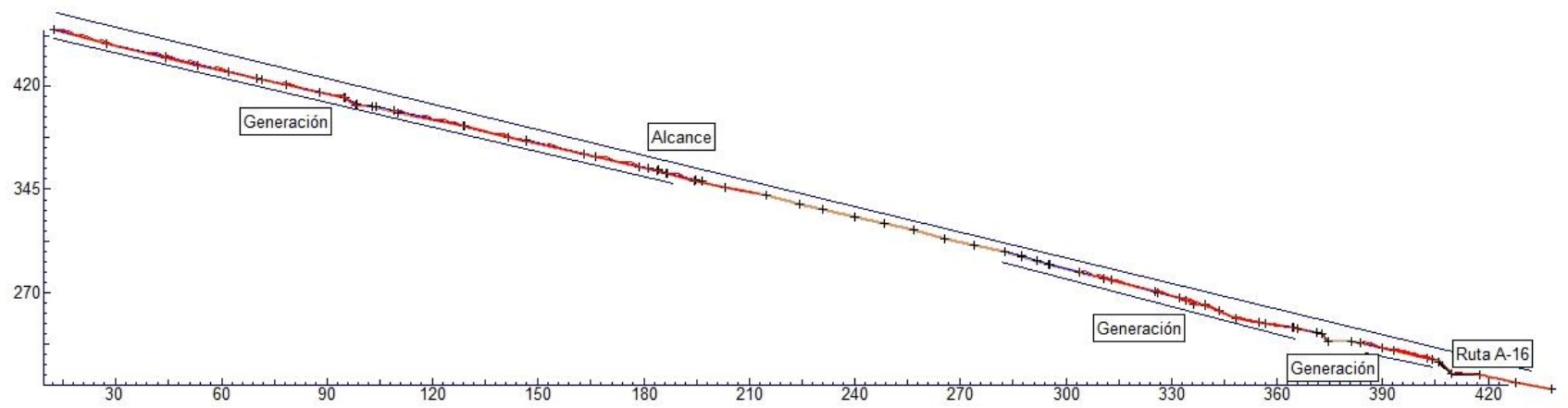
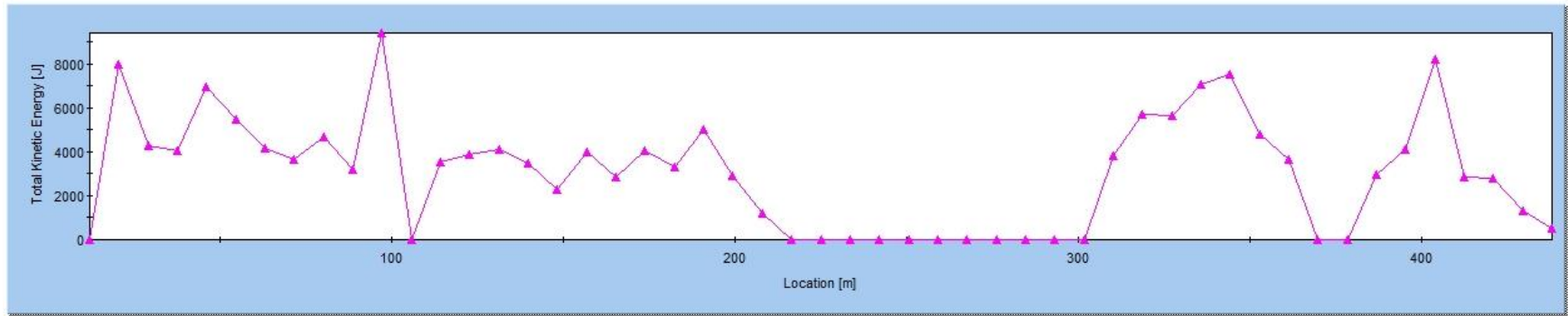
Unidad 111

7. Perfil (Abajo: generación y alcance, Arriba: energía) de las unidades geomorfológicas

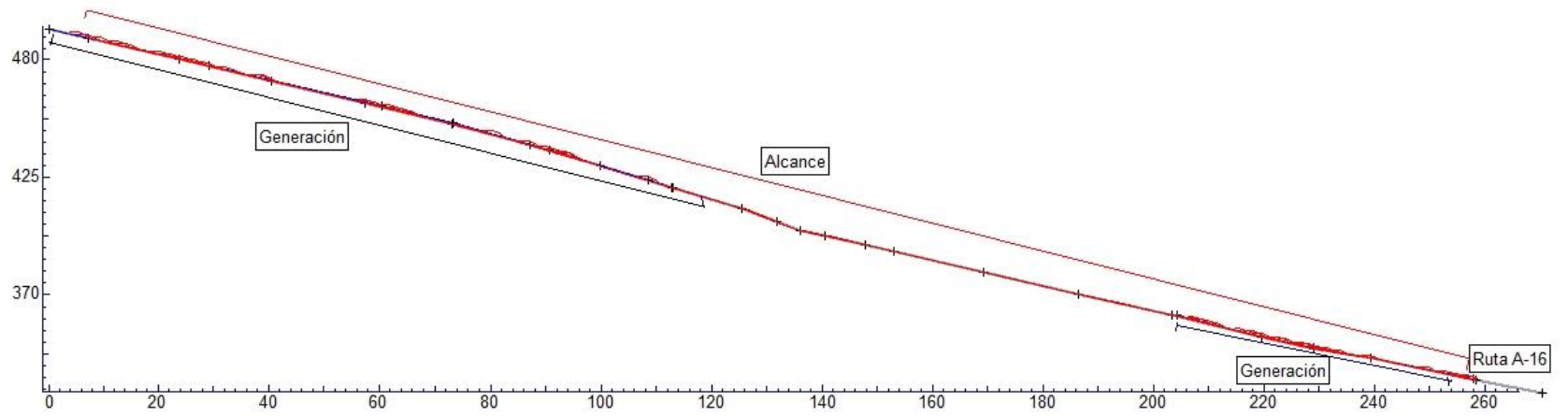
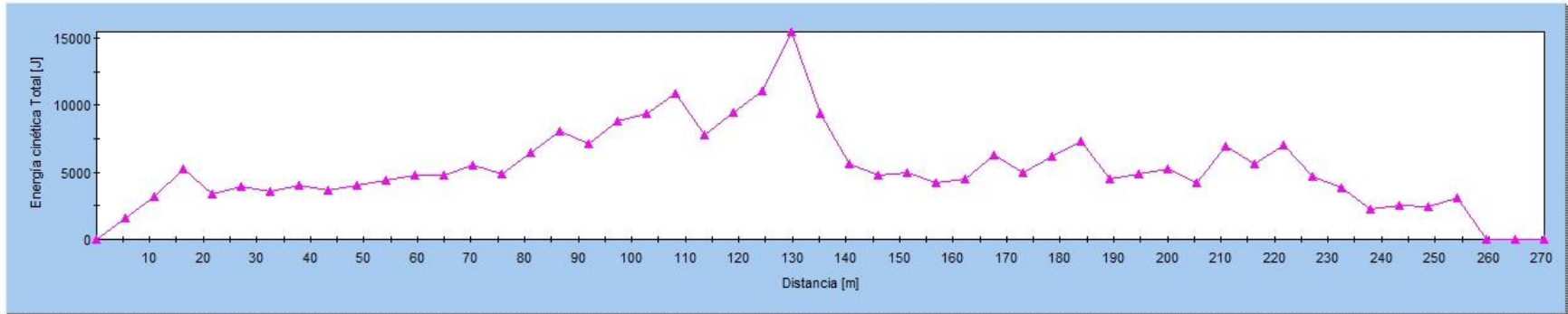




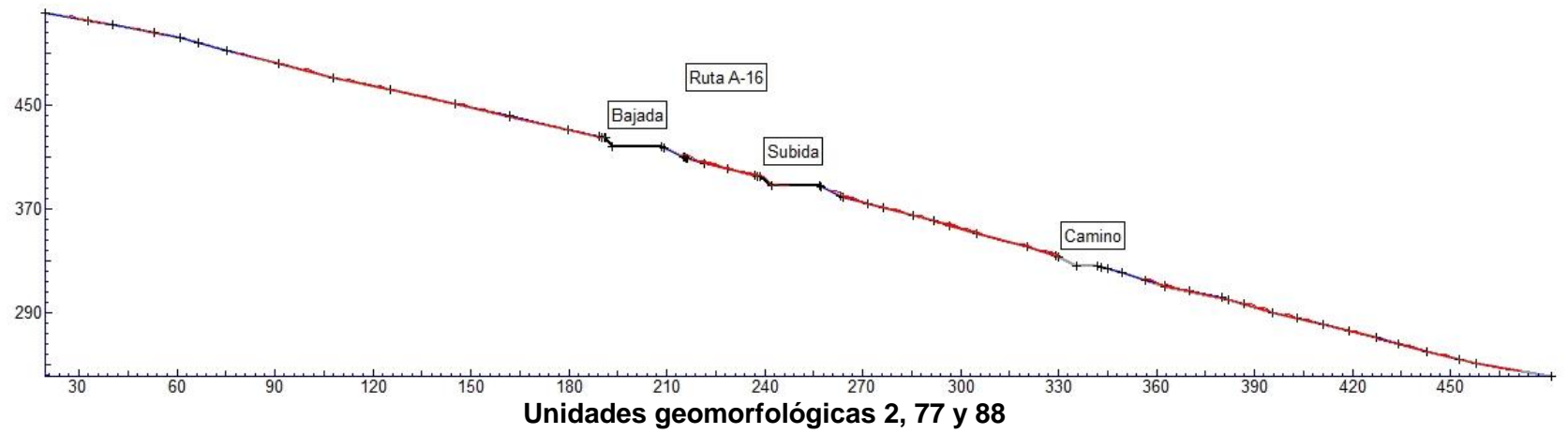
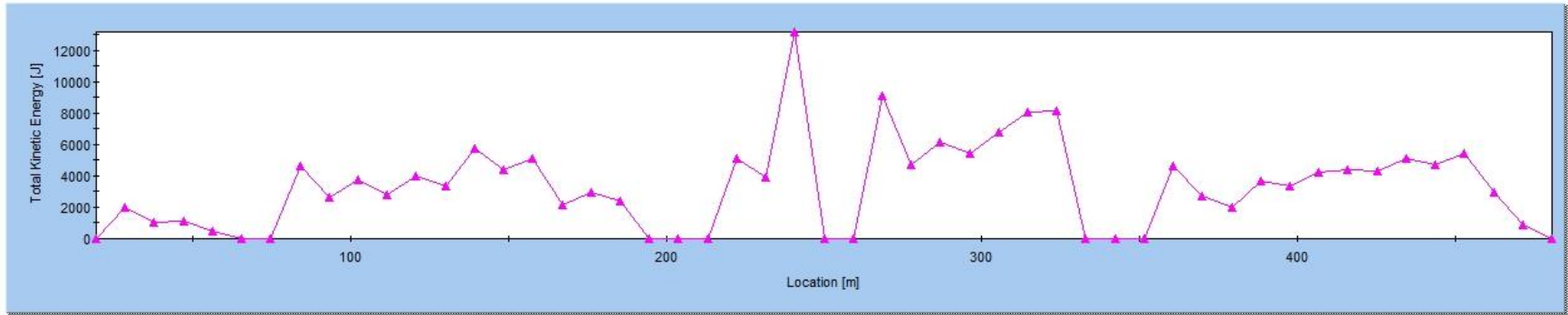
Unidades geomorfológicas 75 y 122

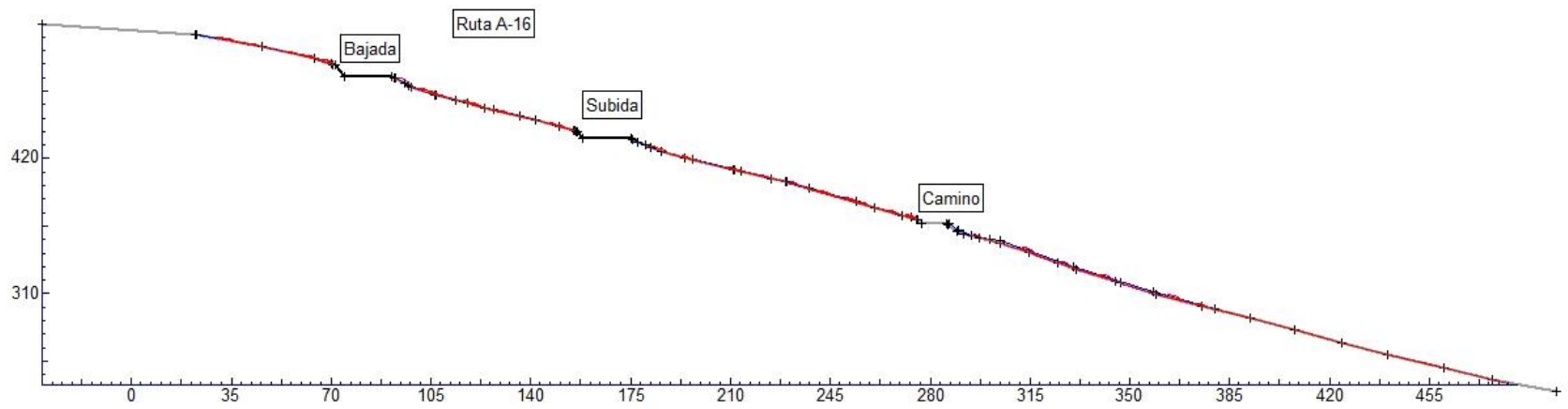
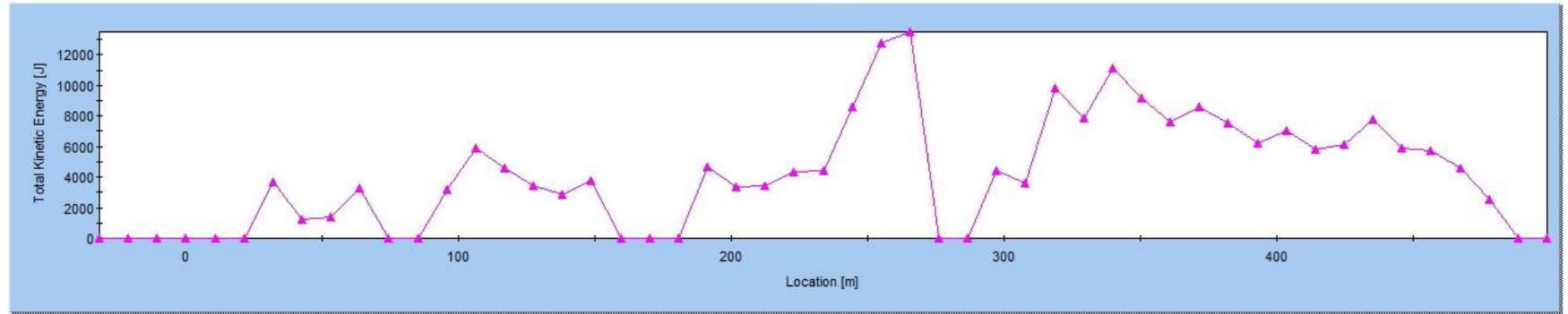


Unidad geomorfológica 111

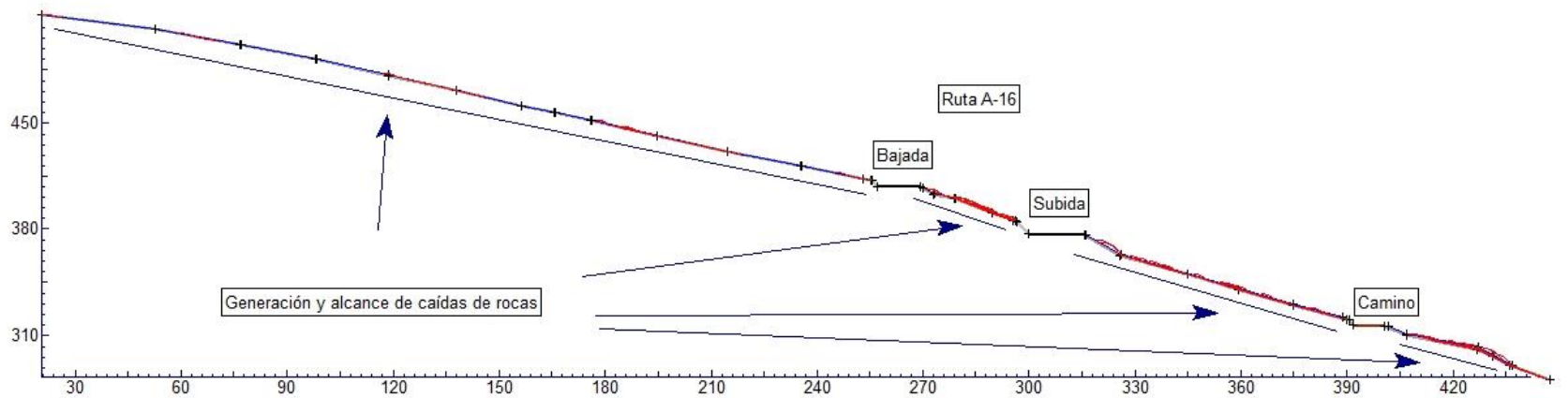
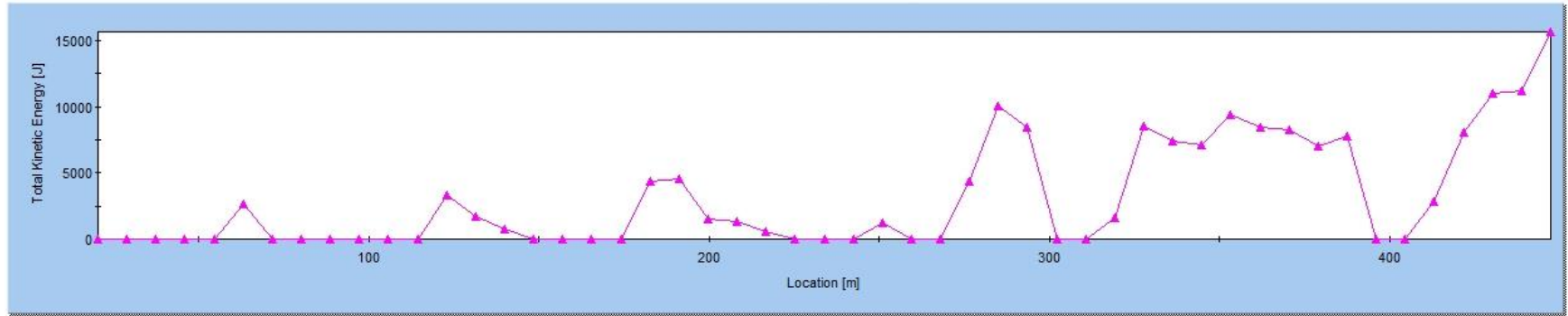


Unidades geomorfológicas 49 y 107

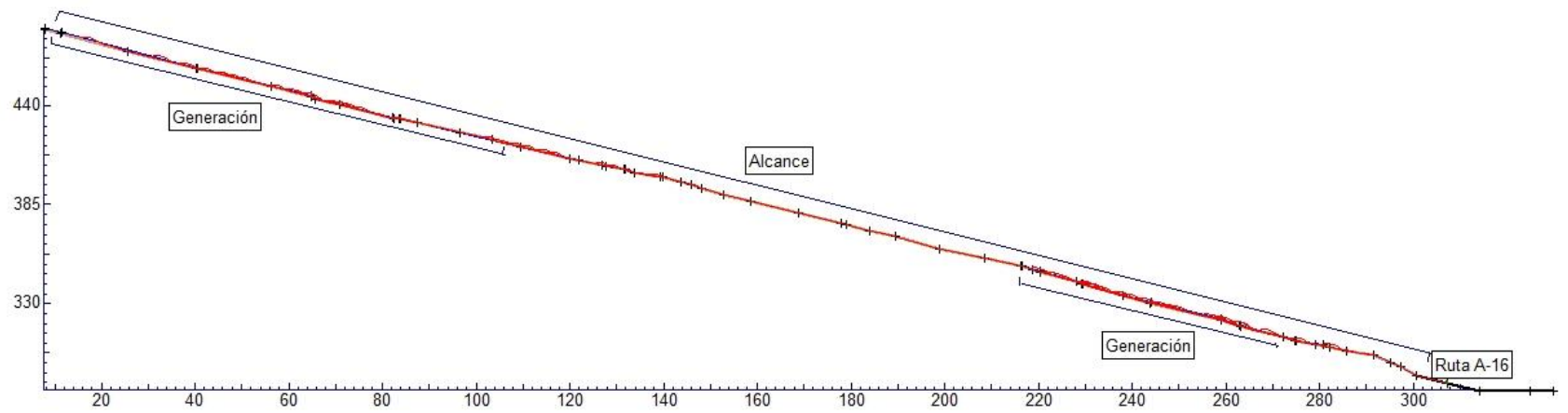
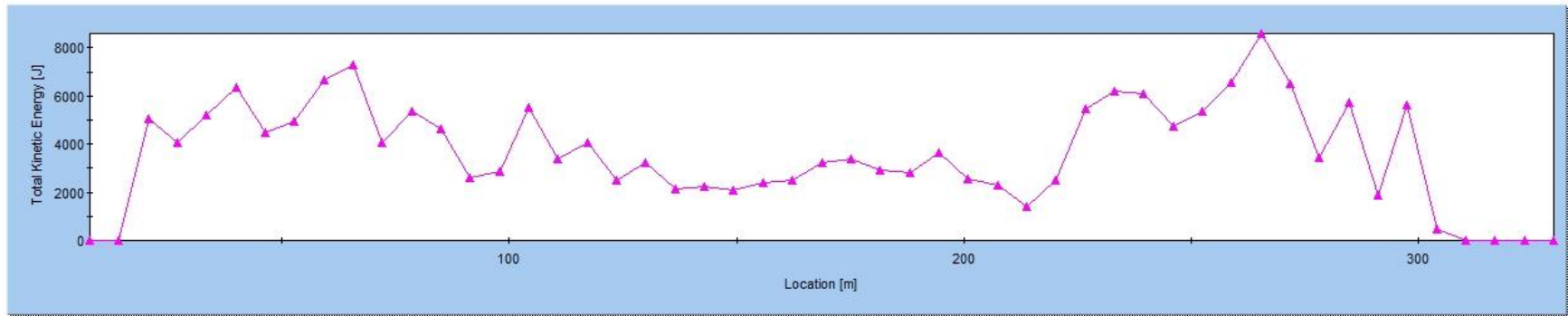




Unidades geomorfológicas 83 y 88

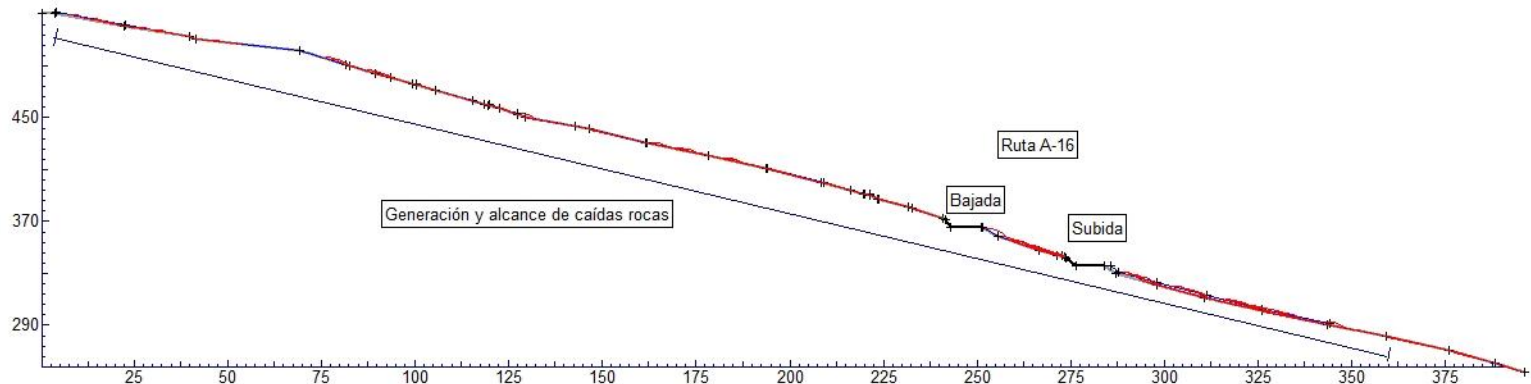
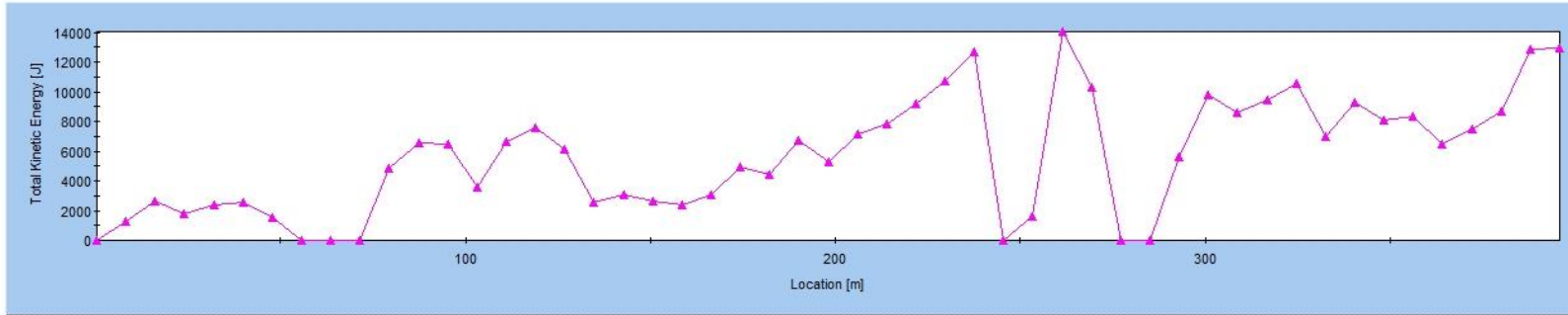


Unidades geomorfológicas 3, 55 y 71



Unidad geomorfológica 27

Total Kinetic Energy Envelope



Unidades geomorfológicas 4 y 75

