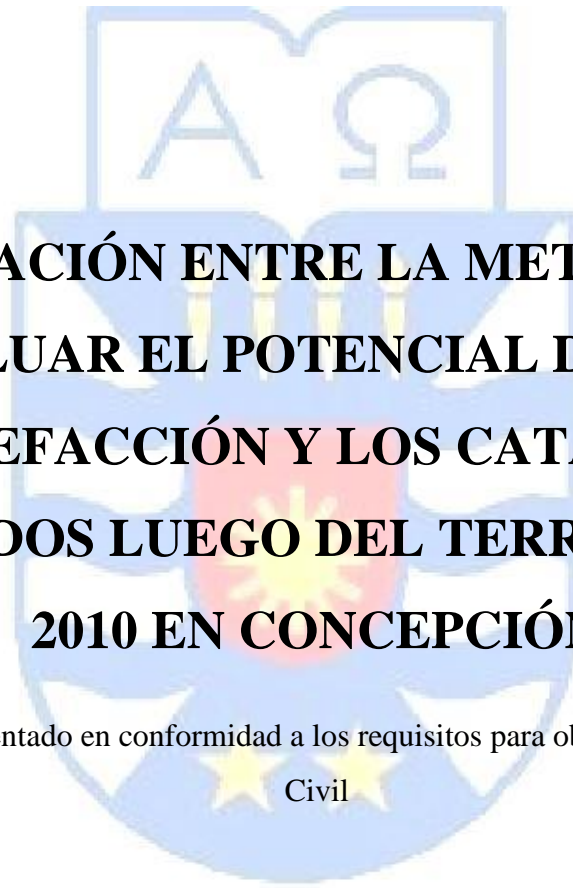


**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL**

Profesor Guía: Carmen González Labbé



**COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA  
PARA EVALUAR EL POTENCIAL DE RIESGO DE  
LICUEFACCIÓN Y LOS CATASTROS  
REALIZADOS LUEGO DEL TERREMOTO DE  
2010 EN CONCEPCIÓN**

Proyecto de título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el Título de Ingeniero  
Civil

**FELIPE ANDRES ALFARO VILLAGRAN**

Concepción, Abril de 2013

## NOMENCLATURA

### a) Nomenclatura

- SPT: Ensayo de penetración estándar.
- Mw: Escala sismológica de magnitud de momento
- SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería
- SW: Arenas bien graduadas, arenas con grava, con pocos finos o sin ellos
- SP: Arenas mal graduadas, arenas con grava, con pocos finos o sin ellos
- SL: Arenas limosas, mezclas de arena y limo mal graduadas
- SC: Arenas arcillosas, mezclas mal graduadas de arenas o arcillas
- ML: Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillas con ligera plasticidad.
- CL: Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras
- MH: Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o con diatomeas, limos elásticos
- CH: Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas grasas
- USCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
- CSR: Razón de Tensiones Cíclicas
- CRR: Razón de Resistencia Cíclica
- IP: Índice plástico
- FS: Factor de seguridad
- $\gamma_d$  seco: Peso específico del suelo seco
- $\gamma$  sat: Peso específico saturado

### a) Unidades de medida

- S.I.

## INDICE

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
CAPITULO 1: INTRODUCCION .....	3
1.1 Identificación del problema .....	3
1.2 Objetivos .....	4
Objetivo general .....	4
Objetivos específicos.....	4
1.3 Alcances .....	4
CAPITULO 2: CONCEPTOS GENERALES.....	5
2.1 Licuefacción.....	5
2.2 Factores que condicionan el fenómeno de licuefacción .....	5
2.3 Efectos de la licuefacción .....	6
CAPITULO 3: SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCION .....	8
3.1 Potencial de Licuefacción .....	8
3.2 Criterios de Susceptibilidad .....	9
3.3 Método basado en el ensayo de resistencia a la penetración estándar (SPT) .....	10
3.3.1 Factores de escala por magnitud del sismo (DWFm) .....	12
3.3.2 Ajuste por tensión de sobrecarga ( $K_{\sigma}$ ) .....	14
CAPITULO 4: APLICACIÓN .....	17
4.1 Recopilación de información .....	17
4.1.1 Zonificación .....	17
4.1.2 Parámetros del suelo.....	18
4.1.3 Parámetros del sismo.....	19
4.1.4 Rango o nivel de licuación .....	20
4.2 Aplicación de la metodología .....	21
4.2.1 Programación .....	21
4.2.2 Resultados .....	22
4.2.3 Aplicación de niveles de licuación.....	22
CAPITULO 5: ANALISIS .....	23
5.1 Comparación de la aplicación de la metodología al aumentar la magnitud sísmica de 7.8 a 8.8 grados Richter .....	23

5.1.1 Áreas donde se mantuvo el nivel de riesgo .....	25
5.1.2 Áreas de aumento en el nivel de riesgo.....	25
5.2 Comparación entre los catastros realizados luego del terremoto de 2010 en concepción y la metodología de Seed & Idriss para esa misma magnitud sísmica. ....	27
5.2.1 Catastros del terremoto del 27 de febrero de 2010 en Concepción.....	27
5.2.2 Comparaciones entre los catastros y la metodología .....	28
5.2.3 Sectores donde coincide la metodología y los catastros .....	30
5.2.4 Sectores donde ocurrió licuefacción y utilizando la metodología se evidencio un potencial de riesgo nulo.....	31
5.2.5 Áreas catastradas en las cuales no se tiene información del suelo.....	33
<b>CAPITULO 6: CONCLUSIONES</b> .....	<b>34</b>
6.1 Observación del riesgo licuable al aumentar la magnitud sísmica utilizando la metodología de Seed & Idriss .....	34
6.2 Comparación entre las zonas realmente licuables y la metodología.....	35
<b>CAPITULO 7: REFERENCIAS</b> .....	<b>37</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>39</b>

### **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1: Corrección por longitud de varillaje $C_R$ . Fuente: .....	12
Figura 2: Factores de Escala por Magnitud del Sismo en función de $N_{1,60}$ .....	13
Figura 3: Valores de $K_\sigma$ , NCEER (2003) para $n=0.7$ , $D_r \approx 60\%$ . ....	15
Figura 4: Relación entre razones de tensiones causantes de licuación y valores corregidos del SPT (para $M_W=7.5$ y $\sigma_v=1$ atm) con ajuste de contenido de finos. Fuente: Seed, et al 2003.....	16
Figura 5: Comparación de las zonas de riesgo entre una magnitud de 7.8 y 8.8 grados Richter ..	24
Figura 6: Superposición entre las zonas licuables luego del terremoto y las áreas que mostraron riesgo luego de aplicar la metodología de Seed & Idriss. ....	28
Figura 7: Mapa de las zonas donde coincide las áreas catastradas licuables con las áreas licuables aplicando la metodología de Seed & Idriss. ....	29

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de Peso Específico Seco y Saturado (Lambe, 1972).....	18
Tabla 2. Porcentaje de finos para cada tipo de suelo según la clasificación USCS de suelos (Lambe, 1972) .....	18
Tabla 3. Máximas aceleraciones registradas en el Terremoto de 2010. ....	20
Tabla 4: Distribución del riesgo de licuefacción para cada magnitud sísmica de análisis. ....	34

# **COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL POTENCIAL DE RIESGO DE LICUEFACCIÓN Y LOS CATASTROS REALIZADOS LUEGO DEL TERREMOTO DE 2010 EN CONCEPCIÓN**

Autor: Felipe Andrés Alfaro Villagrán

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bio Bío

falfaro@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Carmen González Labbé

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del BioBío

cgonzal@ubiobio.cl

## **RESUMEN**

Luego del Terremoto del 27 de Febrero de 2010 en la zona centro sur de Chile se evidenció en varios sectores la presencia de licuefacción. Una de ellas fue Concepción, la segunda ciudad más poblada del país, por su ubicación y características del suelo presentó grandes problemas de este tipo. Los efectos de licuación producen gran cantidad de daño y por lo tanto es de gran importancia establecer con antelación mapas de riesgo para así tenerlas en consideración al momento de construir. Gran aceptación a nivel mundial ha tenido el procedimiento propuesto por Seed (Seed & Idriss, 1971), para determinar el potencial de licuefacción en suelos arenosos, el cual está basado en la prueba de penetración estándar (SPT), dicho ensayo es muy común en los estudios de mecánicas de suelo de la zona y por lo tanto es un buen indicador para el análisis. Este estudio aplica dicha metodología y la compara con la evidencia en terreno donde ocurrió licuefacción después del terremoto, para luego realizar un estudio con el fin de identificar la validez su aplicación en la zona. Finalmente se realiza una comparación de la aplicación de la metodología en Concepción al aumentar la magnitud sísmica de 7.8 a 8.8 grados Richter y ver cual o cuales son las áreas más sensibles al cambio.

**Palabras claves:** Licuefacción, SPT, Suelos arenosos.

(7472) palabras+ (7)\*250figuras+ (4)\*250tablas = 9972 Palabras Totales

**ABSTRACT**

After the earthquake of February 27, 2010 in south-central Chile was evident in several sectors the presence of liquefaction. One was Concepción, the second largest city in the country, because of its location and soil characteristics presented great problems of this type. The effects of liquefaction produce a lot of damage and is therefore of great importance to establish risk maps in advance so take them into consideration when building. Great worldwide acceptance has had the procedure proposed by Seed (Seed & Idriss, 1971), to determine the potential for liquefaction in sandy soils, which is based on the standard penetration test (SPT), this test is very common in soil mechanics studies area and therefore is a good indicator for the analysis. This study applies this methodology and compares it with the evidence on the ground where liquefaction occurred after the earthquake, then undertake a study to identify the validity of its application in the area. Finally a comparison is made of the application of the methodology in Concepción with increasing earthquake magnitude of 7.8 to 8.8 on the Richter scale and see which one is the most sensitive to change.

**Keywords:** Liquefaction, SPT, Sandy soil.

## **CAPITULO 1: INTRODUCCION**

### **1.1 Identificación del problema**

Debido al alto riesgo sísmico de Concepción y su consecuente peligro de licuefacción, luego del terremoto del 2010 de 8.8 grados Richter se hizo necesario estudiar a fondo este fenómeno y analizar las metodologías que se aplican para crear mapas de riesgo.

Como antes del terremoto no se tenía evidencia real de las zonas analizadas con las metodologías usadas para determinar el potencial de licuefacción en Concepción, no se podía realizar una comparación experimental para determinar si eran o no válidas para los suelos de este sector, por lo tanto luego del sismo pueden ser comparadas con datos reales.

Este estudio consta de dos partes, la primera consiste en estudiar la variación de las zonas de riesgo al variar la magnitud sísmica, y la segunda se centra en la comparación entre la metodología del potencial de licuación y lo realmente ocurrido luego del terremoto.

Los antecedentes de la primera parte de esta memoria se basan en los estudios de mecánicas de suelos en el área de Concepción y los antecedentes sísmicos registrados luego de grandes terremotos en la zona, mientras que los antecedentes de la segunda parte de este estudio se basan en los catastros realizados y que fueron entregados por el gobierno luego del evento sísmico. Estos al ser analizados con la metodología permiten compararlos estableciendo alguna semejanza a lo ocurrido y ver su compatibilidad para la Comuna de Concepción.

## **1.2 Objetivos**

### *Objetivo general*

- Comparación entre la metodología de Seed & Idriss para evaluar el potencial de riesgo de licuefacción en Concepción y los catastros realizados luego del terremoto del 27 de Febrero de 2010.

### *Objetivos específicos*

- Aplicar la metodología de Seed & Idriss para evaluar el potencial de riesgo de licuefacción en la comuna de Concepción
- Comparar la metodología de licuefacción con los catastros realizados luego del terremoto de 2010
- Comparar el riesgo de licuefacción utilizando la metodología con dos magnitudes sísmicas y analizar las diferencias.

## **1.3 Alcances**

- Esta investigación fue aplicada al área de la comuna de Concepción
- El estudio solo considera las áreas de Concepción con información de mecánica de suelos.
- Entrega las comparaciones entre la metodología y lo realmente ocurrido luego del terremoto de 2010 mediante mapas en formato ARCVIEW.
- La metodología de estudio solo es aplicable a Arenas, Arenas Limosas y Arenas Arcillosas.
- El estudio solo considera los catastros oficiales realizados por SERNAGEOMIN.

## **CAPITULO 2: CONCEPTOS GENERALES**

### **2.1 Licuefacción**

La licuefacción es un proceso natural mediante el cual determinados tipos de suelo pierden bruscamente su resistencia mecánica ante una carga dinámica rápida como puede ser un sismo. La pérdida de resistencia mecánica del suelo implica que este se comporta momentáneamente de modo similar a un fluido, siendo capaz de migrar generando importantes deformaciones en el terreno.

El sismo de magnitud 8.8 Mw del 27 de febrero de 2010, provocó numerosos casos de licuefacción en el área de estudio, causando el colapso de construcciones, entre ellas viviendas, la red vial y parte del servicio de agua potable y alcantarillado.

La licuefacción se genera principalmente en suelos arenosos y arena limosos saturados en agua, usualmente ubicados cerca de ríos, borde costero u otros cuerpos de agua, o bien, en aquellos suelos donde existe un nivel freático muy superficial. Además, sucede en los suelos que poseen baja compactación, por ejemplo, aquellos terrenos ubicados donde antes existieron lagos o lagunas y zonas de humedales.

Cuando ocurre un sismo, la vibración eleva la presión de agua en los poros del suelo y si esta llega a igualar o superar la fuerza de contacto entre los granos, la resistencia del suelo se reduce a cero, experimentando licuefacción. En este caso, la capacidad de carga del suelo es nula y, efectivamente, el suelo se comporta durante la sacudida como un líquido y cualquier estructura cimentada en él se hunde o sufre asentamientos diferenciales (INGEOMINAS, 2003).

### **2.2 Factores que condicionan el fenómeno de licuefacción**

- *Origen del suelo.* Los suelos depositados por procesos fluviales, litorales y eólicos se sedimentan fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse, de modo que se licuarán con facilidad. Los depósitos glaciales, generalmente, ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse. Suelos compuestos por roca no son en absoluto licuables.
- *Distribución del tamaño de los granos:* La arena uniformemente graduada, de grano muy grueso a medio tiene mayor probabilidad de licuarse, mientras que las arenas limosas finas y las gravas lo hacen bajo cargas cíclicas muy severas.

- *Profundidad de las aguas subterráneas:* Mientras más cerca de la superficie se encuentre el nivel de las aguas subterráneas (nivel freático), mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.
- *Edad del depósito:* Los suelos jóvenes (menos de 3.000 años) son débiles y no cohesivos, de modo que tienen mayor probabilidad de licuarse comparado con aquellos más antiguos donde han actuado procesos de compactación y cementación natural. Dichos procesos incrementan su resistencia.
- *Amplitud y duración de la vibración del terreno:* La licuefacción de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto aumenta con la magnitud y la duración del sismo. Por esta razón, sismos pequeños licuarán únicamente los suelos más próximos al epicentro, mientras que ante un sismo de magnitud mayor será posible reconocer licuefacción a distancias muy grandes. En el caso del sismo del 27 febrero de 2010 se observó licuefacción hasta al menos 400 km de distancia del epicentro (Valparaíso).
- *Peso del recubrimiento y profundidad del suelo:* Las tensiones entre partículas aumentan a medida que aumenta la presión del recubrimiento (a mayor profundidad). Mientras mayor sea dicha tensión menor será la probabilidad que ocurra licuefacción. Por lo general, la licuefacción ocurre a profundidades menores de 9 m y, rara vez, a mayores de 15 m.

### **2.3 Efectos de la licuefacción**

El fenómeno de licuefacción se manifiesta en la superficie del terreno por la formación de grietas, hundimientos de terreno, asentamientos diferenciales de estructuras, “golpes de agua” (surgimiento de agua) y volcanes de arena. Los dos últimos son producto del súbito aumento de la presión de agua de poros ocasionada por la vibración, forzando a que este fluido fluya rápidamente a la superficie. Si el flujo asciende lo suficientemente rápido se generan “golpes de agua”. Al mismo tiempo, el agua ascendente puede transportar partículas de arena hasta la superficie donde son depositadas formando montículos de arena, a los que por analogía se les denomina “volcanes de arena”.

La pérdida de cohesión del suelo permite que este se pueda movilizar, diferenciándose varios tipos de desplazamientos asociados a la licuefacción:

*Flujos de tierra:* Los materiales del suelo se desplazan rápidamente cuesta abajo en un estado licuado, a veces causando coladas de barro o avalanchas.

*Propagación lateral:* Tipo de remoción en masa en que se produce desplazamiento limitado de las capas superficiales del suelo a favor de pendientes suaves o hacia superficies libres, como por ejemplo, en márgenes de ríos y taludes de terrazas fluviales. En este tipo de desplazamientos, a menudo ocurre que las capas subsuperficiales están revestidas de cubiertas antrópicas, como por ejemplo asfaltos. Cuando las capas más profundas se licuan, las capas superficiales antrópicas, generalmente, se mueven lateralmente en bloques, tanto durante como después del sismo, provocando una deformación permanente del suelo y ruptura de las cubiertas.

*Flotación:* Objetos enterrados en el suelo bajo licuación son desplazados. Es común que tanques, buzones o tuberías de alcantarillado ascienden a través del suelo y floten en la superficie.

*Pérdida de resistencia de soporte:* Reducción de la capacidad de soporte de los cimientos debido al debilitamiento del material del suelo subyacente o colindante. A menudo provocan que las estructuras se hundan o dañen.

La licuefacción induce daños severos en estructuras, edificios y líneas vitales afectando el transporte de personas, distribución de mercancías, telecomunicaciones y suministros básicos, agravando más aún la situación posterior al evento sísmico. Por estas razones, la zonificación del peligro de licuefacción y su asimilación en las estrategias comunales de planificación territorial, es uno de los aspectos vitales para la reducción del daño sísmico.

## **CAPITULO 3: SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUEFACCION**

### **3.1 Potencial de Licuefacción**

Existen tres enfoques principales para evaluar el potencial de licuefacción de un suelo, el enfoque basado en las tensiones, el enfoque basado en las deformaciones y el enfoque basado en la energía. Históricamente, el enfoque basado en las tensiones ha sido el más utilizado para la evaluación del potencial de licuefacción, mientras que los métodos basados en la energía han sido propuestos más recientemente.

De acuerdo al enfoque basado en las tensiones, la carga impuesta al suelo por el terremoto y la resistencia del suelo a la licuefacción son caracterizadas en términos de tensiones de corte cíclicas. Este enfoque es útil porque las amplitudes de tensión cíclica pueden ser fácilmente obtenidas con exactitud y han sido verificadas, por observaciones en terreno, como un predictor conservador de licuefacción. Además representa el enfoque clásico para la evaluación del potencial de licuefacción, pues ha sido suficientemente probado y validado como una aproximación práctica y útil para la evaluación, y por consiguiente su uso se ha mantenido en el tiempo y se recomienda al menos en el futuro cercano (Kramer y Stewart, 2004).

Dentro de este enfoque, el método más ampliamente usado para evaluar licuefacción es el procedimiento simplificado propuesto por Seed e Idriss en el año 1971. Este procedimiento se basa principalmente en observaciones empíricas y en datos obtenidos en laboratorio y en terreno. Ha sido continuamente refinado como resultado de nuevos estudios y del mayor número de historiales de licuefacción disponibles en la actualidad. Según Green (2001), el procedimiento simplificado es presentado en términos de demanda, capacidad y factor de seguridad, donde demanda es la carga impartida al suelo por el terremoto, capacidad es la demanda requerida para iniciar la licuefacción o resistencia del suelo a la licuefacción, y el factor de seguridad se define como la razón entre capacidad y demanda.

### 3.2 Criterios de Susceptibilidad

No todos los suelos son susceptibles de presentar licuefacción, así que el primer paso en el desarrollo de una evaluación de riesgo de licuefacción es la determinación de la susceptibilidad de licuefacción. La susceptibilidad de licuefacción de un suelo puede ser evaluada usando criterios históricos, geológicos, basados en su composición o según su estado, estos criterios, descritos por Kramer y Stewart (2004), se presentan a continuación.

*Criterios históricos:* Se ha observado que la licuefacción ocurre frecuentemente en los mismos lugares cuando las condiciones del sitio se mantienen constantes, es por esto que la evidencia de la ocurrencia histórica de licuefacción, observada en forma de paleo licuefacción, puede ser utilizada como prueba de susceptibilidad de licuefacción, en un determinado lugar.

*Criterios geológicos:* Las condiciones geológicas también pueden indicar susceptibilidad de licuefacción, por ejemplo los suelos de depósitos fluviales y eólicos, cuando se encuentran saturados, tienen una alta probabilidad de ser susceptibles de presentar licuefacción. También se ha observado licuefacción en depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios, pero no de manera tan evidente como en los casos anteriores. Otro criterio geológico es la edad del depósito, en general los depósitos de suelo jóvenes son más susceptibles de licuefacción que los depósitos más antiguos.

*Criterios basados en la composición del suelo:* La composición física de un suelo juega un importante papel en la determinación de su susceptibilidad de licuefacción. Las arenas uniformemente gradadas y limpias, compuestas principalmente de partículas redondeadas son intrínsecamente más susceptibles, mientras que los suelos bien gradados y los suelos con partículas angulares son menos susceptibles. La presencia de finos, particularmente finos plásticos ( $IP > 10$ ), tiende a disminuir la susceptibilidad de licuefacción.

*Criterios basados en el estado del suelo:* El potencial de licuefacción de un suelo también depende de su estado, como las tensiones efectivas a las que está sometido y su densidad in situ, ya que la tendencia de un terreno a densificarse, bajo condiciones de carga cíclicas, depende de su densidad y de las tensiones efectivas. Los suelos sueltos son bastante más susceptible de licuefacción que los suelos densos y, para una densidad dada, los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas altas son más susceptible que los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas bajas.

### 3.3 Método basado en el ensayo de resistencia a la penetración estándar (SPT)

Interés ha despertado en la Ingeniería práctica la aplicación de correlaciones entre la resistencia in-situ del suelo, generalmente medida por ensayos de penetración estándar (SPT), y la resistencia a la licuación que representa el suelo frente a un sismo. Estudios realizados por Seed et al, Tokimatsu y Yoshim acerca del comportamiento de arenas limpias y limosas frente a sismos, demuestran la existencia de dichas correlaciones.

El procedimiento requiere calcular dos variables sísmicas que son:

- La excitación sísmica del estrato de suelo, expresada en términos de la relación de tensiones cíclicas promedio ( $CSR = \tau_{pro} / \hat{\sigma}_{vo}$ ).
- La capacidad del estrato de suelo para resistir la licuación, en términos de la relación de resistencia cíclica (CRR)

En la mayoría de los procedimientos empíricos, el valor promedio de la relación de tensiones cíclicas (CSR) inducidos por el sismo se estima de los análisis de la respuesta dinámica del suelo, o mediante la expresión recomendada por Seed e Idriss (1971).

$$CSR_{peak} = \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d \quad (\text{Ec. 1})$$

$$CSR_{eq} = 0.65 \cdot CSR_{peak} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

$a_{m\acute{a}x}$  = máxima aceleración registrada en la superficie

$g$  = aceleración de gravedad

$\sigma_v$  = presión total a la profundidad considerada

$\sigma'_v$  = presión efectiva a la profundidad considerada

$r_d$  = factor de reducción de tensión

El factor de reducción se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$r_d = 1 - 0,001 \cdot h_{SPT} \quad (\text{Ec. 3})$$

donde:

$h_{SPT}$  = Profundidad de análisis para ensayo SPT

La resistencia a la penetración utilizada en las correlaciones corresponde al número de golpes medido en terreno ( $N$ ) al cual se le aplica una corrección por tensión efectiva (Llao y Whitman, 1986):

$$N_1 = N \cdot C_N \quad (\text{Ec. 4})$$

donde:

$$C_N = \left( \frac{1}{\sigma'_v} \right)^{0.5} \quad (\text{Ec.5})$$

donde:

$C_N$  = factor de corrección para una tensión efectiva de sobrecarga de 1 ton/pie<sup>2</sup>

$\sigma'_v$  = tensión efectiva vertical en atmósferas

La resistencia del suelo queda representada por ( $N_{1,60}$ ), la cual es la cantidad de golpes del SPT corregido para una presión de sobrecarga efectiva de 1 Ton/pie<sup>2</sup> ( $\approx 1 \text{ kg/cm}^2$ ), y para una razón de energía del 60% de la máxima teórica (ver Anexo A).

Corrección por energía aplicada, equipamiento y efectos de procedimientos para obtener un valor estandarizado de:

$$N_{1,60} = N_1 \cdot C_R \cdot C_S \cdot C_B \cdot C_E \quad (\text{Ec.6})$$

donde:

$C_R$  = Corrección por longitud de varillaje

$C_S$  = Corrección por tipo de muestreador

$C_B$  = Corrección por diámetro de perforación

$C_E$  = Corrección por relación de energía

$C_S$ : Cuchara partida estándar = 1

Cuchara partida sin liners = 1.1 – 1.3

$C_B$ : 65 a 115 mm = 1

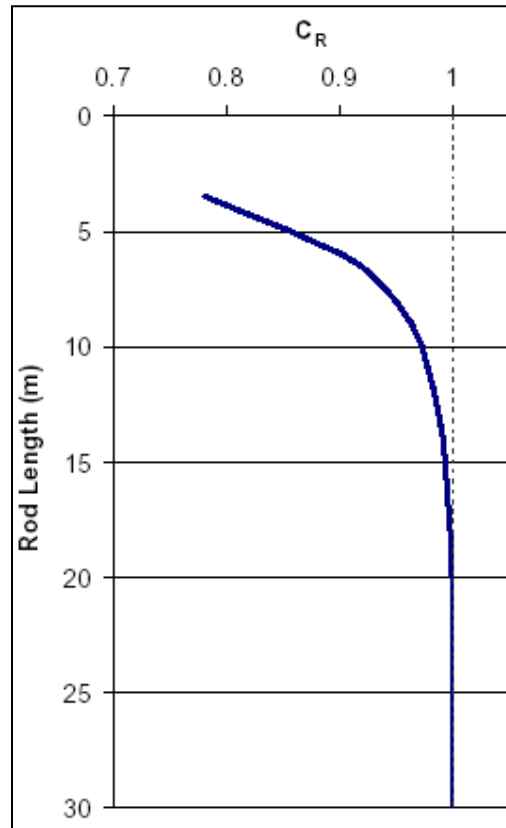
150 mm = 1.05

200 mm = 1.15

$C_E$ : Martillo cilíndrico = 0.5 - 1

Martillo de seguridad = 0.7 – 1.2

Martillo automático-cilíndrico = 0.8 – 1.3



**Figura 1. Corrección por longitud de varillaje  $C_R$ . Fuente: Youd et al, 2000.**

### 3.3.1 Factores de escala por magnitud del sismo (DWF<sub>M</sub>)

Es importante considerar la duración del sismo para la determinación del Potencial de Licuación, porque, éste depende directamente del número de ciclos significativos que tenga el sismo, ya que a mayor cantidad de ciclos, mayor es la cantidad de presión de poros que se va acumulando. Luego, este efecto puede ser tomado en cuenta aplicando un factor de corrección a la magnitud del terremoto.

Seed (1975), demostró que existe un número de ciclos que representa a cada magnitud sísmica, llamado número de ciclos significativos.

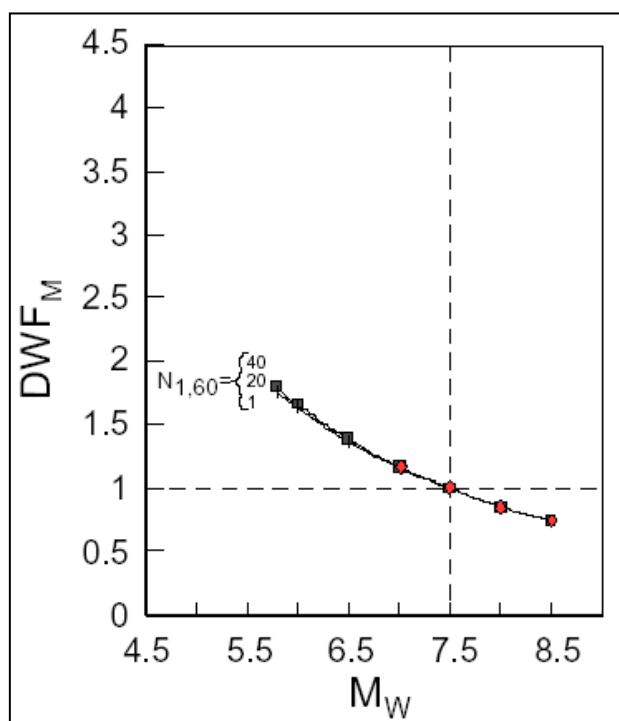
La mayoría de los datos (casos conocidos donde se sabe si hubo o no licuación) utilizados en el desarrollo de las correlaciones están asociados a sismos de magnitudes cercanas a  $M=7,5$ , de manera que las curvas que se obtuvieron representan sismos de esa magnitud; pero también existen datos con otras magnitudes, los cuales pueden ser utilizados en estas correlaciones si se divide la razón de tensiones inducida por el sismo de magnitud  $M$ , por el factor de corrección

propuesto por Seed e Idriss en 1982 y modificado por Idriss (2000), el cual se presenta en la Figura 2, de manera de obtener la razón de tensiones correspondiente a un sismo de magnitud 7,5.

$$CSR_N = CSR_{eq,M=7.5} = \left( \frac{CSR_{eq,M=M}}{DWF_M} \right) \quad (Ec.7)$$

donde:  $CSR_{eq,M=M}$ : Razón de tensiones cíclicas equivalentes para una determinada magnitud sísmica (M).

$DWF_M$ : Factor por Magnitud de Sismo.



**Figura 2. Factores de Escala por Magnitud del Sismo en función de  $N_{1,60}$**

**Fuente: Idriss, 2000.**

### 3.3.2 Ajuste por tensión de sobrecarga ( $K_\sigma$ )

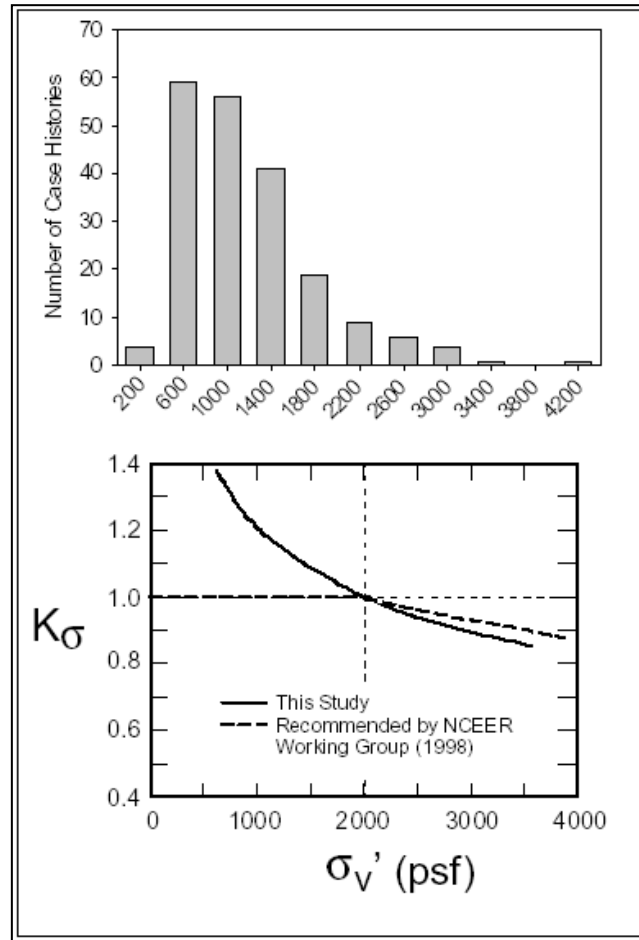
Un factor adicional no resuelto directamente en estudios anteriores basado en casos históricos en el incremento de susceptibilidad de suelos a la licuación cíclica, del mismo modo CSR, con incremento en la tensión efectiva de sobrecarga.

El efecto adicional de reducción en la resistencia a la licuación normalizada con incrementos de la tensión efectiva de sobrecarga ( $\sigma'_v$ ) está demostrado por test de laboratorio, y es una manifestación de un comportamiento del tipo "estado crítico" (suelos llegan a disminuir la dilatancia cerca del incremento de tensión efectiva). La Figura 3 muestra recomendaciones hechas por Youd et al , 2001.

Respecto a la corrección del factor  $K_\sigma$  usado para corregir, la resistencia normalizada a la licuación para una tensión inicial efectiva de sobrecarga de 1 atm ( $\sigma'_v=2000 \text{ lb/ft}^2$ ).

Recomendaciones usadas en las nuevas correlaciones basadas en el Test de Penetración Estándar

$$CSR^* = CSR_{eq,M=7.5,1atm} = \left( \frac{CSR_{eq,M=7.5}}{K_\sigma} \right) \quad (\text{Ec.8})$$



**Figura 3. Valores de  $K_\sigma$ , NCEER (2003) para  $n=0.7$ ,  $D_r \approx 60\%$ .**

La curva que se ilustra en el gráfico de la Figura 4 intenta dividir zonas correspondientes a licuación y No-Licuación, por ejemplo para suelos con un contenido de finos  $< 5\%$ . A partir de esta curva se eleva el Potencial de Licuación de otro sitio, ubicando el punto correspondiente al número de golpes corregido del SPT para el lugar y el sismo de diseño (en este caso 7.5). Si el punto ubicado en esta forma, cae sobre la curva, se dice que el suelo es susceptible de licuarse; si el punto está situado bajo la curva, entonces con un adecuado margen de seguridad se dice que el lugar es seguro.

Se puede ver que los puntos que presentan licuación parcial, por lo general están próximos a la curva, y a medida que se alejan por la parte superior éstos muestran una licuación total; a medida que se alejan por la parte inferior éstos no evidencian licuación.

Para determinar la resistencia a la licuación de los suelos arenosos y con contenidos de finos, la relación de tensiones cíclicas (CSR) se compara con la relación de resistencia cíclica (CRR), esta última se obtiene de correlaciones empíricas entre la relación de esfuerzos cíclicos requeridos para causar licuación y los valores de N (SPT) normalizados por profundidad y energía de los golpes del martillo (valores de  $(N_{1,60})$ ). En la Figura 5 se muestran las curvas recomendadas por Seed, et al (2003).

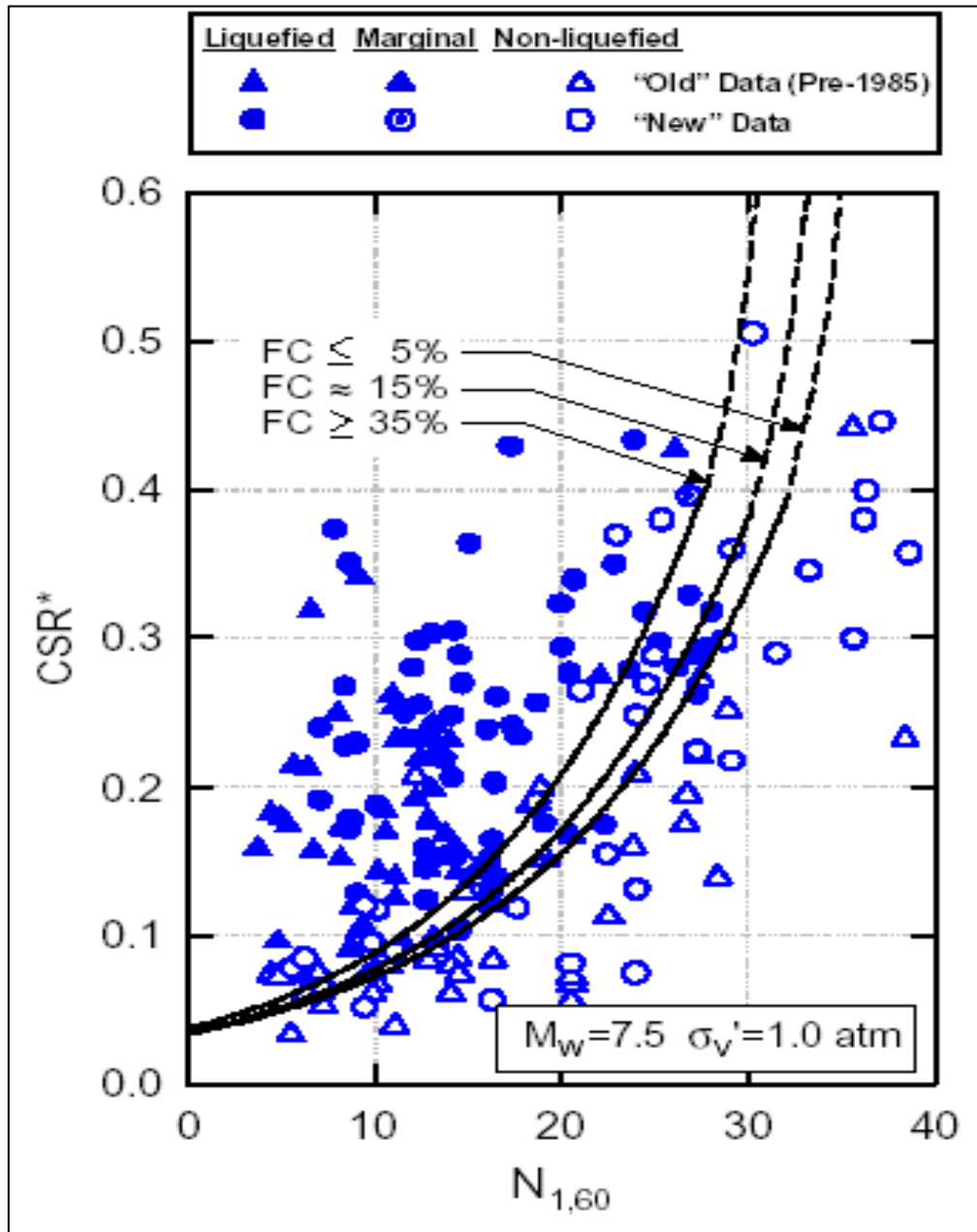


Figura 4. Relación entre razones de tensiones causantes de licuación y valores corregidos del SPT (para  $M_w=7.5$  y  $\sigma_v'=1$  atm) con ajuste de contenido de finos. Fuente: Seed, et al 2003.

## **CAPITULO 4: APLICACIÓN**

En este capítulo se realizara una investigación del riesgo de licuación en Concepción de acuerdo a la metodología de Seed & Idriss. La primera parte consiste en la recopilación de datos para realizar el análisis y la segunda en la aplicación de la metodología, para luego analizar los resultados.

### **4.1 Recopilación de información**

Antes de aplicar la metodología para establecer las zonas potencialmente licuables, fue necesario buscar la información que se requiere para el análisis por lo que se requirió de diferentes fuentes de investigación y se dividen en las siguientes.

#### *4.1.1 Zonificación*

Para poder caracterizar zonas de posible licuación no es necesario identificar cientos o miles de sondajes por separado ya que sería muy tedioso y poco práctico, lo que se hace es analizarlas en grandes zonas con similitud en las características de suelo.

Para ello se utilizó la información de mecánica de suelos de la comuna de concepción en donde se dividió en áreas de igual tipo de suelos.

Esta información de específica en formato ARCVIEW. Detalle de cada zona, ver anexo Anexo B

Cada área en el mapa contiene información de más de 200 sondajes de la ciudad de Concepción, los que entregan la siguiente información:

- Nivel freático
- Perfiles estratigráficos
- Ensayos SPT

#### 4.1.2 Parámetros del suelo

Para la metodología utilizada es necesario saber los parámetros de peso unitario seco y el peso unitario saturado de cada tipo de suelo, por lo que se utilizó los valores de (Lambe, 2000), los que se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Valores de Peso Específico Seco y Saturado (Lambe, 1972)**

	$\gamma_d$ seco (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ saturado (KN/m <sup>3</sup> )
GRAVA	1,9 - 2,2	2 - 2,2
ARENA	1,7 - 2	1,8 - 2
LIMO	1,7 - 2	1,8 - 2
ARCILLA	1,5 - 2,2	1,6 - 2

De la misma manera la información de contenido de finos se obtuvo de (Lambe, 2000), la que se presenta en la Tabla 2.

**Tabla 2. Porcentaje de finos para cada tipo de suelo según la clasificación USCS de suelos (Lambe, 1972)**

	% de fino
SM(ML)	30 - 50
SM	12 - 30
ML	> 50
SP SM	5 - 12
SP	< 5

En el caso del contenido de finos la condición más desfavorable la presenta un porcentaje de finos menor, por lo tanto se utilizará esos porcentajes.

#### 4.1.3 Parámetros del sismo

Para poder realizar un análisis más detallado de la metodología de Seed & Idriss este estudio considera dos magnitudes sísmicas, para así luego comparar el potencial de riesgo de licuefacción con el aumento de la variable de magnitud.

##### a) Magnitud

La primera magnitud utilizada será de 7.8 grados Richter. Esta magnitud responde a que anteriormente se realizó una memoria de estudio con esta metodología la que consideró el terremoto del año 1985 en la zona central del país y se aplicó a la ciudad de Concepción. Este estudio se realizó antes del terremoto del año 2010 en por lo que no se tenía información sísmica parecida.

La segunda magnitud utilizada es de 8.8. Se utilizó este valor ya que en la zona en estudio ocurrió un sismo de esta magnitud el 27 de febrero de 2010 con una magnitud de 8.8 grados en la escala de Richter con hipocentro a 35 kilómetros de profundidad y epicentro a 115 kilómetros de la ciudad de Concepción, según el Servicio sismológico de Chile y el servicio sismológico de los Estados Unidos. Por lo que se tiene información de los daños producidos luego del evento.

##### b) Aceleración máxima del suelo

Para el análisis con la magnitud de 7.8 en el estudio “Susceptibilidad de los Suelos de la Comuna de Concepción a la Licuación” de Alex Acuña el año 2004 se utilizaron tres valores según el área de Concepción. Ver Anexo C

El valor de las aceleraciones superficiales son los siguientes tomados de (referencia 9):

- Concepción centro caracterizado con una aceleración máxima de 0.24g.
- Sector Nonguén caracterizado con una aceleración máxima de 0.32g.
- Sector límite Concepción-Talcahuano caracterizado con una aceleración máxima de 0.28g.

El sismo registrado en 1985 en Valparaíso y Viña del Mar tuvo una magnitud de 7.8 con una aceleración máxima superficial de 0.24g para Viña del Mar en Concepción, de 0.28g para Valparaíso en Concepción-Talcahuano y de 0.32g para Valparaíso en Nonguén.

Para el segundo sismo de análisis, Magnitud 8.8, se utilizó la información de los acelerógrafos localizados en la ciudad de Concepción.

Las máximas aceleraciones obtenidas luego del terremoto se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3. Máximas aceleraciones registradas en el Terremoto de 2010.**

Localidad	Aceleración Máx. Horizontal NS	Aceleración Máx. Horizontal EW	Aceleración Máx. Vertical
Colegio San Pedro, Concepción	0.65 g	0.61 g	0.58 g
Cerro Calán, Santiago	0.20 g	0.23 g	0.11 g
Campus Antumapu, Santiago	0.23 g	0.27 g	0.17 g
Cerro El Roble	0.19 g	0.13 g	0.11 g
Melipilla	0.57 g	0.78 g	0.39 g
Olmué	0.35 g	0.25 g	0.15 g
Casablanca	0.29 g	0.33 g	0.23 g
San José de Maipo	0.47 g	0.48 g	0.24 g
Colegio Las Américas	0.31 g	0.23 g	0.16 g
Cerro Santa Lucia	0.24 g	0.34 g	0.24 g

Como la zona de estudio es Concepción utilizaremos los 0.65 g de aceleración máxima para nuestro estudio.

#### 4.1.4 Rango o nivel de licuación

Al determinar la cantidad de estratos y metros licuables es importante definir criterios para los niveles de licuación, ya que al crear el mapa será necesario identificar zonas de alto, medio y bajo riesgo. Estos criterios están basados en el espesor de suelo licuable, el cual determinara su riesgo de acuerdo a los siguientes niveles.

- Rango de susceptibilidad Bajo: un estrato licuable que tenga un espesor de por lo menos 1 metro.
- Rango de susceptibilidad Medio: Dos estratos licuables que tengan un espesor de por lo menos 1 metro cada uno.
- Rango de susceptibilidad Alto: Tres estratos licuables que tengan un espesor de por lo menos 1 metro cada uno.
- Rango de susceptibilidad Muy Alto: Más de tres estratos licuables que tengan un espesor de por lo menos 1 metro cada uno.

## 4.2 Aplicación de la metodología

Aplicaremos la Metodología de Seed & Idris como se explicó en el Capítulo 3, dividiéndolo en varias zonas. Primero realizaremos los cálculos pertinentes para luego mostrar gráficamente los resultados y realizar comparaciones.

### 4.2.1 Programación

Para aplicar la metodología se requiere de varios pasos y cálculos repetitivos, por lo que utilizamos un método de programación para hacer menos tedioso el análisis. El programa utilizado fue MATLAB por su amplio conocimiento. Ver programación en Anexo D.

Se crearon los comandos para que se realizaran los siguientes cálculos

- Cálculo el esfuerzo efectivo total y efectivo para cada profundidad de análisis de ensayo SPT
- Calcula el factor de reducción de tensiones de corte a cada profundidad de análisis
- Calcula la razón de tensiones cíclicas (CSR) para cada profundidad de análisis
- Aplica el factor de corrección por magnitud sísmica
- Corrige el ensayo SPT para cada profundidad de análisis
- Determina los límites para la razón de resistencia cíclica (CRR) para cada profundidad de análisis
- Gráfica y evalúa a cada profundidad de análisis si el suelo licua o no

Por lo tanto para cada sondaje o zona de estudio se requiere ingresar en una planilla Excel los siguientes datos:

- Magnitud del sismo
- Aceleración máxima, en g
- Numero de estratos del perfil
- Profundidad de los estratos, en metros.
- Nivel freático, en metros
- Numero de ensayos de SPT
- Profundidad de los ensayos SPT, en metros
- Porcentaje de finos a la profundidad de cada ensayo SPT.
- El valor SPT a la profundidad de cada ensayo SPT.
- El peso específico total de cada estrato, en (KN/m<sup>3</sup>).
- El peso específico saturado de cada estrato, en (KN/m<sup>3</sup>).

Al ingresar estos datos el programa entrega la descripción para cada profundidad de ensayo SPT si licua o no, mostrando además un gráfico según la metodología utilizada.

#### *4.2.2 Resultados*

Luego de aplicar la metodología en cada área de suelo se obtuvo cuantos metros licuables hay en cada uno. La Figura 8 y 9 muestran las áreas de la comuna de Concepción evaluadas en el análisis de licuefacción indicando en cada una de ellas los metros licuables para cada magnitud sísmica de análisis respectivamente.

Para ver detalle de cada zona analizada ver Anexo E

#### *4.2.3 Aplicación de niveles de licuación*

Luego de ello es importante establecer criterios o niveles de licuación para determinar qué zonas son altamente licuables y cuáles no tanto, por ello es necesario identificar cada área por zonas de riesgo. Así utilizamos los criterios definidos en 4.1.4.

Para ver mapas ver Anexo F

## **CAPITULO 5: ANALISIS**

El enfoque central de este estudio consiste en la comparación entre los resultados de la metodología y lo realmente ocurrido, pero también se comparará la aplicación de la metodología al incrementar la magnitud sísmica y ver qué sucede. De acuerdo a ello se podrán entregar conclusiones que definan si la metodología es o no aplicable a la comuna de Concepción.

### **5.1 Comparación de la aplicación de la metodología al aumentar la magnitud sísmica de 7.8 a 8.8 grados Richter**

Luego de aplicar la metodología para ambas magnitudes sísmicas vemos las diferencias entre ambos análisis como se muestra en la Figura 5.

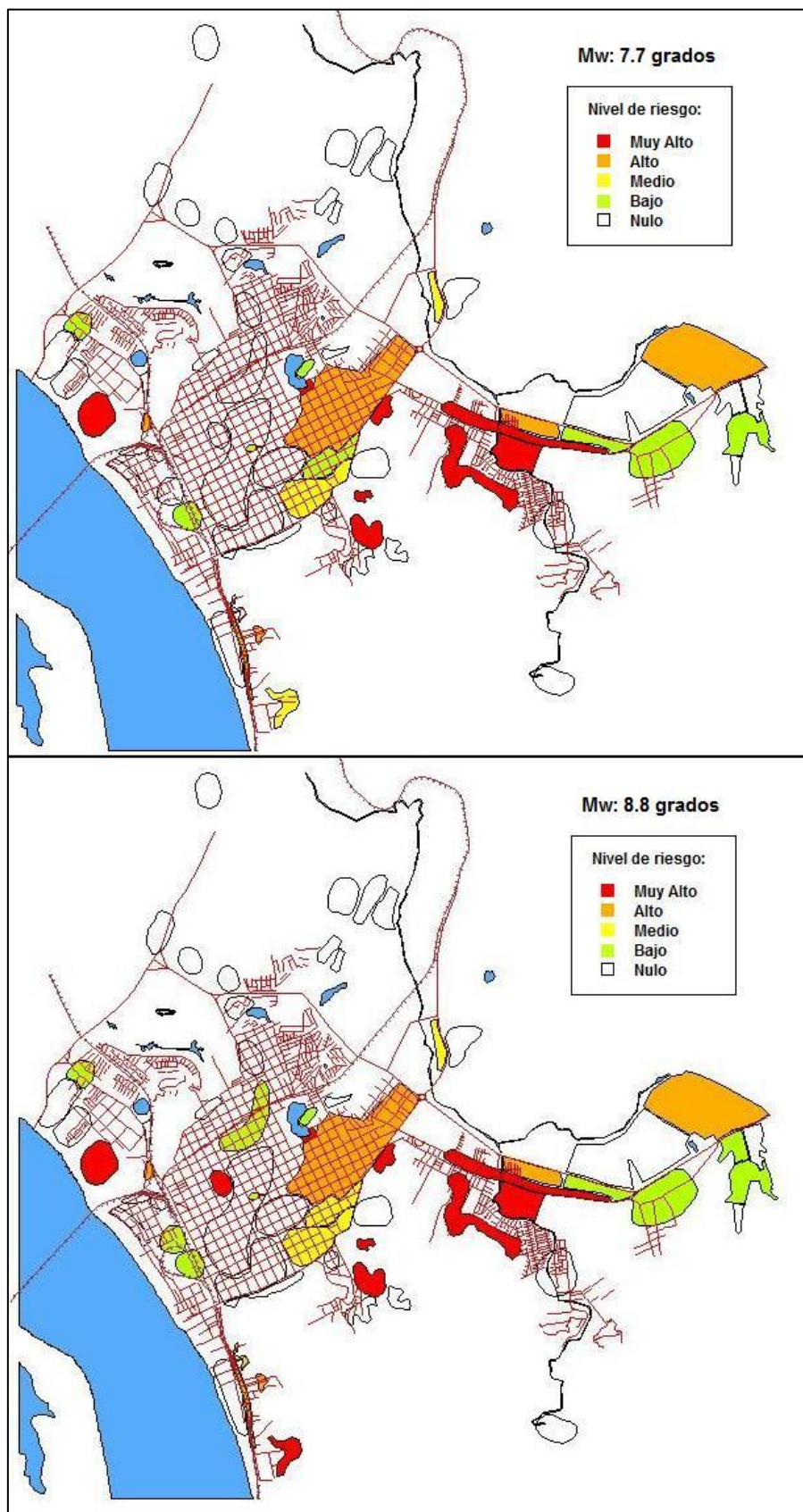


Figura 5. Comparación de las zonas de riesgo entre una magnitud de 7.8 y 8.8 grados Richter

Al analizar las comparaciones se pueden diferenciar dos casos:

#### *5.1.1 Áreas donde se mantuvo el nivel de riesgo*

Como se aprecia en la Figura 5 en la mayoría de las zonas se presentó esta condición. En este caso el aumento de magnitud no provocó cambios en el riesgo licuable ya sea: porque sería necesario una magnitud y aceleraciones mayores, porque los suelos de estos sectores son lo bastante compactos para que no se produzca el fenómeno o porque el aumento en los metros licuables fueron tan pequeños que se mantuvieron en el mismo nivel de riesgo.

#### *5.1.2 Áreas de aumento en el nivel de riesgo*

Luego de comparar los dos mapas de riesgo, el primero de 7,8 grados y el segundo de 8,8 grados, podemos visualizar cuáles áreas aumentaron el número de metros licuables, y por lo tanto, su nivel de riesgo.

Los sectores de estudio mostrados a continuación representan las áreas que aumentaron el potencial de riesgo de licuefacción de acuerdo a la metodología anteriormente vista. Estos cambios se deben únicamente por el aumento en la magnitud sísmica y por ende la aceleración máxima del suelo, ya que el resto de las variables involucradas en el análisis se mantuvieron constantes. (Ver Anexo F)

##### a) Sector Pedro del Rio

La zona del sector de Pedro del Rio estudiada, mostró un aumento de un nivel en el riesgo de licuefacción. Paso de presentar un riesgo Nulo de aproximadamente 0,8 metros a un riesgo Bajo con 1,2 metros licuables. (Ver Anexo G)

##### b) Sector Concepción centro norte

En este sector la zona de análisis aumentó el nivel de licuefacción en un grado, paso de riesgo nulo con 0,5 metros, a riesgo Bajo, con 1,5 metros licuables. (Ver Anexo G)

##### c) Sector Cerro Amarillo

Este fue el sector que más aumento en cantidad de metros licuables, pasó de tener riesgo nulo (0 metros), a riesgo Muy Alto (5 metros). Este aumento se debió a que el estrato de suelo analizado poseía un SPT (entre 8 a 10 golpes) tal que al aumentar la magnitud, todo el estrato licuó. (Ver Anexo G)

d) Sector Concepción centro Este ( entre Ongolmo, Rosevelt, B. Arana y san Martin)

La aplicación de la metodología a este sector indico que pasó de riesgo Bajo, con 1 metro licuable, hasta un riesgo Medio, con 2,8 metros licuables. (Ver Anexo G).

e) Sector Pedro de Valdivia (pie de monte)

Zona 1: Paso de tener riesgo nulo (0 metros) a Bajo (1,1 metros). Ver Anexo G

Zona 2: Paso de tener riesgo Medio (2,4 metros) a Muy Alto (4,4 metros). Ver Anexo G.

f) Sector ex fundo Las Ulloas ( Zona 1)

Este sector pasó de riesgo Nulo (0,5 metros) a riesgo Bajo (1,6 metros). Ver Anexo G.

## **5.2 Comparación entre los catastros realizados luego del terremoto de 2010 en concepción y la metodología de Seed & Idriss para esa misma magnitud sísmica.**

### *5.2.1 Catastros del terremoto del 27 de febrero de 2010 en Concepción*

Para determinar en qué lugares específicamente se evidenció licuación se recurrió a información de catastros realizados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), en los cuales se tiene información en terreno donde ocurrió el fenómeno.

Los informes que se consideraron para este estudio fueron: “EFECTOS GEOLOGICOS DEL SISMO DEL 27 DE FEBRERO DE 2010: OBSERVACIONES DE DAÑOS Y EVALUACION DE RIESGOS GEOLOGICOS EN LA COMUNA DE CONCEPCION”, fuente SERNAGEOMIN.

INFO-BIOBIO: 13, 17, 25, 29, 45, 47, 52. Ver Anexo H.

En estos informes se especifica que las zonas donde se evidenció licuación son:

- Sector Tucapel bajo
- Sector laguna Tres Pascualas
- Sector Lomas de San Andrés
- Sector laguna Lo Méndez
- Sector laguna Lo Costodio
- Sector laguna Redonda
- Sector parque residencial Miraflores
- Portal del Centro, Salas 1541
- Sector autopista Constanera bio bio/ Pedro de Valdivia bajo
- Sector Valle Noble
- Sector Villa Cap
- Villa Loncopán
- Parque residencial Collao
- Población Buena Vista, Chillancito

En todas estas zonas se evidenció: Golpes de agua, volcanes de arenas, agrietamientos y asentamientos que son evidencia inequívoca de Licuefacción

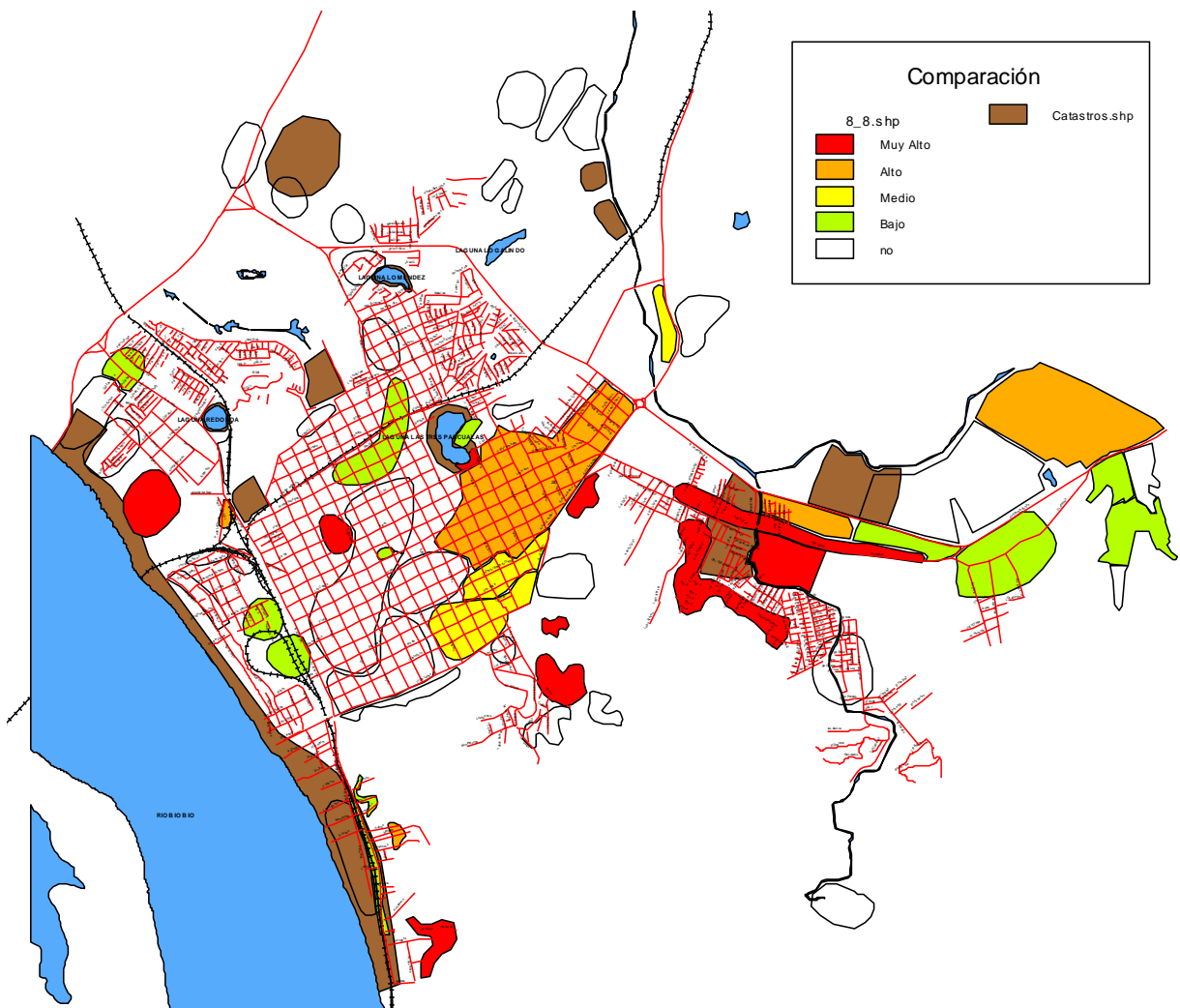
Cabe señalar que estos no son los únicos sectores en donde se presentó el fenómeno. Muchos lugares si fueron afectados con licuefacción pero no fueron catastrados por el gobierno, por lo que en este estudio solo consideraran los casos documentados por SERNAGEOMIN.

Para crear este mapa se tomó la información de los catastros y se ubicó en el mapa de Concepción dichas áreas indicándolas como se muestra en Anexo I.

### 5.2.2 Comparaciones entre los catastros y la metodología

Para poder identificar las similitudes y las diferencias entre los mapas debemos hacer una comparación visual. Ver Anexo I.

Luego realizamos una superposición entre los mapas anteriormente vistos y creamos uno nuevo como se muestra en la Figura 6.



**Figura 6. Superposición entre las zonas licuables luego del terremoto y las áreas que mostraron riesgo luego de aplicar la metodología de Seed & Idriss.**



### 5.2.3 Sectores donde coincide la metodología y los catastros

#### a) Sector Laguna Tres Pascualas

En este sector se evidenció licuefacción en todo el borde de la laguna ya que este tipo de suelo está altamente saturado por la cercanía de la napa a la superficie. Aplicando la metodología de estudio se verificó que el área sur presentó un riesgo Muy Alto, y el borde Este presentó riesgo Bajo. Ver Anexo J

#### b) Sector autopista Constanera Bio bio / Pedro de Valdivia bajo

Todo el borde del Río Bio Bio (sector costanera) presentó licuefacción de acuerdo a los catastros recopilados, con mayor presencia en el sector posterior de la Vega Monumental y entrada al puente Juan Pablo Segundo y por otro lado el sector de Pedro de Valdivia Bajo. Aplicando la metodología se tiene que las áreas coincidentes corresponden a la costanera del río Bio Bio a la altura del Cementerio General, el cual tuvo un riesgo Muy Alto y también una coincidencia en todo el sector de Av. Pedro de Valdivia, donde se analizó que el riesgo era Bajo.

#### c) Sector Villa Loncopán

En este sector los catastros realizados luego del terremoto evidenciaron que en gran parte de la Villa ocurrió licuefacción, los fenómenos más observados fueron golpes de agua, surgimiento de arenas y grietas.

Al aplicar la metodología se observa que esta zona presenta un potencial de riesgo Muy Alto, con aproximadamente 6 metros licuables. Se puede apreciar que la zona analizada con la metodología de Seed & Idriss es bastante limitada y no abarca toda la zona catastrada, por lo tanto no se puede determinar si efectivamente toda el área licuada de la Villa Loncopán, coincide o no con el estudio de la metodología.

#### d) Sector Parque Residencial Collao

En este sector el estudio de catastros post terremoto mostró que amplias zonas del Parque Residencial Collao presentaron licuefacción.

Aplicando la metodología se observó que la zona de suelo a lo largo de Avenida Collao presentó un potencial de riesgo Muy Alto, con aproximadamente 4 metros licuables, mientras que la zona

de suelo que comprende entre el Estero Nonguén, General Bonilla y Avenida Collao presentó un potencial de riesgo Alto con aproximadamente 3,7 metros licuables.

Acá se observaron amplias coincidencias entre el método y lo realmente ocurrido ya que al aplicar la metodología el área de estudio de suelo era más amplio que en el caso de Villa Loncopán.

#### *5.2.4 Sectores donde ocurrió licuefacción y utilizando la metodología se evidencio un potencial de riesgo nulo*

##### a) Sector Pedro de Valdivia Bajo

Este sector presentó licuefacción de acuerdo a los catastros recopiladas luego del terremoto. Sin embargo, la zona 1 contrastada con el catastro muestra que no se registró licuefacción utilizando la metodología de Seed & Idriss. Los metros licuables con la metodología fueron 0,7 metros aproximadamente, los cuales corresponden al intervalo de riesgo Nulo en el criterio de clasificación.

El hecho de que no coincidan se debe a que la información de zonificación de suelo que se tiene contempla que existe suelo arenoso hasta los 3,8 metros, mientras que los estratos siguientes son en su mayoría limos y estos de acuerdo a la metodología de estudio no permite analizarlos. Además de ello se tiene información que en este sector el nivel freático esta en promedio a unos 3,1 metros de la superficie, por lo que de hecho se tiene el máximo de metros licuables para esta zona ( $3,8\text{m} - 3,1\text{m} = 0,7\text{m}$ ). Esta cantidad de suelo licuable en estricto rigor tiene un nivel de riesgo y por lo tanto coincidirían con lo que realmente ocurrió en esta zona luego del terremoto. Ver Anexo K.

##### b) Laguna Lo Méndez:

El catastro evidenció que todo el borde de la laguna licuó, pero al aplicar la metodología mostró que había riesgo nulo. Esto se explica porque la intersección de las zonas es bastante pequeña, por lo que no se tiene mucha información del tipo de suelo que rodea a toda la laguna y es muy probable que en todo el borde se presentara licuefacción producida por propagación lateral, que este estudio no considera. Ver Anexo K

c) Sector Loteo Santa Josefina

En este sector al aplicar la metodología se mostró que los metros licuables fueron 0,7m, por lo que en parte coincide con los catastros del terremoto.

Se puede apreciar que solo parte de la zona analizada con la metodología coincide con zonas que produjeron licuefacción luego del terremoto de 2010, por lo que no se tiene mayor información de todo el sector de Valle noble. A pesar de ello la metodología entregó que 0,7 metros licuaban, lo que entonces coincide con lo realmente ocurrido el 2010.

Independientemente de aquello esta zona es altamente licuable al ser suelo arenoso y saturado debido a la cercanía de ríos. Ver Anexo K

d) Sector Parque Residencial Miraflores

En este sector, se evidenció licuefacción de las arenas generando: asentamientos, fracturamiento del pavimento y subsidencia del suelo. Todo ello debido a que los suelos donde se fundan las viviendas corresponden a terrazas de arenas limosas del Rio Bio-Bio, altamente saturadas por la proximidad del nivel freático a la superficie.

Al aplicar la metodología de Seed & Idriss a las zonas más cercanas a los catastros se calculó que el riesgo era nulo, ya que para la zona 1 y 2 los metros licuables fueron 0 m. Ello se debe principalmente a que los valores de SPT son lo suficientemente altos para no presentar riesgo. Se puede apreciar que tanto la zona 1 como la 2 no presentaron riesgo donde realmente si ocurrió el fenómeno, ello puede deberse a que falta información detallada específicamente de las zonas de contacto más cercanas al Rio Bio Bio, donde puede que el suelo se encuentre más suelto y por lo tanto los valores de SPT producirían un potencial de riesgo mayor.

### *5.2.5 Áreas catastradas en las cuales no se tiene información del suelo*

Las áreas analizadas con nuestra metodología se limitan por la cantidad de información de mecánica de suelos que se tenga. En nuestro análisis se utilizó un enfoque por zonas, como se vio en el Capítulo 4.1.1, dichas zonas lamentablemente no abarcan todas áreas donde se registró licuefacción.

Las áreas donde ocurrió licuefacción luego del terremoto y no se tiene información de suelo son:

- Sector Costanera Rio Bio Bio
- Tucapel Bajo
- Villa Cap
- Sector Portal del Centro (Salas 1541)
- Población Buena Vista
- Sector Laguna Redonda

## CAPITULO 6: CONCLUSIONES

### 6.1 Observación del riesgo licuable al aumentar la magnitud sísmica utilizando la metodología de Seed & Idriss

Luego de aplicar la metodología para evaluar el riesgo de licuefacción en la comuna de Concepción, para ambas magnitudes, se pudo determinar los niveles de vulnerabilidad de cada uno.

**Tabla 4: Distribución del riesgo de licuefacción para cada magnitud sísmica de análisis.**

RIESGO	Mw = 7.8	Mw = 8.8
Muy Alto	<b>15,4%</b>	<b>19,2%</b>
Alto	<b>9,6%</b>	<b>9,6%</b>
Medio	<b>5,7%</b>	<b>5,7%</b>
Bajo	<b>17,3%</b>	<b>23,1%</b>
Nulo	<b>52,0%</b>	<b>42,3%</b>

En general el hecho de aumentar la magnitud sísmica en el análisis significo que el 25 % de las zonas aumentarán de riesgo, mientras que el 75 % se mantuvo con el mismo nivel.

Esto quiere decir que en la mayoría de los casos la magnitud sísmica no fue un factor suficiente para aumentar el nivel de riesgo, sino que el tipo de suelo y la compacidad de éste determinan aún más el potencial de riesgo.

En general, todas las áreas que se evaluaron aumentaron el riesgo en 1 nivel, menos en un caso. Este caso se dio en el sector de Cerro Amarillo, en él, al incrementar la magnitud sísmica aumentó de riesgo nulo (0 metros licuables) a riesgo Muy Alto (5 metros licuables). Esto se debió principalmente a que el espesor de suelo potencialmente licuable (5 metros) poseía un valor de SPT (8 – 10 golpes) tal que para los 7,8 grados Richter no produjo riesgo, mientras que para los 8,8 grados todo el estrato licuó.

Otro factor relevante a considerar es que en este estudio se evaluó únicamente suelos arenosos (SW, SP, SM y SC según clasificación USCS) ya que la metodología solo es aplicable a ellos, pudiendo haber suelos de tipo limosos, gravas o rellenos que podrían presentar licuefacción pero no son considerados.

Como la aplicación de la metodología de evaluación se analizó por grandes áreas de suelo, la información de algunos parámetros geotécnicos se presentó en rangos, como por ejemplo: el nivel freático y el contenido de finos. Para estos casos siempre se utilizó el valor más desfavorable, es decir, el menor valor del intervalo

## **6.2 Comparación entre las zonas realmente licuables y la metodología**

En este análisis solo se estudió la intersección de estas áreas ya que para el resto no se tenía información. Estas áreas corresponden al 23% de las zonas que se evaluaron con la metodología. De estas el 75% presentó suelo licuable y el 25 % no

Las áreas que presentaron licuefacción utilizando la metodología de Seed & Idriss y que coinciden con las áreas catastradas donde realmente ocurrió son:

- Sector Lorenzo Arenas (cementerio General): Riesgo Muy Alto con 4 metros licuables
- Sector Avenida Pedro de Valdivia: Riesgo Bajo, con 1 metro licuable
- Sector Este Laguna Tres Pascualas: Riesgo Bajo, con 1 metro licuable
- Sector Sur Laguna Las Tres Pascualas: Riesgo Muy Alto, con 7 metros licuables
- Sector Los Lirios(Villa Loncopán) : Riesgo Muy alto, con 6 metros licuables
- Sector Avenida Collao: Riesgo Muy Alto, con 4 metros licuables
- Sector entre Gral. Bonilla y Av. Collao alt. 1500 (Parque Residencial Collao): Riesgo Alto, con 3,7 metros licuables.

El hecho de que estos sectores coincidan con lo que realmente ocurrió luego del terremoto indica que la metodología es válida y aplicable para estos casos.

Por otro lado están las áreas donde utilizando la metodología de Seed & Idriss indicaron riesgo nulo, pero según nuestro criterio de análisis, sabemos que riesgo nulo es menos de 1 metro licuable, por lo que las cantidades exactas para estos casos aplicando la metodología son:

- Sector Lorenzo Arenas (Patio Vega Monumental): Riesgo Nulo, con 0 metros licuables.
- Sector Lorenzo Arenas: Riesgo Nulo, con 0 metros licuables
- Sector Pedro de Valdivia Bajo: Riesgo Nulo, con 0,7 metros licuables.
- Sector Laguna lo Méndez: Riesgo Nulo, con 0 metros licuables
- Sector Loteo Santa Josefina: Riesgo Nulo, con 0,6 metros licuables.

Los inconvenientes para estas zonas analizadas es que en la mayoría de ellos los estratos no son arenas, por lo tanto no pudieron ser analizados con la metodología. Además para aquellas arenas que si fueron analizadas se tuvo un SPT lo suficientemente alto (mayor a 30, dependiendo del caso) para no evidenciar licuefacción. También se tiene el caso de que algunos sectores analizados presentaron menos de un metro licuable, lo que según nuestro criterio de clasificación lo determina como Riesgo Nulo, siendo que en estricto utilizando la metodología indicó una cantidad. Por último se tiene el caso de la evidencia de licuefacción recopilada en los catastros producida por propagación lateral en zonas de bordes de ríos y lagunas, que para la metodología de determinación del potencial de licuefacción no los considera, y por lo tanto no pueden compararse con los catastros.

Otro aspecto importante a destacar es que este estudio solo considera los catastros puntuales realizados por SERNAGEOMIN luego del terremoto, limitando las zonas para analizar y quedando varios lugares donde no se pudo constatar oficialmente el fenómeno.

Como conclusión final se puede decir que la metodología de Seed & Idriss en este estudio solo pudo ser válida y aplicable para algunos casos, del resto no se tiene información. De los casos analizados se puede decir que es un buen indicador para establecer potenciales zonas de riesgo ya que el estudio y los catastros coincidieron en más del 75 % de los casos.

En futuros análisis se puede utilizar nuevas metodologías para determinar el potencial de riesgo de licuefacción (Kishida y Ohsaki, 1969; Youd e Idriss, 2001; Idriss & Boulanger, 2004; entre otras) y verificar su validez para la zona de Concepción de acuerdo a los catastros que se encuentran en este trabajo.

**CAPITULO 7: REFERENCIAS**

- Acuña, A. G. (2004). Susceptibilidad de los suelos de la Comuna de Concepción a la licuación. Tesis de pregrado. Universidad del Bio Bio, Concepción.
- Bermedo, E. G. (2004). Estudio del nivel freático en las Comunas de Concepción, Chiguayante y San Pedro de la Paz. Tesis de pregrado. Universidad del Bio Bio, Concepción
- Díaz, J. R. (2006). Dinámica de suelos. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Fac. de Ingeniería.
- García J. R. (2007). Análisis comparativo del fenómeno de licuación en arenas. Aplicación a Tumaco (Colombia). Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Idriss, I. M., Boulanger, R. W. (2004). Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes. Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis, CA. 95616-5924.
- Inostroza, G. E. (2004). Metodología de estratificación y zonificación de los suelos de la Comuna de Concepción, mediante la aplicación de SIG. Tesis de pregrado. Universidad del Bio Bio, Concepción.
- Juárez, E. B. (1974). Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos. Tomo 1. México: Limusa
- Juárez, E. B. (1974). Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos. Tomo 2. México: Limusa
- Lambe, W. T. (1972). Mecánica de suelos. 1a ed. México: Limusa
- Liam Finn, W. D. (2001). State of the art for the evaluation of seismic liquefaction potential. Anabuki Chair of Foundation Geodynamics, Kagawa University, Takamatsu, 761-0396 Japan.
- Obando, T. E. (2009). Metodología y técnicas para la Cuantificación del potencial de licuación en suelos sujetos a solicitaciones dinámicas. Ejemplos de casos.
- Seed, H. B., Idriss, I. M. (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers

- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M. (2003). Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework. 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar. Long Beach, California.
- Seed, H. B., Peacock, W. H. (1971). Test procedures for measuring soil Liquefaction characteristics. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 97 (SM8), pp.1099-1119.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., Makdisi, F., Banerjee, N. (1975). Representation of Irregular Stress-Time Histories by Equivalent Uniform Stress Series in Liquefaction Analyses. Report EERC 75-29, University of California, Berkeley.
- Seed, H. B., Lee, K. L., Idriss, I. M. (1969). Analysis of the Sheffield Sam Failure. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 95, SM6, pp.1453-1490.
- Seed, H. B. (1975). The Slides in the San Fernando Dams During the Earthquake of February 9, 1971. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.101, GT7, pp.651-688.
- Terzaghi, K. (1973). Mecánica de suelos en la ingeniería práctica. 2a ed. Barcelona: El Ateneo
- Troncoso, J. H. (1992). Fundamentos de ingeniería geotécnica antisísmica. 1a ed. Santiago, Chile: Ediciones Universidad Católica de Chile
- Youd, T.L., Idriss, I.M. (1997). Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. Tech. Rep. NCEER-97-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo.

## ANEXOS

### INDICE

A. Ensayo de Penetración Estándar .....	40
B. Zonificación.....	48
C. Mapa de máximas aceleraciones de sismo 7.8 grados en Concepcion .....	52
D. Algoritmo en Matlab .....	53
E. Mapa de metros licuables.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b> 56
F. Mapa de riesgo para dos magnitudes sísmicas.....	59
G. Estudio del incremento en el nivel de licuefacción al aumentar magnitud sísmica .....	61
H. Informe de los catastros realizados luego del Terremoto de 2010 .....	67
I. Mapas de los catastros.....	102
J. Estudio de comparación entre áreas licuables y la metodología.....	106
K. Estudio de las áreas no coincidentes.....	111

## ANEXO A

### ENSAYO DE PENETRACION ESTANDAR

#### 1. PROCEDIMIENTO GENERAL

El método de penetración estándar SPT (Standard Penetration Test) es tal vez el más conocido y usado en la exploración de suelos, tal vez por su sencillez de ejecución y sobre él existe una literatura muy abundante.

Se han planteado una serie de correlaciones entre los valores del S.P.T. y la Resistencia a la Licuación de suelos (por intermedio de gráficos), dando lugar a un camino para evaluar el Potencial de Licuación, donde se podrán diferenciar condiciones licuables y no-licuables del lugar afectado.

El método ha sido estandarizado desde 1958, con varias revisiones (ASTM D-1586) y consiste en hincar un toma muestras partido de 18" ( $\approx 45$  cm) de largo colocado al extremo de una varilla AW, por medio de un peso (martillo) de 140 lb ( $\approx 63.5$  kg) que se deja caer "libremente" desde una altura de 30" ( $\approx 76$  cm), anotando los golpes necesarios para penetrar cada 6" ( $\approx 15$  cm).

El valor normalizado de penetración N es para 12" (1 pie  $\approx 30$  cm) se expresa en golpes/pie y es la suma de los dos valores registrados. El ensayo se dice que muestra "rechazo" si:

- a) N es mayor a 50 golpes/15 cm
- b) N es igual a 100 golpes/pie o
- c) No hay avance luego de 10 golpes.

Aunque se denomina "estándar", el ensayo tiene muchas variantes y fuentes de diferencia, en especial a la energía que llega al toma muestras.

## 2. FACTORES QUE AFECTAN EL SPT

### 2.1 Sobrepresión

La sobrepresión influye a la resistencia a la penetración ya que un mismo suelo a una profundidad pequeña su número de golpes es bajo, pero al aumentar la profundidad se presentará una resistencia a la penetración (N) más elevada.

Los investigadores, Gibbs y Holtz (1957), propusieron modificar el número de golpes cerca de la superficie de suelos sin cohesión para incluir el efecto de la reducida presión de confinamiento, mediante la siguiente relación:

$$N_{SP} = N \left( \frac{3.5}{\sigma_v + 0.7} \right) \quad (\text{Ec. A1})$$

Donde N: Número de golpes del S.P.T. medido en terreno.

$N_{SP}$ : Valor de N corregido por sobrepresión.

$\sigma_v$ : Tensión vertical efectiva a la profundidad de estudio. No puede exceder de 2.8 Kg/cm<sup>2</sup>.

### 2.2 Energía transmitida a las barras perforadoras

La energía real transmitida a las barras perforadoras varía en distintas zonas de un país (EEUU) y más aún alrededor del mundo. Investigadores (Kovacs, 1983; Schmertman, 1976) han encontrado que estas variaciones pueden encontrarse dentro de un rango de 40% a 90% de la energía libre en teoría debiera transmitirse al martillo.

En la actualidad se utilizan principalmente dos tipos de martillo el Donut y el de Seguridad, básicamente su diferencia esta en la eficiencia de entrega de energía sobre la barra, ya que existen variaciones en procedimientos para levantar y dejar caer el martillo (sistemas mecánicos, técnica de la cuerda y la polea, etc.), número de vueltas de la cuerda en la polea (técnica cuerda-polea) y otros factores.

El martillo de Seguridad, es más eficiente en la entrega de energía, logrando una razón entre la máxima entregada y la teórica de un 60%, en tanto el martillo Donut para las mismas condiciones alcanza una razón de energía de un 45%.

Se ha planteado una estandarización de la razón de energía en un 60%, los valores del S.P.T. corregidos de esta forma se designarán como  $N_{60}$ , y se determinarán como:

$$N_{60} = N \frac{ER_m}{60} \quad (\text{Ec. A2})$$

Donde N: Valor del S.P.T. medido en terreno.

ER<sub>m</sub>: Razón de Energía transmitida a las barras por la técnica de caída usada.

N<sub>60</sub>: Valor de N corregido para una razón de energía del 60%.

En la Tabla A1, Seed, 1984 propone factores de corrección por energía para distintos países del mundo, también se incluye la corrección para el caso Chileno.

PAÍS	TIPO DE MARTILLO	TIPO DE CAÍDA	ENERGÍA ESTIMADA %	FACTOR DE CORRECCIÓN
Japón	Donut	Caída Libre	78	78/60=1.30
	Donut	Cuerda-Polea Con impulso	67	67/60=1.12
E.E.U.U.	Seguridad	Cuerda-Polea	60	60/60=1.00
	Donut	Cuerda-Polea	45	45/60=0.75
Argentina	Donut	Cuerda-Polea	45	45/60=0.75
Chile	Donut	Cuerda-Polea	45	45/60=0.75
China	Donut	Caída Libre	60	60/60=1.00
	Donut	Cuerda-Polea	50	50/60=0.83

Tabla A1: Resumen de Razones de energía para distintos procedimientos de SPT.

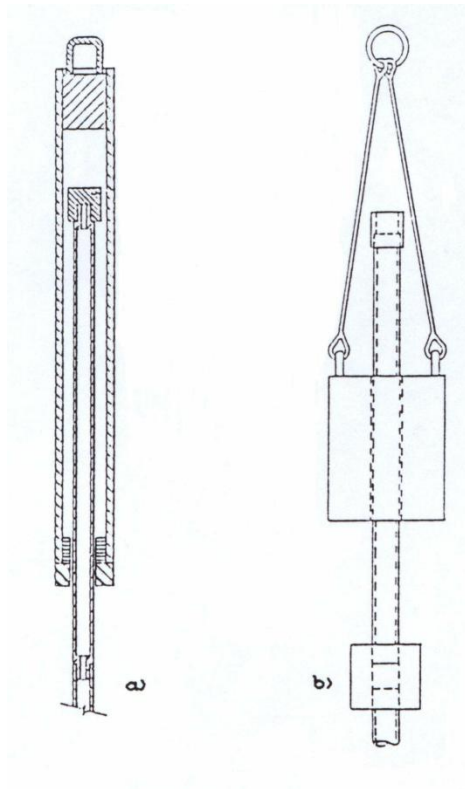


Figura A1. Martillos utilizados en ensayos de penetración estándar: a)Martillo de Seguridad  
b)Martillo Donut.

### 2.3 Frecuencia del número de golpes

La frecuencia de golpes del martillo es significativamente menor en Japón que en E.E.U.U; así, en E.E.U.U la frecuencia de golpes es típicamente de 30 a 40 por minuto, pero con el método "tonbi" japonés es del orden de 10 a 25 golpes por minuto y con la técnica de la cuerda-polea con impulso especial es sólo de 17 a 20 golpes por minuto.

Incluso si la Razón de Energía es la misma, se pueden esperar diferencias en los valores de N obtenidos de ensayos realizados con distintas razones de golpes aplicados.

Durante la penetración del muestreador en un suelo no cohesivo se desarrollan presiones de poros. Una frecuencia más baja en la aplicación de golpes, podría permitir que más de este exceso de presión de poros se disipe entre golpes que con una frecuencia más alta; resultando en una condición de tensiones efectivas más grandes y una correspondiente Resistencia a la Penetración, N, más elevada.

Por lo tanto, si una Razón de Energía de 60% fuera utilizada en E.E.U.U y en Japón, los valores de N podrían diferir, a causa de las distintas razones de golpes de martillo aplicadas, de acuerdo a:

$(N_J)_{60} > (N_{US})_{60}$  Para arenas sueltas, con  $(N_1)_{60} < 20$

$(N_J)_{60} < (N_{US})_{60}$  Para arenas densas, con  $(N_1)_{60} > 20$

## 2.4 Diámetro y limpieza de la perforación

Los diámetros de los agujeros usados en Japón son más pequeños que los empleados en E.E.U.U. El diámetro estándar especificado en Japón es de 2.6" (6.604 cm), aunque diámetros de 3.4" (8.636 cm) y 4.6" (11.684 cm) son a veces usados. En E.E.U.U los diámetros usualmente no son menores a 4" (10.16 cm) y pueden llegar hasta 6" (15.24 cm).

Es razonable esperar que el uso de perforaciones cilíndricas de diámetros más pequeños tiendan a incrementar la Resistencia a la Penetración de un depósito y que para Razones de Energía iguales, el efecto de este factor podría ser la causa de:

$$(N_J)_{60} > (N_{US})_{60}$$

Se ha establecido apropiado considerar para arenas con  $(N_1)_{60} < 20$  que.

$$(N_{US})_{60} \approx 0.9 (N_J)_{60}$$

Descripciones usuales del ensayo lo consideran asociado con perforaciones de 2 1/2" (6.35 cm) o 4" de diámetro (Fletcher, 1965), enfatizando la exclusión de diámetros superiores a 4".

Por otro lado, una limpieza inadecuada de la perforación puede variar los resultados del test por un aumento de la fricción, y principalmente por el lodo del fondo que es transportado hacia la válvula esférica superior (que permite la salida de azolve y evita que la muestra se salga fácilmente del tubo), incrementándose el número de golpes. Se tienen similares efectos al tapar las aberturas laterales, con un posible aumento del número de golpes de hasta un 50%.

## 2.5 Longitud y tipo de barras

Ensayos realizados por Gibbs y Holtz indicaron que la longitud de la barra de perforación, a lo menos de 65 pies ( $\approx 20$  m), no era demasiado importante. Fletcher (1965), también señaló que esto no era un factor muy influyente. Sin embargo, para longitudes superiores a 200 pies ( $\approx 60$  m), el valor de N puede llegar a ser muy elevado.

Amplios estudios del S.P.T. en la Universidad de Florida (Palacios, 1977; Schmertmann, 1977) han mostrado que cuando la longitud de las barras de perforación es menor que 10 pies ( $\approx 3$  m), hay una reflexión de energía en las barras que reduce la energía disponible para impulsar el tubo muestreador dentro del suelo. De esta forma, la medida de la Resistencia a la Penetración es ficticia, por lo que se propuso que esta pérdida de energía impulsante, en barras cortas de longitud, sea corregida multiplicando los valores de N para profundidades entre 0-10 pies ( $\approx 3$  m) por un factor de 0.75.

En cuanto al tipo de barras, aquí influye el uso de tubos más pesados que lo establecido y la flexibilidad de éstos, ya que absorben una parte de la energía entregada por el golpe del martillo (o martinete).

Se ha recomendado el uso de barras A o AW para perforaciones menores a 15 m y barras N, NW o BW para profundidades mayores.

Las barras AW y BW son equivalentes porque tienen un peso similar. Sin embargo, son preferibles las BW porque sufren menos pandeo al someterlas a los impactos del martillo.

En la Tabla A2 se muestran las principales características de estas barras.

tipo de barra	$\phi_e$ mm	$\phi_i$ mm	peso kg/ml	Recomendada usar en
EW	34.9	22.2	4.6	Cono Eléctrico
AW	44.4	30.9	6.5	Sondeo < 15m
BW	54.0	44.5	6.2	Sondeo > 15m
NW	66.7	57.2	8.0	Sondeo > 15m No usar para muestreo.

Tabla A2. Medidas de las barras de perforación más usuales, donde  $\phi_e$  diámetro exterior,  $\phi_i$  diámetro interior.

## 2.6 Factores humanos

Es evidente que en la ejecución del ensayo el factor humano tiene una influencia no despreciable. Por lo tanto, ejecutando el S.P.T. en condiciones normales y con cuidado, para evitar errores sistemáticos y al azar, nos puede proporcionar información muy importante. Algunos de estos errores son:

- Variación en la altura de caída libre (Método Cuerda-Polea) del peso desde 75 cm, puesto que se realiza usualmente al ojo.
- La caída libre de la masa puede ser trabada por cualquier objeto.
- Falta de cuidado en la cuenta de los golpes o la medida de la penetración.
- Uso de una cuerda demasiado larga o liviana.
- Error al asentar la cuchara partida en un material no distorsionado para el conteo de golpes.
- El estado de la superficie interior y exterior del tubo muestreador, donde las partes enmohecidas o abolladas pueden modificar considerablemente el rozamiento con las capas del suelo.
- La posición de la napa freática en relación al nivel del ensayo. Es importante que el nivel del agua en la perforación este por sobre el nivel de la napa. Una retirada rápida de las herramientas para perforar podría bajar el nivel del agua en la perforación con respecto a la napa y el agua que fluiría en el fondo desprendería el suelo, causando número de golpes bajo para la próxima penetración.
- Adecuado apriete en el ensamble de las barras. Coplas mal apretadas disipan energía por pando y flexión de las barras.

En la Tabla A3 se resumen los procedimientos de ejecución recomendados del SPT, para su uso en correlaciones empíricas de evaluación de Potencial de Licuación.

A. Perforación: De 4" (10cm) a 5" (12.5) de diámetro con barro bentonítico como perforador para estabilidad del agujero.
B. Taladro Perforador: Desviación hacia arriba del barro perforador.
C. Muestreador: $\varnothing_{ext.}=2"$ (5.08 cm) $\varnothing_{inte.}=1\frac{1}{8}"$ (3.5 cm) constante, sin revestimiento.
D. Barras Perforadoras: AW para sondeos < 15 m. NW o BW para sondeos mayores.
E. Energía entregada al Muestreador: 4800 kg-cm (60% de la máxima teórica)
F. Frecuencia del Número de Golpes: 30 a 40 golpes/min.
G. Conteo del Número de Golpes: Desde 15cm a 45cm.
H. Cuidado en la ejecución del ensayo.

Tabla A3. Procedimientos del S.P.T. recomendados para usar en correlaciones de Licuación

Fuente: Seed, H.B., 1984.

## ANEXO B

### ZONIFICACION

#### 1. Metodología de Zonificación

Para definir cada área con diferente tipo de suelo se utilizó el Programa ARCVIEW para hacer más didáctico y explicativo su observación

El desarrollo de los modelos de cada sector para la zonificación se siguió la siguiente metodología:

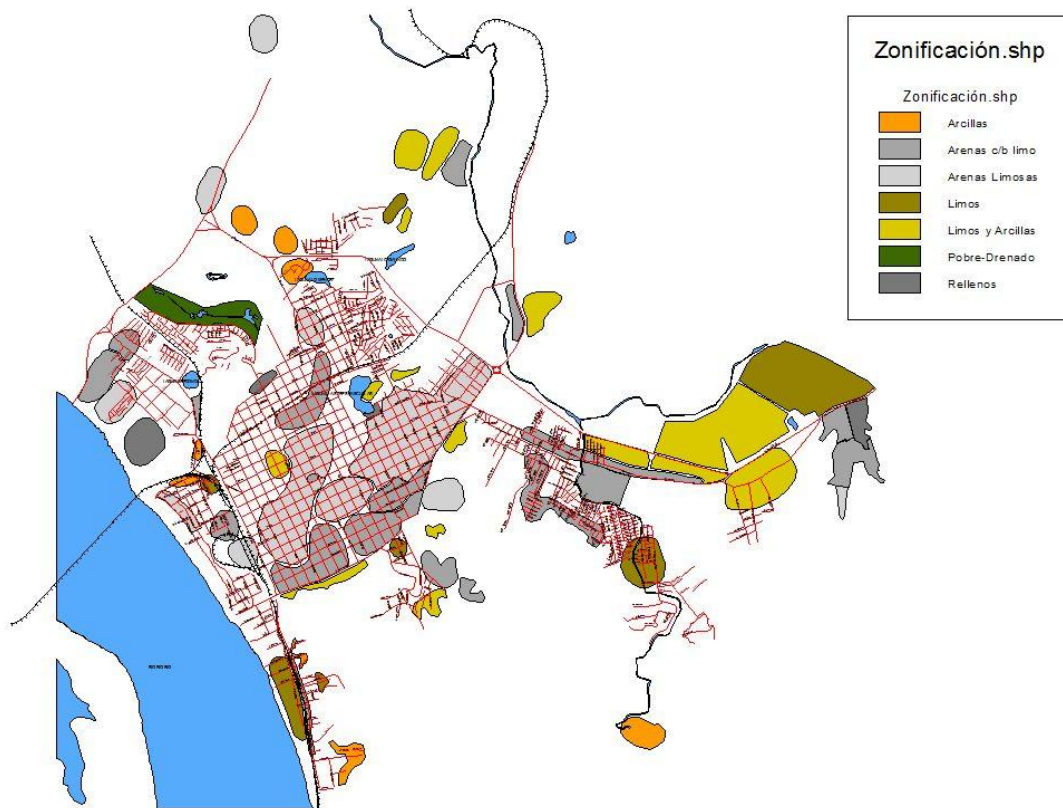
- a) Agrupación de los sondajes más cercanos.
- b) Trazado de ejes: Norte-Sur, Este-Oeste.
- c) Proyección de los sondajes a estos ejes, tomando en cuenta las distancias entre
- d) sondajes, y estratigrafía.
- e) Observar la relación estratigráfica entre los sondajes proyectados.
- f) Modelar estratigráficamente en profundidad los sondajes, llegando finalmente a
- g) la creación de sectores.

También se analizó como se comportaban sectores vecinos, llegando así a abarcar en algunos casos una gran extensión de suelo y así conformar un “sector”. En otros casos, un sector dio paso a distintas “sectores”, ya que los estratos no se asemejaban debido a los distintos materiales que se encontraban en él. Así se fueron creando los distintos sectores, los cuales poseen una modelación estratigráfica representativa, correspondiente a una descripción visual de los estratos con su respectiva clasificación USCS, además de un gráfico denominado “Rango N<sub>spt</sub>”, que describe el rango de golpes entre valores mínimos y máximos que fue observado de acuerdo a todos los sondajes que conformaban el sector. Luego de determinar la estratificación de los distintos sectores de la Comuna de Concepción, estos se zonificaron de acuerdo al material predominante en la estratificación.

Las zonas se dividen de acuerdo a la clasificación de sus estratos en:

- Zonas Arcillosas: Corresponden a sectores con clasificación USCS: CH, CL, SC.
- Zonas de arenas con bastante limo: Corresponde a sectores con clasificación USCS: SM(ML), ML.

- Zonas de limos: Corresponde a sectores con clasificación USCS: ML, MH.
- Zonas de limos y arcillas: Corresponde a sectores con clasificación USCS: ML, MH, CL, CH.
- Zonas de materiales pobremente drenados: Corresponde a sectores donde se encuentran terrenos pobremente drenados, barro y turba.
- Zonas de Rellenos: Corresponde a sectores donde los rellenos artificiales superan los 4m.



**Figura B1. Mapa de los tipos de suelo de la comuna de Concepción.**

Cada tipo de sector singular, a parte de su color representativo, presenta una modelación estratigráfica correspondiente a los suelos de sector que lo conforman, existiendo entonces sectores con el mismo color, pero con distinto modelo estratigráfico.

Para acceder a las modelaciones estratigráficas de cada sector, basta con seleccionar el Tema *Zonificación*, luego utilizando la herramienta Hot-Link de la barra de herramientas, pinchar sobre

la zona que se desea observar. La modelación de cada sector posee un gráfico (Rango NSPT), una columna estratigráfica representativa, la clasificación Visual y su respectiva clasificación USCS

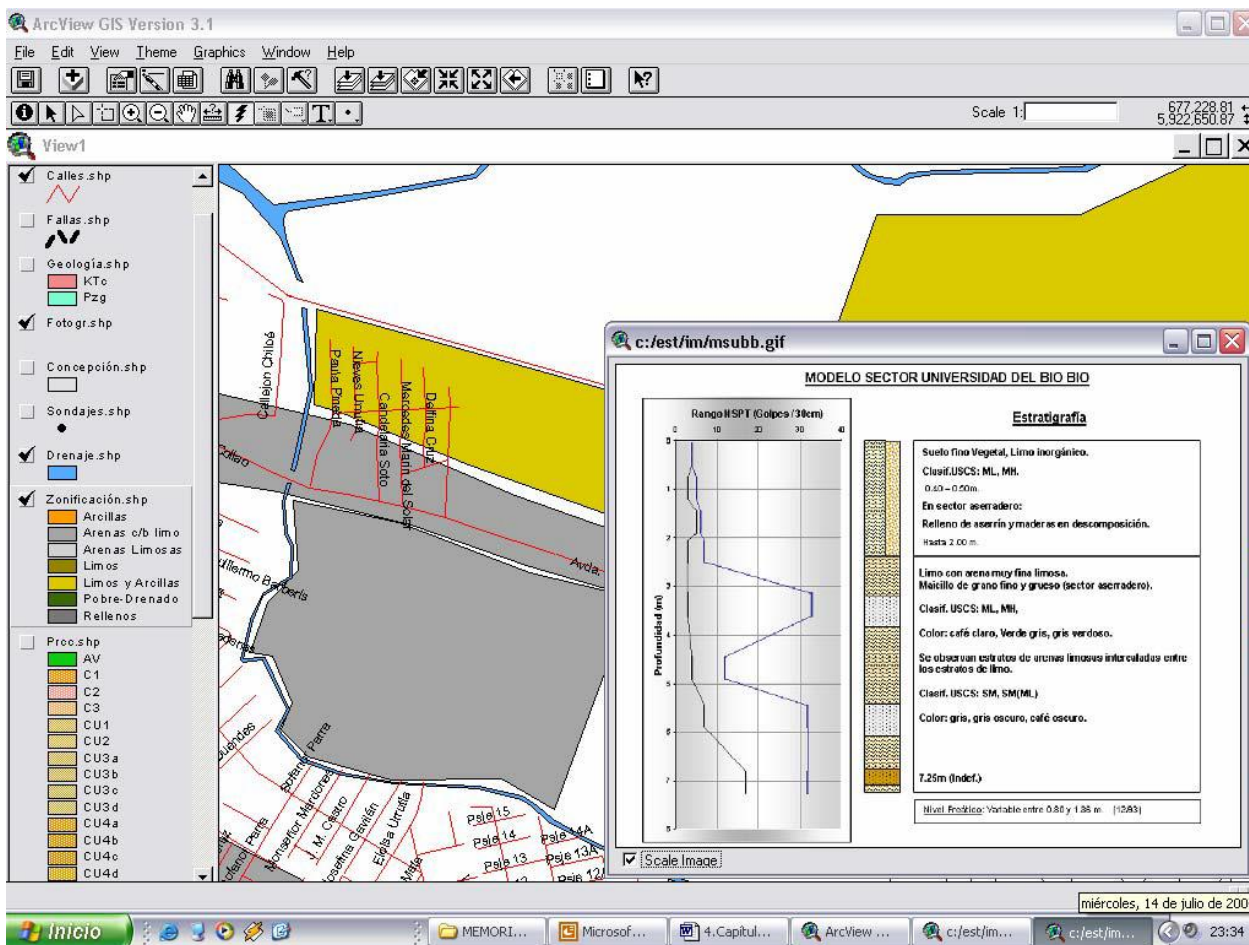


Figura B2. Esquema de acceso a información de sondajes.

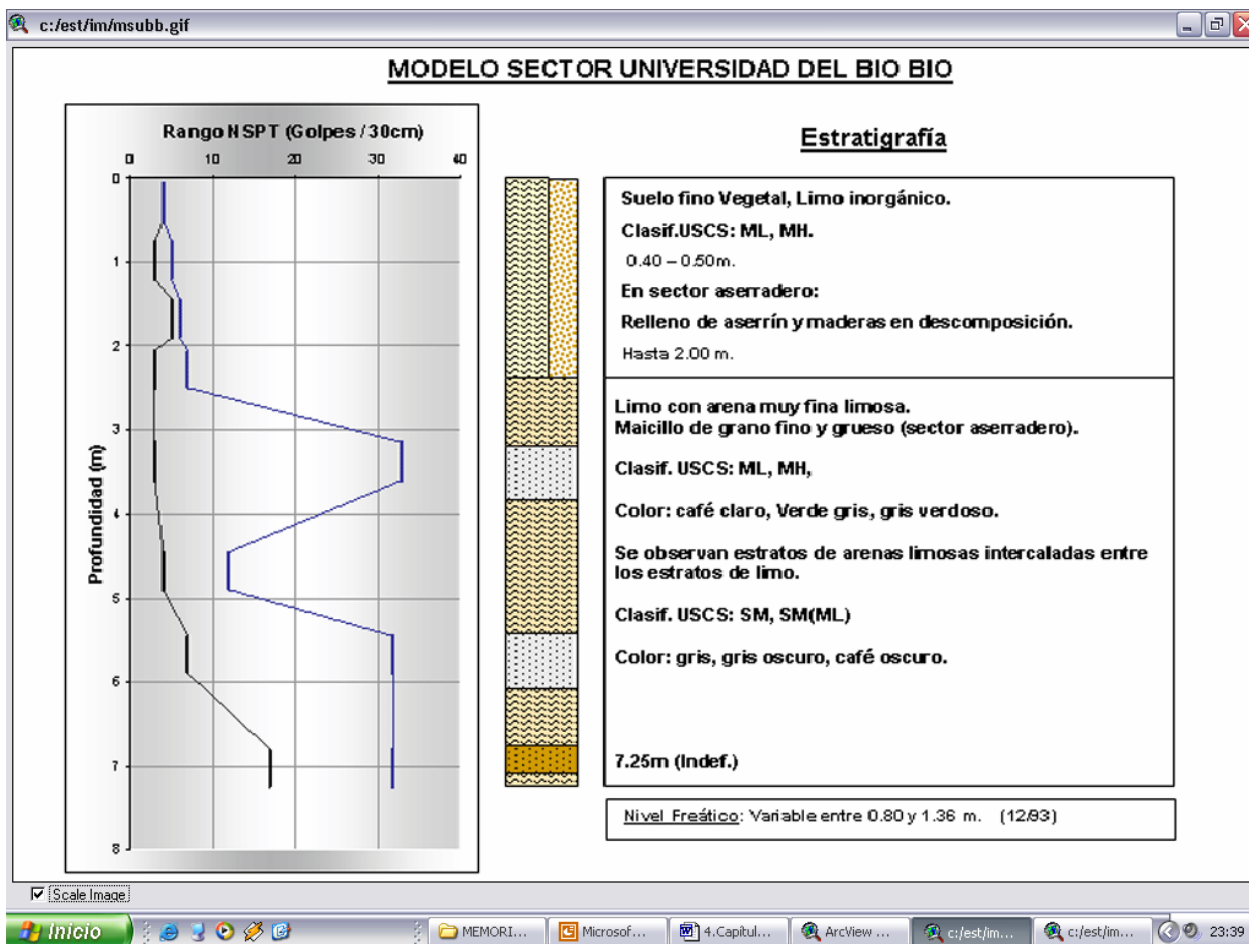
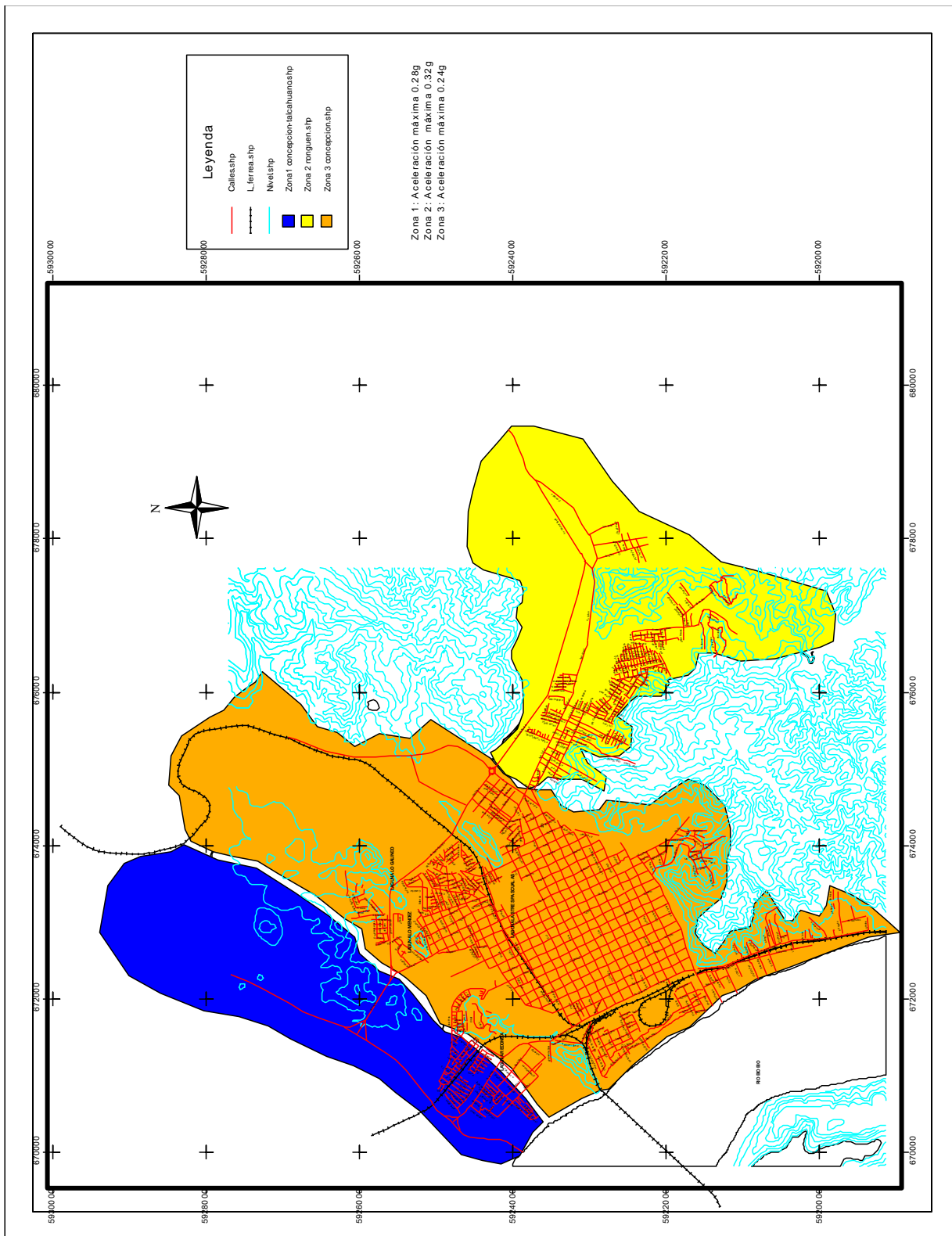


Figura B3. Detalle de tipo de suelo y ensayo SPT para cada zona de análisis



ANEXO C

## Mapa de Concepción de máximas aceleraciones para Sismo de 7.8 grados Richter.

### ANEXO D

#### ALGORITMO EN MATLAB DEL PROGRAMA PARA EVALUAR EL POTENCIAL DE RIESGO DE LICUEFACCIÓN SEGÚN METODOLOGÍA DE SEED & IDRIS.

```

% Licuefacción del Suelo
clear; clc;
%% PARTE 1: Lectura Parámetros de Estratos -----
NE = xlsread('Datos Simulacion Licuefaccion',1,'A3'); % número de estratos
HE = xlsread('Datos Simulacion Licuefaccion',1,['B3:B' num2str(2+NE)]); %
Altura estratos
GAMA1 = xlsread('Datos Simulacion Licuefaccion',1,['C3:C' num2str(2+NE)]); %
Gamma seco
GAMA2 = xlsread('Datos Simulacion Licuefaccion',1,['D3:D' num2str(2+NE)]); %
Gama saturado
NF = xlsread('Datos Simulacion Licuefaccion',1,'E3'); % Nivel Freatico
NSPT = xlsread('Datos Simulacion Licuefaccion',1,'G3'); % número de SPT
HSPT = xlsread('Datos Simulacion Licuefaccion',1,['F3:F' num2str(2+NSPT)]); %
Altura SPT

%% PARTE 2: Cálculo de SIGMAS -----
% A. SIGMA TOTAL
i=1;
SX(1)=0;
HE=[0;HE];
for j=1:NE
while i <= NSPT & HSPT(i) <= HE(j+1) ;
if HSPT(i)>HE(j) & HSPT(i)<HE(j+1) & NF>HE(j) & NF<HE(j+1) & HSPT(i)>NF
S(i)=SX(j)+(NF-HE(j))*GAMA1(j)+(HSPT(i)-NF)*GAMA2(j);
elseif HSPT(i)<NF
S(i)=SX(j)+(HSPT(i)-HE(j))*GAMA1(j);
else
S(i)=SX(j)+(HSPT(i)-HE(j))*GAMA2(j);
end
end
i=i+1;
end
if NF<HE(j+1) & NF>HE(j)
SX(j+1)=SX(j)+(NF-HE(j))*GAMA1(j)+(HE(j+1)-NF)*GAMA2(j);
elseif HE(j+1)<NF
SX(j+1)=SX(j)+(HE(j+1)-HE(j))*GAMA1(j);
else
SX(j+1)=SX(j)+(HE(j+1)-HE(j))*GAMA2(j);
end
end
end

for i = 1 : NSPT
SIGMA(i) = 0;
for j = 1 : NE

if ( NF > HE(j) & NF < HE(j+1) ) & ( HSPT(i) >= HE(j) & HSPT(i) <= HE(j+1) ) %
Caso en que la napa y SPT en el mismo estrato [j, j+1]

```

```

if HSPT(i) <= NF
    SIGMA(i) = SIGMA(i) + (HSPT(i)-HE(j))*GAMA1(j);
end
if HSPT(i) > NF
    SIGMA(i) = SIGMA(i) + (NF-HE(j))*GAMA1(j) + (HSPT(i)-
NF)*(GAMA2(j)-1);
end
end

if ( NF <= HE(j) | NF >= HE(j+1) ) & (HSPT(i) > HE(j) & HSPT(i) <= HE(j+1) ) %
spt en un estrato pero la napa en otro
if HSPT(i) <= NF
    SIGMA(i) = SIGMA(i) + (HSPT(i)-HE(j))*GAMA1(j); % spt sobre
napa
end
if HSPT(i) >= NF % spt bajo napa
    SIGMA(i) = SIGMA(i) + (HSPT(i)-HE(j))*(GAMA2(j)-1);
end
end

if HSPT(i) > HE(j+1) & HE(j+1) < NF % estrato sobre napa , spt esta en
estrato inferior
    SIGMA(i)=SIGMA(i)+(HE(j+1)-HE(j))*GAMA1(j);
end

if HSPT(i) > HE(j+1) & HE(j) >= NF % estrato bajo napa freatica, y spt esta
en estrato inferior
SIGMA(i)=SIGMA(i)+(HE(j+1)-HE(j))*(GAMA2(j)-1);
end

if ( NF >= HE(j) & NF <= HE(j+1) ) & HSPT(i) > HE(j+1) % napa en un estrato y
spt en otro estrato inferior
SIGMA(i)=SIGMA(i) + (NF-HE(j))*GAMA1(j) + (HE(j+1)-NF)*(GAMA2(j)-1);
end
end
end

% CALCULO DE LICUEFACCION
%HE = xlsread('Datos Simulacion Licuefaccion',1,['B3:B' num2str(2+NE)]);
Amax = xlsread('Datos Simulacion Licuefaccion',1,'H3');
PF = xlsread('Datos Simulacion Licuefaccion',1,['I3:I' num2str(2+NSPT)]);
SPT = xlsread('Datos Simulacion Licuefaccion',1,['J3:J' num2str(2+NSPT)]);
DWF=0.89;

for i=1:NSPT
    rd(i)=1-0.01*HSPT(i);
    CSR(i)=(0.65*Amax*(S(i)/SIGMA(i))*rd(i))/DWF;
    SPTCORR(i)= SPT(i)*(1/(SIGMA(i)*0.0098692326671601))^0.5;

if PF(i)<= 5
    CRR(i)=1./(34-SPTCORR(i))+SPTCORR(i)./135+50./(10*SPTCORR(i)+45).^2-
1/200;
if CRR(i)/CSR(i) < 1.3 & SPTCORR(i) <= 30 & HSPT(i)>NF
    LIQ(i,:)= 'SI';
else
    LIQ(i,:)= 'NO';
end
end

```

```

elseif PF > 5 & PF<35
    CRR(i)=1./(34-(exp(1.76-
190/PF(i)^2)+(0.99+PF(i)^1.5/1000)*SPTCORR(i)))+(exp(1.76-
190/PF(i)^2)+(0.99+PF(i)^1.5/1000)*SPTCORR(i))./135+50./(10*(exp(1.76-
190/PF(i)^2)+(0.99+PF(i)^1.5/1000)*SPTCORR(i))+45).^2-1/200;
if CRR(i)/CSR(i) < 1.3 & SPTCORR(i) <= 30 & HSPT(i)>NF
LIQ(i,:)= 'SI';
else
    LIQ(i,:)= 'NO';
end

else
    CRR(i)=1./(34-
(5+1.2*SPTCORR(i)))+(5+1.2*SPTCORR(i))./135+50./(10*(5+1.2*SPTCORR(i))+45).^2-
1/200;
if CRR(i)/CSR(i) < 1.3 & SPTCORR(i) <= 30 & HSPT(i)>NF
    LIQ(i,:)= 'SI';
else
    LIQ(i,:)= 'NO';
end

end
end
end

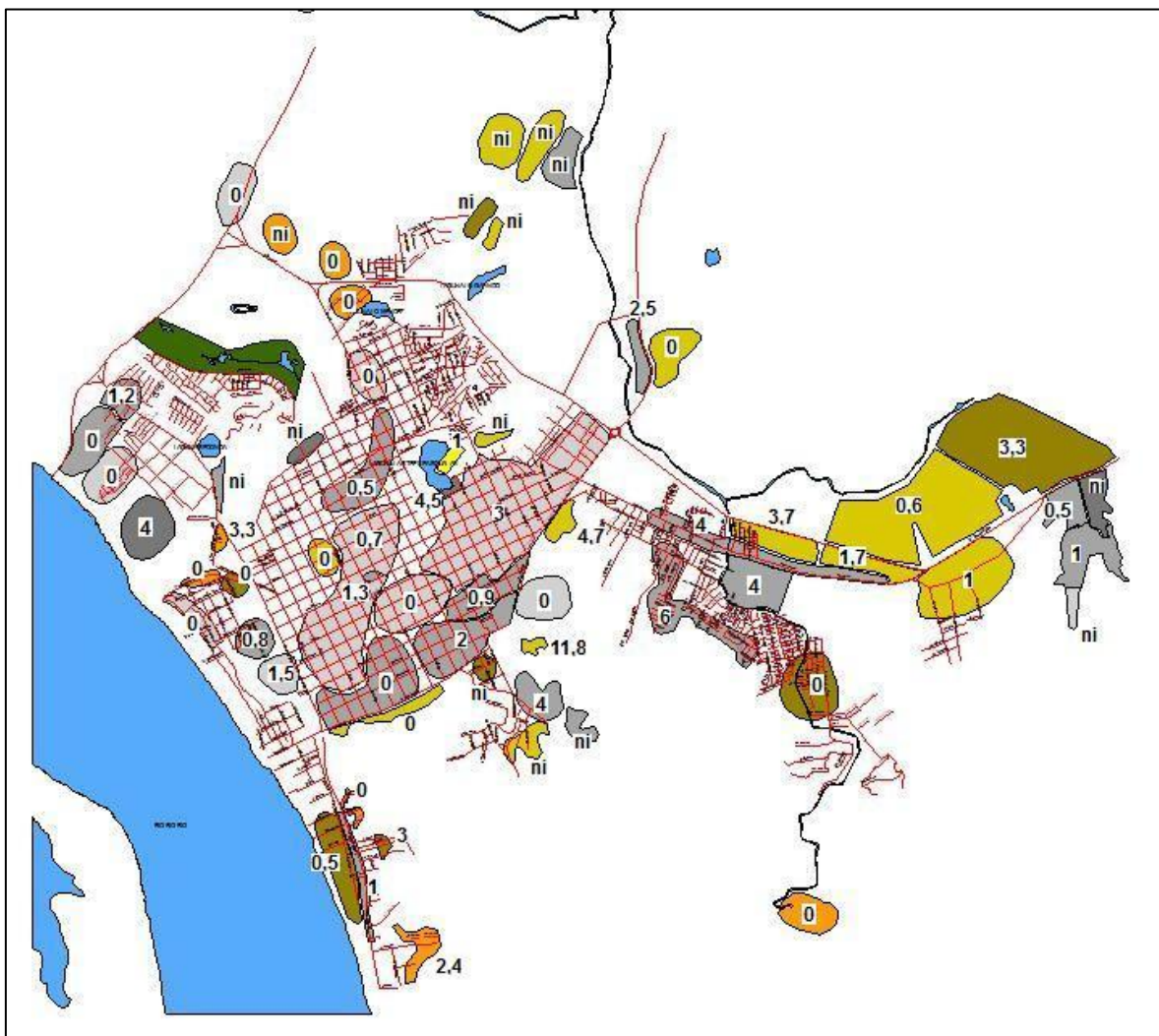
%% GRAFICOS
PF=20;
x1=[0:.1:24];
x2=[0:.1:27];
x3=[0:.1:30];
y1=1./(34-x3)+x3./135+50./(10*x3+45).^2-1/200;
y2=1./(34-(exp(1.76-190/PF^2)+(0.99+PF^1.5/1000)*x2)))+(exp(1.76-
190/PF^2)+(0.99+PF^1.5/1000)*x2)./135+50./(10*(exp(1.76-
190/PF^2)+(0.99+PF^1.5/1000)*x2)+45).^2-1/200;
y3=1./(34-(5+1.2*x1)))+(5+1.2*x1)./135+50./(10*(5+1.2*x1)+45).^2-1/200;
plot(x3,y1, '-k',x2,y2, '-b',x1,y3, '-g',SPTCORR, CSR,
'xr','LineWidth',1.5)
%plot(SPTCORR, m, 'xr')
axis([0, 50, 0, 1])
title('GRAFICO DE LICUEFACCION')
xlabel('N 1,60')
ylabel('CSR')
legend('PF < 5%', 'PF = 20%', 'PF > 35%')
grid

```

**ANEXO E**

**1. MAPA DE LOS METROS LICUABLES LUEGO DE APLICAR LA METODOLOGÍA.**

a) 7.8 grados Richter



**Figura E1. Mapa de los metros licuables luego de aplicar la metodología para sismo de 7.8 grados Richter**



## 2. TABLA RESUMEN PARA CADA ZONA

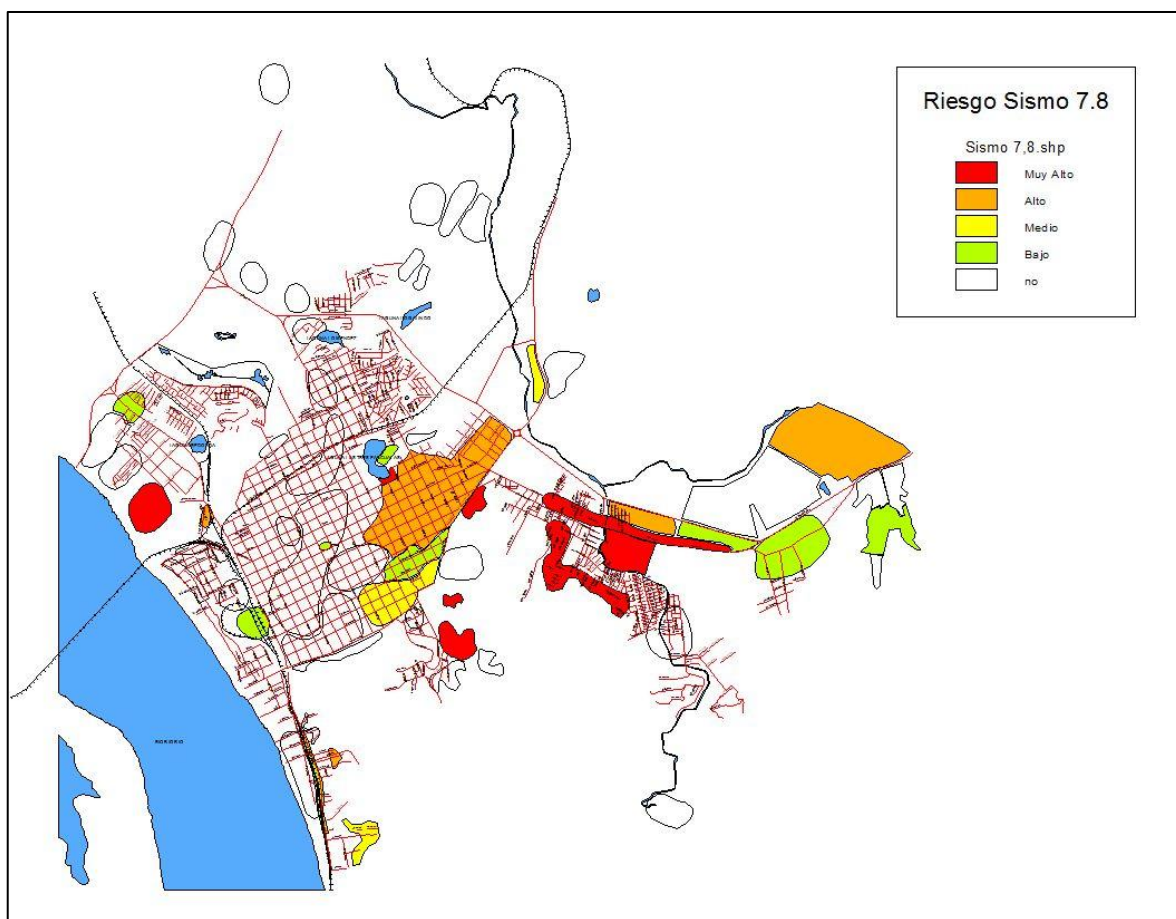
Nº	SECTOR	NF	SPT	7.8 GRADOS		8.8 GRADOS	
				Metros lic.	Riesgo de lic.	Metros lic.	Riesgo de lic.
1	Modelo Sector Lorenzo Arenas (Patio Vega Monumental)	0,4	si	0	nulo	0	nulo
2	Modelo Sector Lorenzo Arenas	0,2	si	0	nulo	0	nulo
3	Modelo Sector Lorenzo Arenas ( Vega M. Pasarela)	0,4	si	1,2	Bajo	1,2	Bajo
4	Modelo Sector Lorenzo Arenas (Cementerio General)	1,2	si	4	Muj Alto	4	Muj Alto
5	Modelo Sector Lorenzo Arenas (Laguna Redonda)	No obs.	si	ni	-	-	-
6	Modelo Sector Rivera Norte (Rellenos Controlados)	1,65	si	0	nulo	0	nulo
7	Modelo Sector Rivera Norte (Calle R. Claro y G. Matta)	2,5	si	0	nulo	0	nulo
8	Modelo Sector Cerro Chepe	0,6	si	3,3	Alto	3,3	Alto
9	Modelo Sector Rivera Norte (entre pasaje Garreton, líneas FFCC y CGEI)	2,7	si	0	nulo	0	nulo
10	Modelo Rellenos Ejército	6	si	0	nulo	0	nulo
11	Modelo Sector Mall Plaza	3,43	si	0	nulo	0	nulo
12	Modelo Sector Mutual de Seguridad	No obs.	si	0	nulo	0	nulo
13	Modelo Sector Universidad católica de la SSTMA Concepcion	3,9	si	0	nulo	0	nulo
14	Modelo sector Costado norte Laguna Lo Mendez	4,5	si	0	nulo	0	nulo
15	Modelo Sector Barrio Norte (Paicavi)	4,1	si	0	nulo	0	nulo
16	Modelo Sector Concepcion Centro Norte	1,25	si	0,5	nulo	1,5	Bajo
17	Modelo sector cerro Amarillo	4	si	0	nulo	5	Muj Alto
18	Modelo sector Concepcion centro Oeste	2	si	0,7	nulo	0,7	nulo
19	Modelo sector Concepcion centro (Av. Los Carrera con A. Pinto)	1,65	si	1,3	Bajo	1,3	Bajo
20	Modelo sector Pedro del Rio	1,9	si	0,8	nulo	1,2	Bajo
21	Modelo Sector Barrio cívico	1,73	si	1,5	Bajo	1,5	Bajo
22	Modelo Sector Concepcion centro sur (entre calles San Martín y V. Lamas)	2,3	si	0	nulo	0	nulo
23	Modelo Sector parque ecuador	0,9	si	0	nulo	0	nulo
24	Modelo Sector Concepcion centro (entre Av. Los Carrera, Ohiggins, A Pinto y Ongilmo)	4,5	si	0	nulo	0	nulo
25	Modelo Sector Concepcion centro Sur- este ( diagonal p. Aguirre Cera)	2,6	si	2	Medio	2,5	Medio
26	Modelo Sector Barrio universitario (Calle Chorrillos)	No obs.	si	-	-	-	-
27	Modelo Sector Universidad de Concepcion ( edificio Biotecnología)	No obs.	si	-	-	-	-
28	Modelo Sector Universidad de Concepcion ( Fac. Cs. Empresariales, ed. Artes, gimnasio)	1,05	si	4	Muj Alto	6,7	Muj Alto
29	Modelo Sector barrio Universitario ( Calle Olmos)	1,3	no	-	-	-	-
30	Modelo sector Universidad de Concepcion ( Fac. de Cs. Fisicas y Matematicas)	0,8	si	11,8	Muj Alto	11,8	Muj Alto
31	Modelo Sector Lo Pequen	2,5	si	0	nulo	0	nulo
32	Modelo Sector Concepcion Centro Este (entre Ongilmo, Rosevelt, B. Arana y San Martín)	0,8	si	1 (0,9)	Bajo	2,8	Medio
33	Modelo sector Concepcion centro Nor- este (entre Paicavi, J.M. Garcia, B. Aarana, Irarrazabal, Camilo Henríquez)	1,2	si	3	Alto	3	Alto
34	Modelo sector Laguna Las Tres Pascualas	2,4	si	4,5	Muj Alto	7	Muj Alto
35	Modelo Sector Universidad San Sebastian	9,2	si	1	Bajo	1	Bajo
36	Modelo sector Taludes cerro La Polvora	No obs.	no	-	-	-	-
37	Modelo Sector Pie de Monte Cerro La Viren ( Irarrazabal)	1,35	si	4,7	Muj Alto	5,4	Muj Alto
38	Modelo sector Entre Puentes	1,9	si	2,5	Medio	2,5	Medio
39	Modelo sector El Manzano	4,7	si	0	nulo	0,6	nulo
40	Modelo sector Ladera estanque ESSBIO Barrio modelo	No obs.	no	-	-	-	-
41	Modelo Sector Calle del cerro barrio Modelo	No obs.	no	-	-	-	-
42	Modelo sector Lomas de Bellavista ( taludes)	No obs.	si	-	-	-	-
43	Modelo Sector Lomas de bellavista ( taludes Nor. Orientales continuacion de cerros Lo Galindo)	No obs.	no	-	-	-	-
44	Modelo Sector Lomas de Bellavista (extremo oriente)	0,8	no	-	-	-	-
45	Modelo sector Peto de Valdivia Bajo	3,1	si	0,5	nulo	0,7	nulo
46	Modelo sector Av. Peto de Valdivia	3,6	si	1	Bajo	1	Bajo
47	Modelo sector Pedro de Valdivia ( pie de monte)	1,9	si	0	nulo	1,1	Bajo
48	Modelo sector Pedro de Valdivia Alto ( calle Manuzier)	0,45	si	3	Alto	3	Alto
49	Modelo sector Pedro de Valdivia( pie de monte)	2,8	si	2,4	Medio	4,4	Muj Alto
50	Modelo sector Av. Collao	1,2	si	4	Muj Alto	4	Muj Alto
51	Modelo sector Los Lirios	1,2	si	6	Muj Alto	6	Muj Alto
52	Modelo sector Universidad del Bío Bío	0,8	si	4	Muj Alto	4	Muj Alto
53	Modelo sector entre General Bonilla y Av. Collao alt. 1500	1,2	si	3,7	Alto	3,7	Alto
54	Modelo sector cruce Av. Collao y Gral. Bonilla lado oeste	0,1	si	1,7	Bajo	1,7	Bajo
55	Modelo sector loteo Santa Josefina	1,2	si	0,6	nulo	0,6	nulo
56	Modelo sector Palomares	0,9	si	1	Bajo	1	Bajo
57	Modelo sector Korach Sur	2	si	3,3	Alto	3,3	Alto
58	Modelo sector exfuno Las Ullioas	1	si	0,5	nulo	1,6	Bajo
59	Modelo sector exfuno Las Ullioas (zona 2)	2,7	no	0	nulo	0	nulo
60	Modelo sector exfuno Las Ullioas (zona 3)	0,9	si	1	Bajo	1	Bajo
61	Modelo sector ex funo Las Ullioas (zona 4)	0,7	no	-	-	-	-
62	Modelo sector Valle Nonguen	1,8	si	0	nulo	0	nulo
63	Modelo sector Valle Nonguen limite sur	3,05	si	0	nulo	0	nulo

**Tabla E1: tabla de talle de cada zona analizada y el aumento en su nivel de riesgo al aumentar la magnitud sísmica**

**ANEXO F**

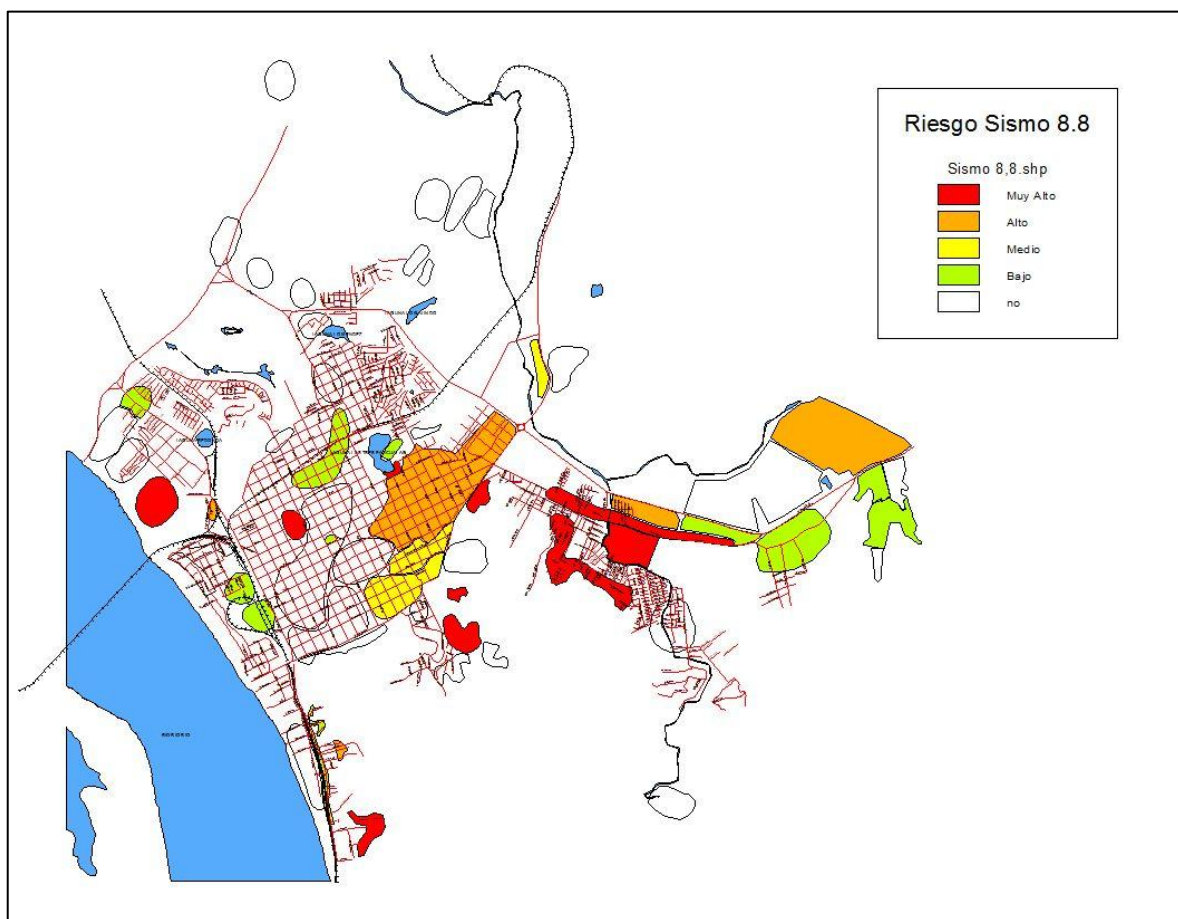
**MAPA DE RIESGO UTILIZANDO LA METODOLOGIA PARA DOS MAGNITUDES SISMICAS.**

a) Para la magnitud de 7.8 grados



**Figura F1. Mapa del riesgo de licuefacción para una Magnitud de 7.8 grados Richter**

b) Para la magnitud de 8.8 grados



**Figura F2. Mapa del riesgo de licuefacción para una Magnitud de 8.8 grados Richter**

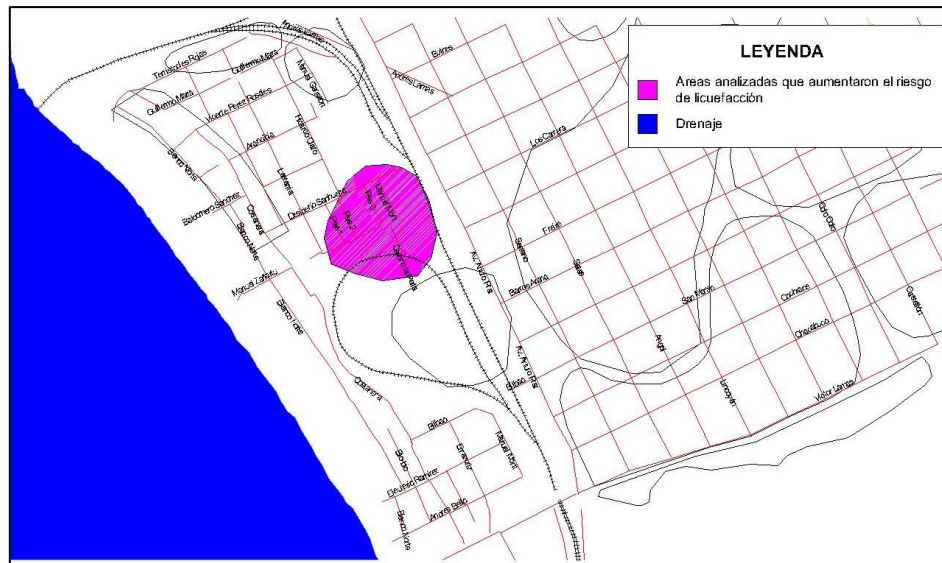
**ANEXO G**

**MAPAS DE AUMENTO EN EL NIVEL DE LICUEFACCION LUEGO DE AUMENTAR LA MAGNITUD SISMICA DE 7.8 A 8.8 GRADOS.**

a) Sector Pedro del Rio

La zona del sector de Pedro del Rio estudiada mostrada en la Figura G1 (área morada), mostro un aumento de un nivel en el riesgo de licuefacción. Paso de presentar un riesgo Nulo de aproximadamente 0,8 metros a un riesgo Bajo con 1,2 metros licuables.

**Figura G1. Aumento de riesgo de licuefacción para sector Pedro del Rio**



b) Sector Concepción centro norte

El sector mostrado en la Figura G2 (área en morada) muestra la zona que aumento el nivel de licuefacción, paso de riesgo nulo con 0,5 metros, a riesgo Bajo, con 1,5 metros licuables

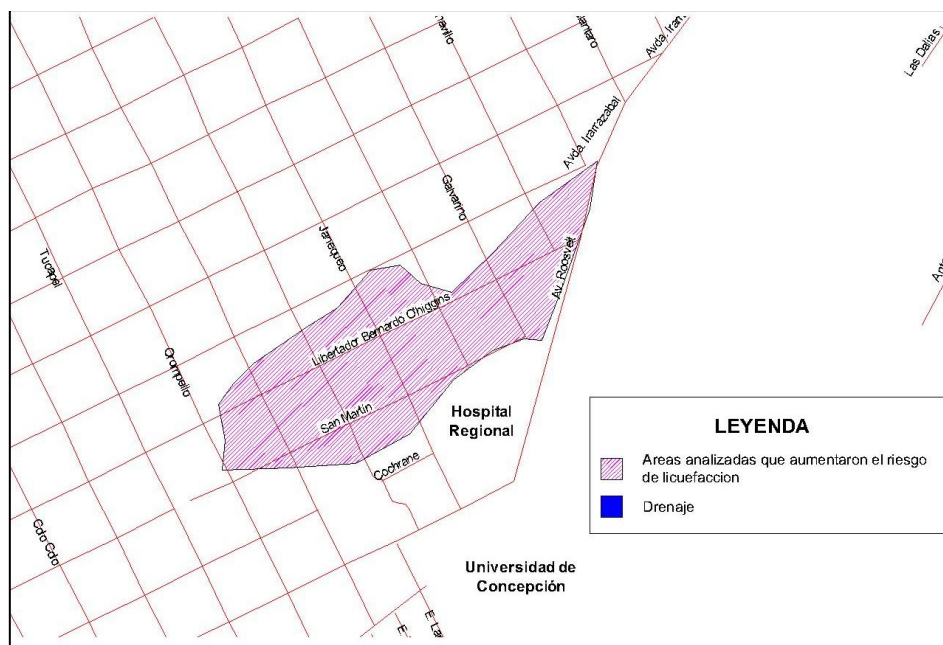


**Figura G2. Aumento de riesgo de licuefacción para sector Concepción Centro Norte**

c) Sector Cerro Amarillo

Este fue el sector que más aumento en cantidad de metros licuables, pasó de tener riesgo nulo (0 metros), a riesgo Muy Alto (5 metros). Este aumento se debió a que el estrato de suelo analizado poseía un SPT (entre 8 a 10 golpes) tal que al aumentar la magnitud, todo el estrato licuó. Ver Figura G3.



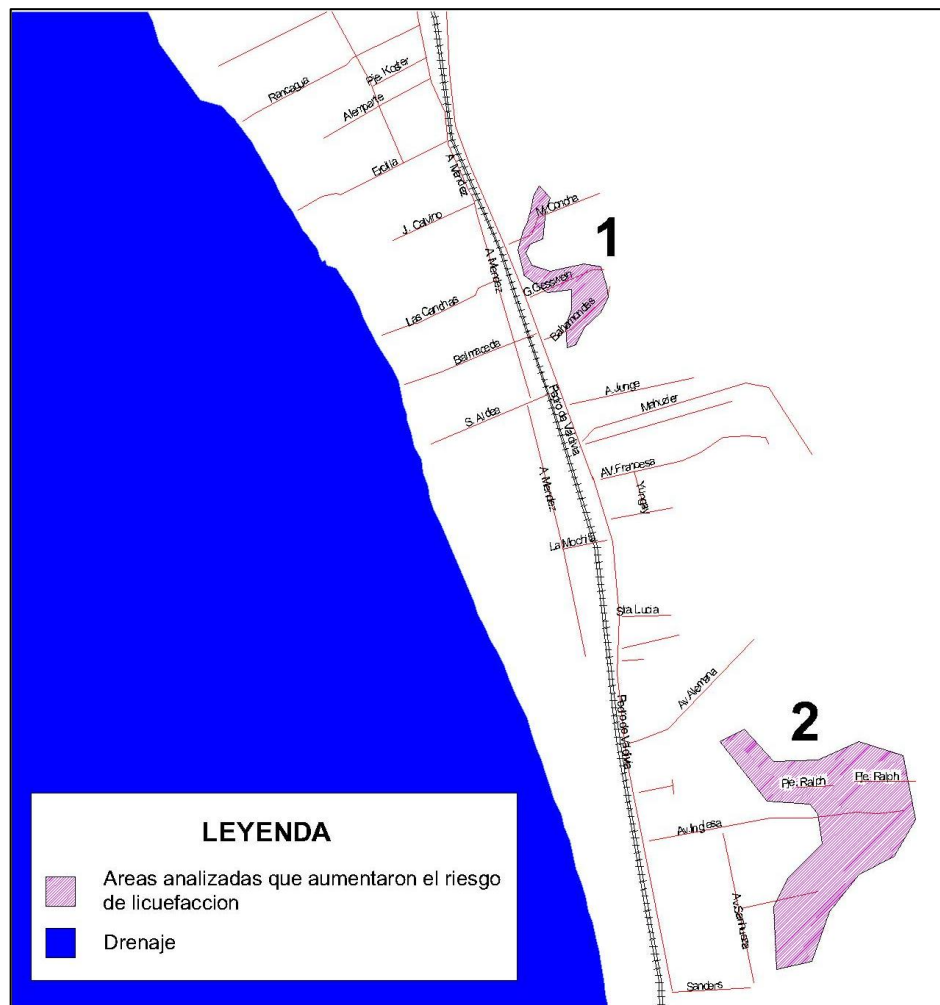


**Figura G4. Aumento de riesgo de licuefacción para sector Concepción centro Este (entre Ongolmo, Rosevelt, B. Arana y san Martín)**

e) Sector Pedro de Valdivia (pie de monte)

Zona 1: Paso de tener riesgo nulo (0 metros) a Bajo (1,1 metros). Ver Figura G5.

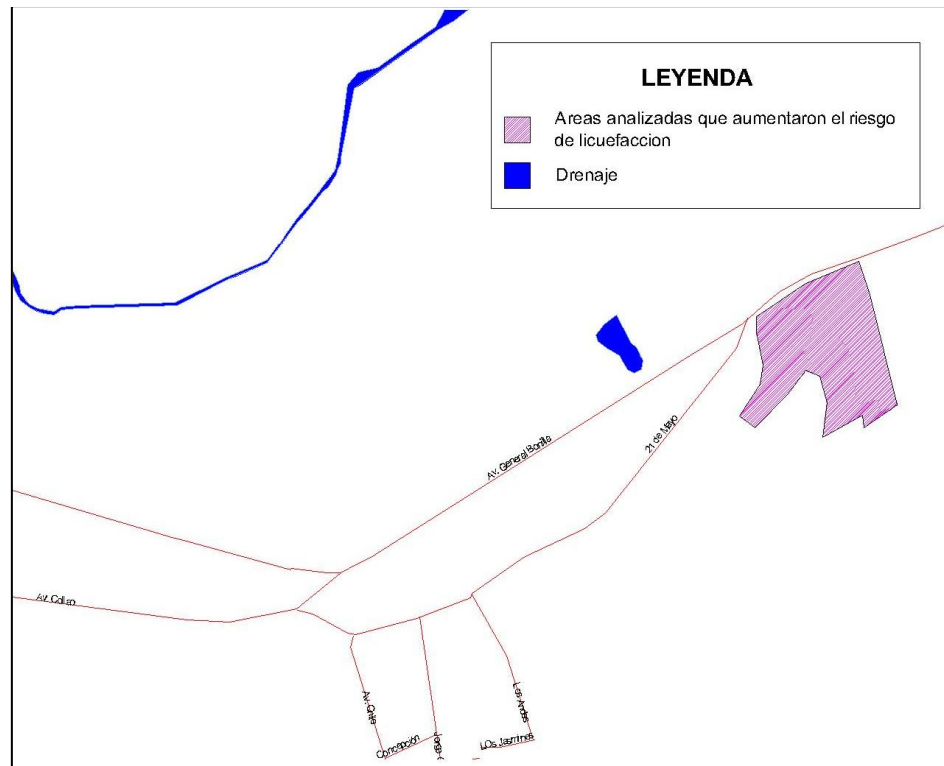
Zona 2: Paso de tener riesgo Medio (2,4 metros) a Muy Alto (4,4 metros). Ver Figura G5.



**Figura G5. Aumento de riesgo de licuefaccion para sector Pedro de Valdivia (pie de monte)**

f) Sector ex fundo Las Ulloas ( Zona 1)

Este sector pasó de riesgo Nulo (0,5 metros) a riesgo Bajo (1,6 metros). Ver Figura G6.



**Figura G6. Aumento de riesgo de licuefacción para sector ex fundo Las Ulloas**

## **ANEXO H**

### **INFORMES DE LOS CATASTROS REALIZADOS EN CONCEPCION POR SERNAGEOMIN LUEGO DEL TERREMOTO DE 2010.**



SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA

Servicio Nacional de Geología y Minería  
Subdirección Nacional de Geología

Documento Externo

Este trabajo fue efectuado por:

María Francisca Falcón H.

Manuel Arenas A.

**EFFECTOS GEOLÓGICOS DEL SISMO DEL 27 DE FEBRERO DE 2010:  
OBSERVACIONES DE DAÑOS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS EN LA  
COMUNA DE CONCEPCIÓN (INF-BIOBÍO-52).**

**JUNIO DE 2010**

**EFFECTOS GEOLOGICOS DEL SISMO DEL 27 DE FEBRERO DE 2010:  
OBSERVACIONES DE DAÑOS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS EN LA  
COMUNA DE CONCEPCIÓN  
(INF-BIOBIO- 52)**

**Fecha:** 31 de Mayo de 2010

**Asistencia solicitada por:** Municipalidad de Concepción.

**Asistencia realizada por:** María Francisca Falcón y Manuel Arenas

La Municipalidad de Concepción a través del oficio Ord. Dom-E-65, de fecha 5 de abril de 2010, solicitó a SERNAGEOMIN hacer una evaluación en terreno relacionada con la aparición de grietas y deslizamientos de terreno en los siguientes sectores:

- Lomas de San Andrés sector Condominio Español
- Villa Loncopán, Río Andalién
- Parque Residencial Collao
- Villa CAP, calle B 290
- Población Buena vista Pasaje 4
- Santa Sabina, Villa Los Escritores
- Valle Noble

Como resultado de la inspección de terreno, se entregan las siguientes observaciones y recomendaciones:

#### **1.- Santa Sabina, Villa Los Escritores (Coord. de referencia N5926059, E674625)**

##### **1.1. Observaciones**

El sector visitado en Villa Los Escritores, abarca 9 viviendas entre los pasajes Lope de Vega y Tirso de Molina, por el sur y norte respectivamente, y el pasaje Calderón de la Barca cuyo límite se encuentra en un talud intervenido para la construcción de la Villa Modelo (Figura. H1).

Villa Los Escritores se ubica en una loma de aproximadamente 65 msnm. Los terrenos corresponden a rocas sedimentarias conformadas por areniscas muy finas con abundante arcilla y limos. Estas se encuentran intensamente alteradas y meteorizadas, cuyo producto final es una roca muy blanda, moldeable si está saturada en agua, excavable a mano, de muy baja permeabilidad. De acuerdo a las indicaciones de los vecinos, sobre esta unidad de roca se encuentra un relleno de 0,5 m de espesor constituido por escombros de basurales, pues se han encontrado, cuando han excavado para construir ampliaciones a las viviendas, con lozas, muñecos, bolsas plásticas y abundante material de desecho.

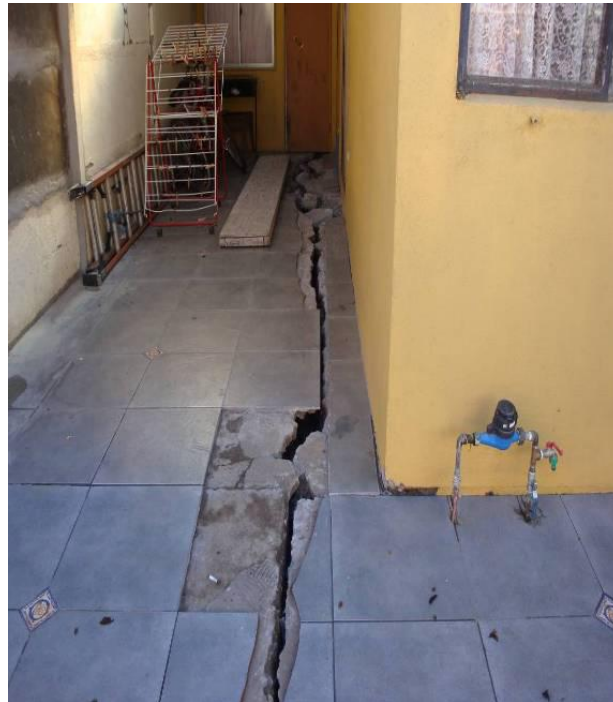
La Villa Los Escritores fue entregada el año 1997, sin embargo, 2 viviendas fueron demolidas en los años 2004 y 2006 producto de un deslizamiento del terreno. Estas viviendas se encontraban sobre un terraplén y muro de contención al lado este del pasaje Calderón de la Barca (polígono en

amarillo de Figura. H1). Se estima que el deslizamiento se desencadenó por la acción combinada de las intensas lluvias de los años 2004 y 2006, y por la excavación del talud natural y consecuente aumento de pendiente del mismo. La excavación se habría ejecutado para los rellenos de la Villa Modelo.



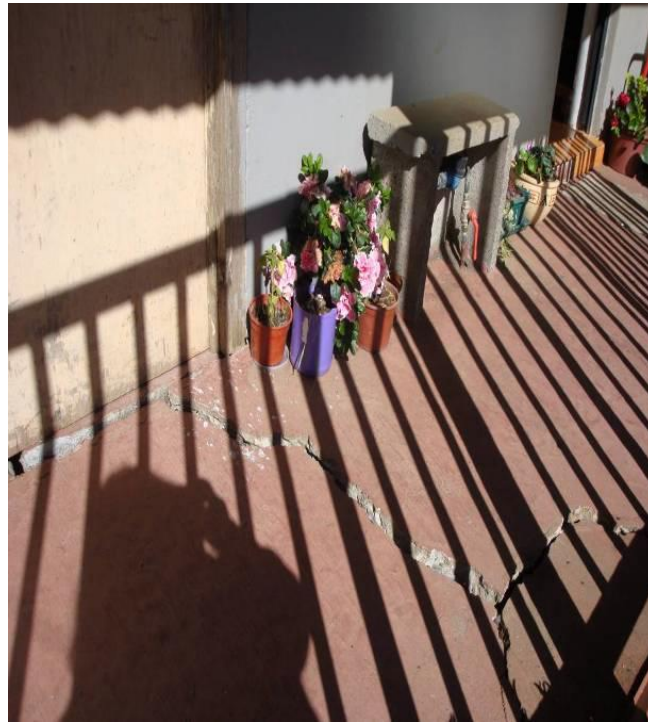
**Figura. H1.** Se observa imagen de sector afectado en Villa Los Escritores. El polígono rojo marca las viviendas muy dañadas por agrietamiento y asentamiento del terreno. En amarillo sector demolido varios años atrás por asentamientos y deslizamientos. La línea azul indica la dirección preferencial N25/W del conjunto más frecuente de grietas. La flecha amarilla indica el sentido del desplazamiento. En verde se demarca el talud intervenido para rellenos de construcción de Villa Modelo.

Producto del sismo del 27/02/2010, un conjunto de 9 viviendas, las más cercanas al talud del cerro, resultaron dañadas, verificándose asentamientos, daños en muros, lozas de segundo piso, cañerías, escalas, grietas en el interior de las viviendas y patios (Figuras. H2 y H3). En el exterior se verifican asentamientos del terreno y un conjunto de grietas principales paralelas de dirección preferencial N25W, además de grietas polidireccionales. Las grietas afectan los pavimentos de los pasajes y desplazan y cortan el muro de contención del pasaje Calderón de la Barca, éstas presentan aberturas en la horizontal variables entre unos 2 a 15 cm. El desplazamiento vertical es

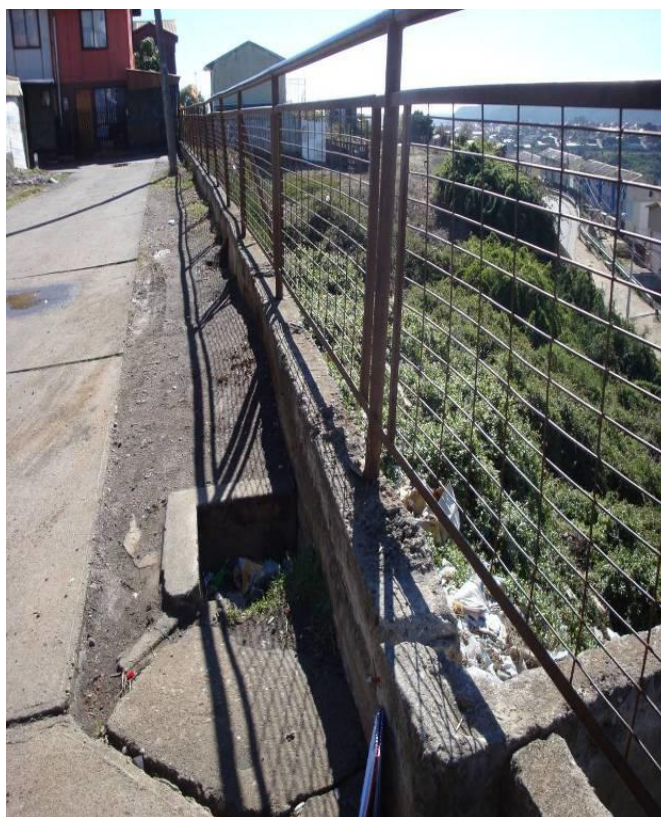


variable, entre 3 a 15 cm, con profundidades de hasta 1 m (Figuras. H4 y H5).

**Figura. H2. Grietas en patio de casa del pasaje Tirso de Molina. Presentan dirección N25W, paralela al talud del cerro.**



**Figura. H3. Grietas polidireccionales en patio de casa del pasaje Lope de Vega. Nótese desplazamiento vertical de las grietas.**



**Figura. H4. Vista desde pasaje Calderón de la Barca. En primer plano se aprecia muro de contención quebrado, donde existe vegetación corresponde al talud alterado por excavaciones. Al fondo casas del pasaje Tirso de Molina.**



**FiguraH5. Casas del pasaje Tirso de Molina. Se observa asentamiento de las viviendas y desacople de las casas en el segundo piso (flecha roja).**

## **1.2 Conclusiones**

De acuerdo a lo observado, los daños se produjeron debido a dos factores. El primero dice relación con el asentamiento de los rellenos artificiales que conforman estos terrenos. Esto se verifica por la presencia de pisos, patios y pavimentos que, en algunos sectores, se encontraban sin sustento. El segundo factor es la aparición de grietas de tracción asociadas a la reactivación del deslizamiento cuyo coronamiento corresponde al Pasaje Calderón de la Barca.

De acuerdo al actual estado del terreno, no se recomienda el arreglo de las viviendas o su reconstrucción sin antes efectuar los estudios de detalle que se entregan en las recomendaciones.

## **1.3 Recomendaciones**

Se recomienda al Municipio lo siguiente:

- Un estudio de detalle para evaluar la estabilidad del talud intervenido que se encuentra bajo el pasaje Calderón de la Barca. Como resultado, debe entregarse el diseño de medidas correctoras y

estabilizadoras del talud de tal manera de evitar una reactivación del deslizamiento que pudiese afectar, aún más, los terrenos dañados por las grietas.

- Un estudio de detalle de mecánica de suelos para evaluar la calidad de los rellenos y el efecto en los terrenos naturales debido a las grietas de tracción aparecidas después del sismo.
- Prohibir el tránsito de vehículos por el pasaje Calderón de la Barca.
- Tapar las grietas con materiales impermeables, para evitar la infiltración de aguas lluvias a los suelos a través de ellas. Esto último facilitaría la saturación de los suelos y el aumento de la presión lateral, con la consiguiente pérdida de disminución de las propiedades resistentes de los suelos.

## **2.- Lomas de San Andrés**

### **2.1.- Observaciones**

En el sector de Lomas de San Andrés se encuentran varios condominios y residencias las cuales se edificaron, en parte, cubriendo, parcial o totalmente, terrenos de humedales y quebradas. Producto del sismo del 27/02/2010, las edificaciones, calles y los servicios de luz, agua y gas sufrieron daños de diversa consideración. En el caso de las viviendas, puede corresponder tanto a daños menores como a pérdida total de las mismas, debido a asentamientos de los rellenos y suelos naturales, causados por licuefacción de estos últimos, y/o porque fueron dañados considerablemente por grietas que las cruzan de lado a lado. Cabe señalar, que en varios sectores, de mayor pendiente, se observó evidencias de procesos de reptación de suelos, anteriores al sismo, marcados principalmente por grietas en veredas y pavimentos.

La Figura H6 muestra el Sector de Lomas de San Andrés. En rojo, los sectores visitados con graves daños de viviendas, en azul se ilustran grietas principales que afectaron calles y viviendas y los círculos rojos muestran los sectores con otras evidencias de licuefacción, como “golpes de agua” y volcanes de arena. El punto 38 ilustra el sector de calle 8, los puntos 39 a 41 la cuadra comprendida entre las calles Alonso García de Ramón y García Hurtado de Mendoza, y los puntos 43 y 44 corresponden al sector Barrio Los Españoles. Cabe señalar que solo se consignan los efectos observados, pudiendo existir más daños en el área que no fueron registrados.



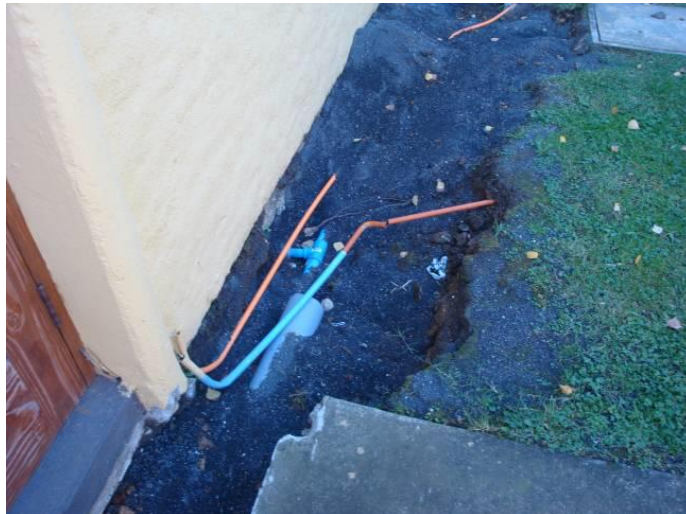
**FiguraH6. Sector Lomas de San Andrés. Polígonos rojos indican los sectores visitados con grave daños de viviendas, en azul se ilustran grietas principales que afectaron calles y viviendas y los círculos rojos indican los sectores donde ocurrieron “golpes de agua”. Los puntos 43 y 44 corresponden al sector Barrio Los Españoles.**

### **2.1.1.- Sector de Calle 8 (Coord. de referencia N5926653, E673561)**

En el sector de Calle 8, se verificó la existencia de abundantes juegos de grietas, de dirección preferencial N65/E, que afectaron a viviendas y calles. Junto a las grietas se observaron hundimientos y desplazamientos de muros y casas, además de cortes de cañerías de servicios de agua, luz y gas. Durante el sismo, en los patios de las viviendas, ocurrieron “golpes de agua” (surgimiento de agua subterránea) y se formaron pequeños volcanes de arenas finas (Figuras H7, H8 y H9). En las grietas se observa la presencia de agua a una profundidad de 0,5 m. La casa de Calle 8 No. 463, presentó hundimiento y desplazamiento lateral de la vivienda en aproximadamente 40 cm hacia el humedal.



**Figura H7.** Barrio Lomas de San Andrés, Calle 8. Se observa desplazamiento horizontal de vivienda.



**Figura H8.** Barrio Lomas de San Andrés, Calle 8. Se observa corte de cañerías debido a desplazamiento lateral de la vivienda.



**Figura H9. Barrio Lomas de San Andrés, Calle 8. Se observa daño y desplazamiento en muro externo.**

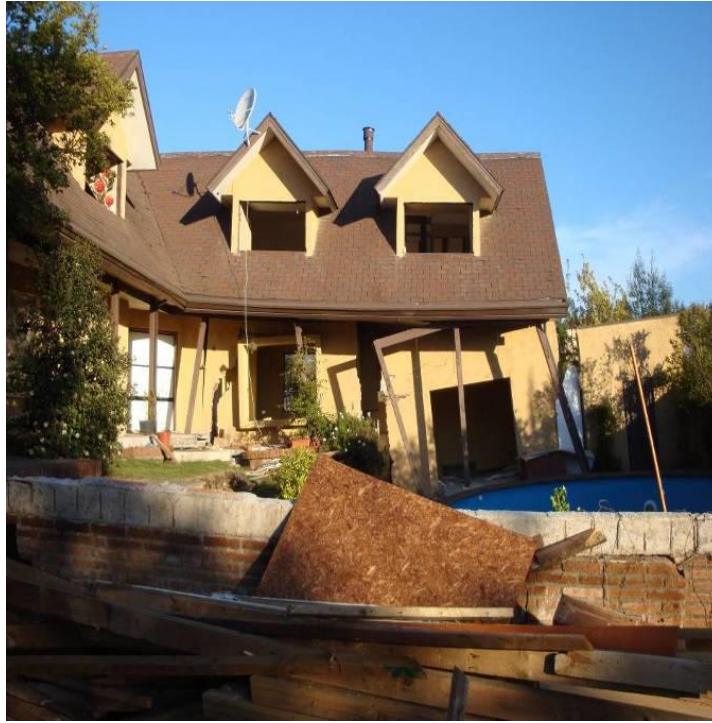
Los antecedentes recogidos permiten aseverar que en el sector de Calle 8 se produjo licuefacción de suelos naturales y rellenos antrópicos debido a la naturaleza arenosa de los mismos y a la elevada ubicación del nivel freático. Esto último es evidente, puesto que el barrio fue construido rellenando el humedal.

### **2.1.2.- Sector calles Alonso García de Ramón y García Hurtado de Mendoza (Coord. de referencia N5926514, E673311)**

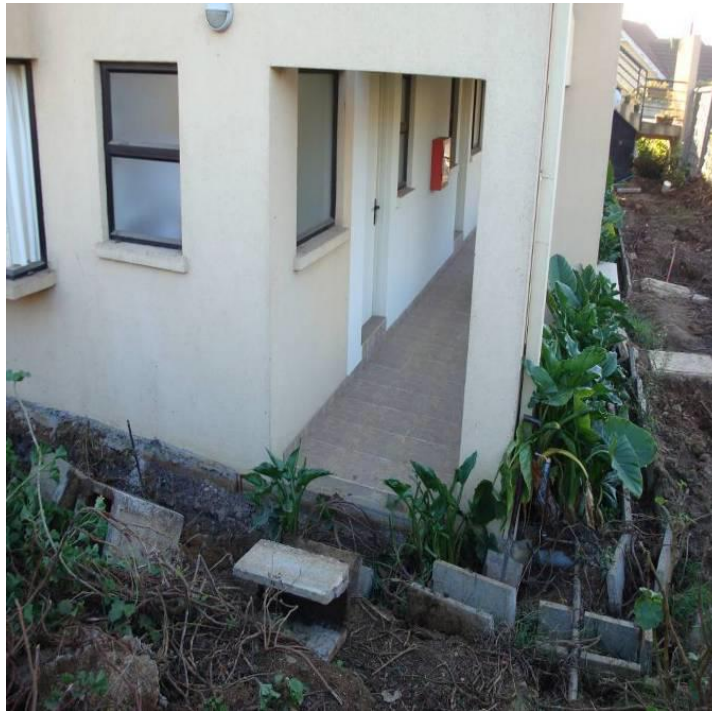
En este sector, que corresponde a los puntos 39 a 41 de la Figura H6, se observaron graves daños en 5 viviendas debido a licuefacción de suelos. Esto se manifestó en hundimientos y alzamientos diferenciales, además de grietas profundas que, por ejemplo, cortaron en dos las viviendas. Junto a lo anterior, en calles, veredas y plazas se observó la presencia de grietas profundas (direcciones N20W-N50W y N65E), que se indican en la Figura H6.

Las grietas que parten en dos las viviendas internas de calle Alonso García de Ramón, tienen una orientación N20W, presentan hasta 2 m de profundidad y 25 cm. de abertura (FiguraH10). En la misma calle, la casa No. 275 fue afectada por hundimiento. El suelo bajo esta vivienda salió por los bordes de la casa verificándose un alzamiento de las veredas respecto de la calle, las que quedaron elevadas más de 1 m por sobre su nivel original (FigurasH11 y H12). Este

hundimiento está relacionado a grietas de dirección N65E entre las cuales se produjo el hundimiento del terreno (FiguraH13).



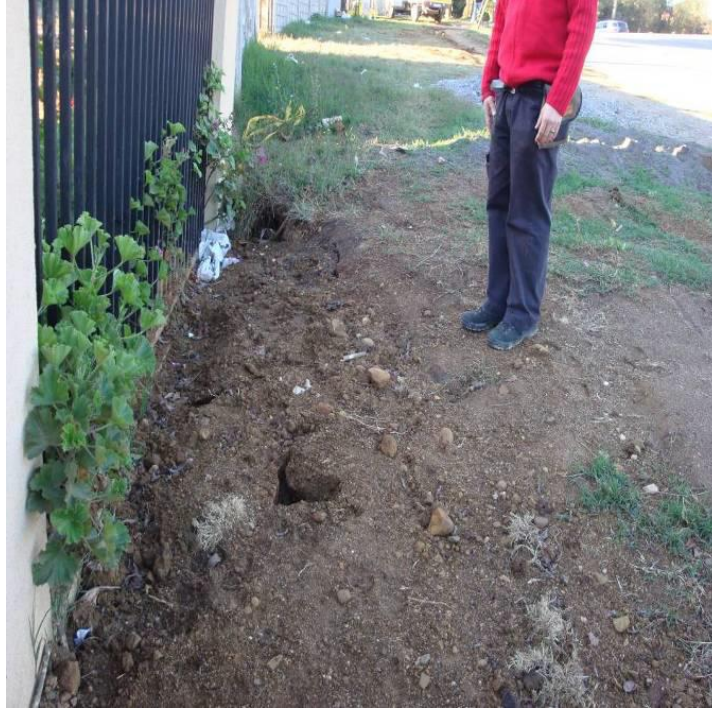
**Figura H10. Barrio Lomas de San Andrés, calle Alonso García de Ramón. Se observa vivienda con asentamiento y muros partidos en dos por la acción de grietas.**



**FiguraH11. Barrio Lomas de San Andrés, calle Alonso García de Ramón, casa No 275. Se observa hundimiento de la vivienda y del suelo del patio. Nótese las plantas hundidas más de 40 cm respecto a la vivienda.**



**FiguraH12. Barrio Lomas de San Andrés, calle Alonso García de Ramón, casa No. 243. Se observa alzamiento de la vereda respecto a la calle. Antes del sismo se encontraban a la misma altura.**



**FiguraH13. Barrio Lomas de San Andrés, calle García Hurtado de Mendoza. Se observa grieta de orientación N65E que limita la zona de hundimiento de viviendas.**

### **2.1.3.- Barrio Los Españoles (Coord. de referencia N5926742, E673791)**

En este sector se observaron dos viviendas con graves daños (con decreto de demolición de la Municipalidad) correspondientes a las casas 2 y 6. Los daños consisten en hundimientos de hasta 40 cm y desplazamientos de las viviendas hacia el humedal contiguo a sus patios traseros. Se observan juegos de grietas de orientación N63E, de hasta 15 m de largo, profundidad de hasta 2 m y aberturas entre 5 y 50 cm. Los desplazamientos, controlados por estas grietas, son hacia el norte. Las viviendas fueron construidas sobre rellenos que cubrían el humedal del sector. A los daños observados, se suman manifestaciones asociadas al fenómeno de licuefacción de terrenos como son los “golpes de agua” y formación de pequeños volcanes de arena (Figuras H14 y H15).



**Figura H14. Barrio Lomas de San Andrés, Barrio Los Españoles, casa 6. Se observa hundimiento de la vivienda en más de 35 cm. La flecha muestra arenas arrastradas por los “golpes de agua”.**



**Figura H15. Barrio Lomas de San Andrés, Barrio Los Españoles, casa 6. Se observa hundimiento de vivienda y grietas de orientación N63E.**

## **2.2.- Conclusiones**

De acuerdo a lo observado, en mayo de 2010, en el barrio Lomas de San Andrés, se puede concluir que varios sectores se vieron afectados por fenómenos de licuefacción de suelos durante el sismo del 27 de febrero de 2010. Esto tuvo como consecuencia la ocurrencia de grietas, asentamientos y alzamientos, tanto de rellenos antrópicos como suelos naturales, que afectaron seriamente a viviendas, calles y sistemas de servicios básicos.

Cabe señalar, sin embargo, que en algunos sectores los asentamientos de rellenos antrópicos podrían deberse a malas técnicas de construcción de los mismos (materiales inadecuados, escasa compactación).

Procesos de reptación de suelos, previos al sismo, pudieron contribuir a los efectos observados. Este proceso de movilización lenta del suelo, pendiente abajo, continuará afectando las laderas del sector y deben ser mitigados en la medida que provoquen daños a las viviendas o infraestructura vial y de servicios.

Se destaca que las viviendas que sufrieron mayor daño, en general, se ubican muy cercanas a los humedales actuales, donde se encuentran los suelos de mayor potencial de licuefacción.

### **2.3.- Recomendaciones**

Se recomienda efectuar estudios de mecánica de suelos de detalle que determinen la calidad de los rellenos, el nivel del agua subterránea y las características de los suelos en este sector. Estos estudios debieran permitir tomar decisiones para la reparación y/o reconstrucción de viviendas y calles.

### **3.- Valle Noble (Coord. de referencia N5923604, E677836)**

#### **3.1.- Observaciones**

Las viviendas de Valle Noble fueron construidas sobre rellenos en un brazo del río Andalién, llamado Pichiandalién, y también sobre humedales del mismo río.

En este sector se observaron al menos 8 viviendas con graves daños producidos por licuefacción de las arenas del río. Los efectos observados corresponden a casas con asentamientos, “golpes de agua” al interior de las viviendas y formación de “volcanes de arena”, que corresponden a las arenas que arrastra el agua subterránea al salir hacia la superficie. Las viviendas dañadas de calle Alicante corresponden a los números 126, 122, 182, 151, 163, 171, 175 y 119. También se observaron viviendas y calles agrietadas. En la casa de calle Alicante No. 126 ocurrieron “golpes de agua” subterránea en el living de la vivienda, similar a lo sucedido en la casa No. 182 (Figuras H16 a H20).



**FiguraH16. Condominio Valle Noble. En la figura se observa arriba el río Andalién, en azul se traza el antiguo cauce del Pichiandalién (Andalién chico). Polígono en rojo indica el sector visitado y los círculos rojos señalan los lugares donde se observó “golpes de agua”. Los puntos corresponden a los sectores de viviendas observadas.**



**FiguraH17. Valle Noble. Vivienda con “golpes de agua”, grietas y “volcanes de arena” ocurridos durante el sismo en el living comedor de la misma, tal como lo señala el cartel. La vivienda no está habitada.**



**FiguraH18. Valle Noble. Detalle de figura anterior, a más de un mes del sismo. Se observan arenas muy finas de color gris claro, que fueron arrastradas por los “golpes de agua” producto de la licuefacción de los suelos.**



**FiguraH19. Valle Noble. Se observan orificios por donde se produjeron “golpes de agua” en la vivienda. Nótese que la arena que cubre las gradas corresponde a las arenas arrastradas por la surgimiento de agua. Se observa, además, grietas en las gradas del patio.**



**FiguraH20. Valle Noble. Vivienda con asentamiento, como lo indica el cartel. La vivienda se encontraba deshabitada.**

### **3.2.- Conclusiones**

Los terrenos sobre los que se emplaza Valle Noble y que corresponden a antiguos cauces del río Andalién, sufrieron licuefacción, debido a la existencia de suelos arenosos con el nivel de aguas subterráneas muy somero. Esto último debido a la cercanía del río. Las grietas, “golpes de agua” y surgimiento de arena corresponden a manifestaciones inequívocas de licuefacción, las cuales produjeron graves daños a los habitantes y sus viviendas.

Cabe señalar, sin embargo, que en algunos sectores los asentamientos de rellenos antrópicos podrían deberse a malas técnicas de construcción de los mismos (materiales inadecuados, escasa compactación).

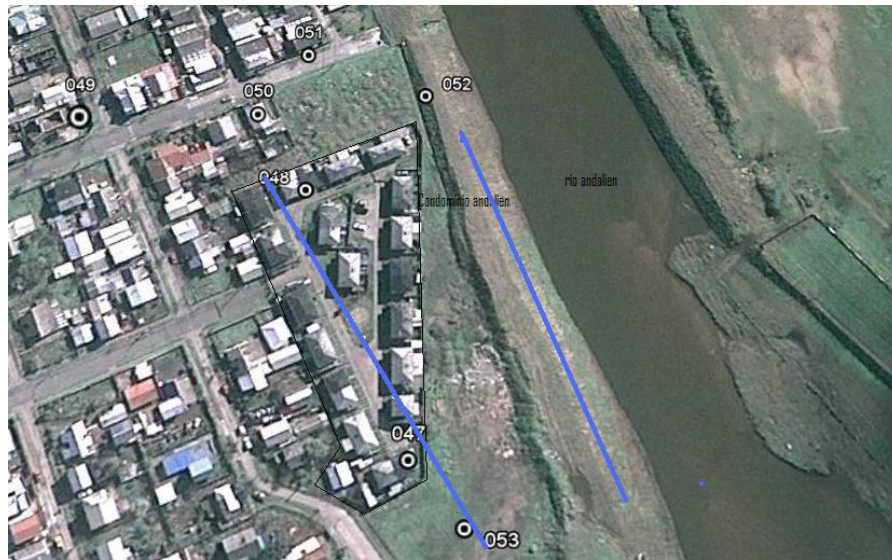
### **3.3.- Recomendaciones**

Se recomienda efectuar estudios de mecánica de suelos de detalle que determinen, la calidad de los rellenos, el nivel del agua subterránea y las características de los suelos del sector. Estos estudios debieran permitir, tomar decisiones para la reparación y/o reconstrucción, o abandono de viviendas y calles.

## **4.- Villa CAP (Condominio Andalién), calle B 290 (Coord. de referencia N5925748, E675718)**

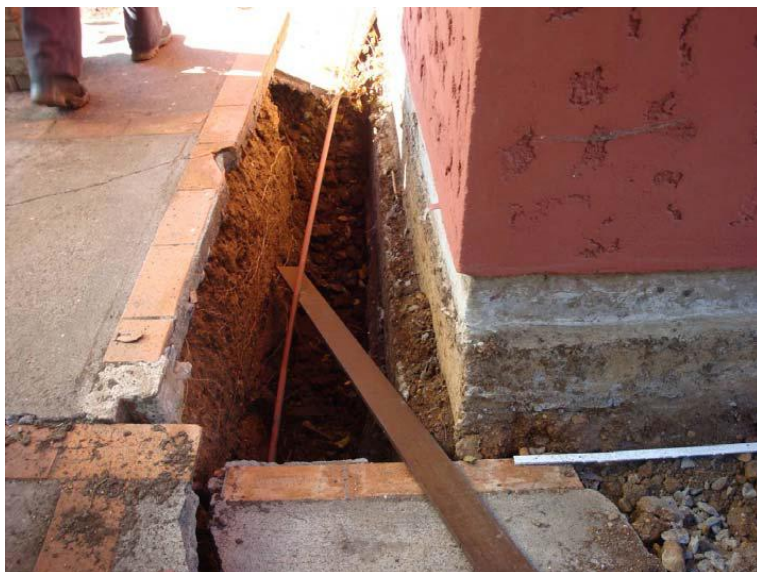
### **4.1.- Observaciones**

El Condominio Andalién se encuentra al costado sur poniente del río Andalién a una altura de menos de 2 m sobre el nivel del mismo. Las casas más cercanas se ubican a 25 m del lecho del río y las más lejanas a menos de 100 m del mismo. El condominio se encuentra sobre rellenos realizados sobre la llanura de inundación del río Andalién. Los suelos en este sector están compuestos por arenas finas, con un nivel de las aguas subterráneas somero, no superior a 3 m (FiguraH21).



**FiguraH21. Condominio Andalién. Se muestra ubicación de condominio respecto al río Andalién. En azul esquema de grietas que afectan al condominio y al terraplén que separa el condominio del río.**

Producto del sismo se formaron grietas a lo largo de todo el condominio, las que se extienden fuera del mismo por más de 200 m. Las grietas muestran una profundidad de hasta 0,8 m, aberturas de 0,15 m y desplazamiento vertical de hasta 0,4 m, con orientación principal N50W (Figuras H22 a H24). De acuerdo a testimonios de los vecinos, durante el sismo se observó “golpes de agua” y surgimiento de arena, con una altura del chorro de agua de aproximadamente 2,5 m. Antes del “golpe de agua” se habría escuchado un sonido parecido al del papel celofán arrugándose.



**Figura H22. Condominio Andalién. Se observa asentamiento y grietas en patio trasero de vivienda**



**Figura H23. Se observan terraplenes, de protección ante inundaciones, dañados por grietas paralelas al curso del río. La flecha muestra el límite del Condominio. Se observa que las viviendas están casi a la misma altura del río, lo que comprueba que estas fueron construidas en la llanura de inundación del río Andalién.**



**Figura H24. Condominio Andalién. Al sur del condominio hacia el puente ferroviario, se aprecian grietas en suelos arenosos, que corresponden a la llanura de inundación del río Andalién**

Producto del sismo las viviendas quedaron con graves daños provocados por levantamientos, asentamientos y desplazamientos de las casas y/o el terreno, Por ejemplo, la casa No. 11 quedó levantada 20-30 cm, la casa No. 29 hundida 15-20 cm y desplazada 13 cm hacia el SW y 6 cm hacia el NW. La casa No.2 presenta grietas en los pisos y hundimiento (inhabitable), con el pavimento levantado 10-15 cm (Figuras. H25 y H26). Se verificaron, además, cortes de cañerías en varios sectores del condominio.



**Figura H25. Condominio Andalién. Se observa grieta en muro en de vivienda.**



**Figura H26. Condominio Andalién. Se observa grieta con desplazamiento vertical que provocó asentamiento en una vivienda.**

De acuerdo a testimonios de los vecinos, durante las crecidas del río, la villa se inundaba frecuentemente. Para evitar esto se construyó un terraplén entre la villa y el río. Producto del sismo, el terraplén quedó dañado con grietas, lo que puede causar su desestabilización durante alguna crecida.

#### **4.2.- Conclusiones**

Durante el sismo los terrenos del condominio se vieron afectados por licuefacción de suelos, debido a que se encuentra emplazado en suelos arenosos con un nivel de aguas subterráneas muy somero dada la cercanía con el río. Las grietas, golpes de agua y surgimiento de arena, corresponden a manifestaciones inequívocas de licuefacción, los cuales produjeron graves daños a los habitantes y sus viviendas.

De acuerdo a lo observado, en mayo de 2010, los rellenos utilizados para la construcción de las viviendas y calles no fueron apropiados, ya que las mismas y el sistema de servicios básicos, sufrieron graves daños debido a la licuefacción de los suelos de la llanura de inundación del río Andalién.

#### **4.3.- Recomendaciones**

Se recomienda efectuar estudios de mecánica de suelos de detalle que determinen, la calidad de los rellenos, el nivel del agua subterránea, y las características de los suelos en este sector. Estos estudios debieran permitir, tomar decisiones para la reparación y/o reconstrucción, o abandono de viviendas y calles.

### **5.- Villa Loncopán (Coord. de referencia N5923187, E676850)**

#### **5.1.- Observaciones**

Villa Loncopán fue construida sobre rellenos, en la llanura de inundación del estero Nonguén, y en antiguos humedales del mismo. Los suelos naturales del sector están formados por arenas finas, donde el nivel de las aguas subterráneas se encuentra a menos de 5 metros de la superficie del terreno. (FiguraH27)



**Figura H27. Villa Loncopán y Parque Residencial Collao. La figura muestra la proximidad de ambas villas al estero Nonguén. En azul se muestra un esquema del sistema de grietas que afectaron viviendas y calles en ambas villas. En rojo se señala ubicación de “golpe de agua”.**

La baja altura de la villa con respecto al nivel del estero, predispone a las viviendas a ser inundadas durante crecidas en períodos de alta pluviosidad, tal como fue el caso reciente en los años 2004 y 2006. En esas ocasiones, las crecidas del estero inundaron las calles y pasajes de la misma con aproximadamente 35 cm de altura de agua. Actualmente, se están construyendo defensas fluviales y limpieza de la caja del estero (FiguraH28).



**FiguraH28. Estero Nonguén, Villa Loncopán. Se observa que las casas de Villa Loncopán están a escasa altura con respecto al Estero Nonguén, lo cual la predispone a sufrir inundaciones durante crecidas invernales.**

Durante la actividad de terreno se visitó la calle General Novoa y el Pasaje 2. En este sector, producto del sismo, se produjeron grietas subparalelas al curso de agua, de dirección aproximada N5°E, con desplazamientos verticales del bloque cercano al estero. Estas estructuras afectaron viviendas y calles, provocando asentamientos diferenciales y hundimientos de las viviendas, resultando algunas de ellas con daños estructurales severos. La casa No.56 del pasaje 2, por ejemplo, se hundió por efecto de una grieta de dirección N5°E de 0,97 m de profundidad, abertura en la horizontal de 0,45 m y 0,12 m de desplazamiento en la vertical, con el bloque de suelo más bajo hacia el este, es decir hacia el estero. Esta vivienda se encontraba deshabitada al momento de la visita. En conjunto con la formación de esta grieta, se observó durante el sismo “golpes de agua” y surgimiento de arenas que provienen de estratos de suelos arenosos finos. Estos, al licuarse afloran hacia la superficie, inundando con agua y sedimentos, en este caso, el patio de la vivienda.

Por otra parte, en la calle General Novoa, se observaron grietas en los pisos de viviendas y patios, además de asentamientos en la calle y veredas.



**FiguraH29. Villa Loncopán, pasaje 2 casa No. 56. Se observa una grieta formada en el patio de una vivienda durante el sismo del 27/02/2010,. El ancho de abertura de la grieta es de 45 cm. Las arenas de color gris corresponden a arenas depositadas por el “golpe de agua” durante la licuefacción.**

## **5.2.- Conclusiones**

Durante el sismo los terrenos del condominio se vieron afectados por licuefacción de suelos, debido a que se encuentra emplazado en suelos arenosos con un nivel de aguas subterráneas muy somero, dada la cercanía del Estero Nonguén. Las grietas, “golpes de agua” y surgimiento de arena corresponden a manifestaciones inequívocas de licuefacción, las cuales produjeron graves daños a los habitantes y sus viviendas.

De acuerdo a lo observado, en mayo de 2010, los rellenos utilizados para la construcción de las viviendas y calles no fueron apropiados, ya que las mismas y el sistema de servicios básicos, sufrieron graves daños debido a la licuefacción de los suelos arenosos que conforman la llanura de inundación del Estero Nonguén.

### 5.3.- Recomendaciones

Se recomienda efectuar estudios de mecánica de suelos de detalle que determinen la calidad de los rellenos, el nivel del agua subterránea, y las características de los suelos en este sector. Estos estudios debieran permitir, tomar decisiones para la reparación y/o reconstrucción, o abandono de viviendas y calles. Se debe considerar, además, la implementación de medidas estructurales de mitigación, que disminuyan el riesgo de inundación a que se encuentra afecto este sector. Esto debe ser realizado por la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP.

## 6.- Parque Residencial Collao (Coord. de referencia N5923377, E677035)

### 6.1 Observaciones

Villa Parque Residencial Collao fue construida sobre rellenos en la llanura de inundación del estero Nonguén, en antiguos humedales del mismo. Los suelos naturales del sector corresponden a arenas finas, donde el nivel de las aguas subterráneas se encuentra a menos de 5 metros de la superficie del terreno (FiguraH27).

Producto del sismo del 27/02 /2010 se produjeron grietas en los terrenos debido a licuefacción de los suelos. Las grietas afectaron directamente las viviendas ubicadas más cercanas al estero, con asentamientos en las mismas (Figura H30). Además, vecinos y guardias indicaron que se produjo cortes en las cañerías de agua y gas.



**FiguraH30.** Villa parque Residencial Collao. Se observa vivienda afectada por el asentamiento de los terrenos. El borde de la ventana da un indicio del grado de hundimiento.

## **6.2.- Conclusiones**

Durante el sismo los terrenos del condominio se vieron afectados por licuefacción de suelos, debido a que se encuentra emplazado en suelos arenosos con un nivel de aguas subterráneas muy somero dada la cercanía del Estero Nonguén. Las grietas cercanas al estero, que resultaron en asentamientos diferenciales de las viviendas, junto a la rotura y corte de los servicios de agua y gas, corresponden a manifestaciones inequívocas de licuefacción.

De acuerdo a lo observado, en mayo de 2010, los rellenos utilizados para la construcción de las viviendas y calles no fueron apropiados, ya que las mismas y el sistema de servicios básicos, sufrieron graves daños debido a la licuefacción de los suelos de la llanura de inundación del Estero Nonguén.

## **6.3.- Recomendaciones**

Se recomienda efectuar estudios de mecánica de suelos de detalle que determinen, la calidad de los rellenos, el nivel del agua subterránea, y las características de los suelos en este sector. Estos estudios debieran permitir, tomar decisiones para la reparación y/o reconstrucción, o abandono de viviendas y calles.

## **7.- Población Buena Vista, Pasaje 4 (Coord. de referencia N5926188, E675489)**

La población Buena Vista, fue construida sobre la llanura de inundación del río Andalién. Los suelos naturales en este sector corresponden a arenas finas depositadas por el río Andalién. El nivel del agua subterránea en este sector se estima que es menor a 5 m bajo la superficie.

Durante el sismo del 27/02/2010, en el Pasaje 4 se formaron grietas que destruyeron inmediatamente viviendas, como es el caso de las casas No. 751, 757, 740 y 793, de las cuales, las dos primeras fueron demolidas. Junto a las grietas, se observó “golpes de agua” y formación de pequeños volcanes de arena, que se encuentran documentados por videos efectuados por los vecinos del pasaje. Los fenómenos observados corresponden inequívocamente a efectos de la licuefacción de los suelos (Figuras H31 a H34).



**FiguraH31. Población Buena Vista, Pasaje 4. La elipse de color verde muestra el sector afectado. En líneas azules se muestra esquema de las grietas que ocasionaron el colapso y asentamiento de viviendas. En rojo se indica el sector donde se observó “golpes de agua” y formación de volcanes de arena. Nótese la cercanía del pasaje 4 al río Andalién (entre 100 y 150 m).**



**FiguraH32. Población Buena Vista, Pasaje 4. Se observa conducto circular de aproximadamente 40 cm por donde se observó, durante el sismo, “golpes de agua” y la formación de volcanes de arena, típicos de fenómenos de licuefacción de suelos arenosos saturados de agua.**



**FiguraH33. Imágenes tomadas del video realizado por vecinos del sector al la mañana siguiente del sismo (Gentileza Rodolfo Núñez). A la derecha se puede observar los daños ocasionados por las grietas, mientras que a la izquierda se ve los volcanes de arena (flechas azules) originados por la licuefacción de los suelos.**



**FiguraH34. Población Buena Vista, Pasaje 4. A los pies del grupo de jóvenes se observa grieta que atraviesa la calle, ya cubierta por los vecinos, nótese el desplazamiento vertical de la misma, así como el descuadre de las rejas.**

Junto con la destrucción de viviendas producto de las grietas, se produjeron asentamientos diferenciales en el pasaje que significó, entre otros daños, la rotura de matrices de agua potable y alcantarillado que a la fecha de la visita a terreno (8 de mayo), aún no era resuelta por ESSBIO.

Muchas viviendas del pasaje 4 se encuentran afectadas por grietas en los pisos y muros, asentamientos de las mismas, además de destrucción de rejas y muros medianeros (Figuras. H35 a H36).



**Figura H35. Población Buena Vista, Pasaje 4. Se observa hundimiento en calle y vereda, quedando el pavimento en el aire.**



**Figura H36. Población Buena Vista, Pasaje 4. Se observa daños en reja, terraza y cañerías de gas.**

## **7.2.- Conclusiones**

Durante el sismo los terrenos del Pasaje 4 de la Población Buena vista se vieron afectados por licuefacción de suelos, debido a que las viviendas se encuentran emplazadas en suelos arenosos con un nivel de aguas subterráneas muy somero dada la cercanía del río Andalién. Las grietas, “golpes de agua” y surgimiento de arena, corresponden a manifestaciones inequívocas de licuefacción, los cuales produjeron graves daños a los habitantes, destrucción de viviendas, roturas de matrices de agua y alcantarillado.

## **7.3.- Recomendaciones**

Se recomienda efectuar estudios de mecánica de suelos de detalle que determinen, la calidad de los rellenos, el nivel del agua subterránea, y las características de los suelos en este sector. Estos estudios debieran permitir, tomar decisiones para la reparación y/o reconstrucción, o abandono de viviendas y calles.

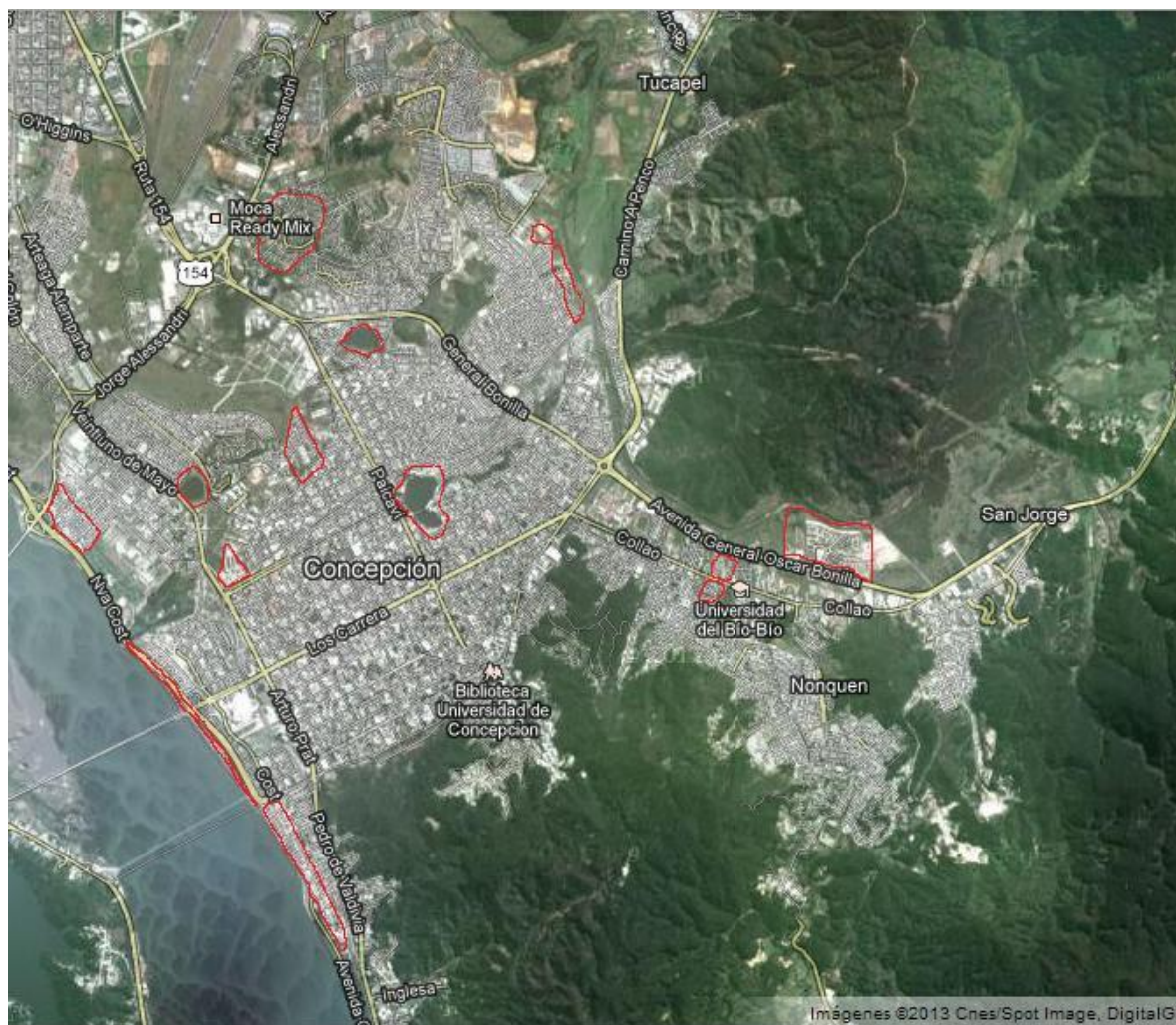
NOTA: Coordenadas UTM 18S, WGS84

MFF/MAA/svg.

**ANEXO I**

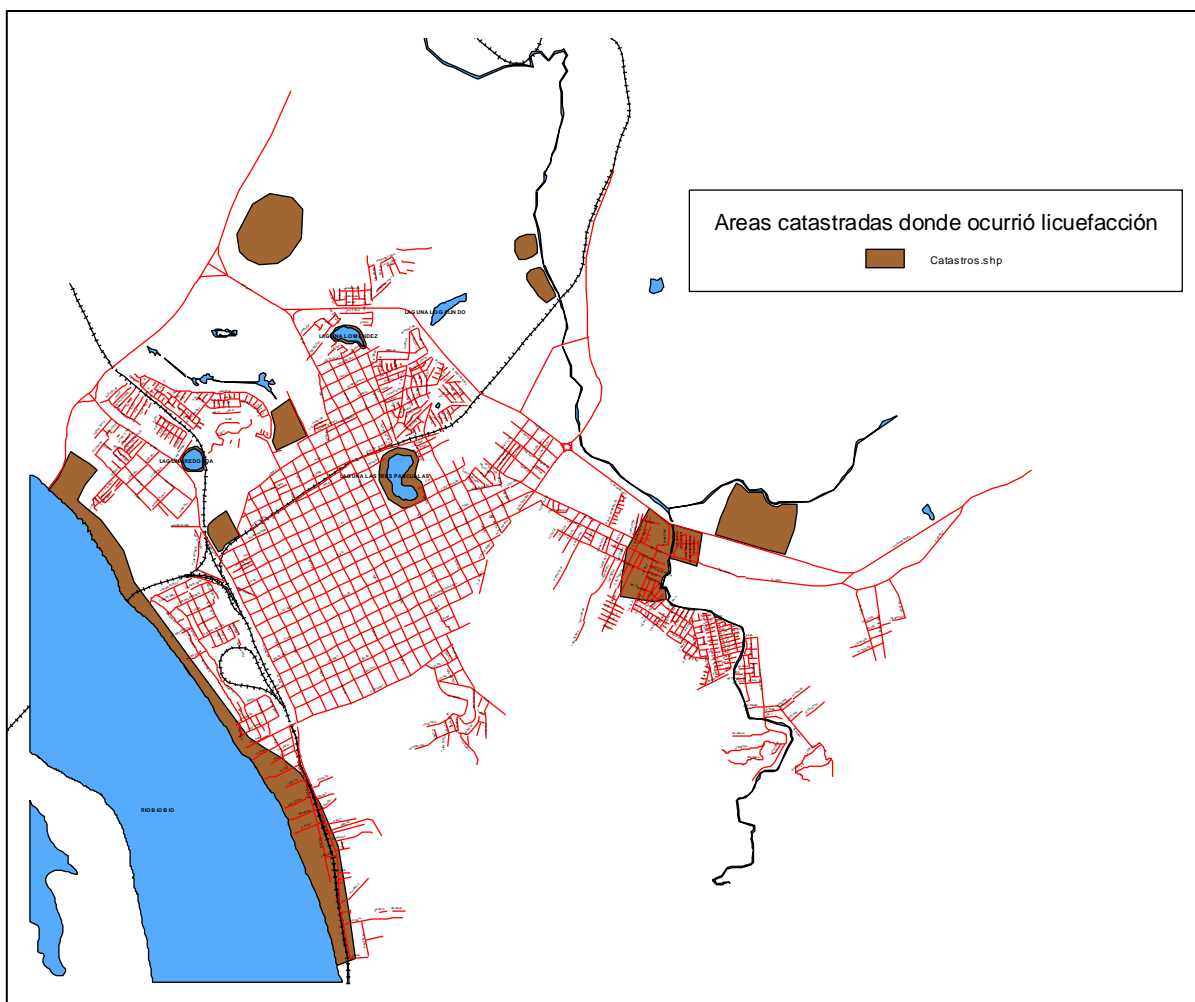
**MAPAS DE LOS CATASTROS REALIZADOS EN CONCEPCION LUEGO DEL TERREMOTO DE 2010.**

a) Imagen satelital



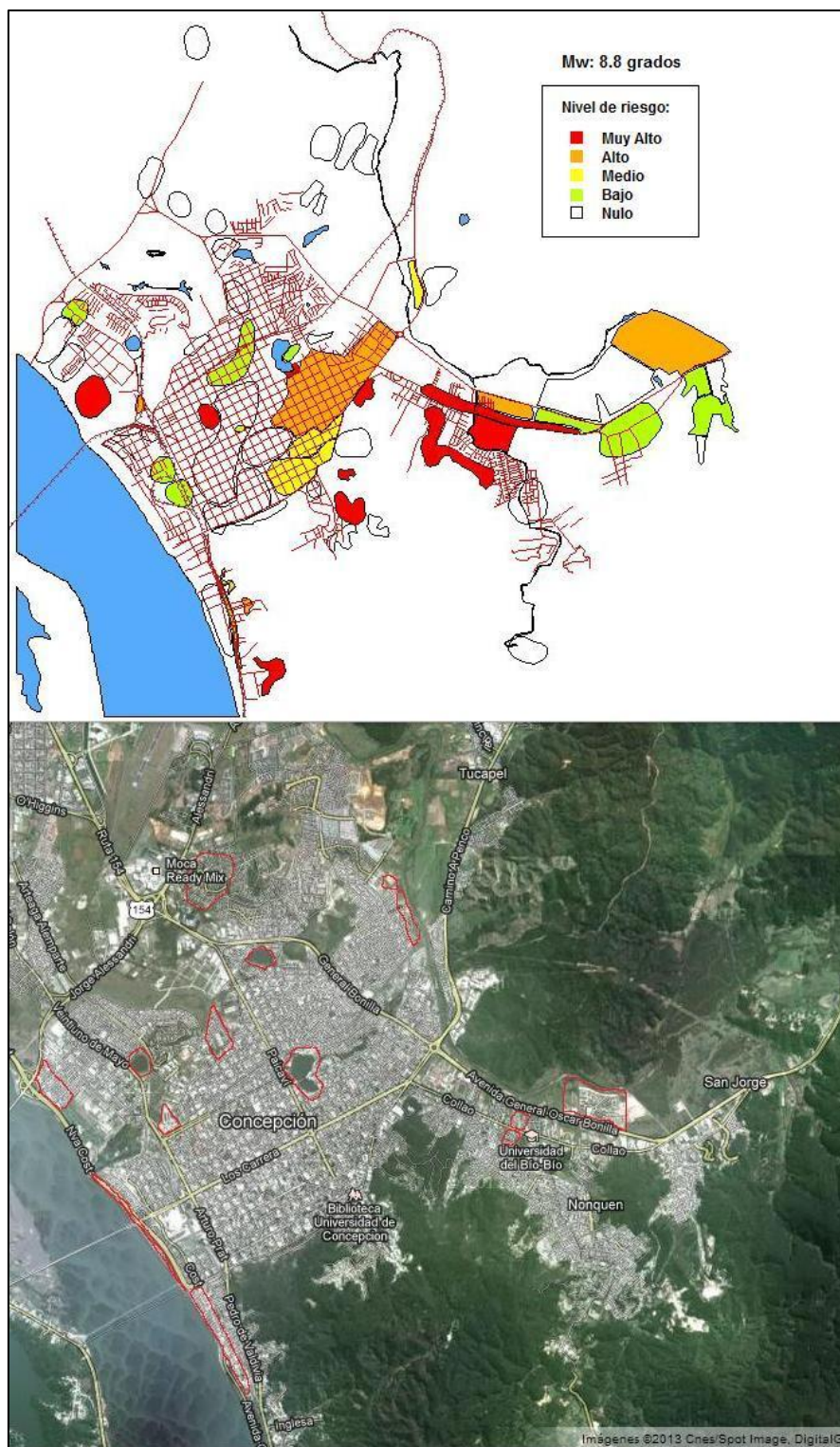
**Figura I 1. Imagen satelital donde se evidencio licuefacción de acuerdo a los catastros realizados luego del terremoto de 2010 (Áreas en rojo)**

b) Mapa en ARCVIEW



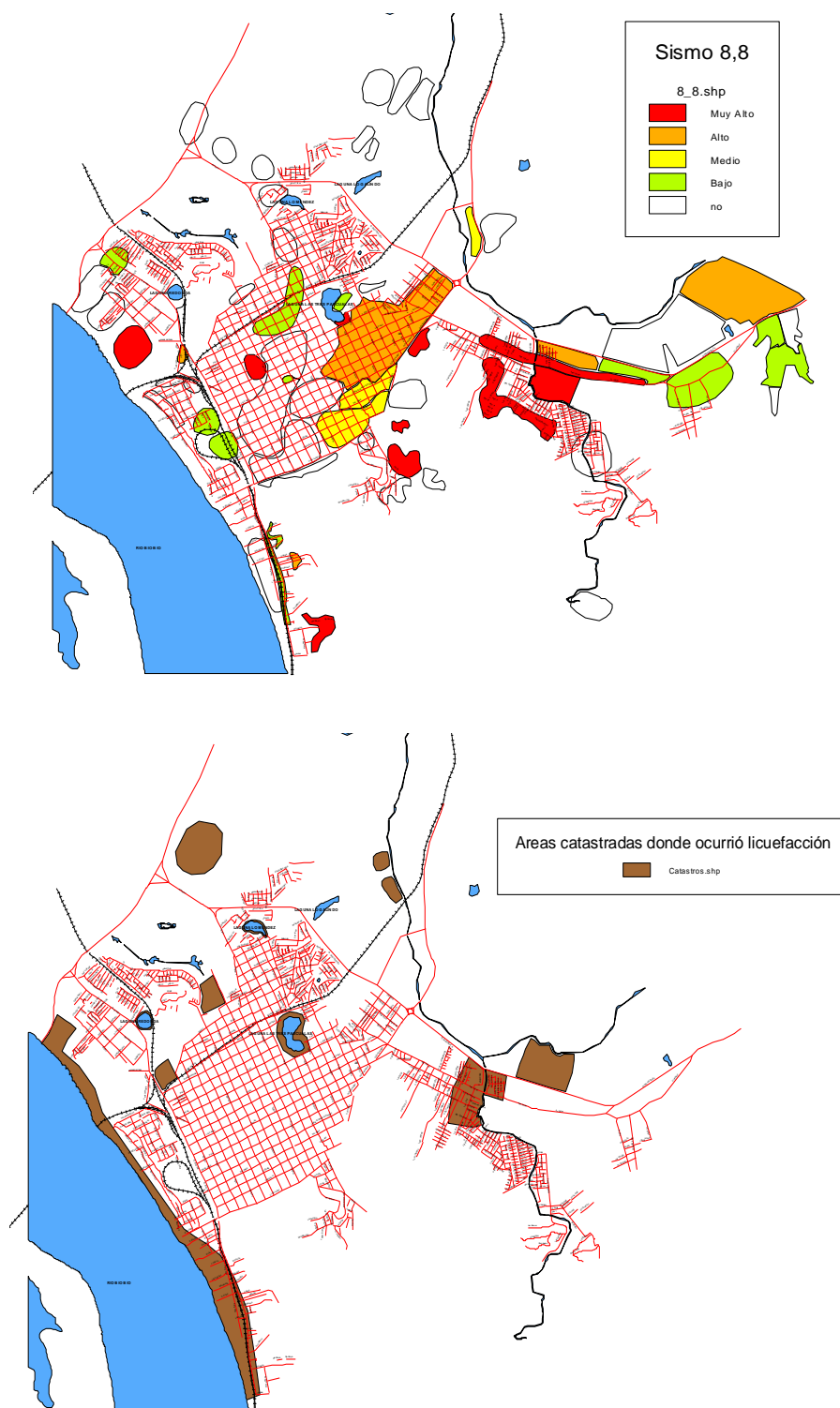
**Figura I 2. Mapa de Concepción donde se evidencio licuefacción de acuerdo a los catastros realizados luego del terremoto de 2010 (Áreas en café)**

c) Comparación entre la metodología y los catastros el mapa satelital



**Figura I 3. Comparación entre los mapas. Imagen superior mapa entregado luego de aplicar la metodología de Seed & Idriss. Imagen inferior mapa satelital de los catastros realizados luego del terremoto del 27 de febrero de 2010.**

d) Comparación entre la metodología y el catastro en formato ArcView



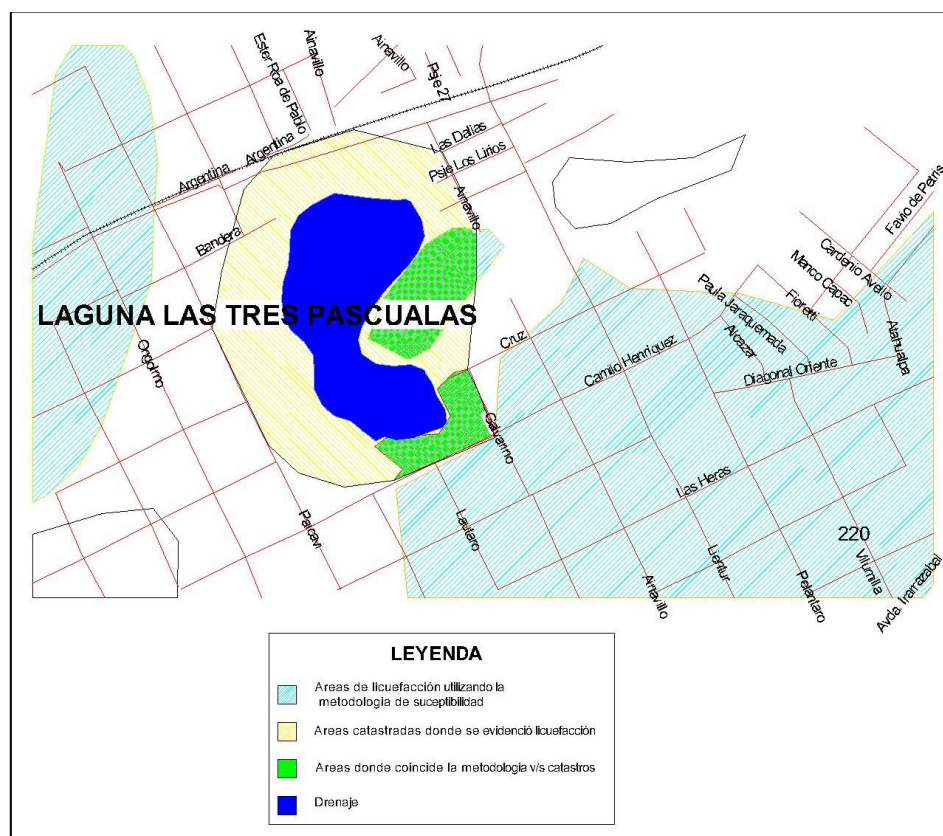
**Figura I 4. Comparación entre los mapas. Imagen superior mapa entregado luego de aplicar la metodología de Seed & Idriss. Imagen inferior mapa de los catastros realizados luego del terremoto del 27 de febrero de 2010.**

**ANEXO J**

**AREAS COINCIDENTES ENTRE LAS ZONAS LICUABLES APLICANDO LA METODOLOGIA Y LAS ZONAS LICUABLES EVIDENCIADAS LUEGO DEL TERREMOTO**

a) Sector Laguna Las Tres Pascualas

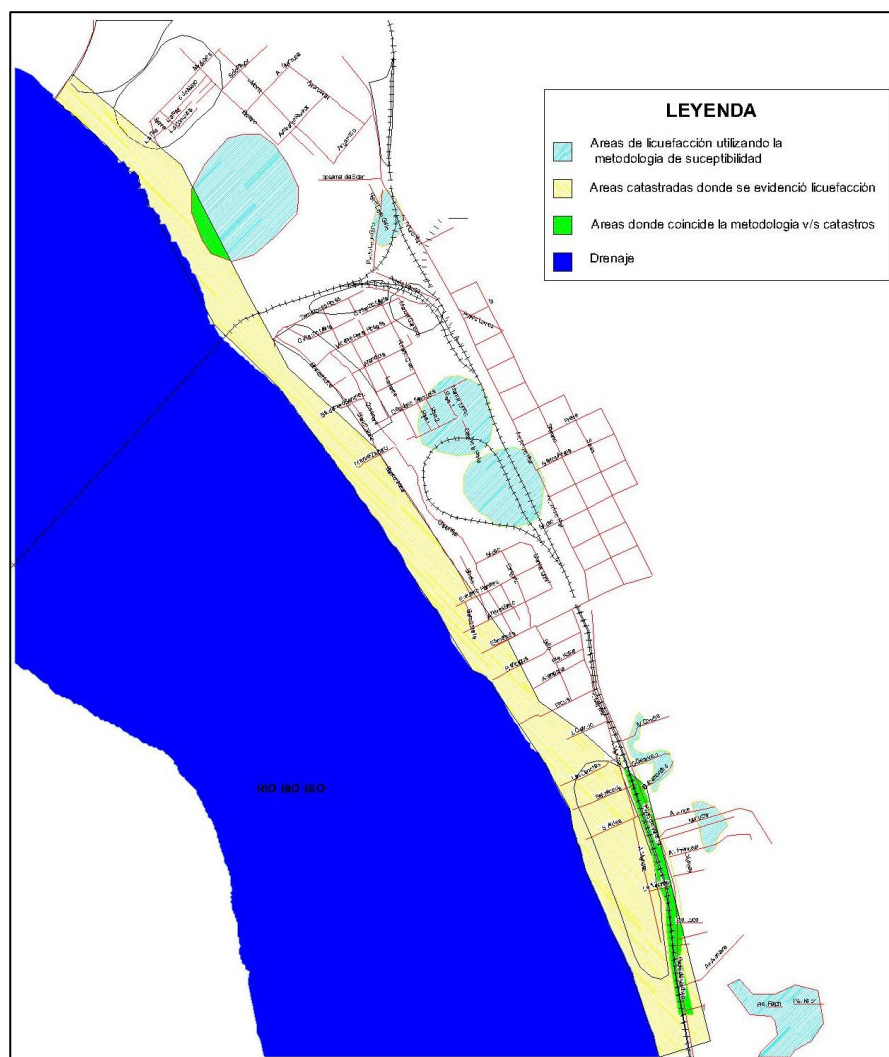
En este sector se evidenció licuefacción en todo el borde de la laguna ya que este tipo de suelo está altamente saturado por la cercanía de la napa a la superficie. Aplicando la metodología de estudio se verificó que el área sur presento un riesgo Muy Alto, y el borde Este presentó riesgo Bajo. Ver Figura J 1.



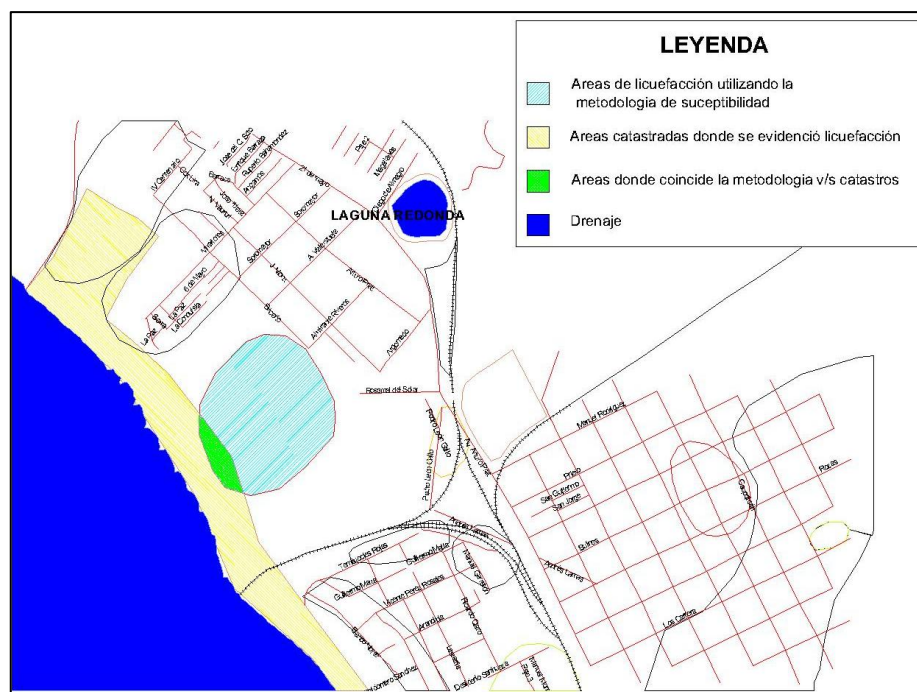
**Figura J 1. Superposición entre las áreas licuables catastradas y las zonas licuables según la metodología de Seed & Idriss para el sector Laguna Tres Pascualas**

b) Sector autopista Constanera Bio bio / Pedro de Valdivia bajo

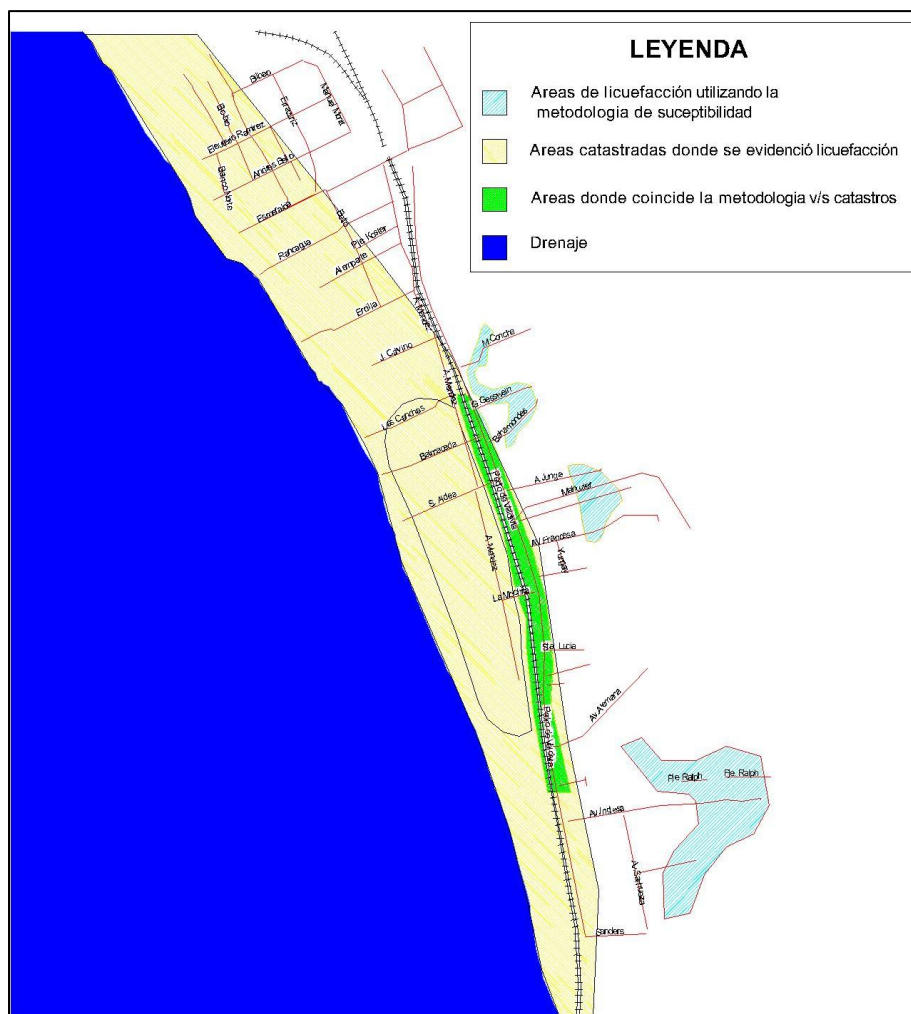
Todo el borde del Río Bio Bio (sector costanera) presentó licuefacción de acuerdo a los catastros recopilados (Figura J 2), con mayor presencia en el sector posterior de la Vega Monumental y entrada al puente Juan Pablo Segundo y por otro lado el sector de Pedro de Valdivia Bajo. Aplicando la metodología se tiene que las áreas coincidentes corresponden a la costanera del río Bio Bio la altura del Cementerio General (Figura J 3), el cual tuvo un riesgo Muy Alto y también una coincidencia en todo el sector de Av. Pedro de Valdivia (Figura J 4), donde se analizó que el riesgo era bajo.



**Figura J 2. Superposición entre las áreas licuables catastradas y las zonas licuables según la metodología de Seed & Idriss para el Sector Costanera Bio Bio y Pedro de Valdivia Bajo**



**Figura J 3. Superposición entre las áreas licuables catastradas y las zonas licuables según la metodología de Seed & Idriss para el Sector norte de la Costanera Bio Bio**



**Figura J 4. Superposición entre las áreas licuables catastradas y las zonas licuables según la metodología de Seed & Idriss para el Sector Sur de la Costanera Bio Bio**

c) Sector Villa Loncopán

En este sector los catastros realizados luego del terremoto evidenciaron que en gran parte de la Villa ocurrió licuefacción, los fenómenos más observados fueron golpes de agua, surgimiento de arenas y grietas.

Al aplicar la metodología se observa que esta zona presenta un potencial de riesgo Muy Alto, con aproximadamente 6 metros licuables. En la Figura J5 se puede apreciar la zona donde coincide tanto la metodología como los catastros (zona 1, área verde), sin embargo la zona analizada con la metodología de Seed & Idriss es bastante limitada y no abarca toda la zona catastrada, para

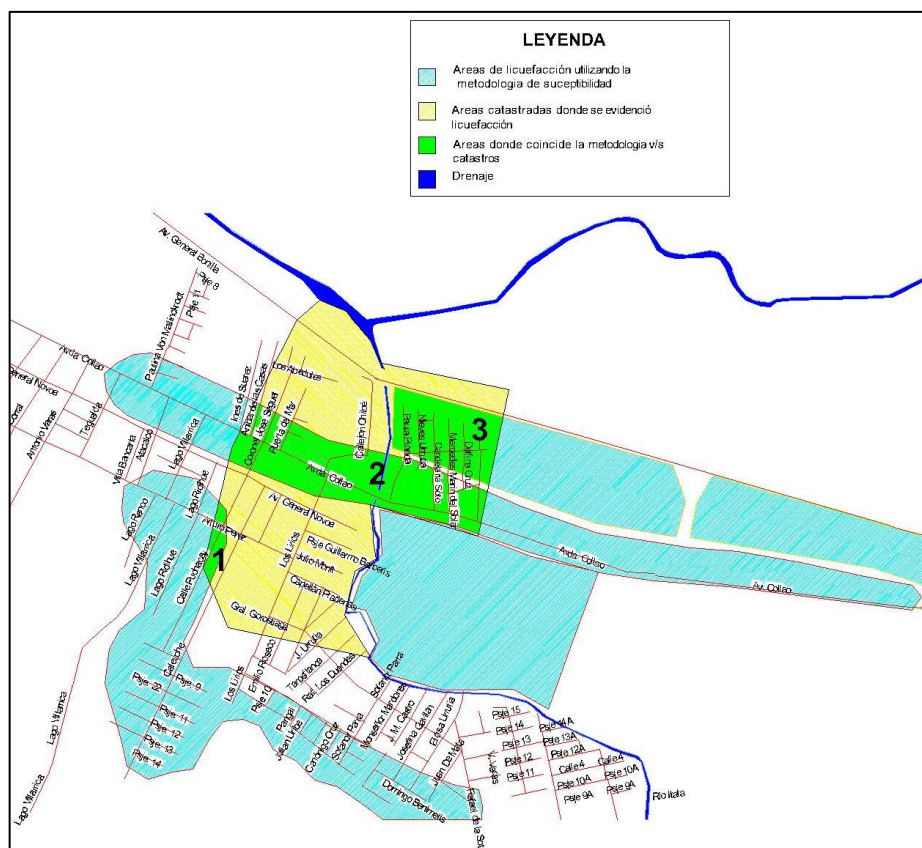
poder así determinar si efectivamente toda el área de Villa Loncopán, coincide o no con el estudio de la metodología.

d) Sector Parque Residencial Collao

En este sector el estudio de catastros pos terremoto mostro que amplias zonas del Parque Residencial Collao FiguraJ5 (área amarilla) presento licuefacción.

Aplicando la metodología se observó que la zona de suelo a lo largo de Avenida Collao presentó un potencial de riesgo Muy Alto, con aproximadamente 4 metros licuables, mientras que la zona de suelo que comprende entre el Estero Nonguén, General Bonilla y Avenida Collao presentó un potencial de riesgo Alto con aproximadamente 3,7 metros licuables.

Acá se observaron amplias coincidencias entre el método y lo realmente ocurrido Figura J5 (zonas 2 y 3, color verde) ya que al aplicar la metodología el área de estudio de suelo era más amplio que en el caso de Villa Loncopán.



**Figura J5. Superposición entre las áreas licuables catastradas y las zonas licuables según la metodología de Seed & Idriss para el Sector Villa Loncopán y Parque Residencial Collao**

## ANEXO K

### SECTORES DONDE OCURRIÓ LICUEFACCIÓN Y UTILIZANDO LA METODOLOGÍA SE EVIDENCIO UN POTENCIAL DE RIESGO NULO

#### e) Sector Pedro de Valdivia Bajo

Este sector presentó licuefacción de acuerdo a los catastros recopiladas luego del terremoto, esto se aprecia en la Figura K2 en la zona sombreada en amarillo. Sin embargo, la zona 1 contrastada con el catastro muestra que no se registró licuefacción utilizando la metodología de Seed & Idriss. Los metros licuables con la metodología fueron 0,7 metros aproximadamente, los cuales corresponden al intervalo de riesgo Nulo en el criterio de clasificación.

El hecho de que no coincidan se debe a que la información de zonificación de suelo que se tiene contempla que existe suelo arenoso hasta los 3,8 metros (Figura K1), mientras que los estratos siguientes son en su mayoría limos y estos de acuerdo a la metodología de estudio no permite analizarlos. Además de ello se tiene información que en este sector el nivel freático está en promedio a unos 3,1 metros de la superficie, por lo que de hecho se tiene el máximo de metros licuables para esta zona ( $3,8\text{m} - 3,1\text{m} = 0,7\text{m}$ ). Esta cantidad de suelo licuable en estricto rigor tiene un nivel de riesgo y por lo tanto coincidirían con lo que realmente ocurrió en esta zona luego del terremoto.

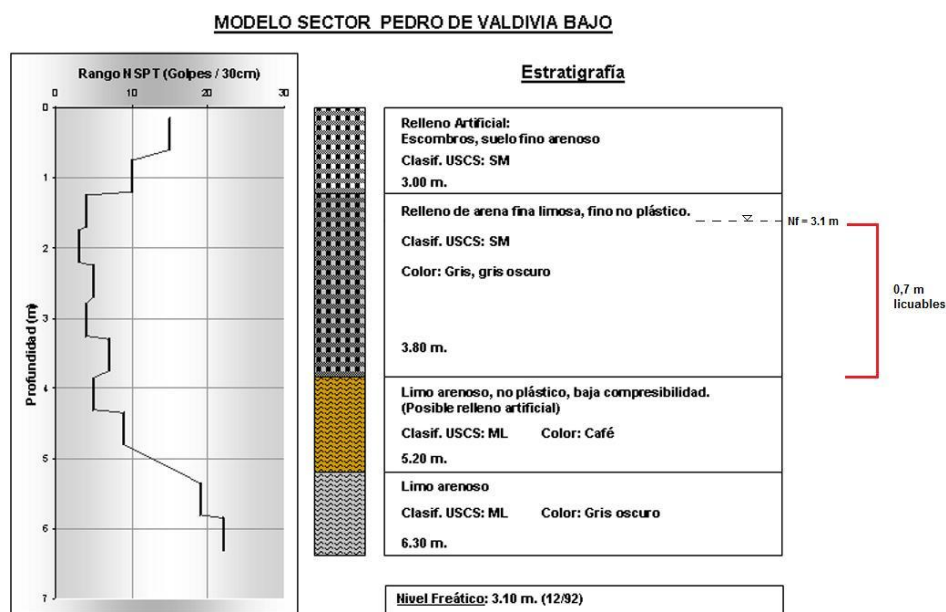
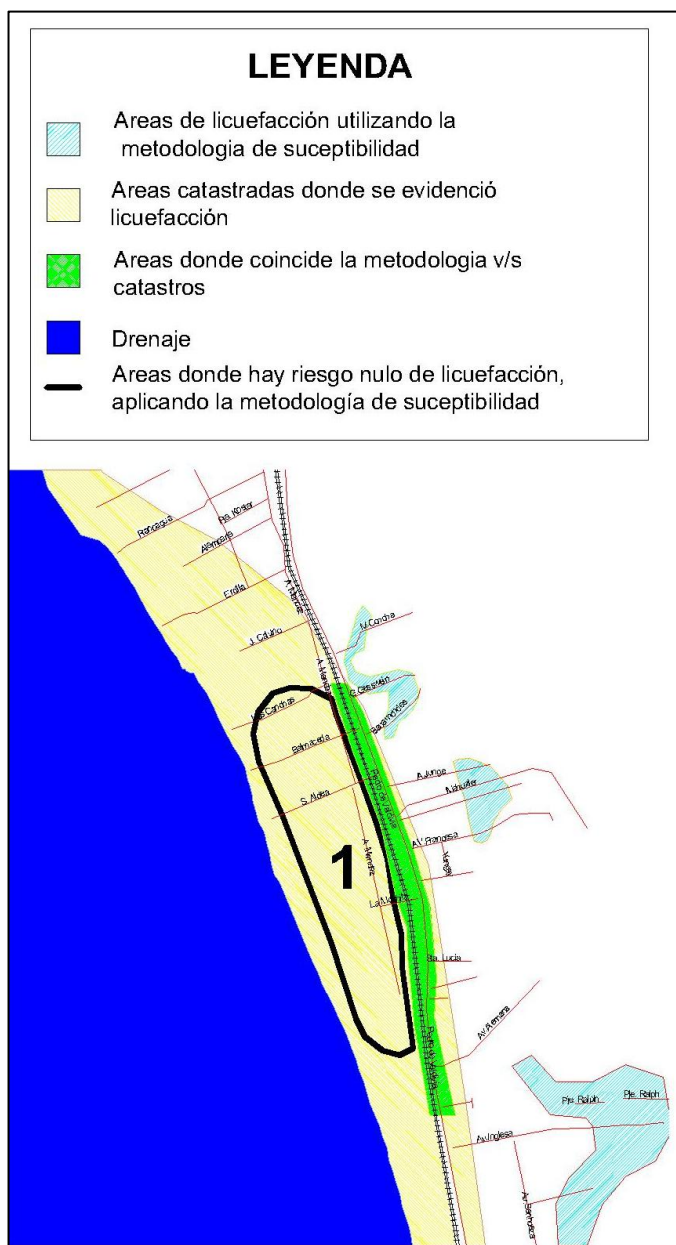


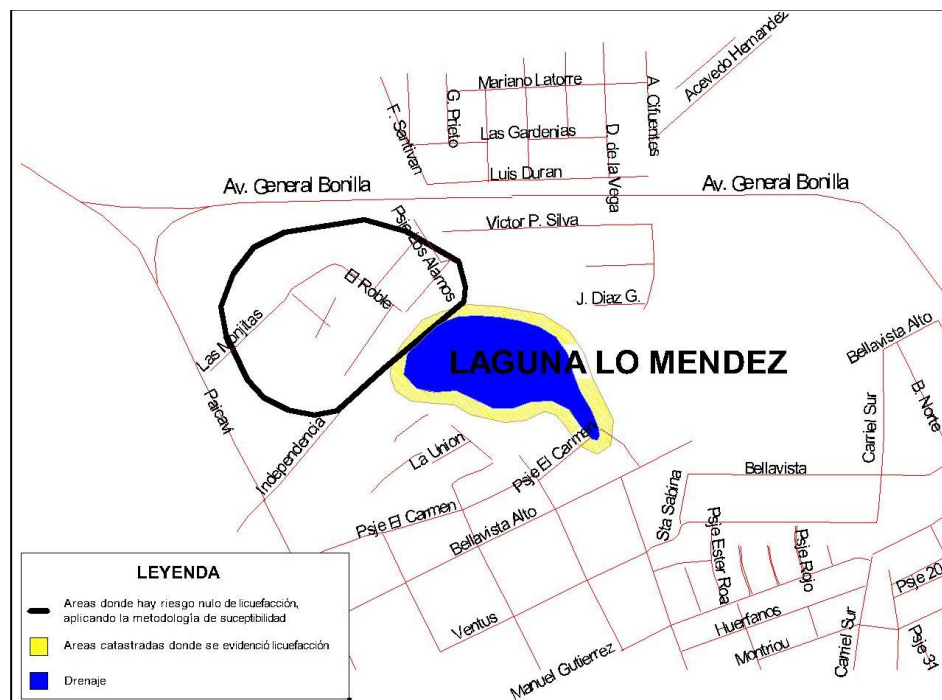
Figura K1. Información de mecánica de suelos para la zona de Pedro de Valdivia Bajo.



**Figura K2. Superposición entre las áreas licuables catastradas y las zonas donde no se registró licuefacción según la metodología de Seed & Idriss para el Sector Pedro de Valdivia Bajo.**

f) Laguna Lo Méndez:

El catastro evidenció que todo el borde de la laguna licuó (Figura K3), pero al aplicar la metodología mostró que había riesgo nulo. Esto se explica porque la intersección de las zonas es bastante baja, por lo que no se tiene mucha información del tipo de suelo que rodea a toda la laguna y es muy probable que en todo el borde se presentara licuefacción producida por propagación lateral, que este estudio no considera.



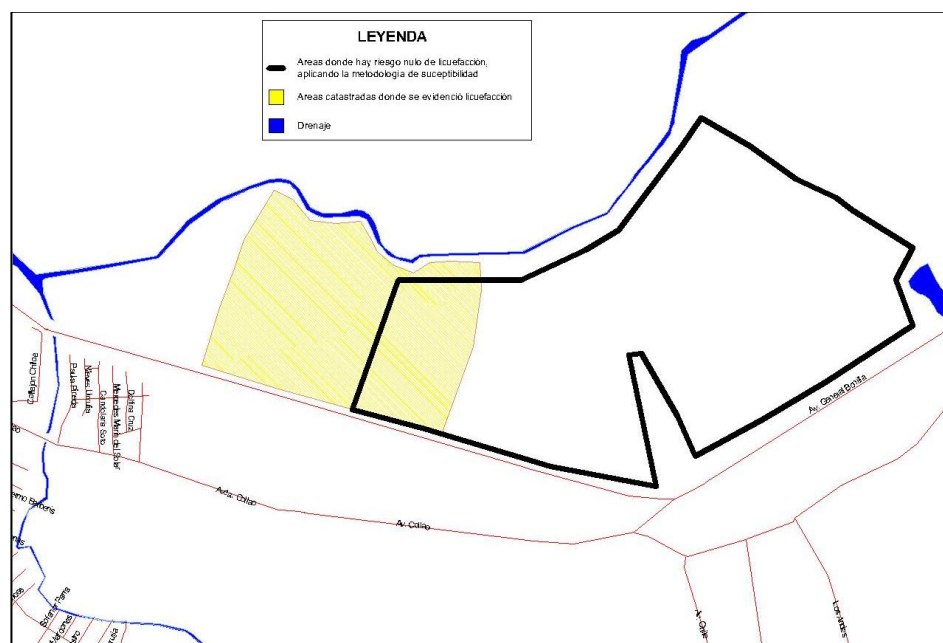
**Figura K3. Superposición entre las áreas licuables catastradas y las zonas donde no se registró licuefacción según la metodología de Seed & Idriss para el Sector Pedro Laguna Lo Méndez.**

g) Sector Loteo Santa Josefina

El sector encerrado con línea negra de la Figura K4 muestra la zona analizada con la metodología. Con dicho análisis los metros licuables fueron 0,7, por lo que en parte coincide con los catastros del terremoto.

Se puede apreciar que solo parte de la zona analizada con la metodología coincide con zonas que produjeron licuefacción luego del terremoto de 2010, por lo que no se tiene mayor información de todo el sector de Valle noble. A pesar de ello la metodología entregó que 0,7 metros licuaban, lo que entonces coincide con lo realmente ocurrido el 2010.

Independientemente de aquello esta zona es altamente licuable al ser suelo arenoso y saturado debido a la cercanía de ríos.



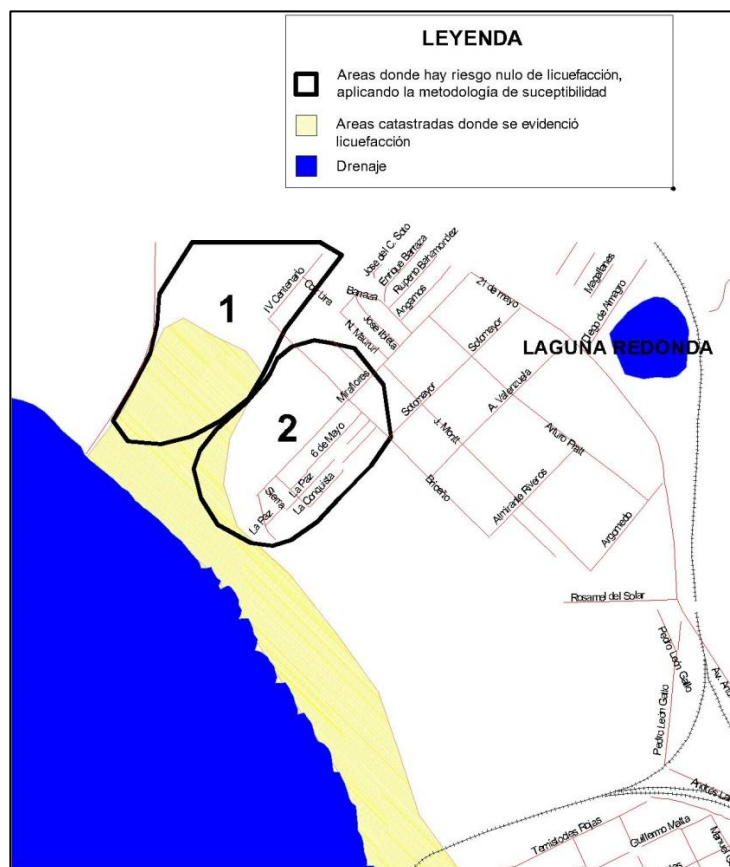
**Figura K4. Superposición entre las áreas licuables catastradas y las zonas donde no se registró licuefacción según la metodología de Seed & Idriss para el Sector Pedro Loteo Santa Josefina.**

h) Sector Parque Residencial Miraflores

En este sector, se evidenció licuefacción de las arenas generando: asentamientos, fracturamiento del pavimento y subsidencia del suelo. Todo ello debido a que los suelos donde se fundan las

viviendas corresponden a terrazas de arenas limosas del Río Bio-Bio, altamente saturadas por la proximidad del nivel freático a la superficie.

Al aplicar la metodología de Seed & Idriss a las zonas más cercanas a los catastros se calculó que el riesgo era nulo, ya que para la zona 1 y 2 de la Figura K5 los metros licuables fueron 0 m. Ello se debe principalmente ya q los valores de ensayo SPT son lo suficientemente altos para no presentar riesgo. Se puede apreciar que tanto la zona 1 como la zona 2 no presentaron riesgo donde realmente si ocurrió el fenómeno, ello puede deberse a que falta información detallada específicamente de las zonas de contacto más cercanas al Río Bio Bio, donde puede que el suelo se encuentre más suelto y por lo tanto los valores de SPT producirían un potencial de riesgo mayor.



**Figura K5. Superposición entre las áreas licuables catastradas y las zonas donde no se registró licuefacción según la metodología de Seed & Idriss para el Sector Parque Residencial Miraflores.**