



ESTUDIO DE RIESGOS
PLAN REGULADOR COMUNAL DE QUINTA DE TILCOCO
LOCALIDADES DE QUINTA DE TILCOCO Y GUACARHUE
DICIEMBRE 2022

INDICE

1. INTRODUCCION.....	4
1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	4
1.2 DEFINICIONES RELEVANTES.....	4
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES	5
1.4 CONTEXTO JURÍDICO	5
2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	6
2.1 LA COMUNA.....	6
2.2 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	8
2.3 GEOMORFOLOGÍA LOCAL	9
2.4 GEOLOGÍA REGIONAL.....	10
2.5 GEOLOGÍA LOCAL	10
2.6 CLIMA Y VEGETACIÓN	11
2.7 VOLCANISMO.....	12
2.8 SISMOS.....	13
2.9 SISMOS Y FUENTES SISMOGÉNICAS.....	14
2.10 ANTECEDENTES SÍSMICOS EN LA REGIÓN	16
2.11 FALLAS GEOLÓGICAS.....	18
3. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	21
3.1 REMOCIONES EN MASA	21
3.2 DEFINICIÓN Y TIPO DE REMOCIONES EN MASA.....	21
3.3 FACTORES CONDICIONANTES Y DESENCADENANTES	25
3.4 INUNDACIONES.....	28
4. METODOLOGÍA.....	31
4.1 Inundación por desborde de cauces y anegamiento	32
1.1. Remoción en masa	32
1.2. Zonificación de la susceptibilidad	33
5. ZONAS DE RIESGO EN LA COMUNA DE QUINTA DE TILCOCO.....	35
5.1 REMOCIONES EN MASA	35
5.2 ZONIFICACIÓN POR SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA	36
5.3 VOLCANISMO.....	37
5.4 SISMOS.....	38
5.5 FALLAS GEOLÓGICAS.....	38
5.6 ÁREAS CON RIESGO DE INUNDACION.....	38
6. CONCLUSIONES.....	40
7. REFERENCIAS.....	41

FIGURAS

Figura n° 1: Localización de la comuna de Quinta de Tilcoco, VI región. 7

Figura n° 2: Unidades morfológicas entre los 34° y 35° Lat. S. 8

Figura n° 3: Vista de cerros sector norte de la comuna 9

Figura n° 4: Vista de cerros sector sur 9

Figura n° 5: Unidades geológicas comuna Quinta de Tilcoco 11

Figura n° 6: Ubicación de volcanes RM y VI región 12

Figura n° 7: Zonas y áreas definidas con peligro volcánico (se destaca área sensible a procesos Laháricos) 13

Figura n° 8: Sismicidad histórica entre 1900 y 2010 14

Figura n° 9: Esquema de subducción de Chile mostrando fuentes sismogénicas 15

Figura n° 10: Relación general entre el material del sustrato y la amplificación de la vibración durante un terremoto 16

Figura n° 11: Imagen de Mapa de Peligro Sísmico Probabilístico..... 17

Figura n° 12: Imagen del Mapa de Amenaza Sísmica. 18

Figura n° 13: Modificado del Mapa geológico de Chile (escala 1: 1.100.000) mostrando fallas 20

Figura n° 14: Remociones en Masa de tipo Caídas de Rocas 22

Figura n° 15: Remociones en Masa de tipo Deslizamientos 23

Figura n° 16: Remociones en Masa de tipo Flujo..... 23

Figura n° 17: Remociones en Masa de solifluxión y extensiones laterales 24

Figura n° 18: Modificado Terrazas de inundación con periodos de retorno hipotéticos 29

Figura n° 19: Modelo de pendientes comuna de Quinta de Tilcoco..... 36

Figura n° 20: Susceptibilidad de remociones en masa comuna de Quinta de Tilcoco 37

Figura n° 21: Área de riesgo de inundación Quinta de Tilcoco 39

TABLAS

Tabla n° 1: Clasificación de Remociones en Masa 21

Tabla n° 2: Resumen de factores que condicionan y desencadenan cada peligro geológico y criterios de zonificación de la susceptibilidad 34

1. INTRODUCCION

La ocurrencia de daños asociados a fenómenos naturales ha estado siempre presente, sin embargo con la explosión demográfica a nivel mundial estos fenómenos han adquirido mayor importancia, especialmente por la ocupación de terrenos escarpados y la construcción de grandes ciudades con complejas obras de ingeniería. La tendencia mundial es que los fenómenos naturales sean considerados dentro de la planificación del territorio o que sean incluidos como una variable más a analizar dentro de obras de ingeniería. Según Ayala-Carcedo (2002), la actitud social y política adoptada ante los desastres naturales ha ido cambiando con el tiempo. A partir de la década de los 80 se genera un reconocimiento del deterioro ambiental causado por el hombre y por otro lado se hace un llamado desde la racionalidad científica a la adopción de medidas de reducción de desastres, mediante sistemas de alerta temprana, ordenamiento del territorio y adopción de medidas curativas post desastre.

En el contexto de la Licitación Pública Estudio Básico “Actualización Planes Reguladores de Once Comunas de la Región del Libertador General Bernardo O’Higgins”, comunas con Modificaciones Sustanciales, se presentan los resultados del estudio de riesgos físicos de la comuna de Quinta de Tilcoco, realizado para actualizar y/o modificar el Plan Regulador Comunal, cumpliendo con la Ley General de Urbanismo y Construcciones y el proceso de Evaluación Ambiental Estratégica.

1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo general de este trabajo es ajustar y/o delimitar las áreas de riesgos (de acuerdo a lo señalado por el artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones) que han de ser incorporadas en la modificación del Plan Regulador Comunal de Quinta de Tilcoco.

1.2 DEFINICIONES RELEVANTES

El planeta tierra es un sistema dinámico en permanente cambio debido a una serie de procesos geológicos generados tanto en su interior (procesos Endógenos) como en superficie (procesos Exógenos). Algunos de estos cambios son repentinos y violentos (como un terremoto o la erupción de un volcán), mientras que otros son cambios lentos, que pocas veces se perciben, pero que paulatinamente van modelando nuestro entorno y también pueden ser fuente de amenazas.

La ocurrencia de eventos asociados en muchas ocasiones genera daño y devastación en poblaciones. Dentro de este contexto, se fijarán algunos términos y definiciones que permitirán entender el desarrollo de las distintas etapas del estudio. En este contexto, González de Vallejo et al. (2002) define como **riesgo** al conjunto de amenazas potenciales que pueden generar daño a personas y sus bienes (en este caso asociados a causas de origen geológico e hidrometeorológico). Esta definición, por una parte hace referencia al fenómeno propiamente tal (estudio de la amenaza potencial), y por otra, al nivel de daño que puede generar.

En el estudio de la amenaza potencial, resulta fundamental determinar el **peligro** o **peligrosidad**, y está directamente relacionado con determinar la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno en un área y tiempo determinado (González de Vallejo et al., 2002). Específicamente, determinar el tipo de fenómeno, área que abarcará, probabilidad de ocurrencia, período de retorno, magnitud, velocidad, capacidad de control y predicción, entre otros aspectos resulta fundamental para cuantificar las amenazas que pueden afectar un sector, y que en general es abordado por profesionales ligados a las ciencias de la tierra (geólogos, geógrafos físicos, geofísicos e ingenieros geólogos).

La otra arista en la definición de riesgo, es la referida al daño o a quienes afectará la ocurrencia de algún fenómeno. En este caso, se considera el grado de pérdidas y el nivel de preparación que presentan los asentamientos y se conoce como **vulnerabilidad** (UNDRP 1979, en Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial, SUBDERE 2011). Según la Organización de Naciones Unidas (ONU), la vulnerabilidad se estima como la capacidad de respuesta de las construcciones humanas a la activación de una amenaza o bien, se puede estimar el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos como consecuencia de un fenómeno de

intensidad determinada. Determinar el grado de vulnerabilidad de una población es un tema complejo, pues depende un tema complejo, dado que abarca aspectos del medio construido, aspectos sociales, económicos, ideológicos, territoriales, entre otros.

El concepto de **susceptibilidad**, que dice relación con la posibilidad que una zona se vea afectada por un determinado proceso expresada en grados cualitativos y relativos (González de Vallejo et al., 2002), y que dependerá de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos (que pueden ser intrínsecos a los propios materiales geológicos o externos). Este concepto es fundamental en el presente trabajo, pues en general los estudios de amenazas naturales a escala comunal abordan la temática desde esta perspectiva.

La susceptibilidad se puede estimar considerando el inventario de los fenómenos registrados en una zona y la superposición de los factores que los condicionan, no considerando la variable temporal ni el cálculo de la probabilidad de ocurrencia, sino que mediante una sumatoria de factores favorables a la generación del fenómeno (González de Vallejo et al., 2002).

1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

Para este trabajo, se realizó en una primera etapa una compilación de antecedentes y referencias bibliográficas referidas a la comuna, especialmente en términos de características físicas (geomorfología, geología, hidrografía e hidrogeología), y tipo de amenazas geológicas presentes.

Las zonas definidas como “Zonas de Riesgo” corresponden a zonas con distintos niveles de susceptibilidad ante un determinado proceso, evaluada como la superposición de antecedentes, no determinándose niveles de peligrosidad o probabilidad de ocurrencia en el tiempo.

Considerando que la escasa información geológica del área de estudio está disponible a escala 1:250.000, la extensión de la comuna, la identificación de áreas susceptibles a ser afectadas por algún peligro geológico se realizó a escala 1:50.000 a escala comunal, y a escala **1:5.000** en el área urbana consolidada. Por lo anterior, se debe destacar que los resultados de este trabajo no deberían ser utilizados a una escala más detallada que la de referencia, ya que esto podría llevar a errores en la planificación territorial. Para estudios con mayor nivel de detalle, se deberán hacer estudios específicos.

1.4 CONTEXTO JURÍDICO

La Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC), en su apartado 2.1.17 “Disposiciones complementarias” indica que: “En los planes reguladores podrán definirse áreas restringidas al desarrollo urbano, por constituir un riesgo potencial para los asentamientos humanos. Dichas áreas se denominarán “áreas de riesgo”, como se indica a continuación:

Por “áreas de riesgo” se entenderán aquellos territorios en los cuales, previo estudio fundado, se limite determinado tipo de construcciones por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, que requieran para su utilización la incorporación de obras de ingeniería o de otra índole, suficientes para subsanar o mitigar tales efectos. En el marco de este informe, “áreas de riesgo” son definidas como las zonas susceptibles a ser afectadas por un “peligro geológico”.

Las “zonas no edificables” corresponderán a aquellas franjas o radios de protección de obras de infraestructura peligrosa, tales como aeropuertos, helipuertos, torres de alta tensión, embalses, acueductos, oleoductos, gaseoductos, u otras similares, establecidas por el ordenamiento jurídico vigente.

De acuerdo a la OGUC, las “áreas de riesgo” se determinarán en base a las siguientes características:

- Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos.
- Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.
- Zonas con riesgo de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.
- Zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana.

Haciendo una homologación entre lo dispuesto por la OGUC en términos de las amenazas naturales que generan la definición de zonas de riesgo, se identifican procesos de Inundación por desborde de cauces y anegamientos; procesos de tipo Remociones en Masa; y procesos asociados a la actividad interna del planeta (como Sismicidad, Volcanismo y fallas geológicas). Más adelante se presenta una descripción de las amenazas antes señaladas.

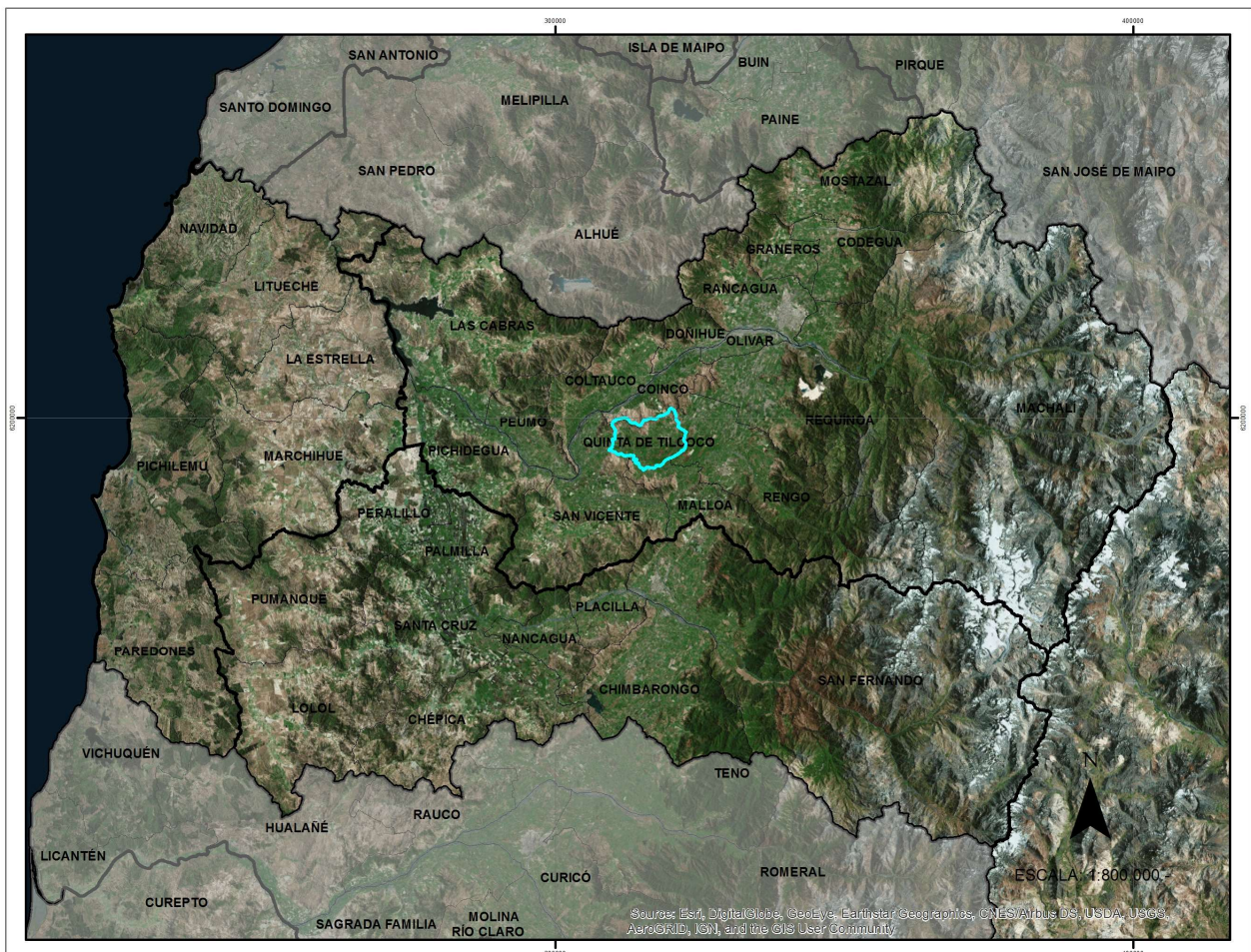
Para autorizar proyectos a emplazarse en áreas de riesgo, se requerirá que se acompañe a la respectiva solicitud de permiso de edificación un estudio fundado, elaborado por profesional especialista y aprobado por el organismo competente, que determine las acciones que deberán ejecutarse para su utilización, incluida la Evaluación de Impacto Ambiental correspondiente conforme a la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, cuando corresponda.

2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 LA COMUNA

La comuna de Quinta de Tilcoco pertenece a la Provincia de Cachapoal, en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Limita al norte con la Comuna Coinco, al sur con la Comuna de Malloa y al este con la Comuna de Rengo y al oeste con la Comuna de San Vicente (ver Figura 1. Ubicación de la comuna de Quinta de Tilcoco), referencialmente en las coordenadas 34°39' S y 71°12' W, el área urbana a una altura de 250 metros sobre el nivel del mar.

Figura n° 1: Localización de la comuna de Quinta de Tilcoco, VI región.



Fuente: Elaboración propia

2.4 GEOLOGÍA REGIONAL

Abarcando la cordillera de la Costa y las zonas de serranías, se reconocen franjas longitudinales (de oeste a este) de rocas metamórficas e intrusivas del Paleozoico. En la depresión intermedia, se identifican franjas longitudinales de rocas intrusivas, volcánicas con intercalaciones continentales y marinas (Jurásico a Cretácico), disminuyendo su edad hacia el este, donde predominan rocas volcánicas del cenozoico. Los principales centros volcánicos de la zona se ubican en el sector oriental (cordillera principal), que se presenta plegada e integrada por rocas meso-cenozoicas intruidas a su vez por granitoides del Mioceno. En la zona cordillerana (70°2' S) se reconocen centros volcánicos activos (que han manifestado alguna actividad en los últimos 10 mil años, o presente evidencias de actividad medible). Estos son los complejos volcánicos Andrés, Palomo, El Portillo y Tinguiririca, entre las ciudades San Fernando y Chépica (PROT. 2002).

Las unidades cuaternarias de la zona de estudio corresponden principalmente a depósitos fluviales, aluviales, coluviales que se emplazan fundamentalmente a lo largo de los valles.

2.5 GEOLOGÍA LOCAL

La información geológica del área de estudio es escasa. Dentro de los antecedentes recopilados y analizados para el presente trabajo, se mencionan:

- a. Avance geológico de las Hojas Rancagua – Curicó – Talca – Linares – Chanco, Concepción y Chillán. Escala 1:250.000 (Escobar, F. et al. 1977).
- b. Carta Hidrogeológica de Chile. Hoja Rancagua, VI región. 1:250.000 (Hauser, 1990).
- c. Mapa Geológico de Chile. Escala 1:1.000.000. SERNAGEOMIN.

Es importante señalar que la información citada (a) corresponde a un material inédito, mientras que en la carta hidrogeológica (b) el autor hace el alcance que en la división de las unidades geológicas se utilizaron criterios geológicos, geotécnicos y su influencia en las características hidrogeológicas e hidrológicas de las unidades (por ejemplo, porosidad, grado de fracturamiento, grado de meteorización).

En términos de unidades de roca, de más antiguo a más nuevo se reconocen:

Formación Lo Valle (Kia2). Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo Secuencias sedimentarias y volcánicas: rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas. En la Precordillera y Cordillera de la Costa, regiones III a Metropolitana: formaciones Cerrillos, Viñita (occidental) y Las Chilcas.

Depósitos Fluviales y Fluvio-Aluvionales (Q1).

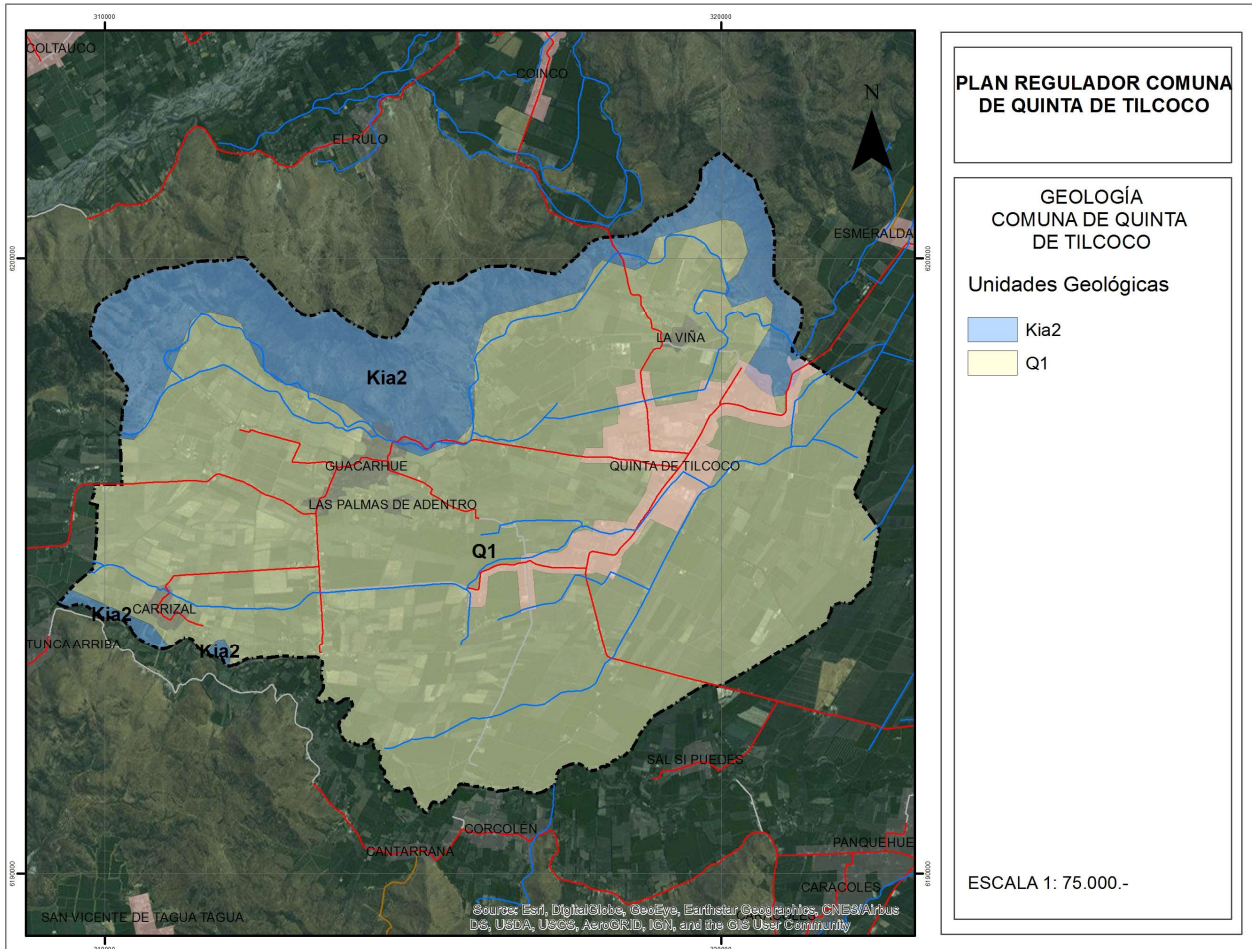
Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la Depresión Central, regiones Metropolitana a IX: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvioglaciales con intercalación de depósitos volcanoclásticos.

Depósitos Gravitacionales (Qg). Estos depósitos engloban a los materiales clásticos no consolidados producto de movimientos gravitacionales o transportados por escurrimiento de agua (Hauser, 1990). En general incluyen depósitos no diferenciados de tipo escombros de falda, coluvios, conos de deyección, etc., que rellenan las quebradas con alta pendiente (25° a 35°). Estos materiales se manifiestan al pie de las laderas en el entorno a la Formación Lo Valle (y rocas intrusivas) y litológicamente están constituidos por una mezcla caótica de fragmentos de variada composición y tamaño, en matriz fina limoarcillosa. En sectores centrales del depósito suelen predominar bloques de mayor tamaño (asociados a la energía del transporte). Los depósitos de remociones en masa suelen ser fuente para nuevas movilizaciones, especialmente por la geometría que presentan y propiedades geotécnicas. Los depósitos “activos” suelen presentar remociones periódicas en forma de flujo de detritos

asociados a precipitaciones de gran intensidad (>60 mm/24 hrs), asociados a cauces de mayor pendiente y escasa cobertura vegetal (Hauser, 1990).

La Figura 5 muestra la disposición de las unidades descritas para la comuna.

Figura n° 5: Unidades geológicas comuna Quinta de Tilcoco



Fuente: Modificada de Hauser, 1990, (en DIA (Estudio de Riesgos. Intrat S.A. 2003).

2.6 CLIMA Y VEGETACIÓN

El sector comprendido entre el borde preandino y la Cordillera de la Costa se ubica en una zona climática con notables variaciones, atribuibles a la condición topográfica local (Hauser, 1990), generándose microclimas (como ejemplo, Lolol, Peumo y San Vicente de Tagua Tagua).

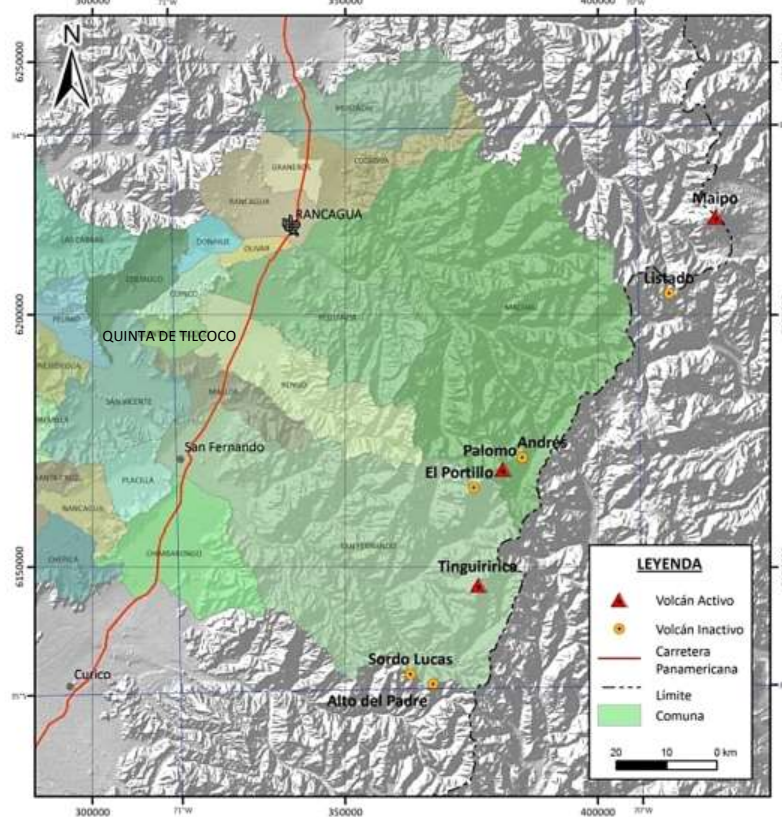
Las precipitaciones promedio son entre 600 y 850 mm, con tendencia a incrementarse hacia el oriente. Las temperaturas medias anuales se sitúan entre 12° y 14°C, que combinado a las precipitaciones y temperaturas medias, generan los siguientes ciclos estacionales: cinco meses “secos”, tres meses “templados” y cuatro meses “fríos y húmedos” (Hauser, 1990).

2.7 VOLCANISMO

Los peligros asociados a la actividad volcánica abarcan una serie de eventos y procesos que son fuente de amenaza para la población. Por un lado, durante el proceso eruptivo es frecuente la emisión de cenizas volcánicas, flujos de lava, y en ocasiones eventos más devastadores, como flujos piroclásticos o colapso de domos. Por otro lado, un proceso eruptivo suele ir acompañado de eventos secundarios y efectos colaterales que también afectan a la población, como contaminación del agua y el medio ambiente, lahares, incendios, inundaciones, entre otros.

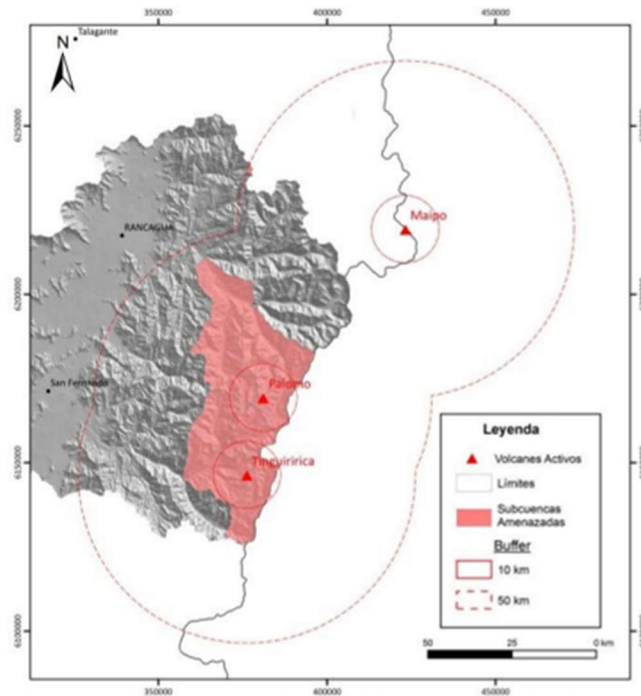
De acuerdo a la información geológica, en la región se encuentran los complejos y centros volcánicos Andrés, Palomo, El Portillo y Tinguiririca (PROT. 2012), de los cuales se consideran activos el Volcán Palomo y el complejo Volcánico Tinguiririca. La Figura 6 muestra la ubicación referencial de los volcanes en la comuna, destacándose la comuna de Quinta de Tilcoco.

Figura n° 6: Ubicación de volcanes RM v VI región



En el estudio, se evalúan los distintos productos de un evento eruptivo, así como los eventos asociados, definiéndose en cada caso límites y zonas con niveles de peligro. A partir del estudio de peligros volcánicos desarrollado para el PROT (2012), la comuna de Quinta de Tilcoco no se encuentra dentro de las áreas que pueden ser afectadas por volcanismo y sus procesos. El estudio considera en el estudio de eventos asociados al proceso eruptivo en sí en zonas proximales a los volcanes, y la evaluación de posibles eventos de tipo lahares en las zonas más distales, con un buffer de 50 kilómetros (Figura 7). En ambos casos, la comuna se encuentra fuera de las áreas de peligro por volcanismo.

Figura n° 7: Zonas y áreas definidas con peligro volcánico (se destaca área sensible a procesos Laháricos)



Fuente: PROT (2012)

2.8 SISMOS

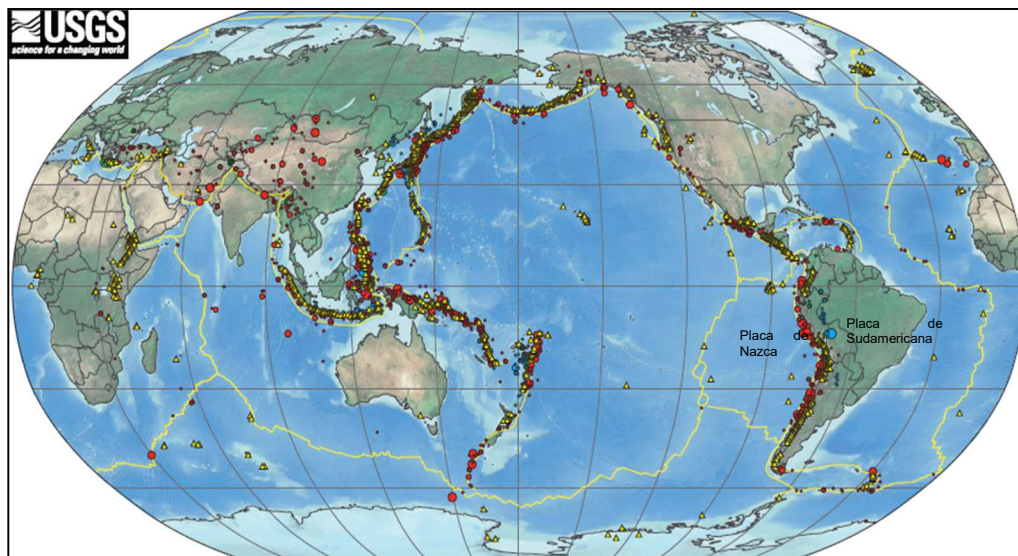
Si bien la OGUC (en su apartado 2.1.17) no menciona los sismos dentro de las amenazas que generen zonas de construcción condicionada, es sabido que Chile es uno de los países más sísmicos del mundo, y que estos fenómenos son considerados dentro de la planificación territorial a través de estudios específicos de Microzonificación Sísmica y en las Normas Chilenas de Construcción.

Como los sismos son clasificados como una amenaza de origen geológico, se presenta a continuación una breve introducción teórica respecto a los sismos y los antecedentes del área de estudio, no estando en los alcances del presente estudio evaluar el peligro sísmico de la comuna, y se considera No zonificable.

2.9 SISMOS Y FUENTES SISMOGÉNICAS

El movimiento de placas tectónicas es la responsable de la gran mayoría de sismos en el planeta (Leyton et al., 2010), y corresponden a una ruptura violenta generada por la acumulación y posterior liberación de energía acumulada por el movimiento de placas tectónicas, superando la resistencia de las rocas. Como se muestra en la Figura 15, se puede destacar la relación que existe entre algunos límites de placas tectónicas y la sismicidad histórica en la tierra (entre 1900 y 2010. Fuente USGS). Particularmente de la figura se puede observar que el borde occidental de Sudamérica se caracteriza por una banda de sismicidad activa angosta, entre 100 y 150 kilómetros.

Figura n° 8: Sismicidad histórica entre 1900 y 2010



Fuente: National Earthquake Information Center – NEIC from USGS

La subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana ocurre según un plano inclinado hacia el este con inclinación que varía entre los 15° y 30° respecto a la horizontal con un fuerte grado de acoplamiento (Madariaga, 1998) denominado zona o plano de Wadati - Benioff. La velocidad relativa de subducción entre ambas placas está entre 6 a 7 cm/año¹ (según Khazaradze y Klotz, 2003) lo que es una alta velocidad de convergencia y permite una rápida acumulación de esfuerzos consecuencia del contacto dinámico de estas placas dando lugar a la alta sismicidad que caracteriza a Chile y Perú (Ruiz y Saragoni, 2005). El empuje de la placa de Nazca en dirección al Este se vería favorecida por su composición y edad (placa oceánica, de 35 millones de años en la zona central), siendo comparativamente más densa que la placa continental, por lo que tendería a introducirse por debajo la corteza continental menos densa de la placa Sudamericana.

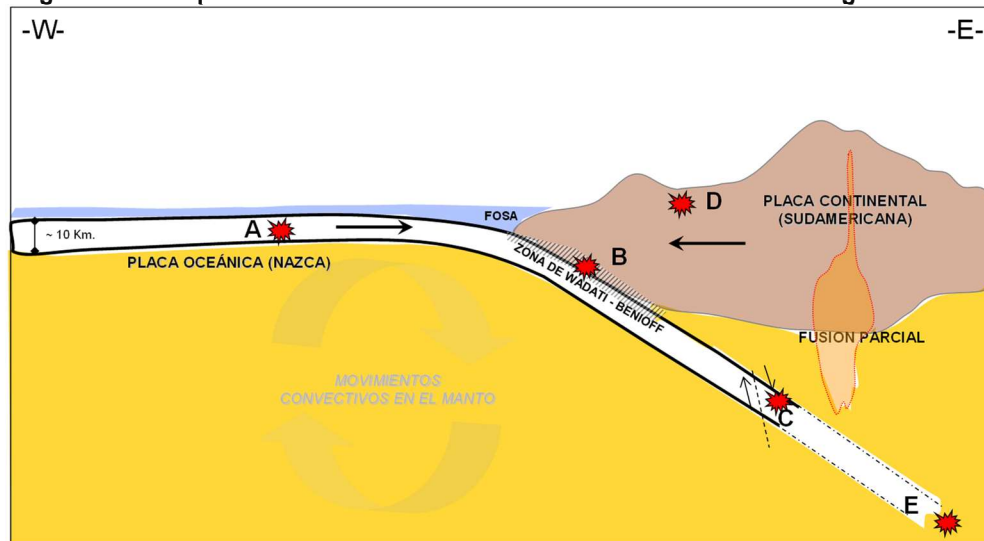
Por otra parte, el ángulo de subducción de la placa de Nazca no sería único en el margen Pacífico de Chile. Barazangi e Isacks, 1976 (en Madariaga, 1998) demostraron que la zona de subducción de Nazca se divide en cinco segmentos de norte a sur, de longitud variable, y que poseerían ángulos de subducción muy diferentes. Entre los 15° y 27° de lat. Sur, el ángulo de subducción oscilaría entre los 25° y 30° de inclinación (Norte Grande de Chile), mientras que los 27° y 33° lat. Sur, la Placa de Nazca descendería con un ángulo de 12° a 18° aproximadamente. En la zona de los valles transversales, entre los 26° y 33° lat. Sur, la placa de Nazca parece

¹ Velocidad variable según distintos autores. 6.6 cm/año (Kendrick et al., 2003); 8.4 cm/año (DeMets et al., 1990); 8 cm/año (DeMets et al., 1994).

pegarse bajo el continente sudamericano y descendería bajo la Cordillera de los Andes y Argentina con un ángulo de solo unos 10° . Finalmente, en la región del Valle Central, a partir de 33° lat. Sur, el ángulo nuevamente estaría cercano a los 30° de inclinación.

Perfiles transversales al margen de Chile (disponibles en el Centro Sismológico Nacional, www.sismologia.cl), permiten observar que la sismicidad se concentra principalmente entre los 5 y 200 kilómetros de profundidad (en la zona de Wadati - Benioff), lo que además permite deducir el ángulo de subducción en las distintas zonas. La liberación de tensiones y deformaciones a lo largo del plano de Benioff, generan lo que se conocen como **sismos interplaca** (Madariaga, 1998) o sismos en la zona de Wadati - Benioff (tipo B de Figura 16), y serían los más comunes en Chile. El mecanismo de generación de este tipo de sismos, estaría asociado a las rugosidades que existen en ambos materiales generan zonas “trabadas o enganchadas”, las cuales se ven superadas por las resistencias de los materiales a deformaciones liberando energía (destrabándose). Este tipo de sismos se reconocen desde la fosa hasta unos 50 a 60 kilómetros de profundidad (Tichelaar y Ruff, 1993, en Leyton et al., 2010; Belmonte-Pool, 1997).

Figura n° 9: Esquema de subducción de Chile mostrando fuentes sismogénicas



Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, la sismicidad en el margen de Chile no sólo existe en el contacto entre ambas placas tectónicas. Debido a los esfuerzos a que están sometidas la placas de Nazca y Sudamericana producto del movimiento convergente, también existen sismos en el interior mismo de las placas conocidos como **sismos intraplaca** (tipo A, C, D y E de Figura 16).

Los mecanismos de liberación de energía en los distintos tipos de sismos son complejos. En el caso de los sismos tipo A (sismos intraplaca oceánica), los materiales de la placa de Nazca (más jóvenes) se flexionan y doblan previamente al proceso de subducción, lo que genera campos extensionales (de estiramiento) los cuales reaccionan producto del choque de las placas, generando reacciones de liberación de energía de tipo “carga – descarga”. Esta fuente sismogénica también es conocida como “outer rise” pues ocurren a distancias mayores a 150 kilómetros de la costa (Leyton et al., 2010).

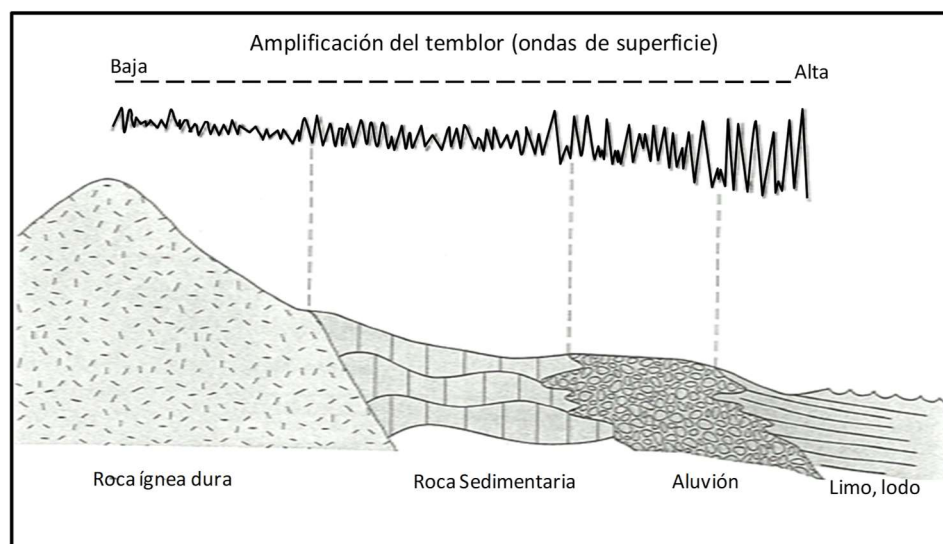
En el caso de los **sismos intraplaca** tipo C (también denominados sismos de profundidades intermedias) el mecanismo tiende a ser de tipo fracturamiento (en general tensional y en algunos casos compresional) debido a la flexión de la placa subductante. En otras palabras, se dobla y quiebra por su propio peso (ver Figura 16). Esta actividad sísmica se ha observado desde los 50 kilómetros hasta los 200 kilómetros de profundidad (Leyton et al., 2010), existiendo también registros de sismos intraplaca profundos (tipo E) en la zona norte del Chile (alrededor de los 22° Lat. Sur), entre 500 y 600 km de profundidad bajo la Argentina (Madariaga, 1998).

La sismicidad en la parte superior de la placa Sudamericana a baja profundidad (menos de 30 kilómetros) se conoce como **sismos corticales** (tipo D de Figura 16). Estos sismos serían producto del esfuerzo inducido por la subducción, que a la vez contribuye a la generación de relieve (es decir, la placa continental, más antigua se deforma producto de las presiones que ejerce la placa oceánica). Esta acumulación de energía se libera en general asociada a fallas superficiales que pueden tener movimientos normales, inversos y de rumbo, que responden a campos de esfuerzos compresivos o extensivos.

Para el estudio de los sismos como un tipo de peligro de origen geológico, es necesario considerar por un lado aspectos relacionados con el fenómeno propiamente tal así como sus efectos secundarios. Dentro de los parámetros propios del sismo, se considera su *magnitud* (relacionada con el tamaño del sismo), el *largo de la zona de ruptura* (entendida como el área que abarca la zona en que la placa se rompe), el *período de retorno* (años que transcurren entre dos eventos de similares características en un área determinada), *aceleraciones máximas* alcanzadas y la *intensidad* de un sismo, que corresponde a una escala cualitativa que describe la percepción subjetiva de las personas ante un sismo en un lugar específico y dependerá de los tipos de suelos y daños registrados. Se sabe que la naturaleza de los materiales locales y la estructura geológica influyen en gran medida en el movimiento del suelo durante un sismo (Keller et al., 2004). Se ha observado que las condiciones locales, como tipo de suelos, topografía, profundidad del nivel freático, entre otras, pueden suponer respuestas sísmicas diferentes dentro de un entorno geográfico considerado (González de Vallejo et al., 2002) y se denomina “efecto de sitio” o “efectos locales”. De esta forma, para un mismo terremoto y dependiendo del tipo de terreno donde se encuentra ubicado el observador, las ondas sísmicas pueden amplificarse durante el desarrollo del terremoto generándose más daño en algunos sectores que en otros.

En términos geológicos es posible hacer una diferenciación general de los suelos de fundación basada en su nivel de compactación y nivel de consolidación (Keller et al., 2004), pudiendo hacerse una relación general con algunos materiales geológicos (Figura 17). Hay que destacar que un estudio de peligro sísmico incluye muchas aristas que no están dentro del alcance del presente estudio, sin embargo, se presentan estudios anteriores a escala regional.

Figura n° 10: Relación general entre el material del sustrato y la amplificación de la vibración durante un terremoto



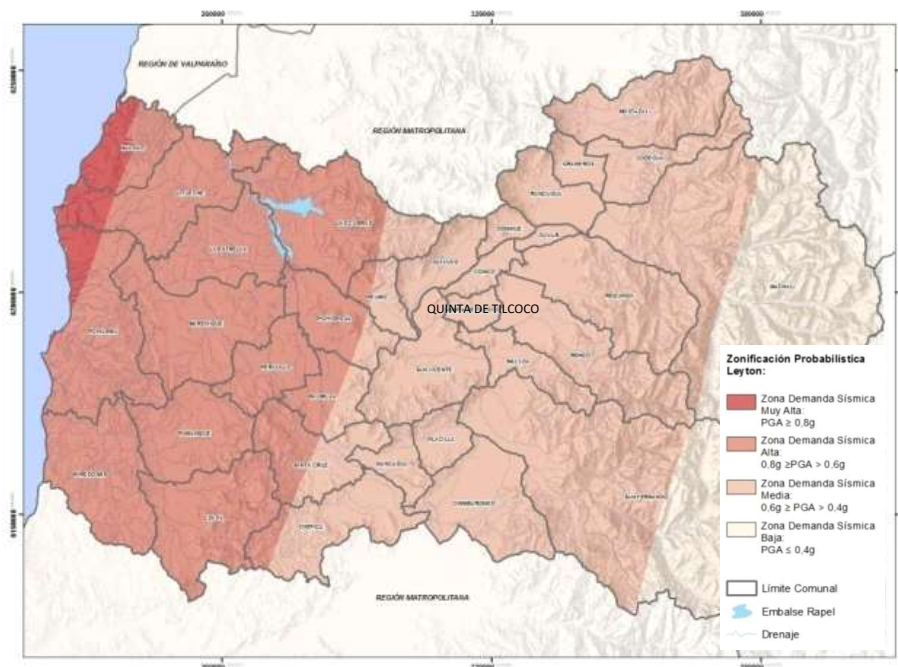
Fuente: Modificada de Keller and Blodgett, 2004.

2.10 ANTECEDENTES SÍSMICOS EN LA REGIÓN

Existen numerosos ejemplos de sismos que han provocado significativos daños socioeconómicos en la región central de Chile (PROT, 2012). El 3 de marzo de 1985 un sismo de $M_w=8.0$ con hipocentro a 17 km de profundidad, y epicentro cercano a Laguna Verde en la Región de Valparaíso, dejó 177 víctimas fatales y más de mil millones de dólares en pérdidas (El Mercurio 2010). El sismo de mayor magnitud registrado en las últimas tres décadas en Chile central ocurrió en febrero de 2010 cerca de Cobquecura, en la Región del Maule. Este evento tuvo su epicentro en el mar y registró una magnitud $M_w=8.8$, registrándose cuantiosos daños a consecuencia directa de este terremoto y el posterior tsunami.

La Región del Libertador General Bernardo O'Higgins ha sido afectada tanto por sismos con epicentros lejanos como por sismos con epicentros en su territorio. El sismo de mayor magnitud en ésta región ocurrió cerca del Embalse Rapel, en marzo de 1985, y tuvo una magnitud $M_s=7.5$. Numerosos sismos mayores a 5 grados Richter se registraron el año 2010, probablemente asociados al gran terremoto ocurrido en febrero de ese año en la costa de la Región del Maule. En base a los registros sísmicos desde la década de los setenta, en el contexto del PROT se analiza la amenaza sísmica en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, donde realiza un análisis probabilístico (Leyton et al. 2010) que permite definir y caracterizar las fuentes sismogénicas relevantes para el área de estudio y zonificar el territorio a partir la demanda sísmica (ver Figura 11).

Figura n° 11: Imagen de Mapa de Peligro Sísmico Probabilístico.

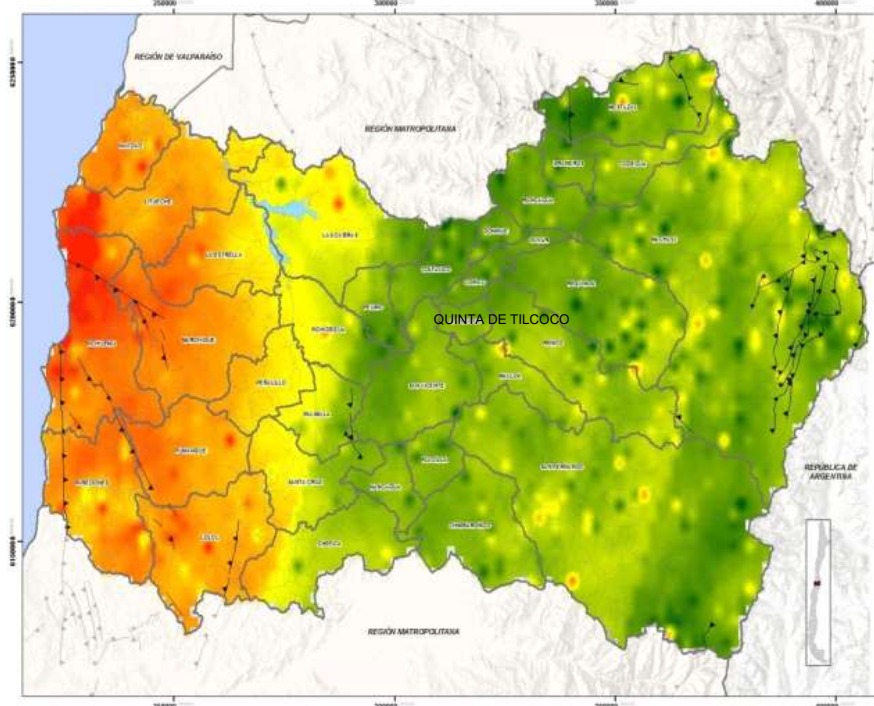


Fuente: Leyton et al., 2010

La zonificación sísmica de un territorio por lo general se presenta en valores de PGA (Peak Ground Acceleration o aceleración horizontal máxima), la cual a su vez se expresa en un porcentaje de la aceleración de gravedad (% g). Existen muchos estudios en los cuales se ha determinado la peligrosidad sísmica para Chile. Como ejemplo, la Norma Chilena NCh433 de 1996 presenta una zonificación desarrollada a partir de un análisis histórico-determinístico, se definen tres zonas sísmicas presentes en el país, definidas de acuerdo a la cercanía con región de subducción, con valores de aceleración máxima efectiva del suelo de 0.2g para la zona cordillerana, 0.3g para la zona central, y 0.4g para la zona 3 costera. La modificación a la NCh 422 posterior al sismo del 2010 (D.S. 61), señala un ajuste a las zonas por condición de suelos. De acuerdo a los resultados del PROT (2012) la comuna de Quinta de Tilcoco se encuentra en la franja longitudinal que tiene Demanda Sísmica Media, valorizada entre $0.6g \geq PGA > 0.4g$ (Figura 12).

La Figura 19 muestra el Mapa de amenaza sísmica para la VI región (PROT, 2012), resultado del estudio de peligro sísmico realizado.

Figura n° 12: Imagen del Mapa de Amenaza Sísmica.



Fuente: PROT, 2012.

Como es posible observar, la comuna de Quinta de Tilcoco se encuentra en una zona de bajo grado de amenaza sísmica. Sin embargo, no se debe confundir lo anterior con la respuesta particular de los terrenos ante un sismo. En este tema, y utilizando conceptualmente el modelo conceptual propuesto por Keller et al. (2004) y las unidades geológicas presentes en la comuna, es esperable un mayor grado de amplificación sísmica en los depósitos cuaternarios (depósitos fluviales y aluviales saturados, depósitos de remociones en masa y abanicos), donde preferentemente se ubican las zonas pobladas. Como prueba de lo anterior, el evento del 27 de febrero del 2010 causó muchos daños en viviendas en la zona de estudio.

2.11 FALLAS GEOLÓGICAS

Según lo indicado en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC), en su apartado 2.1.17 se deben incluir zonas con peligro de ser afectadas por “fallas geológicas”, no especificándose de qué forma deben ser consideradas. Dentro de los efectos que pueden generar los sismos, está la rotura de la superficie del terreno por desplazamientos de fallas activas (González de Vallejo et al., 2002) o deformaciones superficiales inducidas por fallas inactivas que generarán un comportamiento distinto en la zona por la cual atraviesan (Galdames y Saragoni, 2002).

La presencia de fallas geológicas a lo largo del territorio nacional es frecuente, por lo tanto algunas zonas urbanas se encuentran emplazadas sobre o en el entorno a estas estructuras. La presencia de una falla geológica permite suponer una serie de posibles consecuencias, como por ejemplo un cambio en las unidades geológicas, presencia de zonas de cizalle o macizos rocosos con menor calidad geotécnica, en algunos casos posible actividad sísmica asociada a fallas activas, o reactivación de fallas producto de grandes sismos (Fariás et al., 2011).

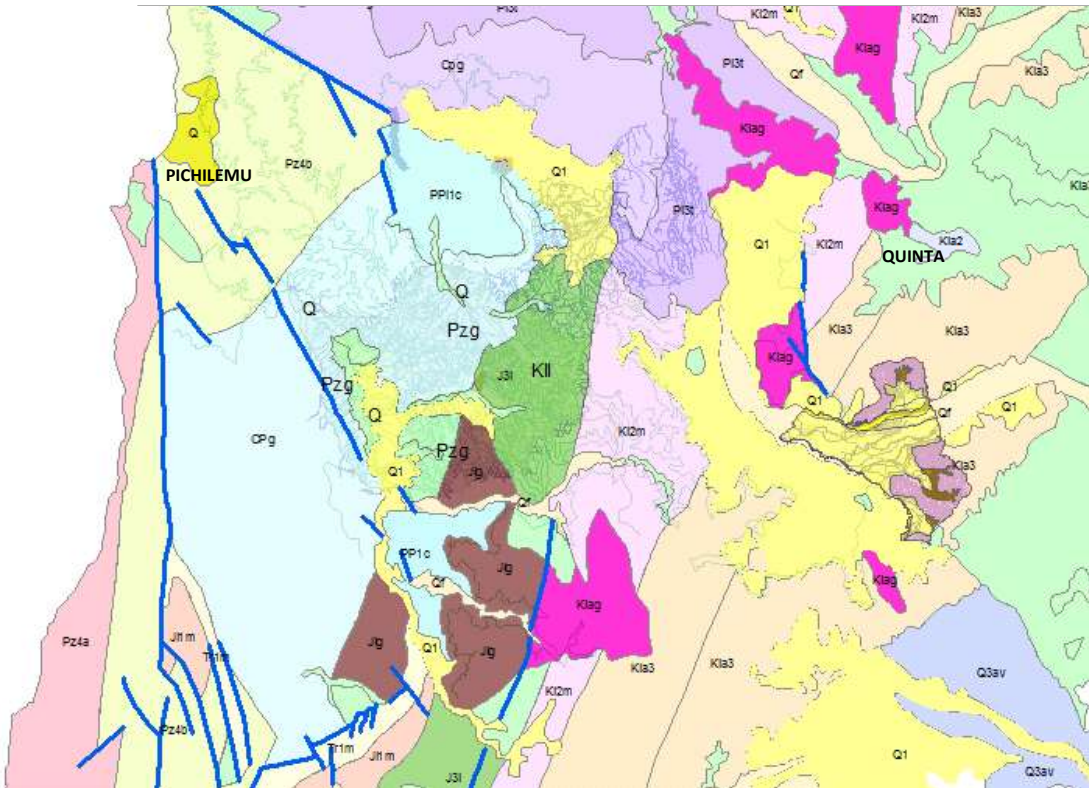
Los límites para definir si una falla es activa pueden ser variables, por ejemplo en función de las condiciones tectónicas, o a partir de las leyes específicas de cada país, o en función de la vida útil y niveles de seguridad de un proyecto específico. En términos geológicos una falla activa es aquella falla que ha presentado movimiento durante el régimen tectónico actual (Sabaj, 2008), mientras que en ingeniería geológica, una falla activa es la que ha presentado movimiento en los últimos 10.000 años (Holoceno). Según Kerr et al. (2003), una falla activa es aquella que ha presentado movimiento repetidamente en el pasado y su historia indica que podría presentarlo nuevamente. En Chile existe escasa información de la génesis y actividad sísmica de cortical (Barrientos et al., 2004) o asociada a fallas, existiendo algunos casos emblemáticos como el sismo de Aysén del año 2007, con una Magnitud Mw 6,2 (Sepúlveda y Serey, 2009). No obstante la carencia de información acerca de sismos superficiales en Chile, existen zonas de reconocida actividad sísmica de tipo superficial como la zona cordillerana de Chile Central y el Altiplano (Barrientos y Kausel, 1993).

Una interrogante que aparece después de cada sismo importante, es si existe movimiento de fallas inactivas durante grandes terremotos (como ejemplo sismo de Antofagasta de 1995 (Delouis et al., 1997) o con la falla Marga-Marga (Galdames y Saragoni, 2002; Muñoz et al., 2010), o con el sismo Mw 8.8 del 27 de Febrero de 2010, donde se reconocieron desplazamientos co-sísmicos y deformación en superficie (Arriagada et al., 2011), así como reactivación de fallas geológicas al interior del continente manifestada de manera sísmica (con el terremoto de Pichilemu del 11 de marzo de 2010, Farías et al., 2011).

A partir de lo descrito anteriormente, independiente de si una falla se considera activa o inactiva, en su evaluación se debiesen incluir todos sus posibles efectos (especialmente en áreas urbanas) y de esta forma dar cumplimiento con la ley vigente en Chile que exige la consideración de áreas de riesgo por presencia de fallas geológicas (en el artículo 2.1.17 de la O.G.U.C.). Dentro de los posibles efectos, se deberían considerar desplazamientos y deformación durante un sismo, ya sea mediante la rotura de la superficie del terreno por desplazamientos de fallas activas (González de Vallejo et al., 2002) o mediante deformaciones inducidas por fallas inactivas que generarán un comportamiento distinto en la zona por la cual atraviesan (Galdames y Saragoni, 2002). Muñoz (2013) propone una metodología que permita determinar la susceptibilidad de respuesta sísmica de zonas aledañas a fallas mayores en áreas urbanas, entendida como zonas sensibles a presentar posibles deformaciones superficiales, rupturas superficiales o una mayor intensidad ante sismos. La metodología considera la ponderación de antecedentes (físicos, geológicos, daños históricos, estudios anteriores, entre otros) que orientarían la necesidad de estudios más profundos. Lo anterior no debe confundirse con el estudio de la peligrosidad sísmica que puede presentar una falla activa (asociada a sismicidad cortical), y que se estudia siguiendo las etapas típicas de un estudio de peligro sísmico (evaluando la sismicidad histórica, determinando la productividad sísmica de la falla, y estimando magnitudes máximas).

A escala regional (Mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000) indica la presencia de fallas en la cordillera de la Costa con rumbo NS y NW (atravesando el basamento metamórfico Paleozoico) y algunas fallas afectando la secuencia de rocas Jurásicas y Cretácicas de la zona Central (rumbo NS y NNE). En el caso de la comuna de Quinta de Tilcoco, la información geológica local y regional muestra un lineamiento NW a NS al norte de la comuna, no siendo reconocida en las zonas de análisis (Figura 20).

Figura n° 13: Modificado del Mapa geológico de Chile (escala 1: 1.100.000) mostrando fallas



Fuente: Modificado de Mapa geológico de Chile 1:1.000.000.

3. ANTECEDENTES TEÓRICOS

A partir de los antecedentes expuestos, se resumen a continuación las amenazas de origen geológico e hidrometeorológico que pudiesen afectar a la comuna de Quinta de Tilcoco, y que se ajusten a lo exigido por la OGUC (2.1.17).

En aquellos casos en que la potencial amenaza no se haya manifestado en la comuna, no sea zonificable, o esté fuera de los alcances del estudio, se presenta una descripción a partir de los antecedentes. En aquellos casos en que la amenaza esté presente en la comuna, sea zonificable y que estén dentro del alcance del estudio, se presentan áreas de riesgo o zonas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de algún proceso.

Dentro de las potenciales amenazas de origen geológico e hidrometeorológicos que serán estudiados, se consideran fenómenos asociados a Procesos Endógenos (como el volcanismo, la sismicidad y fallas geológicas), además de fenómenos relacionados con Procesos Exógenos, tales como movimientos de material remociones en masa e inundaciones.

3.1 REMOCIONES EN MASA

3.2 DEFINICIÓN Y TIPO DE REMOCIONES EN MASA

Los procesos que involucran la movilización de materiales (suelo, rocas o ambos) por efectos de la gravedad se denominan genéricamente **remociones en masa** (Cruden, 1991). Constituyen un conjunto de amenazas que resultan ser frecuentes en la naturaleza y que en algunas ocasiones generan gran daño a la población. El término remoción en masa, por lo general se refiere a movimientos de laderas que ocurren pendiente abajo de un determinado volumen de material, en los cuales el factor gravedad está siempre presente, por lo que también se conocen como procesos gravitacionales. Para incorporar las remociones en masa en la planificación del territorio, es necesario diferenciarlas y caracterizarlas (tipo, velocidad del movimiento, material afectado). Esto permitiría orientar medidas correctivas adecuadas, o dimensionar su real impacto en la población.

La clasificación de los distintos fenómenos de remoción en masa se basa por un lado en el **tipo de movimiento** que presentan, y por otro lado, en la **naturaleza de los materiales** involucrados (Varnes, 1978 en Tabla 1). Los movimientos más frecuentes son de tipo deslizamientos (superficiales y profundos), desprendimientos, volcamientos, mecanismos tipo flujo y extensiones laterales. Mientras que la naturaleza de los materiales afectados puede ser muy variable entre rocas y suelo o combinación de ambos, incluyendo en ocasiones fragmentos material orgánico, troncos de árboles e incluso escombros y basura. Dentro de la características de cada tipo de remoción en masa, es importante considerar si presentan o no control de estructuras geológicas, el mecanismo de falla que predomina y las velocidades a las que ocurren. Existen remociones en masa extremadamente rápidas (5 m/s según la clasificación de Cruden y Varnes, 1996), como por ejemplo caídas de rocas, hasta movimientos extremadamente lentos (velocidad típica de 16 mm/año según la clasificación de Cruden y Varnes, 1996), como por ejemplo fenómenos de reptación.

Tabla n° 1: Clasificación de Remociones en Masa

Tipo de movimiento		Tipo de material		
Caída		Roca	Suelo	
Toppling (volcamiento)				
Deslizamiento	Rotacional		Grano Grueso (detritos, <80% partículas <2mm)	Grano fino (barro, >80% partículas <2mm)
	Traslacional			
Extensiones laterales				
Flujos				
Complejos				

Fuente: Varnes, 1978.

La velocidad de una remoción en masa junto al volumen del material movilizado, condicionan en gran medida la capacidad de control que existe sobre el proceso mediante obras de contención o medidas de mitigación.

Dentro de las remociones en masa más comunes en la zona central de Chile para sectores no montañosos, se reconocen desprendimientos de material (rocas, suelos o mezclas, incluyendo en algunos casos vegetación), deslizamientos (ya sea de roca o material disgregado) y los mecanismos de tipo flujo (barro y detritos). En los sectores montañosos y de la cordillera principal, se incluyen avalanchas de roca, lahares y flujos asociados a volcanismo.

Las caídas o desprendimientos de bloques de roca o masas de roca son eventos muy rápidos (González de Vallejo et al., 2002) en los cuales el material movilizado se separa del macizo rocoso que lo contiene, viéndose favorecidos por la existencia de planos de debilidad y por laderas con geometrías irregulares. El material desprendido podrá alcanzar el pie del talud mediante caída libre (tipo (a1) y (a3) de Figura 9), ruedo y rebote (tipo (a2) de Figura 14) o una combinación de ellas.

La trayectoria del material, dependerá principalmente de la forma del bloque y del ángulo de pendiente del talud (Lara, 2007).

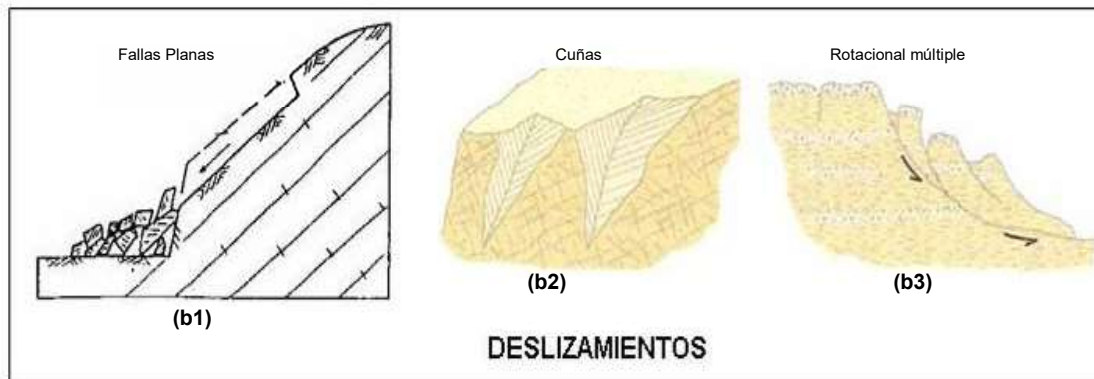
Figura n° 14: Remociones en Masa de tipo Caídas de Rocas



Fuente: Modificado de González de Vallejo et al. 2002

Los deslizamientos corresponden a movimientos de masas ladera abajo que ocurren a través de una o más superficies de cizalle predefinidas, ya sean discontinuidades del macizo rocoso o a partir de las condiciones de resistencia de los suelos que definirán su fallamiento. Los movimientos más comunes que presentan los deslizamientos, son de tipo traslacionales y rotacionales (Varnes, 1978). Los primeros, tienen lugar en superficies preexistentes más o menos planas (por ejemplo diaclasas, fallas o planos de estratificación), y donde la masa a deslizar supera la resistencia que le ocasiona la discontinuidad (González de Vallejo et al., 2002). Dentro de los mecanismos más comunes asociados a deslizamientos traslacionales de bloques rígidos (roca o suelo duro) se reconocen deslizamientos tipo cuña y falla plana (ver Figura 10 – casos b1 y b2). En el caso de los deslizamientos de tipo rotacionales (b3 de Figura 10), la superficie de rotura (que puede ser superficial, profunda, única o múltiples) queda definida por superficies curvas y cóncavas (González de Vallejo et al., 2002) y son frecuentes en materiales homogéneos y de baja calidad geotécnica (como arenas o suelos) o rellenos artificiales (botaderos de material estéril y lastre en minería, rípios de lixiviación).

Figura n° 15: Remociones en Masa de tipo Deslizamientos

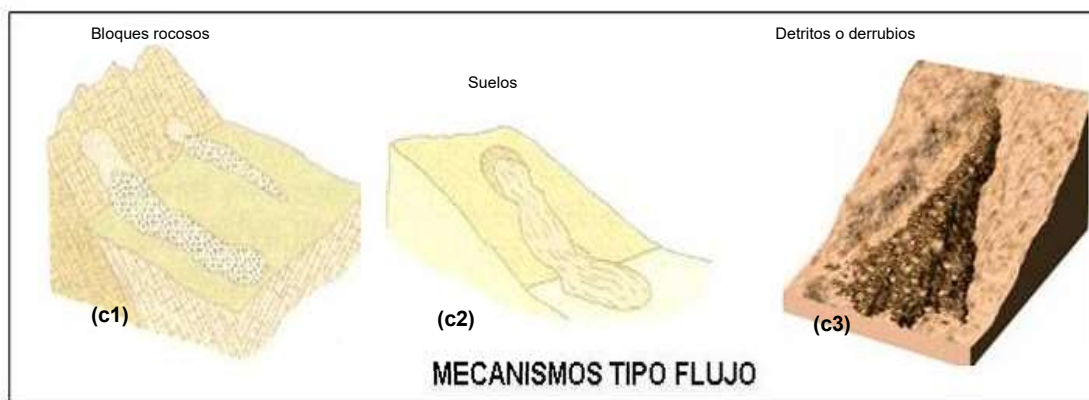


Fuente: Modificado de González de Vallejo et al. 2002

Otro tipo de mecanismo frecuente son los flujos (tipo c de Figura 16), y que corresponden a movimientos continuos, en que el material se comporta de manera similar a un líquido viscoso saturado en agua (Varnes, 1978). Existen distintas clasificaciones para los flujos, basadas en el tipo de material movilizado (barro, detritos o fragmentos rocosos) y en la proporción de líquido y sólido que presenten. Los eventos más comunes en Chile Central son los flujos de barro y detritos, y cuya ocurrencia dependerá por un lado de existencia de material disponible (generalmente disgregado) que pueda ser arrastrado ladera abajo, y la presencia de algún agente (comúnmente agua) que lo ponga en movimiento.

En general estos mecanismos son poco profundos en comparación con el área que pueden abarcar, y pueden tener lugar en laderas con pendientes incluso menores a 10° (González de Vallejo et al., 2002). Su transporte tiende en un principio a ser dominado por las altas pendientes y luego a canalizarse por cauces preexistentes, mediante el cual el fluido va perdiendo velocidad a medida que avanza por sobre la topografía, hasta que el ángulo de fricción interna del material es mayor o igual al de la pendiente (Selby, 1993).

Figura n° 16: Remociones en Masa de tipo Flujo



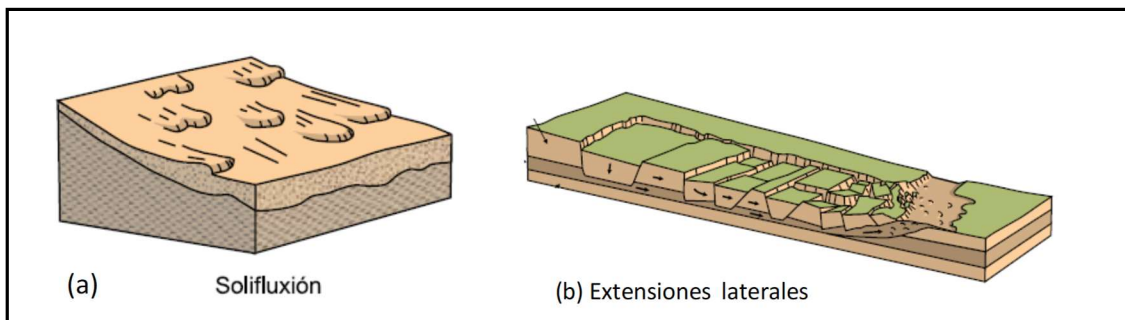
Fuente: Modificado de González de Vallejo et al. 2002

En la categoría de remociones en masa tipo flujo de baja velocidad, menor a 1,5 m/día, se identifican procesos de Soliflucción y reptación de suelo (Varnes, 1978), que afectan principalmente a materiales compuestos por menos de un 80% de arenas y más finos, y en los cuales el movimiento se inicia sin la existencia de una superficie de

rotura previa (ver Figura 12 (a)). También se presenta un tipo de movimiento denominado “extensiones o propagaciones laterales” (o *lateral spreads*, ejemplificados en la Figura 12 (b)). La extensión lateral de una masa de suelo o roca, genera un deslizamiento traslacional sobre superficies asociadas por lo general a niveles de saturación cercanos a superficie, generándose un agrietamiento de la superficie, y como consecuencia la subsidencia general de la masa de material fracturado. Las grietas permiten el ascenso de agua desde los sedimentos saturados (y por consecuencia, daños en la infraestructura que soportan). En estos últimos, la superficie de cizalle está poco definida y suele ser subparalela a superficie, lo que genera el agrietamiento.

Estos fenómenos son frecuentes en terrenos de bordes de ríos, lagos y deltas, donde se conjugan materiales limo-arcillosos y arenosos que constituyen buenos reservorios de agua genera. Además, pueden ser lentos o rápidos. En el último caso, asociados a la licuefacción de suelos producto de sismos.

Figura n° 17: Remociones en Masa de solifluxión y extensiones laterales



Fuente: Modificado de Varnes (1978)

Vale la pena señalar que pueden existir otras sub clasificaciones de remociones en masa que dependerán tanto del tipo de material afectado, tipo de movimiento, velocidad que alcanzan y geometría del depósito.

3.3 FACTORES CONDICIONANTES Y DESENCADENANTES

Existen factores o características del medio que predisponen o favorecen la movilización de materiales. Estos se conocen como **Factores Condicionantes** y están relacionados con la naturaleza, estructura y composición del terreno. Por ejemplo pendientes y topografía abrupta de laderas, o tipo y calidad de los materiales, presencia o ausencia de vegetación, presencia de agua, entre otros (González de Vallejo et al., 2002). De la misma forma, existen factores que modifican la estabilidad preexistente del terreno, como construcciones, caminos, cortes, sismos y lluvias intensas, que desencadenan o gatillan la ocurrencia de un evento y son conocidos como **Factores Desencadenantes**.

Dentro de los factores condicionantes más comunes para distintos tipos de remociones en masa (Hauser, 1993; González de Vallejo et al., 2002; Lara, 2007; Muñoz, 2013), se consideran los siguientes:

- **Geología y geotecnia.** Las características geológicas de un sector, son usualmente descritas a partir de los tipos de materiales presentes (distintas litologías, sedimentos y coberturas de suelo), por la disposición que presentan (orientación, estratificación, contactos entre unidades, presencia de fallas o sistemas de diaclasas). Sin embargo, para estudiar las remociones en masa no sólo es importante conocer la composición y tipo de masa sensible a ser movilizadas, sino que también como se espera que se comporte en términos mecánicos y resistentes. Es importante considerar el grado de alteración y meteorización de los macizos rocosos, así como caracterizar su fábrica estructural (tipo, disposición y condición de las discontinuidades), y estimar u obtener valores de la resistencia de la roca intacta, del macizo y de sus discontinuidades. También es importante describir el comportamiento de los materiales ante la presencia de agua (porosidad, permeabilidad, humedad, densidad de los materiales que lo componen).
- **Geomorfología.** Las condiciones geomorfológicas de un área estarán gobernadas por los distintos procesos que modelan la superficie, y pueden ser descritas en términos de rangos de pendientes, topografía presente, a altura de las laderas y la forma que presentan (laderas regulares o irregulares, con pendiente positiva o negativa). De esta forma, topografías escarpadas, con altas pendientes, propiciarán la generación de varios tipos de remociones en masa (como flujos, deslizamientos y caídas), favorecidas por la acción gravitatoria. Los rangos críticos de pendientes para cada tipo de remoción en masa son variables. Hauser (1993) señala que pendientes mayores a 25° en las cabeceras de las hoyas hidrográficas serían favorables para el desarrollo de flujos o aluviones, mientras que Sauret (1987) en Sepúlveda (1998) señala que aluviones podrían generarse en pendientes menores (que no sobrepasen los 15°). Laderas en roca con pendientes mayores a 35° serían susceptibles a que se generen deslizamientos, y en un caso sísmico, ésta pendiente podría ser sólo mayor que 15° (Keefer, 1984). En el caso de caídas de rocas, podrían generarse ante un sismo a partir de un macizo rocoso fracturado, meteorizado, y poco resistentes, en zonas donde los taludes son mayores o iguales a 40° (Keefer, 1984). En algunos tipos de remoción en masa, donde es relevante el espesor de suelo y cobertura vegetal, se consideran además aspectos geográficos del área, como por ejemplo orientación con respecto al norte lo que puede finalmente influir por ejemplo en el grado de humedad de la ladera y exposición al sol.
- **Clima y vegetación.** Las condiciones climáticas y cubierta vegetal influyen directamente en el comportamiento del terreno. Una ladera expuesta a precipitaciones, viento, cambios de temperatura y radiación solar, tendrá mayores niveles de desintegración y como consecuencia presencia de materiales disgregados en superficie que pueden moverse ladera abajo. En climas húmedos, las laderas generarán mayores espesores de suelo y horizontes orgánicos cubriendo la superficie. Esto por un lado reduce la disponibilidad de materiales, o actúa reteniendo el material que se moviliza. Sin embargo, genera coberturas de baja calidad geotécnica. Para evaluar cómo el clima y la vegetación condicionan la ocurrencia de remociones en masa, se hace necesario además conocer las características particulares del área a evaluar y los fenómenos asociados.
- **Condiciones hidrológicas e hidrogeológicas.** El agua, tanto en superficie como por debajo de ella, condiciona en forma directa e indirecta la generación de remociones. La forma y distribución de sistemas de drenaje en superficie, así características de caudales, escorrentías, infiltración y posición del nivel freático, además de

propiedades de permeabilidad y porosidad de las unidades, influyen en la incorporación de agua en suelos y macizos rocosos (Lara, 2007). El agua juega un papel negativo en la resistencia de los materiales, ya que por un lado, genera presiones intersticiales lo que reduce la resistencia, aumenta los esfuerzos de corte por el incremento del peso del terreno y genera fuerzas desestabilizadoras en grietas y discontinuidades (González de Vallejo et al., 2002) y reduce la resistencia al corte de discontinuidades al lavar los rellenos de estas.

- **Intervención antrópica.** El hombre genera de forma planificada o no, modificaciones en el medio. La generación de obras constructivas, cortes, terraplenes, plataformas, obras de minería, etc., en muchas ocasiones deja las laderas más susceptibles a la ocurrencia de eventos producto de diseños mal concebidos, con ángulos mayores a los que es capaz de resistir en forma natural los materiales, o que no consideran el control estructural que tendrá un talud de forma natural. En algunas ocasiones, el resultado son geometrías de laderas irregulares o con pendientes negativas que finalmente causarán desestabilización. Sin embargo, también existen obras antrópicas robustas, que disminuirán la susceptibilidad ante remociones en masa, y esa consideración será incluida y abordada en el presente trabajo. Cabe señalar, que al igual que las precipitaciones, la intervención antrópica en algunos casos resulta el agente desencadenante de un evento.

A diferencia de los factores condicionantes, los **factores desencadenantes** corresponden a agentes activos y pueden ser considerados como factores externos que provocan o gatillan inestabilidades (González de Vallejo et al., 2002). En la mayoría de los casos, son varias causas las que finalmente contribuyen al movimiento de una ladera, aunque con frecuencia se atribuyen a sismos o precipitaciones intensas, sin embargo, deben existir las condiciones predeterminadas para su ocurrencia.

Dentro de los factores desencadenantes, los más comunes se citan:

- **Condiciones hidrológicas e hidrogeológicas.** Las precipitaciones y aportes de agua cambia las condiciones hidrológicas en los terrenos produciendo: variación en las presiones intersticiales, en el peso del terreno, cambios en los niveles de saturación, pérdida de resistencia de los materiales, además de un aumento en la erosión de las laderas o en algunos casos, socavamiento de terrenos. Según González de Vallejo et al. (2002), el desencadenamiento de remociones en masa por causas meteorológicas y climáticas está relacionado fundamentalmente con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones, lo que implica considerar la respuesta del terreno ante lluvias intensas durante horas o días, su respuesta estacional y en ciclos de sequía. Las precipitaciones cortas e intensas serían más proclives a generar eventos superficiales, mientras que remociones más profundas serían provocadas por eventos distribuidos en largo periodo de tiempo (Aleotti, 2004 y Kim et al., 2004, en Lara, 2007).

En este sentido, la cantidad de lluvias necesarias para que se desencadenen remociones en masa, dependerá del tipo y condición de los terrenos y su ubicación geográfica. En general, distintas zonas necesitarán lluvias de intensidad y/o duración distinta para que se generen remociones, existiendo así un umbral de precipitaciones característico de cada lugar (Lara, 2007). Para determinar los umbrales característicos de cada zona, se quiere contar con bases de datos idealmente continuas de precipitaciones o con alta frecuencia que permitan la realización de análisis estadísticos para la zona de estudio (situación que no siempre ocurre) e incluir dentro del análisis la ocurrencia de fenómenos climáticos como por ejemplo el fenómeno de El Niño en el cual existe una tendencia al exceso de precipitaciones (inviernos con mayor días con lluvia y con precipitaciones de intensidades mayores) y de los niveles de caudales líquidos de escorrentía (García, 2000 en Lara, 2007).

Existen numerosos estudios, antecedentes históricos e información de prensa que dan cuenta de eventos de tipo flujo en la zona precordillerana y cordillerana de la zona Central de Chile. Hauser (1985) plantea una evidente relación entre la generación de aluviones en la zona central con precipitaciones anormalmente intensas (más de 60 mm/24 horas en periodos invernales). Precipitaciones de intensidad media en periodos prolongados de tiempo pueden ser consideradas como factores desencadenantes de flujos (Padilla, 2006). Eventos de precipitaciones anormales llevan consigo también, un aumento de la escorrentía superficial que incrementa la erosión del suelo

suelto, elemento importante en la generación de flujos. Es importante señalar la ocurrencia de flujos en áreas urbanas donde el material movilizado se satura en agua por causas humanas (ruptura de cañerías, entre otros).

- **Sismos.** Los terremotos pueden provocar movimientos de todo tipo en las laderas, dependiendo de sus características y de parámetros sísmicos, como magnitud y distancia a la fuente (González de Vallejo et al., 2002). Las aceleraciones sísmicas generan un cambio temporal en el régimen de esfuerzos al que está sometido la ladera, tanto normales como de corte, pudiendo producir su inestabilidad (Lara 2007). Según González de Vallejo et al. (2002), los desprendimientos de bloques, deslizamientos, flujos y avalanchas de roca son las remociones en masa más frecuentes producto de un fenómeno sísmico, mientras Keefer (1984) señala que corresponderían a caídas de rocas, deslizamientos desagregados de suelos en laderas con pendientes mayores a 15° y deslizamientos de roca en laderas con pendientes mayores a 40°, y en forma secundaria, derrumbes en suelo, deslizamientos en bloques de suelo y avalanchas de tierra, estableciendo magnitudes mínimas aproximadas para la generación de cierto tipo de fenómenos de remociones en masa, en base a observaciones de eventos generados. Por ejemplo, para sismos con magnitud menor o igual a 5,3 se establece en 50 kilómetros la máxima distancia desde el foco y zonas con ocurrencia de caídas de rocas y deslizamientos disgregados (Keefer, 1984). De la misma forma, se establece en 10 kilómetros la máxima distancia entre el foco de un sismo con magnitud cercana a 5,5 y zonas con flujos de detritos y deslizamientos masivos. Cabe señalar que estas condiciones no contemplan amplificaciones locales o efectos de sitio que pudiese desencadenar remociones en masa.
- **Intervención antrópica.** El hombre, como ente modificador del medio, genera una serie de cambios que en algunos casos son el principal desencadenante de remociones en masa. Los cambios en las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas producto de la impermeabilización artificial de los suelos o el desvío de cauces sin las correctas medidas paliativas, pueden generar cambios en las propiedades de los materiales y variaciones en el nivel freático. Por otro lado, la obstrucción de cauces con basura y escombros puede aumentar el material a movilizar durante un aluvión, o bien, la mala mantención de redes de alcantarillado y agua potable, pueden desencadenar aluviones (por ejemplo el aluvión en el Cerro el Litre (Valparaíso) el año 2009). La generación de obras constructivas, cortes, terraplenes, plataformas, entre otros, sin un análisis geotécnico adecuado, puede ocasionar desestabilización, así como el poco mantenimiento de sistemas de contención, o bien la limpieza de laderas sin la guía de un especialista.

3.4 INUNDACIONES

Las inundaciones corresponden, en la mayoría de los casos, a un fenómeno de origen natural y recurrente para un río. “Estadísticamente, los ríos igualarán o excederán la inundación media anual, cada 2,33 años (Leopold et al. 1984, en Rojas, 2009). La mayor parte de las inundaciones resultan de la interacción que se produce entre el agua y el sedimento que se mueve o permanece en el cauce del río (Keller & Blodgett, 2007).

Keller & Blodgett (2007), definen inundación como un proceso natural por el cual el flujo rebosa el cauce, relacionando el proceso generalmente con la cantidad y distribución de las precipitaciones en una cuenca. Para estos autores, el fenómeno puede caracterizarse por el caudal como por la altura de la lámina de agua.

Para Monsalve (1999, en Rojas, 2009), no se deben confundir los términos entre creciente e inundación. Una creciente es simplemente la ocurrencia de caudales relativamente grandes, en cambio una inundación es la ocurrencia de caudales suficientemente grandes que se salen de su cauce, de esta forma una creciente puede o no causar una inundación, como también una inundación puede o no provenir de una creciente (ej. Elevación del nivel del mar, represamientos). Conceptos similares son los ocupados en Estados Unidos por el Servicio Nacional de Meteorología, el que tiene un sistema de alertas de inundación designando una altura precisa en un lugar determinado. La fase de crecida, comienza cuando se sobrepasa el nivel establecido, esperando que comience una inundación, una vez que el caudal se sitúa por debajo del nivel de crecida el río se encuentra en fase de encausamiento (Strahler, 1992).

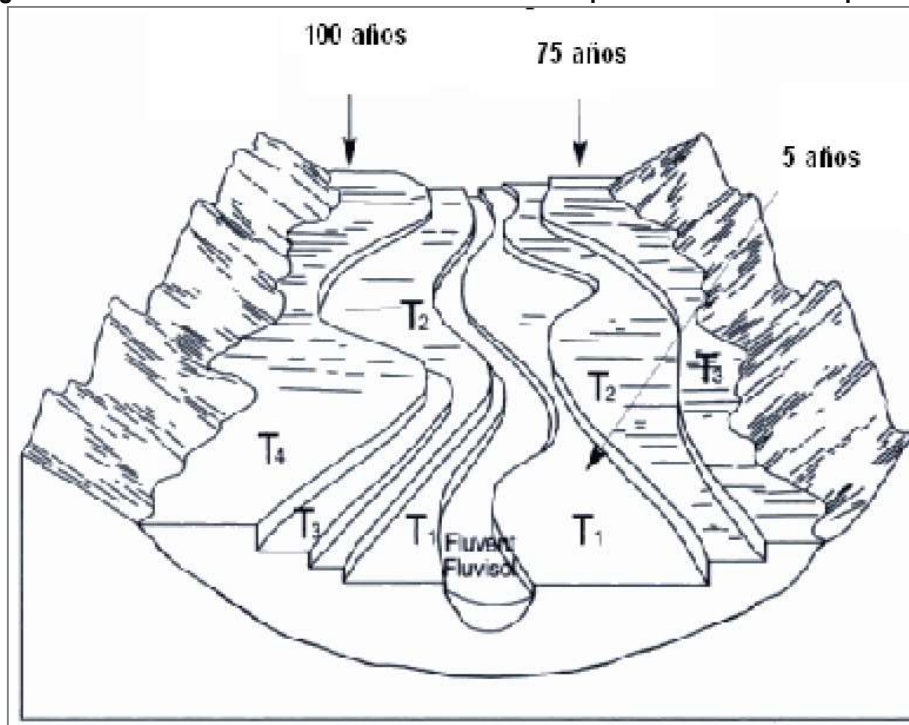
En síntesis, todas las definiciones apuntan a la superación de la capacidad de evacuación del cauce, pasando el agua a ocupar la llanura de inundación o lecho mayor, la definición de esta zona depende de la perspectiva del estudio, “como categoría topográfica es muy plana y se encuentra al lado un río; geomorfológicamente, es una forma de terreno compuesto primariamente de material depositado no consolidado, derivado de sedimentos transportados por el río en cuestión; hidrológicamente, está mejor definida como una forma de terreno sujeta a inundaciones periódicas por un río padre” (Schmudde, 1968, en Rojas, 2009), en síntesis corresponde a una zona relativamente plana ubicada en una zona adyacente al cauce que sufre inundaciones periódicas.

El sistema fluvial responde al aporte de agua desde fuera del sistema (Camarasa, 2002, en Rojas, 2009), produciendo una aceleración de los procesos de erosión, transporte y sedimentación en el área afectada. En la intensificación de un proceso de crecida que puede terminar en inundación, intervienen factores espacio-temporales del evento, que dicen relación con la propagación del agua valle abajo, algunos de estos factores fueron expuestos por Mateu (1988, en Rojas, 2009): Condiciones climáticas e hidrológicas previas registradas en la cuenca; caracteres físicos de la cuenca: topografía, superficie drenada, litología, cubierta vegetal, uso de suelo, canalizaciones, tipo de suelo, densidad y jerarquización de la red de drenaje. Características de los canales: morfología del lecho, geometría del cauce, procesos naturales, obstrucciones.

Para determinar los alcances de una posible inundación se utiliza el concepto de intervalo de recurrencia o tasa de retorno, entendido como el tiempo promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud determinada, se acostumbra a denotarlo con T (Aparicio, 1989; Chow et al. 1994; Keller & Blodgett, 2007, en Rojas, 2009), generalmente y si las metodologías y datos disponibles lo permiten, cada terraza de inundación tendrá su propio período de retorno (Figura).

Tarback & Lutgens (2005, en Rojas, 2009), clasifican las inundaciones en primer lugar por sus causas, sean estas naturales o humanas. A partir de ello establecen una clasificación por cuatro tipos de inundaciones: inundaciones regionales; inundaciones repentinas o avenidas; inundaciones por obstrucción de hielo; inundaciones por rotura de represas.

Figura n° 18: Modificado Terrazas de inundación con periodos de retorno hipotéticos



Fuente: Modificado de Porta & López-Acevedo, 2005

Keller & Blodgett (2007), identifican dos tipos de inundaciones: inundaciones de cabecera y de valle. Las inundaciones de cabecera se producen en las partes altas de las cuencas fluviales, por rotura de presas, diques y obstrucciones de hielo. Por su parte las inundaciones de valle son las más conocidas, comúnmente aparecen en la prensa y son el resultado de tormentas que saturan el suelo y hacen aumentar la escorrentía. Ollero (1997, en Rojas, 2009), identifica seis tipos de inundaciones en cursos fluviales, y agrega las inundaciones provocadas por el mar pero con la sinergia de las crecidas fluviales.

Los efectos de una inundación pueden ser vistos desde el punto de vista del medio natural como del medio antrópico. En el medio natural podemos mencionar: movilización de gran cantidad de sólidos desde la cabecera de la cuenca; aceleración de los procesos de erosión, transporte y sedimentación; generación de corrientes anárquicas en llanos de inundación como también microformas de relieve; variaciones de geometría y trazado del cauce; renovación del ambiente fluvial y de los hábitats. En el medio humano las consecuencias son en su mayoría negativas: daños en infraestructuras; repercusiones en la vida humana (falta de comunicaciones, gastos económicos, cesantía, efectos psicológicos, sociológicos, problemas de salud, abastecimiento, etc.); pérdida de vidas humanas (Ollero, 1997, en Rojas, 2009).

3.4.1 INUNDACIÓN POR ANEGAMIENTO

La inundación por anegamiento se define como formas de acumulación de aguas de lluvia sobre el terreno, y oteando hacia la causalidad, por lo general en este caso también existe una situación de desbalance, la cual se da entre el volumen de la lluvia precipitada en un determinado lapso de tiempo y la capacidad de evacuación de un suelo dado, tanto horizontal como verticalmente.

Si bien ello es cierto, existen complicaciones. Estas se derivan de los cambios en la permeabilidad, en la saturación del suelo, y en la micro-topografía de la superficie, ya sean por causas naturales o artificiales, Los cambios en la permeabilidad del suelo pueden ser positivos o negativos. Entre las acciones positivas, es decir, que incrementan la permeabilidad está la aradura y la incorporación de materia orgánica. Los efectos negativos tienen como causa la intervención en términos de compactación y/o de cobertura con materiales impermeables, como son las construcciones, los concretos y los asfaltos, incluso la aplicación de petróleo o aceite quemado a los caminos de tierra o la adición de una cubierta de maicillo y su apisonamiento.

La saturación del suelo se refiere concretamente a dos situaciones :

1°- la existencia natural de áreas hidromórficas o con presencia semi-constante a constante de la napa en superficie, lo que impide la percolación de las aguas lluvias, puesto que un suelo con estas características se comporta como un material impermeable y,

2°- los suelos pueden sufrir saturación progresiva, más o menos rápida según su permeabilidad, ante la ocurrencia de precipitaciones prolongadas o intensas, lo cual conduce a una situación similar a la anterior. Se trata del concepto de permeabilidad efectiva.

En este caso, si un suelo dado ve superada su capacidad de infiltración y evacuación subterránea de las aguas, lo cual es común que ocurra cuando las lluvias son intensas, se generará un excedente pluviométrico que deberá permanecer en superficie por el lapso de tiempo post-lluvia necesario para que la situación se normalice.

Las variaciones en la micro-topografía se refieren a cambios en la configuración del terreno que crean desniveles y obstáculos para el drenaje superficial. Este hecho tiene una causal fundamental: el hombre. Las construcciones que este efectúa (diques, terraplenes, camellones, soleras, muros, etc.) vienen a constituirse en obstáculos para que el agua circule libremente sobre los terrenos siguiendo las diferencias de pendiente. Esto ocurre tanto en el ámbito rural como en el urbano.

En el primero de los casos, los terraplenes de las carreteras y de las vías férreas suelen cumplir el rol de diques por insuficiencia de alcantarillas transversales, generando enlagnamientos hacia aguas arriba. En las ciudades, prácticamente todas las construcciones son obstáculos al escurrimiento de las aguas lluvias, las cuales terminan por acumularse en sectores ligeramente más bajos sin posibilidad de circular ni infiltrarse.

Frente a la ocurrencia de precipitaciones, la malla de calles y avenidas de una ciudad se transforma en una “red fluvio-vial” que, siguiendo la inclinación del eje de cada una de ellas funcionando como cauces, va creando flujos que confluyen progresivamente, sumando sus aguas en dirección de los sectores topográficamente más deprimidos. Creo que con base en un levantamiento topográfico detallado de las calles de una ciudad, es posible establecer claramente de donde vienen y para donde van las aguas, y los diferentes puntos de concentración, lo cual puede servir como herramienta de decisión sobre qué hacer y donde hacer en el contexto de las medidas que deben emanar de los planes maestros de aguas lluvias.

Por otra parte, cuando los anegamientos en el área rural llegan a superar parte de los obstáculos del terreno, estas aguas comienzan a desplazarse sobre la superficie, pasando a constituir una forma de escurrimiento laminar. Como resultado de este proceso pueden presentarse nuevas situaciones :

- Pueden resultar afectados terrenos que no habían sufrido este problema;
- La suma de estas aguas provenientes de diferentes sectores, lo cual requiere de ciertas condiciones topográficas favorables, puede elevar sustantivamente la cota de anegamiento en algún sector agravando la situación;
- En su camino pueden encontrarse con un cauce y vaciarse en él, lo cual puede ser la solución para un sector, pero puede provocar problemas aguas abajo al generar un superávit hídrico en dicho cauce y su desborde.

4. METODOLOGÍA

En el marco del desarrollo del estudio del Plan Regulador comunal, ha sido necesario elaborar un estudio que permita determinar los niveles de riesgos por fenómenos naturales y los generados por la intervención humana que es posible definir a escala comunal. La escala de análisis a nivel urbano corresponde a 1:5.000.

A continuación, se efectúa el análisis respecto de los componentes físicos del riesgo y su evaluación en función de los objetivos del estudio. Dentro de los procesos que han sido considerados como potenciales generadores de situaciones de riesgo sobre el espacio antrópico (vinculados con el objetivo de este estudio), se han desarrollado los siguientes:

- Procesos de Crecidas y Desbordes de cauces (Inundaciones)
- Procesos de Remoción en Masa

A continuación, se presenta el desarrollo de cada uno de estos aspectos en detalle.

- **Metodología General del Estudio**

El método utilizado para la definición de riesgos corresponde a la superposición de cartas temáticas digitales utilizando como herramienta un sistema de información geográfico, obteniendo de esta forma una carta integradora de distintas variables que condicionan la ocurrencia de fenómenos naturales que se traducen en riesgo para la población.

Los pasos metodológicos aplicados se describen a continuación:

- **Definición de variables que determinan el riesgo**

Las variables que determinan los distintos tipos de riesgos (Remoción en Masa, Inundaciones, anegamiento e incendios) corresponden a distintos factores que por una parte son componente importante del riesgo y que a su vez se encuentran disponibles a la escala de análisis necesaria para los objetivos del estudio.

- **Elaboración de Cartas temáticas para cada variable que determina el riesgo, determinando sub-unidades espaciales.**

Para cada una de las variables o factores que determinan los distintos tipos de riesgos se elabora una carta temática que busca identificar las condiciones específicas de cada variable que permiten desencadenar distintos niveles de riesgo. Estas condiciones específicas de cada variable son especializadas y representan sub unidades al interior de cada carta temática.

- **Determinación de valores relativo para cada sub-unidad espacial**

Cada una de las sub-unidades descritas anteriormente, reciben un valor relativo a la potencialidad de generar riesgo. El valor numérico asociado a cada valor relativo ha sido extraído de diversas fuentes, principalmente Ferrando 1998) y Brignardello (1997).

- **Determinación del Peso absoluto que tiene cada variable en la ocurrencia del riesgo.**

Del mismo modo que los valores relativos establecido para cada sub- unidad al interior de las cartas temáticas, Ferrando (Op. Cit.) define pesos absolutos de los distintos factores que determinan el tipo de riesgo. Sin embargo, al no utilizarse los mismos modelos de riesgo, sino que adaptaciones relacionadas a la disponibilidad de información, se modificaron dichos ponderadores mediante herramientas de evaluación multicriterio con consulta a expertos.

- **Asociación del peso absoluto y los valores relativos que posee cada variable y sub-unidades al interior de cada carta temática.**

Como resultado del proceso anterior, se obtendrá una serie de cartas temáticas con subunidades o polígonos. Cada sub-unidad tendrá asociado un valor relativo y cada carta temática tiene asociado un peso absoluto vinculado a la importancia que tiene dicho componente en la generación del tipo de riesgo. El siguiente paso del modelo es realizar una factorización de cada sub-unidad con el peso absoluto de la carta temática a la cual corresponde, es decir, se realiza a través del SIG, la multiplicación del peso absoluto definido para la carta temática por los valores relativos asociados a cada polígono.

- **Superposición de las distintas cartas temáticas**

Finalmente, las cartas temáticas asociadas a cada tipo de riesgo serán superpuestas a través del SIG, el objetivo es realizar una suma de los valores que tendrá cada sub unidad de las distintas cartas temáticas, generando

nuevas subunidades en una carta final resultante. Los valores que resulten de la suma de las distintas subunidades serán agrupados en cuartiles que definirán (desde los rangos mayores a los menores) los distintos niveles de riesgo para la región.

A continuación, se presentan los resultados y metodología específica de cada tipo de riesgo asociado a este estudio.

4.1 Inundación por desborde de cauces y anegamiento

Inundación

Una inundación es la ocupación por parte del agua de zonas que habitualmente están libres de ésta, bien por desbordamiento de ríos y cursos de agua.

Las inundaciones fluviales son procesos naturales que se han producido periódicamente y que han sido la causa de la formación de las llanuras en los valles de los ríos, tierras fértiles donde tradicionalmente se ha desarrollado la agricultura en vegas y riberas.

La información relevante para la modelación del riesgo por inundaciones que ha sido analizada, especializada e integrada a través de un SIG (ArcGIS - Spatial Analyst) para la determinación de áreas de riesgo de inundación, corresponde a las siguientes variables:

- Pendiente en grados
- Elevación del terreno cada 5 mts
- Curvatura (plano, cóncavo y convexo)
- Geomorfología de cauce (Terrazas)

Inundación por anegamiento

Corresponde a sectores morfológicamente muy planos (menor a 3°), deprimidos, con mal drenaje, que según el catastro han sido afectados previamente por anegamiento (compilada en el catastro o información obtenida en terreno) Estos bajos topográficos tienen una diferencia de altura de entre 20 cm y 1 m con respecto al nivel base promedio de su entorno.

1.1. Remoción en masa

El riesgo de remoción en masa considera los deslizamientos y flujos de detritos, rocas y barro. Las áreas asociadas a este tipo de riesgo se definen en función de antecedentes históricos y recientes de ocurrencia, de valores de pendiente en relación con umbrales potenciales de desencadenamiento de procesos, del grado de erosión geológica geomorfológica detectado y en parte evidenciado por hechos tectónicos y acumulación de sedimentos, y de la variable vegetación como factor de protección del suelo. A continuación, se presenta una clasificación y caracterización de los tipos de remoción en masa:

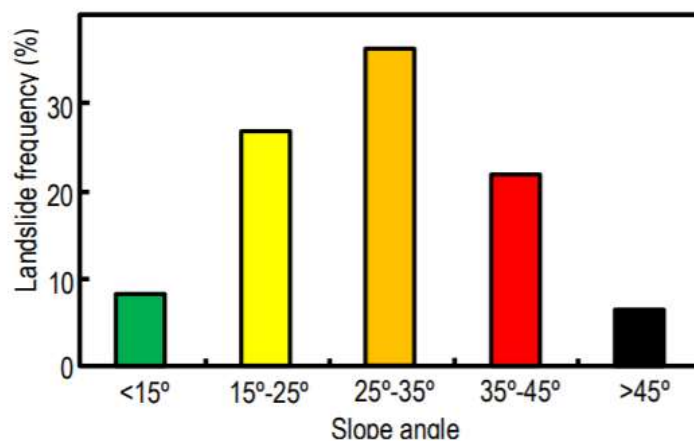
Diversos autores señalan que uno de los principales factores que determina la generación de remociones en masa es la pendiente de las laderas (Esaki, et al., 2005; Giraud & Shaw, 2007). Para diferenciar qué pendientes son las más susceptibles, se utilizó la información compilada a partir de diversas fuentes que han generado catastros de deslizamientos en distintos lugares del mundo. Esaki et al. (2005) y Giraud y Shaw (2007), así como otros catálogos de deslizamientos, indican que la mayor frecuencia de deslizamientos en el mundo se observa sobre pendientes de 25° a 35° de inclinación (Figura 5.2-1), relacionado principalmente al ángulo de fricción interno del material, siendo también frecuentes entre los 15° y 25° y sobre los 35° de pendiente. Luego, las pendientes del terreno pueden ser utilizadas como criterio para una clasificación general del territorio frente a potenciales deslizamientos.

Con base en lo anterior, **para el análisis de susceptibilidad de remociones en masa se consideran las pendientes entre 15° y 25° como moderadamente susceptibles, las pendientes entre 25° y 35° altamente susceptibles y las pendientes sobre los 35° como zonas de muy alta susceptibilidad.**

Finalmente, a partir de todo lo anteriormente expuesto, se determinaron las siguientes categorías de susceptibilidad de deslizamientos y caídas de roca

- **Muy Alta:** sectores con pendientes mayores a 35° o sectores que presentan condiciones geomorfológicas de inestabilidad
- **Alta:** laderas con pendientes entre 25° y 35°
- **Moderada:** laderas con pendientes entre 15° y 25°

Figura n° 19: Frecuencia de deslizamientos en función de la pendiente del terreno



Fuente: Esaki et al.(2005)

Cálculo de pendientes

El cálculo de las pendientes de acuerdo a los parámetros antes mencionados se realizará a través de un Sistema de información geográfica, donde a través de una modelación 3d, se generarán mapas de pendientes en versión raster con píxeles de 1m x 1m. Una vez realizadas la jerarquización se transformarán a formato SHP y Cad para ser considerados en el Plan.

1.2. Zonificación de la susceptibilidad

Para definir los criterios que permitan incorporar los peligros naturales dentro de la zonificación urbana, es necesario tener claros los criterios utilizados en la definición de las diferentes categorías de susceptibilidad y la zonificación resultante. En este sentido, en la siguiente tabla se resumen los factores que condicionan y desencadenan cada peligro geológico y los elementos metodológicos con los que se asignó la distribución espacial de la susceptibilidad, los que son descritos precedentemente.

Es muy relevante comprender que la categorización de susceptibilidad se relaciona con la posibilidad de ocurrencia de un fenómeno dado en un área determinada, pero corresponde a una categorización cualitativa, de carácter relativo, y no cuantitativa.

Pese a que el concepto de susceptibilidad no contempla la cuantificación de períodos de retorno, ni probabilidades de ocurrencia, sí estipula niveles que indican de manera relativa la frecuencia con que ocurre un cierto fenómeno. En este sentido, las zonas de 'muy alta' susceptibilidad son aquellas que muy probablemente serán afectadas en caso de ocurrir un evento del peligro analizado, las zonas de 'alta' susceptibilidad serán aquellas afectadas por eventos extremos (en muchos casos son los más grandes de los que se tengan registros históricos) y las de 'moderada' susceptibilidad se asocian a eventos excepcionales, de los que muchas veces no existen registros históricos, pero si otro tipo de evidencias, como evidencias geológicas o morfológicas. Por otra parte, mientras la magnitud de un evento sea más intensa, se producirán daños mayores, pero los daños serán más importantes en la medida que mayor sea la susceptibilidad del territorio. En consecuencia, se recomienda que, mientras mayor sea la susceptibilidad de un área específica, mayores sean las restricciones y/o condicionantes para su utilización.

Tabla n° 2: Resumen de factores que condicionan y desencadenan cada peligro geológico y criterios de zonificación de la susceptibilidad

Peligro	Factores condicionantes	Factores desencadenantes	Elementos de zonificación
Inundaciones por desborde de cauce	Características morfológicas de la red de drenaje	Lluvias intensas	Catastro de eventos de inundación Unidades geológicas Red de drenaje Observaciones de terreno
Inundaciones por anegamiento	Morfología Malas condiciones de drenaje	Lluvias	Imágenes satelitales Catastro de humedales
Remociones en masa (procesos de ladera)	Pendientes Material que compone la ladera (geología) Exposición de laderas Formaciones vegetales	Sismos Lluvias intensas Viento	Pendiente del terreno Catastro de remociones en masa
Incendios	Pendientes Formaciones vegetales	Altas temperaturas Vientos	No susceptible
Sismicidad	Características de los depósitos	Sismos	No susceptible
Volcanismo (caída de ceniza)	Distancia a los centros eruptivos Morfología del terreno Dirección del viento	Erupciones	No susceptible

Fuente: Elaboración propia

5. ZONAS DE RIESGO EN LA COMUNA DE QUINTA DE TILCOCO

Dentro de las amenazas descritas en el capítulo anterior, algunas están presentes en la comuna de Quinta de Tilcoco. A partir de la superposición de información y análisis de los antecedentes, se identifican áreas de riesgo (definidas como zonas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de alguna amenaza), lo que permitirá actualizar y/o modificar el Plan Regulador Comunal, cumpliendo con la Ley General de Urbanismo y Construcciones y el proceso de Evaluación Ambiental Estratégica.

Es importante señalar que dados los alcances del presente estudio, así como la escala de trabajo (1:5.000 en áreas urbanas) y mayor a 1:50.000 fuera del entorno urbano de la comuna, existirán peligros reconocidos que serán zonificables y otros no.

Como peligros **no zonificables**, se considerarán aquellos que requerirían estudios de mayor detalle para poder determinar su distribución, o que quedan fuera de los alcances definidos para el presente trabajo. Por el contrario, como **peligros zonificables** se incluirán aquellas amenazas en que se puede categorizar la susceptibilidad y por lo tanto determinar una categorización de la misma (mediante planos anexados al estudio).

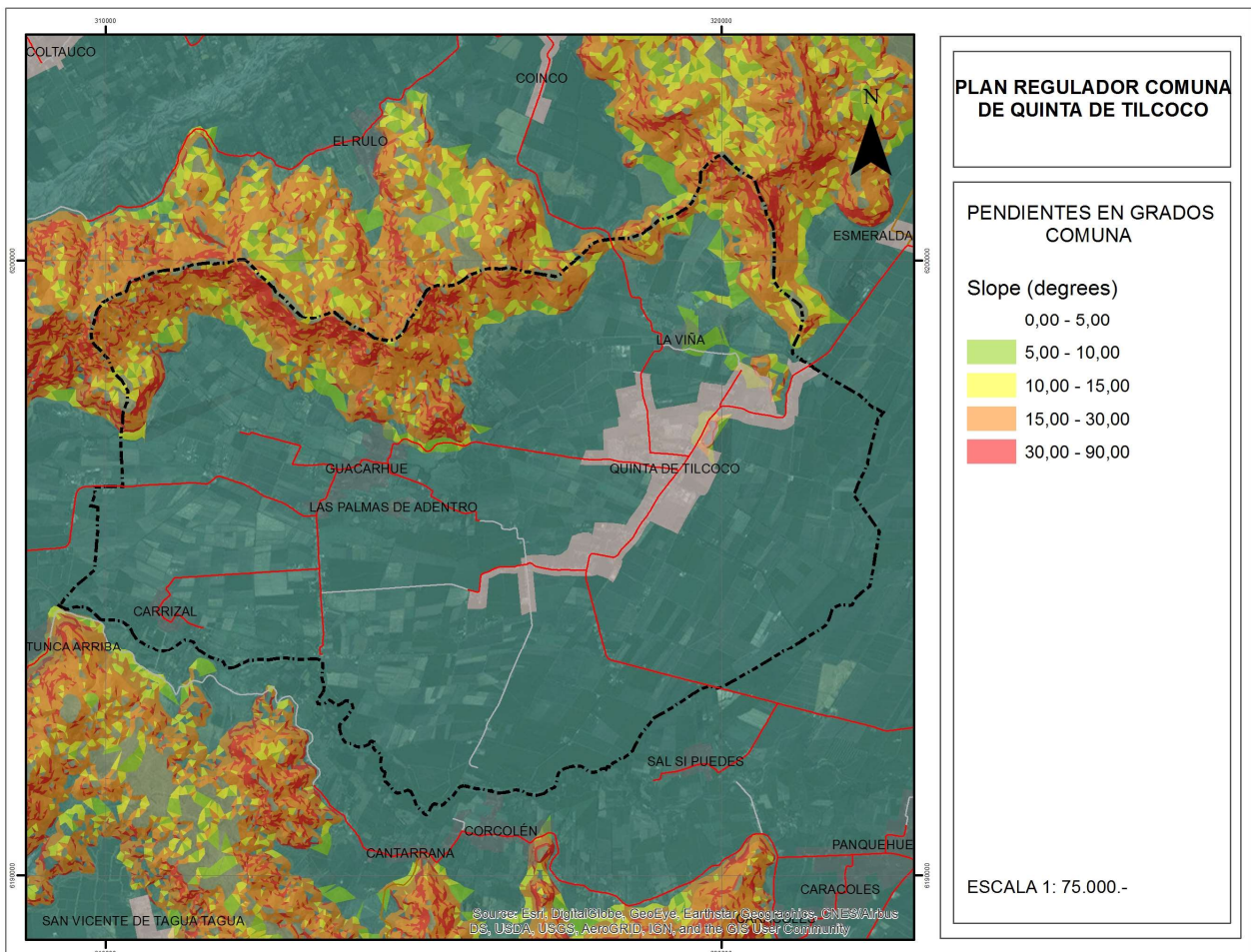
A medida que se realice una descripción de las amenazas identificadas para la comuna de Quinta de Tilcoco, se indicará si estos son o no zonificables, indicando los criterios utilizados y áreas susceptibles según corresponda.

5.1 REMOCIONES EN MASA

Para definir la susceptibilidad de caída de rocas en la comuna, se consideró como factores condicionantes la distribución y características de los eventos anteriores, pendientes, presencia de afloramientos rocosos y depósitos de remociones en masa anteriores. El uso de imágenes google_earth y las observaciones realizadas en terreno resultaron fundamentales en este proceso, definiéndose así zonas susceptibles a la generación de eventos, y sectores susceptibles de ser alcanzados por los bloques caídos.

Para evaluar las pendientes de las laderas, se realizaron modelos de triangulación a partir de las curvas de nivel (cada 50 metros). Los rangos definidos se basan en los antecedentes de pendientes mínimas para la generación de remociones (Keefer, 1984) y en la clasificación de pendientes de MARSH (1978, en MOPT 1992), que señala que todos los terrenos cuya pendiente supere los 15° constituyen en una barrera topográfica natural para el poblamiento.

Figura n° 20: Modelo de pendientes comuna de Quinta de Tilcoco



Fuente: Elaboración propia

Para definir zonas susceptibles a la generación de caídas de rocas, se consideraron aquellas laderas con pendientes mayores a 30°. La susceptibilidad de alcance de caída de rocas, considera las áreas ubicadas ladera abajo de las zonas de generación, con rangos de pendiente entre los 5° y 30°. La categoría de susceptibilidad quedó definida de la siguiente forma:

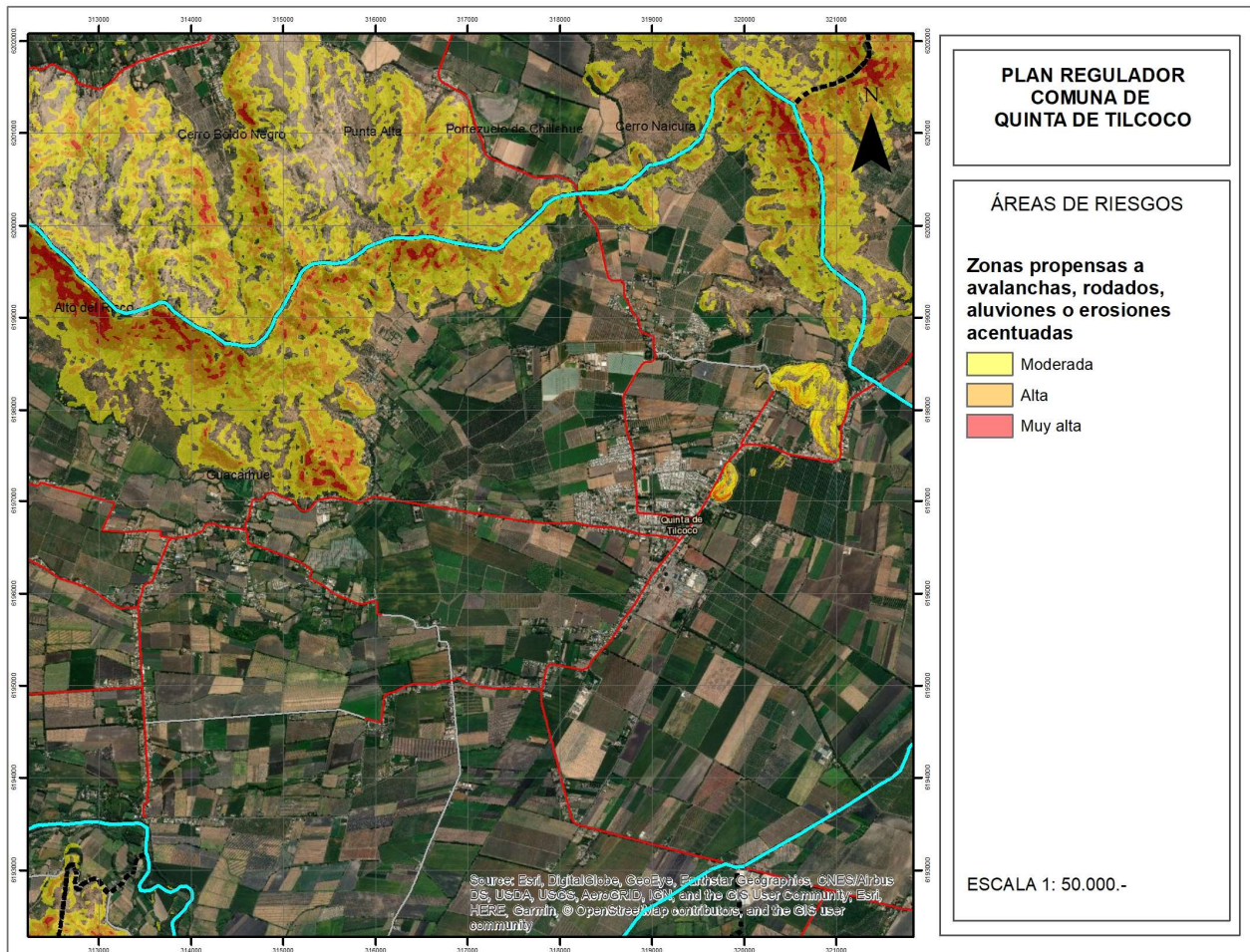
5.2 ZONIFICACIÓN POR SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA

A partir de los antecedentes expuestos, se presenta una zonificación por susceptibilidad de remociones en masa de la comuna de Quinta de Tilcoco realizada a escala 1:50.000 (con representación a escala 1:100.000). Esta zonificación se basa en la superposición de antecedentes y condicionantes descritos anteriormente, y entrega como resultado la definición de sectores con distintos niveles de susceptibilidad para distintos tipos de remociones. Se destaca sectores en color rojo (alta susceptibilidad de caídas de rocas y moderada susceptibilidad de deslizamientos de roca); color anaranjado (moderada susceptibilidad de caídas de rocas, baja susceptibilidad de deslizamientos de roca y alta susceptibilidad a la generación de flujos) y color amarillo (alta susceptibilidad a extensiones laterales y soliflucción). Todos los sectores definidos se encuentran fuera del área urbana de la comuna, foco central del presente estudio.

Es importante señalar que por la escala de trabajo y alcances del estudio no es factible realizar una zonificación con mayor nivel de detalle, y su uso para planificación urbana debe ser complementado con estudios a menor escala, incluyéndose por ejemplo análisis, ensayos y pruebas de terreno, para dar cumplimiento a requerimientos legales y técnicos.

Las zonas de alta y moderada susceptibilidad se encuentran principalmente fuera del radio urbano, sin embargo se debe hacer notar que existen sectores habitados por población rural (especialmente la base de los cordones montañosos) en zonas con moderada susceptibilidad y que en ocasiones se han visto afectados por remociones en masa. Es importante restringir o normar el crecimiento de la comuna hacia estas zonas.

Figura n° 21: Susceptibilidad de remociones en masa comuna de Quinta de Tilcoco



Fuente: Elaboración propia

5.3 VOLCANISMO

El estudio de riesgo volcánico para la VI región en el contexto del PROT (Etapa II Componente riesgos. 2012) evalúa las amenazas asociadas al proceso eruptivo y eventos comunes asociados, dentro de los cuales se mencionan:

- Proyección de piroclastos balísticos
- Dispersión y caída de piroclastos
- Emisión de lava
- Generación de flujos y oleadas piroclásticas

- Generación de lahares e inundaciones
- Colapso total o parcial del edificio volcánico
- Emisión de gases
- Ocurrencia de sismos volcánicos
- Ocurrencia de deformación del terreno
- Alteraciones físico-químicas de cursos de agua, acuíferos y sistemas Geotérmicos

Los centros volcánicos activos se ubican en la zona cordillerana (volcán Palomo y complejo Tinguiririca), siendo los procesos de escurrimiento de lavas y lahares los más evidentes en el área proximal y hasta un radio no superior a 50 km (PROT, 2012). En ambos, podrían generarse columnas eruptivas de altura superior a 10 km representan un escenario razonable en el contexto de sus erupciones características, con flujos piroclásticos de envergadura moderada (alcance < 10 km).

De acuerdo a los antecedentes presentados en el capítulo anterior, no existiría riesgo volcánico para la comuna de Quinta de Tilcoco, y por lo tanto no es zonificable.

5.4 SISMOS

En el caso de la amenaza por sismos, la OGUC en el apartado 2.1.17 no hace mención a ellas y no forman parte de los alcances del presente estudio, por lo que debe ser abordada de acuerdo a la normativa de construcción vigente y los aspectos geológicos, geomorfológicos y tipos de suelos propios de la comuna que puedan incidir en el comportamiento sísmico de esta. Un ejemplo de lo anterior es la susceptibilidad a la generación de extensiones laterales, solifluxión y licuefacción de suelos en zonas de alledaños a la ribera norte del río Tinguiririca, gatilladas con el evento del 27F. La escala y alcances del presente estudio no permiten una identificación y zonificación de dichos peligros a una escala con mayor detalle, requiriéndose para ello estudios más profundos.

5.5 FALLAS GEOLÓGICAS

De acuerdo a los antecedentes recopilados, no existen fallas geológicas mayores que atreviesen la comuna, por lo tanto no aplica al presente estudio.

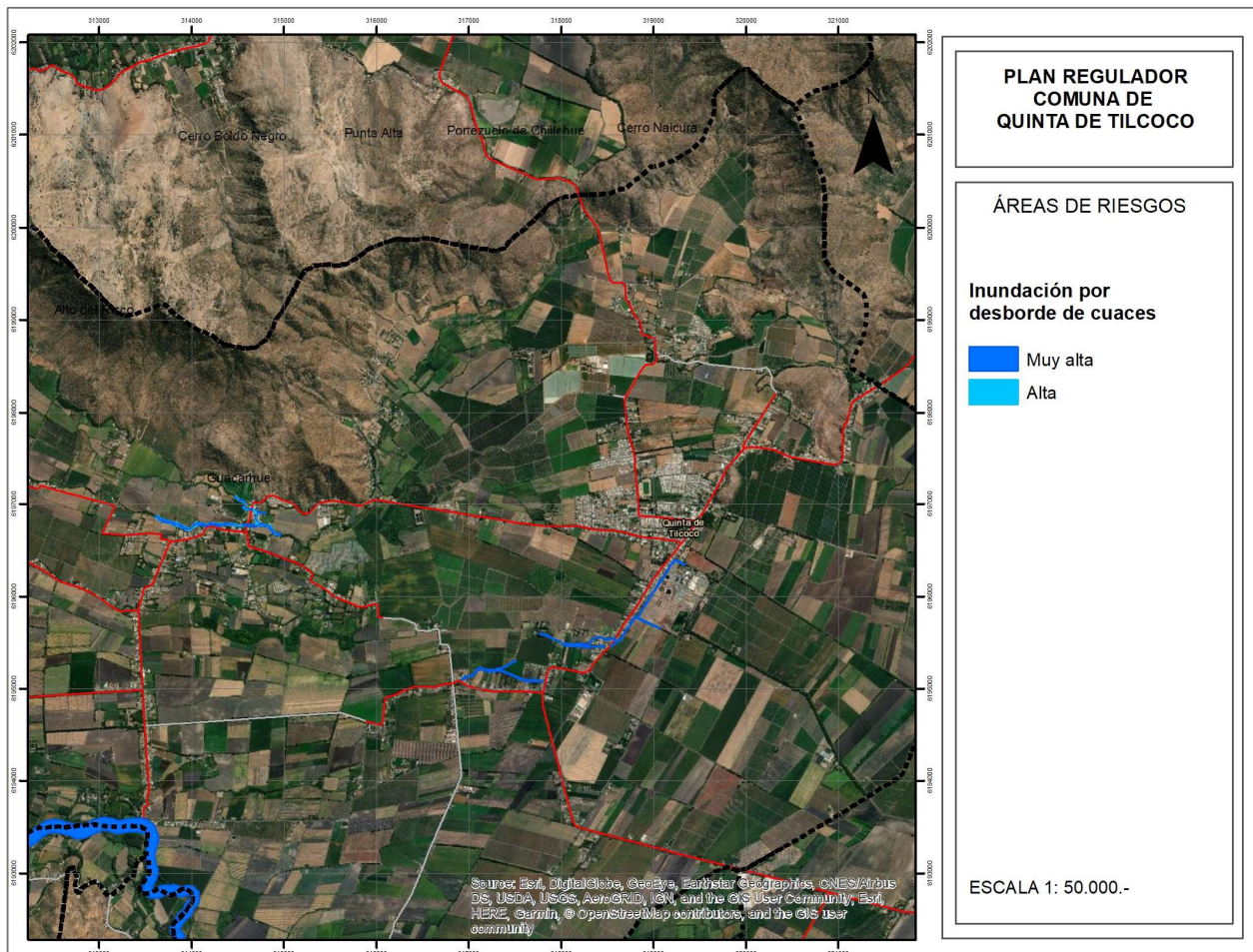
5.6 ÁREAS CON RIESGO DE INUNDACION

Áreas de riesgo de inundación Sector urbano de Quinta de Tilcoco

Respecto de la localidad de Quinta de Tilcoco, su trama intra urbana es intersectada por cursos de aguas, canales de regadío que en época invernal funcionan como evacuadores de aguas lluvias. Estos canales principales se determinó un área de inundación que asegura el libre escurrimiento de las aguas, asegura el espacio para su mantención, y restringe los usos que pudieran afectar el libre tránsito de las aguas.

En la Localidad de Guacarhue las áreas principales de desborde de cauces corresponde al Estero Guacargue y sus tributarios

Figura n° 22: Área de riesgo de inundación Quinta de Tilcoco



6. CONCLUSIONES

Para dar cumplimiento a la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC), en su apartado 2.1.17, y definir “áreas de riesgo” para la comuna de Quinta de Tilcoco, se agruparon los peligros geológicos en remociones en masa, volcanismo, sismicidad e inundaciones, de los cuales sólo algunos son zonificables de acuerdo a la escala y alcances del estudio.

La metodología de trabajo aplicada incluyó la descripción física de la comuna, recopilación y análisis de antecedentes y un catastro de eventos (tanto por reportes como por evidencias recogidas en terreno). Para el área urbana, los peligros zonificables identificados fueron las inundaciones, las cuales se representaron en planos 1:5.000. Los resultados indican que dentro de los límites urbanos (Quinta de Tilcoco), se consideraron las áreas inundables de los cursos de agua principales, correspondientes a canales de regadío, los que en época invernal ayudan a la evacuación de las aguas lluvias.

Para el resto de la comuna (áreas excluidas al desarrollo urbano) como peligros zonificables se identificaron las remociones en masa, cuya escala de análisis fue 1:50.000, con representación de resultados escala 1:100.000 (susceptibilidad de remociones en masa), dentro de las cuales se reconocen sectores sensibles a caídas de rocas y deslizamientos de roca (generación y alcance), y se asocian principalmente a altas pendientes y sectores con afloramientos rocosos fracturados, registrándose evidencias de caídas de rocas a los pies de los cordones montañosos. También se identificaron sectores sensibles a la generación de flujos (especialmente en quebradas o abanicos aluviales). También se reconocieron sectores susceptibles a la generación de extensiones laterales de suelo y solifluxión en eventos sísmicos, asociados a sedimentos limo-arcillosos saturados cercanos a superficie. La escala del presente estudio no permite definir con mayor precisión la ubicación de estos sedimentos, se requieren estudios de mayor detalle. Estos debiesen ser incorporados en los instrumentos de planificación de escala intercomunal, ya que los antecedentes indican que si están presentes en la comuna, especialmente ante sismos de gran intensidad.

En el caso de los peligros no zonificables, algunos no se encuentran presente en la comuna (como el Volcanismo y fallas geológicas) o quedan fuera de los alcances del estudio (como una zonificación sísmica o una zonificación de suelos para identificar zonas propensas a la licuefacción y extensión lateral de suelo).

7. REFERENCIAS

- Araya-Carcedo, F.; Olcina J. 2002. Riesgos Naturales. Editorial Ariel S.A., 1512 pp.
- Arriagada, C., Arancibia, G., Cembrano, G., Martínez, F., Carrizo, D., Van Sint Jan, M., Sáez, E., González, G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S.A., Contreras-Reyes, E., Jensen, E., Yañez, G. 2011. Nature and tectonic significance of co-seismic structures associated with the Mw 8.8 Maule earthquake, central-southern Chile forearc. *Journal of Structural Geology* 33 (2011), p. 891 – 897.
- Barrientos, S.; Kausel, E. 1993. Características de la Sismicidad Superficial en la Zona Central de Chile; *Proceedings 6as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Universidad de Chile, Santiago 9-13 Agosto, 1993, v.1, p. 3-9.
- Belmonte-Pool, J. 1997. Análisis del Contacto Sismogénico Interplaca a lo Largo de Chile. Santiago: Tesis de Magíster, Depto. de Geofísica. Universidad de Chile, 148 pp.
- Cruden, D.M, and Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes, in Turner, A. Keith, and Schuster, Robert L. eds. *Landslides—Investigation and mitigation: Transportation Research Board, Special report no. 247*, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., p. 36–75.
- Delouis, B., Monfret, T., Dorbath, L., Pardo, M., Rivera, L., Compte, D., Haessler, H., Caminade. L., Ponce, L., Kausel, E., Cisternas, A. 1997. The Mw=8.0 Antofagasta Earthquake of July 30, 1995: A precursor of the end of the large 1887 Gap. *Bull. Seismic Society of America*, Vol. 87, N°2, p.1 – 19.
- Escobar, F.; Guzman, R.; Vierina, C., 1977. Avance geológico de las Hojas Rancagua – Curicó – Talca – Linares – Chanco, Concepción y Chillán. Escala 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG). Inédito.
- Galdames, G; Saragoni, R. 2002. Influencia del posible movimiento de la falla Marga-Marga en el daño de edificios altos de Viña del Mar en el terremoto de Chile de 1985. VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Abril 2002. UTFSM. Valparaíso, 6pp.
- Godoy, E.; Schilling, M.; Solari, M.; Fock, A. 2009. Geología del Área Rancagua-San Vicente de Tagua Tagua, Región del Libertador General Bernardo O’Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 118: 50 p. 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- González de Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. 2002. Ingeniería Geológica. Editorial Pearson. 744pp
- Hauser A, SERNAGEOMIN. 1996. Evaluación preliminar del riesgo aluvional en torno a la localidad de San Alfonso, región Metropolitana. Documento inédito.
- Hauser A, 1985. Flujos de barro en la zona preandina de la Región Metropolitana: Características, causas, efectos, riesgos y medidas preventivas. *Revista Geológica* N°24 1985, p.75-92.
- Hauser, A. 2000. Remociones en masa en Chile. Santiago de Chile: SERNAGEOMIN, Boletín N° 59.
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 95, p. 406-421
- Keller, E.; Blodget, R. 2004. Riesgos naturales. Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes. Editorial Pearson, S.A., Madrid 2004. 448 pp.
- Hauser, A. 1990. SERNAGEOMIN. Carta Hidrogeológica de Chile. Hoja Rancagua, VI región. 1:250.000. 74 p.
- Lara, M. 2007. Metodología para la evaluación y zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en la Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar el Grado de Magíster en Ciencias Mención Geología y Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología, 212 p.
- Leyton, F.; Ruiz, S.; Sepúlveda, S. 2010. Reevaluación del peligro sísmico probabilística en Chile Central. *Andean Geology*. Versión on-line. ISSN 0718-7106. V. 37, n° 2. Julio 2010, 21 pp.
- Madariaga, R. 1998. Física de la Tierra TS5N: 0214-4557. 1998, n.10, p. 221-255 Sismicidad de Chile.
- Muñoz, E., Sepúlveda, S.A., Rebolledo, S. 2012. Nuevos antecedentes sobre la falla Marga-Marga y sus implicancias en el peligro sísmico, T9, p. 854 – 856.
- Muñoz, E. 2013. Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en áreas urbanas. Estudio de caso Viña del Mar, V región. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias mención Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 164 p.
- PMA-GCA, 2007. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Santiago: Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4, 432 p.

- Ruiz, S. y G.R. Saragoni. 2005. "Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos de sismogénesis y los efectos del suelo". IX Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Concepción, p. 16-19.
- Sabaj, R. 2008. Identificación y caracterización de estructuras potencialmente activas en la cordillera de la costa, entre los 33° y 33°45' Sur. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología.
- Sauret, B., 1987. Coulées de débris canalisées. Compte rendu bibliographique. In Risques Naturels. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, No.150-151, p.65-77.
- Selby, M.J., 1993. Hill slope materials and processes. Second Edition, Oxford University Press, 451 pp.
- 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.
- Sepúlveda, S.A., Padilla, C., 2008. Rain-induced debris and mudflow triggering factors assessment in the Santiago cordilleran foothills, Central Chile. Natural hazards, 47, 201-215.
- Sepúlveda, S.A. y Serey, A. 2009. Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the 21st of April 2007 Aysén earthquake, southern Chile (45.5°S). Geological Note. Andean Geology 36 (1), pp. 131-136.
- SERNAGEOMIN. Mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000.
- SERNAGEOMIN. 2012. Atlas de Faenas Mineras, Regiones de Valparaíso, del Libertador General Bernardo O'Higgins y Metropolitana de Santiago (Versión Actualizada). Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas y Estadísticas de Faenas Mineras de Chile No 9: 177 p. Santiago.
- Padilla, C., 2006. Análisis de factores meteorológicos desencadenantes de remociones en masa en el sector oriente de Santiago. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial, Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE), Gobierno de Chile, Junio 2011. Registro de Propiedad Intelectual N°: 205-409. I.S.B.N.: 978-956-8468-34-7
- Norma Chilena Oficial. Diseño Sísmico de Edificios. NCh433.Of.1996. Instituto Chileno de Normalización y modificaciones 2010 y 2011.
- Gobierno Regional (GORE). Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Plan Regional de Ordenamiento Territorial. Informe Etapa II. Componente Riesgos. División de Planificación y Ordenamiento Territorial. Diciembre 2012.