



GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO  
SECRETARÍA REGIONAL MINISTERIAL DE VALPARAÍSO

# ESTUDIO DE RIESGO DE LA COMUNA DE SAN ANTONIO

## ETAPA 2. DIAGNÓSTICO FINAL Y MODELACIONES



OBSERVATORIO  
DE CIUDADES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y ESTUDIOS URBANOS  
DIRECCIÓN DE EXTENSIÓN DE SERVICIOS EXTERNOS –DESE  
OBSERVATORIO DE CIUDADES UC

Junio, 2011

## **EQUIPO PARTICIPANTE**

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos

DESE – Dirección de Extensión de Servicios Externos

### **Observatorio de Ciudades UC**

JEFE DE PROYECTO – Felipe Morales Rojas, Geógrafo, Magíster en Desarrollo Urbano.

COORDINADORA PROYECTO – Alma Torres Barahona, Geógrafa.

ENCARGADO SIG – Luis Meza Moya, Geógrafo, Magíster en Asentamientos Humanos y Medio Ambiente.

ENCARGADO NORMATIVA IPT – Rodrigo Rojas, Arquitecto.

AYUDANTE DE APOYO – Ítalo Abarca Vera, Geógrafo.

ENCARGADO RIESGO DE TSUNAMI – Rodrigo Cienfuegos Carrasco, experto en Ingeniería Hidráulica.

ENCARGADO RIESGO DE INUNDACIÓN – Jorge Gironás León, experto en Ingeniería Hidráulica.

Cristian Escauriaza Mesa, experto en Ingeniería Hidráulica.

ENCARGADO DE RIESGO DE REMOCIÓN EN MASA – Carlos Bonilla Meléndez, experto en Ingeniería Hidráulica.

ENCARGADO RIESGO SÍSMICO – Christian Ledezma Araya, experto en Ingeniería Geotécnica Sísmica, y en análisis y evaluación de riesgo de estructuras geotécnicas.

AYUDANTE DE APOYO – Maricarmen Guerra Paris, Ingeniera Civil Industrial.

## CONTENIDO

<b>CONTENIDO</b> .....	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>2 MARCO CONCEPTUAL. RIESGO: AMENAZA POR VULNERABILIDAD</b> .....	<b>5</b>
<b>3 MODELACIÓN DE TSUNAMI</b> .....	<b>6</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS.....	6
3.1.1 <i>Tsunami 16 de Agosto de 1906</i> .....	6
3.1.2 <i>Tsunami 27 de Febrero de 2010</i> .....	8
3.1.3 <i>Escenarios Probables</i> .....	8
3.2 METODOLOGÍA DE PROPAGACIÓN DE TSUNAMI .....	11
3.2.1 <i>Modelo Ruptura</i> .....	11
3.2.2 <i>Modelo Regional</i> .....	12
3.2.3 <i>Modelo de Inundación</i> .....	13
3.2.4 <i>Acoplamiento Modelo Regional con Modelo de Inundación</i> .....	15
3.2.5 <i>Dominios Considerados Para la Modelación</i> .....	15
3.2.6 <i>Información Topo-Batimétrica</i> .....	16
3.3 VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO CON EL TSUNAMI DEL 27 DE FEBRERO 2010 .....	21
3.3.1 <i>Validación Modelo Regional</i> .....	21
3.3.2 <i>Validación Modelo Inundación</i> .....	21
3.4 MAPAS DE INUNDACIÓN PARA LOS ESCENARIOS ANALIZADOS .....	24
3.4.1 <i>Tsunami de 1906</i> .....	24
3.4.2 <i>Tsunami del 27 de Febrero de 2010</i> .....	25
3.4.3 <i>Escenario de Sismo de 8.6 Mw</i> .....	31
3.4.4 <i>Escenario de Sismo 8.8 Mw</i> .....	41
3.5 AMENAZA DE TSUNAMI.....	51
<b>4 MODELACIÓN DE INUNDACIÓN POR CRECIDAS</b> .....	<b>53</b>
4.1 HIDROGRAFÍA COMUNA SAN ANTONIO .....	54
4.2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA .....	56
4.3 MODELACIÓN HIDRÁULICA .....	60
4.3.1 <i>Metodología</i> .....	60
4.4 RESULTADOS.....	66
4.4.1 <i>Validación de los Modelos Construidos</i> .....	66
4.4.2 <i>Caracterización de la Amenaza por Inundación</i> .....	70
4.4.3 <i>Efectos de la Posible Expansión Demográfica en la Amenaza por Inundación</i> .....	78
4.5 RECOMENDACIONES .....	84
<b>5 MODELACIÓN SÍSMICA</b> .....	<b>86</b>
5.1 PRE-CLASIFICACIÓN SÍSMICA APROXIMADA BASADA EN CORRELACIÓN CON SERIES DE SUELOS .....	89
<b>6 MODELACIÓN DE REMOCIÓN EN MASA ASOCIADA A PRECIPITACIONES</b> .....	<b>93</b>
6.1 METODOLOGÍA.....	93

6.1.1	<i>Caracterización de eventos históricos</i> .....	93
6.1.2	<i>Análisis de las precipitaciones, suelos y relieve de la comuna</i> .....	99
6.1.3	<i>Modelación de los factores desencadenadores y predisponentes</i> .....	100
6.2	RESULTADOS .....	101
6.2.1	<i>Eventos históricos</i> .....	101
6.2.2	<i>Precipitaciones, suelos y relieve de la comuna</i> .....	106
6.2.3	<i>Mapas de Amenaza</i> .....	107
<b>7</b>	<b>DIAGNÓSTICO FINAL</b> .....	<b>112</b>
7.1	VULNERABILIDAD .....	112
7.2	METODOLOGÍA DE VULNERABILIDAD .....	112
7.2.1	<i>Información necesaria para el análisis de vulnerabilidad</i> .....	115
7.3	ANÁLISIS DE VARIABLES DE VULNERABILIDAD.....	116
7.3.1	<i>Análisis de condiciones demográficas y económicas</i> .....	116
7.3.2	<i>Conectividad y Accesibilidad</i> .....	126
7.3.3	<i>Construcciones</i> .....	131
7.4	REDES DE INFRAESTRUCTURA, EQUIPAMIENTO Y SERVICIOS .....	134
7.4.1	<i>Infraestructura</i> .....	134
7.4.2	<i>Equipamiento</i> .....	135
7.4.3	<i>Servicios</i> .....	140
7.5	CARACTERÍSTICAS DE LOS CENTROS POBLADOS EN FUNCIÓN DEL IMPACTO DEL TERREMOTO DEL 27 DE FEBRERO DE 2010	143
<b>8</b>	<b>ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD</b> .....	<b>148</b>
8.1	MAPAS DE VULNERABILIDAD .....	148
8.1.1	<i>Población Vulnerable</i> .....	148
8.1.2	<i>Vulnerabilidad de las Construcciones</i> .....	148
8.1.3	<i>Vulnerabilidad del Equipamiento</i> .....	152
8.1.4	<i>Vulnerabilidad de la Infraestructura</i> .....	158
8.2	CONCLUSIONES.....	161
8.2.1	<i>Sectores Vulnerables</i> .....	161
8.2.2	<i>Conclusiones generales</i> .....	166
<b>9</b>	<b>MODELACIONES DE ÁREAS DE EVACUACIÓN PARA UN PLAN DE EVACUACIÓN</b> .....	<b>167</b>
9.1	METODOLOGÍA.....	167
9.2	INSUMOS .....	167
9.2.1	<i>FASE I: Construcción y actualización de la información de Ejes viales</i> .....	167
9.2.2	<i>FASE II: Definición de áreas de seguridad y tiempos de evacuación, a partir del peor escenario modelado para evento sísmico de magnitud Mw 8.8</i> .....	169
9.2.3	<i>FASE III: Definición de vías de evacuación en función del trazado urbano, topografía y zonas de seguridad</i> .....	170
9.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	170
9.3.1	<i>Memoria explicativa</i> .....	170
9.3.2	<i>Plan de Evacuación</i> .....	172

<b>10 ANÁLISIS NORMATIVA LOCAL (ESTADO DE AVANCE)</b> .....	<b>174</b>
10.1 REVISIÓN DEL TRATAMIENTO DE LAS MATERIAS RELACIONADAS CON RIESGOS EN LA LEY GENERAL DE URBANISMO Y CONSTRUCCIONES Y EN SU ORDENANZA GENERAL. ....	174
10.1.1 <i>Conclusiones sobre análisis de la Ley</i> .....	174
10.1.2 <i>Instrumentos de Planificación</i> .....	176
10.2 ALCANCES SOBRE EL CONTENIDO DEL PLAN INTERCOMUNAL .....	176
10.3 ALCANCES AL CONTENIDO DEL PLAN REGULADOR COMUNAL DE SAN ANTONIO. ....	190
<b>11 BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>195</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

El presente informe corresponde a la entrega número dos del estudio de Riesgo de la comuna de San Antonio, que se enmarca en el proceso de apoyo a los planes reguladores comunales que se encuentra realizando el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, a través de la Secretaria Regional de Valparaíso.

Este estudio surge en virtud de la necesidad de la autoridad de apoyar los instrumentos de planificación existentes y en formulación.

El objetivo del informe, presentar las **Modelaciones de Amenazas** naturales (Tsunami, Inundación fluvial, Remoción en masa, Licuefacción y Amplitud sísmica)<sup>1</sup> y el **Diagnóstico final** de la vulnerabilidad del territorio y de la peligrosidad de los eventos naturales. Los resultados obtenidos del primer ítem, serán, consecuentemente, los insumos para del segundo.

El diagnóstico final de la comuna de San Antonio dará cuenta del panorama pre y post terremoto del 27 de febrero de 2010. Dentro de las variables estudiadas se encuentran las condiciones demográficas y económicas, conectividad y accesibilidad, estado de las construcciones, redes de infraestructura, equipamiento y servicios, y las características de los centros poblados en función del impacto de este terremoto.

Complementariamente se presenta un estado de avance de la revisión de la normativa vigente con el detalle de observaciones para la sugerencia de actualización de ciertos ítems que se abordarán en la entrega final de este estudio.

Finalmente, se presentan planos de evacuación en función de la modelación de distintos escenarios de eventos sísmicos con consecuencias de tsunami.

---

<sup>1</sup> Los tipos de riesgos abordados en este informe son aquellos que están previstos en las bases técnicas del contrato del presente estudio.

## 2 MARCO CONCEPTUAL. RIESGO: AMENAZA POR VULNERABILIDAD

Desde el punto de vista conceptual, riesgo es definido generalmente como la probabilidad de algo, cuya ocurrencia acarrea consecuencias, en términos de pérdidas posibles relativas a cierta causa, lugar y momento en particular.

La O.N.U. (Ayala-Carcedo, 1993) define el riesgo como el producto de la probabilidad de ocurrencia de una amenaza o peligro natural (peligrosidad), por la vulnerabilidad y la exposición. En este caso, la amenaza es entendida como un fenómeno eminentemente natural, externo a una comunidad expuesta, que al manifestarse superando los umbrales más frecuentes de intensidad, magnitud y localización, puede ocasionar daños tanto a las personas como a sus bienes.

La vulnerabilidad puede entenderse como el factor interno de una comunidad, resultado de la capacidad intrínseca de responder frente a la amenaza. Por lo tanto, su evaluación se hace fundamental para el conocimiento del riesgo que mantiene frente a las condiciones de peligrosidad del medio. El factor de exposición entonces, alude a la población media en número de habitantes o de bienes por unidad de superficie, situados al interior de una zona de peligro.

En este estudio se utilizará el concepto de vulnerabilidad como la susceptibilidad de un sistema determinado a ser impactado negativamente por una amenaza de origen natural. Dicha susceptibilidad es determinada por los factores propios del sistema. Al mismo tiempo, se usará el concepto de Resiliencia como la habilidad de ese sistema determinado para contener los efectos de tales amenazas, y su capacidad de responder y reconstruirse frente a estas situaciones extremas.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> "Estudio de riesgo de sismos y maremotos para comunas costeras de las regiones del General Libertador Bernardo O'Higgins y Maule" elaborado por la Pontificia Universidad Católica de Chile con financiamiento SUBDERE 2010.

### **3 MODELACIÓN DE TSUNAMI**

En esta sección se presentan los resultados de la modelación de tsunamis para la comuna de San Antonio, de modo de caracterizar la amenaza existente frente a este tipo de fenómenos naturales. De acuerdo con la metodología propuesta, se han planteado cuatro escenarios de maremoto, de los cuales dos corresponden a casos históricos y dos a casos de ocurrencia probable en el futuro para la zona centro-norte del país.

Los casos históricos han sido estudiados a partir de los antecedentes disponibles en la literatura, en publicaciones científicas y documentos técnicos. El primer caso histórico corresponde al maremoto ocurrido en agosto de 1906, el cual fue provocado por un sismo con epicentro frente a la costa de Valparaíso, cuya magnitud se estima entre los 8.2 y 8.3 grados en escala de Richter (SHOA. N.D; NGDC, 2011). El segundo caso histórico de estudio corresponde al tsunami provocado por el terremoto del 27 de febrero de 2010 con epicentro frente a la costa de Cobquecura y 8.8 Mw en la escala de magnitud de momentos (USGS, 2010).

La amenaza existente frente a escenarios futuros de tsunami ha sido cuantificada mediante la modelación numérica de dos tsunamis generados por dos terremotos de magnitudes 8.6 Mw y 8.8 Mw respectivamente. Ambos sismos esperados abarcan una zona de ruptura desde Santo Domingo hacia el norte, hasta La Serena, pero con diferentes desplazamientos verticales, similar a la del terremoto de 1730, el cual es probablemente el mayor registrado en la zona centro-norte del país en los últimos 500 años (Kausel, 1986). La definición de estos escenarios se basó en un estudio realizado por la consultora de Ingeniería de Costas PRDW-AV "Estudio de la Propagación Regional de Tsunamis basados en el Evento de 1730" (PRDW-AV, 2011). En este contexto la modelación numérica de los escenarios permitirá obtener una buena predicción de la dinámica del flujo y sus variables principales, como alturas y velocidades, y el área de inundación de cada evento, facilitando la definición de zonas de riesgo y de planes de mitigación y evacuación.

A continuación se realiza una descripción de los escenarios estudiados, luego la metodología utilizada y finalmente los resultados y su discusión.

#### **3.1 Descripción de Escenarios**

##### **3.1.1 Tsunami 16 de Agosto de 1906**

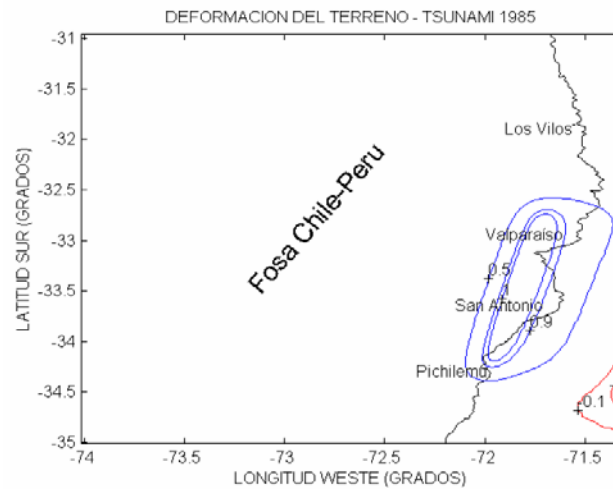
Los efectos provocados por este tsunami en San Antonio han sido estudiados por el SHOA (SHOA, 2000a). La línea de inundación alcanzada por este tsunami ha sido estimada a partir de la modelación numérica del evento, cuyos detalles se encuentran en la publicación del SHOA "Carta de Inundación por Tsunami para Puerto San Antonio y Rada el Algarrobo, Chile. Documento Explicativo", (SHOA, 2000a).



La deformación inicial del terreno que generó el tsunami se determinó mediante el modelo de Mansinha y Smylie (1971) utilizando los parámetros de falla mostrados en la Tabla 1. La zona de ruptura utilizada abarca desde Pichilemu por el sur hasta Zapallar por el norte, como se muestra en la Figura 1.

Parámetro	Tsunami 1906
Longitud de ruptura	330 km
Ancho de ruptura	130 km
Rumbo del plano de falla	10º N
Ángulo de buzamiento	18º
Desplazamiento de la dislocación	4,6 m
Ángulo de desplazamiento	90º
Profundidad	15 km

**Tabla 1: Parámetros ruptura terremoto 1906 utilizados por el SHOA.**  
Fuente: SHOA (2000a)



**Figura 1: Deformación del terreno utilizada por el SHOA en la modelación del tsunami de 1906.**  
Fuente: SHOA (2000a).

La simulación numérica se realizó con el modelo TUNAMI-N1 y TUNAMI-N2 (Shuto, 1995) utilizando cuatro mallas anidadas de diferente resolución, siendo la más fina de 3" de arco de resolución (aproximadamente 90 m) la cual contiene el área de interés de San Antonio en la que se obtuvo el plano de inundación (SHOA, 2000a). La topografía utilizada para este estudio fue extraída de una restitución aerofotogramétrica de las áreas de interés del puerto San Antonio y curvas de nivel cada 5 metros desde el nivel medio del mar (SHOA, 2000a). La batimetría costera se extrajo de información del SHOA disponible en sus cartas náuticas y batimetrías obtenidas por

empresas. En esta modelación no se consideró la desembocadura del río Maipo ni detalles de las obras asociadas al Puerto de San Antonio.

### 3.1.2 Tsunami 27 de Febrero de 2010

La inundación alcanzada por el tsunami del 27 de febrero de 2010 en San Antonio puede ser estimada en base a los antecedentes bibliográficos recopilados. Esta información también podrá ser utilizada para validar la modelación numérica de la inundación y posteriormente complementada con resultados numéricos.

El área afectada por este tsunami en San Antonio abarca principalmente el sector ubicado en la playa de Lolloe conocido como “Ojos de Mar de Lolloe”. La población ubicada en la ribera de la laguna norte fue protegida por el terraplén del camino de acceso al puerto, mientras que la población ubicada en la ribera de la laguna sur resultó totalmente destruida por el tsunami, debido a que sólo estaba protegida por un pequeño cordón de dunas de menor altura que el terraplén de la parte norte (IMSA, 2010; SERNAGEOMIN, 2010). El agua penetró también por Av. La Playa, la cual conecta el sector con la parte centro de Lolloe, aproximadamente hasta 450 m desde la línea de máxima marea (Winckler & Contreras, 2010; Lazcano et al., 2010, Fritz et al., 2011). Los antecedentes indican que la ola también ingresó por el cauce del río Maipo hacia aguas arriba alcanzando el puente Lo Gallardo. Por otra parte, el estudio presentado en Fritz et al. (2011), presenta mediciones de terreno realizadas en marzo de 2010, las cuales indican *runups*<sup>3</sup> de entre 2 y 4 metros en la zona de estudio, consistentes con los 3 metros de cota de inundación reportados por Winckler & Contreras (2010). En cuanto a tiempos de arribo, los antecedentes indican que la primera ola de importancia arribó aproximadamente una hora después de ocurrido el sismo, pero que los mayores daños fueron provocados por las olas siguientes (IMSA, 2010; Winckler & Contreras, 2010).

### 3.1.3 Escenarios Probables

Los escenarios estudiado corresponden a los definidos en el estudio de PRDW-AV (PRDW-AV, 2011). En éste, para establecer las características del próximo gran sismo de magnitud que pueda afectar a San Antonio se revisaron los antecedentes bibliográficos sobre los sismos históricos ocurridos en la zona central de Chile. La información sobre grandes sismos registrados en la región (SHOA, 1995; Comte et al., 1986; Kelleher, 1972; Nishenko, 1985) se presenta en forma de diagrama en la Figura 2, donde se indica la extensión geográfica y el año de ocurrencia de los sismos históricos.

Se observa que el último gran sismo de carácter tsunamigénico ocurrido en la zona central corresponde al terremoto de 1906, de una magnitud estimada entre 8.5 y 8.6 Mw, y que causó daños en Valparaíso. Tanto éste como el terremoto del 27 de febrero de 2010 presentaron largos de ruptura de aprox. 500km en la dirección norte-sur (PRDW-AV, 2011). Adicionalmente, los

---

<sup>3</sup> Runup : cota de inundación máxima

registros indican una baja actividad sísmica reciente entre las regiones de Valparaíso y Coquimbo, lo que indicaría la presencia de una eventual “laguna sísmica” en la zona central de Chile (PRDW-AV, 2011).

Sobre la base de estos antecedentes, se propuso un sismo de diseño que considera una ubicación correspondiente a la zona donde se espera un gran terremoto en los próximos 100 años, aproximadamente entre San Antonio y La Serena. Adicionalmente, se considera un segundo caso que consiste en una sensibilización sobre la magnitud del deslizamiento de la falla para obtener un sismo de mayor magnitud (PRDW-AV, 2011). Los parámetros de falla de ambos sismos de diseño se detallan a continuación.

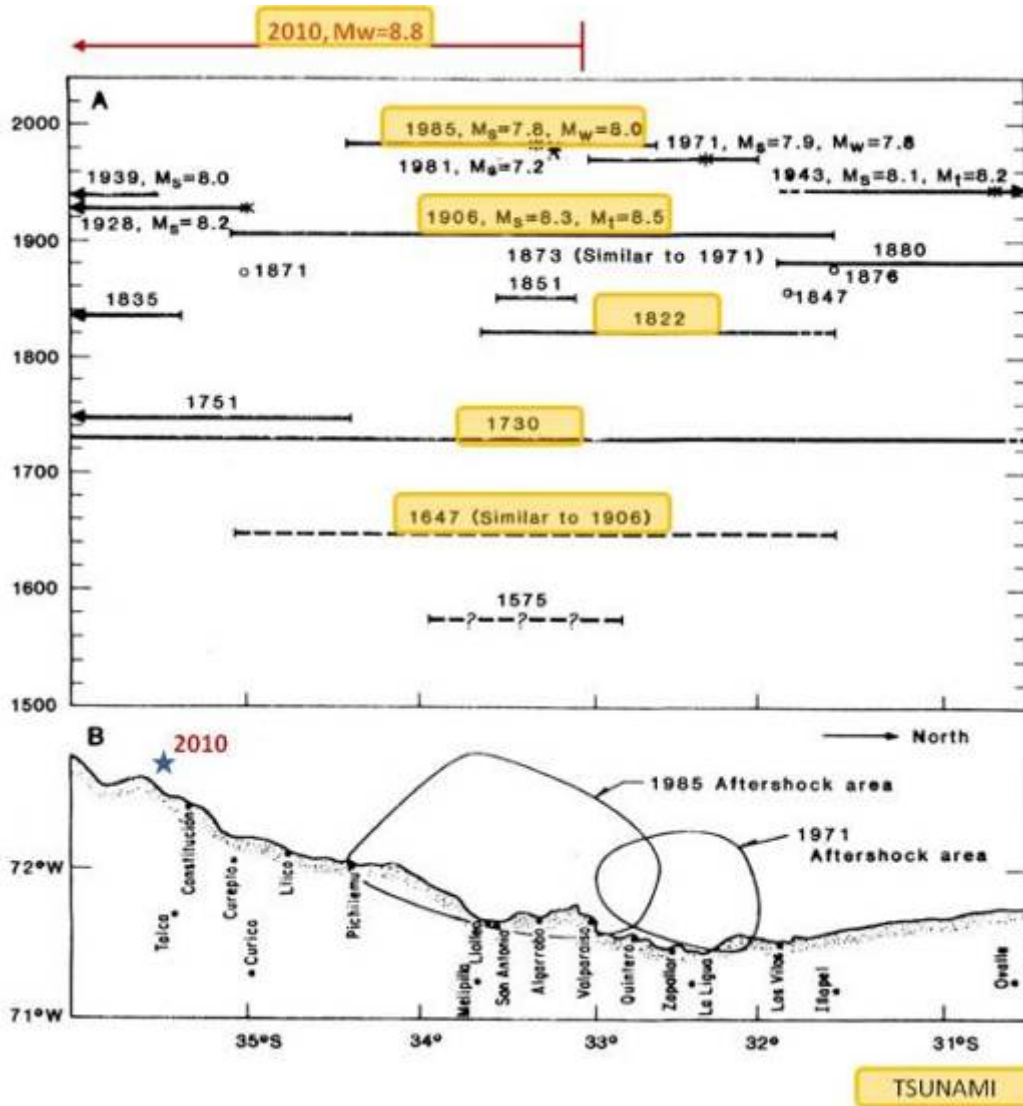


Figura 2: Diagrama espacio-temporal terremotos ocurridos en Chile central.  
Fuente: Comte et al. (1986).

### 3.1.3.1 *Parámetros de Falla*

El plano de falla considerado para ambos escenarios se extiende por 500km, desde el sur de San Antonio hasta el norte de La Serena, siguiendo la orientación de la fosa Perú-Chile que en la zona central tiene un rumbo aproximado de 10°N (PRDW-AV, 2011).

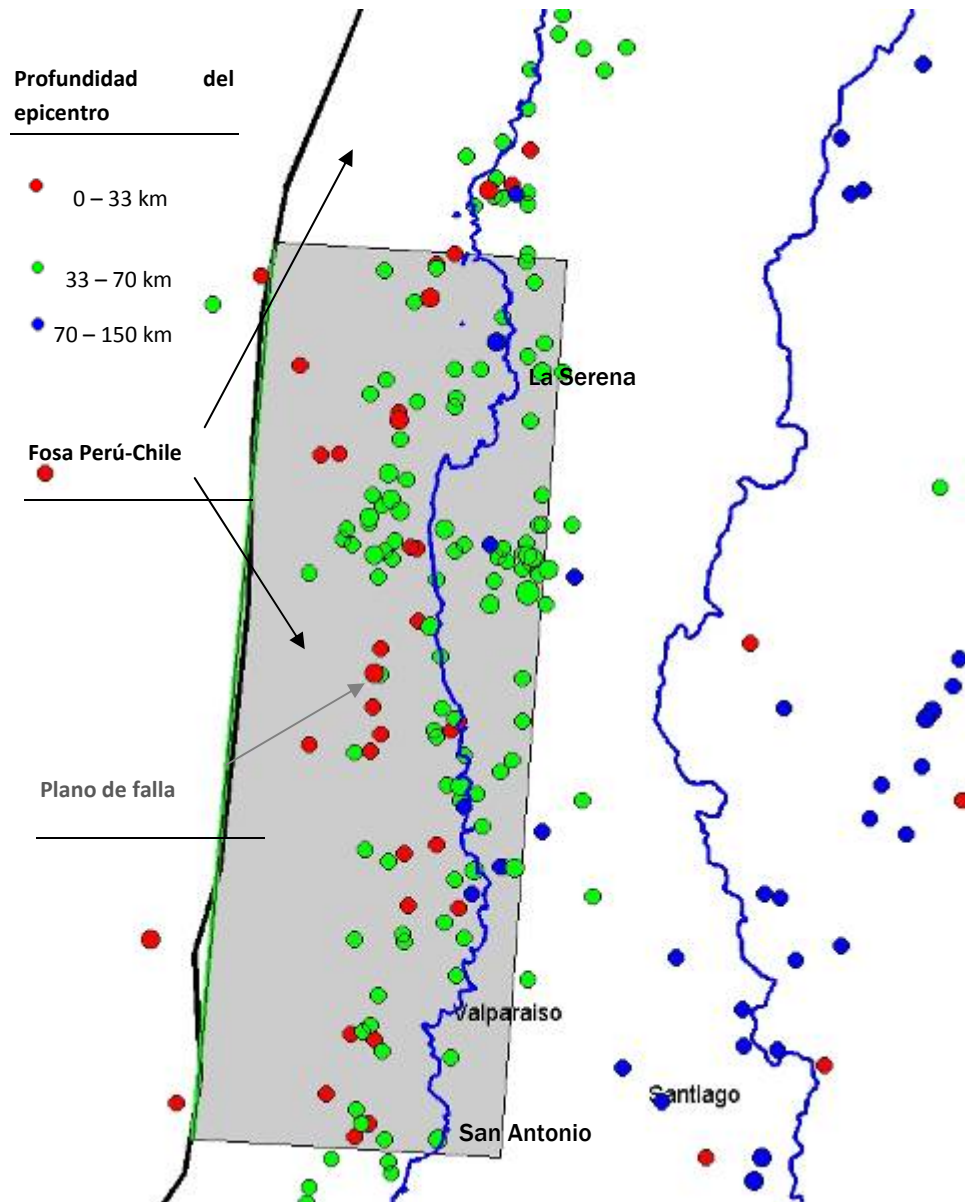


Figura 3: Registro de sismos históricos en la zona central de Chile.  
Fuente: PRDW-AV (2011).

En Figura 3 se muestra el plano de falla propuesto junto con la estadística de los epicentros registrados en la zona, segmentados por profundidad. Su ubicación y profundidad siguen la tendencia de la inclinación del plano entre placas, que en esta zona presenta un ángulo de buzamiento promedio de 18° (PRDW-AV, 2011). Cabe mencionar que la posición del plano de falla

propuesto, adyacente a la fosa, es la más desfavorable desde el punto de vista de la generación de un tsunami, ya que es la ubicación menos profunda posible y la que produce la mayor deformación de la corteza y de la superficie libre del mar (PRDW-AV, 2011). El ancho del plano de falla, de 150km, fue escogido sobre la base de la estadística disponible de la ubicación de los epicentros y en comparación con otros sismos de descritos en Delouis et al. (2010) y en Lay et al. (2010).

Para ambos sismos probables se propone utilizar el mismo plano de falla, siendo la magnitud del desplazamiento entre placas la única diferencia, lo que incide en distintas magnitudes del sismo. En el primer caso, la dislocación es similar a la estimada para el sismo de 1906, generando una magnitud de momento sísmico 8.6 Mw. En el segundo caso, se propone una dislocación tal que la intensidad de energía sea similar a la del sismo ocurrido el 27 de febrero de 2010 en la zona centro-sur de Chile, con una magnitud de momento sísmico de 8.8 Mw (PRDW-AV, 2011). En la siguiente tabla se resumen los parámetros para ambos escenarios estudiados.

Parámetro	Valores	
	Escenario 1	Escenario 2
Magnitud de Momento Sísmico Mw	8.6	8.8
Longitud de ruptura	500 km	500 km
Ancho de ruptura	150 km	150 km
Rumbo del plano de falla	10° N	10° N
Ángulo de buzamiento	18°	18°
Desplazamiento de la dislocación	5,0 m	10,0 m

**Tabla 2: Parámetros de falla sismo de diseño.**  
Fuente: PRDW-AV (2011).

### 3.2 Metodología de Propagación de Tsunami

La modelación numérica de escenarios se llevó a cabo en tres etapas. La primera corresponde a la modelación del mecanismo de ruptura que genera el tsunami, luego se procede con la modelación regional de la propagación del tsunami hacia la costa de Chile, y finalmente se realiza la modelación de inundación en la costa de la zona de estudio. En esta última etapa, de mayor detalle, es posible determinar los efectos locales de los tsunamis modelados. Para las dos primeras etapas se utilizaron los resultados modelados por el estudio de la consultora de Ingeniería de Costas PRDW-AV y reportados en el documento “Estudio de la Propagación Regional de Tsunamis basados en el Evento de 1730”. A continuación se resumen las metodologías utilizadas en cada etapa.

#### 3.2.1 Modelo Ruptura

El campo de deformación de la corteza  $u_i (x_1, x_2, x_3)$  se calculó usando la formulación analítica cerrada de Okada (Ec. 1) (Okada, 1985), como una función de la dislocación  $\Delta u_j (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  sobre una

superficie  $\Sigma$  de un medio isotrópico, como la corteza terrestre, donde  $\lambda$  y  $\mu$  corresponden a las constantes de elasticidad del medio y  $F$  a la fuerza equivalente aplicada en el punto  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ .

$$u_i = \frac{1}{F} \int \int_{\Sigma} \Delta u_j \left[ \lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left( \frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) v_k \right] d\Sigma$$

Ec. 1: Fórmula de Okada.  
Fuente: Okada (1985)

El modelo de ruptura de Okada (1985) recibe como entrada los parámetros de falla descritos en la sección 3.1.3.1.

### 3.2.2 Modelo Regional

Para la propagación regional del tsunami se utilizó el modelo hidrodinámico SWAN, desarrollado por Mader (2004). SWAN ha sido ampliamente utilizado para modelar tsunamis por variados profesionales y académicos incluyendo artículos científicos que han buscado explicar el arribo tardío de las ondas de tsunami del evento del 27 de febrero de 2010 (Carrión et al., 2010; Cienfuegos et al., 2011).

El modelo utiliza coordenadas geográficas para resolver las ecuaciones no lineales de aguas someras promediadas en la vertical (2DH), considerando los efectos de aceleraciones de Coriolis y de fricción de fondo (PRDW-AV, 2011). Las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento utilizadas están dadas por Ec. 2 y Ec. 3 respectivamente, donde  $\eta$  corresponde a la desnivelación instantánea de la superficie libre,  $h$  a la profundidad instantánea de la columna de agua,  $u$  y  $v$  a los componentes ortogonales de la velocidad promediada en la vertical y  $g$  a la aceleración de gravedad (PRDW-AV, 2011).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(\lambda u)}{\partial x} + \frac{\partial(\lambda v)}{\partial y} = 0$$

Ec. 2: Conservación de masa modelo SWAN.  
Fuente: Mader, 2004.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = f v + W(x) - g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = -f u + W(y) - g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h}$$

Ec. 3: Conservación de la cantidad de movimiento SWAN.  
Fuente: Mader, 2004.

El efecto de Coriolis se incluye a través del coeficiente  $f$ , dependiente de la posición geográfica. Los términos  $W(x)$  y  $W(y)$  representan funciones de forzamiento debidas a esfuerzos por vientos o presiones, que en este caso no se incluyen. La fricción de fondo se considera proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo, caracterizada por el parámetro de Chezy,  $C$  (PRDW-AV, 2011).

### 3.2.3 Modelo de Inundación

Los resultados obtenidos de la modelación regional son utilizados luego para alimentar al modelo de inundación, con el cual es posible obtener el área inundada, la cota de inundación o *runup*, y las alturas y velocidades máximas en la zona de estudio.

El estudio de inundación se llevó a cabo utilizando el modelo SURF\_UC (Guerra et al., 2010; Guerra, 2010), el cual ha sido diseñado especialmente para representar flujos naturales extremos, como inundaciones, crecidas violentas u ondas de tsunamis. Estos flujos usualmente ocurren sobre topografías variables y rugosas, y se caracterizan por cambios rápidos y bruscos en la velocidad y la profundidad, que incluso pueden llevar al rompimiento (ondas de shock) y producir complejas interacciones en las interfaces seco-mojadas.

El modelo numérico resuelve las ecuaciones de Saint-Venant (Saint-Venant, 1871) en un sistema de coordenadas curvilíneas no ortogonales y ajustadas al borde del dominio (Ec. 4) utilizando un esquema balanceado de resolución (Marche et al., 2007), el cual es capaz de predecir la dinámica de estos flujos extremos de manera eficiente y precisa. Las ecuaciones de Saint-Venant (SV) han sido ampliamente utilizadas para describir escurrimientos en condición de aguas someras, como ríos, lagos y estuarios. Las ecuaciones describen la dinámica de escurrimientos abiertos de fluidos homogéneos, incompresibles y no viscosos, en términos de la profundidad del agua y la velocidad promediada en la vertical en ambas direcciones cartesianas, asumiendo una distribución hidrostática de presiones en la columna de agua. Las ecuaciones de SV bidimensionales escritas en un sistema de coordenadas curvilíneo, incluyendo términos fuente asociados a topografía y fricción, se escriben como:

$$Q_t + J \cdot F_\xi + J \cdot G_\eta = S$$

**Ec. 4: Ecuaciones de Saint-Venant escritas en coordenadas curvilíneas.**  
**Fuente: Guerra et al. (2010).**

Dónde  $t$  representa tiempo,  $\xi$  y  $\eta$  las coordenadas del sistema de coordenadas curvilíneas,  $Q$  es el vector de variables hidrodinámicas,  $F$  y  $G$  son los vectores de flujo en cada dirección y  $S$  es el vector de términos fuente. Estos términos, expresados en variables adimensionales, están dados por:

$$Q = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}, S = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{h}{Fr^2}(z_\xi \xi_x + z_\eta \eta_x) - S_{fx} \\ -\frac{h}{Fr^2}(z_\xi \xi_y + z_\eta \eta_y) - S_{fy} \end{pmatrix},$$

$$F = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} hU^1 \\ uhU^1 + \frac{1}{2Fr^2}h^2\xi_x \\ vhU^1 + \frac{1}{2Fr^2}h^2\xi_y \end{pmatrix}, G = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} hU^2 \\ uhU^2 + \frac{1}{2Fr^2}h^2\eta_x \\ vhU^2 + \frac{1}{2Fr^2}h^2\eta_y \end{pmatrix}$$

**Ec. 5: Vector de variables (Q), vectores de flujo (F y G) y vector de términos fuente (S) modelo SURF\_UC.  
Fuente: Guerra et al. (2010).**

Dónde  $z_\xi$  y  $z_\eta$  definen la pendiente de fondo,  $S_f$  la fricción,  $Fr$  corresponde al número de Froude definido por las escalas dimensionales vertical y de velocidad,  $H$  y  $U$  respectivamente, y la aceleración de gravedad,  $g$ , como  $Fr=U/gH$ .  $J$  corresponde al jacobiano de la transformación,  $\xi_x$ ,  $\xi_y$ ,  $\eta_x$  y  $\eta_y$  se definen como las métricas asociados al cambio de coordenadas, y  $U^1$  y  $U^2$ , como las velocidades contra variantes derivadas del cambio de coordenadas, las que se escriben como  $U_j = u\varepsilon_x + v\varepsilon_y$ ,  $j=(1,2)$ ,  $\varepsilon=(\xi,\eta)$ .

Las ecuaciones son resueltas mediante un esquema de volúmenes finitos con capacidad de captura de shocks el cual incorpora los efectos de la fricción de fondo y los cambios de pendiente. La resolución numérica se basa en el esquema balanceado de resolución propuesto en Marche et al. (2007), en el que se combina el solver de Riemann aproximado VFRoe-ncv (Galloüet et al, 2003) y el esquema de reconstrucción hidrostática propuesto por Audusse et al. (2004). Además el término de fricción es incorporado utilizando el método propuesto por Liang & Marche (2009).

El modelo ha sido validado antes variados casos de referencia presentes en la literatura, además de experiencias de laboratorio relacionadas con la propagación de una onda generada por el rompimiento de una presa sobre un modelo físico a escala de un río. Los resultados obtenidos han demostrado que el modelo es capaz de representar correctamente el flujo sobre topografías altamente variables y rugosas, y de predecir los procesos de secado y mojado (Guerra, 2010; Marche et al., 2007). Una descripción más detallada del modelo y su validación se presenta en el Anexo 1.



### **3.2.4 Acoplamiento Modelo Regional con Modelo de Inundación**

Para ingresar la señal del tsunami calculada por el modelo regional en el dominio local, se interpolaron las variaciones de la superficie libre y los caudales unitarios en cada dirección cartesiana resultantes de la modelación regional en cada uno de los puntos del borde del dominio usando la función *griddata* de Matlab®. Luego, utilizando una condición de borde del tipo Generación/Absorción (Cienfuegos et al., 2007; Mignot & Cienfuegos, 2009; Sanders, 2002), se ingresan las ondas al dominio en cada instante de tiempo.

### **3.2.5 Dominios Considerados Para la Modelación**

#### **3.2.5.1 Dominio Modelo Regional**

La modelación regional considera un dominio de extensión en la dirección Norte–Sur de 30°, y de 25° en la dirección Este–Oeste, abarcando la costa de Chile desde Iquique hasta Chaitén, aproximadamente. Esta gran extensión permite incorporar los efectos de las posibles reflexiones en torno a Chile Insular en el Pacífico y evitar que reflexiones numéricas espurias producidas en los bordes de la grilla contaminen los resultados en las zonas de interés (PRDW-AV, 2011). Además aseguran el considerar fenómenos locales de ondas atrapadas como los observados en el evento del 27 de febrero de 2010 (Carrión et al., 2010).

#### **3.2.5.2 Dominio Modelo de Inundación**

La propagación local del tsunami se realizó sobre un dominio de 7 km en la dirección norte por 5,5 km en la dirección este. El dominio abarca desde la costa de Santo Domingo por el sur hasta Punta Panul por el norte, y desde una profundidad promedio de 50 m por el oeste hasta aproximadamente la cota 100 m.s.n.m por el este. El dominio de estudio se muestra en la Figura 4.



Figura 4: Dominio de estudio modelación local Tsunami en San Antonio.  
Modificado a partir de Google Earth®.

### 3.2.6 Información Topo-Batimétrica

#### 3.2.6.1 Modelo Regional

La información batimétrica utilizada para la modelación regional proviene de 3 fuentes principales (PRDW-AV, 2011): i) Base de datos GEBCO, ii) Cartas Náuticas del SHOA, y iii) Datos de archivos de PRDW-AV.

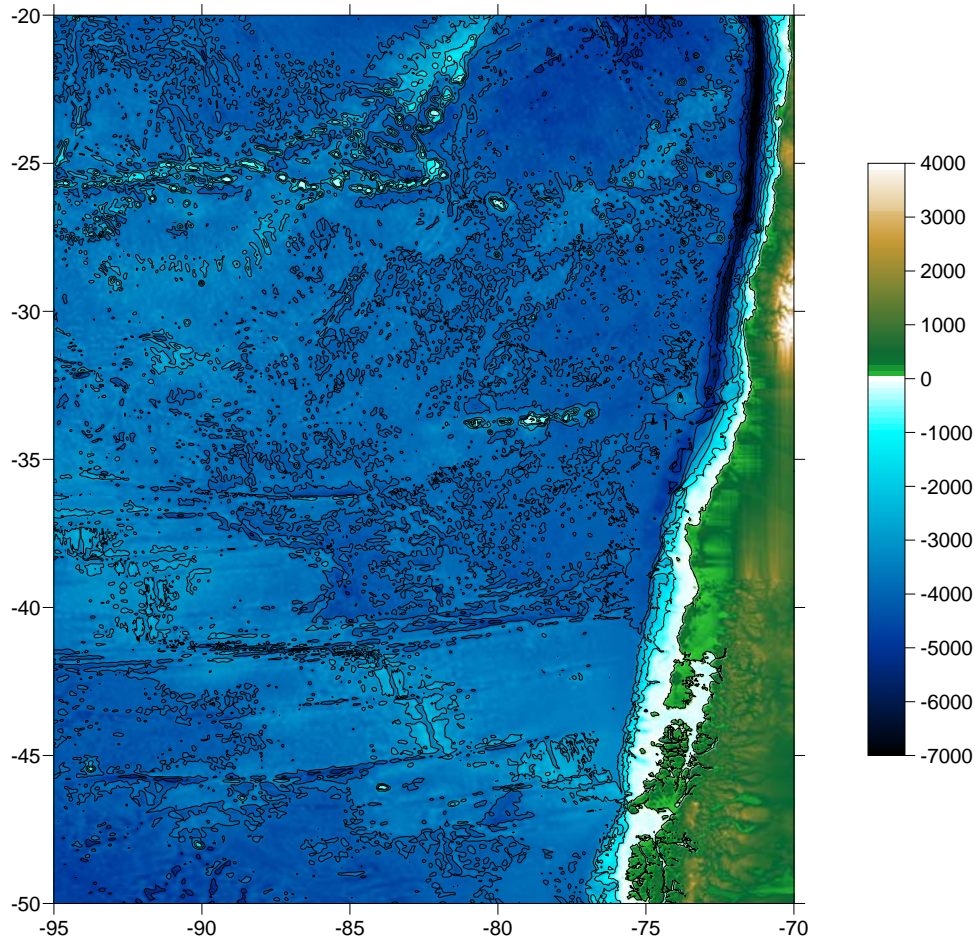
La base de datos GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*), se utilizó para determinar la batimetría mar adentro, donde la profundidad media es cercana a 4000 m. La información

procesada tiene una resolución de 30 segundos de arco y se encuentra contenida en la “Grilla GEBCO\_08, versión 20091120”, disponible en <http://www.gebco.net> (PRDW-AV, 2011).

En la zona comprendida entre la fosa de Perú-Chile y la costa, y las bahías de Coquimbo y Corral se utilizó la información de sondas y veriles hasta 7.000m de profundidad contenida en las cartas náuticas del SHOA número 4000, 5000 y 6000, que tienen una escala de 1:500.000. Para las principales zonas de interés se utilizaron cartas náuticas de mayor resolución: carta número 4320, 4321 y 5111 (Puertos de Quintero y Valparaíso), cartas número 5114 y 5115 (Puerto de San Antonio).

La topografía se obtuvo de la base de datos del proyecto de altimetría satelital mundial *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), liderado por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de NASA, desarrollado y distribuido en conjunto con EROS Data Center del USGS. Los datos corresponden a la segunda revisión de las mediciones satelitales originales realizadas en 2000, y tienen una resolución de 3” de arco (aproximadamente 90m en el área de Sudamérica), por lo que se encuentran entre los datos más precisos y detallados disponibles sin necesidad de realizar mediciones en terreno (PRDW-AV, 2011).

La modelación regional de tsunamis fue realizada considerando toda la información topobatemétrica recopilada, usando una grilla regular de 0,025° de resolución, lo que equivale a 90 segundos de arco o aproximadamente 2,8km (PRDW-AV, 2011; Carrión et al., 2010). En la Figura 5 se presenta el modelo de elevación de terreno utilizado para la modelación regional.



**Figura 5: Modelo de elevación de terreno utilizado por PRDW-AV para la modelación regional de tsunamis.**  
Fuente: PRDW-AV (2011).

### **3.2.6.2 Modelo de Inundación**

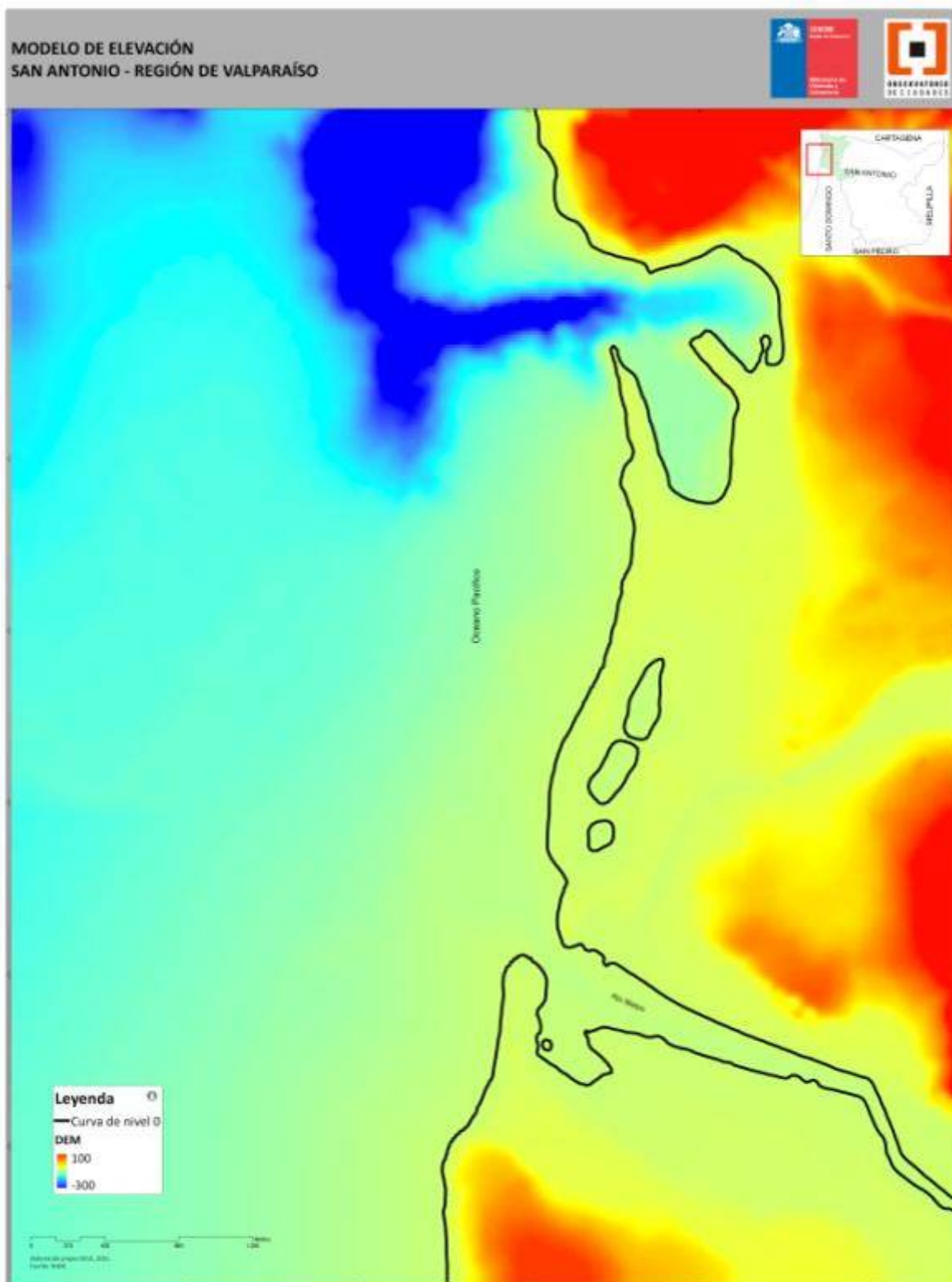
El modelo de elevación de terreno para la estimación de la inundación se construyó a partir de datos topográficos y batimétricos de diversas fuentes de información disponibles además de mediciones realizadas en terreno especialmente para este estudio, las cuales se describen en el Anexo 2.

La topografía de la zona costera de San Antonio se elaboró a partir de curvas de nivel cada 2m del Plano Regulador Comunal (PRC) de San Antonio y mediciones de terreno realizadas en la playa de Lolloe (ver Anexo 2). En la zona de Santo Domingo se utilizaron curvas de nivel cada 10 m proporcionadas por CIREN.

Para la definición de las batimetrías se consultaron las cartas náuticas del SHOA número 5000 (Bahía de Valparaíso hasta Golfo de Arauco), 5114 (Aproximación Puerto San Antonio) y 5115 (Puerto San Antonio), batimetría adicional proporcionada por el mandante, y datos batimétricos disponibles en la base de datos de GEBCO.

La batimetría del río Maipo se generó a partir de datos disponibles en el Plan Maestro de Aguas Lluvias de la comuna (DOH, 2003), incluyéndose en esta modelación la misma batimetría utilizada en la modelación de crecidas fluviales. De la misma manera se incorporó la batimetría del Estero El Sauce, la cual fue construida mediante datos disponibles en el Plan Maestro de Aguas Lluvias y datos tomados en las campañas de terreno (ver Anexo 2).

Toda la información disponible se integró en ArcGis 9.3, obteniéndose el modelo de elevación de terreno mostrado en la Figura 6. Para la modelación numérica, el dominio fue discretizado en celdas uniformes de tamaño 20 m x 20 m, resultando en una malla de alta resolución de 276 x 351 nodos, lo que permite observar los detalles del borde costero de San Antonio. Es importante destacar que este nivel de resolución permite incorporar en la modelación detalles acerca de terraplenes, muros, además de las obras que forman el Puerto de San Antonio.

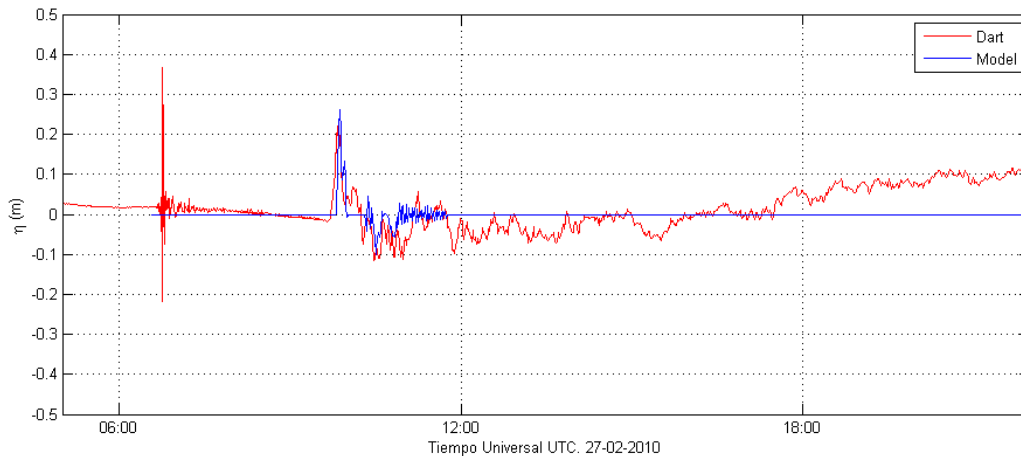


**Figura 6: Modelo de elevación de terreno para la modelación de inundación por tsunami.**  
Fuente: Elaboración propia con datos IMSA, CIREN, SHOA y GEBCO.

### 3.3 Validación del Modelo Numérico con el Tsunami del 27 de Febrero 2010

#### 3.3.1 Validación Modelo Regional

El modelo regional fue validado comparando sus resultados con información disponible para el tsunami del 27 de febrero de 2010 (Carrión et al., 2010; Cienfuegos et al., 2011; PRDW-AV, 2011). Para los resultados de campo lejano se utilizó el registro de la boya DART<sup>4</sup> ubicada frente a Perú, mientras que para campo cercano se utilizaron los registros mareográficos de Talcahuano y Valparaíso, además de diversa información recolectada acerca de los tiempos de arribo para distintas localidades de la costa (Catalán et al., 2010).



**Figura 7: Comparación del modelo regional tsunami 27F con registro boya DART© en Perú.  
Fuente: PRDW-AV (2011).**

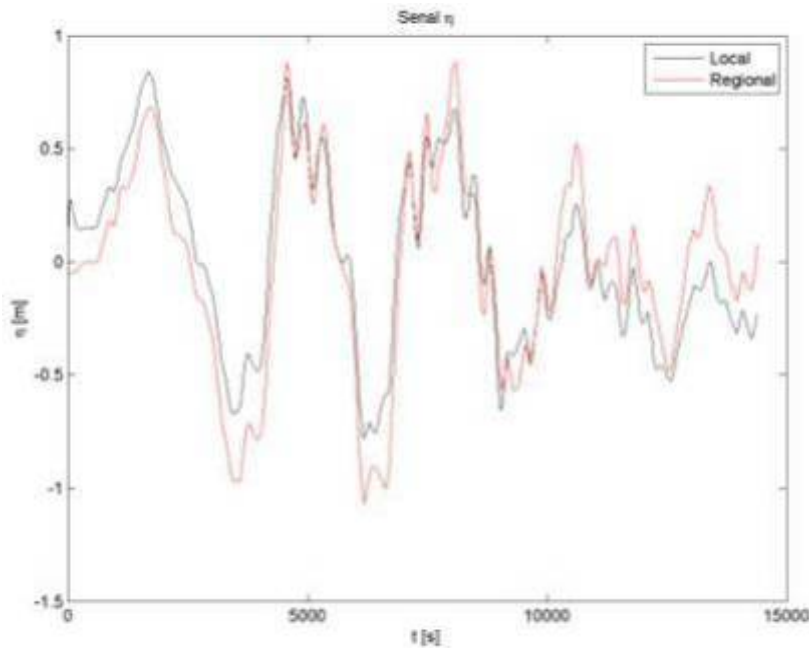
En la Figura 7 se presenta el registro de la boya DART©, corregido por la marea astronómica, indicado por la línea roja, en donde se aprecia el registro del sismo a las 6:34 UTC (hora universal) y el arribo del frente de olas de poco más de 30 cm de amplitud, cerca de las 10:00 UTC. Se aprecia que el modelo reproduce correctamente tanto la amplitud como el tiempo de arribo a este punto, que se encuentra a más de 2500 km de la zona de generación del tsunami (PRDW-AV, 2011). Las oscilaciones posteriores, de muy pequeña amplitud, no son reproducidas por el modelo debido en gran medida a su esquema explícito que lo vuelve muy disipativo sobre largas distancias, por lo que se considera que el modelo SWAN es poco apropiado para modelar tsunamis transoceánicos (PRDW-AV, 2011). Una validación más amplia de los resultados obtenidos para el evento del 27 de febrero de 2010 con este modelo, se puede encontrar en Carrión et al. (2010) y Cienfuegos et al. (2011).

#### 3.3.2 Validación Modelo Inundación

Con el objeto de validar el modelo de inundación se propagó sobre el dominio local la onda del tsunami del 27 de febrero de 2010 predicha por el modelo regional. La metodología de

<sup>4</sup> Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis, disponible en <http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml>

interpolación y acoplamiento entre ambos modelos descrita en la sección 3.2.4 permitió reproducir correctamente la señal a la entrada del dominio local. En la Figura 8 se muestra una comparación de las señales en un punto a 66 m de profundidad en el borde oeste del dominio. Se aprecia el arribo de varias olas sucesivas con alturas (distancia entre la cresta y el valle) cercanas a los 2m y períodos característicos (diferencia temporal entre dos crestas sucesivas) cercanos a 80 minutos.



**Figura 8: Comparación amplitudes modelo regional y modelo de inundación en punto de acople.**  
**Fuente: Elaboración propia**

El modelo de inundación, forzado por la señal calculada por el modelo regional, permitió entonces simular la fase final de propagación de las ondas de tsunami hacia la costa para el evento del 27 de febrero de 2010. El modelo de inundación consideró para estos propósitos un coeficiente de fricción de Manning  $n=0,020$  representativo de terrenos naturales suaves y poco profundos (Kotani et al., 1998). Este valor, conservador por el lado de la seguridad para efectos de este estudio, será utilizado en todas las simulaciones presentadas de aquí en adelante.

Los resultados obtenidos a través de la metodología de propagación de tsunami propuesta se presentan en la Figura 9. La línea de inundación calculada se comparó con antecedentes bibliográficos y de terreno disponibles, obteniéndose una buena concordancia para la inundación de la playa de Lolloe y la laguna sur. También fue posible representar la propagación de la onda de tsunami por el río Maipo. Tal como se aprecia en esta figura, el Puerto de San Antonio no fue sobrepasado, como tampoco lo fue el terraplén que separa el mar de la zona de casas ubicadas en la laguna norte. Sin embargo el sector de casas de madera que estaba ubicado frente a la laguna



sur, fue completamente barrido por el tsunami, pasando a través de dunas y zonas bajas de la playa de Lolleo.

Estos resultados le otorgan validez a la metodología de propagación de tsunami propuesta y a los modelos numéricos y parámetros utilizados. Es importante señalar que el área afectada no fue alcanzada por las primeras ondas tsunami, puesto que la mayor inundación tuvo lugar al cabo de aproximadamente 2,5 horas luego de ocurrido el sismo, para la tercera de las ondas representadas en la Figura 8.



**Figura 9: Línea inundación 27 de febrero: Antecedentes y Modelo Inundación.**  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 Mapas de Inundación para los Escenarios Analizados

#### 3.4.1 Tsunami de 1906

La línea de inundación estimada por el SHOA, publicada en la Carta de Inundación por Tsunami TSU-5115 (SHOA, 2000b), se observa en la Figura 10. El área inundada abarca la totalidad del Puerto de San Antonio incluyendo el Puerto Panul y Paseo Bellamar, y hacia el sur, la playa de Lolloe, las lagunas conocidas como Ojos de Mar, poblaciones Juan Aspee, Brisamar, San Pedro y La Boca. Es importante hacer hincapié en que esta simulación se realizó con una malla de cerca de 90m de resolución por lo que no incorporar detalles acerca de terraplenes, muros u otras obras ubicadas al interior del Puerto de San Antonio.



Figura 10: Línea de inundación Tsunami 1906.  
Fuente: SHOA (2000b).

### 3.4.2 Tsunami del 27 de Febrero de 2010

La línea de inundación generada de acuerdo a los antecedentes recopilados y los puntos medidos en terreno presentados por Fritz et al. (2011) y Winckler & Contreras (2010) se presenta en la Figura 11. También se presenta la línea de inundación calculada a partir de la modelación numérica.



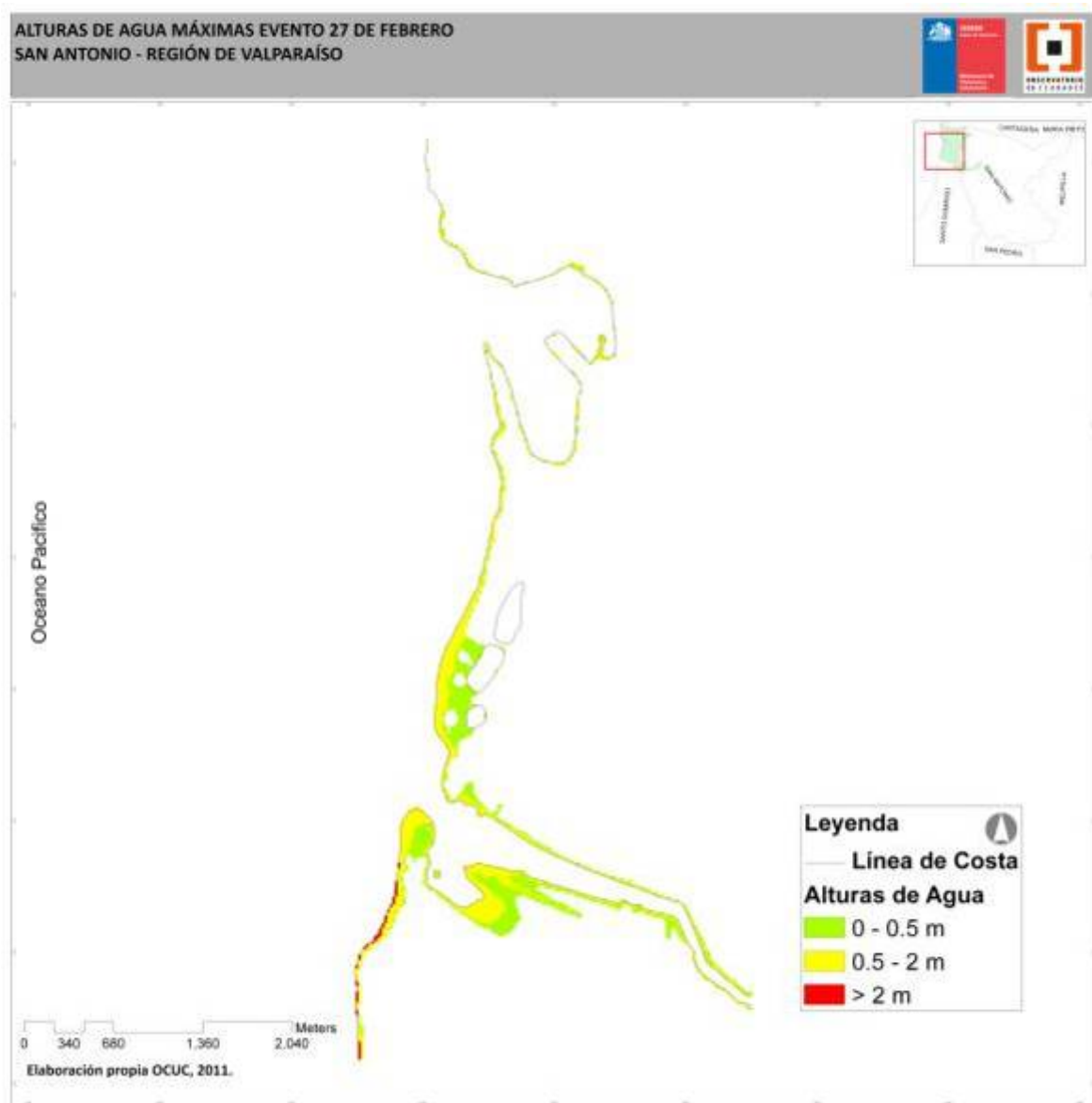
**Figura 11: Línea de inundación estimada tsunami 27 Febrero 2010 y puntos tomados en terreno.  
Fuente: Elaboración propia con datos de Fritz et al. (2011) y Winckler y Contreras (2010).**

Adicionalmente, de la modelación numérica de este evento se han obtenido las alturas de agua y velocidades máximas producidas por el tsunami en las zonas inundadas. Una descripción detallada

de la modelación numérica regional para este evento se encuentra disponible en los artículos de Carrión et al. (2010) y Cienfuegos et al. (2011).

En la Figura 12 se presentan las alturas de agua máximas alcanzadas en tierra para este tsunami, y en la Figura 13, las velocidades instantáneas asociadas a cada altura máxima. En la playa de Lollo se alcanzan alturas de agua máximas de entre 1 y 2 m, mientras que las mayores alturas de agua se observan en la desembocadura del río Maipo (2,2 m). La altura de agua máxima alcanzada en tierra es de 2,3 m, la cual asoció una velocidad de 0,22 m/s, mientras que en el sector de las lagunas de Lollo, las alturas de agua máximas asocian velocidades entre 0,5 y 1 m/s. Es importante destacar que estas combinaciones de alturas de agua y velocidades del flujo explican la destrucción de las casas de madera ubicadas entre la playa y la laguna sur. También se aprecia que el terraplén situado frente a la laguna norte y las instalaciones del Puerto de San Antonio impidieron que el tsunami provocara daños mayores.

En la Figura 14 se presentan las velocidades máximas en tierra estimadas para este tsunami, y en la Figura 15, las alturas de agua asociadas a cada velocidad máxima. Respecto de las velocidades máximas alcanzadas, se observan velocidades hasta los 4 m/s al sur de la desembocadura del río Maipo. En el sector de las lagunas de Lollo se estiman velocidades cercanas a los 1,5 m/s, las cuales corresponden a alturas de agua inferiores a 1 m, las que fueron responsables de la destrucción de las casas ligeras ubicadas en este sector.



**Figura 12: Alturas de agua máximas alcanzadas en tierra para el Tsunami 27 de febrero de 2010.**  
Fuente: Elaboración propia.

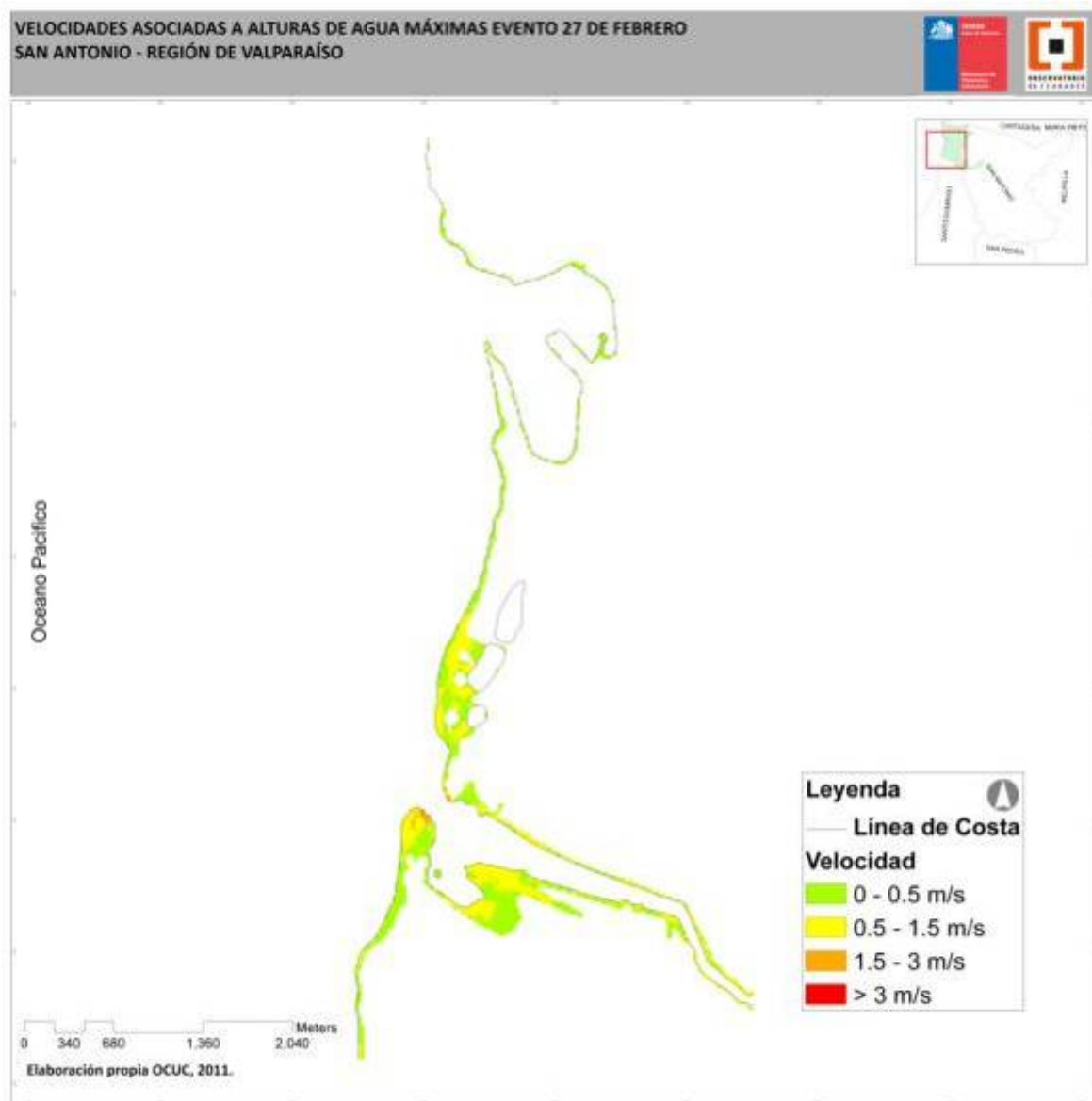
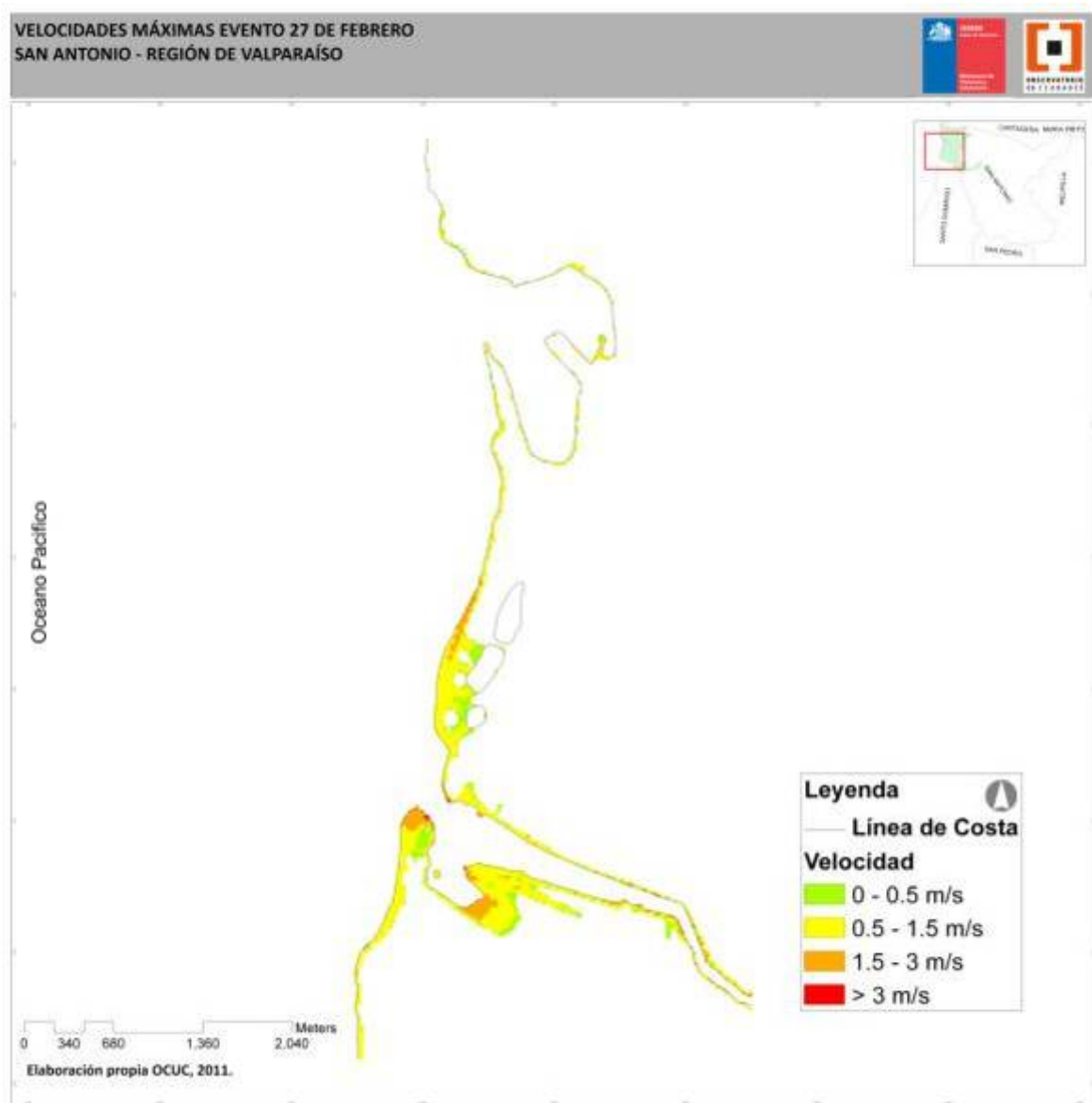
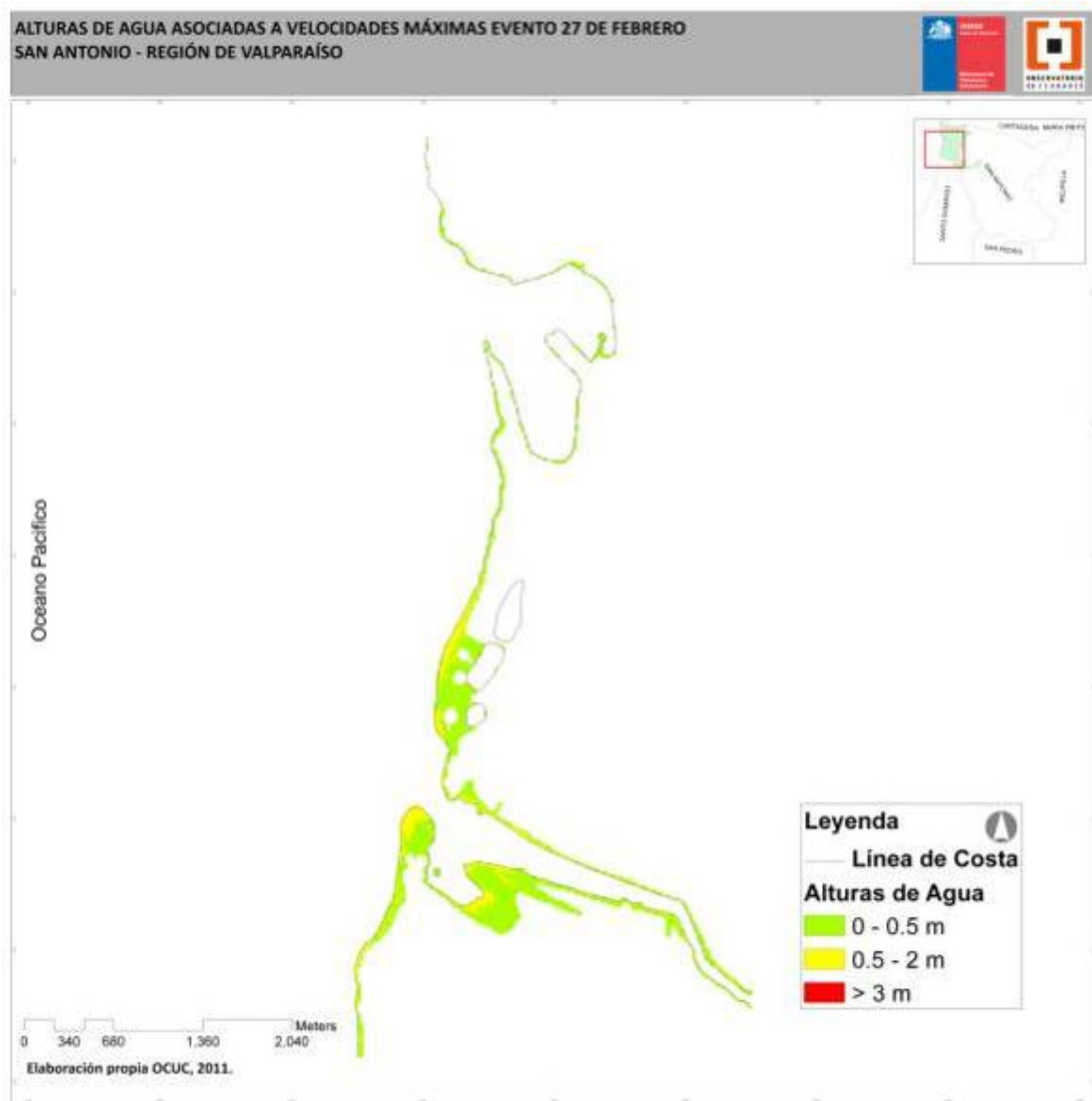


Figura 13: Velocidades asociadas a las alturas de agua máximas para el Tsunami del 27 de febrero de 2010.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 14: Velocidades máximas alcanzadas en tierra para el Tsunami del 27 de febrero 2010.**  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 15: Alturas de agua asociada a las velocidades máximas para el Tsunami del 27 de febrero de 2010.**  
Fuente: Elaboración propia



### 3.4.3 Escenario de Sismo de 8.6 Mw

#### 3.4.3.1 *Modelo de Ruptura*

En la Figura 16 se presentan los resultados del cálculo de las deformaciones verticales para el sismo de 8.6 Mw obtenidas a partir de los parámetros de falla considerados para este evento probable y el modelo de Okada (1985) (estimada en el estudio de PRDW-AV, 2011). En la modelación se asumió que la superficie libre del mar se deforma instantáneamente de la misma forma que el fondo. En la figura, las coordenadas de los bordes de la grilla son geográficas y la escala de colores de la desnivelación del mar se encuentra en metros. Para este escenario la sobreelevación máxima es cercana a los 1,6 m (PRDW-AV, 2011).

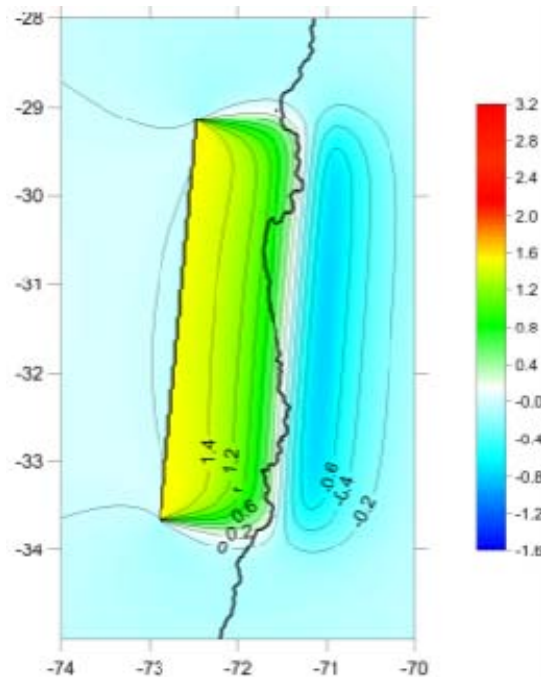


Figura 16: Deformación vertical de la corteza terrestre para sismo de 8.6 Mw.  
Fuente: PRDW-AV (2011).

#### 3.4.3.2 *Propagación Regional*

En las Figura 17 y Figura 18 se presenta la evolución de la onda de tsunami frente a la zona de generación, entre San Antonio y La Serena, para el sismo 8.6 Mw (PRDW-AV, 2011). Es importante destacar que la simulación se llevó a cabo hasta 5 horas después de ocurrido el sismo, de manera de capturar el arribo de los frentes secundarios que en algunos casos pueden ser incluso mayores que el primer frente de acuerdo a lo observado para el evento del 27 de febrero de 2010 (Carrión et al., 2010; Cienfuegos et al., 2011).

En los primeros cuadros se aprecia el arribo del frente de onda hacia la costa solo pocos minutos después del sismo, seguido de una importante depresión del nivel del mar en casi toda la costa (PRDW-AV, 2011). Se observan zonas de acumulación de energía susceptibles a sufrir inundaciones como el sector entre La Serena y la bahía de Tongoy, y la bahía de Valparaíso, ambas orientadas

principalmente hacia el Norte (PRDW-AV, 2011). Comparativamente, el sector de San Antonio se observa menos propenso a amplificar las ondas de tsunami incidentes, ya sea porque no es una bahía altamente resonante, o porque la batimetría en su entorno no favorece la conducción de éstas desde aguas profundas (PRDW-AV, 2011).

Adicionalmente, se observa la presencia de ondas atrapadas en la costa con movimientos oscilatorios de la superficie libre, que parecen presentar una tendencia de movimiento preferente hacia el Sur, viajando en forma paralela a la costa (PRDW-AV, 2011). Esta situación es consistente con las observaciones disponibles para el evento del 27 de febrero de 2010 y documentada en Carrión et al. (2010) y Cienfuegos et al. (2011)..

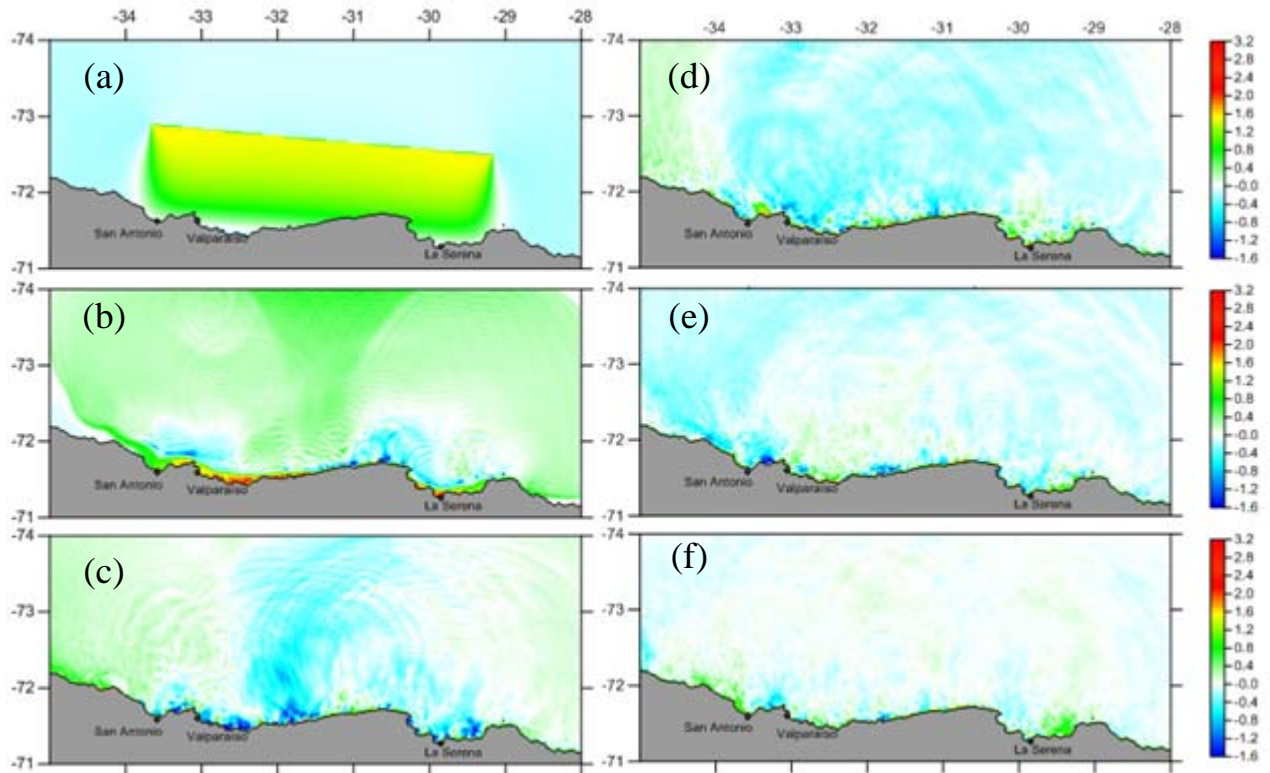
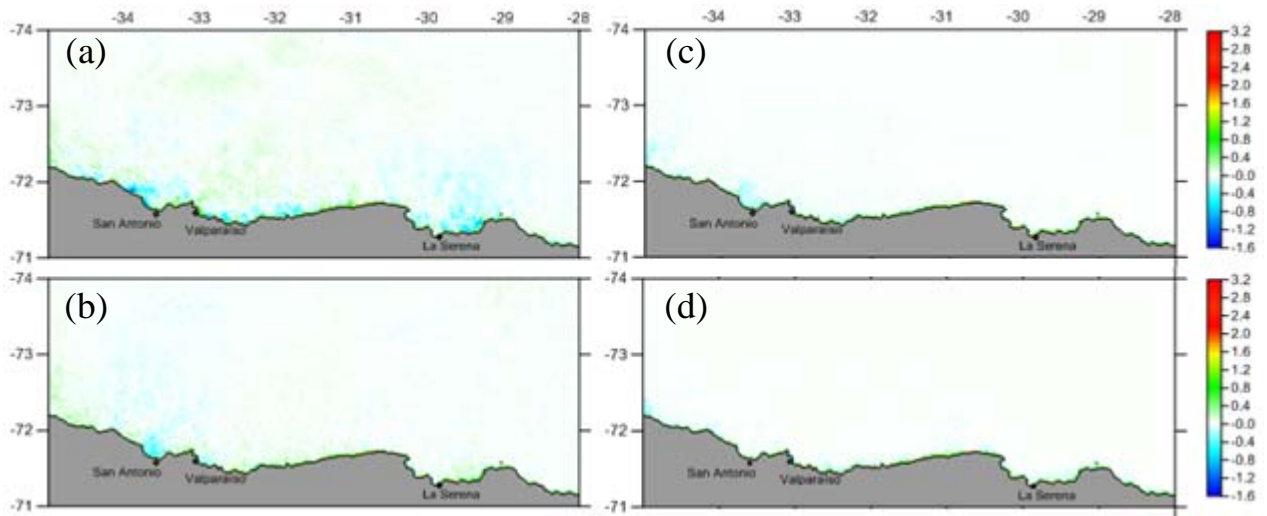
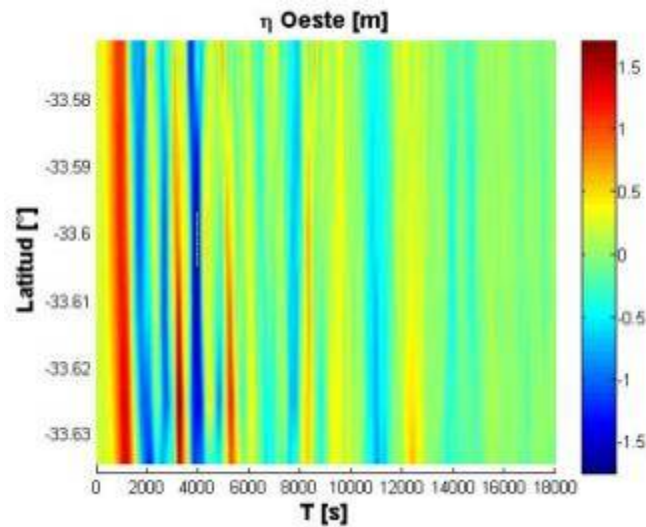


Figura 17: Propagación regional Tsunami 8.6 Mw: (a) 00:00 (b) 00:15 (c) 00:30 (d) 00:45 (e) 01:00 (f) 01:30 horas después del sismo. Fuente: PRDW-AV (2011).



**Figura 18: Propagación regional Tsunami 8.6 Mw: (a) 02:00 (b) 03:00 (c) 04:00 (d) 05:00 horas después del sismo. Fuente: PRDW-AV (2011).**

Las señales extraídas de los resultados del modelo regional que serán introducidas al modelo de inundación en cada borde se presentan en las Figura 19, Figura 20 y Figura 21. En los bordes sur y norte se ha ingresado la señal del tsunami hasta una profundidad de -5 m. En ellas se observa que el primer frente arriba antes de la primera hora de simulación, alcanzándose en los tres bordes amplitudes máximas por sobre los 1,5 m (distancias entre cresta y valle superiores a los 3,0 m).



**Figura 19: Amplitudes modelo regional a modelo inundación borde oeste para el Tsunami 8.6 Mw. Fuente: Elaboración propia con datos de PRDW-AV (2011).**

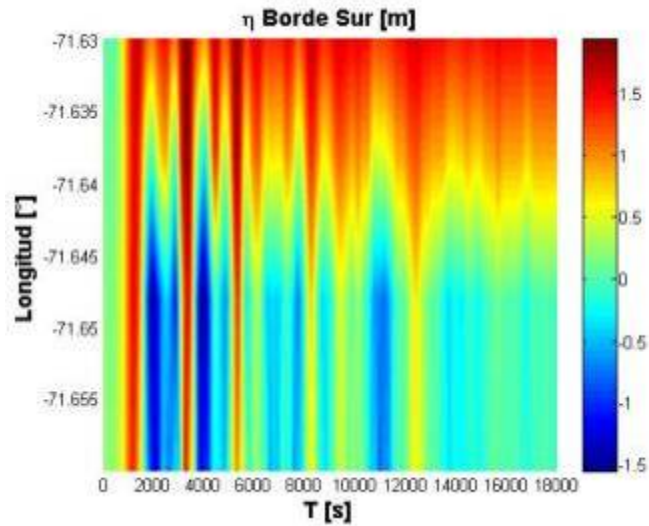


Figura 20: Amplitudes modelo regional a modelo inundación borde sur para el Tsunami 8.6 Mw.  
Fuente: Elaboración propia con datos de PRDW-AV (2011).

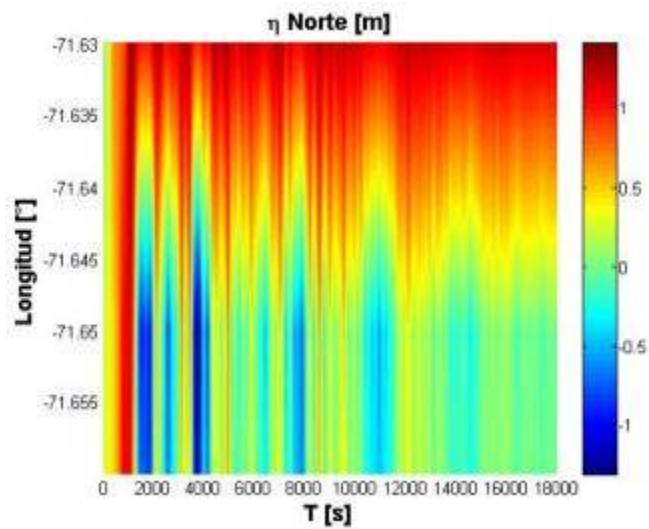


Figura 21: Amplitudes modelo regional a modelo inundación borde norte para el Tsunami 8.6 Mw.  
Fuente: Elaboración propia con datos de PRDW-AV (2011).

### **3.4.3.3 Modelo de Inundación**

La propagación del tsunami en el dominio local se simuló durante 5 horas utilizando un paso de tiempo de 0,2 segundos, con el fin de asegurar la estabilidad del modelo. En las siguientes figuras se muestra el resultado de la simulación en términos del área inundada y las alturas de agua y velocidades máximas alcanzadas en tierra.

En la Figura 22 se muestra la línea de inundación estimada a partir del modelo de inundación. Se aprecia en el sector céntrico de San Antonio que los molos del Puerto y el paseo Bellamar son parcialmente inundados. Hacia el sur, el sector lagunas de Lolleo, poblaciones Juan Aspee, San Pedro, Brisamar y La Boca corresponden a zonas potencialmente inundables por el tsunami provocado por este evento. También se observa el avance de ondas por el cauce del estero El Sauce. Además, ocurre inundación en la ribera sur del río Maipo, y en la ribera norte en el sector de Tejas Verdes y hasta más arriba del puente Lo Gallardo, hasta el sector urbano Lo Gallardo.

En las Figura 23 y Figura 24 se presentan las alturas de agua máximas alcanzadas en tierra para este tsunami, y las velocidades instantáneas asociadas a cada altura de agua máxima respectivamente. Para este tsunami se estiman alturas de agua por sobre los 4 m. En la playa de Lolleo se alcanzan alturas de agua máximas de hasta 3 m. A estas alturas se les asocian velocidades mayores a 1 m/s. En la ribera norte del río Maipo, cerca del sector Lo Gallardo se observan alturas de agua de hasta 1 m. Es importante señalar que estas condiciones producirían la destrucción total de habitaciones de madera que pudieran estar ubicadas en las zonas afectadas.

En la Figura 25 se presentan las velocidades máximas en tierra estimadas para este tsunami, y en la Figura 26, las alturas asociadas a cada velocidad máxima. Para este tsunami se estiman velocidades sobre los 5 m/s al sur de la desembocadura del río Maipo y en el sector de las lagunas de Lolleo. Estas velocidades asocian alturas de agua entre 1 y 2 m. En la ribera norte del río Maipo se observan velocidades cercanas a los 2,5 m/s con alturas de agua de 1 m.

Es importante señalar que el terraplén ubicado frente al sector de la laguna norte de Lolleo y las obras del Puerto de San Antonio, permiten limitar el impacto del tsunami en los sectores donde están ubicados. Estas obras se ven sólo parcialmente sobrepasadas para este evento.



Figura 22: Línea de Inundación para el Tsunami provocado por el escenario de 8.6 Mw.  
Fuente: Elaboración propia

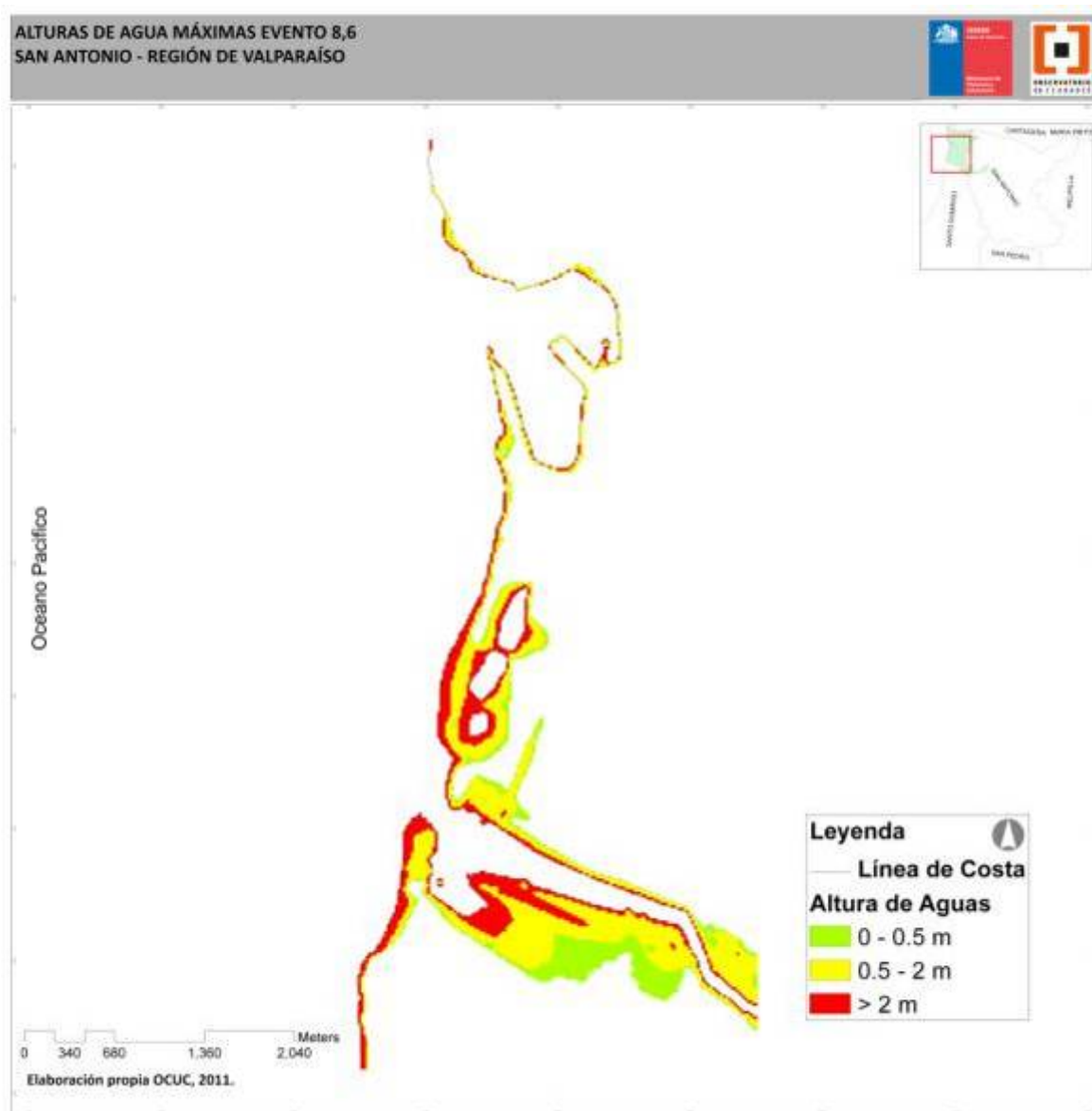
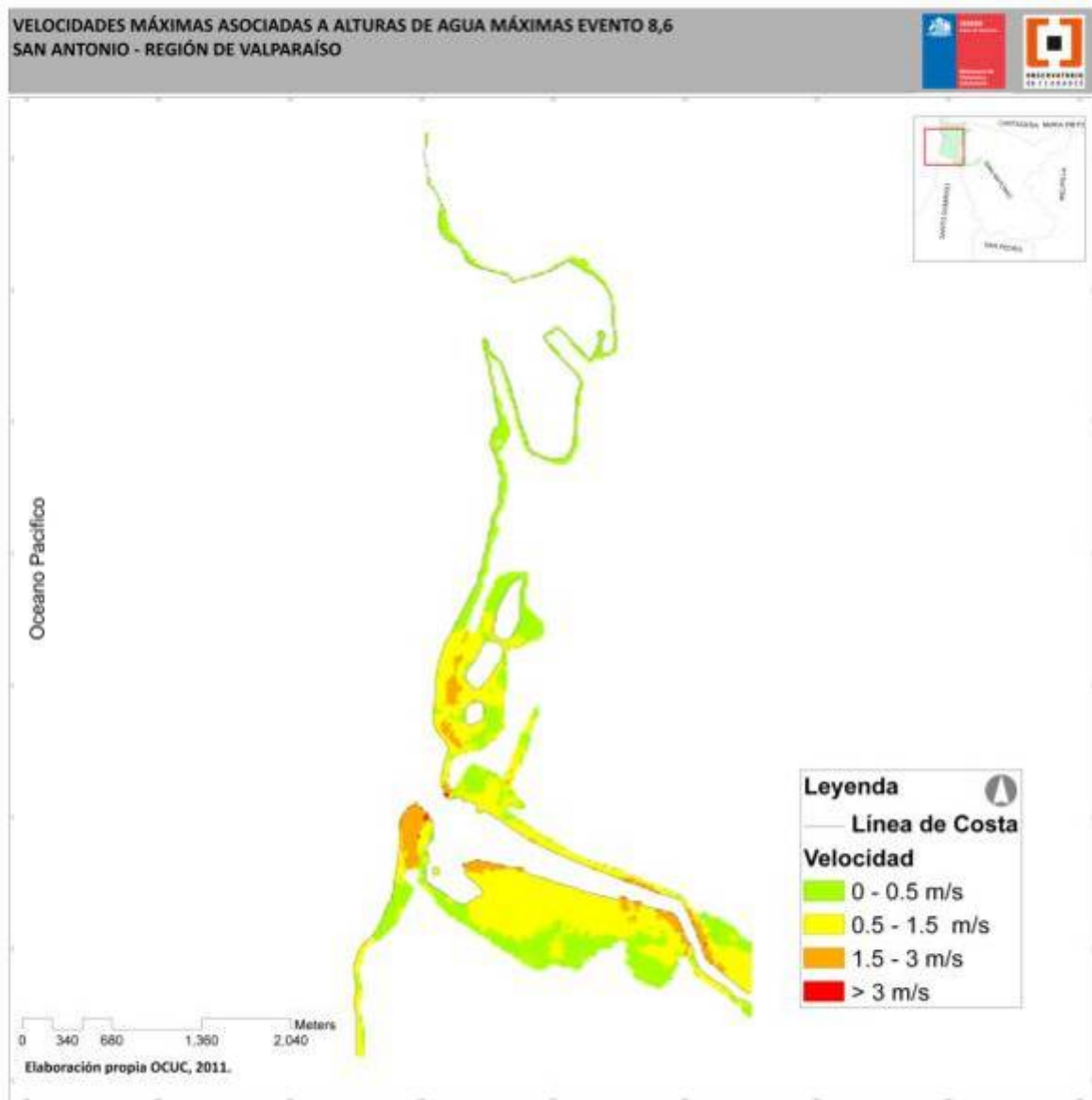
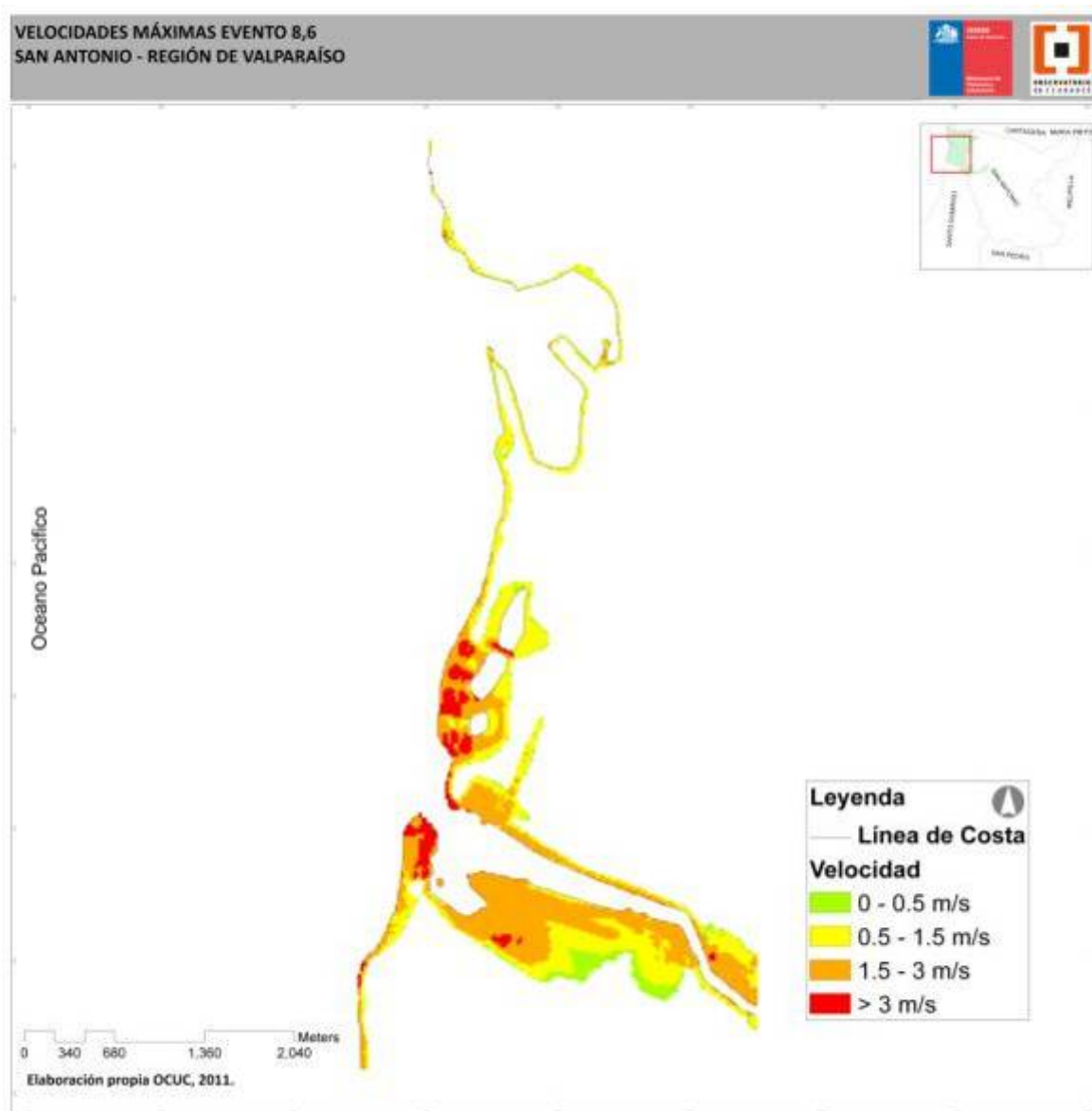


Figura 23: Alturas de agua máximas alcanzadas en tierra para el Tsunami provocado por el escenario de 8.6 Mw.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 24: Velocidades asociadas a las alturas de agua máximas para el Tsunami provocado por el escenario de 8.6 Mw. Fuente: Elaboración propia**





**Figura 25: Velocidades máximas alcanzadas en tierra para el Tsunami provocado por el escenario de 8.6 Mw.**  
Fuente: Elaboración propia

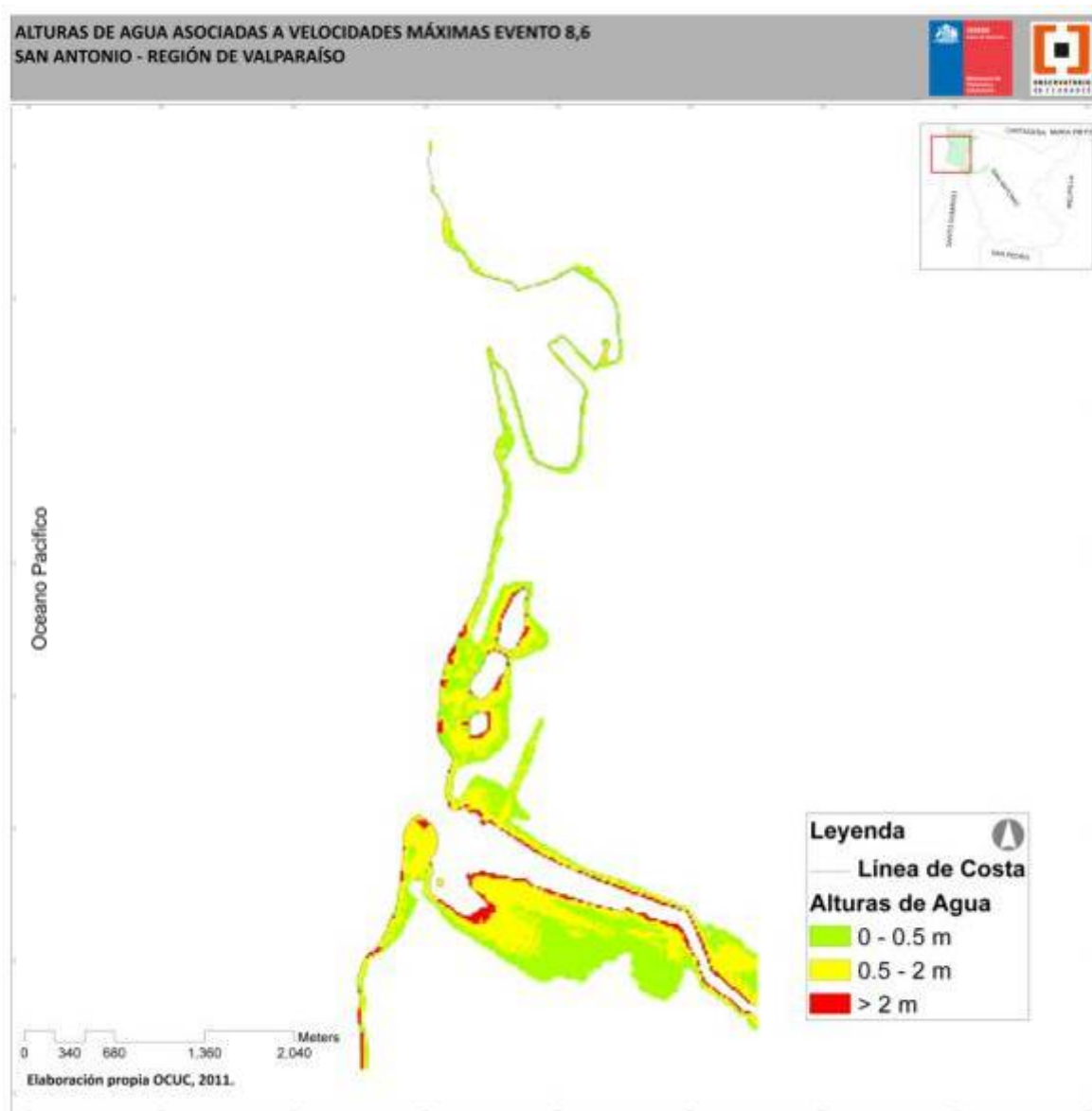


Figura 26: Alturas de agua asociadas a las velocidades máximas para el Tsunami provocado por escenario de 8.6 Mw.  
Fuente: Elaboración propia

### 3.4.4 Escenario de Sismo 8.8 Mw

#### 3.4.4.1 Modelo de Ruptura

En la Figura 27 se presentan los resultados del cálculo de las deformaciones verticales para el sismo de 8.8 Mw estimadas a partir del modelo de Okada (1985) alimentado con los parámetros de falla descritos en la sección 3.1.3.1. Se asume que la superficie libre del mar se deformará instantáneamente de la misma forma que el fondo (PRDW-AV, 2011). En la figura, las coordenadas de los bordes de la grilla son geográficas y la escala de colores de la desnivelación del mar se encuentra en metros. Para este escenario la sobreelevación máxima es de 3,2 m, el doble del caso anterior (PRDW-AV, 2011).

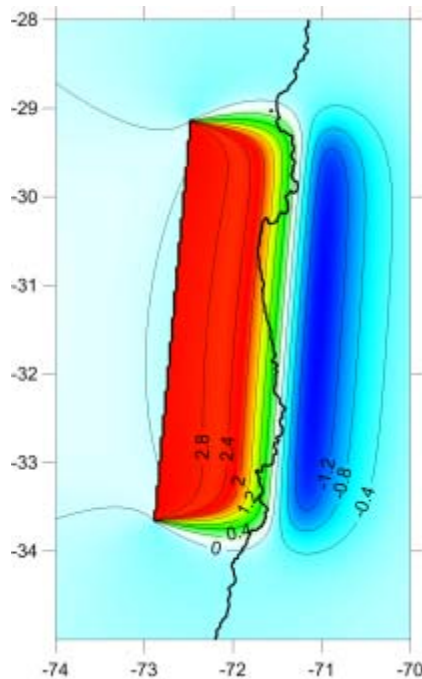


Figura 27: Deformación vertical de la corteza terrestre para sismo de 8.8 Mw.  
Fuente: PRDW-AV (2011).

#### 3.4.4.2 Propagación Regional

En las Figura 28 y Figura 29 se presenta la evolución de la onda de tsunami frente a la zona de generación, entre San Antonio y La Serena, para el sismo 8.8 Mw (PRDW-AV, 2011). En ellas se aprecia el mismo comportamiento que para el escenario anterior respecto de los tiempos de arribo, sin embargo se observa una mayor amplitud de onda, debido a que este sismo es mucho más energético (PRDW-AV, 2011).

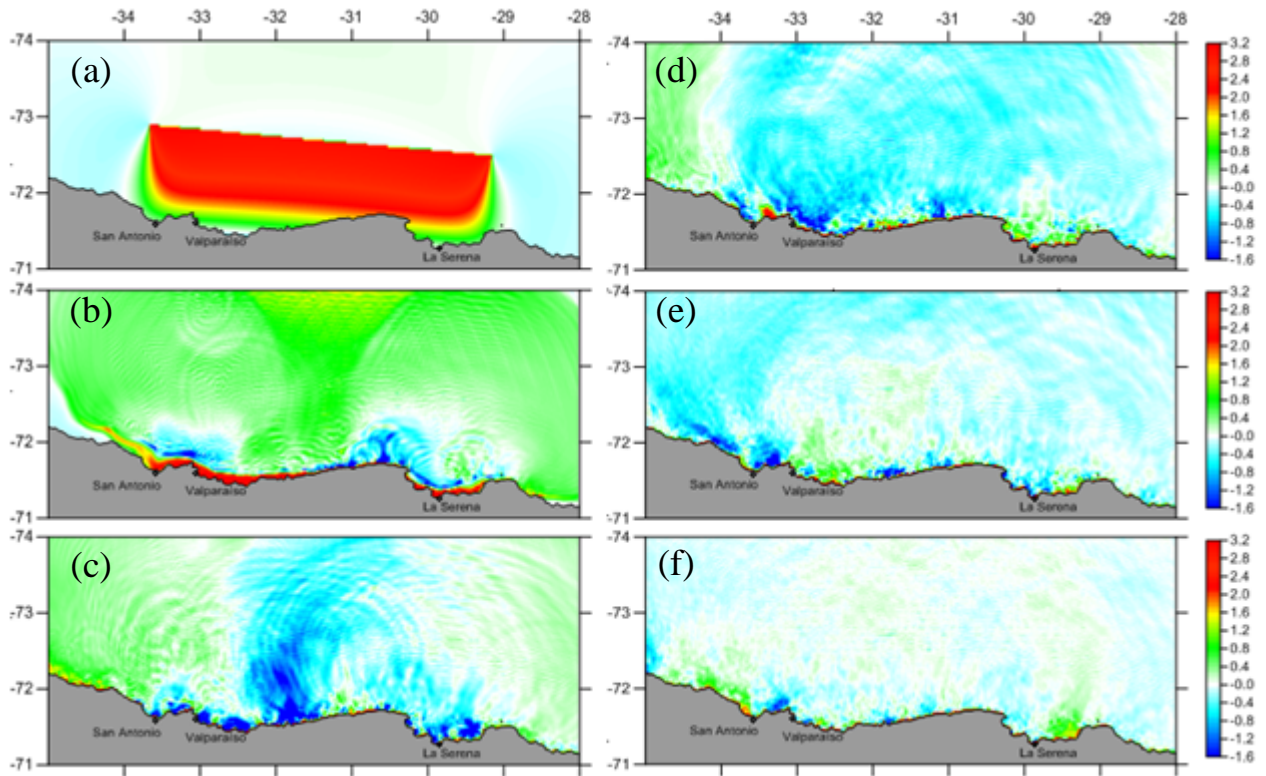


Figura 28: Propagación regional Tsunami 8.8 Mw: (a) 00:00 (b) 00:15 (c) 00:30 (d) 00:45 (e) 01:00 (f) 01:30 horas después del sismo. Fuente: PRDW-AV (2011).

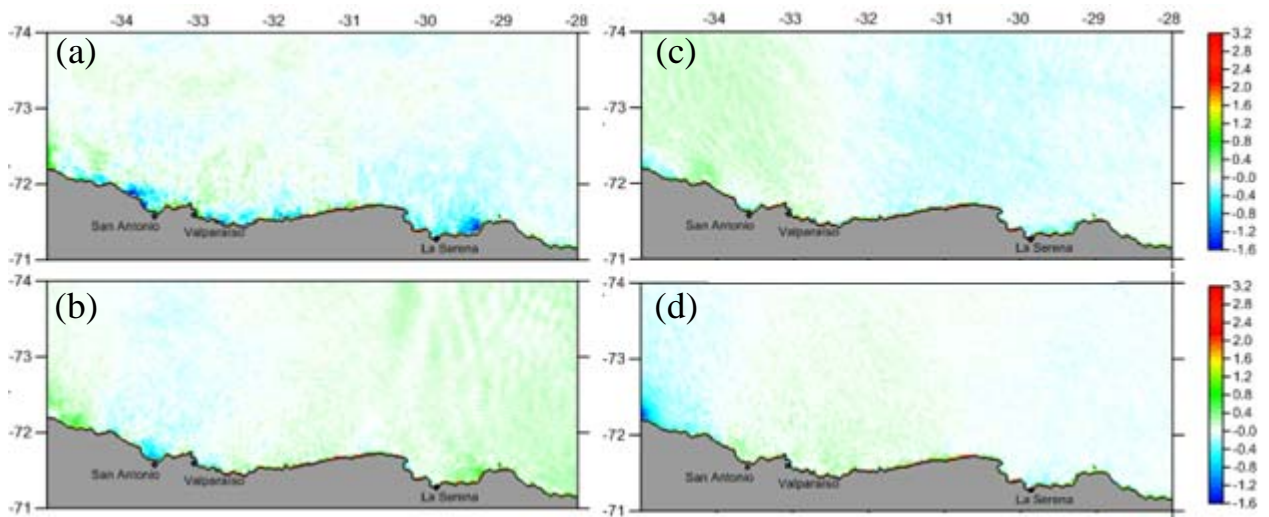


Figura 29: Propagación regional Tsunami 8.8 Mw: (a) 02:00 (b) 03:00 (c) 04:00 (d) 05:00 horas después del sismo. Fuente: PRDW-AV (2011).

Las señales extraídas del modelo regional que serán introducidas al modelo de inundación en cada borde se presentan en las Figura 30, Figura 31 y Figura 32. En los bordes sur y norte se ha ingresado la señal del tsunami hasta una profundidad de -5 m. Para este sismo se observan amplitudes de hasta 3 m (distancia entre la cresta y el valle cercano a los 6 m) ingresando al dominio y un primer frente importante llegando durante los primeros 30 minutos de simulación. Luego los sucesivos frentes decaen en amplitud a medida que pasa el tiempo.

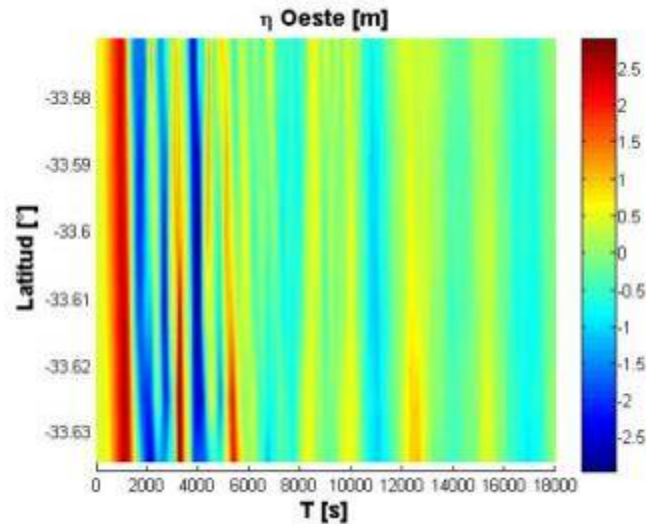


Figura 30: Amplitudes modelo regional a modelo inundación borde oeste para el Tsunami 8.8 Mw.  
Fuente: Elaboración propia con datos PRDW-AV (2011).

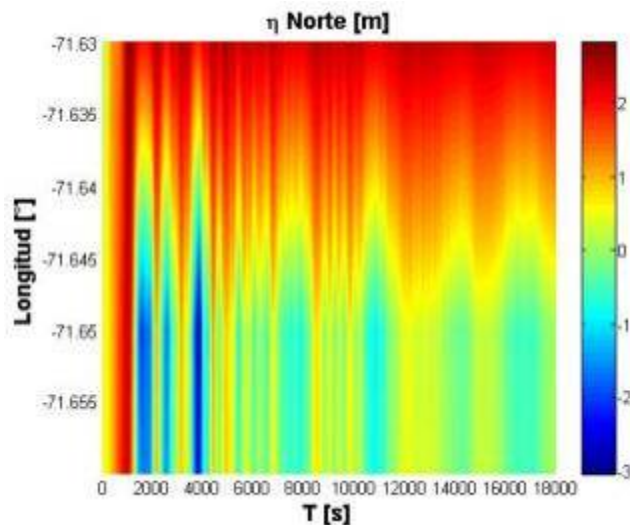


Figura 31: Amplitudes modelo regional a modelo inundación borde norte para el Tsunami 8.8 Mw.  
Fuente: Elaboración propia con datos PRDW-AV (2011).

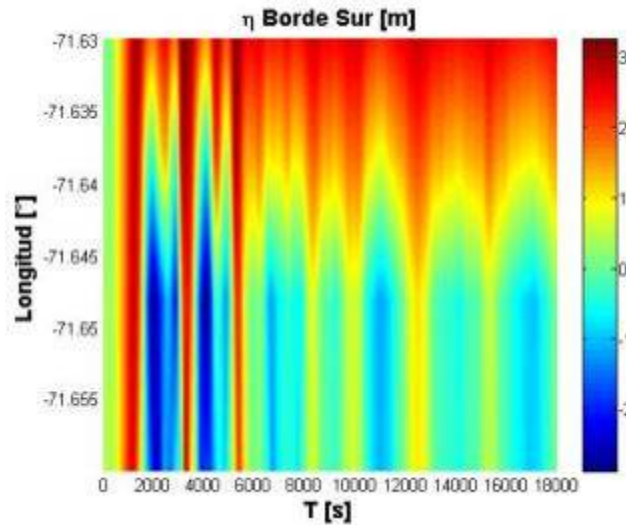


Figura 32: Amplitudes modelo regional a modelo inundación borde sur para el Tsunami 8.8 Mw.  
Fuente: Elaboración propia con datos PRDW-AV (2011).

#### 3.4.4.3 *Modelo de Inundación*

La propagación del tsunami en el dominio local se simuló durante 5 horas utilizando un paso de tiempo de 0,2 segundos, con el fin de asegurar la estabilidad del modelo. En las siguientes figuras se muestra el resultado de la simulación en términos del área inundada y las alturas de agua y velocidades máximas alcanzadas en tierra.

Para este tsunami se observa un área de inundación mucho mayor que para los escenarios considerados previamente. En la Figura 33 se aprecia en el sector céntrico de San Antonio que los molos del Puerto y el paseo Bellamar son inundados completamente. Hacia el sur, el sector lagunas de Lolloe, poblaciones Juan Aspee, San Pedro, Brisamar y La Boca corresponden a zonas potencialmente inundables por el tsunami. También se observa el avance de ondas por el cauce del estero El Sauce. Además, existe una inundación importante de la planicie de la ribera sur del río Maipo, y en la ribera norte, en el sector de Tejas Verdes hasta más arriba del puente Lo Gallardo.

En las Figura 34 y Figura 35 se presentan las alturas de agua máximas alcanzadas en tierra para este tsunami, y las velocidades instantáneas asociadas a cada profundidad máxima respectivamente. En este caso la profundidad máxima estimada alcanza los 5,5 m, la que ocurre en la costa de Santo Domingo.

En San Antonio, sobre los molos del Puerto se estiman alturas de agua por sobre 1 m, las que asocian velocidades cercanas a 1 m/s. En el sector de las lagunas de Lolloe se estiman alturas de agua bastante mayores que los estimados en los escenarios anteriores, superando los 3 m, mientras que las velocidades asociadas superan a veces 1,5 m/s. En las riberas del estero El Sauce

y su desembocadura al río Maipo, sector Tejas Verdes y ribera norte del río Maipo se estiman alturas de agua de más de 1 m. Es importante destacar que en este escenario, el Puerto de San Antonio se vería completamente sobrepasado, con consiguientes daños importantes en infraestructura. Sin embargo, la presencia de las distintas obras del Puerto, además del terraplén ubicado frente a la laguna norte de Lollole ayuda a disminuir el impacto del tsunami sobre los sectores ubicados detrás de ellos.

En la Figura 36 se presentan las velocidades máximas en tierra estimadas para este tsunami, y en la Figura 37, las alturas de agua asociadas a cada velocidad máxima. En los molos del Puerto se estiman velocidades entre los 2 y 3 m/s, las que asocian alturas cercanas a 1 m. Más hacia el sur, en la playa de Lollole se estiman altas velocidades sobre los 4 m/s. En el estero El Sauce y su desembocadura al río Maipo, se observan velocidades cercanas a 3 m/s, mientras que en la ribera sur del río Maipo se observan velocidades de hasta 2 m/s. En estas condiciones, las habitaciones ligeras ubicadas en la zona afectada serían barridas por el tsunami.



**Figura 33: Línea inundación para el Tsunami provocado por el escenario de 8.8 Mw.**  
Fuente: Elaboración Propia



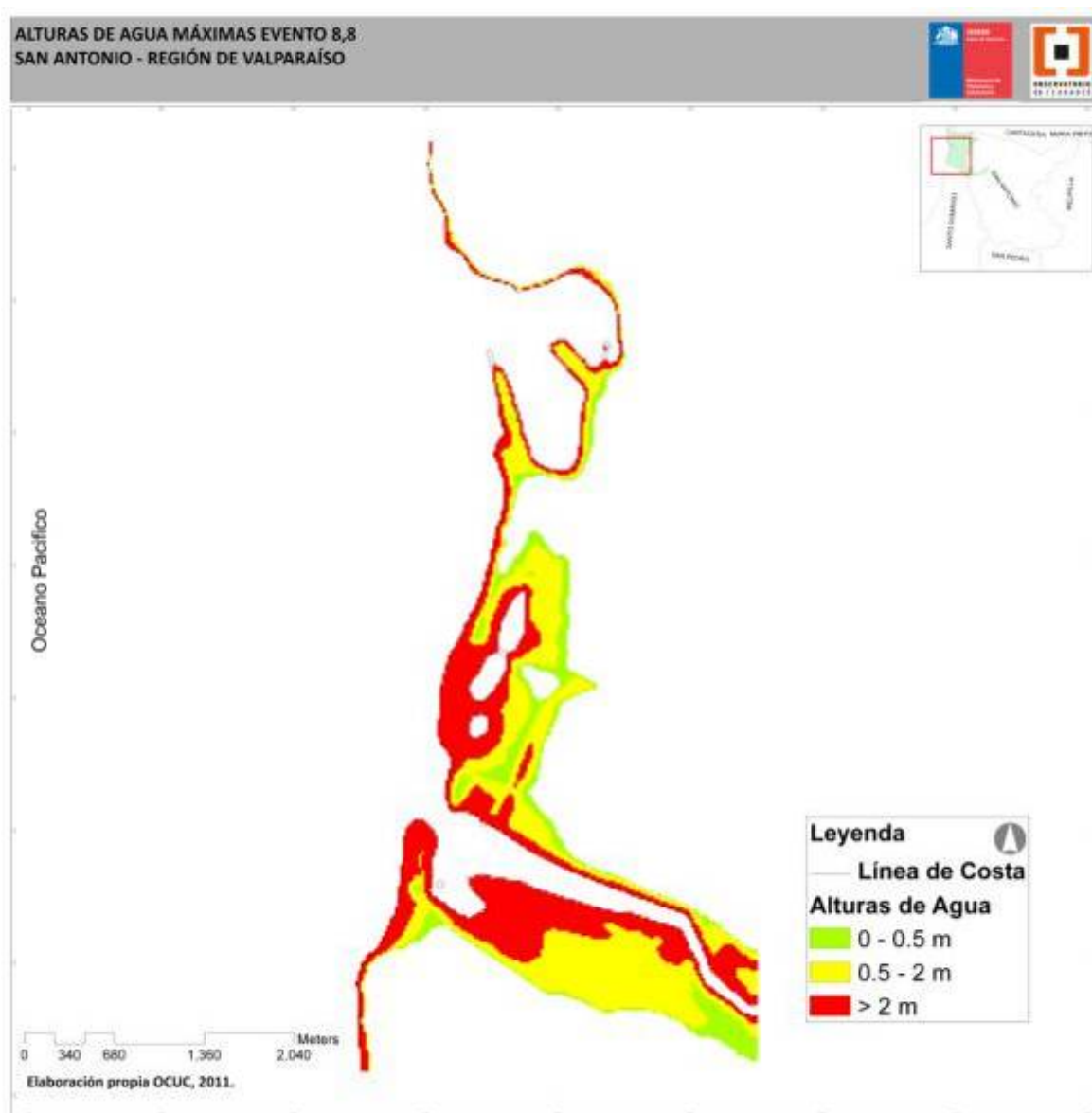


Figura 34: Alturas de agua máximas alcanzadas en tierra para el Tsunami provocado por el escenario de 8.8 Mw.  
Fuente: Elaboración propia.

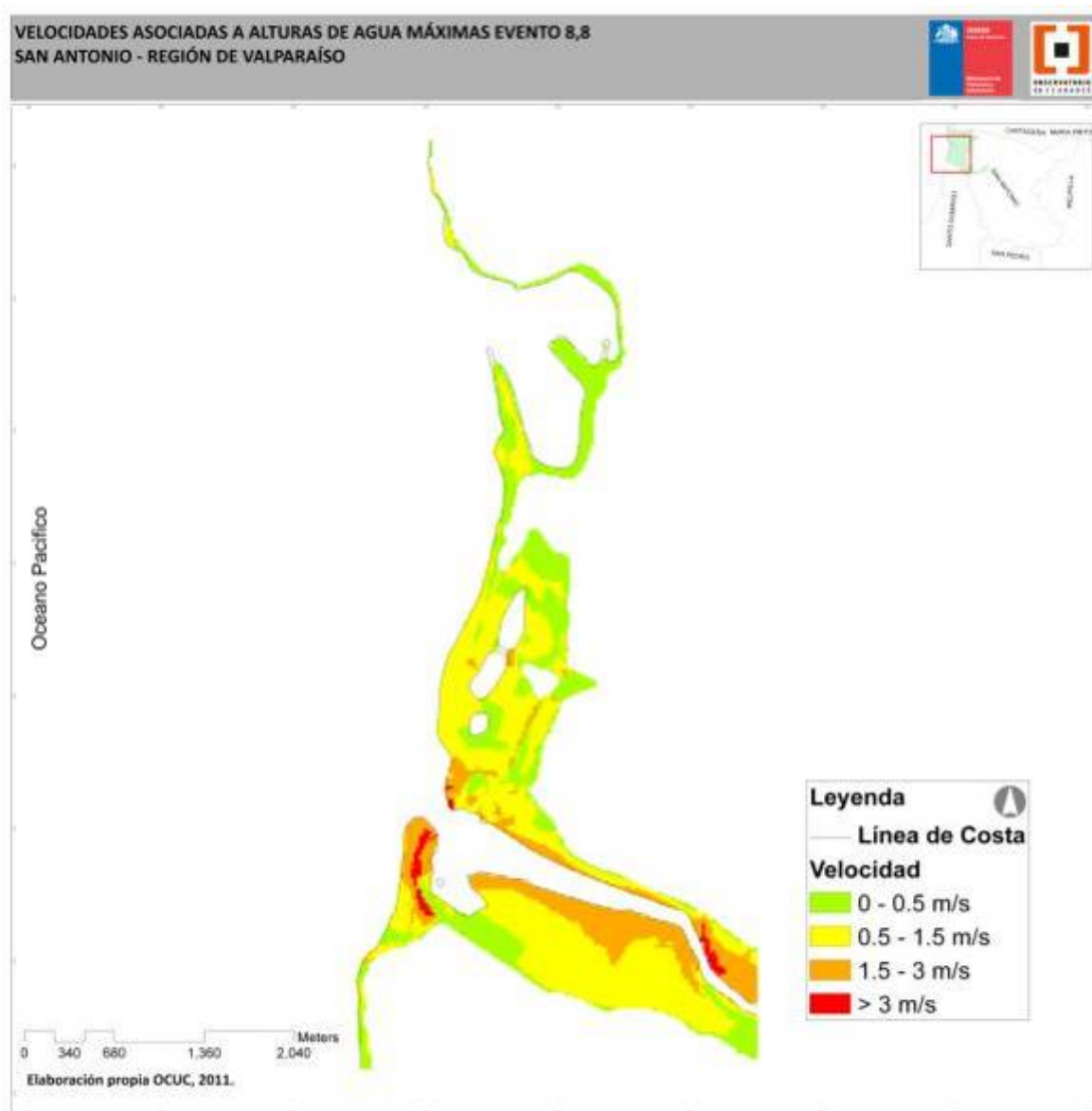
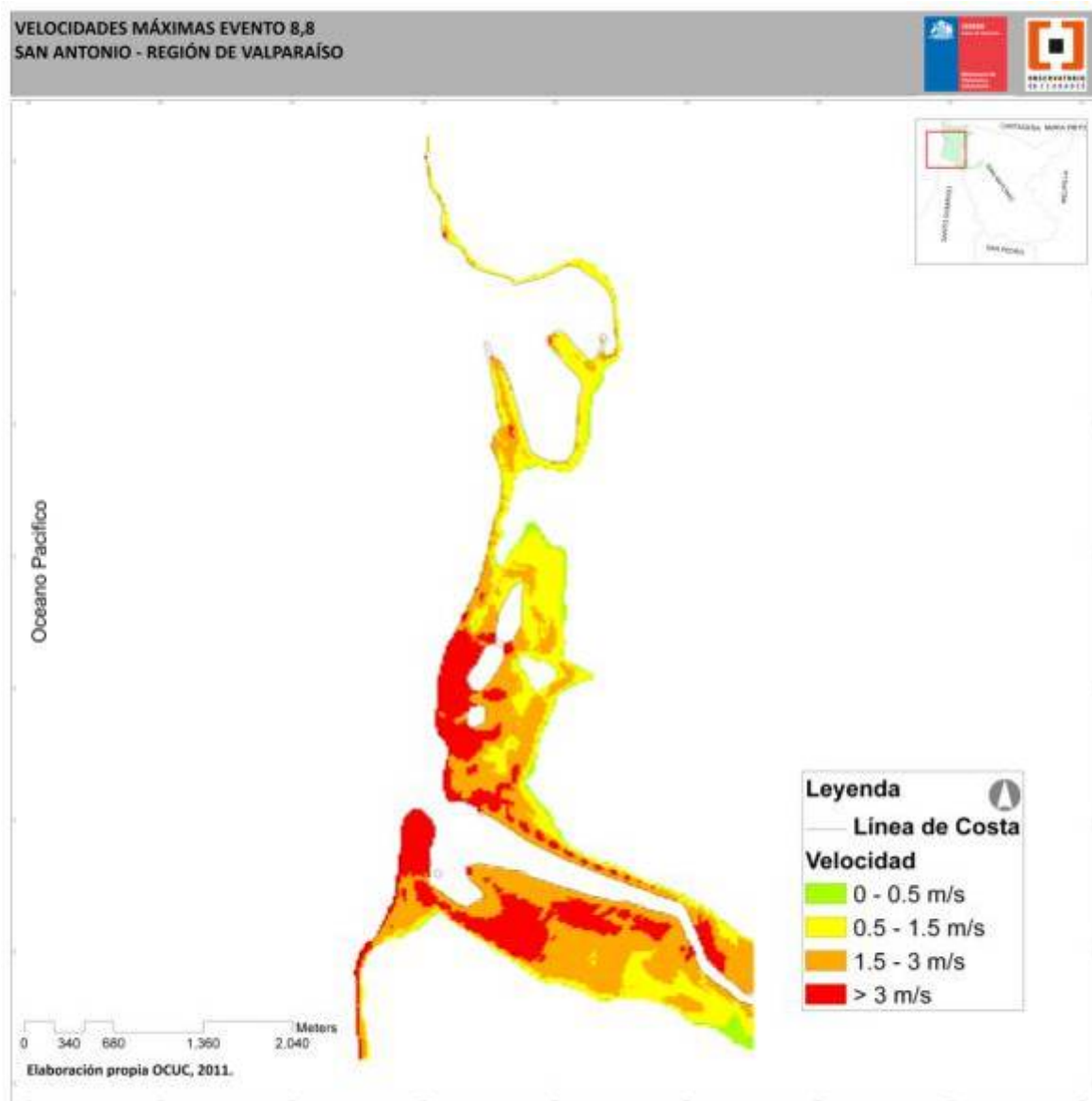


Figura 35: Velocidades asociadas a las alturas de agua máximas para el Tsunami provocado por el escenario de 8.8 Mw. Fuente: Elaboración propia



**Figura 36: Velocidades máximas alcanzadas en tierra para el Tsunami provocado por el escenario de 8.8 Mw.**  
Fuente: Elaboración propia

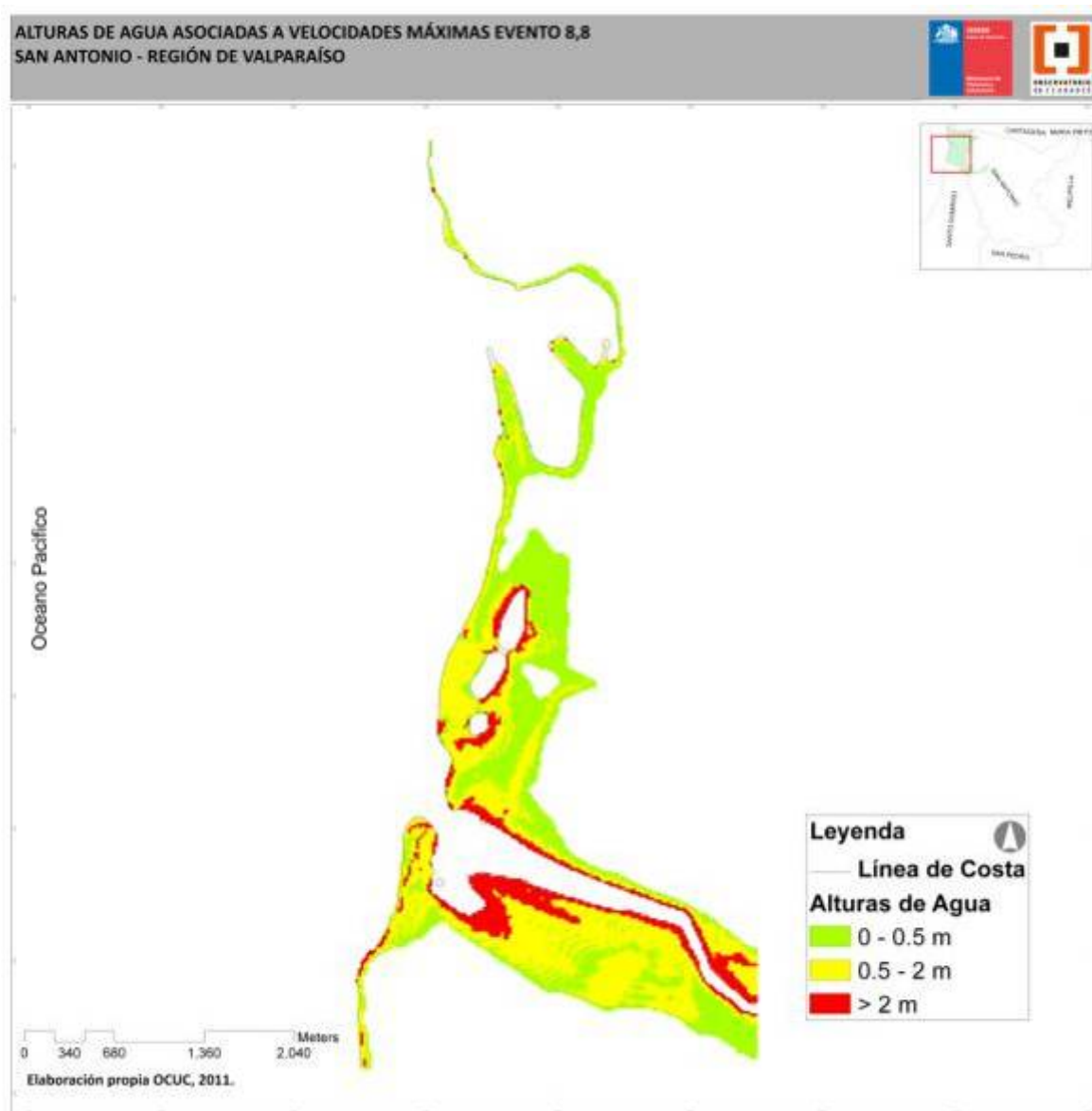


Figura 37: Altura de aguas asociada a las velocidades máximas para el Tsunami provocado por el escenario de 8.8 Mw.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.5 Amenaza de Tsunami

En la Figura 38 se muestran y comparan las líneas de inundación obtenidas para cada escenario modelado. En ella se aprecia que las zonas potencialmente inundables por estos eventos de tsunamis corresponden al sector del Puerto de San Antonio, paseo Bellamar, sector costero de Barrancas, lagunas de Lolloe, riberas estero El Sauce, población Juan Aspee, Brisamar, La Boca, Tejas Verdes y sector Lo Gallardo en la ribera norte del río Maipo.

Es posible apreciar además, que existe bastante concordancia entre la nueva simulación realizada para un potencial sismo de 8.8 Mw y el evento modelado por el SHOA para el escenario de 1906. Es importante recalcar que existen, sin embargo, diferencias importantes en las metodologías empleadas en cada caso puesto que el nivel de detalle considerado para la elaboración de la carta de inundación del SHOA (grillas de cerca de 90m de resolución) no permite tener en cuenta el efecto de mitigación sobre el tsunami que ejerce el Puerto de San Antonio y los distintos terraplenes existentes frente a la laguna norte de Lolloe y la ribera norte del río Maipo. Por el contrario, la modelación de inundación considerada en este estudio, con grillas de 20 m de resolución, incorpora un nivel de detalle adecuado para considerar estos efectos. De esta forma, existen zonas que se ven beneficiadas por la presencia de estas obras, las que contribuyen a disminuir los efectos del tsunami.

Por otra parte, es importante destacar que la topografía de la bahía de San Antonio, bastante escarpada, contribuye a disminuir el área afectada por estos eventos. La batimetría de la bahía también incide en el efecto que tienen las ondas de tsunami, puesto que frente al Puerto de San Antonio existe un cañón submarino bastante profundo que ayuda a disminuir el asomeramiento al que son sometidas estas olas. Del mismo modo, en el sector sur, frente a Santo Domingo, la playa es de pendiente bastante suave, lo que limita las alturas con que entran estas olas puesto que comenzarán a disipar energía por rompimiento antes de alcanzar la costa. El fenómeno de disipación de energía bajo este efecto está considerado en el modelo empleado para la confección de los mapas de inundación.

A modo de referencia, se indica que para el evento del 27 de febrero de 2010, la cota de inundación alcanzada fue cercana a los 3 m en el sector de las lagunas de Lolloe, mientras que los eventos modelados con escenarios de 8.6 y 8.8 Mw presentan sectores en donde este nivel puede alcanzar las cotas de 6 y 10 m respectivamente.

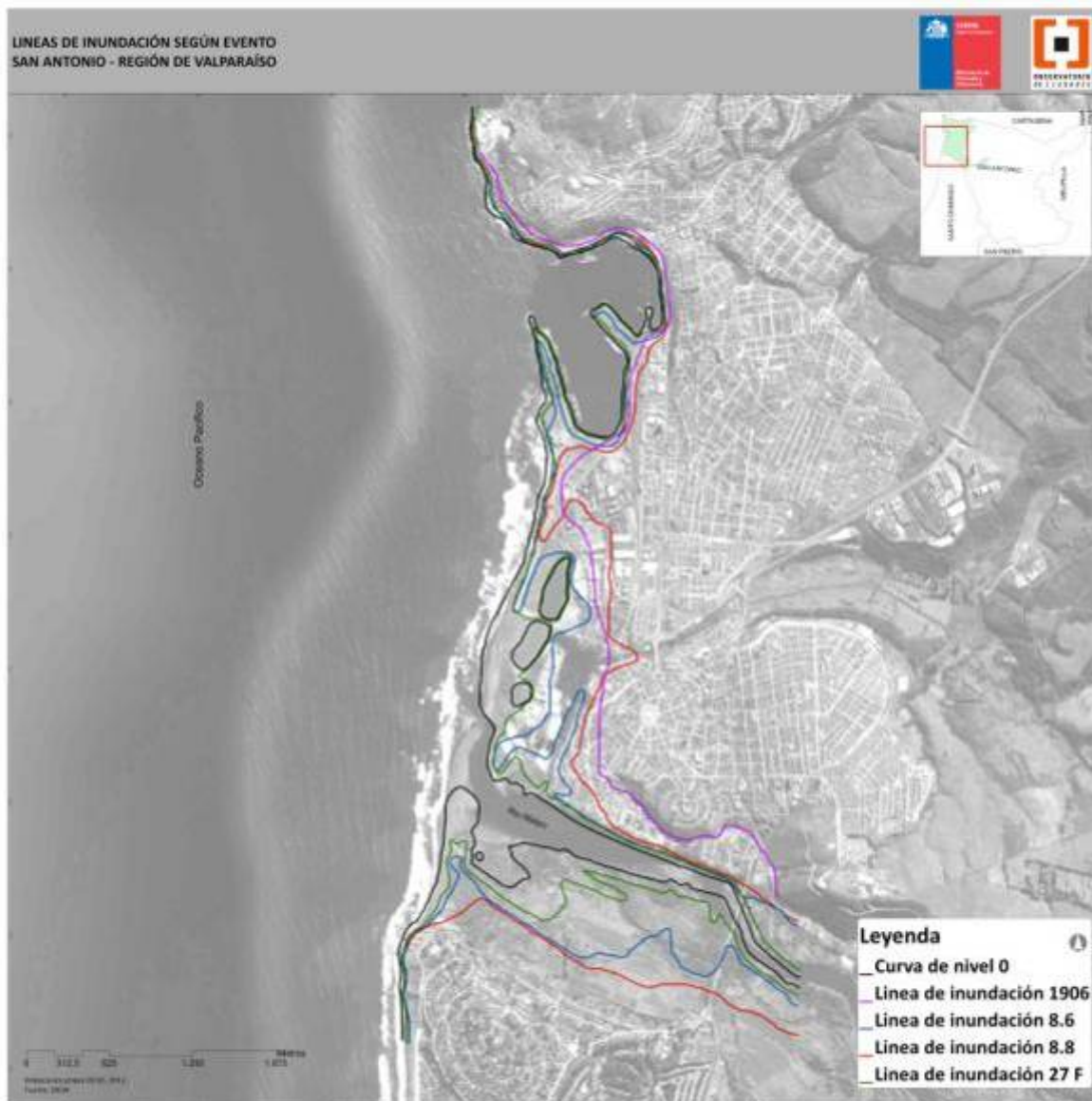


Figura 38: Líneas de Inundación para los escenarios de Tsunami estudiados.  
Fuente: Elaboración propia.

#### **4 MODELACIÓN DE INUNDACIÓN POR CRECIDAS**

Los antecedentes recabados en la primera etapa del estudio (Informe de Plan de Trabajo y Pre Diagnóstico) permiten afirmar que los sectores aledaños al río Maipo, estero El Sauce, estero San Juan y estero Arévalo de la comuna de San Antonio han sufrido inundaciones asociadas a fenómenos hidro-meteorológicos. Por consiguiente, es fundamental analizar las amenazas asociados a este tipo de eventos. Específicamente, los antecedentes recopilados evidencian que estas inundaciones ocurren periódicamente, con una frecuencia mayor a las de otros eventos naturales catastróficos. La magnitud de las crecidas, sin embargo, es variable y está definida por una probabilidad de ocurrencia.

Si bien las inundaciones hidrológicas son eventos naturales, sus consecuencias son muchas veces amplificadas por una mala integración de los asentamientos humanos con el entorno. Ejemplo de esto es la ubicación descontrolada de poblados en las proximidades de cauces, el uso de estos como vertedero de residuos líquidos y sólidos, la alteración e impermeabilización del sistema de drenaje natural, y la falta de medidas de control para evitar los impactos en la morfología y ecología de los cauces. Por lo tanto, cualquier futuro desarrollo urbano debe incorporar sólidamente definiciones que apunten a una correcta integración y preservación de la red de drenaje natural si se pretende reducir o eliminar los riesgos asociados.

Para una correcta caracterización de las inundaciones, su probabilidad de ocurrencia y sus efectos, se debe recurrir a una modelación hidrológica-hidráulica. La modelación hidrológica permite estimar los caudales y volúmenes de escorrentía en los distintos cauces de cada cuenca y las correspondientes frecuencias o probabilidades de ocurrencia. La modelación hidráulica permite estimar las alturas de aguas y la velocidad del escurrimiento asociada a estos caudales en secciones específicas del cauce, haciendo posible determinar las zonas de la planicie de inundación que serán afectadas por el flujo de agua. Los resultados de esta modelación integrada permiten vincular las variables hidráulicas directamente relacionadas con los riesgos y daños (altura de agua y velocidad) con probabilidades de ocurrencia. En la actualidad existe una amplia variedad de herramientas computacionales que pueden ser utilizadas en el desarrollo de modelos hidrológicos e hidráulicos, tales como planillas de cálculo, lenguajes de programación y modelos computacionales e interfaces gráficas especializadas.

El Plan Maestro de Evacuación y Drenajes de Aguas Lluvias de San Antonio y Cartagena, V Región (DOH, 2003) proporciona la modelación hidrológica, con estimaciones de caudales de crecida y sus respectivos periodos de retorno en el río Maipo y en los esteros El Sauce, San Juan y Arévalo y sus tributarios. Se entiende como periodo de retorno el número de años promedio que debe transcurrir entre dos eventos con caudales máximos iguales o superiores a un umbral determinado. El marco regulatorio vigente identifica como uno de los objetivos de los Planes

Maestros esta estimación de caudales, la cual es hecha con herramientas ampliamente utilizadas y validadas. Por lo tanto, se hizo innecesario utilizar modelos de lluvia-escorrentía en este estudio para estimar los caudales máximos probables. Sin embargo, y atendiendo a dar guías para un ordenamiento territorial en los próximos años, se evalúan caudales representativos de una condición futura que considere un mayor desarrollo urbano.

La modelación hidráulica implica analizar la propagación del caudal máximo anual a lo largo del cauce, de manera de estimar el eje hidráulico (alturas y velocidades medias del escurrimiento) y las zonas de inundación en la situación más riesgosa. Dado que la modelación hidrológica del Plan Maestro proporciona una probabilidad de ocurrencia asociada a los caudales máximos, es posible asociar estas mismas probabilidades a las alturas de escurrimiento y zonas de inundación. Cualquiera sea el enfoque utilizado, se requiere cierta información fundamental del cauce relacionado con el material del lecho, su geometría, batimetría y otros obstáculos que puedan existir en el curso. Junto con las características del cauce, se debe tener información referida a las condiciones que restringen el comportamiento hidráulico (condiciones de borde) y posibilitan la correcta modelación. Si bien el plan maestro considera cierta información detallada, fue en este tópico donde se realizaron los mayores esfuerzos tanto en la modelación como en el trabajo de campo.

#### **4.1 Hidrografía Comuna San Antonio**

La red hidrográfica principal de la comuna (Figura 39) está compuesta por algunas quebradas, esteros y el tramo final del río Maipo. A continuación se presenta una breve descripción de estos cauces y sus correspondientes cuencas.

##### ***Río Maipo***

El río Maipo, ubicado en el límite sur del área de estudio, constituye un importante cauce para la comuna de San Antonio. A lo largo de aproximadamente 5 km desde la desembocadura hacia aguas arriba, la ribera norte del río coincide con el límite sur de la zona de estudio, donde se encuentran las localidades urbanas de San Juan, Lo Gallardo y Lolleo. En este tramo recibe los aportes de los Esteros San Juan y El Sauce, por lo que su comportamiento durante épocas de crecida afecta enormemente las condiciones hidráulicas de estos esteros. En la desembocadura misma del Maipo en el sector de Tejas Verdes, el ancho del cauce llega a los 200 m. A partir de la Punta de Santo Domingo se desarrolla una barrera litoral que desvía el estuario hacia el norte y que tiende a romperse en casos de crecidas (Arriagada, 2005).

La cuenca hidrográfica del Río Maipo es la más importante de la zona central de Chile, abarcando la totalidad de la Región Metropolitana y parte de la V y VI regiones. El área total de la cuenca es de aproximadamente 15.260 km<sup>2</sup> (DOH, 2003), y se extiende entre los 32°55' y 34°15' latitud sur y los 69°55'-71°33' longitud oeste. La longitud del río Maipo es de aproximadamente 250 km (Cade-Idepe, 2004). En la zona de estudio el régimen del río es mayoritariamente pluvial (DOH, 2003), siendo la época invernal, entre Mayo y Agosto donde ocurren las crecidas más importantes. La



estación pluviométrica más cercana a la zona de estudio es la estación Maipo en Cabimbao (DGA N° 05748001-7).

### ***Estero San Juan***

El estero San Juan es uno de los más relevantes en la comuna de San Antonio. Su cuenca tiene un área de 116 km<sup>2</sup> (DOH, 2003) y se ubica en el extremo sur-este de la comuna de San Antonio. En un primer tramo, aguas arriba del Embalse San Juan, el cauce se llama Estero Leyda, aguas abajo del embalse, en su tramo más bajo, se llama Estero San Juan. El estero llega al río Maipo en la localidad de San Juan, 4 kilómetros aguas arriba de su desembocadura al mar. Por lo tanto, su desembocadura se encuentra influenciada por las crecidas del río Maipo, presentándose problemas de inundación en este sector de confluencia.

### ***Estero El Sauce o San Pedro***

El estero El Sauce, conocido también como San Pedro, es el principal cauce que cruza por el área urbana de San Antonio. El estero delimita las zonas de Llolleo y Barrancas, descargando sus aguas al río Maipo, aproximadamente a 1 km de la desembocadura al mar en la zona de Tejas Verdes. En este tramo se presenta una baja pendiente longitudinal y su capacidad de evacuación está influenciada por las mareas y las crecidas del río Maipo (MOP, 1991; DOH, 2003), lo que favorece la ocurrencia de inundaciones. El estero tiene su origen en el sector de Marquesa, cercano a la localidad de Leyda, donde se conoce como estero Marquesa. Sus principales afluentes son la quebrada El Tranque y la micro cuenca El Canelo (González, 2005). De los 120 km<sup>2</sup> drenados por el cauce (DOH, 2003), la superficie es mayoritariamente rural; sin embargo en el último tramo recibe las aguas lluvias provenientes de las zonas urbanas de Barrancas y Llolleo.

### ***Estero o quebrada Arévalo***

El estero o quebrada Arévalo y su tributaria, Huallipén, constituyen el tercer cauce importante de la zona urbana de San Antonio. Esta quebrada atraviesa por la mitad del área urbana norte de San Antonio, dónde ha sido completamente abovedada en un tramo de aproximadamente 1000 m de longitud hasta su desembocadura al mar (González, 2005). El estero nace al oriente de la comuna y drena un área de aproximadamente 6 km<sup>2</sup> (DOH, 2003), previo a su abovedamiento está canalizado y descarga sus aguas en el sector del Puerto de San Antonio. Entre sus afluentes se encuentran las quebradas Huallipén, Bruselas, Holanda, Víctor Domingo Silva y Los Perales.

### ***Quebrada Huallipén***

Esta quebrada se ubica al interior de la comuna de San Antonio. Tiene su nacimiento en la parte sur oriente de Placilla y avanza hacia el norponiente hasta descargar sus aguas en el tramo abovedado del estero Arévalo.

### **Quebradas Zona Norte San Antonio**

Cuatro son las quebradas que nacen en el cerro Centinela y desaguan hacia el estero Arévalo: quebrada Bruselas, quebrada Holanda, quebrada Víctor Domingo Silva y quebrada Los Perales. Estas cuatro quebradas han sido canalizadas en su tramo final a la altura de la calle José Manuel Balmaceda, dónde luego desembocan en el estero Arévalo.



Figura 39: Hidrografía comuna San Antonio sobre imagen satelital de Google Earth

## **4.2 Modelación Hidrológica**

La ocurrencia de inundaciones y la magnitud y extensión de éstas se evalúan a partir de los caudales máximos esperados para diferentes periodos de retorno en cada uno de los distintos cauces. El Plan Maestro de Evacuación y Drenajes de Aguas Lluvias de San Antonio y Cartagena, V Región (DOH, 2003) proporciona resultados de modelaciones hidrológicas realizadas sobre las cuencas de los esteros de la red hidrográfica principal, estableciendo caudales máximos anuales para distintos periodos de retorno. Estos caudales fueron simulados con una versión del modelo lluvia-escorrentía Stormwater Management Model (SWMM, Rossman, 2009) utilizada por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) y ampliamente validada por la comunidad nacional e

internacional. En cuencas de área aportante mayor a 10 km<sup>2</sup>, entre las cuales se encuentra la cuenca del estero El Sauce y la cuenca del estero San Juan, el modelo consideró el método del Soil Conservation Service de Estados Unidos (USSCS) para determinar la escorrentía, el cual se basa en el método del Hidrograma Unitario, utilizando la metodología la Curva Número para calcular la precipitación efectiva. Para cuencas de área menor a 10 km<sup>2</sup>, entre las cuales se encuentra la cuenca del estero Arévalo, se utilizó el método racional modificado. Un análisis comparativo del uso de suelo de los años 2003 y 2011 (Figura 40 y Figura 41) no muestra variaciones apreciables de la zona urbana localizadas en las cuencas aportantes a los esteros. Adicionalmente tampoco se distinguen variaciones significativas en la estadística de precipitaciones. Así entonces se asume que la modelación hidrológica del año 2003 es aún válida al año 2011, por lo que se utilizan los caudales máximos determinados por el Plan Maestro para la determinación de las amenazas de inundación en los esteros anteriormente mencionados.



**Figura 40: Uso de suelo, estero El Sauce. Imagen satelital de Google Earth tomada el 17 de diciembre 2004 y 10 de agosto 2009, arriba y abajo, respectivamente.**



**Figura 41: Uso de suelo, estero El Sauce. Imagen satelital de Google Earth tomada el 17 de diciembre 2004 y 10 de agosto 2009, arriba y abajo, respectivamente.**

Los caudales máximos para diferente periodo de retorno a la salida de la cuenca de los esteros El Sauce, San Juan y Arévalo se muestran en la Tabla 3. El Plan Maestro hace referencia a embalses con cierta capacidad aguas arriba de los esteros El Sauce y San Juan, los cuales tendrían un efecto regulador. Frente a la escasez de información sobre estos embalses y su operación, el Plan Maestro no consideró el efecto regulador en la estimación de los caudales máximos en los distintos cauces. La misma decisión se adoptó en este estudio, atendiendo a lograr una caracterización conservadora de la amenaza por crecidas e inundaciones.

Periodo de retorno (años)	Caudales (m <sup>3</sup> /s)		
	Estero El Sauce	Estero San Juan	Estero Arévalo
2	25,7	28,3	5,6
5	62,8	73,5	8,3
10	119,3	150,1	11,6
20	164,1	206,7	14,1
50	198,8	250,6	16,1
100	232,9	293,8	17,9

**Tabla 3: Caudales máximos anuales para diferentes periodos de retorno.**

**Fuente: Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de San Antonio y Cartagena, V región (DOH, 2003).**

Por otro lado, el río Maipo si cuenta con información fluviométrica 15 km aguas arriba de su desembocadura, en la estación Maipo en Cabimbao (Tabla 4). Esta información fue utilizada en el Plan Maestro para estimar los caudales máximos y su frecuencia de ocurrencia mediante el ajuste de un modelo probabilístico. Dada el área de la cuenca y todas las posibles modificaciones que esta haya podido experimentar a la fecha, se hace imposible identificar y caracterizar todos los cambios de uso de suelo que puedan haber ocurrido. Se hace necesaria entonces una actualización/validación de la modelación de estos caudales de modo de incluir la información fluviométrica generada desde el 2003 hasta la fecha.

Estación	Tipo	Institución	Datos	Fechas		Ubicación	
				Inicio	Fin	Latitud S	Longitud O
Maipo Cabimbao	Fluviométrica	DGA	Caudales y Calidad	1939	2010	33° 43'	71° 33'

**Tabla 4: Estación fluviométrica de interés para este estudio**

**Fuente: Elaboración Propia, 2011**

Se procedió a ajustar un modelo probabilístico Log-Pearson III al registro completo de los caudales instantáneos máximos anuales. Este modelo permitió entonces determinar los caudales máximos para diferente periodo de retorno en la estación Maipo en Cabimbao (Tabla 5). Estos caudales fueron corregidos por un factor de 1,036, el cual permite considerar el aumento del área aportante de la cuenca entre la estación fluviométrica y la zona de estudio definida en la desembocadura del estero San Juan (DOH, 2003).

Periodo de retorno (años)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
2	640
5	1.420
10	2.222
25	3.670
50	5.143
100	7.033

**Tabla 5: Caudales máximos para diferentes periodos de retorno en río Maipo, corregidos hacia justo aguas arriba desembocadura estero San Juan. Fuente: Elaboración Propia, 2011**

### 4.3 Modelación Hidráulica

La modelación hidráulica implica analizar la propagación del caudal máximo anual a lo largo del cauce, de manera de estimar el eje hidráulico (alturas y velocidad media del escurrimiento) y las zonas de inundación en la situación más riesgosa. Dado que la modelación hidrológica del Plan Maestro proporciona una probabilidad de ocurrencia asociada a los caudales máximos, es posible asociar estas mismas probabilidades a las alturas de escurrimiento y zonas de inundación. Para efectos de la modelación se requiere información fundamental del cauce relacionado con su perfil batimétrico, el material del lecho y el coeficiente de rugosidad de Manning, el cual depende de la granulometría del lecho del río, su sinuosidad, estructuras sedimentarias en el cauce y la posible presencia de vegetación u otros obstáculos. Junto con las características del cauce, se debe tener información referida a las condiciones que restringen el comportamiento hidráulico (condiciones de borde) y posibilitan la correcta modelación.

#### 4.3.1 Metodología

Cuatro son los esteros modelados hidráulicamente (Tabla 6).

Cauce	Sector afectado	Coordenada UTM Desembocadura		Área Cuenca Aportante (Km <sup>2</sup> )
		Norte	Este	
<b>Río Maipo</b>	- Tejas verdes - Lo Gallardo - San Juan	6277653.00	256109.20	15.380
<b>Estero El Sauce</b>	- La Boca - Brisamar - Juan Aspee - San Pedro	6277039.46	256565.98	119,4
<b>Estero San Juan</b>	- Lo Gallardo - San Juan	6275628.53	258952.96	116
<b>Estero Arévalo</b>	- Centro de San Antonio (calles Pedro Montt y Centenario)	6281174.86	257241.95	6,01

**Tabla 6: Selección de cauces para modelación hidráulica. Fuente: Elaboración propia, 2011**

La modelación hidráulica se realiza para cinco escenarios de caudales máximos según la probabilidad de ocurrencia (periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años). Es importante

destacar que en los casos del estero El Sauce, San Juan y Arévalo, la modelación hidrológica del Plan Maestro entrega los caudales a la salida de la cuenca, es decir, la modelación hidráulica se realiza bajo un peor escenario al ingresarlos como caudales de entrada aguas arriba del cauce a modelar.

La topografía de la zona norte del río Maipo proviene de curvas de nivel cada 2 m de la comuna de San Antonio proporcionadas por el Plan Regulador Comunal PRC (IMSA, 2006). Por otro lado, la topografía de la zona sur del río Maipo proviene de curvas de nivel cada 10 m proporcionadas por el Centro de Información de Recursos Naturales CIREN (2007). Las curvas de nivel están referenciadas al sistema de coordenadas cartográficas WGS84, el cual sirve también como datum para el ajuste de las batimetrías levantadas en terreno y para los niveles de marea. La batimetría utilizada en los esteros proviene de los Planos a escala 1:250 de mediciones efectuadas directamente en terreno, proporcionados por el Plan Maestro. Sin embargo, se hizo necesaria una mejor caracterización de la batimetría, por lo que esta información es complementada con una campaña en terreno realizada especialmente para este estudio y resumida en la sección de anexos.

En los cauces del río Maipo y de los esteros El Sauce y San Juan se realiza una modelación hidráulica unidimensional en Hec Ras (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) (US Army Corps of Engineers, 2010). Debido a que un tramo del estero Arévalo está abovedado, en este cauce se realiza una modelación hidráulica unidimensional del escurrimiento en la zona urbana del caudal no controlado por el tramo abovedado, mediante una modelación en SWMM (Rossman, 2009). Este escurrimiento es posible calcularlo como la diferencia entre la capacidad del tramo abovedado y el caudal estimado por el modelo hidrológico en este estero, ambos valores entregados por el Plan Maestro.

El modelo Hec GeoRas es un modelo unidimensional con interfaz SIG (Sistema de Información Geográfica) que soluciona la ecuación dinámica de flujo gradualmente variado a través del método directo por etapas. Según este método, los cálculos se desarrollan para cada sección (perfil batimétrico) comenzando por una sección cuya condición de flujo es conocida. El modelo distingue entre condiciones hidráulicas de tipo río o torrente puesto que la dirección de avance del cálculo numérico depende de estas características. En el caso de tratarse de escurrimiento de tipo torrente, el flujo es rápido y de poca profundidad, y el cálculo del eje hidráulico debe avanzar hacia aguas abajo, definiendo una condición de borde a la entrada del dominio. En el caso de un escurrimiento de tipo río, el flujo se manifiesta con alturas mayores y velocidades menores. En esta situación, el cálculo del eje hidráulico debe realizarse a partir de una condición de borde ubicada aguas abajo, en la sección de salida del dominio. En este estudio el escurrimiento en todos los cauces y escenarios de probabilidad está condicionado por la altura de agua en las desembocaduras, lo que genera comportamientos de tipo río. Esta altura está definida por el nivel del mar en el caso del río Maipo y por la cota de escurrimiento en éste en los casos del estero El Sauce y San Juan. Se consideraron condiciones de borde representativas del peor escenario para la

confección de las cartas de riesgo por inundación. De este modo, para el río Maipo, la condición de borde corresponde al nivel de marea máxima propuesto por el Plan Maestro, el cual se asume constante en todos los escenarios de caudal para distintos periodos de retorno. El Plan Maestro propone para obras en estudio una cota de 1.5 m sobre el nivel medio del mar (NMM), lo cual corresponde a 1.6 m en WGS84 (SHOA, 2011). Esta cota incluye la marea astronómica máxima y un factor de seguridad por marea meteorológica. En los esteros El Sauce y San Juan la altura de agua en la desembocadura corresponde a la altura de agua en la sección del río Maipo correspondiente, dependiente del periodo de retorno analizado. El detalle de estas condiciones de borde se presenta en la sección de anexos.

### **Metodología para la Interpolación de Perfiles Batimétricos**

Los datos de batimetría levantados para este estudio han servido para complementar la información cartográfica disponible en cada localidad. Los nuevos perfiles han permitido incorporar información de los cauces naturales desde sus desembocaduras hasta aproximadamente 3 km aguas arriba.

Para construir el modelo hidráulico, se ha procedido a interpolar entre los datos de perfiles medidos y disponibles en el Plan Maestro de acuerdo a la metodología descrita a continuación.

#### **a) Interpolación dentro de cada perfil**

En cada perfil batimétrico, se identifican los vértices y el punto de cota más baja (talweg). Luego se discretiza entre los puntos medidos, generándose un número fijo de puntos a cada lado del talweg de manera de obtener una mejor resolución espacial en cada perfil. Se utiliza la misma cantidad de puntos en todos los perfiles.

Para obtener las coordenadas en planta de cada punto en el perfil, se calcula el vector de dirección del perfil  $\vec{d} = \vec{X}_2 - \vec{X}_1$ , en el plano, donde el vértice inicial es  $\vec{X}_1$  y el vértice final es  $\vec{X}_2$ . La distancia entre vértices se calcula como la norma del vector,  $dT = \|\vec{d}\|$ .

El perfil es discretizado en el plano (x,y) en dos etapas. Primero, se considera la distancia  $dS$ , desde el inicio hasta el talweg ( $\vec{X}_s$ ) y se generan  $Np$  puntos hasta  $\vec{X}_s$  utilizando una discretización  $ds_1 = dT_1 / Np$ , donde  $dT_1$  es la distancia entre  $\vec{X}_1$  y  $\vec{X}_s$ . Luego desde  $\vec{X}_s$  al otro vértice del perfil, se generan  $Np$  puntos utilizando una discretización igual a  $ds_2 = dT_2 / Np$ , todo esto con el objetivo de respetar la ubicación del talweg. Así, se obtienen las distancias desde el punto inicial hasta cada nuevo punto ( $S_i$ ) (Figura 42). Luego, tomando en cuenta la dirección unitaria del perfil y cada una de las distancias obtenidas, se proyecta en el plano (x,y) y se obtienen las coordenadas de los nuevos puntos como:



$$\vec{X}_i = \vec{X}_1 + S_i \frac{\vec{d}}{dT}$$

Por otra parte, para encontrar la altura correspondiente a cada punto, se interpola linealmente la altura de cada punto tomando como referencia la distancia de los puntos originales al punto inicial y su altura.

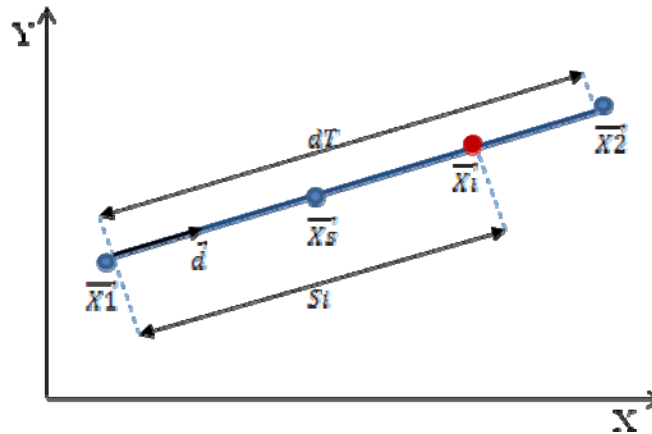


Figura 42: Vista en planta. Generación puntos en un perfil.

### b) Interpolación entre perfiles

La misma metodología anterior se utiliza para crear perfiles intermedios. Entre dos perfiles consecutivos se realiza una interpolación entre cada par de puntos correspondientes ( $\vec{X}_{p1}$  y  $\vec{X}_{p2}$ ). Se calcula la distancia entre ambos puntos  $d_{1-2}$  y la dirección  $\vec{d}_{1-2}$ , luego se discretiza el tramo en  $N_{ap}$  puntos y a partir de la distancia entre cada punto y el origen del tramo  $S_i$ , se proyecta cada vector en el plano Cartesiano para obtener las coordenadas de los nuevos puntos (Figura 43). Luego, se ajusta linealmente la altura en cada nuevo punto considerando la diferencia de altura entre los puntos extremos del tramo y la distancia a cada punto como:

$$Z_{i+1} = Z_i + \frac{Z_2 - Z_1}{d_{1-2}} S_i$$

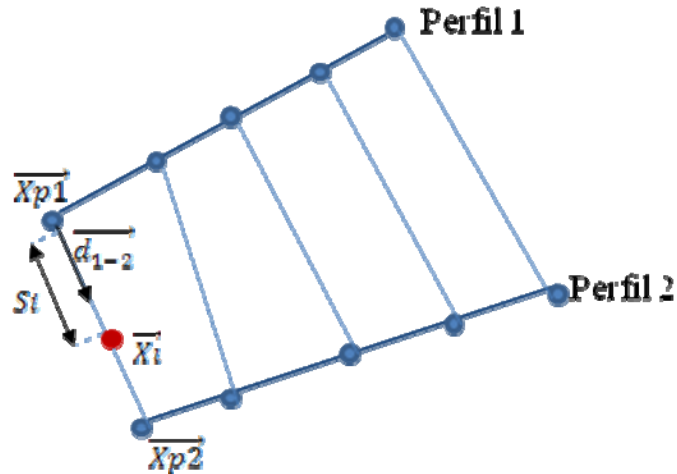


Figura 43: Vista en planta. Generación puntos entre perfiles.

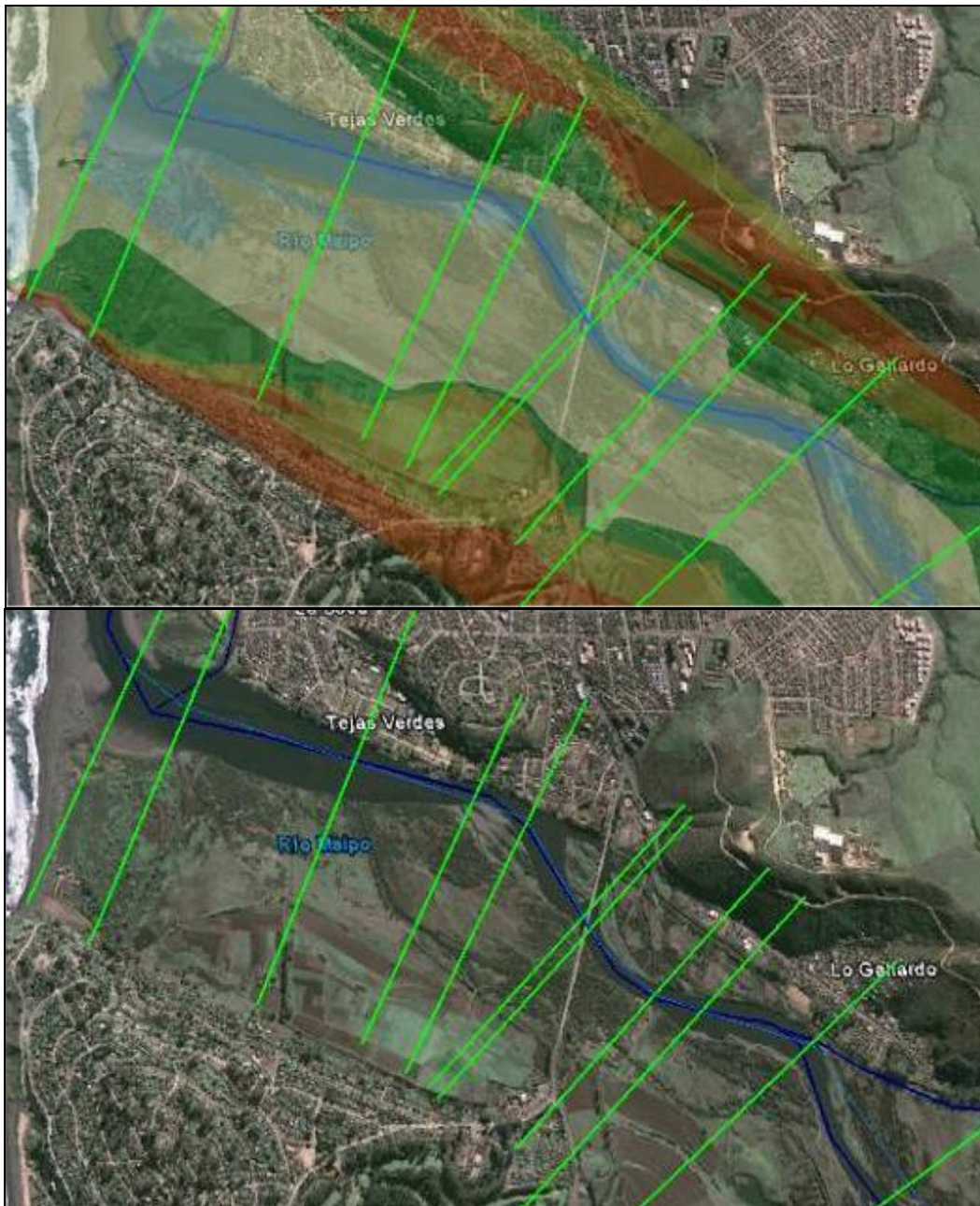
En cada cauce se utiliza  $N_p=50$  y  $N_{eq}=20$  obteniéndose así una mejor resolución espacial considerando la información medida en terreno. Este procedimiento permite complementar las cartas topográficas agregando puntos representativos de las variaciones batimétricas del cauce.

#### **Procesamiento de información topográfica**

Para la modelación se procesó la información topográfica tanto de las curvas de nivel como la interpolación resultante de los perfiles. Se utilizó el SIG para interpolar las curvas de nivel de las localidades y generar así un archivo raster con las elevaciones de los puntos entre curvas de nivel. La combinación de esta información con las elevaciones obtenidas de la interpolación de la batimetría, permite generar un archivo raster de elevaciones, el cual posee toda la topografía del lugar, incluyendo el lecho del cauce, sus inmediaciones y el sector poblado.

#### **Modelación en Hec GeoRas**

La información previamente descrita se incorporó a la herramienta Hec GeoRas, la cual se utilizó para el cálculo de los ejes hidráulicos asociados a los caudales obtenidos para distintos periodos de retorno. Esta herramienta permite el cálculo del eje hidráulico con el modelo hidráulico 1D Hec RAS, la visualización en ambiente SIG y la generación de polígonos de inundación en formato *shape*, los que pueden ser superpuestos a una imagen satelital de la zona. A modo de ejemplo, la Figura 44 muestra el diseño del archivo de entrada con las secciones transversales del cauce identificadas en el raster de elevaciones y en la foto satelital para el caso del río Maipo.



**Figura 44: Modelo topográfico utilizado para el diseño del eje principal y definición de secciones transversales en SIG, río Maipo.**

Una vez incorporada la batimetría a Hec Ras se define un coeficiente de Manning obtenido de la literatura (Chow, 1988) y del Plan Maestro, en los casos en que se encuentre especificado. Los distintos coeficientes de Manning usados a lo largo de cada cauce tanto para la sección principal como la planicie de inundación se presentan en los anexos. Además se ingresa la pendiente aguas

arriba del cauce (0,001 para el río Maipo y estero El Sauce, y 0,002 para el estero San Juan). Finalmente se realizan las modelaciones para los distintos caudales definidos por la modelación hidrológica, considerando las condiciones de borde aguas abajo según lo estipulado previamente.

#### **4.4 Resultados**

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos de la modelación hidráulica en tres grupos diferenciados. Un primer set de resultados tiene por objeto validar y/o verificación los modelos construidos para este estudio. Posteriormente se presentan los resultados que caracterizan la magnitud de la amenaza por inundación. Finalmente se presentan los resultados obtenidos luego de asumir un cierto crecimiento urbano a futuro en la zona de estudio.

##### **4.4.1 Validación de los Modelos Construidos**

Es posible comparar algunos resultados de la modelación con información proveniente del Plan Maestro a modo de validación. La Figura 46 muestra una comparación entre eje hidráulico del río Maipo modelado en el presente estudio con el eje hidráulico que se reporta en el Plan Maestro de San Antonio, también modelado en Hec-Ras. El perfil 6 corresponde al puente que une Llolleo y Santo Domingo, el cual no fue modelado por el Plan Maestro. Se aprecia un buen grado de similitud, particularmente en la zona cercana a la desembocadura.

Por otro lado, una segunda validación consistió en representar la zona de inundación del río Maipo para un día particular en el cual se hubiese tomado una foto digital. Con tal propósito se simuló con el modelo el caudal del 8 de octubre del 2009, y se comparó la zona de inundación con la observada en la foto obtenida desde Google Earth en esa fecha (Figura 45). Se aprecia una buena representación de la sección mojada, lo que fortalece en mayor medida la validación previamente señalada.



Figura 45. Modelación de crecidas, fecha 8 de octubre de 2009.

Finalmente, el Plan Maestro plantea una cota máxima permitida en las obras hidráulicas ubicadas a lo largo del cauce del estero El Sauce y San Juan. Esta cota se asocia a un cierto caudal, también propuesto por el Plan Maestro (Tabla 7). La Figura 48 y Figura 49 muestran una comparación entre la cota máxima permitida en cada obra hidráulica definida en el Plan Maestro y modelada bajo el caudal asociado, y la altura de agua resultante de la modelación preparada en este estudio utilizando los mismos caudales. Esta comparación se hace para cada uno de los perfiles identificados con una numeración ascendente. La comparación entre los resultados de los modelos y lo calculado en el Plan Maestro permite validar de buena manera estos modelos, por lo que la confiabilidad de estos últimos queda bastante bien demostrada.

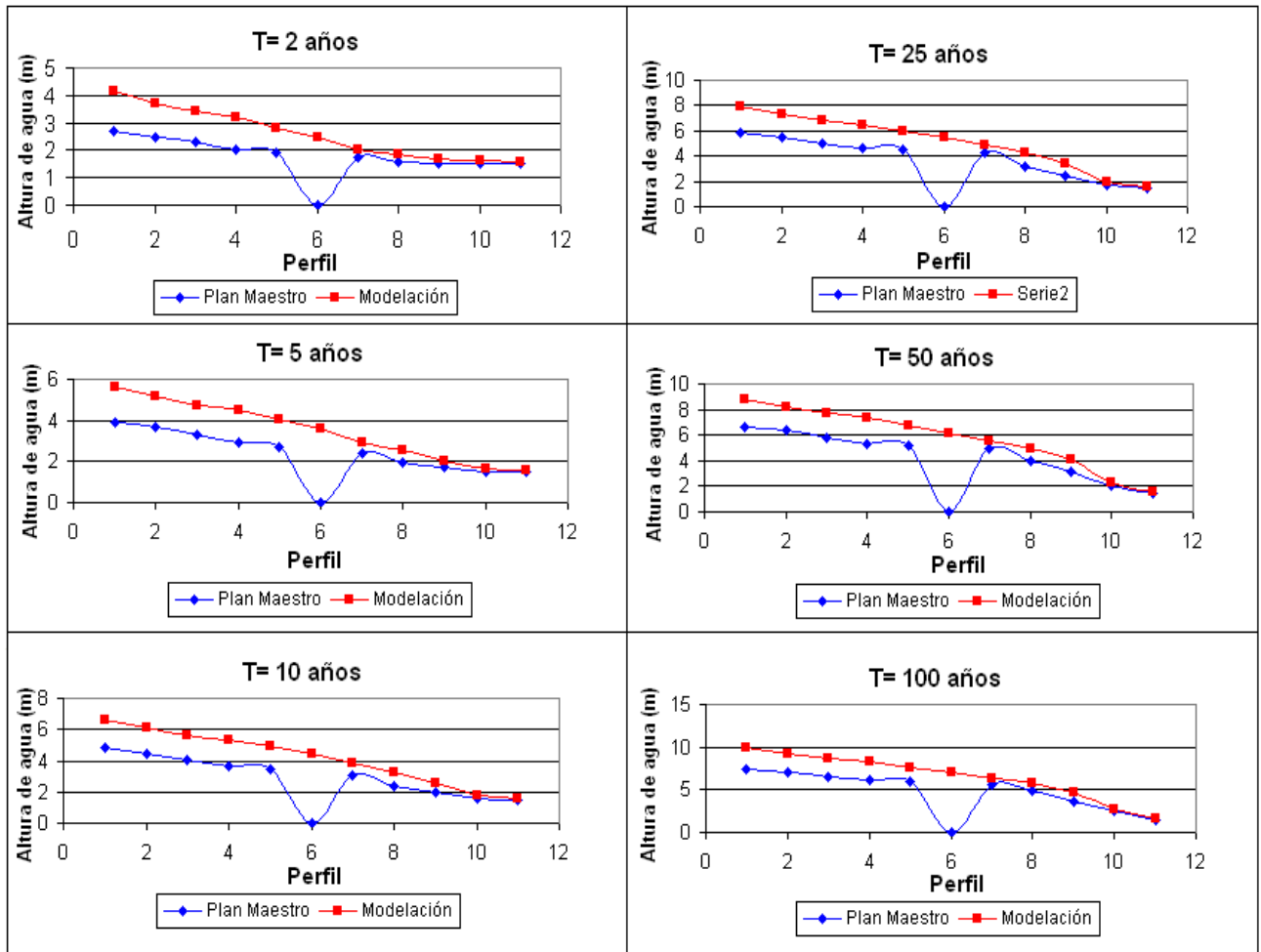


Figura 46: Comparación del eje hidráulico obtenido en este estudio comparado con el Plan Maestro (2003) en el río Maipo para distintos periodos de retorno.

\*Periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Fuente: Elaboración propia, 2011



Figura 47: Validación modelo. Río Maipo, 8 de octubre 2009.  
Fuente: Elaboración propia, 2011.

	Perfil	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Diferencia entre cota máxima permitida y altura modelada (m)
El Sauce	PT1-O (OA1-O puente)	25	2
	PT2-O	10	1
	PT3-O	15	1
	PT4-O (OA2-O)	25	1
	PT5-O (OA3-O)	374	-2
	PT6-O (OA4-O puente)	356	1
	PT7-O (OA5-O puente)	84	-
	PT8-O	29	1
	PT9-O	11	1
	PT10-O	33	0
	PT11-O	46	0
San Juan	PT1-Q	98	1
	PT2-Q	53	0
	PT3-Q	138	0
	PT4-Q (OA1-Q)	300	-1
	PT5-Q	224	-1
	PT6-Q	128	-1
	PT7-Q (OA2-Q)	247	-3
	PT9-Q	27	-2
	PT10-Q	33	-4
	PT11-Q	21	0

Tabla 7: Caudal usado para comparar cota máxima permitida y altura modelada. Se agrega la diferencia entre ambas alturas. Fuente: Elaboración propia, 2011.

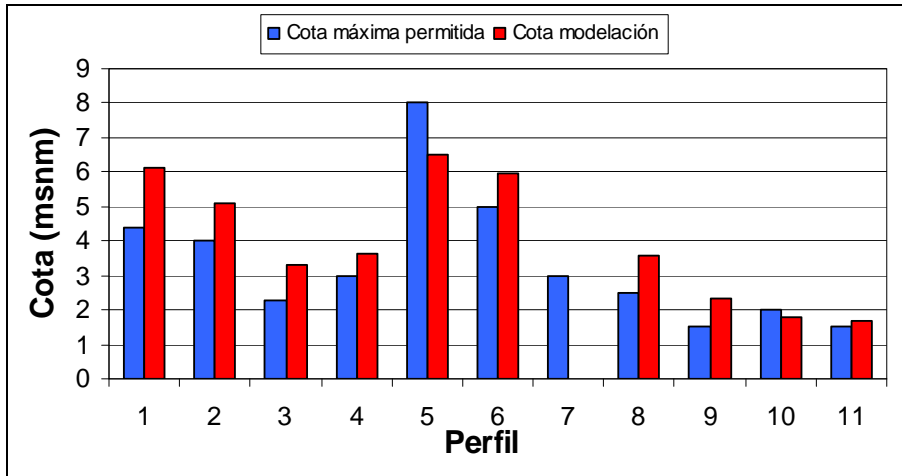


Figura 48: Comparación de alturas de agua, modelación hidráulica v/s estimación del Plan Maestro. Estero El Sauce.  
Fuente: Elaboración propia, 2011

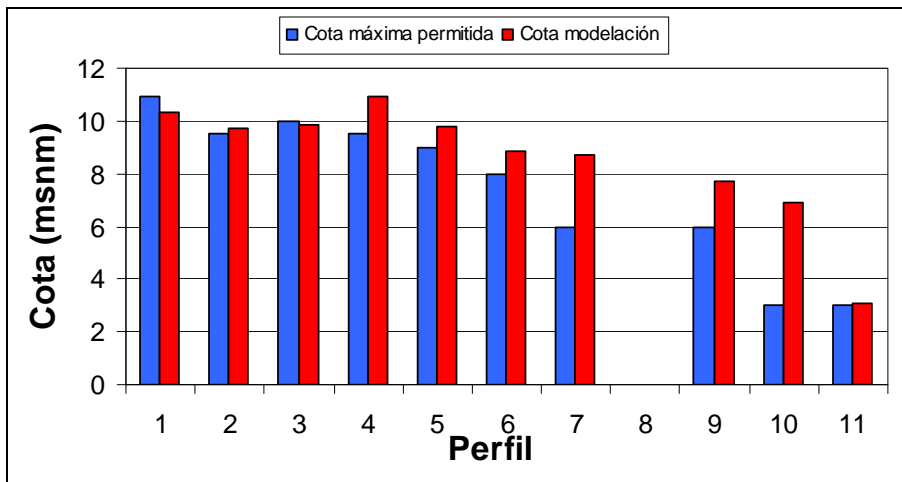


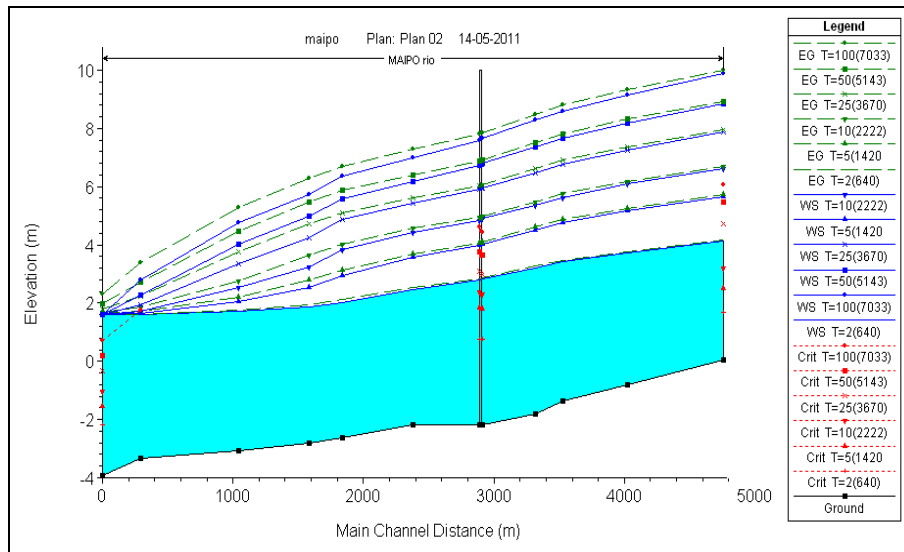
Figura 49: Comparación de alturas de agua, modelación hidráulica v/s estimación del Plan Maestro. Estero San Juan.  
Fuente: Elaboración propia, 2011

#### 4.4.2 Caracterización de la Amenaza por Inundación

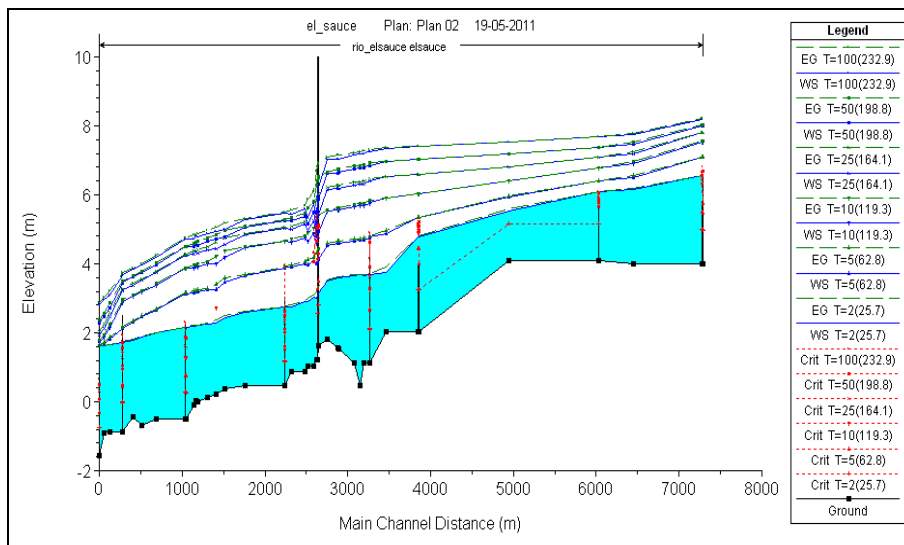
##### Ejes Hidráulicos

Una vez validados los modelos, se procede a la utilización de estos para simular eventos de crecida con distinta probabilidad de ocurrencia, las inundaciones correspondientes, y las principales características de éstas. Las Figura 50, Figura 51 y Figura 52 muestra los perfiles longitudinales de la profundidad del flujo en el río Maipo, El Sauce y San Juan respectivamente. En estos perfiles se indica la cota de la altura de agua (o eje hidráulico) para diferentes periodos de retorno (WS), la altura crítica (Crit) y la altura de energía (EG) del escurrimiento. Como referencia, se incluye la altura ocupada por el agua para 2 años de periodo de retorno y la presencia de infraestructura en los perfiles correspondientes.





**Figura 50: Eje hidráulico, altura crítica y altura de energía del escurrimiento, río Maipo.**  
\*Periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.  
Fuente: Elaboración propia, 2011



**Figura 51: Eje hidráulico, altura crítica y altura de energía del escurrimiento, estero El Sauce.**  
\*Periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.  
Fuente: Elaboración propia, 2011

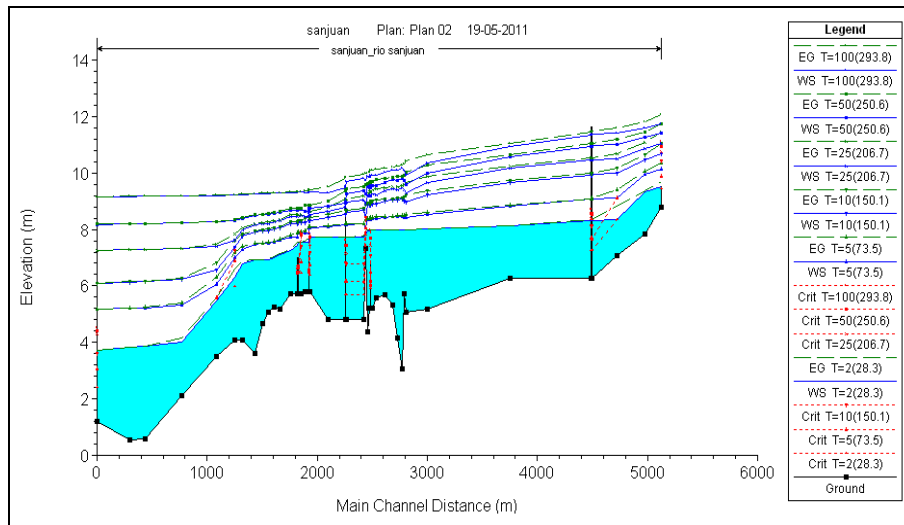


Figura 52: Eje hidráulico, altura crítica y altura de energía del escurrimiento, estero San Juan.  
\*Periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.  
Fuente: Elaboración propia, 2011

### Velocidad media en los perfiles transversales

La velocidad media en los perfiles transversales es otro de los resultados importantes a considerar, ya que permite identificar las zonas de los cauces con mayor potencial de erosión y socavación, fenómenos que pueden poner en riesgo a la población. La modelación origina velocidades no uniformes a lo largo de los cauces, alcanzando magnitudes significativas, cercanas a 5 m/s en algunas secciones. En la Figura 53, Figura 54 y Figura 55 se presenta la variación de velocidad a lo largo del cauce para el río Maipo, el estero El Sauce y el estero San Juan, siendo el perfil 1 el perfil ubicado en la sección inicial, aguas arriba del respectivo cauce.

Se puede apreciar que para los tres cursos las velocidades a lo largo del eje longitudinal crecen para crecidas de mayor periodo de retorno. Dependiendo de las condiciones locales de la batimetría, estos cambios de velocidades pueden ser más o menos significativos. Es interesante notar que los esteros El Sauce y San Juan están más controlados por el río Maipo de lo que éste está controlado por la altura del nivel del mar. Esto se debe a que la cota del nivel del mar se consideró fija para la simulación de todas las crecidas en el río Maipo (es decir, la condición de borde aguas abajo es constante), mientras que en el caso de los esteros, la condición de borde es variable según el periodo de retorno, ya que está dada por la altura del agua del río Maipo dependiente de este periodo de retorno.

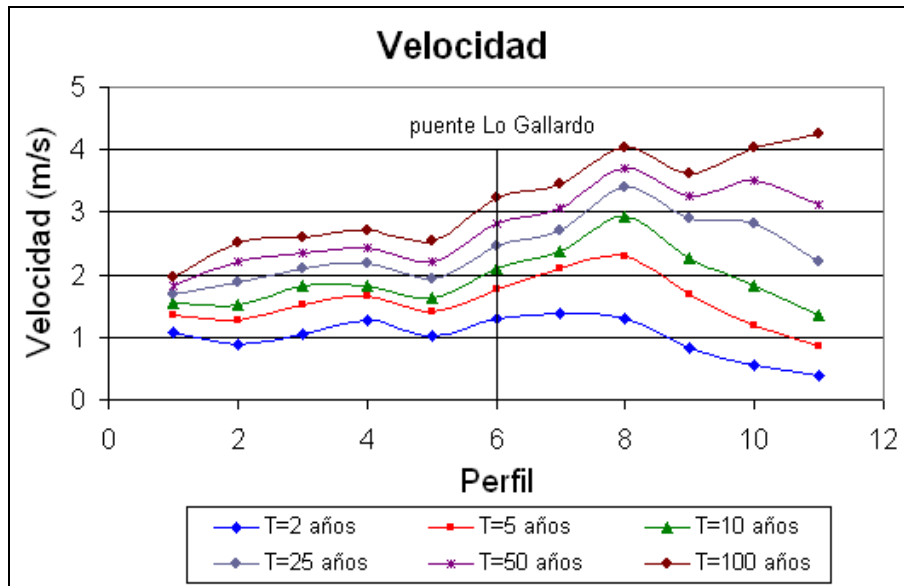


Figura 53: Velocidad en los perfiles transversales, río Maipo.  
Fuente: Elaboración propia, 2011.

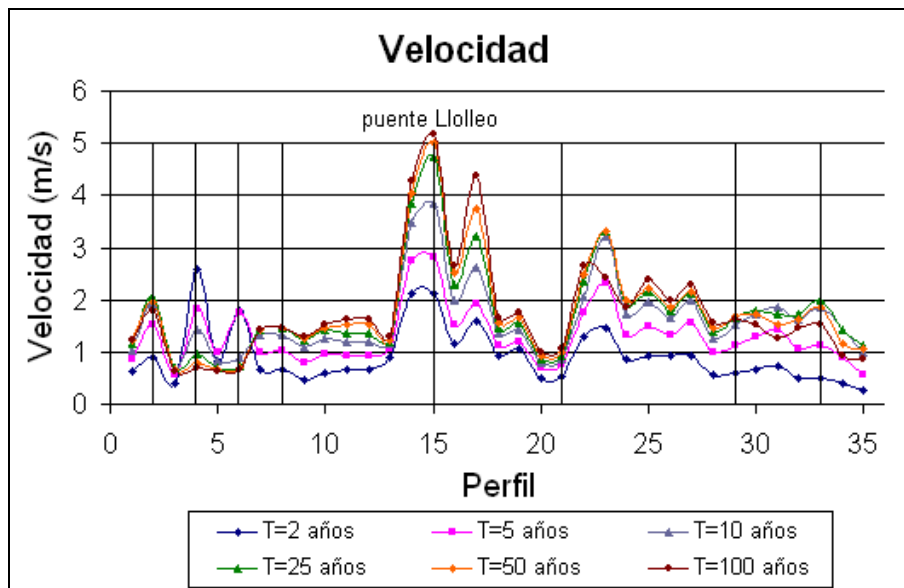


Figura 54: Velocidad en los perfiles transversales, estero El Sauce.  
Fuente: Elaboración propia, 2011.

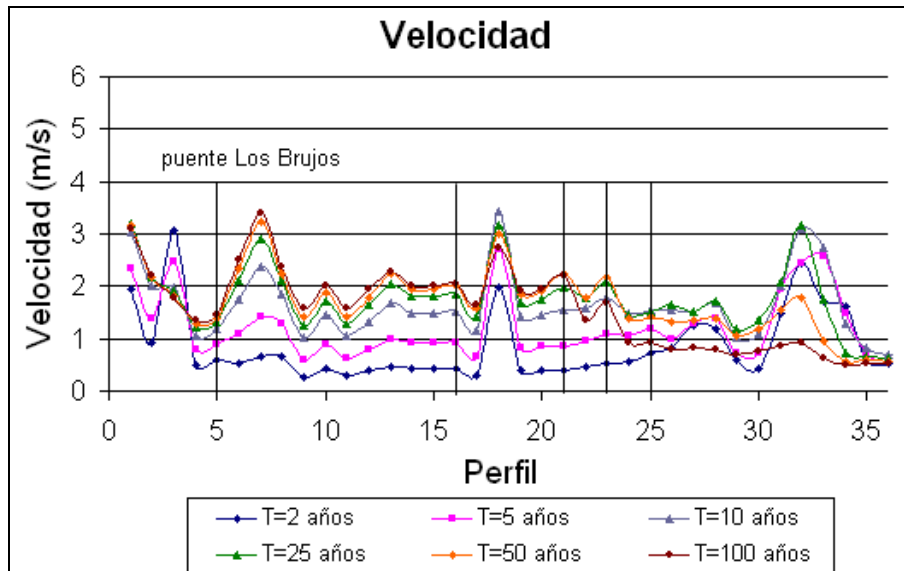


Figura 55: Velocidad en los perfiles transversales, estero San Juan.  
Fuente: Elaboración propia, 2011.

Además es importante conocer el rango de velocidades a los cuales se ve sometido el cauce en una crecida y el lugar donde se genera la máxima velocidad. En la Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10 se muestra la velocidad máxima y mínima resultante para cada período de retorno a lo largo del cauce respectivo.

	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años
Velocidad máxima	1,38	2,3	2,93	3,39	3,71	4,25
Velocidad mínima	0,39	0,86	1,34	1,69	1,81	1,96

Tabla 8: Rango de velocidades para distintos periodos de retorno, río Maipo.  
Fuente: Elaboración propia, 2011.

La velocidad máxima del escurrimiento en el río Maipo ocurre en el mismo perfil para los periodos de retorno superior a 5 años. Este perfil se ubica 700 m aguas abajo del puente Lo Gallardo, justo aguas arriba del poblado de Tejas Verdes. La Figura 56 muestra este perfil con una línea roja.

	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años
Velocidad máxima	2,57	2,83	3,83	4,74	5,01	5,16
Velocidad mínima	0,25	0,55	0,68	0,71	0,66	0,63

Tabla 9: Rango de velocidades para distintos periodos de retorno, estero El Sauce.  
Fuente: Elaboración propia, 2011.

La velocidad máxima del escurrimiento en el estero El Sauce ocurre en el mismo perfil para los periodos de retorno superior a 5 años. Este perfil se ubica aguas abajo del puente Llolleo. La Figura 57 muestra este perfil con una línea roja.

	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años
Velocidad máxima	3,05	2,71	3,42	3,21	3,23	3,41
Velocidad mínima	0,27	0,55	0,69	0,61	0,57	0,48

Tabla 10: Rango de velocidades para distintos periodos de retorno, estero San Juan.

Fuente: Elaboración propia, 2011.

La velocidad máxima del escurrimiento en el estero San Juan se distribuye en 3 perfiles para los distintos periodos de retorno. Los perfiles se ubican aguas arriba de la laguna grande, en la barrera ubicada aguas abajo de la laguna chica y 200 m aguas arriba del lugar donde el estero prácticamente bordea el camino a San Juan. La Figura 58 muestra estos perfiles con una línea roja.

### Áreas de Inundación

Las Figura 56, Figura 57 y Figura 58 presentan las áreas de inundación de las localidades de la comuna de San Antonio, para crecidas con distintas probabilidades de ocurrencia (es decir, periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años). Estos mapas por lo tanto corresponden a los mapas de amenaza por inundación, los que serán posteriormente cruzados con los mapas de vulnerabilidad para originar los mapas de riesgo correspondientes. La confección de estos mapas de inundación no es simple dado que la resolución de la información espacial disponible no permite modelar en detalle el área inundada en sectores donde el perfil del cauce sea muy plano o presente cotas de terreno más bajas a la cota de inundación. Esta situación ocurre con el estero El Sauce en el sector de Brisamar, y con el estero San Juan y el río Maipo, en el sector de los cultivos. Por lo tanto, los mapas de inundación obtenidos de Hec GeorAS tuvieron que ser modificados en estos sectores en base a los antecedentes topográficos y a la experiencia del modelador.

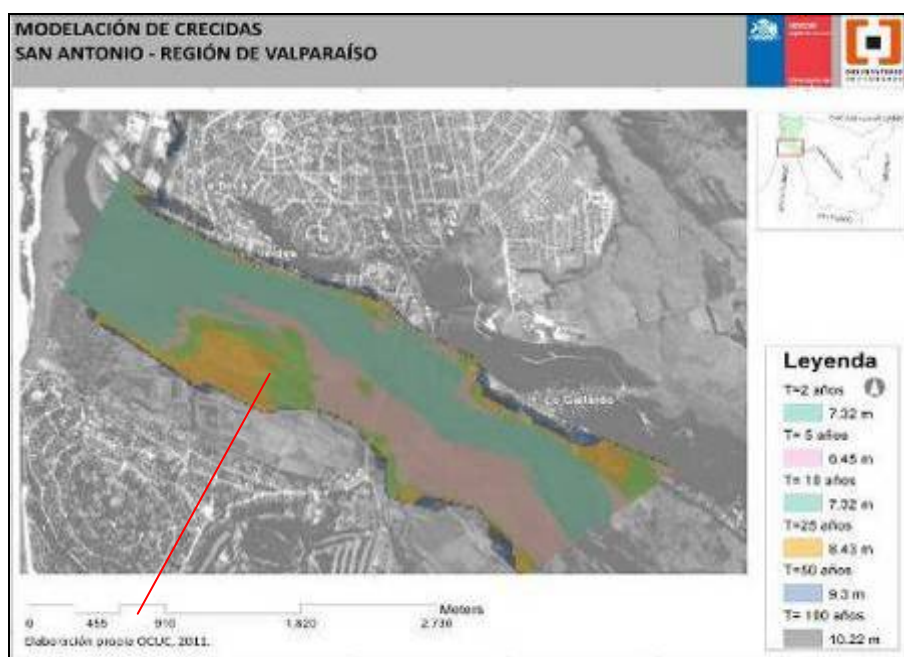


Figura 56: Áreas de inundación del río Maipo.

Fuente: Elaboración propia, 2011.

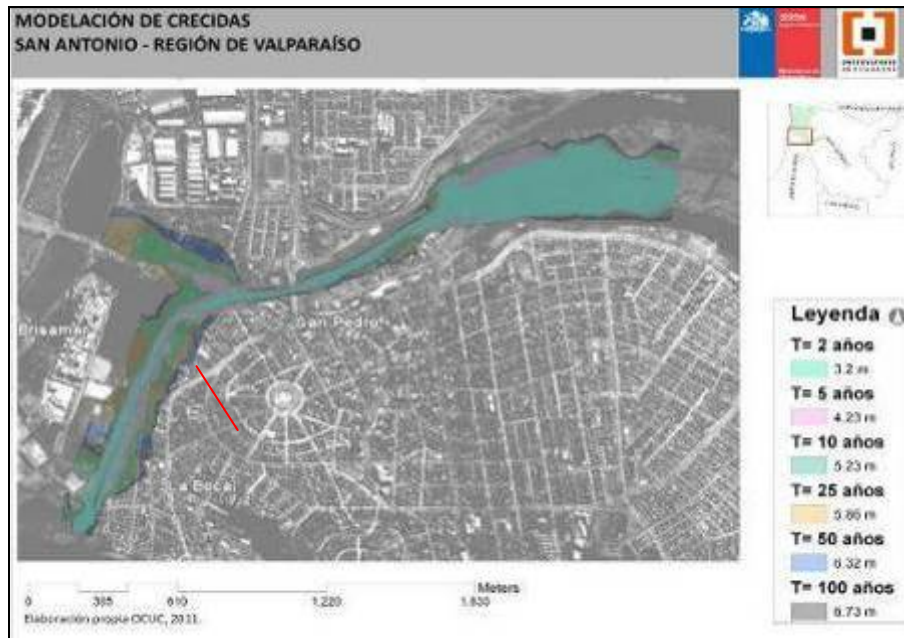


Figura 57: Áreas de inundación del estero El Sauce.  
Fuente: Elaboración propia, 2011.

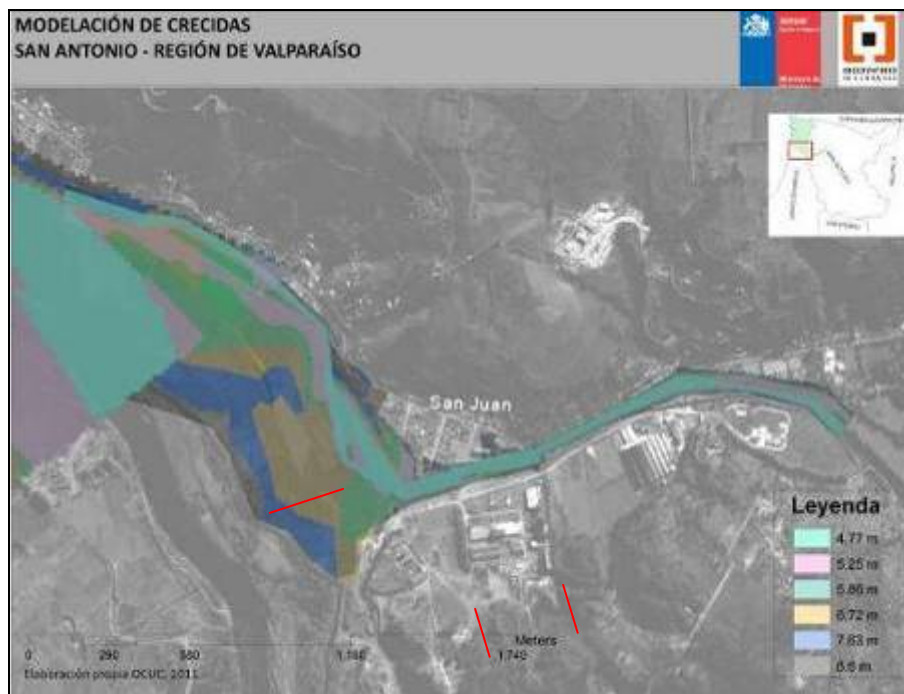


Figura 58: Áreas de inundación del estero San Juan.  
Fuente: Elaboración propia, 2011.

**Modelación Hidráulica en el sector norte de San Antonio, Estero Arévalo**

El último sector de interés a modelar corresponde al tramo final del estero Arévalo, de 1500 m, el cual atraviesa la zona urbana central de la ciudad, siendo canalizado unos 510 m y abovedado los

Etapas 2. Diagnóstico Final y Modelaciones  
Estudio de Riesgo de la comuna de San Antonio

últimos 1000 m aproximadamente. El principal punto de interés es la sección de entrada al tramo abovedado, dado que éste puede entrar en presión y generar un efecto de remanso que podría provocar una inundación a la entrada de dicho tramo. Esta problemática fue estudiada por el Plan Maestro para caudales máximos con distintos periodos de retorno. La Tabla 11 presenta la capacidad del cauce en el tramo canalizado y abovedado y los caudales para diferentes periodos de retorno propuestos por el Plan Maestro.

De la Tabla 11 se observa que la capacidad es excedida sólo para el caudal de 100 años de periodo de retorno en el tramo canalizado. La diferencia entre la capacidad y el caudal de 100 años de periodo de retorno es de aproximadamente 1 m<sup>3</sup>/s, el cual debe escurrir por las calles de la ciudad. Se desarrolló un modelo SWMM simple para evaluar la altura de agua que este desborde originaría por la principal avenida aguas abajo del sector de desborde. Para la modelación se considera la geometría entregada por el Plan Maestro de la calle Pedro Montt, principal receptora de este escurrimiento. El resultado de la modelación entrega una altura de agua igual a 13 cm, es decir, el agua alcanza el nivel de solera pero no debiese entrar a las viviendas o establecimientos comerciales.

Perfil Transversal	Capacidad (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s) para diferentes periodos de retorno (años)					
		2	5	10	20	50	100
Canalización	17	5,6	8,3	11,6	14,1	16,1	17,9
Abovedamiento	20	5,6	8,3	11,6	14,1	16,1	17,9

Tabla 11: Capacidad y caudales para distintos periodos de retorno, estero Arévalo.  
Fuente: Plan Maestro, 2003.

### ***Discusión de los resultados sobre amenazas por inundación***

Los resultados evidencian el desborde de los cursos de aguas, tal como lo mencionan los antecedentes históricos en el informe anterior (Antecedentes y Pre-Diagnóstico). Los sectores aledaños al río Maipo, es decir, Tejas Verdes, Lo Gallardo y San Juan, presentan inundaciones con caudales mayores al caudal de 10 años de periodo de retorno. Las zonas de inundación se marcan en la Figura 56, Figura 57 y Figura 58. A partir del caudal de 25 años de periodo de retorno se observa una importante entrada del escurrimiento hacia estas localidades. El sector de Tejas Verdes es el poblado más vulnerable a estas inundaciones ya que la velocidad del escurrimiento aumenta justo aguas arriba de este sector.

Las zonas aledañas al estero El Sauce, es decir, La Boca, Brisamar, Juan Aspee y San Pedro, presentan inundaciones con caudales mayores al de 5 años de periodo de retorno, e incluso se presentan inundaciones con el caudal de 2 años de periodo de retorno en las casas ubicadas a 700 m aguas arriba del puente Lolloe, en el sector de San Pedro. Al igual que en los sectores aledaños al río Maipo, a partir del caudal de 25 años de periodo de retorno se observa una importante entrada del escurrimiento hacia los sectores urbanos cercanos al río. El sector aguas abajo del puente Lolloe, es decir, el poblado de Juan Aspee hacia el norte y San Pedro hacia el sur, son los

sectores más vulnerables a estas inundaciones ya que se producen las velocidades más altas del escurrimiento.

Los sectores aledaños al estero San Juan, es decir, Lo Gallardo y San Juan, presentan inundaciones con caudales mayores al caudal de 10 años periodo de retorno, e incluso se presentan inundaciones con el caudal de 2 y 5 años de periodo de retorno en algunas casas cercanas al badén que se extiende de la calle Sótero del Río, en el poblado de San Juan. A partir del caudal de 10 años de periodo de retorno se observa una importante entrada del escurrimiento hacia las calles de San Juan y a los cultivos ubicados entre el río Maipo y el estero. El caudal de periodo de retorno igual a 100 años provoca inundaciones en gran parte del sector de San Juan, mostrando desbordes de las lagunas existentes. Justamente, los sectores más vulnerables son los cercanos a estas lagunas, ya que aguas arriba y aguas abajo de ellas se observan las mayores velocidades. La modelación coincide con los comentarios de vecinos del sector que culpan a estas nuevas lagunas de los grandes desbordes. Otro sector vulnerable es el de los cultivos que se ubican entre el río Maipo y el estero San Juan ya que se observan grandes velocidades en el estero. Además, la entrada de agua al sector producto de desbordes en el estero se acompaña a la entrada de agua proveniente del río Maipo para periodos de retorno 10, 25, 50 y 100 años.

Los antecedentes históricos de desbordes del estero indican que el agua escurre por las calles Pedro Montt y Centenario. No se registran antecedentes históricos de inundaciones en casas por desborde del estero, sólo en los casos que impliquen eventos de remoción en masa. La modelación evidencia los antecedentes, entregando una altura de agua de 13 cm en el escurrimiento de estas calles para el caudal de 100 años de periodo de retorno. Sin embargo es importante tener en cuenta que la modelación considera el flujo de agua limpia, sin basura u otros elementos sólidos de tamaño significativo. Estos elementos podrían tapar la sección cerrada del estero y generar una salida de agua hacia las calles con caudales menores a los considerados como “seguros” a partir de la modelación. Eventualmente se podría desarrollar una modelación más compleja para representar este fenómeno, pero la valide de los resultados es dudosa. Ante esto, lo más simple y menos riesgoso es mantener limpios los distintos tramos del estero Arévalos y sus distintos efluentes.

Es importante también indicar que la resolución y nivel de detalle de la topografía disponible para esta zona, que tampoco incluye casas ni muros, puede ocasionar diferencias entre las áreas de inundación real y modelada. Aún así, se generó la mejor aproximación de la topografía real disponible para determinar las áreas de inundación.

#### **4.4.3 Efectos de la Posible Expansión Demográfica en la Amenaza por Inundación**

El Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO) de San Antonio (IMSA, 2008) estimó 2660 há de superficie urbana para el año 1991 y 4336 há para el año 2001. Esto implica una tasa de crecimiento de suelo urbano de 167 há/año, la que se puede distribuir en los distintos sectores de la comuna según su porcentaje de superficie urbana (Tabla 12).



	% de superficie urbana	Hectáreas urbanas por año
Total comuna		167
San Antonio	23,5	39,25
Llolleo	43	71,81
Barrancas	34,5	57,62

**Tabla 12: Capacidad y caudales para distintos periodos de retorno, estero Arévalo.**

Fuente: Plan Maestro, 2003; IMSA, 2008.

Con estas tasas de crecimiento urbano es posible lograr simular en forma bastante simple los caudales máximos en un escenario futuro con mayor desarrollo urbano al actual. Con tal propósito se utilizó el método racional, el cual permite estimar el caudal máximo asociado a un periodo de retorno en función del área de la cuenca, una intensidad definida para el periodo de retorno, y un coeficiente de escorrentía C o porción de la precipitación que se transforma en escurrimiento. En concreto se utilizó este modelo y los datos presentados en la Tabla 12 para estimar valores de C en un horizonte de 10 años. El coeficiente C futuro se estima considerando la futura área residencial en las distintas zonas de la comuna, a la cual se le asignó un coeficiente C de 0,4 según lo propuesto por el Plan Maestro. La Tabla 13 muestra el valor futuro estimado de C y el respectivo caudal máximo simulado con el método racional. Se compara el valor de C estimado con los propuestos por el Plan Maestro. Desafortunadamente el cálculo de estos valores y el horizonte de tiempo considerado no son explicados, por lo que los valores del Plan Maestro sólo sirven como una referencia.

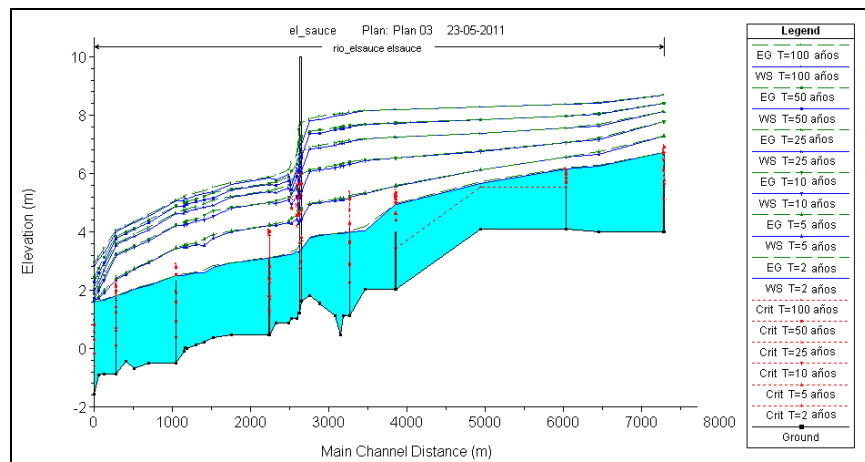
Cauce	Área (km <sup>2</sup> )	C actual	Periodo de retorno	Caudal Actual (m <sup>3</sup> /s)	i (mm/hr)	C futuro a 10 años	Caudal Futuro (m <sup>3</sup> /s)
Estero El Sauce	119,4	0,33	2	<b>25,7</b>	2,3	0,44 (0,37 Plan Maestro)	<b>34,1</b>
			5	<b>62,8</b>	5,7		<b>83,4</b>
			10	<b>119,3</b>	10,9		<b>158,5</b>
			25	<b>164,1</b>	15,0		<b>218,0</b>
			50	<b>198,8</b>	18,2		<b>264,1</b>
			100	<b>232,9</b>	21,3		<b>309,4</b>
Estero San Juan	116	0,34	2	<b>28,3</b>	2,6	0,36 (0,36 Plan Maestro)	<b>30,4</b>
			5	<b>73,5</b>	6,7		<b>78,9</b>
			10	<b>150,1</b>	13,7		<b>161,0</b>
			25	<b>206,7</b>	18,9		<b>221,8</b>
			50	<b>250,6</b>	22,9		<b>268,9</b>
			100	<b>293,8</b>	26,8		<b>315,2</b>
Estero Arévalo	6,01	0,3	2	<b>5,6</b>	11,2	0,56 (0,49 Plan Maestro)	<b>10,5</b>
			5	<b>8,3</b>	16,6		<b>15,5</b>
			10	<b>11,6</b>	23,2		<b>21,7</b>
			25	<b>14,1</b>	28,2		<b>26,4</b>
			50	<b>16,1</b>	32,1		<b>30,1</b>
			100	<b>17,9</b>	35,7		<b>33,5</b>

**Tabla 13: Caudales estimados a 10 años.**

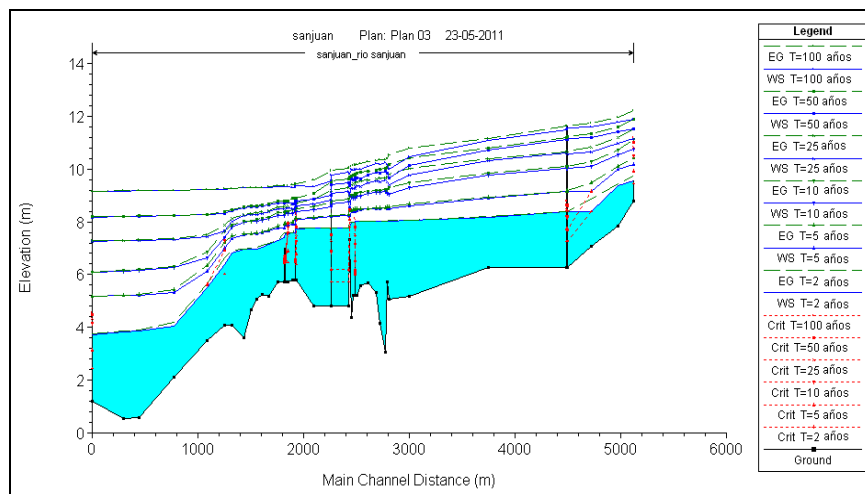
Fuente: Elaboración propia, 2011.

Se aprecia como los caudales en el Estero Arévelo aumentarían bastante con este escenario de desarrollo urbano futuro. Eventualmente las capacidades de los tramos canalizado y abovedado (17 y 20 m<sup>3</sup>/s respectivamente) se verían sobrepasadas con las crecidas de 10 años de periodo de retorno, teniéndose que para eventos de 25 años de periodo de retorno o mayores los flujos podrían entrar en las casas de las calles aledañas. Se hace fundamental entonces una buena planificación urbana a futuro de modo de considerar obras de drenaje que eviten generar los caudales extras aquí simulados. La sección de recomendaciones discute el tema con más detalle.

Los caudales futuros estimados en los esteros El Sauce y San Juan se utilizaron en los modelos hidráulicos para calcular las nuevas zonas de inundación y sus principales características. Los nuevos ejes hidráulicos, con el perfil de la elevación del agua a lo largo del cauce se presentan en la Figura 59 y Figura 60 para El Sauce y San Juan.



**Figura 59: Eje hidráulico, altura crítica y altura de energía del escurrimiento, condición futura estero El Sauce.\*Periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Fuente: Elaboración propia, 2011**



**Figura 60: Eje hidráulico, altura crítica y altura de energía del escurrimiento, condición futura estero San Juan.\*Periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Fuente: Elaboración propia, 2011**

Las Figura 61 y Figura 62 presentan la velocidad del escurrimiento en condiciones futuras a lo largo del cauce, mientras que la Tabla 14 y la Tabla 15 presentan la velocidad máxima y mínima a lo largo del cauce.

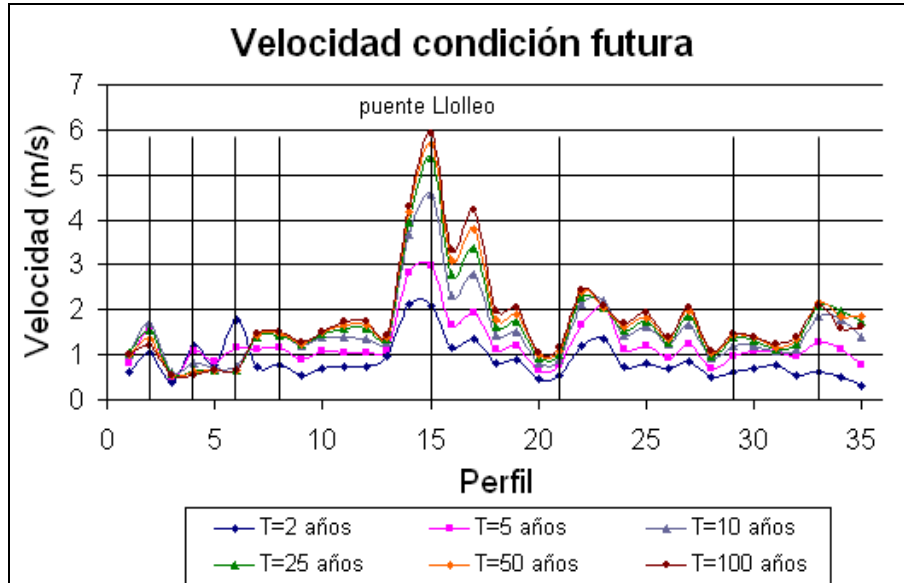


Figura 61: Velocidad en los perfiles transversales, condición futura estero El Sauce.  
Fuente: Elaboración propia, 2011.

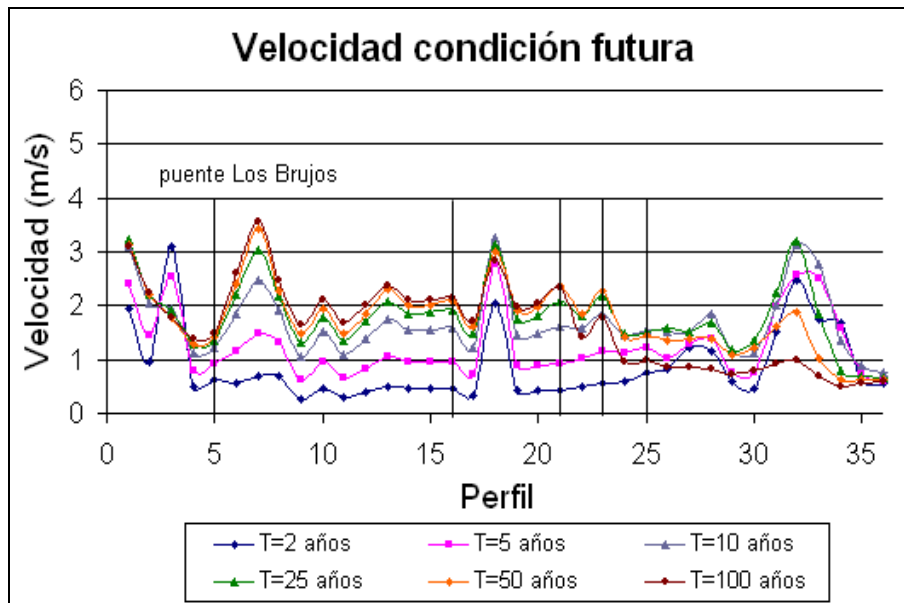


Figura 62: Velocidad en los perfiles transversales, condición futura estero San Juan.  
Fuente: Elaboración propia, 2011.

	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años
Velocidad máxima Condición actual	2,57	2,83	3,83	4,74	5,01	5,16
Velocidad máxima Condición futura	2,14	2,98	4,55	5,37	5,69	5,93
Velocidad mínima Condición futura	0,32	0,52	0,61	0,58	0,56	0,54

**Tabla 14: Rango de velocidades para distintos periodos de retorno, condición futura estero El Sauce.**  
Fuente: Elaboración propia, 2011.

La velocidad máxima del escurrimiento en el estero El Sauce, bajo la condición futura, ocurre en el mismo perfil para los periodos de retorno superior a 5 años, al igual que en la condición actual analizada anteriormente. Este perfil se ubica aguas abajo del puente Lolloe. Las velocidades de la condición futura aumentan en relación a la condición actual para caudales superiores al caudal de 10 años de periodo de retorno.

	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años
Velocidad máxima Condición actual	3,05	2,71	3,42	3,21	3,23	3,41
Velocidad máxima Condición futura	3,1	2,78	3,26	3,23	3,44	3,57
Velocidad mínima Condición futura	0,28	0,59	0,74	0,66	0,61	0,51

**Tabla 15: Rango de velocidades para distintos periodos de retorno, estero San Juan.**  
Fuente: Elaboración propia, 2011.

La velocidad máxima del escurrimiento en el estero San Juan, bajo la condición futura, se distribuye en 3 perfiles para los distintos periodos de retorno, al igual que en la condición actual. Los perfiles se ubican aguas arriba de la laguna grande, en la barrera ubicada aguas abajo de la laguna chica y 200 m aguas arriba del lugar donde el estero prácticamente bordea el camino a San Juan. Las velocidades de la condición futura son levemente más altas en relación a la condición actual en la mayoría de los casos.

La superficie inundada por los caudales de la condición futura es similar a la inundación de la situación actual en la mayoría de los casos. La zona de inundación con el caudal futuro de 10 años de periodo de retorno es la que más se diferencia de su homóloga para las condiciones actuales. Adicionalmente, en el estero San Juan se observan cambios para el caudal de 100 años de periodo de retorno. La Figura 63, Figura 64 y Figura 65 muestran la diferencia en el área de inundación entre la condición actual y futura para el caudal de 10 años de periodo de retorno en el estero El Sauce y para el caudal de 10 y 100 años de periodo de retorno en el estero San Juan, respectivamente.

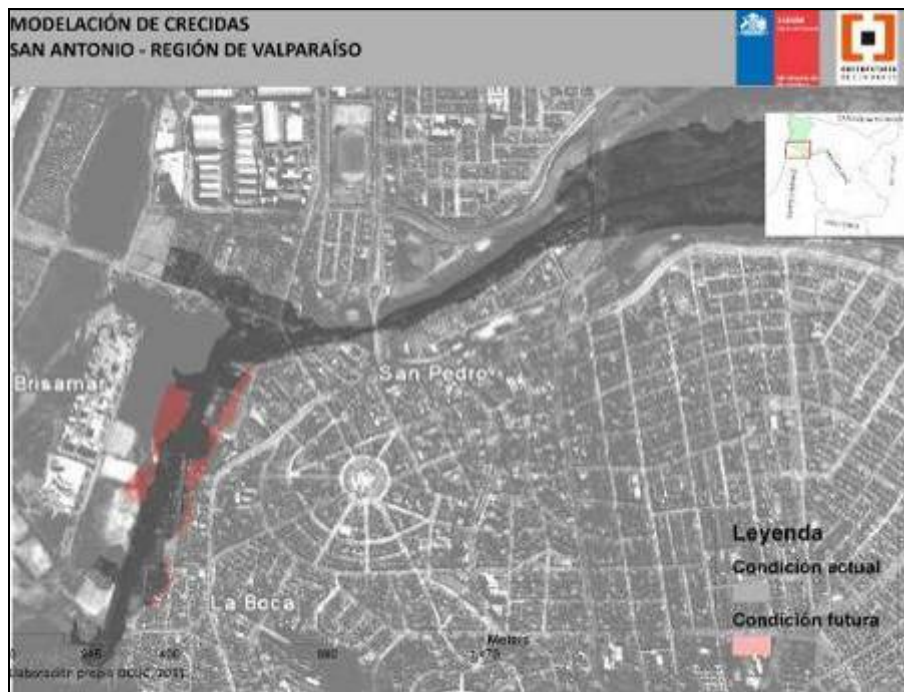


Figura 63: Superficie inundada para 10 años de periodo de retorno, condición futura estero El Sauce.  
Fuente: Elaboración propia, 2011.



Figura 64: Superficie inundada para 10 años de periodo de retorno, condición futura estero San Juan.  
Fuente: Elaboración propia, 2011.



Figura 65: Superficie inundada para 100 años de periodo de retorno, condición futura estero San Juan.  
Fuente: Elaboración propia, 2011.

#### 4.5 Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en la modelación, se proponen las siguientes recomendaciones relacionadas con la amenaza de inundación fluvial. Éstas podrían verse modificadas y/o complementadas una vez incorporados los aspectos de vulnerabilidad en la determinación de riesgos por inundación.

- Se recomienda definir áreas de regulación en la zona de inundación. Por ejemplo, se propone definir (1) una zona de prohibición donde sólo pueda haber infraestructura propia de uso de cauces (por ejemplo muelles o puentes), (2) una zona de restricción de uso limitado a actividades específicas, pero no a vivienda u otra infraestructura relevante. Ejemplos de obras que pueden considerarse en esta zona son los recintos deportivos, parques, etc. Finalmente se propone definir una tercera zona de advertencia que puede ser utilizada para la construcción de viviendas bajo la responsabilidad de los habitantes. Esta zona debe tener una evacuación preestablecida y debe ser continuamente monitoreada y mantenida.
- Se recomienda no construir o urbanizar al interior de la zona de inundación para la crecida de 100 años de periodo de retorno. Por otra parte, se recomienda trasladar las viviendas que se encuentran actualmente dentro de esta zona, y dejar estos espacios como zonas de áreas verdes de ocupación eventual.

- Se deben realizar inspecciones periódicas y mantener limpios los cauces y sus alrededores para mantener la capacidad hidráulica de transportar los caudales de crecida sin aumentar el área inundada. En particular se recomienda fuertemente el saneamiento del estero El Sauce, el cual se encuentra fuertemente contaminado, significando un alto riesgo para la comunidad.
- Mantener limpios y en buenas condiciones estructurales las obras de canalización, abovedamientos, sumideros u otras obras hidráulicas existente (barreras, puentes, badenes). Los antecedentes del informe anterior (Antecedentes y Pre-Diagnóstico) evidencian problemas en este sentido.
- Se recomienda fomentar fuertemente el uso de técnicas de infiltración y almacenamiento para controlar la escorrentía de futuras áreas urbanas por desarrollar en el área de estudio. Existe una amplia variedad de posibilidades técnicas conocidas como Técnicas de Gestión de Escurrimientos Urbanos, o Técnicas alternativas, que permiten limitar los caudales generados por sectores urbanos a los caudales generados antes de impermeabilizar (MINVU y DICTUC 1996). Con la aplicación de estas soluciones se evita aumentar los caudales drenados por los esteros y cauces durante épocas de crecida, y se facilitan futuras medidas tendientes a restaurar los cauces.
- También es recomendable una revisión y actualización de los Planos Hidrográficos del Plan Maestro de Aguas Lluvias, ya que se observaron incongruencias entre éstos y los informes del mismo documento. Por ejemplo, la ubicación de los puentes en los perfiles 6 y 7 del estero El Sauce según los planos del Plan Maestro, no coinciden con lo señalado en el informe escrito. También se observaron diferencias de cotas entre los perfiles entregados por el Plan Maestro y las mediciones en terreno realizadas especialmente para este estudio. Además, el perfil longitudinal de los cauces y los perfiles transversales no están georreferenciados.

## 5 MODELACIÓN SÍSMICA

En este apartado se efectuó un análisis de correlación entre la pre-clasificación sísmica presentada en el informe anterior y las características geológicas del área de estudio, los resultados del estudio de Geotecnia Consultores, y las series de suelo presentes en el área. Del resultado de este análisis se concluye que la única propiedad que permite efectuar una clasificación sísmica preliminar y aproximada para toda el área de estudio, es la que corresponde a las series de suelos, cuyos resultados se detallan en la siguiente sección. Es muy importante entender que esta pre-clasificación sísmica es aproximada y preliminar, y que en ningún caso intenta reemplazar la clasificación sísmica que pueda lograrse en mediciones específicas in-situ de las propiedades de los suelos de fundación. En este sentido, la pre-clasificación propuesta debe considerarse sólo como una guía general aproximada de los tipos de suelos de fundación presentes en la zona de estudio.

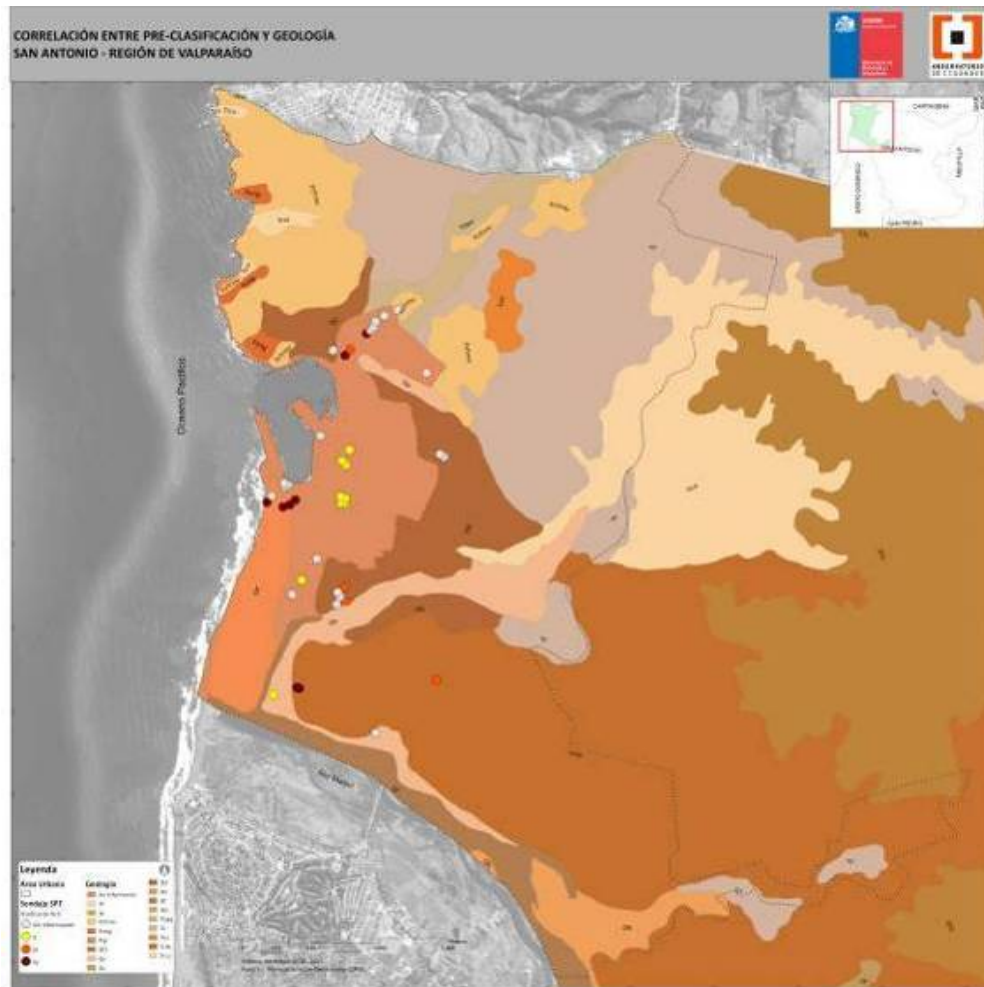
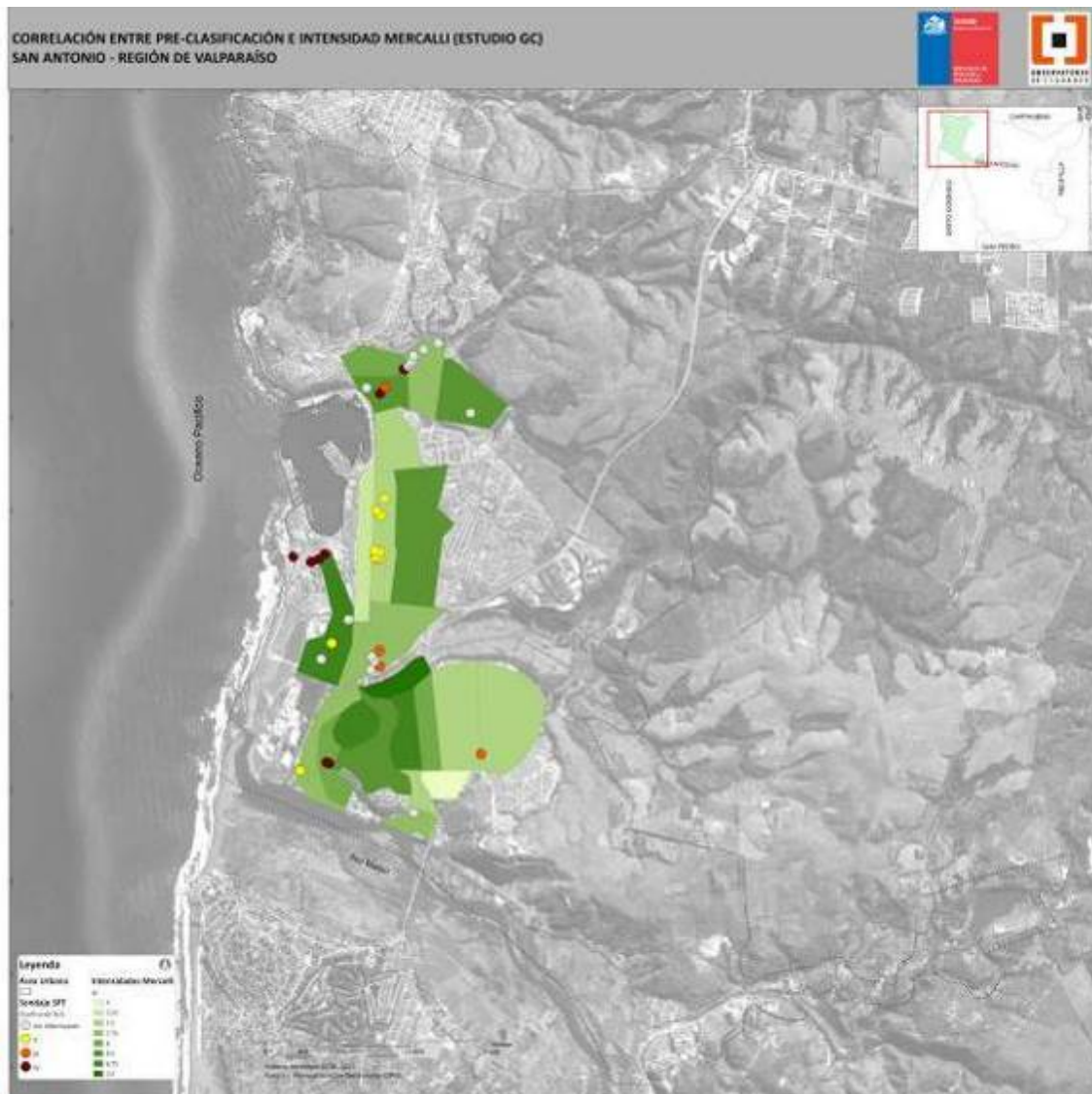


Figura 66. Correlación entre pre-clasificación y geología.



Tal como se observa en la figura anterior, no fue posible correlacionar los resultados del primer informe con los de geología, porque en las zonas donde se hizo la pre-clasificación (i.e., en las zonas con pozos donde se midieron propiedades in-situ) el plano geológico aparece como "Sin Información".

Por otra parte, y tal como se muestra en la Figura 67, se observa correlación entre los resultados del primer informe y los reportados por GC como Intensidades Mercalli (círculos café oscuro se correlacionan con zonas verde oscuro, y círculos café claro con zonas verde claro). Lamentablemente este es un resultado que no es posible extrapolar a otras zonas del área de interés, pues en esas otras áreas no hay pozos de donde extraer datos como para efectuar esta extrapolación.



**Figura 67. Correlación entre pre-clasificación e intensidad Mercalli (estudio GC).**

De comparar las series de suelos con la pre-clasificación del primer informe (Figura 68), se observa cierta correlación, la que finalmente es utilizada para generar la pre-clasificación sísmica para el área completa (ver sección siguiente).

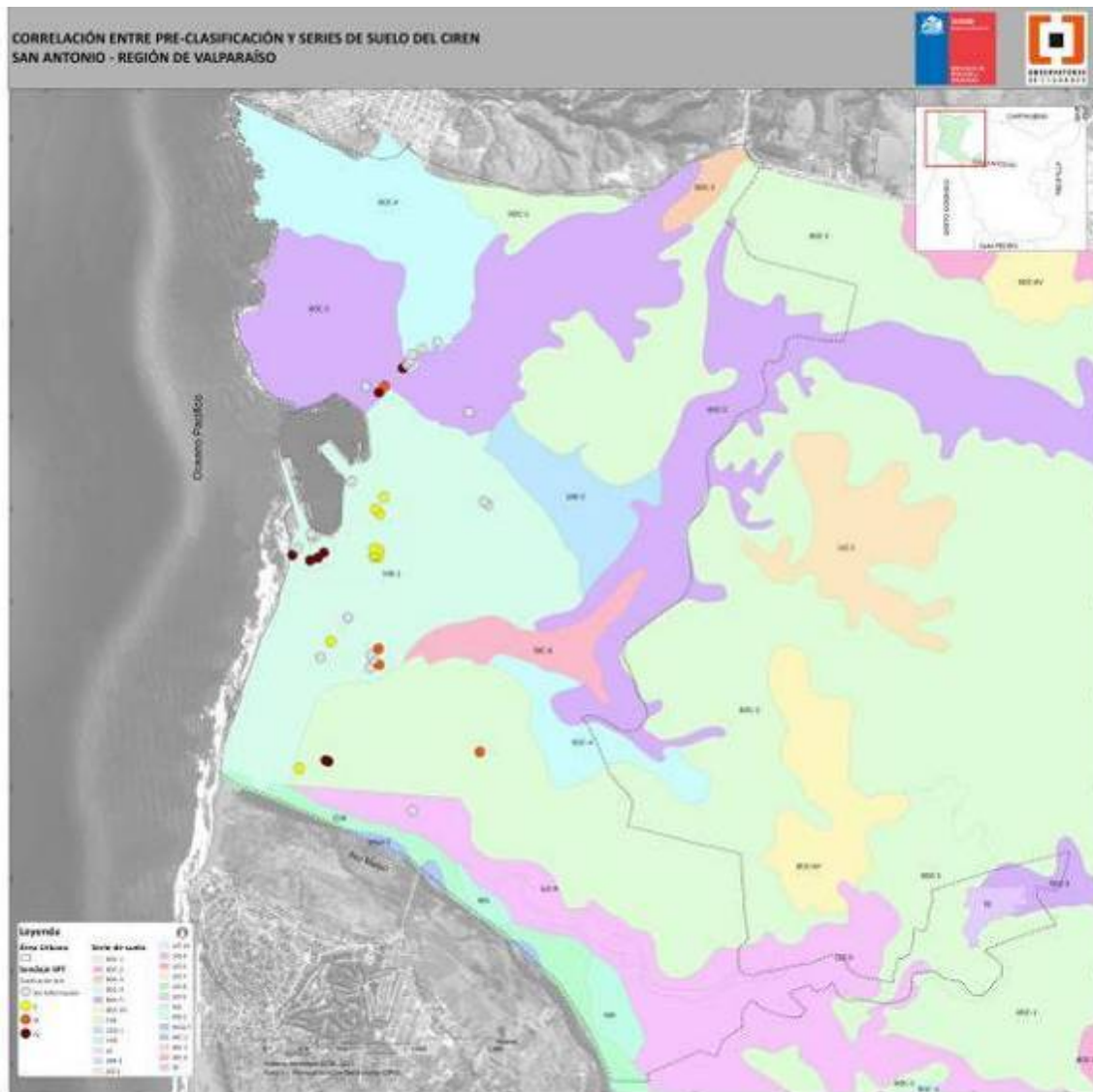


Figura 68. Correlación entre pre-clasificación y series de suelo del CIREN.

Finalmente, la Figura 69 compara los resultados de pre-clasificación sísmica del primer informe con los valores  $V_s$  del estudio de GC. A pesar de que lo útil de esta información, ésta no puede ser extrapolada pues no se tiene información sobre los perfiles de velocidades de ondas de corte para las demás áreas que componen la zona de interés.

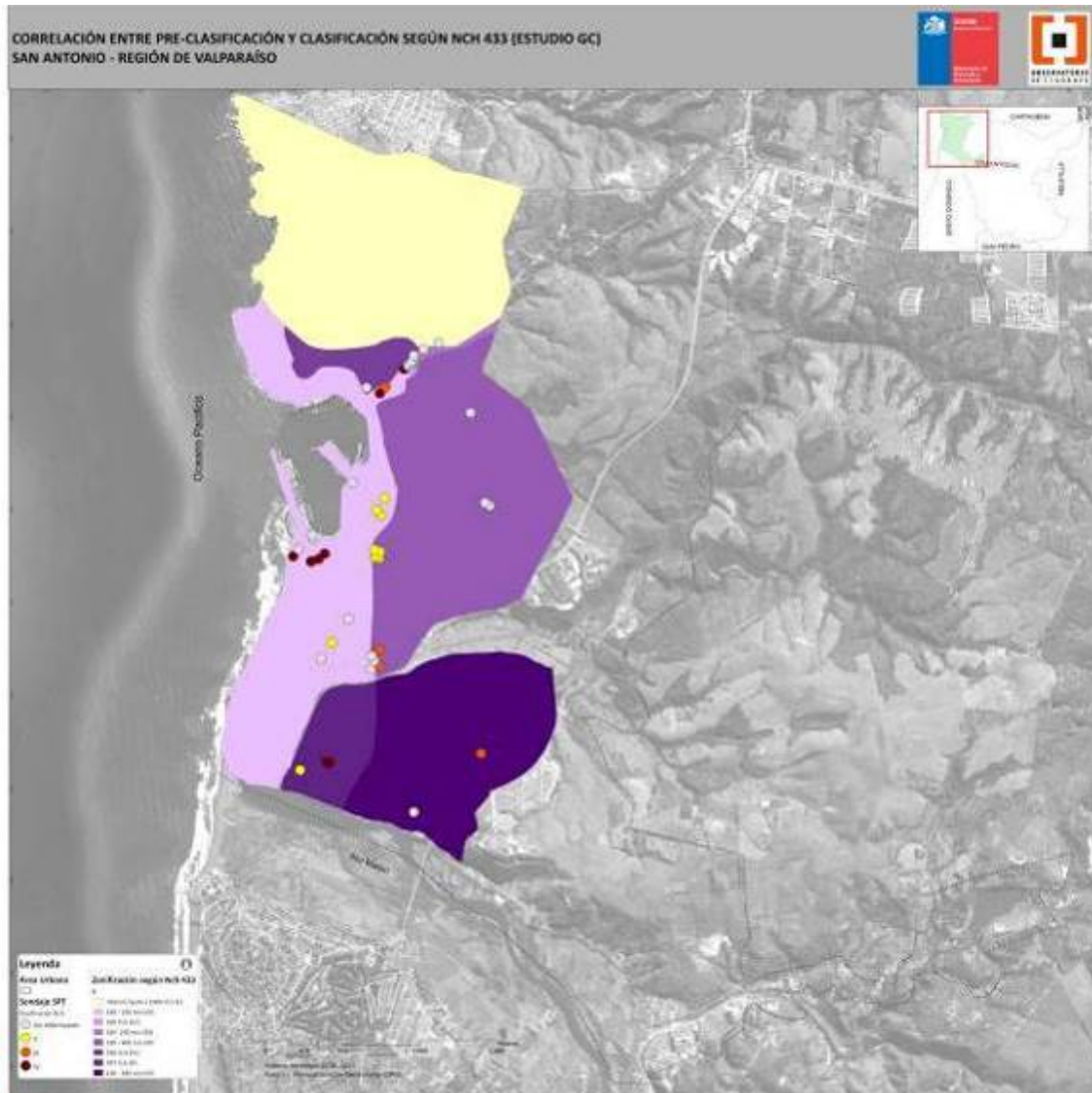


Figura 69. Zonificación según Nch 433.

### 5.1 Pre-clasificación sísmica aproximada basada en correlación con series de suelos

En la Figura 70 se compara la pre-clasificación sísmica del primer informe, la clasificación sísmica hecha por Geotecnia Consultores, y las series de suelos.

Por otra parte, el Estudio Agrológico, V Región de 1997 del CIREN presenta las siguientes descripciones para las series de suelo del sector (resumen de características relevantes para efectos de pre-clasificación sísmica):

Sobre la serie MD-1 se indica lo siguiente:

- Corresponde a terrazas ocupadas por arenas estabilizadas (dunas), con vegetación arbustiva y pastos escasos y que permite el desarrollo de especies forestales.

Sobre la serie BOC se indica lo siguiente:

- La serie BOC descansa sobre un substrato de gravas redondeadas, donde se distingue la presencia de gravilla de cuarzo y ortosa abundantes. En profundidad y en los quiebres de pendiente se observa que esta terraza descansa sobre la formación granítica.
- La profundidad efectiva del suelo varía entre 40 y 80 cm.
- Todo el perfil presenta gravilla de cuarzo y ortosa que aumenta en profundidad.
- En la zona de contacto del substrato con las rocas graníticas se observa una fuerte meteorización en esta última formación.

Sobre la serie LNR se indica lo siguiente:

- Descansa sobre arenas graníticas
- La profundidad efectiva del suelo varía entre 50 y 70 cm y descansa sobre un substrato constituido por estratos de arena media a gruesa francosa gruesa.

Sobre la serie LVZ se indica lo siguiente:

- Los materiales se encuentra bien estructuras en los primeros 40 ó 50 cm y no presenta estructuras en profundidad. El substrato está constituido por rocas graníticas descompuestas.
- Para profundidades de 115 cm y más se indica la presencia de roca granítica en diversos estados de meteorización.

Sobre la serie SRC no se indica la presencia de roca meteorizada o de suelo competente similar a relativa baja profundidad.

Sobre la serie MGA se indica lo siguiente:

- Descansa sobre un substrato constituido por arenisca cuarcífera, compactada y de granulometría fina.
- Para profundidades entre 85 y 100 cm se observa la presencia de arenisca cuarcífera compactada, de granulometría fina.
- La profundidad efectiva del suelo varía entre 40 y 100 cm.

En base a estas descripciones, y a la comparación de resultados que se muestra en la Figura 70, se propone la siguiente pre-clasificación sísmica aproximada:

- Para la zona indicada como MD-1 se sugiere mantener la clasificación global propuesta originalmente por GC. Sin embargo, es importante notar la potencial presencia de suelos tipo IV en algunas áreas de esta zona.
- Para las zonas cuya serie de suelo corresponda a BOC, dada la presencia de material competente a baja profundidad, se sugiere clasificar de manera preliminar este sector como de suelos tipo II, lo cual es relativamente consistente con lo indicado por GC en su informe.
- Para las zonas cuya serie de suelo corresponda a LNR, y dado que no se tienen datos precisos respecto al substrato presente en estas zonas, se sugiere adoptar una clasificación sísmica de tipo III.
- Para las zonas cuya serie de suelo corresponda a LVZ, y dada la presencia de material competente a baja profundidad, se sugiere clasificar de manera preliminar este sector como de suelos tipo II.
- Para la zona marcada como SRC no es posible establecer una pre-clasificación con la información disponible.
- Finalmente, para la serie MGA, y dado que no se tienen datos precisos respecto a las características mecánicas del substrato presente en estas zonas, se sugiere adoptar una clasificación sísmica de tipo III.

Esta pre-clasificación se refiere a los suelos I, II, III, y IV señalados en la norma NCh433Of96Mod2009. Para efectos de hacer una clasificación más precisa de los suelos de fundación del sector, y de manera de adecuar esta clasificación a la señalada en el decreto de emergencia generado a raíz del terremoto del 27 de febrero de 2010, se sugiere efectuar ensayos geofísicos que permitan construir los perfiles de velocidades de ondas de corte en estos sectores hasta profundidades de 30 metros como mínimo.

Para mayor detalle de figura siguiente, ver anexo n°3.

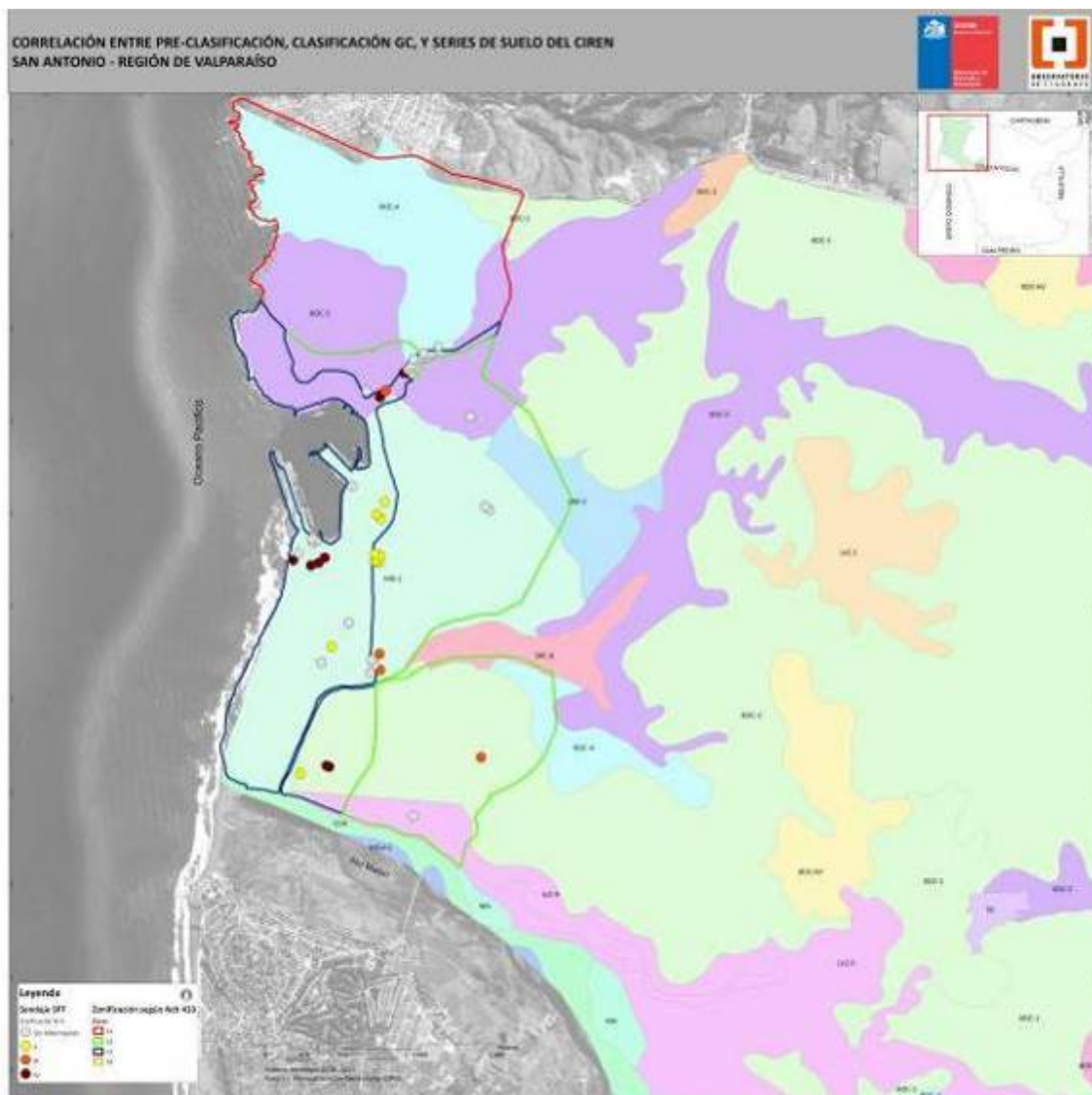


Figura 70. Correlación entre pre-clasificación, clasificación GC, y series de suelo del CIREN.

## **6 MODELACIÓN DE REMOCIÓN EN MASA ASOCIADA A PRECIPITACIONES**

Los factores que determinan la ocurrencia de un evento de remoción en masa se pueden agrupar en dos categorías: i) los que hacen naturalmente susceptible el sitio a la ocurrencia de fallas (ej.: geología, pendiente, elevación, propiedades geotécnicas del suelo) y ii) las variables que desencadenan la desestabilización del terreno, tales como la lluvia o los terremotos. En particular las variables de esta última categoría resultan difíciles de evaluar pues cambian de estado en lapsos de tiempo muy cortos u ocurren con una baja frecuencia. Habitualmente el análisis de estas variables se hace evaluando los sitios de acuerdo a la susceptibilidad de ser afectados por las variables que desestabilizan el terreno.

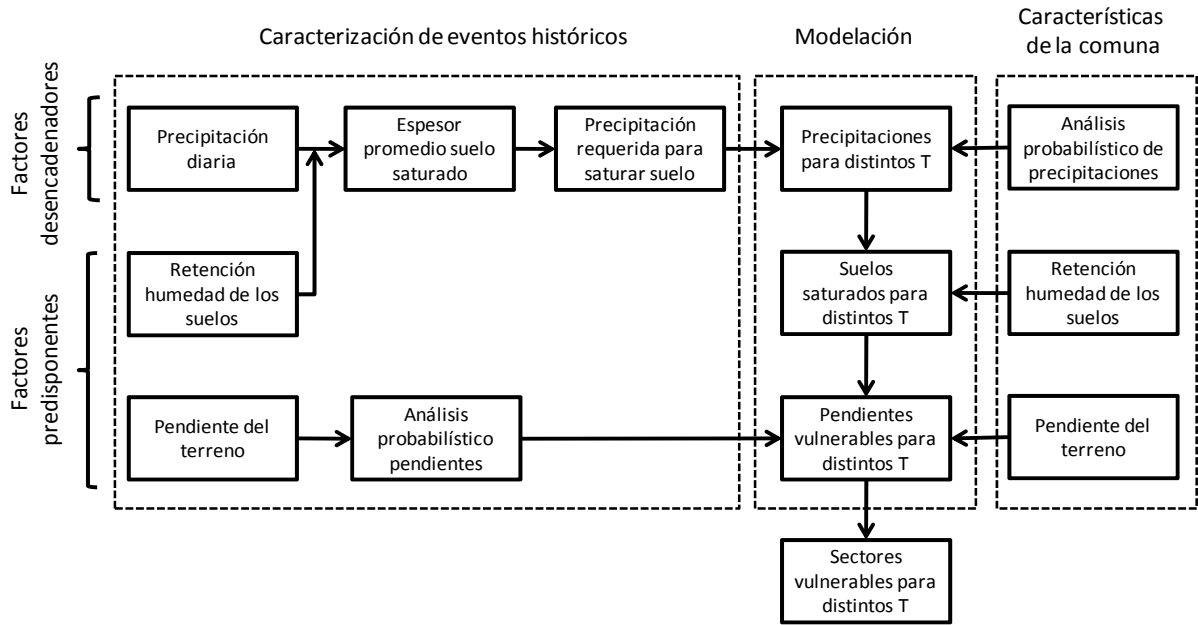
En base a lo anterior y la información disponible, en esta sección se presenta un análisis de las características de los eventos de remoción en masa asociados a precipitaciones en la comuna de San Antonio y se entrega una zonificación de riesgo del área de estudio. El análisis se basa en los eventos de remoción en masa identificados en el informe de antecedentes y pre-diagnóstico de este estudio. La zonificación de riesgo se presenta a través de una serie de mapas que consideran el efecto de los factores condicionantes (propiedades físicas del sitio) y el factor desencadenador (precipitaciones).

### **6.1 Metodología**

La metodología empleada para la definición de los sectores vulnerables a procesos de remoción en masa asociada a precipitaciones se basa en tres procesos: a) Caracterización de los eventos históricos ocurridos en la comuna, b) análisis de las precipitaciones, suelos y relieve de la comuna, y c) modelación de los factores desencadenadores y predisponentes para la identificación de los sectores vulnerables. El procedimiento desarrollado en cada una de las etapas se resume a en la Figura 71. A continuación se describen los pasos específicos seguidos en cada caso.

#### **6.1.1 Caracterización de eventos históricos**

La caracterización de eventos históricos se hizo en base a la información recopilada sobre 20 eventos de remoción en masa asociados a precipitaciones en la zona de estudio. Los eventos empleados corresponden al período comprendido entre los años 1986 y 2010. En la Tabla 16 se muestra la fecha y lugar de ocurrencia de cada uno de ellos.



**Figura 71. Diagrama de la metodología empleada.**

Diagrama de la metodología empleada para la identificación de sectores vulnerables a procesos de remoción en masa asociados a precipitaciones. El proceso considera tanto propiedades específicas de eventos históricos como también características generales de la comuna. Estas propiedades se asocian a factores desencadenadores y predisponentes. De la combinación y modelación espacial de estas propiedades se obtiene la identificación de los sectores vulnerables para distintos períodos de retorno (T).



Eventos identificados según fecha y lugar de ocurrencia	
Fecha estimada evento	Lugar
27-05-1986	Quebrada Estero Arévalo
27-05-1986	Ladera Camino San Antonio -Cartagena
09-06-1986	Talud 21 de Mayo
04-06-1992	Ladera Camino San Antonio -Cartagena Altura Faro Panul
17-05-1997	Nueva Ruiz Tagle, Quebrada Huallipén Norte 1
17-05-1997	Nueva Ruiz Tagle, Quebrada Huallipén Norte 2
03-06-1997	Ladera Camino Lo Gallarado - San Juan
16-08-1997	Ladera Camino Lo Gallarado - San Juan
16-08-1997	Barrancas Alto, Calle Nápoles
16-08-1997	Camino San Antonio - Cartagena (Cerro Centinela)
18-07-2001	Talud 21 de mayo
18-07-2001	Camino San Antonio - Cartagena
18-07-2001	Manuel Montt con Maule
18-07-2001	Av. Los Aromos de Llolleo
18-07-2001	República (Barrancas)
03-06-2002	Av. Núñez de Fonseca
03-06-2002	Camino Lo Gallardo - San Juan
03-09-2005	Av. Núñez de Fonseca frente al mercado
04-06-2007	Nueva Ruiz-Tagle, Quebrada Huallipén
13-06-2010	Camino San Antonio - Cartagena (Vopak)

**Tabla 16. Eventos de remoción en masa asociados a precipitaciones en la comuna de San Antonio.**

Cada evento de remoción fue descrito y analizado en función de los factores condicionantes y las características del factor desencadenador. Dentro de los factores condicionantes se identificó el tipo de suelo en el cual se produjo el evento y sus respectivas propiedades de retención de humedad (porosidad, contenido de humedad a 15 atm, drenaje y estructura); y las características físicas del lugar, tales como pendiente, exposición y uso del suelo. El factor desencadenador,

precipitación, fue analizado en función de las lluvias ocurridas el día del evento y en los días previos.

La caracterización de los suelos en cada uno de los sitios afectados se hizo en base al Estudio Agrológico de la V Región publicado por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN, 1997). A cada sitio se le asoció una serie de suelo, perfil, textura, estructura, tipo de drenaje y propiedades de retención de humedad. A cada una de las series de suelo se le asignaron parámetros de porosidad y retención de humedad tomando como referencia las funciones de pedotransferencia desarrolladas por Rawls et al. (1992). Las pendientes y exposición de cada sitio se obtuvieron a partir de la información topográfica de la comuna. El tipo de uso de suelo se obtuvo del Plan Regulador Comunal (PRC) de San Antonio (Ilustre Municipalidad de San Antonio, 2006).

Como factores desencadenadores se evaluaron dos parámetros: a) la cantidad de agua caída el mismo día del evento (24 horas), y b) la lluvia acumulada en los días previos al evento. La cantidad de agua caída el día del evento incorporara en la modelación el efecto de una lluvia intensa ocurrida en un lapso de tiempo reducido. Estos parámetros son habitualmente utilizados en estudios similares (Hauser, 1985; Hauser, 1993; Sepúlveda, 2008; Terlien, 1998). Ambos parámetros son relevantes ya que la desestabilización del terreno se puede producir con una lluvia intensa o como resultado de la saturación del perfil de suelo a consecuencia de sucesivos eventos de lluvia más pequeños.

Para cada evento de remoción en masa identificado en la comuna se determinó la cantidad de agua caída el día del evento y en los días previos. Se empleó para ello el registro de precipitación de la estación pluviométrica de la Dirección General de Aguas San Antonio en Punta Panul.

El número de días considerados en el cálculo de la lluvia acumulada se definió en base a un análisis de las precipitaciones diarias registradas en los 30 días previos a la ocurrencia de cada uno de los eventos de remoción analizados. Tal como se presenta en la Tabla 17 y Figura 72, el resultado de este análisis muestra que en promedio al cabo del día 20 se acumula un 96% del agua caída en los treinta días previos al evento. En consecuencia, se empleó el agua acumulada en 20 días como segundo parámetro desencadenador de un proceso de remoción en masa en la comuna.

Fecha estimada evento	Precipitación acumulada en días anteriores al evento (mm)					Espesor de suelo saturado (m)				
	0	5	10	15	20	0	5	10	15	20
27-05-1986	78	162	162	226	226	0,13	0,27	0,27	0,38	0,38
27-05-1986	78	162	162	226	226	0,13	0,27	0,27	0,38	0,38
09-06-1986	83	85	92	251	257	0,12	0,13	0,14	0,37	0,38
04-06-1992	19	183	183	239	244	0,03	0,31	0,31	0,40	0,41
17-05-1997	31	59	59	59	59	0,05	0,09	0,09	0,09	0,09
17-05-1997	31	59	59	59	59	0,05	0,09	0,09	0,09	0,09
03-06-1997	1	56	112	112	205	0,00	0,13	0,27	0,27	0,49
16-08-1997	1	125	125	125	168	0,00	0,30	0,30	0,30	0,40
16-08-1997	1	125	125	125	168	0,00	0,20	0,20	0,20	0,26
16-08-1997	1	125	125	125	168	0,00	0,21	0,21	0,21	0,28
18-07-2001	43	70	107	109	111	0,06	0,10	0,16	0,16	0,16
18-07-2001	43	70	107	109	111	0,07	0,12	0,18	0,18	0,19
18-07-2001	43	70	107	109	111	0,06	0,10	0,16	0,16	0,16
18-07-2001	43	70	107	109	111	0,07	0,12	0,18	0,18	0,19
18-07-2001	43	70	107	109	111	0,06	0,10	0,16	0,16	0,16
03-06-2002	3	135	155	266	266	0,00	0,23	0,26	0,45	0,45
03-06-2002	3	135	155	266	266	0,01	0,32	0,37	0,64	0,64
03-09-2005	4	25	71	73	100	0,01	0,04	0,12	0,12	0,17
04-06-2007	39	39	39	39	39	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
13-06-2010	14	25	25	25	30	0,02	0,04	0,04	0,04	0,05

**Tabla 17: Reconstrucción de las precipitaciones y saturación del suelo en cada uno de los eventos de remoción registrados en la comuna.**

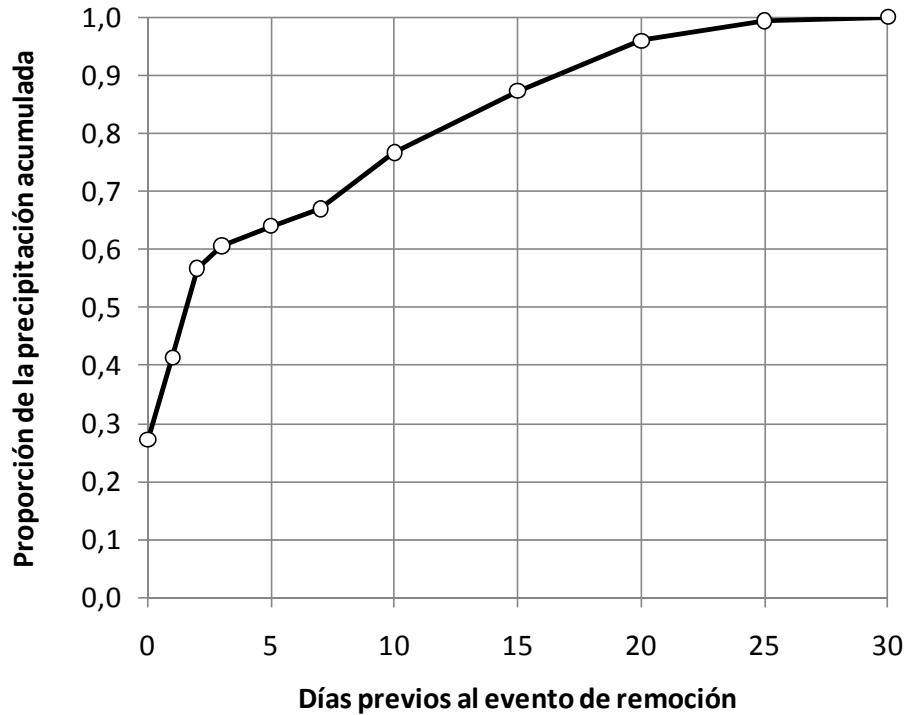


Figura 72: Proporción de la lluvia acumulada en los 30 días previos al evento de remoción en masa.

La gráfica muestra los valores promedios acumulados de agua caída en los 20 eventos identificados en la comuna.

Con el objetivo de identificar los factores predisponentes asociados a los eventos de remoción en masa en la comuna, se evaluaron una serie de características de los sitios. Producto de este análisis se definieron dos como relevantes: las propiedades de retención de humedad de los suelos y la pendiente del terreno.

El efecto de las propiedades de retención de humedad de los suelos se evaluó calculando el umbral de suelo saturado necesario para desencadenar un proceso de remoción en masa en los suelos de la comuna. Este valor se determinó a partir de las características del suelo y las precipitaciones acumuladas en cada uno de los eventos. Se calculó el espesor de suelo saturado en cada evento en base al agua caída, al coeficiente de escorrentía, y al contenido inicial de humedad (humedad a 15 atm). El espesor de suelo saturado se calculó de la siguiente forma:

$$E = \frac{L}{\theta - \theta_{15}}$$

$$L = \frac{P}{1000} \cdot (1 - C)$$

Ec. 6

Dónde  $E$  es el espesor de suelo saturado (m),  $L$  es la lámina infiltrada (m),  $\theta$  es la porosidad del suelo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $\theta_{15}$  es la retención de humedad a 15 atm ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $P$  es la precipitación total (mm) y  $C$  es el coeficiente de escorrentía. Para el coeficiente  $C$  se empleó un valor igual 0,4 para todo el sector de estudio de acuerdo a lo indicado en el Plan Maestro de Aguas Lluvias de la comuna. La Tabla 17 muestra los espesores de suelo saturado así calculados para considerando distintos días antes del evento de remoción. La máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo se estimó en base a la porosidad. Mediante este análisis se definió la profundidad promedio de suelo saturado para la ocurrencia de un evento de remoción. Este valor se estimó igual a 30 cm. Con esta profundidad se determinó la precipitación requerida para saturar cada uno de los tipos de suelo existentes en la comuna, obteniendo de esta forma un dimensionamiento espacialmente distribuido del factor desencadenador de eventos de remoción en masa.

El segundo factor predisponente fue evaluado a partir de las pendientes observadas en los terrenos afectados por procesos de remoción en masa. Las pendientes medias de cada sector se obtuvieron a partir de mapas de curvas de nivel cada 2 m para la zona urbana de San Antonio, y de curvas cada 10 m para el resto de la comuna. En base a la información de las pendientes de los sitios con eventos se ajustó una distribución de probabilidad log normal, y con ella se estimaron los umbrales de pendientes para los cuales se registrarían eventos de remoción en masa con distintos períodos de retorno (T).

### **6.1.2 Análisis de las precipitaciones, suelos y relieve de la comuna**

A partir de distintas fuentes se describieron las características comunales relevantes para la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Esto es, la probabilidad de lluvias, la distribución espacial de las propiedades de retención de humedad de los suelos y las pendientes del terreno. Para determinar la probabilidad de ocurrencia lluvias en 1 y 20 días se empleó el registro de precipitaciones diarias en la estación pluviométrica de la Dirección General de Aguas San Antonio en Punta Panul. El registro utilizado corresponde al comprendido entre los años 1972 a 2010. Se ajustó un modelo de probabilidad de Valores Extremos Tipo I a las precipitaciones máximas, y se calcularon las precipitaciones diarias máximas y acumuladas máximas en 20 días para distintos períodos de retorno.

La distribución espacial de las propiedades de retención de humedad de los suelos se calculó en base al Estudio Agrológico de la V Región elaborado por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN, 1997). Al igual que para el caso de los eventos históricos, a cada uno de los suelos se le asignaron parámetros de porosidad y retención de humedad de acuerdo a Rawls et al. (1992).

De forma similar, las pendientes del terreno comunal se obtuvieron a partir de la información topográfica de la comuna. Las pendientes del terreno del área urbana de San Antonio se obtuvieron a partir de curvas de nivel de 2 metros provenientes del Plan Regulador Comunal de San Antonio (Ilustre Municipalidad de San Antonio, 2006). Para los sectores faltantes del área urbana y las localidades del interior de la comuna (Malvilla, Leyda y Cuncumén), se emplearon

mapas de curvas de nivel de 10 metros (CIREN, 2007). Estos últimos mapas se interpolaron con ArcGIS 9.3 para obtener curvas de 2 metros.

### **6.1.3 Modelación de los factores desencadenadores y predisponentes**

Para la definición de las zonas de riesgo de remoción en masa se empleó el siguiente procedimiento de modelación. A partir de la información de suelos y modelo de elevación digital comunal, se implementó en ArcGIS 9.3 una serie de capas de información para identificar los sectores vulnerables a distintos umbrales de precipitación, suelos y pendientes. Esta modelación consideró los factores desencadenadores y predisponentes antes descritos, y eventos de precipitación ocurridos con períodos de retorno de 5, 10, 20, 50 y 100 años.

Para obtener la probabilidad de ocurrencia de un evento de remoción en masa se utilizó la cantidad de lluvia requerida para saturar cada tipo de suelo hasta una profundidad umbral. Tomando en cuenta los antecedentes recopilados para cada evento histórico de remoción registrado, se definió este umbral en 0,3 metros. Con esta profundidad de suelo saturado ya es posible la ocurrencia de un evento de remoción en masa. Se calculó la lámina de agua necesaria para saturar 0,3 metros de suelo y posteriormente, considerando el coeficiente de escurrimiento se calculó la precipitación requerida para desencadenar dicha remoción. Este valor de precipitación se comparó con las precipitaciones diarias máximas y de 20 días descritas en la sección anterior. Se identificaron así las series de suelo que superarían ese umbral para distintos períodos de retorno.

Tal como se indicó en las secciones previas, el segundo factor predisponente fue evaluado a partir de las pendientes observadas en los terrenos afectados por procesos de remoción en masa y el ajuste de probabilidad para estimaron los umbrales de pendientes para los cuales se registrarían eventos con distintos períodos de retorno (T). Combinando para el mismo período de retorno los umbrales de pendiente y de lluvia requerida para alcanzar la saturación del suelo, se elaboraron en ArcGIS 9.3 los mapas de amenaza a escala comunal. Los mapas se elaboraron buscando la combinación de dos factores: a) saturación según tipo de suelo y b) pendiente. Cada uno de los mapas identifica las condiciones comunales que coinciden con la ocurrencia de procesos de remoción en masa para distintos períodos de retorno. Las condiciones identificadas corresponden a las siguientes:

- T = 5 años. Pendiente  $\geq 15^\circ$ , suelos de la serie La Manga.
- T = 10 años. Pendiente  $\geq 13^\circ$ , suelos de la serie La Manga y Lo Vázquez.
- T = 20 años. Pendiente  $\geq 11^\circ$ , suelos de la serie Bochinche, Codigua, Loncura, Lo Vázquez, La Manga y Sta. Rita de Casablanca.
- T = 50 años. Pendiente  $\geq 10^\circ$ , en cualquier suelo.
- T = 100 años. Pendiente  $\geq 9^\circ$ , en cualquier suelo.

El resultado de la simulación se evaluó y validó contrastando las estimaciones con las observaciones recabadas de eventos en terrenos. La zonificación así determinada se presenta en una serie de mapas elaborados para eventos de distintos períodos de retorno.

## **6.2 Resultados**

### **6.2.1 Eventos históricos**

En la Tabla 18, se muestran las características de suelo y topográficas de cada uno de los sitios donde se identificaron eventos de remoción en masa. Las escalas utilizadas y la simbología se encuentran en el Anexo 4 de este informe. Los sitios donde se han registrado eventos de remoción en masa, presentan características similares entre ellos. Estas características, de acuerdo a la literatura, pueden considerarse factores predisponentes frente a un evento de remoción en masa. Los tipos de suelo de los sitios identificados corresponden principalmente a suelos de textura arenosa, los cuales se caracterizan por su alta permeabilidad y escasa estructura. El drenaje de los suelos en que han sucedido eventos se clasifica entre bueno y excesivo de acuerdo con la escala definida por CIREN (Anexo 4). Esto implica que en esos suelos se facilita la infiltración de agua y posterior saturación, y también el paso del agua hacia estratos inferiores.

De acuerdo con los antecedentes, las altas pendientes son un factor condicionante frente a un evento de remoción en masa. En los sitios estudiados, la pendiente promedio es variable, con un rango entre los 7° y 32°, media 21° y mediana en 22°. En la mitad de los eventos, la pendiente supera los 22°. La escala definida por CIREN (Anexo 4) indica que estos sitios van de fuertemente inclinados a escarpados.

Por otra parte, la exposición predominante en los sitios estudiados es sur (suroeste, sur, sureste), lo que significa que son laderas más húmedas, y por lo tanto más proclives a sufrir eventos de remoción en masa. Dentro de los usos del suelo, la mayoría de los sitios se definen como áreas urbanas e industriales, además de praderas, terrenos agrícolas y matorrales. En este aspecto es importante destacar que aunque el uso del suelo sea área urbana e industrial no implica que el suelo esté impermeabilizado y libre de amenaza de remoción en masa. Por ejemplo, la Quebrada Huallipén se define como área urbana e industrial, y si bien lo es, corresponde a un talud de alta pendiente y descubierto. Lo mismo sucede con el Talud 21 de Mayo, el cual corresponde a un talud de alta pendiente, con eucaliptos e inserto en medio del área urbana.

Tipos y características de los sitios con eventos de remoción en masa asociados a lluvias											
Fecha evento	estimada	Lugar	Uso suelo	Pendiente promedio (°)	Exposición promedio	Serie Suelo	Textura	Estructura	Tipo drenaje	Porosidad (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Humedad a 15 atm (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
27-05-1986		Quebrada Estero Arévalo	Áreas Urbanas e Industriales	24,30	Sureste	BOC-5	Franco Arenoso	Bloques angulares y subangulares medios	5	0,453	0,095
27-05-1986		Ladera Camino San Antonio - Cartagena	Praderas y matorrales	31,65	Sureste	BOC-5	Franco Arenoso	Bloques angulares y subangulares medios	5	0,453	0,095
09-06-1986		Talud 21 de Mayo	Áreas urbanas e industriales, bosque eucaliptus	19,41	Suroeste	MD-1	Arenoso	Grano simple	6	0,437	0,033
04-06-1992		Ladera Camino San Antonio - Cartagena Altura Faro Panul	Praderas y matorrales	21,86	Suroeste	BOC-5	Franco Arenoso	Bloques angulares y subangulares medios	5	0,453	0,095
17-05-1997		Nueva Ruiz Tagle, Quebrada	Áreas urbanas e industriales	14,34	Sur	MD-1	Arenoso	Grano simple	6	0,437	0,033



	Huallipén Norte 1									
17-05-1997	Nueva Ruiz Tagle, Quebrada Huallipén Norte 2	Áreas urbanas e industriales	24,30	Sureste	MD-1	Arenoso	Grano simple	6	0,437	0,033
03-06-1997	Ladera Camino Lo Gallarado - San Juan	Áreas urbanas e industriales y terrenos agrícolas y matorrales	21,86	Sur	LVZ-9	Franco Arcillo Arenoso	Bloques subangulares y angulares moderados	5	0,398	0,148
16-08-1997	Ladera Camino Lo Gallarado - San Juan	Áreas urbanas e industriales y terrenos agrícolas y matorrales	21,86	Sur	LVZ-9	Franco Arcillo Arenoso	Bloques subangulares y angulares moderados	5	0,398	0,148
16-08-1997	Barrancas Alto, Calle Nápoles	Bosques y terrenos agrícolas	9,62	Sueste	LNR - 5	Areno Francoso	Grano simple	6	0,437	0,055
16-08-1997	Camino San Antonio - Cartagena (Cerro Centinela)	Praderas y matorrales	31,65	Sur	BOC -5	Franco Arenoso	Bloques angulares y subangulares medios	5	0,453	0,095
18-07-2001	Talud 21 de mayo	Áreas urbanas e industriales,	19,41	Suroeste	MD-1	Arenoso	Grano simple	6	0,437	0,033

		bosque eucaliptus									
18-07-2001	Camino San Antonio - Cartagena	Praderas y matorrales	31,65	Sur	BOC -5	Franco Arenoso	Bloques angulares y subangulares medios	5	0,453	0,095	
18-07-2001	Manuel Montt con Maule	Praderas y matorrales	9,62	Sur	MD-1	Arenoso	Grano simple	6	0,437	0,033	
18-07-2001	Av. Los Aromos de Lolleo	Terrenos agrícolas	12,06	Sur	SRC-6, BOC-1, BOC-4	Franco Arenoso	Bloques subangulares finos, Bloques	3,5,5	0,453	0,095	
18-07-2001	República (Barrancas)	Áreas urbanas e industriales	7,17	Sureste	MD-1	Arenoso	Grano simple	6	0,437	0,033	
03-06-2002	Av. Núñez de Fonseca	Áreas urbanas e industriales	21,86	Sur	BOC-5	Franco Arenoso	Bloques	5	0,453	0,095	
03-06-2002	Camino Lo Gallardo - San Juan	Áreas urbanas e industriales y terrenos agrícolas y matorrales	21,86	Sur	LVZ-9	Franco Arcillo Arenoso, Franco Arenoso	Bloques subangulares y angulares moderados	5	0,398	0,148	
03-09-2005	Av. Núñez de Fonseca frente al	Áreas urbanas e industriales	21,86	Sur	BOC-5	Franco Arenoso	Bloques angulares y	5	0,453	0,095	

	mercado						subangular es medios			
04-06-2007	Nueva Ruiz-Tagle, Quebrada Huallipén	Áreas urbanas e industriales, talud quebrada	24,30	Sur	MD-1	Arenoso	Grano simple	6	0,437	0,033
13-06-2010	Camino San Antonio Cartagena (Vopak)	Praderas y matorrales	21,86	Sureste	BOC-5	Franco Arenoso	Bloques angulares y subangular es medios	5	0,453	0,095

**Tabla 18. Principales características de los sitios con registros de remoción en masa producto de precipitaciones.**

## 6.2.2 Precipitaciones, suelos y relieve de la comuna

El resultado de la estimación de precipitaciones máximas diarias y acumuladas en 20 días para distintos períodos de retorno se presenta en la Tabla 19. La precipitación diaria máxima de 5 años de período de retorno es de 80 mm, y la de 20 días llega a 230 mm. En el otro extremo, para T=100, la precipitación diaria máxima alcanza los 150 mm, y 455 mm en 20 días.

Período de retorno T (años)	F(x ≤ y)	Precipitación (mm)	
		24 horas	20 días
5	0,80	80	230
10	0,90	97	284
20	0,95	113	337
50	0,98	135	405
100	0,99	151	455

Tabla 19. Estimación de las precipitaciones máximas diarias y en 20 días en San Antonio.

En el análisis se empleó un modelo de Valores Extremos Tipo I y el registro de precipitaciones diarias en la estación pluviométrica Punta Panul desde 1972 hasta 2010.

El resultado del cálculo de la lámina de agua y precipitación requerida para saturar 0,3 metros de suelo y con ello desencadenar un proceso de remoción en masa se presenta en la Tabla 19. En este cálculo se emplearon las relaciones descritas en las ecuaciones presentadas anteriormente. De acuerdo a estos valores, los suelos más vulnerables son los de las series La Manga y Lo Vásquez. En el caso particular de los suelos de la serie La Manga, basta una precipitación de 114 mm para saturar la profundidad umbral. En el otro extremo están los suelos de las series Loncura y Codigua, los cuales requieren alrededor de 190 mm de agua caída para saturar la misma profundidad umbral. El caso extremo lo constituyen los sectores de dunas y terrazas recientes, donde se requieren alrededor de 220 mm de agua caída para alcanzar el umbral de saturación.

Serie o asociación de suelo	Símbolo cartográfico	Lámina de agua (mm)	Precipitación requerida (mm)
Bochinche	BOC	109	181
Codigua	CDG	113	189
Loncura	LNR	115	191
Lo Vásquez	LVZ	89	149
La Manga	MGA	68	114
Sta. Rita de Casablanca	SRC	107	179
Misceláneo Dunas	MD	131	219
Terrazas recientes	TR	131	219

**Tabla 20. Lámina de agua y precipitación requerida para saturar cada suelo hasta 30 cm de profundidad.**

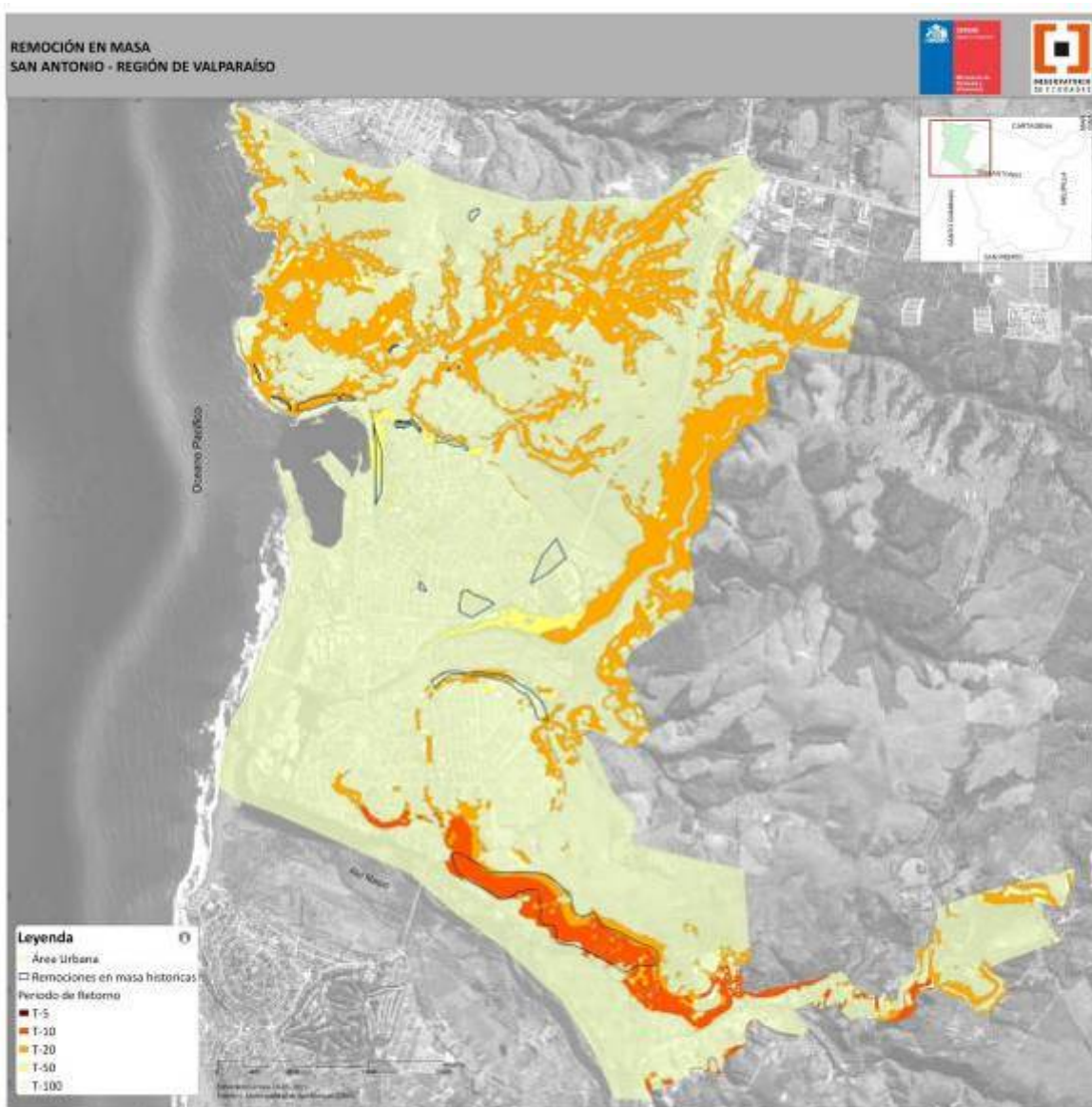
### 6.2.3 Mapas de Amenaza

El mapa de la Figura 73 presenta distribución de eventos de remoción en masa asociada a diferentes períodos de retorno. Este mapa se construyó considerando la pendiente de cada punto y la precipitación requerida para saturar el suelo. Con este mapa es posible identificar que sitios tienen una mayor probabilidad de ser afectados por un evento de remoción masa asociada a precipitaciones. En el mapa se puede observar que los sitios en donde han ocurrido eventos previamente, son los que asocian períodos de retorno más bajos, como por ejemplo la ladera del Camino Lo Gallardo-San Juan que asocia un período de retorno de 10 años.

En la Figura 73 también se identifican como sitios susceptibles la ladera del Camino San Antonio-Cartagena, las quebradas Huallipén y Arévalo, dónde han ocurrido eventos. Además se indican como zonas susceptibles las quebradas que nacen desde el cerro Centinela y que desaguan hacia el estero Arévalo: Bruselas, Holanda, Víctor Domino Silva y Los Perales, y la ladera de Av. Los Aromos en Llolleo, todos con períodos de retorno bajo los 20 años. Los sitios nombrados han sido afectados por eventos de remoción en masa en los últimos 24 años, validando la información contenida en el mapa. Con períodos de retorno mayores (50 años) se identifica la zona urbana de San Antonio y el Talud 21 de Mayo.

En la zona costera de Llolleo se observan puntos marcados como susceptibles de sufrir procesos de remoción en masa que corresponden a formaciones de dunas y al terraplén del camino de acceso sur al Puerto de San Antonio. Estos puntos, si bien presentan una amenaza, son más proclives a ser erosionados por el efecto del oleaje y las mareas.

En las Figura 74, Figura 75 y Figura 76 se presenta la distribución de eventos de remoción en masa asociada a diferentes períodos de retorno para las zonas urbanas de Malvilla, Leyda y Cuncumén. En Malvilla se observa que gran parte del sector exhibe período de retorno de 20 años, salvo algunos puntos que presentan períodos de retorno superiores. En este mapa se identifican como sectores más susceptibles de ser afectados por procesos de remoción las laderas y quebradas que desaguan al Estero El Sauce. En Leyda se observa que gran parte del sector ubicado al sur de la zona urbana como susceptible de sufrir procesos de remoción en masa, con período de retorno de 10 años. Esta zona corresponde a la ladera del monte La Piedra del Peñón, la cual desagua en el Estero El Sauce. Por último, en Cuncumén se aprecia que gran parte del territorio se asocia a períodos de retorno de 10 años, con algunos sectores con probabilidades de eventos de 20 y más años de períodos de retorno. En esta área se identifican como susceptibles las quebradas y laderas que desaguan al Estero Cuncumén, como Quebrada el Ajuste proveniente del Cerro La Gloria, Quebrada La Cuneta y Quebrada Los Perales. (mayores detalles de este mapa se encuentran en anexo n°4).



**Figura 73: Mapa de amenaza de remoción en masa por precipitaciones para diferentes períodos de retorno en el sector urbano de San Antonio. Fuente: Elaboración propia.**

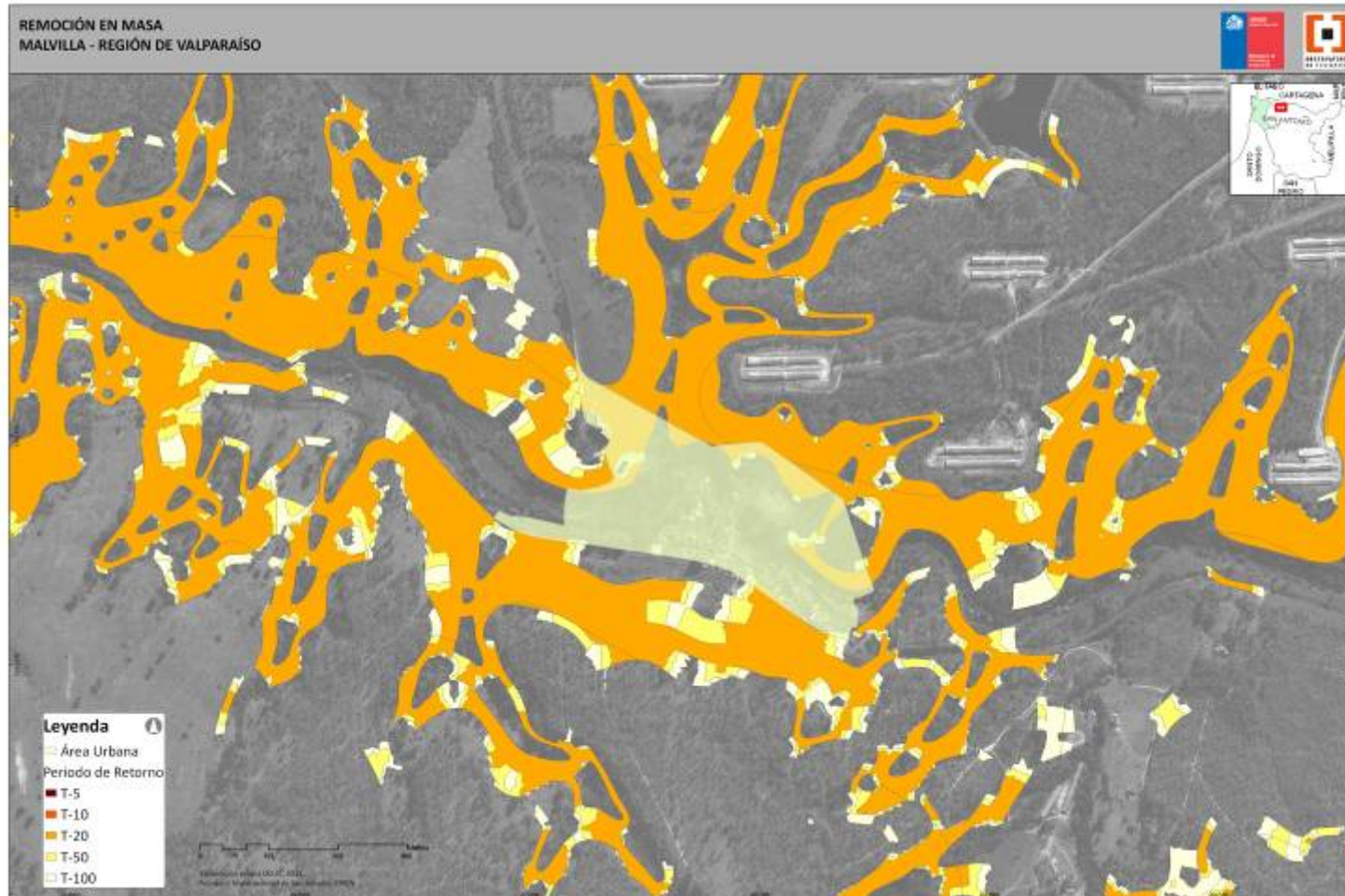


Figura 74: Mapa de amenaza de remoción en masa por precipitaciones para diferentes períodos de retorno en Malvilla.

Fuente: Elaboración propia.

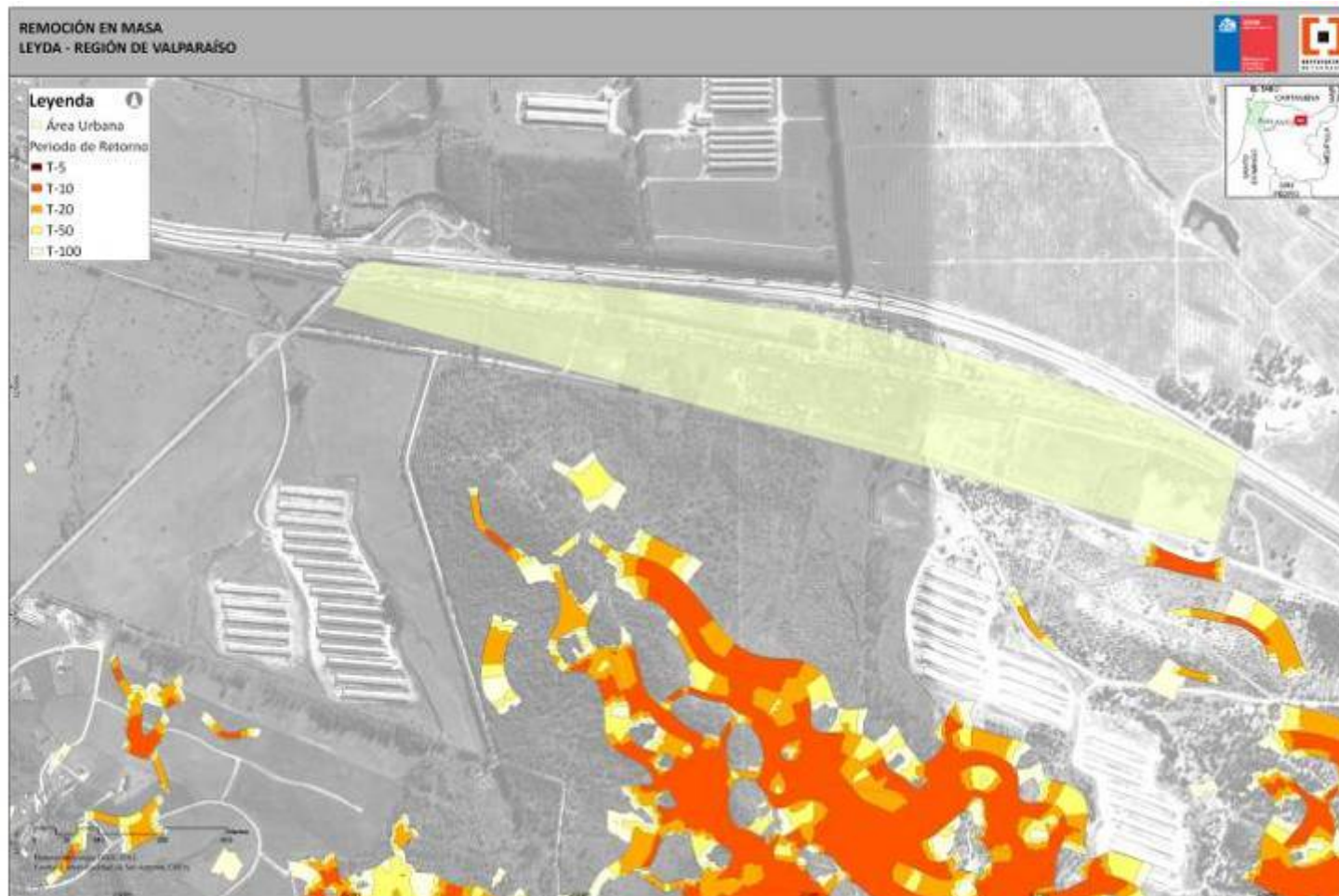
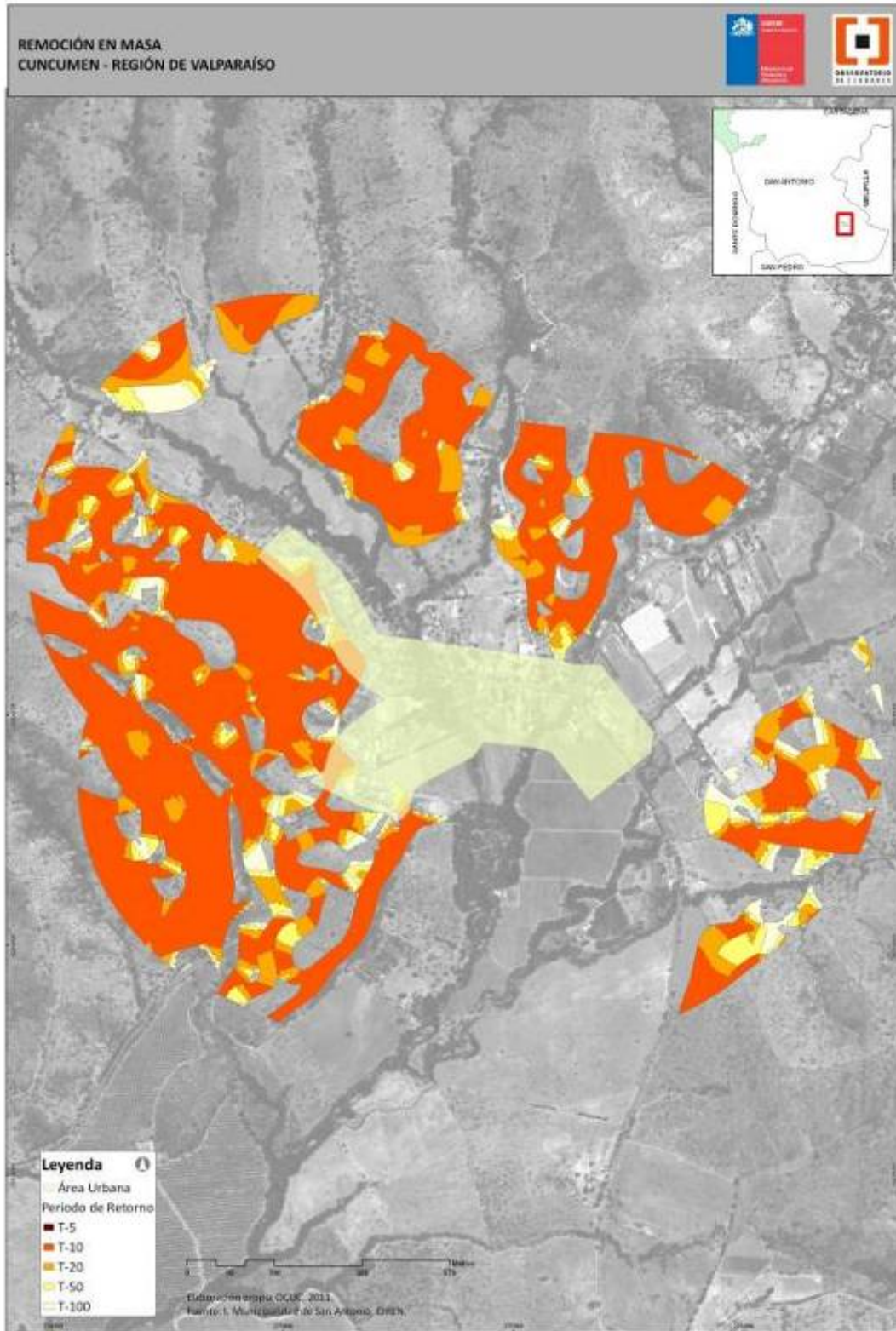


Figura 75: Mapa de amenaza de remoción en masa por precipitaciones para diferentes períodos de retorno en Leyda.

Fuente: Elaboración propia.





**Figura 76: Mapa de amenaza de remoción en masa por precipitaciones para diferentes períodos de retorno en Cuncumén. Fuente: Elaboración propia.**

## 7 DIAGNÓSTICO FINAL

### 7.1 Vulnerabilidad

#### 7.2 Metodología de Vulnerabilidad

La *vulnerabilidad física* se calculó en función de cada una de las amenazas detectadas y está orientada a los aspectos físicos del territorio (vivienda, infraestructura, equipamiento). Para ello, a las variables que caracterizan la condición física de cada aspecto evaluado, se les asignó un puntaje diferente de acuerdo a su respuesta a una amenaza determinada.

Así por ejemplo, mientras una construcción de madera tiene una baja vulnerabilidad ante la amenaza de Amplitud Sísmica debido a que tiene buena respuesta sísmica, pero tendrá una alta vulnerabilidad ante la amenaza de Tsunami, ya que la resistencia mecánica de la madera ante la fuerza de una ola de tsunami es muy baja. Por tanto, cada elemento tendrá cálculos de vulnerabilidad física, uno ante cada amenaza estudiada.

La *vulnerabilidad funcional* en cambio, es independiente de la amenaza y depende del rol que cumple el elemento en el funcionamiento del sistema. Por tanto, a cada elemento se le otorgó sólo un cálculo de vulnerabilidad funcional.

Los elementos se analizaron de manera independiente, y los puntajes de vulnerabilidad de cada uno se integrarán a la tabla de atributos en formato SIG, manteniendo todos los campos que inciden en el análisis de vulnerabilidad. Como síntesis de vulnerabilidad se presentan en un plano, los elementos graficados según su Vulnerabilidad total ante el caso de amenaza.

El análisis de vulnerabilidad incluirá las siguientes categorías, antes mencionadas: población, vivienda, equipamiento e infraestructura. Para aquellos elementos analizados en las dimensiones física y funcional –equipamiento y algunas sub categorías de infraestructura- éstas se ponderaron considerando el supuesto de que las variables físicas inciden de mayor forma que las funcionales en la vulnerabilidad final de cada elemento. Donde  $V_f$  es la vulnerabilidad física, y  $V_c$  es vulnerabilidad funcional. Considerando que cada elemento tendrá una vulnerabilidad ( $V_e$ ) para cada amenaza.

$$V_e = V_f * 0,6 + V_c * 0,4^5$$

Exceptuando Población, los elementos de las diferentes categorías serán analizados según diferentes variables, las que ponderadas generan el grado de vulnerabilidad ante cada amenaza.

---

<sup>5</sup> Ponderaciones que se revisarán con la contraparte.

En el caso de la población de un análisis de vulnerabilidad está basado en las siguientes variables: Cantidad de población, densidad de población, grupos socioeconómico y grupo etario.

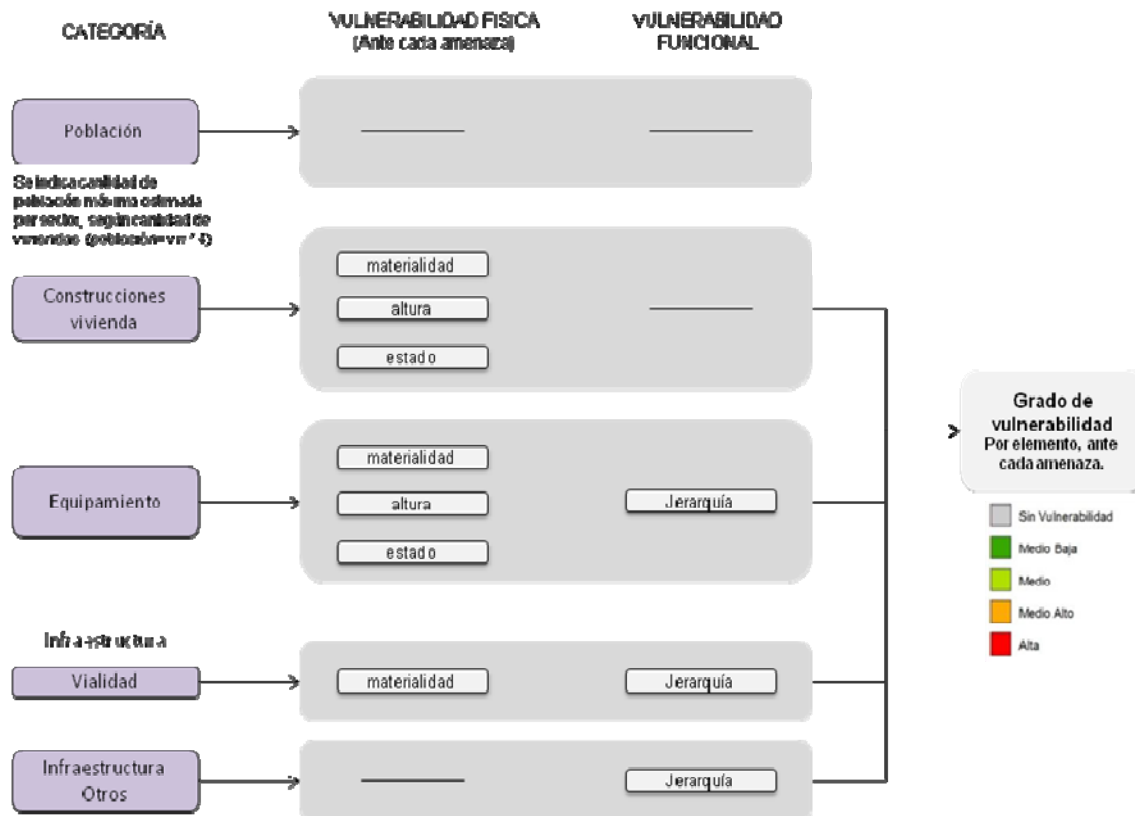


Ilustración 1 Esquema de Variables utilizadas para cálculo de vulnerabilidad

Dado que muchas de las variables, y la evaluación de vulnerabilidad en sí son aspectos cualitativos, será necesario darles una equivalencia cuantitativa, de manera de realizar ponderaciones. Los puntajes asignados varían entre 0 y 4 con números enteros, según la siguiente equivalencia:

Grado cualitativo de vulnerabilidad	Valor asignado
SIN VULNERABILIDAD	0
BAJA	1
MEDIA	2
MEDIA-ALTA	3
ALTA	4

Tabla 21. Equivalencia cualitativa de valores de vulnerabilidad asignados

Para el análisis de la ciudad se realizó con la división por sectores: San Antonio, Barrancas, Lolloe, Puerto y Lo Gallardo, como se muestra en la Figura 77.

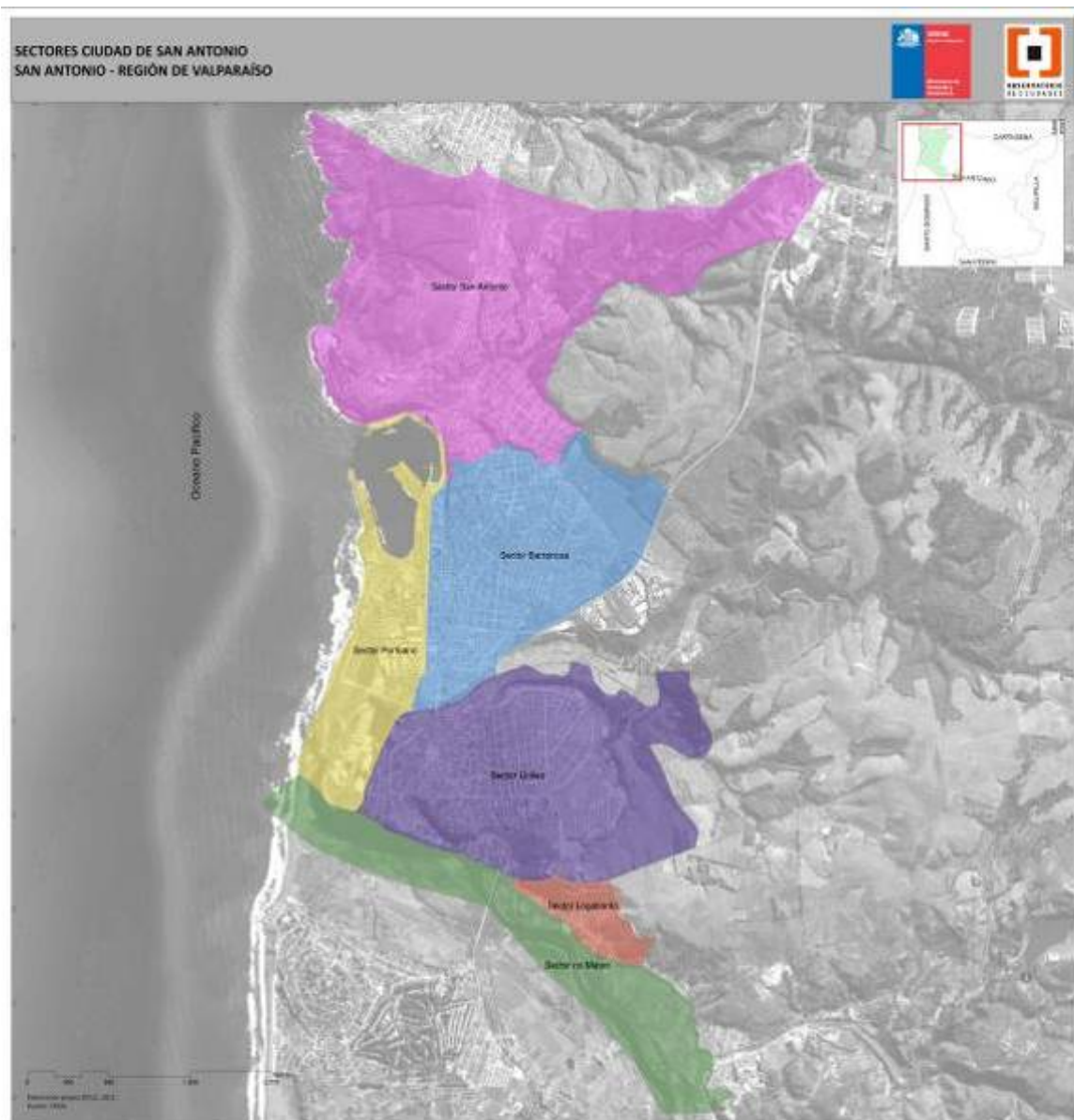


Figura 77 Sectores Ciudad de San Antonio

### 7.2.1 Información necesaria para el análisis de vulnerabilidad

La información requerida para el análisis de vulnerabilidad es: demografía y características económicas, construcciones, conectividad y accesibilidad, y las redes de infraestructura, equipamiento y servicios.

- **Demografía y características económicas:** la información existente para este apartado es extraída del CENSO 2002, a nivel de manzanas, se extrajo la concentración de población, grupos etarios, y la situación socioeconómica (GSE). Para el caso de las localidades rurales solo se presenta el dato a nivel de la localidad. La información económica es extraída del CENSO 2002 y corroborada con informes y estudios de la comuna como el PLADECOC, Plan Regular Comunal (Memoria explicativa), Informe del Diagnóstico Pesquero, Diagnóstico análisis técnico económico zonas industriales de San Antonio.
- **Construcciones:** para este apartado se utilizarán las construcciones georreferenciadas de la ciudad de San Antonio, las cuales se le integrará el uso, materialidad y estado. Dicha información se obtuvo en trabajo en terreno y contrarrestada con información del PRC, y de los planos Proyecto Plan Maestro Infraestructura Deportiva y Recreativa de San Antonio. Para el caso de las localidades rurales se usó el mismo procedimiento en terreno.
- **Conectividad y accesibilidad:** para esta variable se utilizó la vialidad general de la comuna la cual fue obtenida de la Dirección de Vialidad del MOP, con información de tipo de vía, y estado. Con respecto a la ciudad de San Antonio la información es obtenida de la SECPLAC, en donde se extrae el estado de la vía (pavimentada o no pavimentada) y del Proyecto Plan Maestro Infraestructura Deportiva y Recreativa de San Antonio se extrae la jerarquía (tipo de vía).
- **Redes de infraestructura equipamiento y servicios:** para esta variable se consideran los siguientes tópicos: red sanitaria, red eléctrica, telecomunicaciones (antenas de repetición, antenas celulares, etc.), centros de salud, centros de educación, centros deportivos, áreas verdes.
  - Para el caso de la red sanitaria se cuenta con información de la localización de la planta de distribución de agua potable, los estanques de distribución, plantas relevadoras y grifos, esta información es obtenida por la SECPLAC y Plan Maestro Aguas Lluvias San Antonio.
  - La red eléctrica es obtenida de información de la SECPLAC y refiere principalmente la localización de los postes dentro de la ciudad de San Antonio.

- El tópico de telecomunicaciones la información obtenida corresponde a la localización de antenas.
- La información para el equipamiento de salud es extraída del Estudio de Red Comuna de San Antonio realizado por la red de salud del municipio, esta información se complementa con la variable de construcciones.
- El tópico de educación es abordado con la localización de los distintos centros educacionales presentes en la comuna, se obtuvieron de la página web del MINEDUC de la georreferenciación de escuelas, en donde se encuentran todos los establecimientos educacionales del país. Ésta será complementada con la información de las construcciones.
- Los centros deportivos serán extraídos del Proyecto Plan Maestro Infraestructura Deportiva y Recreativa de San Antonio, el cual contiene los planos en donde localizan los distintos centros deportivos de la ciudad.
- Las áreas verdes son obtenidas de la información entregada por la SECPLAC.

### **7.3 Análisis de variables de vulnerabilidad**

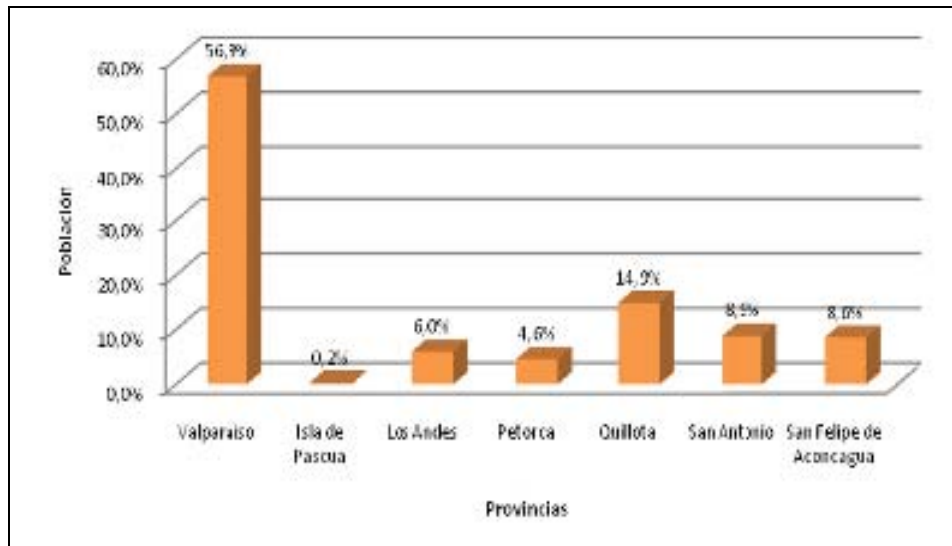
En este apartado se realizará el diagnóstico de las variables que permiten el análisis de vulnerabilidad. Dicho diagnóstico presentará las características generales de la población, de la conectividad y accesibilidad, y las redes de infraestructura, equipamiento y servicios.

#### **7.3.1 Análisis de condiciones demográficas y económicas**

##### ***7.3.1.1 Características de de la población de la Comuna de San Antonio***

La comuna de San Antonio está ubicada en la Provincia del mismo nombre, a 113 km de distancia de la Capital regional Valparaíso, y a 109 km de la ciudad de Santiago.

La Región de Valparaíso cuenta con 1.539.852 habitantes (CENSO, 2002), que se distribuyen de la siguiente manera:



**Gráfico 1 Población Provincias Región de Valparaíso**  
**Fuente: Elaboración propia en base al CENSO 2002**

Siendo la provincia de Valparaíso la que concentra el 57% de la población regional. La provincia de Quillota presenta un 14,9% de los habitantes de la región, y en tercer lugar se encuentra la provincia de San Antonio con una concentración de población regional del 8,9%.

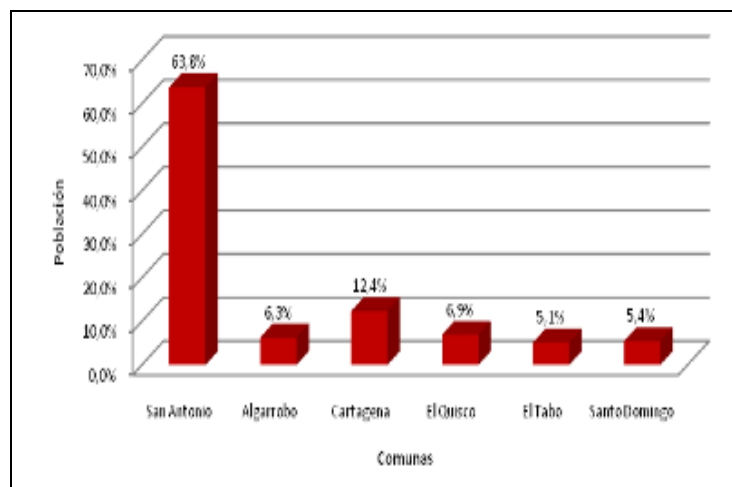
La siguiente figura muestra espacialmente la distribución de población de la Región de Valparaíso:



**Figura 78 Distribución de la Población Regional, Región de Valparaíso**  
Fuente: Elaboración propia en base al CENSO 2002

La Figura 78 muestra claramente la concentración de población en las provincias localizadas al suroeste de la región.

Dentro de la provincia, la comuna de San Antonio es la que presenta la mayor concentración de población con un 63,8% de los habitantes de la provincia, y en segundo lugar se encuentra la comuna de Cartagena con un 12,4% de la población provincial. Ambas comunas presentan las mayores concentraciones de población de la provincia, las otras cuatro comunas presentan porcentajes por debajo del 7% de población (ver Gráfico 2).



**Gráfico 2 Población Comunas Provincia de San Antonio**



**Fuente: Elaboración propia en base al CENSO 2002**

La Figura 79 muestra la distribución de la población dentro de la provincia de San Antonio destacándose la mayor concentración en la comuna del mismo nombre, se debe destacar que todas las comunas de la provincia presentan población en el borde costero.



**Figura 79 Distribución de la Población en las Comunas de la Provincia de San Antonio**

**Fuente: Elaboración propia en base al CENSO 2002**

La Tabla 22 muestra la proyección de población, realizada por el INE, para cada una de las comunas que se encuentran dentro de la provincia de San Antonio.

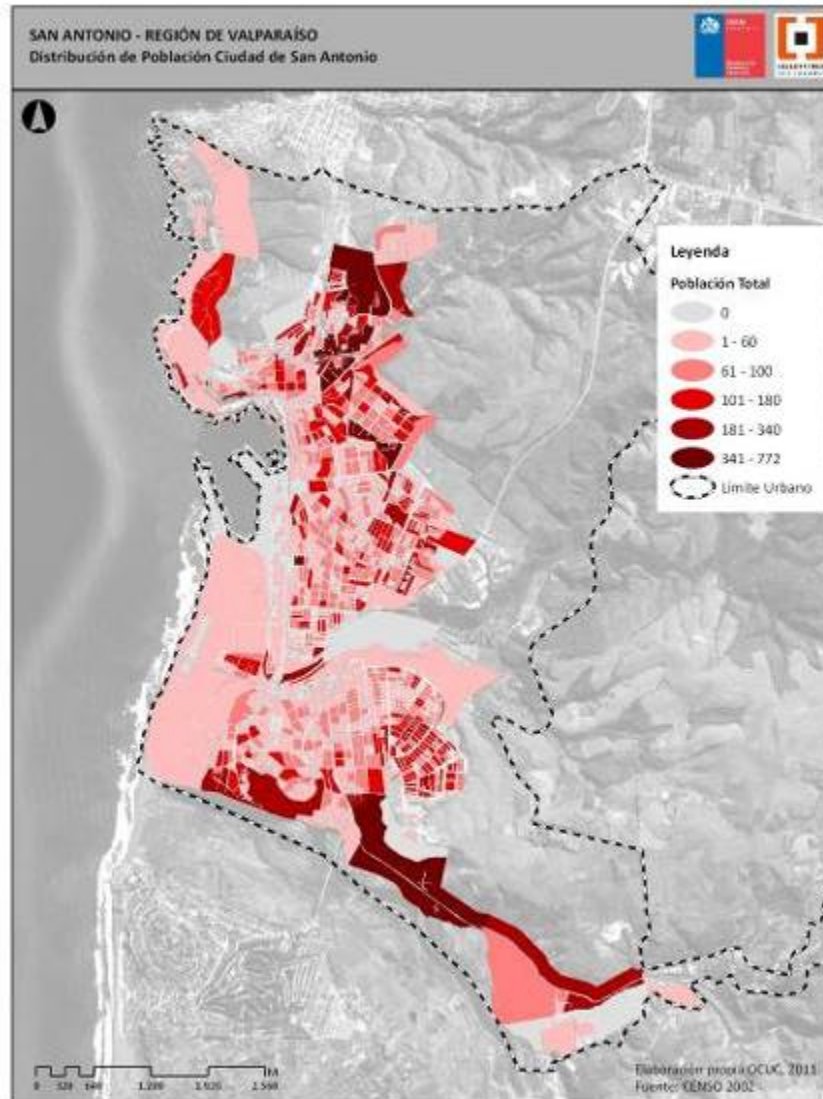
AÑO	San Antonio	Algarrobo	El Quisco	El Tabo	Cartagena	Santo Domingo
2011	99.120	13.011	15.204	11.365	24.942	9.070
2012	99.868	13.472	15.829	11.861	25.787	9.205
2013	100.612	13.926	16.462	12.358	26.625	9.336
2014	101.363	14.382	17.096	12.846	27.466	9.478
2015	102.108	14.843	17.729	13.342	28.312	9.605
2016	102.666	15.360	18.441	13.918	29.233	9.724
2017	103.213	15.871	19.161	14.491	30.166	9.847
2018	103.773	16.386	19.893	15.064	31.097	9.969
2019	104.322	16.901	20.613	15.643	32.027	10.090
2020	104.877	17.420	21.332	16.217	32.953	10.213

**Tabla 22 Proyección de población Comunas Provincia de San Antonio**

Fuente: Elaboración propia en base al CENSO 2002

Como se observa, la comuna de San Antonio es la que muestra la mayor proyección de habitantes, muestra el mayor crecimiento poblacional dentro de la provincia, proyectándose para el año 2020 la cantidad de 104.877 habitantes.

Con respecto a la ciudad de San Antonio la Figura 80 muestra la distribución de la población:



**Figura 80 Distribución de Población Ciudad de San Antonio**

Como se observa en la Figura 80 la distribución de la población en la ciudad es bastante homogénea, se aprecia una mayor concentración de habitantes en la zona nor-oriental (sector de San Antonio), con manzanas que presentan entre 341 a 772 habitantes, esta es la zona más central

de San Antonio y en donde se concentra la mayor actividad de comercio y servicios (centro urbano).

Con respecto a las localidades menores que se encuentran dentro de la comuna, y que presentan límite urbano, muestran las siguientes características demográficas.

Localidad	Hombres	Mujeres	Total
Leyda	245	232	477
Cuncumén	253	256	509
Malvilla	58	61	119

**Tabla 23 Población Localidades, Comuna de San Antonio**  
Fuente: Elaboración propia en base al CENSO 2002

Las tres localidades presentan características de pequeña concentración de población, teniendo un carácter más rural, debido a la densidad de ocupación y a la escasa infraestructura vial.

Con respecto a la distribución de población por grupo etario, las diferencias entre los distintos sectores se espacializan en la Figura 81 y se grafica en la Tabla 24:

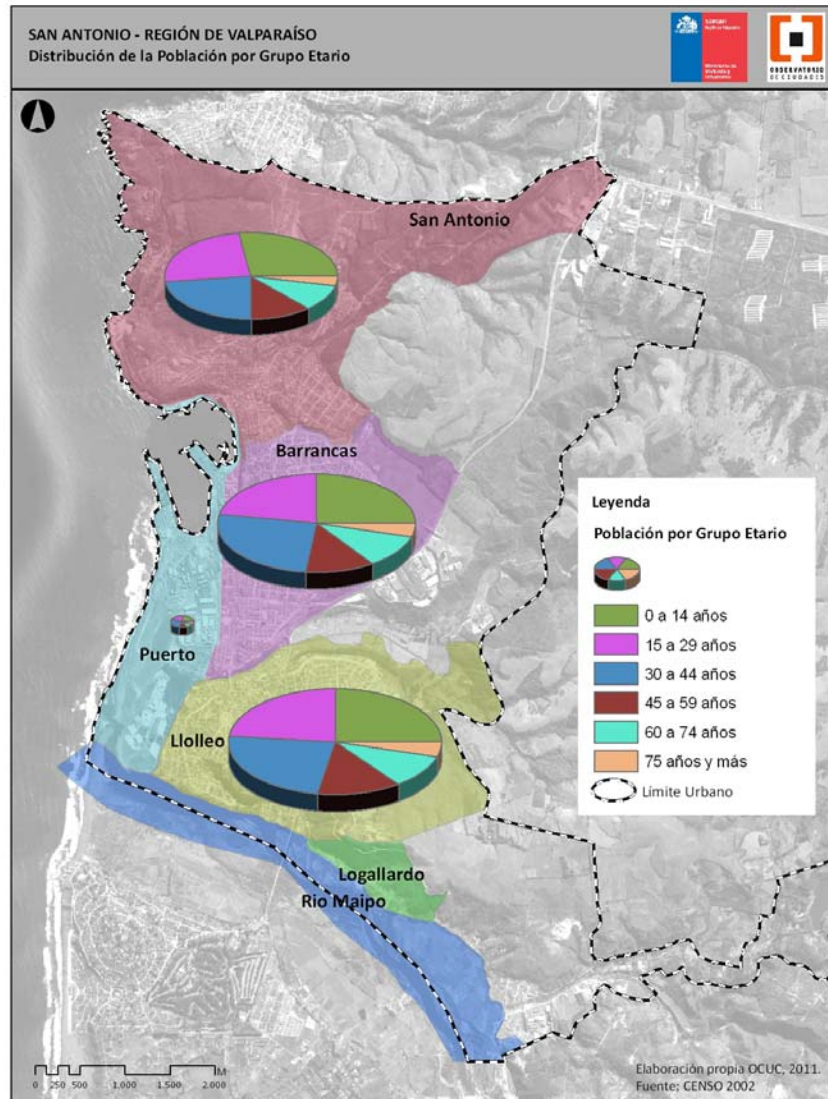


Figura 81. Distribución de la población por grupo etario.  
Fuente: elaboración propia, OCUC, 2011.

Sector	0 a 14 años	15 a 29 años	30 a 44 años	45 a 59 años	60 a 74 años	75 años y más	Total
Barrancas	7.004	6.353	6.846	4.117	2.636	898	<b>27.854</b>
Lolloo	7.874	7.600	7.108	5.265	2.796	1.055	<b>31.698</b>
Puerto	153	147	157	95	64	38	<b>654</b>
San Antonio	6.232	5.155	5.245	3.173	1.769	587	<b>22.161</b>
<b>Total</b>	<b>21.263</b>	<b>19.255</b>	<b>19.356</b>	<b>12.650</b>	<b>7.265</b>	<b>2.578</b>	<b>82367</b>

Tabla 24 Distribución de Población por Grupo Etario Ciudad de San Antonio

La población de 0 a 14 años se concentra en el sector de Lolloe y Barrancas sobre 7.000 habitantes, en el sector de San Antonio se concentran sobre 6.000 habitantes en este rango de edad.

Sobre la población entre los 15 y 29 años se presenta una mayor concentración en el sector de Lolloe. En éste, es en donde se concentra la mayor cantidad de población de la ciudad, y presenta predominancia en todos los grupos etarios. Por lo anterior es importante destacar que la población entre 0 a 14 años presenta 37% con respecto al total del grupo etario, y es un grupo que presenta una importante vulnerabilidad frente a eventos naturales que causen catástrofes.

En el sector de Barrancas hay importantes concentraciones de población sobre los 60 años, destacándose el grupo etario de 60 a 74 años con un 36,3% con respecto a total del grupo.

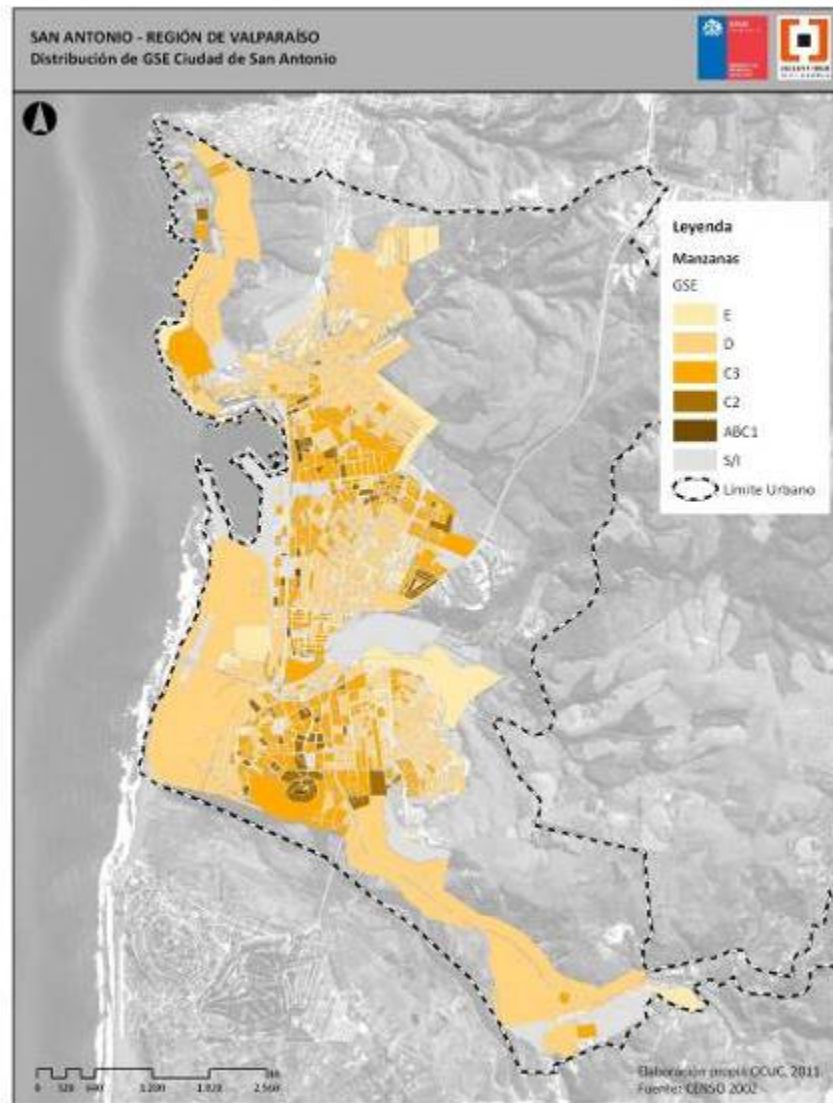
En Lolloe el grupo etario 75 años y más presenta un 40,9% con respecto al total. Lo que indica una importante concentración de población en este rango de edad. Se debe considerar que esta población es vulnerable frente a eventos naturales catastróficos.

El sector puerto presenta poca concentración de población, porque se desarrolla la actividad portuaria y no es de preferencia de residentes.

### 7.3.1.2 Características económicas de la población

En este apartado se mostrarán las características económicas tanto de la población como de las actividades económicas que se desarrollan en la comuna de San Antonio.

La Figura 82 muestra la distribución de los GSE de la ciudad de San Antonio, siendo los de mayor concentración de hogares los grupos D, C3 y E.



**Figura 82 Distribución de los GSE en la Ciudad de San Antonio**  
**Fuente: Elaboración propia, OCUC 2011.**

En el sector de Llole se presentan manzanas con GSE predominante D en la ribera y cercano a la desembocadura del río Maipo. Se debe destacar que los GSE más altos (C3, C2 y ABC1) se localizan principalmente en las zonas más centrales de los sectores de San Antonio (centro), Barrancas y Llole. En las partes más periféricas de la ciudad se localizan principalmente los GSE d y E.

La Tabla 25 muestra la cantidad y porcentajes de hogares por GSE, el grupo D es el que predomina en la ciudad con un 42% de hogares en dicho GSE, seguido por C3 con 25% y E con 17% de hogares.

GSE	Hogares	Porcentaje
E	6.713	17%
D	16.301	42%
C3	9.926	25%
C2	4.992	13%
ABC1	1.003	3%
<b>Total</b>	<b>38.935</b>	<b>100%</b>

**Tabla 25 Distribución de los GSE en la Ciudad de San Antonio**  
Fuente: Elaboración propia OCUC, 2011. En base al CENSO 2002

Con respecto a la actividad económica que se desarrolla en San Antonio se destaca que el 57,2% personas se dedican a labores de servicio, seguido por la actividad de transporte y telecomunicaciones con un 15,4%.

Con respecto al empleo, la información recogida del estudio de red de salud de la comuna, expresa que la encuesta CASEN (2006) en términos comparativos para los años 1998, 2003 y 2006, los niveles de empleabilidad, el porcentaje de desocupados ha ido en aumento a medida que aumenta la población. Por otro lado, el porcentaje de ocupación laboral ha descendido, para el tramo en 1998-2003 en un 1,3% y para 2003-2006 un 0,5%.

Los datos entregados por la misma encuesta, expresan que para la comuna de San Antonio existe un total de 34.698 personas ocupadas y 4.657 desocupadas, lo que equivale a un 11.9% de la población económicamente activa.

La memoria explicativa del PRC expresa que hay poca diversificación de la base económica de la ciudad, lo cual se refleja en los datos expuestos en la Tabla 26.

Actividad	Porcentaje
Agricultura y Silvicultura	4,3%
Pesca	4,2%
Minería	0,4%
Industria	9,1%
Construcción y Actividad Inmobiliaria	9,3%
Servicios	57,2%
Transporte y Telecomunicaciones	15,4%

Tabla 26 Actividad económica de San Antonio  
Fuente: Elaboración propia OCUC, 2011. En base al CENSO 2002

Se debe destacar la pesca artesanal ya que dentro de la comuna se presentan tres caletas de pescadores las cuales están dentro de la zona urbana de San Antonio. Estas caletas pesqueras son: Puertecito, Pacheco Altamirano y Desembocadura Río Maipo. De la información entregada sobre la actividad pesquera de la comuna se puede apreciar que todas estas presentan una buena organización como infraestructura<sup>6</sup>, lo cual en la etapa de diagnóstico se analizará su vulnerabilidad frente a las distintas amenazas que se pueden ver afectadas.

### 7.3.2 Conectividad y Accesibilidad

La principal vía de acceso a la comuna de San Antonio y a su centro urbano es la Ruta 78 (Autopista del Sol), que comunica a Santiago con el puerto de San Antonio y sus alrededores. Esta vía, está constituida por una moderna autopista de alto estándar, cuya administración está concesionada a particulares.

Para el acceso norte y conexión con el puerto de Valparaíso existe la variante Ruta G-962-F que conecta con la Ruta 68 (autopista Santiago-Valparaíso), la cual al salir de San Antonio se conecta con la G-82, para empalmar con la G-94-F, luego con la F-90 para conectar con la Ruta 68 (Cruce Ruta 68 Casablanca-Algarrobo).

Para el acceso sur existe la Ruta 66 (Camino de la Fruta), la cual conecta directamente al puerto de San Antonio con la Ruta 5 a la altura de Pelequén.

Existe un ramal ferroviario, que conecta Santiago con el puerto de San Antonio, el cual en la actualidad se encuentra sin utilización para transporte de pasajeros, sólo se utiliza para el transporte de carga asociado al puerto.

La Figura 83 muestra las distintas rutas que conectan a San Antonio con el resto del País, presentando una importante accesibilidad desde Santiago y el sur (para mayor detalle de este mapa, ver anexos).

<sup>6</sup> Ilustre Municipalidad de San Antonio 2006, Investigación Recursos Pesqueros, San Antonio.



Con respecto al estado de las rutas anteriormente nombradas la Ruta 78, es una autopista de un buen estándar, la Ruta 66 presenta un estado de la berma bueno, calzada regular y en el Km 82,5 la calzada se encuentra en mal estado por reconstrucción. La ruta con la cual se conecta a Valparaíso G-962-F se encuentra en muy buen estado, tanto la Berma como la calzada<sup>7</sup>.

Todas las rutas que son utilizadas en la conectividad de San Antonio con el país (nombradas anteriormente) se encuentran con carpeta de pavimento.

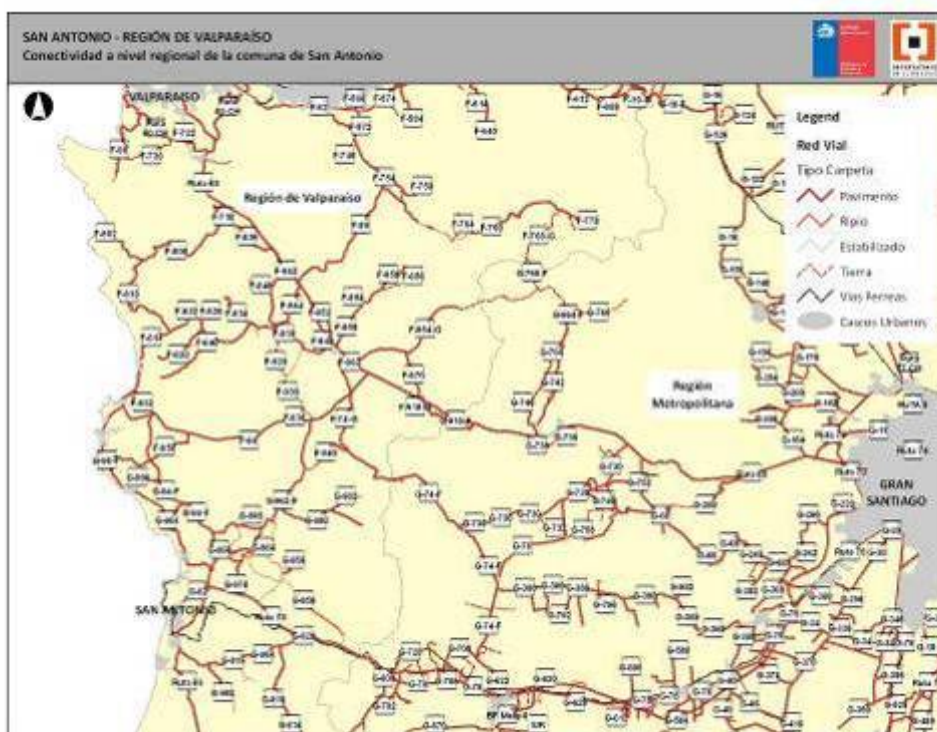


Figura 83 Conectividad a Nivel Regional de la Comuna de San Antonio

Fuente: Elaboración propia, 2011. En base a información Dirección de vialidad, MOP

La ciudad de San Antonio tiene un rol de dotador de servicios y equipamientos intercomunales, siendo el polo de desarrollo dentro del sistema urbano de la provincia y de la región gracias a la conexión con la zona central, por lo cual constituye un importante atractivo para futuras inversiones en los sectores portuarios, residenciales, industriales y turísticos. Esta afirmación radica principalmente por la accesibilidad que presenta la ciudad de San Antonio.

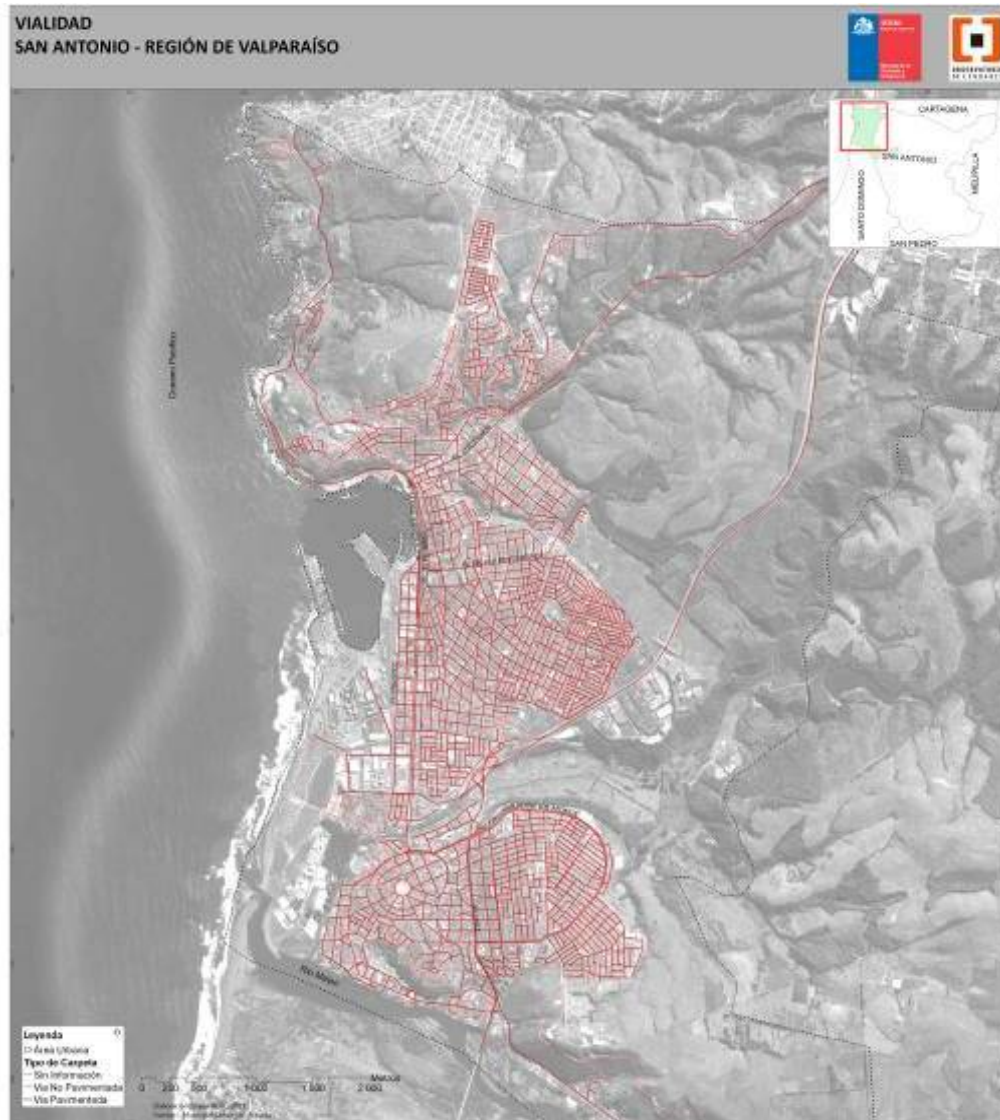
Las localidades interiores, tienen la siguiente conectividad:

- La localidad de Leyda se localiza al sur de la ruta 78, cuya conexión la une directamente con la ciudad de San Antonio.

<sup>7</sup> Información entregada por la Dirección de Vialidad, MOP Proposición de Acciones de Mantenimiento y Estado de la Calzada y Bermas para caminos pavimentados - Año 2010

- La localidad de Cuncumén tiene una accesibilidad por tres rutas G-820 que es conexión entre ésta y Cuncumén bajo, la ruta G-814 que es conexión con Leyda y con la ciudad de San Antonio al empalmarse con la ruta G-904 y la ruta G-800 que conecta a esta localidad con la Ruta-78. Todas estas rutas se encuentran pavimentadas.
- La localidad de Malvilla, presenta vías de carácter rural que la conectan con la Ruta 78, cuya conexión une esta localidad con la ciudad de San Antonio.

Con respecto a la vialidad de la ciudad de San Antonio, cuenta con 296,7 Km de las cuales el 84,3% se encuentran pavimentadas y 15,6% son de tierra. La Figura 84 muestra las calles de la ciudad diferenciadas según tipo de carpeta.



**Figura 84 Vialidad Ciudad de San Antonio**

**Fuente: Elaboración propia 2011 OCUC. En base a información de la I. Municipalidad de San Antonio**

Dentro de la distinta información recopilada, de la red vial se puede afirmar que esta presenta restricciones, principalmente en la zona centro de la ciudad, con gran concentración de vehículos como de peatones, sobretodo en la temporada estival. Esto tiene como resultado una saturación de la capacidad de infraestructura vial, afectando principalmente al transporte público, y considerando las condiciones socioeconómicas predominantes, es el más relevante en términos de conectividad dentro y fuera de la ciudad<sup>8</sup>.

Dentro del Diagnóstico Cuantitativo del PLADECO, en la estructura urbana interna confirman la afirmación del párrafo anterior, especificando que *“la estructura, consolidación, y ocupación de la red vial que genera congestión vehicular en diversos puntos de la ciudad”*, por otro lado, también se presenta como restricción las dificultades topográficas de la ciudad para constituir conexiones viales alternativas principalmente a Av. Ramón Barros Luco en una cota más alta<sup>9</sup>.

Otro elemento importante de destacar, es lo que se expresó en párrafos anteriores sobre el porcentaje de vías sin pavimentar las cuales generan erosión y contaminación por el material particulado.

Otra restricción que se hace referencia en el PLADECO sobre la vialidad es la siguiente: *“Una red vial no jerarquizada y deficiente en cuanto a conexiones expeditas entre los distintos sectores de la ciudad, lo que produce saturación en el eje estructurante de Av. Ramón Barros Luco”*.

Pero se pueden determinar potencialidades, las cuales al desarrollar distintos proyectos pueden ayudar a disminuir la vulnerabilidad de la población frente amenazas naturales. Las mencionadas en el PLADECO son las siguientes<sup>10</sup>:

- La malla vial inconclusa, lo que ayuda a definir una nueva accesibilidad, cuestión fundamental como factor de localización de sectores residenciales, industrias, empresas y actividades asociados al puerto, así como eficiencia en el funcionamiento del territorio portuario y la ciudad.
- La ruta concesionada "Autopista del Sol", permite un flujo más expedito y rápido entre San Antonio y Santiago, por lo que es posible un aumento de los flujos actuales por incremento en la población residente.
- La construcción de la vía concesionada inter balnearia Cartagena-Quintay y su prolongación hacia San Antonio, que permitiría descongestionar en gran medida el actual eje Av. Ramón Barros Luco, además de estructurar vialmente la parte alta de la ciudad.

---

<sup>8</sup> Ilustre Municipalidad de San Antonio, Secretaría Comunal de Planificación y Coordinación, Estudio de pre factibilidad para la remodelación del centro de San Antonio.

<sup>9</sup> Ilustre Municipalidad de San Antonio, PLADECO 2008-2013

<sup>10</sup> Dichas potencialidades son expuesta en el Diagnóstico Cuantitativo del PLADECO expuesto en el punto 1.2.2.4 Vialidad

- La factibilidad de otorgar continuidad a vías longitudinales paralelas al borde mar en las partes más altas, supeditadas a un número menor de expropiaciones y la creación de viaductos sobre los accidentes topográficos importantes, por ejemplo: el eje Av. Chile-Independencia-Caupolicán - San Antonio de la Bodegas, como una valiosa alternativa a la Av. R. Barros Luco, en la interconexión de la ciudad. Actualmente ya está construido el viaducto que une Av. Chile con Independencia.

Otra información importante de destacar, es la inversión en proyectos del sector transporte enfocados al mejoramiento de las distintas vías de la ciudad. La Tabla 27 muestra los distintos proyectos que se presentaron en el 2010 sobre el mejoramiento de distintas vías de la ciudad de San Antonio.

El total invertido en este ítem alcanza a 7.480.565 M\$, de los cuales el 76% corresponden al Fondo Nacional de Desarrollo Regional.

FUENTE	NOMBRE	UNIDAD VECINAL	SECTOR	MONTO M\$	ESTADO
<b>CIRC 33</b>	Bacheos calzadas San Antonio, Barrancas y Lollole	COMUNA	TRANSPORTE	239.017	En Ejecución
<b>FNDR</b>	Pavimento Avda. San Antonio de las Bodegas	6	TRANSPORTE	680.501	Ejecutado
<b>FNDR</b>	Pavimentación Av. M. Bulnes Prieto	4 y 5	TRANSPORTE	478.527	En Licitación
<b>FNDR</b>	Construcción Pavimentación Circuito Av. Asturias y M. Mena	2	TRANSPORTE	893.660	En Licitación
<b>FNDR</b>	Construcción de Veredas y Estacionamientos, Sector Centro de Lollole, San Antonio	23	TRANSPORTE	1.044.288	En Licitación
<b>FNDR</b>	Construcción Rampa G. Mira y Mejoramiento Eje Gregorio Mira, Comuna San Antonio.	8	TRANSPORTE	2.124.608	Financiado
<b>FNDR</b>	Diagnóstico para Pre factibilidad Terminal de Buses	18	TRANSPORTE	40.600	Postulado
<b>FNDR</b>	Construcción atravesio Av. Centenario sobre Estero Arévalo	8	TRANSPORTE	206.486	Postulado
<b>FNDR</b>	Construcción Pavimento Calle Maestranza	13	TRANSPORTE	226.797	Postulado
<b>MOP</b>	Conservación Global Caminos Rurales	RURAL	TRANSPORTE	960.000	En Ejecución
<b>MINVU</b>	Pavimentos participativos 20 llamado Manuel Montt, Los Españoles, Calle 1, calle 2, los líquenes Juan Vargas, Desiderio Soto, Los boldos, Israel, Violeta Parra, Osca Castro, Holanda, Lo Vásquez, los Huemules	COMUNA	TRANSPORTE	586.081	Financiado

**Tabla 27 Inversiones Sector Transporte 2010, Comuna de San Antonio**

**Fuente: Ilustre Municipalidad de San Antonio, Inversiones 2010**

### 7.3.3 Construcciones

Para el caso de las construcciones la información se obtuvo del trabajo realizado en terreno, se consideró la materialidad de las construcciones a nivel de predio. El total de éstos que fueron catastrados son un total de 25.364, de los cuales 69% corresponde a construcciones de materialidad de albañilería y el 25% a material de madera (ver Tabla 28).

MATERIALIDAD	CANTIDAD	PORCENTAJE
ADOBE	20	0,1%
ALBAÑILERÍA	17.504	69,0%
DESECHOS	4	0,0%
MADERA	6.346	25,0%
OTRO	133	0,5%
SIN MATERIALIDAD	1.357	5,4%
<b>TOTAL</b>	<b>25.364</b>	<b>100%</b>

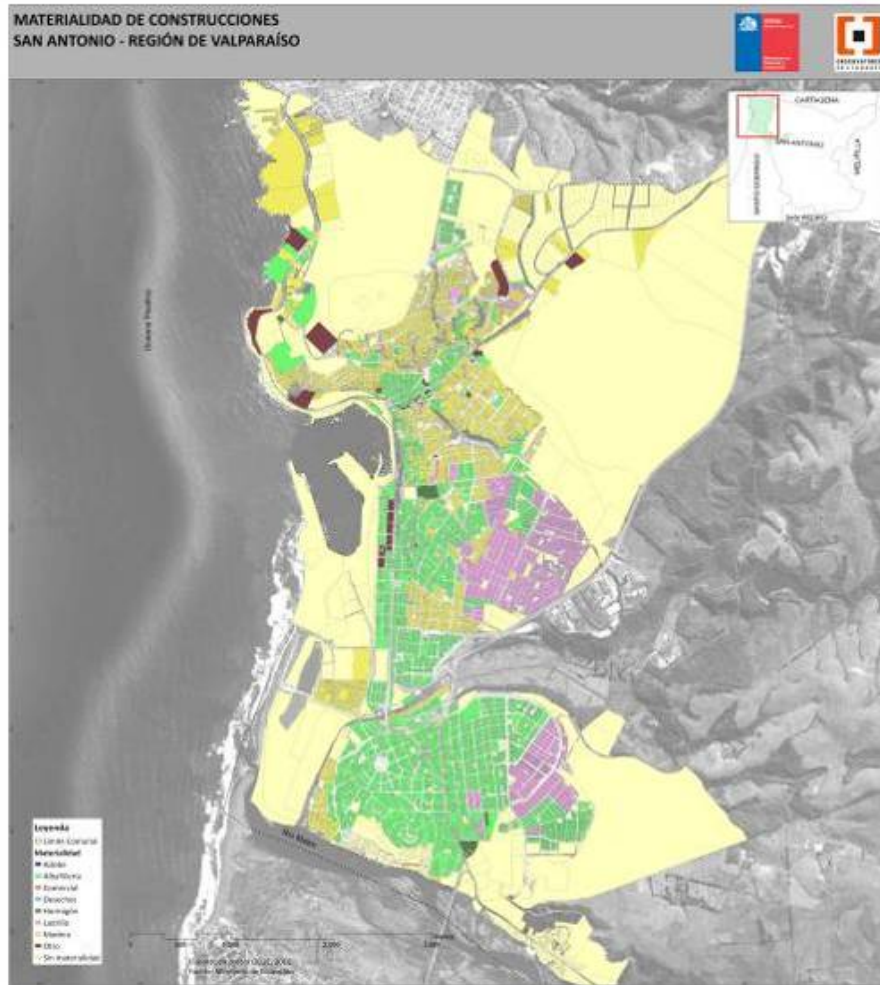
Tabla 28 Materialidad de las construcciones ciudad de San Antonio  
Fuente: Elaboración propia, OCUC 2011.

Con respecto a cada sector, las diferencias radican entre la materialidad de madera y albañilería, en el caso de San Antonio hay una predominancia de construcciones de madera, como se observa en la Figura 85 y en la Tabla 29.

En el caso de Barrancas predominan las construcciones de materialidad de albañilería, lo mismo sucede en el sector de Lolleo. La Figura 85 muestra la distribución de las construcciones según su materialidad en la ciudad de San Antonio.

SECTOR	ADOBE	ALBAÑILERÍA	DESECHOS	MADERA	OTRO	SIN MATERIALIDAD	TOTAL
BARRANCAS	0	7.466	0	1.594	55	333	9.448
LOLLEO	0	8.323	0	357	0	664	9.344
SAN ANTONIO	20	1.715	4	4.395	78	360	6.572
<b>TOTAL</b>	<b>20</b>	<b>17.504</b>	<b>4</b>	<b>6.346</b>	<b>133</b>	<b>1.357</b>	<b>25.364</b>

Tabla 29 Materialidad de las construcciones, sectores de la ciudad de San Antonio  
Fuente: Elaboración propia, OCUC 2011.



**Figura 85 Materialidad de Construcciones, San Antonio**  
Fuente: Elaboración propia, OCUC 2011.

Con respecto al estado de las construcciones en la ciudad de San Antonio, predominan construcciones en buen estado, lo que indica que pueden ser habitadas y/o utilizadas en servicios o comercio (ver Tabla 30). La cantidad de construcciones en regular estado presentan 12% del total catastrado y las que están en mal estado sólo alcanzan un 0,5%.

Para ver este mapa con mayor detalle, ver anexo n°5.

MATERIALIDAD	BUENO	MALO	REGULAR	S/I	TOTAL
<b>ADOBE</b>	10	0	10	0	<b>20</b>
<b>ALBAÑILERÍA</b>	16.451	24	1.020	9	<b>17.504</b>
<b>DESECHOS</b>	0	4	0	0	<b>4</b>
<b>MADERA</b>	4.284	85	1.977	0	<b>6.346</b>
<b>OTRO</b>	83	3	47	0	<b>133</b>
<b>SIN MATERIAIDAD</b>	0	0	0	1.357	<b>1.357</b>
<b>TOTAL</b>	<b>20.828</b>	<b>116</b>	<b>3.054</b>	<b>1.366</b>	<b>25.364</b>

**Tabla 30 Estado de las Construcciones, Ciudad de San Antonio**  
**Fuente: Elaboración propia, OCUC 2011.**

Con respecto a las construcciones de adobe se puede inferir que son pocas, ya que después del terremoto del año 1985, las más antiguas se vinieron abajo o quedaron en mal o regular estado, por lo que se fueron reforzando con trabajo de albañilería, y en consecuencia actualmente predominan estas características. También se debe destacar que las nuevas construcciones realizadas dentro de ciudad son de albañilería.

Con respecto a las tres localidades rurales, predominan las construcciones de material de madera y hay una equidad entre la albañilería y el adobe, esto se aprecia en la Tabla 31.

LOCALIDADES	ALBAÑILERÍA	MADERA	ADOBE	DESECHOS	TOTAL
CUNCUMÉN	30	88	39	1	158
LEYDA	13	107	10	0	130
MALVILLA	4	32	3	1	40

**Tabla 31 Materialidad de las construcciones, Localidades rurales**  
**Fuente: Elaboración propia, OCUC 2011.**

## 7.4 Redes de infraestructura, Equipamiento y servicios

En este apartado se identifican las características de la infraestructura, equipamientos y servicios de la comuna de San Antonio. La información se presenta con los siguientes tópicos:

Variables	Sub-variables
<b>Infraestructura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Infraestructura Sanitaria</li> <li>• Infraestructura Eléctrica y Telecomunicaciones</li> <li>• Deposition de Residuos Sólidos</li> </ul>
<b>Equipamiento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Educación</li> <li>• Salud</li> <li>• Seguridad</li> <li>• Áreas Verdes</li> </ul>
<b>Servicios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comercio y Servicios varios</li> </ul>

Tabla 32 Tópicos de análisis de las redes de infraestructura, equipamientos y servicios  
Fuente: Elaboración propia, OCUC 2011.

### 7.4.1 Infraestructura

#### 7.4.1.1 *Infraestructura Sanitaria*<sup>11</sup>

En la actualidad las localidades urbanas del litoral de la V Región que cuentan con servicio sanitario son Santo Domingo, San Antonio, Cartagena, San Sebastián, Las Cruces, El Tabo, El Quisco y Algarrobo. Todas estas son atendidas por Aguas Quinta, actual ESVAL para ellas, a excepción de Santo Domingo que es atendido por la Cooperativa de Agua Potable de Santo Domingo.

La principal fuente de abastecimiento son las aguas superficiales del río Maipo, las que son tratadas en la planta San Juan de Lolleo. Ésta se ubica a 4.5 km. al oriente de la localidad, cerca de la ribera Norte del Río Maipo, a unos 6 km. aguas arriba de su desembocadura al mar. Desde esta planta, son abastecidas las ciudades de San Antonio y el resto de las localidades hacia el norte, mediante un sistema de impulsión y aducción que corre paralelo a la costa. Los estanques de regulación de las distintas localidades se abastecen directamente de la aducción, excepto para los sectores altos de San Antonio, donde existen planta reelevadoras.

En la comuna de San Antonio, el sistema de regulación y distribución de agua potable cuenta con nueve estanques de regulación que suman una capacidad de 17.300 m<sup>3</sup>, cinco plantas reelevadoras (La Viuda, Villa Italia, Villa Italia Alto, La Virgen y La Virgen Alto), 188 km. de cañerías, 248 válvulas y 334 grifos.

La red de alcantarillado, consiste principalmente en un sistema de tuberías de cemento comprimido con diámetros comprendidos entre 100 mm y 700 mm, con extensión aproximada de

<sup>11</sup> Información extraída del Estudio de Factibilidad de Servicios Sanitarios 2002 del PRC y del Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de San Antonio y Cartagena, V Región, 2003.



111 km. El sistema posee dos plantas elevadoras (Llolleo y Barrancas) y tres descargas al mar (Llolleo, Barrancas y Dolores Placilla). Todas estas descargas se efectúan con tratamiento preliminar de aguas servidas y disposición marina mediante un emisario submarino<sup>12</sup>, la planta física está localizada en la zona de San Antonio, en la Avenida Manuel Bulnes Prieto. Dicha planta está en funcionamiento desde marzo de 2006.

Las localidades de Leyda, Malvilla y Cuncumén cuentan con el sistema de Agua Potable Rural.

#### **7.4.1.2 Infraestructura Eléctrica y telecomunicaciones**

Con respecto a la infraestructura eléctrica de la ciudad, sólo se cuenta con una subestación eléctrica al costado de la Variante Ruta Nacional 78 – Ex Nuevo Acceso al Puerto (o By Pass) Ruta Nacional 78, se emplaza en un lugar que con los debidos resguardos no debiera presentar un obstáculo mayor al desarrollo de la ciudad, toda vez que su geografía ya presenta umbrales físicos a la expansión urbana.

En telecomunicaciones las antenas repetidoras de señal de radio y televisión se encuentran en el cerro Centinela. También se encuentran antenas de celulares distribuidas en la ciudad.

#### **7.4.1.3 Deposición de Residuos sólidos**

La deposición de los residuos sólidos domiciliarios se efectúan en la actualidad, en el vertedero ubicado en la comuna de Cartagena, administrado por la empresa ECOGARBAGE que posee una autorización sanitaria que le permite operar hasta una cota determinada. De acuerdo a la cubicación que obra en la carpeta del Plan de Cierre aprobado en octubre de 2008 por la Autoridad Sanitaria, la vida útil de ese vertedero se proyecta a 4 años 6,5 meses.

De información extraída del PLADECO, se explica que se realiza una optimización del vertedero Altos de Cartagena, lo que implica que puede recibir residuos hasta el año 2010. Posteriormente en el caso de San Antonio, los residuos domiciliarios serán enviados al relleno sanitario Los Molles en la comuna de Valparaíso camino a Laguna Verde por un período de 8 años. En el PLADECO se especifica que la recolección y disposición final de basuras domiciliarias requiere de una mejor gestión y frecuencia, ya que la proyección de vida útil del actual vertedero en donde se depositan los Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD) es de pocos años.

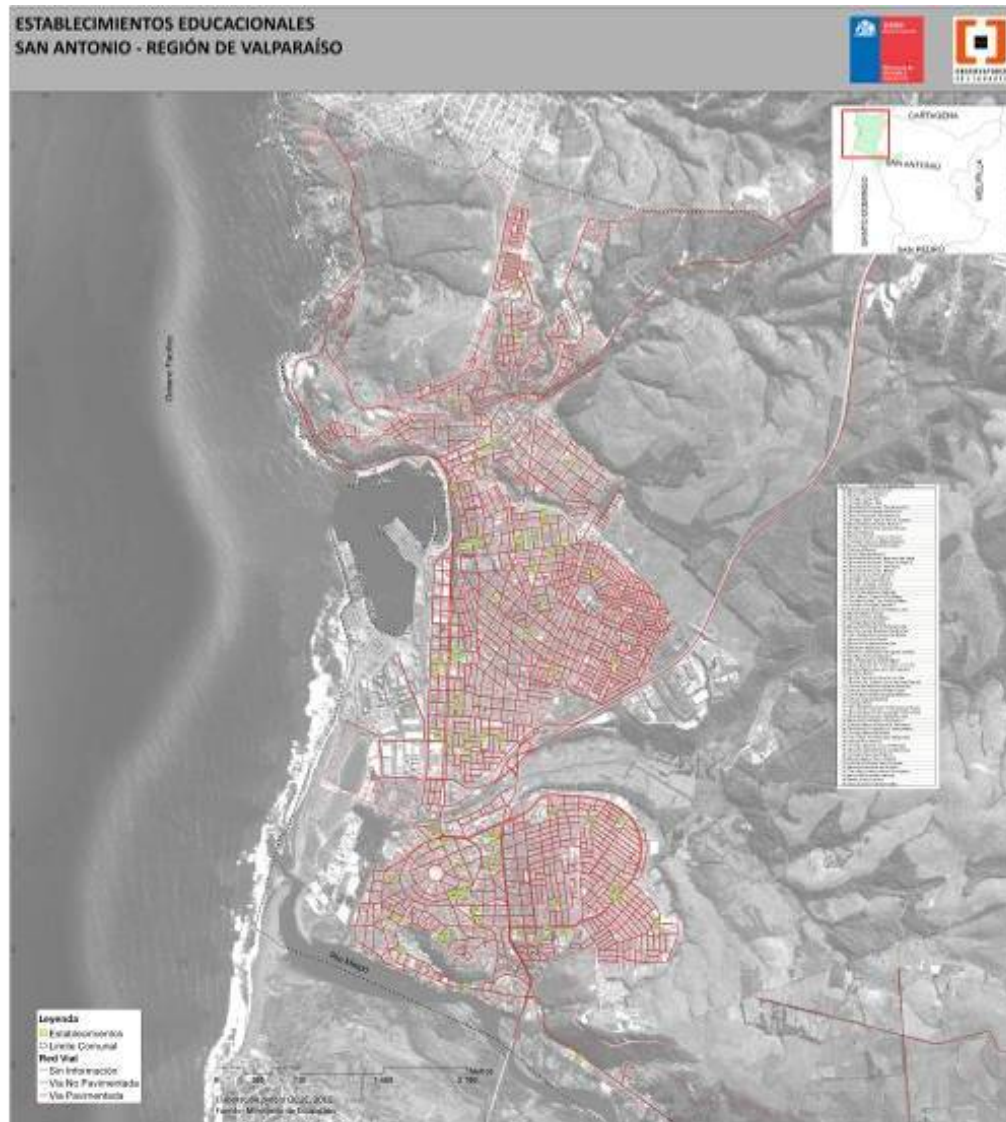
### **7.4.2 Equipamiento**

#### **7.4.2.1 Educación**

Con respecto al equipamiento de educación se obtuvo la información de localización de los 71 establecimientos presentes en la comuna de San Antonio a través de la georreferenciación de escuelas del Ministerio de Educación. La Figura 86 muestra la localización de dichos establecimientos (para mayor detalle, ver anexo n°6):

---

<sup>12</sup> Información obtenida del la DIA Proyecto: “San Antonio; Planta de Tratamiento Físico de Aguas Servidas y Emisarios Terrestre y Submarino” el cual fue aprobado en diciembre 2005



**Figura 86 Establecimientos Educativos, Ciudad de San Antonio**  
**Fuente: Elaboración propia 2011, OCUC. En base a información del MINEDUC**

La Figura 86 muestra la caracterización de los distintos establecimientos educativos, ya sea de dependencia privada, subvencionada y municipal. Este trabajo se obtuvo con la información recopilada desde el MINEDUC y contrastada con el trabajo realizado en terreno.

Se presenta una tendencia de los establecimientos particulares por abandonar el centro de la ciudad para radicarse en el centro de Llole, el cual presenta mejores condiciones de localización. Al contrario, los establecimientos públicos secundarios se concentran en el centro de San Antonio. La educación primaria, tiene una distribución más homogénea asociado a centros poblacionales<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> Ilustre Municipalidad de San Antonio Estudio complementario Análisis del Equipamiento y Servicios Comerciales de San Antonio del PRC.

La educación superior se presenta en centros de formación técnica, todos ellos localizados en Lilloe, además de una sede universitaria, otras dos sedes se localizan en Barrancas y en el centro de San Antonio.

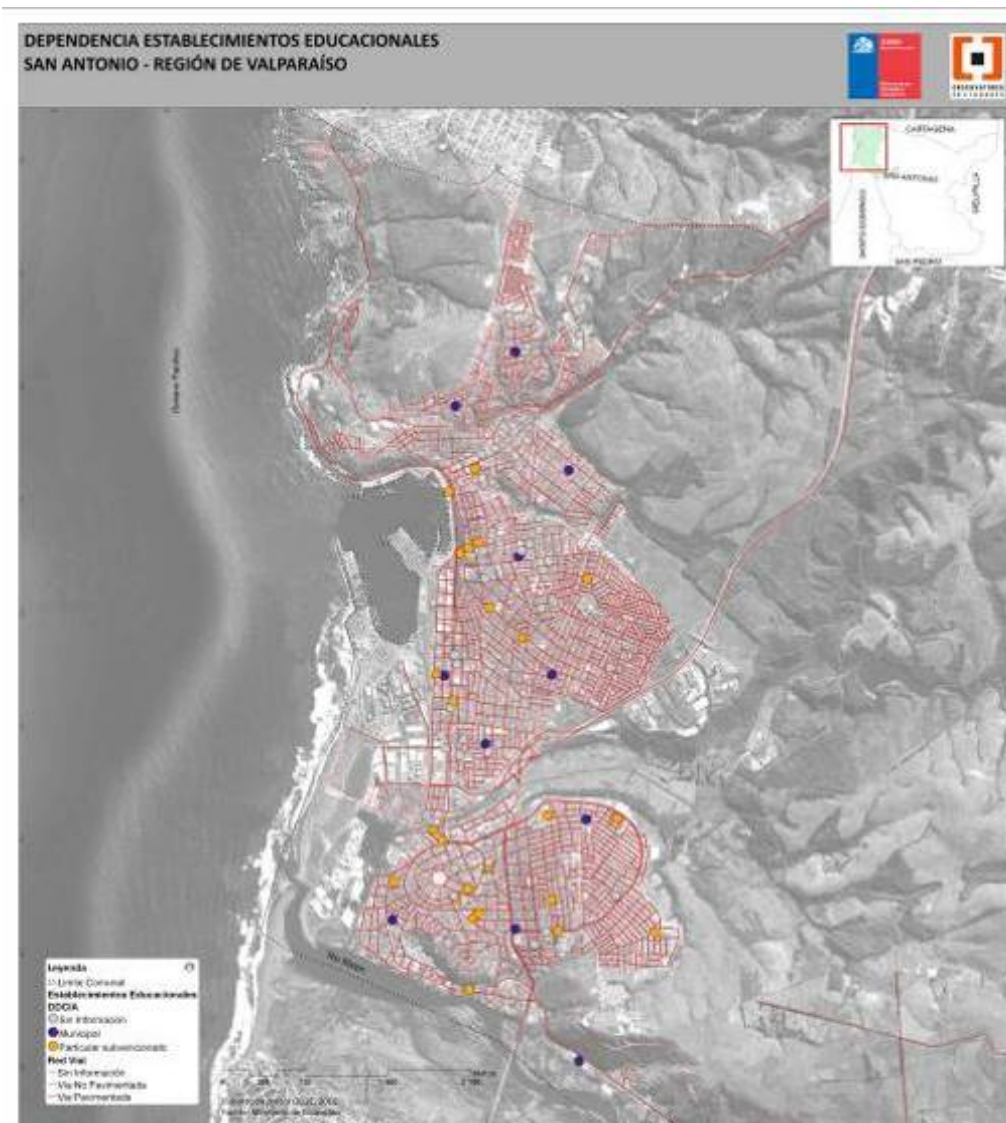


Figura 87. Dependencia Establecimientos Educativos.

#### 7.4.2.2 Salud<sup>14</sup>

La red de salud de la comuna está conformada por el Hospital Claudio Vicuña de San Antonio, que corresponde al único establecimiento hospitalario de la Provincia, definido como de mediana complejidad, y que dispone de 154 camas distribuidas en diferentes servicios<sup>15</sup>.

<sup>14</sup> La información de este apartado es entregada por el Estudio de Red Comuna de San Antonio realizado por la dirección de salud del municipio.

Servicios Clínicos	Especialidades
Urgencia	Urología
Medicina	Traumatología
Cirugía	Salud Mental Adulto
Gineco-Obstetricia	-----
Pediatría	-----

**Tabla 33 Servicios y Especialidades Hospital Claudio Vicuña**

**Fuente:** Ilustre Municipalidad de San Antonio, Dirección de Salud 2011 Estudio e Red Comuna de San Antonio  
La Red de Urgencia de salud de la comuna, está conformada por:

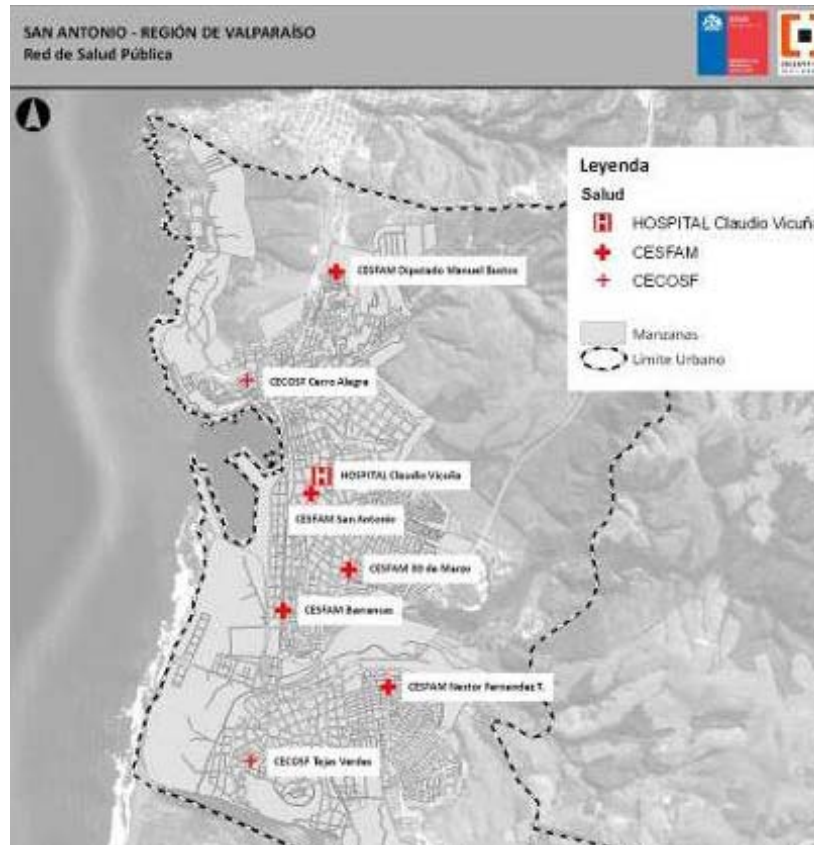
- Unidad de Emergencia del Hospital Claudio Vicuña.
- Servicio de Atención Primaria de Urgencia SAPU del CESFAM Néstor Fernández Thomas.
- Servicio de Atención Primaria de Urgencia SAPU del CESFAM Diputado Manuel Bustos.

La Red de Rehabilitación está conformada por:

- Centro de Rehabilitación con Base Comunitaria San Antonio de Padua, dependiente de la Dirección de Salud Municipal de la I. Municipalidad de San Antonio.
- Centro de Rehabilitación Integral, dependiente de DIDECO del municipio.

---

<sup>15</sup> Ilustre Municipalidad de San Antonio, Dirección de Salud 2011 Estudio e Red Comuna de San Antonio.



**Figura 88. Red de Salud pública.**  
Fuente: elaboración propia.

#### **7.4.2.3 Seguridad**

En San Antonio se concentran los centros de mando provincial de las fuerzas de seguridad: Prefectura y Comisaría de Carabineros, Cuartel de Policía de Investigaciones y Centro de Readaptación Social CRS de San Antonio (ex Cárcel y/o Penitenciaría), localizados en Barrancas y San Antonio respectivamente. También existe una subcomisaría de Carabineros en Lloleto.

La ciudad, por su condición de puerto y base militar aloja en los extremos de la ciudad, instalaciones de la Armada en el Paseo Bellamar y Paseo El Mar (Gobernación Marítima) y en el sector de El Faro (Guarnición Naval), al norte de San Antonio; y un regimiento especializado del Ejército, en el sector de Tejas Verdes, Lloleto (Escuela de Ingenieros Militares).

Además, la ciudad cuenta con cuatro cuarteles de Bomberos, en San Antonio, Barrancas, Lloleto y San Juan-Lo Gallardo, directamente asociados con la generación de los grandes macro-barrios de la ciudad.

#### **7.4.2.4 Áreas Verdes**

Dentro del estudio “Análisis del Equipamiento y Servicios Comerciales” del PRC, se expresa que la ciudad presenta un importante déficit de áreas verdes, sobre todo por el escaso grado de consolidación de estas áreas.

Es importante incluir estas áreas en el análisis de vulnerabilidad para considerarlas en futuros planes de evacuación, ya que estas pueden ser utilizadas como zonas seguras frente a eventuales amenazas naturales.



**Figura 89. Áreas Verdes.**  
Fuente: elaboración propia.

### 7.4.3 Servicios

#### 7.4.3.1 Comercio y servicios varios

La localización del comercio y de los servicios (financieros, cívicos, administrativos, entre otros) es en el centro de San Antonio y Llole, como dos nodos centrales de la ciudad, siendo jerárquicamente más importante el de San Antonio.

También se ha consolidado un área comercial en el sector de la Plaza de Barrancas, pero en éste también se presenta una localización de servicios administrativos y cívicos en el eje Av. Ramón Barros Luco.

Los servicios financieros y empresas se localizan mayoritariamente en el sector de San Antonio centro, pero también se refleja un emplazamiento de estos servicios en Llole y Barrancas.

Con respecto al puerto de San Antonio, presta un servicio que es más allá de lo económico para la ciudad, también le da una identidad propia a la ciudad y a sus habitantes.

El puerto está compuesto, con respecto a los sitios de atraque, por 4 terminales y 9 sitios de atraque: Terminal Molo Sur (sitios 1,2,3) operado por el concesionario San Antonio Terminal Internacional, STI, con el sistema mono operador; Terminal Espigón (sitios 4, 5, 6 y 7) operado por múltiples empresas bajo el sistema multi operador y administrado por la Empresa Portuaria San Antonio; Terminal Norte (sitio 8) especializado en gráneles sólidos de importación, el que está operado por el concesionario Puerto Panul con el sistema mono operador; y el Terminal Policarpo Toro (sitio 9) especializado en líquidos y operado en contrato por Vopak Terminal San Antonio Ltda.

Puerto Panul posee además 6 cintas transportadoras que permiten movilizar los gráneles. Este puerto, también posee dentro de sus instalaciones un terminal de productos químicos, TERQUIM, quien administra un terminal público de líquidos y un Terminal de ácido sulfúrico. Este último se construyó en septiembre de 1998 y su objetivo es la recepción, almacenaje y embarque de ácido producido por CODELCO, División El Teniente. El embarque de ácido sulfúrico se realiza utilizando 2 líneas de acero inoxidable que llevan el producto hasta el sitio 1 Norte, ubicado a 800 metros de los estanques, a razón de 750 toneladas/hora<sup>16</sup>.

En el área de almacenaje, el puerto está compuesto por la información expuesta en la Figura 90. Como servicio complementario en el puerto San Antonio, existe una Estación Intermodal administrada por FEPASA. Esta estación posee una superficie de 0,5 hectáreas dedicadas a la transferencia de carga con ferrocarril, permitiendo la conexión intermodal con los frentes de atraque de los Terminales STI y TEM.

---

<sup>16</sup> Información extraída de: Ilustre Municipalidad de San Antonio, PLADECO 2008-2013.

Cubiertas y Semicubiertas			Descubiertas			Estanques		
Almacén	Ha	Tipo Carga	Almacén	Ha	TEUS	Estanque	m <sup>3</sup>	Tipo de Carga
Molo Sur 1	0.26	General	Molo Sur	23,40	15.000	Vopak	18.300	
Molo Sur 2	0.24	General	Espigón	12,56	3.504	Terquim 1	18.320	Terminal Químico
Molo Sur ex Disputada	0.6	Sin uso				Terquim 2	20.000	Planta Acido
Espigón N° 52	0.12	Peligrosa /rezagos						
Espigón N° 53	0.090	Rezagos						
Espigón N° 54	0.300	General						
Espigón N° 55	0.081	Graneles						
Espigón N° 56	0.277	Graneles						
<i>Total</i>	<i>1.968</i>		<i>Total</i>	<i>35.96</i>		<i>Total</i>	<i>56.620</i>	

**Figura 90 Áreas de almacenamiento Puerto de San Antonio.**  
Fuente: PLADECO 2008-2013. En base empresa portuaria de San Antonio

A continuación se presenta el mapa de síntesis de localización del equipamiento catastrado en la ciudad de San Antonio (anexo n°7).



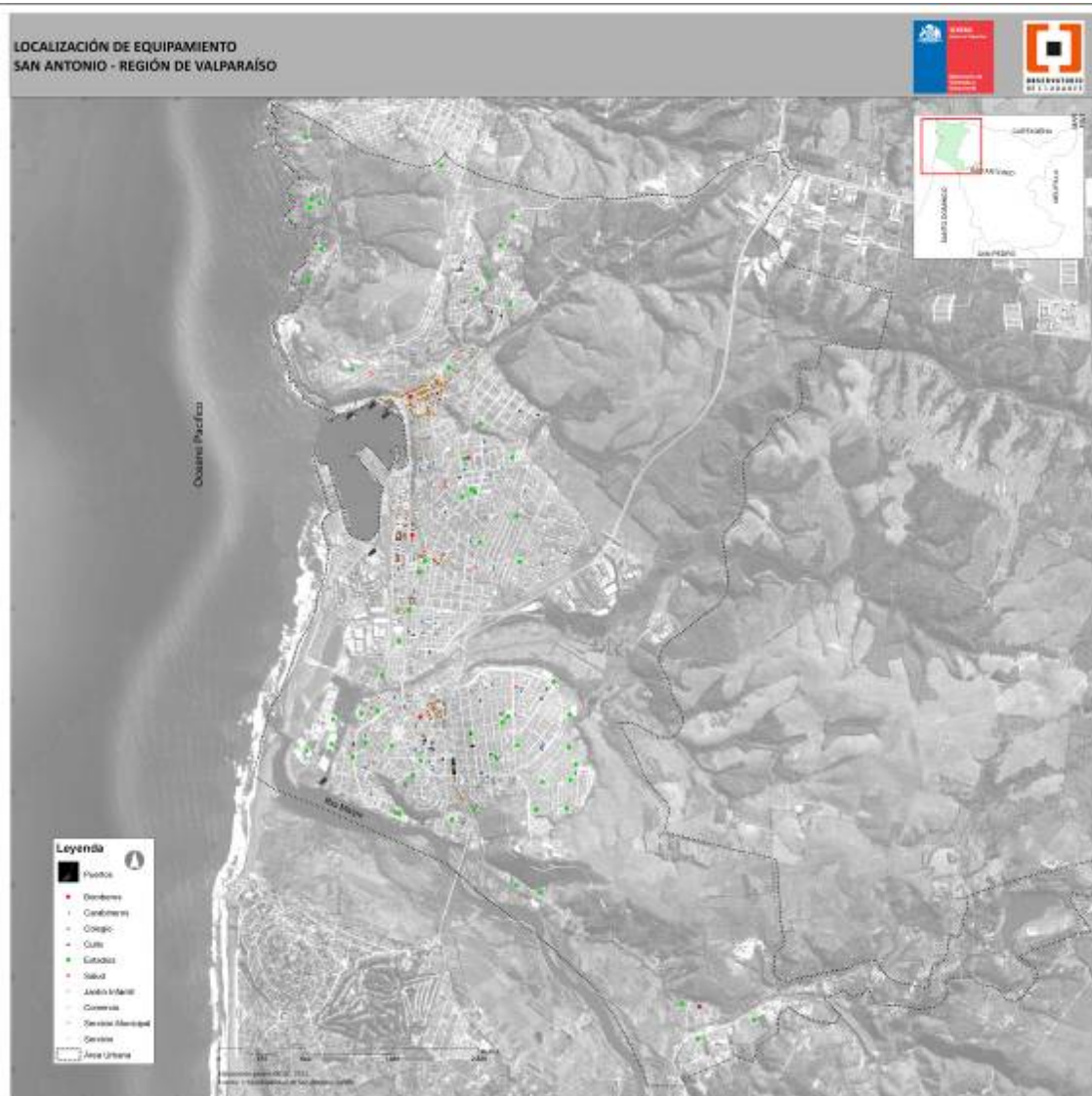


Figura 91. Mapa de síntesis localización de equipamiento.

## 7.5 Características de los Centros Poblados en función del impacto del Terremoto del 27 de febrero de 2010<sup>17</sup>

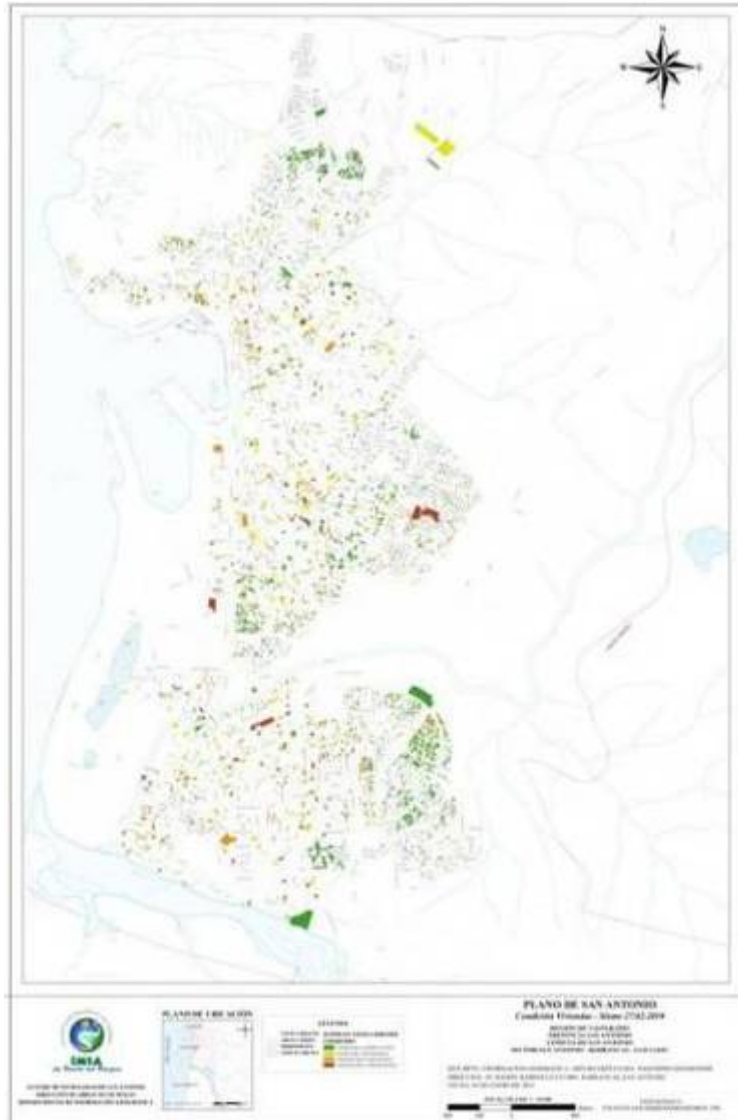
El día 27 de febrero de 2010, a las 03:34 hrs., se produjo un terremoto al este de Cobquecura de 8.8 grados en la escala de Richter y que generó desastrosas olas sísmicas o tsunamis con efectos graves sobre la Costa de la zona centro sur del país, causando graves daños a las poblaciones costeras y grandes cambios en la geomorfología costera.

<sup>17</sup> Toda la información expuesta en este apartado, fue extraída de los distintos informes elaborados por el municipio de San Antonio post terremoto del 27 de febrero de 2010.

En la zona central el terremoto fue de 8.3 grados en la escala de magnitud Richter, causando importantes daños en taludes de cerros, zonas de rellenos y en las construcciones humanas sobre arenas dunarias.

Posteriormente al terremoto, se produjo una ola sísmica, alrededor de las 04:20 hrs. aproximadamente, causando en la provincia de San Antonio al menos siete muertes humanas y tres desaparecidos. La costa entre el río Rapel, albufera El Yali, desembocadura del río Maipo, laguna Lollole y finalmente en la playa Chica de Cartagena, que fue el lugar más septentrional en la costa chilena donde el tsunami causa daños severos.

La Dirección de Obras del municipio de San Antonio realizó un catastro post terremoto el cual se expresa en el siguiente plano:



**Figura 92 Plano de San Antonio, Condición de viviendas - Sismo 27.02.2010**

**Fuente: Dirección de Obras, Departamento de Información Geográfica, Ilustre Municipalidad de San Antonio, 2010**

Como se observa en el plano la mayor cantidad de viviendas con algún daño se concentra en la zona de Barrancas y principalmente en Lolloe. En el catastro se clasifican las viviendas en cuatro categorías: Habitable daño leve, habitable daño reparable, inhabitable reparable e inhabitable irreparable.

Los resultados del catastro pos terremoto en sector comercio y turismo fueron los siguientes: se estima que cerca del 85% del comercio sufrió daño en la infraestructura, los cuales cerca del 40% son de carácter grave. En términos de mano de obra, se estimó que la población afectada alcanza a 150 familias, lo que equivale al menos a 600 personas. El 60% restante de los establecimientos presentó daños de diversa consideración.

Con respecto al sector turismo, la zona de Puertecito y Caleta Pacheco Altamirano se ha visto afectada enormemente por la baja afluencia de público a causa del corte de accesos al sector gastronómico, producto de los daños en el sector del muelle y explanada, lo que mantuvo completamente paralizada las labores de todas las actividades comerciales del sector, afectando directamente a los Paseos de turismo en el borde costero, artesanías, comercio menor y sector Gastronómico, alcanzando el orden de las 300 familias afectadas de manera directa. La población estimada que fue afectada total de 1.200 personas aproximadamente.

Para el caso del sector pesquero artesanal, cada una de las caletas existentes en la comuna, sufrieron distinto tipo de daños, los cuales se presentan a continuación:

- En el sector Boca del Maipo se vio afectado el muelle de paseo turístico, el cual había sido implementado recién en Febrero de 2010. Junto con ello, se produjo la pérdida de una embarcación de madera de los socios.
- El sector de Puertecito sufrió daños producto del tsunami, al elevarse el nivel del mar en la poza de este sector y anegar la explanada, boxes y primer piso del edificio del Puerto Pesquero. Datos preliminares cifran en 40 las embarcaciones hundidas, igual número de motores sumergidos, perdidas en materiales de pesca (redes y espineles) y equipamiento electrónico mojado por el anegamiento de los boxes.
- El sector Pacheco Altamirano sufrió daños de consideración en tres puntos: Muelle Pacheco Altamirano, con desprendimiento de pilotes de la cara sur, y desnivel en terraplén que une el muelle con la explanada. Por su parte la explanada de dicho muelle presenta una serie de grietas en su losa. El mercado Esfuerzo y Trabajo presenta el socavamiento del relleno que se encuentra debajo de la losa del mercado, eso produjo que esta losa bajara en su secciones sur y poniente, lo cual derivó en la clausura de ocho puestos de venta. Actualmente se está en proceso de elaboración de presupuesto de las mejoras de dicha estructura.

Con respecto a las localidades rurales, que se encuentran incluidas en este estudio, se realizó por parte de la Secretaría Comunal de Planificación del municipio, el catastro de daños post-terremoto del 27/F de la zona rural de la comuna.

Para el caso de las tres localidades en cuestión, el catastro entregó los siguientes resultados:

- **Malvilla:** actualmente esta localidad, presenta una cantidad de 200 habitantes distribuidos en 50 viviendas, de las cuales ninguna resultó con algún tipo de daño. No se registraron habitantes afectados por el terremoto y la posta rural de la localidad se encontró en un constate funcionamiento. La energía necesaria para extraer el agua potable rural (APR) se vio afectada y la localidad se mantuvo por un tiempo sin energía eléctrica suficiente.
- **Leyda:** la población actual de esta localidad es de 523 habitantes con 133 viviendas. En ella se presentaron algunos daños en las viviendas, los resultados del catastro son los

siguientes: 6 viviendas afectadas, 2 con daño importante y 4 con daño medio. La población afectada alcanza a 9 personas (6 adultos y 3 niños). La posta rural, luego del terremoto, permaneció en funcionamiento y el abastecimiento del agua potable se distribuye por camiones aljibes. El servicio eléctrico se encontró en funcionamiento.

- **Cuncumén:** la población actual de esta localidad alcanza a 696 personas y tiene 174 viviendas. La cantidad de viviendas afectadas fue de 79, con daño importante 32 y con daño medio 47. La población afectada alcanzó a 249 personas (181 adultos y 68 niños). La posta rural se encontró en funcionamiento, el agua potable con servicio parcial (APR), y el servicio eléctrico sin problemas.

De las tres localidades que mayores daños presentó fue Cuncumén, tanto por cantidad de viviendas afectadas como por población que se vio con efectos adversos por el terremoto del 27 de febrero de 2010.

## 8 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

### 8.1 Mapas de Vulnerabilidad

Cada mapa que se realizó para el análisis de vulnerabilidad se adjunta en los anexos de este informe. Dichos mapas son el insumo principal para el análisis de vulnerabilidad de cada elemento: Construcciones, Equipamiento e Infraestructura.

Por otro lado se entregará la cantidad de población por sector y la cantidad de población por GSE de cada sector.

#### 8.1.1 Población Vulnerable

Considerando la información recopilada, la cual es del CENSO 2002, la población para la ciudad alcanza a 82.367. La distribución se vio en los apartados del diagnóstico, considerando que los sectores de Barrancas y Lolloe contienen sobre el 30% de la población de la ciudad, concentrando mayor población (ver Tabla 34).

Con respecto a los grupos socioeconómicos el sector de San Antonio es el que presenta mayor cantidad de población en grupo D con respecto a la población total del sector. Lo mismo sucede en Lolloe, la diferencia se aprecia en el sector de Barrancas en donde existe una leve predominancia de los GSE C3 (ver Tabla 34).

Sectores	Total de Población	Porcentaje	GSE					
			ABC1	C2	C3	D	E	s/i
<b>Barrancas</b>	27.854	33,8%	49	1.519	12.892	11.384	1.876	134
<b>Lolloe</b>	31.698	38,5%	20	1.698	8.090	20.478	1.355	57
<b>Puerto</b>	643	0,8%	0	0	1	391	251	0
<b>San Antonio</b>	22.172	26,9%	31	402	1.816	16.148	3.764	11

Tabla 34 Distribución y concentración de población versus GSE

#### 8.1.2 Vulnerabilidad de las Construcciones

Con respecto a la vulnerabilidad de las construcciones se entregará en este apartado un análisis por cada zona de la ciudad de San Antonio.

Se debe recordar que la información para este análisis se obtuvo del trabajo en terreno, el cual se desarrolló en el mes de abril. En este terreno se obtuvo información de las construcciones a nivel de predio: materialidad, estado, altura y uso. La información se traspasó al SIG del cual se extrajeron las bases las cuales se estandarizaron en EXCEL para obtener el grado de vulnerabilidad frente a las amenazas en estudio: tsunami, inundación fluvial, remoción en masa y amplitud sísmica.

Como se muestra en apartados anteriores la materialidad de las construcciones de la ciudad de San Antonio están dadas por la albañilería principalmente presentando un 69% con respecto a todas las construcciones de la ciudad (ver Tabla 35).

Con respecto a los sectores tanto en Barrancas como en Lolleo predominan las construcciones de albañilería, sólo en el sector de San Antonio predominan las construcciones de madera (ver Figura 85).

SECTORES	ADOBE	ALBANILERIA-LADRILLO	DESECHOS	MADERA	OTRO	S/I	TOTAL
<b>BARRANCAS</b>	0,0%	29,4%	0,0%	5,2%	0,2%	1,0%	<b>35,9%</b>
<b>LLOLLEO</b>	0,0%	32,8%	0,0%	1,4%	0,8%	1,8%	<b>36,8%</b>
<b>PUERTO</b>	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	0,1%	0,2%	<b>1,4%</b>
<b>SAN ANTONIO</b>	0,1%	6,8%	0,0%	17,3%	0,3%	1,4%	<b>25,9%</b>
<b>TOTAL</b>	<b>0,1%</b>	<b>69,0%</b>	<b>0,0%</b>	<b>25,0%</b>	<b>1,5%</b>	<b>4,4%</b>	<b>100,0%</b>

Tabla 35 Materialidad de las construcciones, Ciudad de San Antonio

Con respecto al estado de las construcciones predominan las construcciones en buen estado con un 83%, esto indica que son construcciones que pueden ser habitadas o utilizadas en otra actividad (comercio, servicios, etc.).

Porcentualmente el sector de San Antonio presenta mayor cantidad de construcciones en regular y mal estado con respecto a los otros sectores. En los sectores de Barrancas y Lolleo presentan los mayores porcentajes de construcciones en buen estado (Tabla 36).

SECTORES	BUENO	MALO	REGULAR	S/I
<b>BARRANCAS</b>	33,4%	0,1%	1,4%	1,0%
<b>LLOLLEO</b>	32,8%	0,0%	2,2%	1,8%
<b>PUERTO</b>	0,1%	0,0%	1,1%	0,2%
<b>SAN ANTONIO</b>	16,8%	0,3%	7,4%	1,4%
<b>TOTAL</b>	<b>83,1%</b>	<b>0,5%</b>	<b>12,0%</b>	<b>4,4%</b>

Tabla 36 Estado de las construcciones, Ciudad de San Antonio

Con respecto a la altura en toda la ciudad predominan construcciones de 1 piso, solo en algunos lugares del centro de San Antonio, Lolleo y Barrancas se pueden encontrar edificaciones que sobrepasen los 3 ó 4 pisos (ver Tabla 37).

SECTORES	1	2	3	4	5 Y más	S/I
<b>BARRANCAS</b>	23,5%	10,9%	0,1%	0,2%	0,1%	1,0%
<b>LLOLLEO</b>	29,1%	5,7%	0,1%	0,1%	0,03%	1,8%
<b>PUERTO</b>	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,00%	0,2%
<b>SAN ANTONIO</b>	19,1%	4,9%	0,4%	0,1%	0,02%	1,4%

Tabla 37 N° de pisos de las construcciones, ciudad de San Antonio

### 8.1.2.1 ***Vulnerabilidad de construcciones frente a la amenaza de tsunami***

Para el análisis de vulnerabilidad de construcciones frente a la amenaza de tsunami se toma las siguientes variables y puntajes según la amenaza (ver Tabla 38):

Etapa 2. Diagnóstico Final y Modelaciones  
Estudio de Riesgo de la comuna de San Antonio

Materialidad	Valor	Altura	Valor	Estado	Valor
<b>OTRO</b>		>2 PISOS	<b>1</b>	BUENO	<b>0</b>
<b>ALBAÑILERÍA-LADRILLO</b>	<b>0</b>	2 PISOS	<b>2</b>		
<b>ADOBE</b>	<b>2</b>	1 PISO	<b>4</b>	REGULAR	<b>2</b>
<b>MADERA</b>	<b>3</b>	-	-		
<b>DESECHO</b>	<b>4</b>	-	-	MALO	<b>4</b>

Tabla 38 Variables y Puntaje de Vulnerabilidad de Construcciones frente a la amenaza de tsunami

Para el análisis se consideran los siguientes supuestos (ver Tabla 39):

Variable	Supuesto
<b>Materialidad</b>	A mayor resistencia mecánica, menor vulnerabilidad
	A mayor proceso de carácter artesanal, mayor vulnerabilidad
<b>Altura</b>	A mayor altura, menor vulnerabilidad
<b>Estado</b>	A mejor estado, menor vulnerabilidad

Tabla 39 Variables y Supuestos en el Análisis de Vulnerabilidad de Construcciones frente a la amenaza de tsunami

Considerando la información obtenida de las construcciones y su posterior trabajo estadístico se obtuvo la vulnerabilidad frente a la amenaza de tsunami de las construcciones, información representada encada predio (Ver plano Anexo n°5).

La Tabla 40 muestra el grado de vulnerabilidad de las construcciones frente a la amenaza de tsunami. El 46% de las construcciones se encuentran con un grado de vulnerabilidad media-baja, el 28% de construcciones se encuentran con una vulnerabilidad media-alta.

Tanto en Barrancas como en Lolleo la mayoría de sus construcciones se encuentran con una vulnerabilidad media-baja, la diferencia se encuentra en el sector de San Antonio en donde existen más de 4.000 construcciones con vulnerabilidad media-alta, lo que equivale al 65% del total de construcciones de este sector.

SECTORES	SIN VULNERABILIDAD	BAJA	MEDIA-BAJA	MEDIA-ALTA	ALTA	TOTAL
<b>BARRANCAS</b>	257	2.869	4.314	1.642	21	<b>9.103</b>
<b>LOLLEO</b>	461	1.495	6486	900	2	<b>9.344</b>
<b>PUERTO</b>	43	0	33	269	0	<b>345</b>
<b>SAN ANTONIO</b>	356	1.021	891	4.243	61	<b>6.572</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1.117</b>	<b>5.385</b>	<b>11.724</b>	<b>7.054</b>	<b>84</b>	<b>25.364</b>

Tabla 40 Vulnerabilidad de las construcciones frente a la amenaza de tsunami

La situación en San Antonio de presentar mayor cantidad de construcciones con vulnerabilidad media-alta se debe a la presencia de materialidad de madera la cual presenta menor resistencia mecánica, por lo cual mayor vulnerabilidad. Y se puede inferir, que al estar en buen estado estas construcciones su vulnerabilidad no alcanza a ser alta.



### 8.1.2.2 Vulnerabilidad de construcciones frente a la amenaza de inundación fluvial

Con respecto a la vulnerabilidad de las construcciones frente a la amenaza de inundación fluvial, se utilizan los mismos valores en las variables de análisis como los supuestos en la vulnerabilidad frente a la amenaza de tsunami (ver Tabla 38 y Tabla 39).

Considerando el párrafo anterior, los resultados de la cantidad de construcciones según grado de vulnerabilidad son los mismos que se entregaron en el apartado anterior.

### 8.1.2.3 Vulnerabilidad de construcciones frente a la amenaza de Remoción en Masa.

Para el análisis de vulnerabilidad de construcciones frente a la amenaza de remoción en masa se consideraron las siguientes variables y puntajes según la amenaza (ver Tabla 41)

Materialidad	Valor	Altura	Valor	Estado	Valor
OTRO		>2 PISOS	4	BUENO	4
ALBAÑILERÍA-LADRILLO	4	2 PISOS	4		
ADOBE	4	1 PISO	4	REGULAR	4
MADERA	4	-	-		
DESECHO	4	-	-	MALO	4

Tabla 41 Variables y Puntaje de Vulnerabilidad de Construcciones frente a la amenaza de remoción en masa

Para el análisis se consideran los siguientes supuestos (ver Tabla 42):

Variable	Supuesto
Materialidad	Dada la tecnología actual de construcción edificatoria, y las características destructivas de la amenaza, todas las materialidades se consideran altamente vulnerables.
Altura	Dadas las características de la amenaza, todas las alturas se consideran altamente vulnerables.
Estado	Dadas las características de la amenaza, todos los estados se consideran altamente vulnerables.

Tabla 42 Variables y Supuestos en el Análisis de Vulnerabilidad de Construcciones frente a la amenaza de remoción en masa

Considerando el análisis estadístico de las construcciones y los valores, puntajes y supuestos, se obtuvo el siguiente resultado expresado en la Tabla 43 y en el Anexo n°6.

SECTORES	SIN VULNERABILIDAD	BAJA	MEDIA-BAJA	MEDIA-ALTA	ALTA	TOTAL
BARRANCAS	257	0	7	49	8.790	9.103
LLOLLEO	461	0	8	203	8.672	9.344
PUERTO	43	0	0	33	269	345
SAN ANTONIO	356	0	2	84	6.130	6.572
TOTAL	1.117	0	17	369	23.861	25.364

Tabla 43 Vulnerabilidad de las construcciones frente a la amenaza de Remoción en Masa

Considerando los resultados y los supuestos utilizados para este análisis, sobre el 94% de las construcciones de la ciudad se presentan una vulnerabilidad alta frente a la amenaza de remoción en masa, recordando que el supuesto utilizado es: "Dada la tecnología actual de construcción

edificatoria, y las características destructivas de la amenaza, todas las materialidades se consideran altamente vulnerables”.

#### 8.1.2.4 **Vulnerabilidad de construcciones frente a la amenaza de Amplitud Sísmica.**

Para el análisis de vulnerabilidad de construcciones frente a la amenaza de amplitud sísmica se consideraron las siguientes variables y puntajes según la amenaza (ver Tabla 41)

Materialidad	Valor	Altura	Valor	Estado	Valor
OTRO	0	>2 PISOS	1	BUENO	1
ALBAÑILERÍA-LADRILLO	1	2 PISOS	2		
ADOBE	2	1 PISO	4	REGULAR	2
MADERA	3	-	-		
DESECHO	4	-	-	MALO	4

Tabla 44 Variables y Puntaje de Vulnerabilidad de Construcciones frente a la amenaza de amplitud sísmica

Para el análisis se consideran los siguientes supuestos (ver Tabla 45):

Variable	Supuesto
Materialidad	A mayor resistencia sísmica, menor vulnerabilidad
	A mayor proceso de carácter artesanal, mayor vulnerabilidad
Altura	A mayor altura, mayor vulnerabilidad
Estado	A mejor estado, menor vulnerabilidad

Tabla 45 Variables y Supuestos en el Análisis de Vulnerabilidad de Construcciones frente a la amenaza de amplitud sísmica.

Sobre el 62% de las construcciones de la ciudad de San Antonio presenta una vulnerabilidad baja frente a las amenazas de sismos, y los sectores de Barrancas y Lolleo presentan más construcciones con vulnerabilidad baja (sobre 12.000 construcciones), esto es porque las características constructivas predominantes de estos sectores es de albañilería-ladrillo, la cual es más resistente frente a la amplitud sísmica, como se explica en los supuestos (ver Tabla 45).

SECTORES	SIN VULNERABILIDAD	BAJA	MEDIA-BAJA	MEDIA-ALTA	ALTA	TOTAL
BARRANCAS	263	5.644	3.193	0	3	9.103
LOLLEO	461	6.832	2.035	15	1	9.344
PUERTO	43	33	269	0	0	345
SAN ANTONIO	357	3.234	2.939	40	2	6.572
TOTAL	1.124	15.743	8.436	55	6	25.364

Tabla 46 Vulnerabilidad de las construcciones frente a la amenaza de Amplitud Sísmica

El grado de vulnerabilidad media-baja presenta sobre el 33% de construcciones, predominando también en cantidad los sectores de Barrancas y Lolleo.

### 8.1.3 Vulnerabilidad del Equipamiento

En los siguientes apartados se entregarán los resultados del análisis de vulnerabilidad de equipamientos, divididos en tres categorías: crítico, económico y otros.

### 8.1.3.1 Equipamiento Crítico

#### a. Equipamiento de Salud

El puntaje de vulnerabilidad asignado a cada elemento es según la envergadura y jerarquía del establecimiento de salud bajo el supuesto de que aquellos establecimientos de mayor complejidad y mayor capacidad de atención juegan un rol más importante en las comunidades ante una catástrofe natural.

La Tabla 47 muestra el grado de vulnerabilidad del equipamiento de salud pública, en donde el Hospital Claudio Vicuña, localizado en el sector de Barrancas, presenta una vulnerabilidad alta, debido a la importancia que este tiene frente a una catástrofe natural.

El resto de centros de salud presenta una vulnerabilidad media-alta.

NOMBRE	TIPO	SECTOR	GRADO DE VULNERABILIDAD
CESFAM Diputado Manuel Bustos	CESFAM	SAN ANTONIO	Media-alta
CESFAM 30 de Marzo	CESFAM	BARRANCAS	Media-alta
CESFAM Barrancas	CESFAM	BARRANCAS	Media-alta
CESFAM Néstor Fernández T.	CESFAM	LLOLEO	Media-alta
CECOSF Tejas Verdes	CECOSF	LLOLEO	Media-alta
CESFAM San Antonio	CESFAM	BARRANCAS	Media-alta
HOSPITAL Claudio Vicuña	HOSPITAL	BARRANCAS	Alta
CECOSF Cerro Alegre	CECOSF	SAN ANTONIO	Media-alta

Tabla 47 Grado de vulnerabilidad del equipamiento de salud

#### b. Escuelas

El puntaje de vulnerabilidad es asignado según nº de matrículas, considerando más relevantes aquellos establecimientos que asisten a una gran cantidad de la población, como también son establecimientos que presentan una mayor infraestructura. Ellos pueden considerarse como apoyo para situaciones de catástrofe, para ser utilizados como alberges para la población que se encuentre en situación de riesgo.

La Tabla 48 presenta el listado de establecimientos educacionales, al sector que pertenecen, dependencia, matrícula y grado de vulnerabilidad.

Nombre	Matrícula 2010	Dependencia	Sector	Grado de vulnerabilidad
2050: Colegio Nuestra Señora De Pompeya	529	PS	Barrancas	Alta
2048: Colegio Sagrada Familia	595	PS	Barrancas	Alta
2018: Escuela Movilizadores Portuarios	721	MD	Barrancas	Alta
2043: Instituto Ercilla	484	PS	Barrancas	Alta
14699: Colegio Fénix	579	PS	Barrancas	Alta
2052: Colegio Providencia	429	PS	Barrancas	Alta
2013: Inst. Comercial Marítimo Pacífico Sur	1086	MD	Barrancas	Alta
2012: Profesor Juan Dante Parraguez Arellano	545	MD	Barrancas	Alta

Nombre	Matrícula 2010	Dependencia	Sector	Grado de vulnerabilidad
14711: Ctro De Estudios Alonso De Ercilla	343	PS	Barrancas	Alta
2045: Liceo Gabriela Mistral	483	PS	Llolleo	Alta
14373: Colegio José Luis Norris	420	PS	Llolleo	Alta
2019: Escuela España	423	MD	Llolleo	Alta
14348: Colegio Espíritu Santo	1038	PS	Llolleo	Alta
14288: Colegio Nueva Providencia	492	PS	Llolleo	Alta
2040: Liceo Nacional De Llolleo	908	PS	Llolleo	Alta
2042: Instituto Del Puerto De San Antonio	978	PS	Llolleo	Alta
14525: Ctro. Educ.Y Capac. Ad. Fco. Bilbao	251	PS	Llolleo	Alta
2049: Colegio Fund. Educ. Fernández León	629	PS	Llolleo	Alta
2041: Liceo Santa Teresita De Llolleo	866	PS	Llolleo	Alta
14568: Colegio Cristo Rey Salvador	464	PS	Llolleo	Alta
2057: Escuela Particular N. 33 María Konig	368	PS	Llolleo	Alta
14547: Centro De Estudios Dalbadie	352	PS	Llolleo	Alta
2055: Colegio El Retiro	514	PS	Llolleo	Alta
14492: Ctro. Educ. Adultos Pedro De Valdivia	346	PS	San Antonio	Alta
2026: Escuela Básica Cerro Placilla	449	MD	San Antonio	Alta
2044: Escuela Industrial San Antonio	729	PS	San Antonio	Alta
2014: Escuela Poeta Pablo Neruda	405	MD	San Antonio	Alta
14788: Colegio Papa Juan Pablo II	338	PS	San Antonio	Alta
2021: Padre Andre Coindre	726	MD	San Antonio	Alta
2047: Colegio Particular Sara Cruchaga	560	PS	San Antonio	Alta
14625: Centro De Estudios Ignacio Domeyko	201	PS	Barrancas	Media-alta
2020: Grupo Escolar Sor Teresa De Los Andes	236	MD	Barrancas	Media-alta
2051: Esc. Particular N_ 22 San Rafael	114	PS	Barrancas	Media-alta
12167: Colegio Blanco Encalada	156	PS	Barrancas	Media-alta
14542: Centr. Esc. Trat. Del Lenguaje Paihuén	122	PS	Barrancas	Media-alta
2054: Colegio Part. Guillermo Blest Gana	122	PS	Barrancas	Media-alta
2022: Escuela Básica San José De Calasanz	225	MD	Barrancas	Media-alta
2053: Instituto Psicopedagógico	112	PS	Barrancas	Media-alta
2017: Escuela Villa Las Dunas	177	MD	Barrancas	Media-alta
2028: Parvulario Rayito De Sol	144	MD	Barrancas	Media-alta
2025: Escuela Pre-Básica Peter Pan	167	MD	Barrancas	Media-alta
14539: Escuela De Lenguaje Santa Inés	182	PS	Llolleo	Media-alta
2023: Escuela Cristo Del Maipo	206	MD	Llolleo	Media-alta
40047: Colegio Santo Tomas De Las Acacias	121	PS	Llolleo	Media-alta
14749: Colegio Bilbao - Eim.	101	PS	Llolleo	Media-alta
14626: Colegio Araucarias	238	PS	Llolleo	Media-alta
11201: Colegio Francisco Bilbao Barquin	207	PS	Llolleo	Media-alta
2027: Escuela Poeta Huidobro	149	MD	Llolleo	Media-alta

Nombre	Matrícula 2010	Dependencia	Sector	Grado de vulnerabilidad
14909: Escuela Especial De Lenguaje Paihuén-Map	71	PS	Barrancas	Media-baja
11234: Escuela De Adultos José Domingo Saavedra	65	MD	Barrancas	Media-baja
14669: Escuela De Párvulos Gotita De Luna	43	PS	Barrancas	Media-baja
14855: Ctro. Educ. Para Párvulos Happy Kids	21	PS	Barrancas	Media-baja
14645: Escuela Santa María De La Esperanza	8	PS	Barrancas	Media-baja
14873: Colegio Bautista Jesús Mi Refugio	19	PS	Barrancas	Media-baja
14806: Esc. De Párvulos Árbol De La Vida	41	PS	Barrancas	Media-baja
14557: Ctro De Estimulación Temprana Las Rosas	28	PS	Barrancas	Media-baja
14551: Escuela De Lenguaje Los Almendrales	59	PS	Barrancas	Media-baja
14684: Esc. De Párvulos Cascanueces	23	PS	Llolleo	Media-baja
2011: Escuela Especial Divino Maestro	92	MD	Llolleo	Media-baja
14611: Colegio De Educ. De Adultos Bilbao	75	PS	Llolleo	Media-baja
2024: Profesor Pedro Viveros Ormeño	81	MD	Llolleo	Media-baja
14691: Escuela De Párvulos Gabrielita	99	PP	Llolleo	Media-baja
14817: Esc. De Lenguaje Cediatrin	18	PS	Llolleo	Media-baja
14509: Escuela De Párvulos Tía Patricia N_2	42	PS	Llolleo	Media-baja
14386: Escuela De Párvulos Tiritas De Papel II	35	PS	Llolleo	Media-baja
14898: Escuela De Párvulos Emilita	28	PP	Llolleo	Media-baja
14888: Escuela De Párvulos Remolino De Papel	65	PS	Llolleo	Media-baja
14789: Esc. Especial Vida Nueva Elim	62	PS	San Antonio	Media-baja

Tabla 48 Grado de vulnerabilidad de los establecimientos educacionales

La Tabla 49 muestra la cantidad de establecimientos por sector y por grado de vulnerabilidad, los sectores de Barrancas y Llolleo son los que presentan la mayor cantidad de establecimientos. Llolleo es el que presenta más establecimientos en vulnerabilidad alta y Barrancas en media-alta.

En resumen hay 30 establecimientos en vulnerabilidad alta, 18 en media alta y 20 en media-baja, de los cuales son los que presentan una matrícula menor de 100 alumnos y una menor infraestructura.

SECTOR	Alta	Media-alta	Media-baja	TOTAL
Barrancas	9	11	9	29
Llolleo	14	7	10	31
San Antonio	7	0	1	8
TOTAL	30	18	20	68

Tabla 49 Resumen del grado de vulnerabilidad de los establecimientos educacionales

c. Equipamiento de seguridad

En el caso de los equipamientos de seguridad, el puntaje de vulnerabilidad es asignado según jerarquía, considerando el rol que éstos cumplen en catástrofes naturales y planes de emergencia.

La Tabla 50 muestra el grado de vulnerabilidad de cada uno de los equipamientos de seguridad, en donde la subcomisaría de carabineros es la única que muestra un grado de vulnerabilidad medio-

alto, el resto de equipamientos muestran una vulnerabilidad alta y esto es principalmente por el supuesto expuesto en el párrafo anterior.

EQUIPAMIENTO DE SEGURIDAD	TIPO	GRADO DE VULNERABILIDAD
<b>Prefectura de Carabineros San Antonio</b>	Seguridad	Alta
<b>1ra Comisaría San Antonio</b>	Seguridad	Alta
<b>Subcomisaría Lolleo</b>	Seguridad	Media-alta
<b>PDI San Antonio</b>	Seguridad	Alta
<b>Gobernación Marítima (Capitanía de Puerto)</b>	Seguridad	Alta
<b>Recinto Militar</b>	Seguridad	Alta
<b>3ra Compañía de Bomberos Lolleo</b>	Seguridad	Alta
<b>2da Compañía Bomberos San Antonio</b>	Seguridad	Alta
<b>Cuartel General Bomberos (Barrancas)</b>	Seguridad	Alta
<b>1ra Compañía de Bomberos Barrancas</b>	Seguridad	Alta
<b>4ta Compañía de Bomberos San Juan</b>	Seguridad	Alta

Tabla 50 Grado de vulnerabilidad de los equipamientos de seguridad

d. Equipamiento municipal

Respecto al equipamiento municipal, el puntaje de vulnerabilidad fue asignado según jerarquía de las oficinas, considerando el rol que cumple la municipalidad en catástrofes naturales y planes de emergencia.

La Tabla 51 muestra el grado de vulnerabilidad de cada una de las oficinas municipales destacándose la alcaldía la cual presenta una vulnerabilidad alta, esto es por la importancia que tiene en coordinar una situación de emergencia frente a una catástrofe.

EQUIPAMIENTO MUNICIPAL	TIPO	GRADO DE VULNERABILIDAD
<b>Gobernación Provincial - Provincia de San Antonio</b>	Gobierno	Media-baja
<b>Dirección Aseo Ornato y Medio Ambiente</b>	Oficina Municipal	Media-baja
<b>Dirección de Educación Municipal</b>	Oficina Municipal	Media-baja
<b>DIDECO - CDC</b>	Oficina Municipal	Media-baja
<b>Oficina Discapacidad</b>	Oficina Municipal	Media-baja
<b>DIDECO - OMIL</b>	Oficina Municipal	Media-baja
<b>Oficina Vivienda y Subsidio</b>	Oficina Municipal	Media-baja
<b>Municipio - Municipalidad de San Antonio</b>	Alcaldía	Alta
<b>OPD (Protección de los Derechos de Niños y Adolescentes)</b>	Oficina Municipal	Media-baja
<b>Bienestar RRHH</b>	Oficina Municipal	Media-baja
<b>Servicios Municipales Varios</b>	Oficina Municipal	Media-baja
<b>Departamento de Operaciones</b>	Oficina Municipal	Media-baja
<b>Tesorero Municipal</b>	Oficina Municipal	Media-baja
<b>Departamento de RR.HH - DAF</b>	Oficina Municipal	Media-baja
<b>Asesoría Jurídica</b>	Oficina Municipal	Media-baja
<b>Departamento de Cultura</b>	Oficina Municipal	Media-baja

Tabla 51 Grado de vulnerabilidad de los equipamientos municipales

### **8.1.3.2 Equipamiento económico**

Dentro de este apartado se entregarán los resultados del grado de vulnerabilidad de: actividad portuaria y caletas de pescadores, y equipamientos de servicios económicos.

#### a. Actividad portuaria y caletas de pescadores

Considerando que el área de estudio que es una zona costera, hay presencia de actividad portuaria como de pequeños pescadores, por lo cual se realizó una valoración de vulnerabilidad por su funcionalidad e infraestructura.

La Tabla 52 muestra el grado de vulnerabilidad de cada uno de los elementos de la actividad portuaria que se realiza en San Antonio.

Los puestos presentan un grado de vulnerabilidad medio-alto, y las caletas de pescadores bajo.

EQUIPAMIENTO PORTUARIO	TIPO	GRADO DE VULNERABILIDAD
<b>Puerto</b>	Puerto Transporte Marítimo	Medio-alto
<b>Puerto</b>	Puerto industrial	Medio-alto
<b>Caleta</b>	Caleta Puertecito	Bajo
<b>Caleta</b>	Caleta Pacheco Altamirano	Bajo
<b>Caleta</b>	Caleta Boca del Maipo	Bajo

**Tabla 52 Grado de vulnerabilidad del equipamiento portuario**

#### b. Equipamientos de servicios económicos

A los equipamientos de servicios económicos, se les asignó un puntaje de vulnerabilidad media-baja (2), bajo el supuesto de que ante un evento de catástrofe, son de relevancia media-baja.

El plano de vulnerabilidad (Anexo n°5 y 6) muestra los servicios económicos con un grado de vulnerabilidad media-baja. Estos se concentran principalmente en los centros neurálgicos de los tres sectores (San Antonio, Barrancas y Llole).

### **8.1.3.3 Otros Equipamientos**

Dentro de este apartado se entregarán los resultados del grado de vulnerabilidad de los equipamientos deportivos y de otros equipamientos como son: culto y los jardines infantiles.

#### a. Equipamiento deportivo

Se le asignó un puntaje de vulnerabilidad según categoría, considerando por un lado los posibles usos temporales y de emergencia que permite el equipamiento deportivo, y por otro lado el nivel de inversión que involucran.

Dentro del trabajo de terreno y de gabinete se contabilizaron seis recintos de características de estadio, los cuales presentan un grado de vulnerabilidad alta, y las 55 canchas o multi canchas presentan un grado de vulnerabilidad medio-bajo.

El sector de Llole es el que concentra la mayor cantidad de estos equipamientos, con tres estadios y 24 canchas.

b. Otros equipamientos

A los equipamientos de otro tipo, obtuvieron un grado de vulnerabilidad media-baja, bajo el supuesto de que ante un evento de catástrofe, son de relevancia media-baja.

Dentro de este ítem se encuentran los equipamientos de culto y jardines infantiles, los cuales presenta un grado de vulnerabilidad media-bajo. En el trabajo de terreno y gabinete se localizaron 17 jardines infantiles y 42 iglesias de diferente culto.

En el plano de vulnerabilidad se encuentran localizados dichos equipamientos, la mayor concentración de iglesias se encuentran en la localidad de Llole, los jardines presentan un distribución más homogénea dentro de la ciudad.

### 8.1.4 Vulnerabilidad de la Infraestructura

Dentro de la categoría de Infraestructura, se evaluó: Red Vial, Alumbrado eléctrico, Telecomunicaciones y Agua potable.

a. Red vial

La vulnerabilidad de la red vial es analizada en la dimensión física. La vulnerabilidad física es evaluada en base al estado: pavimentada o no pavimentada.

Para el caso de la vulnerabilidad frente a la amenaza de tsunami e inundación fluvial las vías pavimentadas presentan un grado de vulnerabilidad bajo, y las no pavimentadas un grado alto, considerando que si las vías están pavimentadas hay una mayor resistencia a la erosión, por lo cual menor vulnerabilidad. En caso contrario las vías no pavimentadas presentan mayor impermeabilidad, y menor vulnerabilidad.

La Tabla 53 muestra el grado de vulnerabilidad de la vialidad, destacándose el 15,6% de estas que presentan un estado de no pavimentadas. Estas vías se concentran en sectores altos de San Antonio, al sur poniente de Barrancas y sur poniente de Llole.

TIPO DE CARPETA	METROS	PORCENTAJE	GRADO DE VULNERABILIDAD
Vía No Pavimentada	46,2	15,6%	Alto
Vía Pavimentada	250,0	84,3%	Bajo
s/i	0,5	0,2%	s/i
<b>TOTAL</b>	<b>296,6900</b>	<b>100%</b>	<b>--</b>

Tabla 53 Grado de Vulnerabilidad de la vialidad ante amenaza de inundación

Con respecto a la vulnerabilidad frente a la amenaza de remoción en masa se presenta el siguiente supuesto: Dadas las características de la amenaza, todos los tipos de carpeta se consideran altamente vulnerables.



Considerando lo anterior, toda la vialidad del área de estudio presenta un grado de vulnerabilidad alto.

b. Alumbrado Eléctrico

En el caso de la infraestructura de alumbrado, se asignó el grado de vulnerabilidad según la categoría del elemento y su importancia en la red total.

Considerando lo anterior la Tabla 54 muestra el grado de vulnerabilidad de los elementos de alumbrado eléctrico analizado, la subestación eléctrica presenta una vulnerabilidad alta y los postes un grado bajo.

CATEGORÍA	CANTIDAD	GRADO DE VULNERABILIDAD
Subestación eléctrica	1	Alto
Postes	9.836	Bajo

Tabla 54 Grado de vulnerabilidad alumbrado eléctrico

c. Telecomunicaciones

En el caso de la infraestructura de telecomunicaciones, se consideró el rol que cumple el elemento respecto a la comunicación en planes de emergencia y catástrofes naturales. Se utiliza el supuesto de que la radio es el medio de información más masivo, por lo que se le asigna un valor de vulnerabilidad alto. El sistema de celulares, por su parte, también se considera como relevante en la respuesta ante emergencias.

Dentro del catastro realizado y trabajo de gabinete se localizaron: cinco antenas de celulares, dos antenas de radio y dos antenas repetidoras de televisión

La Tabla 55 muestra el grado de vulnerabilidad de cada elemento de telecomunicaciones destacándose las antenas de radio con una vulnerabilidad alta.

TIPO	GRADO DE VULNERABILIDAD
Antena	Alto
Antena repetidora	Medio-bajo
Antena repetidora	Medio-bajo
Antena	Alto
Antena celular	Medio-alto
Antena celular	Medio-alto
Antena celular	Medio-alto
Antena celular	Medio-alto
Antena celular	Medio-alto

Tabla 55 Grado de vulnerabilidad de los elementos de telecomunicación

d. Agua potable

En el caso de la infraestructura de agua potable, se asignó el grado de vulnerabilidad según la categoría del elemento y su importancia en la red total.

Dentro del catastro realizado y trabajo de gabinete se localizaron: 5 plantas relevadoras, 1 planta de distribución de agua potable y 1 planta de tratamiento de aguas servidas.

En Llole se encuentra la planta de distribución de agua potable, más una planta relevadora. En Barrancas se encuentran dos plantas relevadoras, y en San Antonio (cerro la virgen) dos plantas relevadoras y la planta de tratamiento.

La Tabla 56 muestra el grado de vulnerabilidad de los elementos de la red de agua potable, se destaca que los grifos presentan un grado de vulnerabilidad medio-alto, ya que son elementos que en situación de catástrofes son útiles por el abastecimiento de agua.

TIPO	GRADO DE VULNERABILIDAD
Planta relevadora	Medio-alto
Planta relevadora	Medio-alto
Planta de distribución del agua potable	Alto
Planta relevadora	Medio-alto
Planta relevadora	Medio-alto
Planta relevadora	Medio-alto
Planta de Tratamiento	Alto
Grifos	Medio-alto

Tabla 56 Grado de vulnerabilidad de los elementos de la red de agua potable

## 8.2 Conclusiones

Se expondrá por cada sector la situación de vulnerabilidad, de esta manera conocer las características de las zonas vulnerables de San Antonio.

Se debe recordar que la vulnerabilidad de los elementos analizados, presentan diferentes características frente a las amenazas analizadas en este estudio, con la diferencia que hay elementos que por sus características e importancia presenta una sola valoración de vulnerabilidad como son los equipamientos e infraestructura (salvo la vialidad).

Se debe considerar que en los siguientes apartados se mostrarán imágenes que son parte de los planos de vulnerabilidad que se encuentran en los anexos.

### 8.2.1 Sectores Vulnerables

A continuación se presentan las condiciones de vulnerabilidad por sectores de la ciudad de San Antonio. Para ver los mapas con mayor detalle ver anexo n°8, donde se presentarán los respectivos mapas de vulnerabilidad de las amenazas.

#### 8.2.1.1 *San Antonio*

En el sector de San Antonio predominan los GSE D y la materialidad de las construcciones es la madera, con alturas predominantes de un piso y estado de bueno a regular, se presenta una vulnerabilidad predominante frente a la amenaza de tsunami media-alta (ver Figura 93 y Figura 94), se debe destacar que en el centro de este sector la vulnerabilidad predominante es baja y media-baja, ya que en este sector las construcciones son de dos o más pisos y la materialidad que predomina es la albañilería.

En conclusión, los sectores que presentan mayor vulnerabilidad frente a la amenaza de tsunami son los que se localizan en el sur-poniente y nor-poniente de la ciudad, por las características de las construcciones y de los equipamientos e infraestructura.

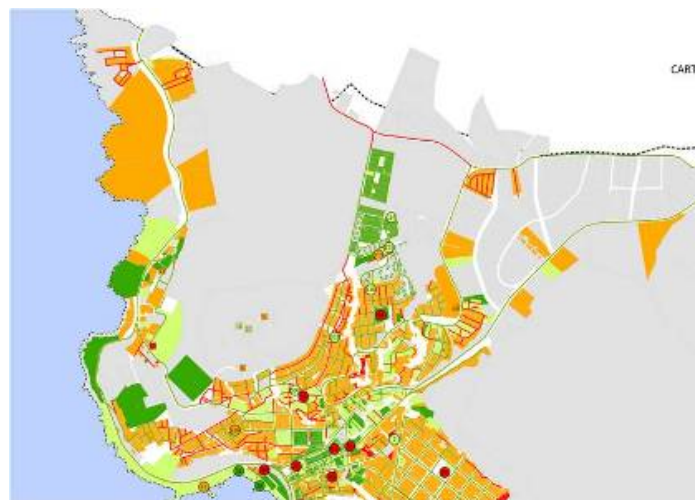


Figura 93 Vulnerabilidad del Sector de San Antonio frente a la amenaza de tsunami



Figura 94 Leyenda del análisis de vulnerabilidad

Con respecto a la vulnerabilidad frente a la amenaza sísmica, las construcciones muestran una vulnerabilidad baja y media-baja, esto por es por las características de ellas y la resistencia frente a la amenaza sísmica (ver Figura 95 y Figura 94).

Es importante destacar que estos niveles de vulnerabilidad frente a la amenaza sísmica se deben mantener o mejorar en el tiempo a favor de los habitantes del sector.



Figura 95 Vulnerabilidad del Sector de San Antonio frente a la amenaza de amplitud sísmica

### **8.2.1.2 Barrancas**

El sector de Barrancas presenta zonas con vulnerabilidad media-alta, en el norte y en el centro, el resto presenta vulnerabilidad media-baja y baja. Dentro de Barrancas se encuentra un importante número de servicios e equipamientos concentrados en la Av. Barros Luco, lo cual aumenta la vulnerabilidad del sector.

Es importante destacar que para que disminuyan los niveles de vulnerabilidad en los sectores de media-alta, se debe mejorar la materialidad y estado de las construcciones.



**Figura 96 Vulnerabilidad del Sector de Barrancas frente a la amenaza de tsunami**

Con respecto a la vulnerabilidad frente a la amenaza de sismos, la localidad de Barrancas predomina la vulnerabilidad baja y media-baja (ver Figura 96)). Se recomienda mantener o mejorar este indicador de vulnerabilidad frente a la amenaza de sismicidad.



**Figura 97 Vulnerabilidad del Sector de Barrancas frente a la amenaza de sismo**

### **8.2.1.3 Lolleo**

Dentro del sector de Lolleo se ve una predominancia de la vulnerabilidad frente a la amenaza de tsunami de media baja. En un sector en el sur – poniente se encuentra construcciones con grado de vulnerabilidad media-alta.

Se recomienda mantener los indicadores de vulnerabilidad en gran parte del sector de Lolleo, y mejorar en los sectores que se encuentran con materialidades y estados de las construcciones en regular o malo.



**Figura 98 Vulnerabilidad del Sector de Lolleo frente a la amenaza de tsunami**

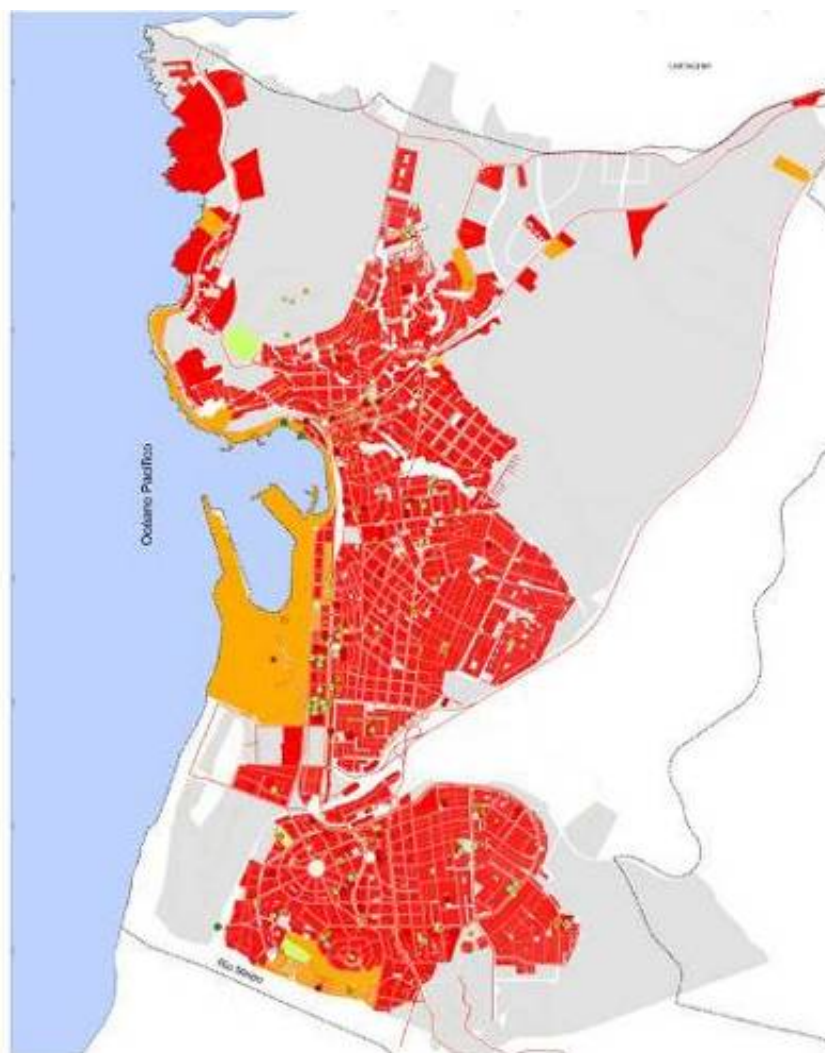
Para el caso de la vulnerabilidad frente a la sismicidad se presentan una predominancia de vulnerabilidad baja. Esto indica que las construcciones resisten eventos sísmicos significantes.



**Figura 99 Vulnerabilidad del Sector de Lolleo frente a la amenaza de sismicidad**

#### **8.2.1.4 Otros sectores**

Con respecto a la amenaza de remoción en masa, se utilizó el supuesto “Dada la tecnología actual de construcción edificatoria, y las características destructivas de la amenaza, todas las construcciones se consideran altamente vulnerables”, por lo cual el indicador de vulnerabilidad es alto, los sector puerto presenta una vulnerabilidad menor por las características de estado y altura.



**Figura 100 Vulnerabilidad frente a la amenaza de remoción en masa**

### **8.2.2 Conclusiones generales**

Las concentraciones de equipamientos críticos y servicios, se concentran principalmente, en los centros de los tres sectores, en zonas de vulnerabilidad media baja y baja, tanto para enfrentar las amenazas de tsunami y sismicidad. Lo que indica la ciudad se encuentra en un buen pie para enfrentar una catástrofe.

Con respecto a la vialidad, se debe pavimentar las vías que no se encuentran en este estado, ya que aportaría a disminuir los niveles de vulnerabilidad que se ven enfrentado los habitantes de la ciudad.

Se debe considerar siempre los indicadores de vulnerabilidad, es decir, mantener una base de datos que permita ser actualizable periódicamente para conocer los avances en materias de seguridad para enfrentar futuras catástrofes. Mantener informada a la población para enfrentar eventos complicados, como también tener un plan de emergencia que ayude a disminuir los niveles de vulnerabilidad.



## 9 MODELACIONES DE ÁREAS DE EVACUACIÓN PARA UN PLAN DE EVACUACIÓN

### 9.1 Metodología

La metodología propuesta para el desarrollo de este trabajo, fue elaborada con el propósito de constituir una herramienta de uso preliminar para establecer tiempos generales de escape, así como también proponer zonas seguras y vías de evacuación. No obstante, su utilidad debe ser complementada por otros procedimientos y metodologías, que incluyan análisis de flujos más específicos que los trabajados en este modelo y revisiones de materialidad anexas a los ejes viales y las vías de evacuación.

Como herramienta se utilizó el análisis de red proporcionado por el SIG ArcGIS 9.3, en el cual a través del manejo de criterios y parámetros controlados, es posible obtener una zonificación automática, generada a partir de tiempos de evacuación de acuerdo a factores topográficos.

### 9.2 Insumos

El desarrollo de los procedimientos se realizó a través de 3 fases, las cuales se detallan a continuación:

#### 9.2.1 FASE I: Construcción y actualización de la información de Ejes viales.

Se actualizaron los ejes viales de la ciudad de San Antonio, transformando las coberturas de vialidad existentes (en formato CAD) en ejes viales, digitalizando los faltantes y clasificando según ancho de calle. Además, se insertaron impedancias de velocidad y tiempo de desplazamiento en cada eje vial. Este procedimiento se realizó en tres actividades, utilizando como herramienta el SIG Arc GIS 9.3:

- **Actividad 1:** La actualización de los ejes viales se realizó de tres formas. En primer lugar se editaron las coberturas de borde de calle contenidas en el Plan Regulador Comunal (PRC) de San Antonio, dando como resultado una línea central en cada eje de calle. En segundo lugar, utilizando fotografías aéreas e imágenes satelitales obtenidas a través de *Google maps*, se digitalizaron los ejes viales faltantes en la cobertura del PRC. En tercer y último lugar, se conectaron las calles en todas sus intersecciones conformando nodos en cada una de ellas. Estos pasos dieron como resultado la cobertura de ejes viales que corresponde a la construcción gráfica de la red.
- **Actividad 2:** La segunda actividad que se realizó, fue insertar las impedancias de velocidad en los ejes viales. Para ello se utilizaron las curvas de nivel de 2 m de cada localidad. Con ello se generó un modelo de pendientes a través de un MDE, al cual se le asignó una velocidad de desplazamiento según un rango de pendiente en grados. Los rangos asignados se muestran en la siguiente tabla:

Pendiente °	km/h
< 5,6	4,48
5,6 - 8	3,29
8 -11,2	2,72
11,2 - 14	2,17
14 - 30	1,12
> 30	0,08

Fórmula:  $5,3724 \times e^{(-0,0757/2 \times X)^{18}}$

Fuente: elaboración propia a partir de Martín, D. 2007

Seguidamente se intersecaron los ejes viales con el modelo de pendiente, generando así una velocidad de desplazamiento y una pendiente determinada para cada arco de los ejes viales. Inmediatamente después, se clasificaron distintas velocidades de desplazamientos para los diversos anchos de calle (avenida, calle y pasaje), resultando una matriz de velocidades de desplazamiento. Este último paso da a la configuración de la red un atributo de flujo, debido a que a menor ancho de calle, mayor flujo de personas evacuando y por ende menor velocidad de desplazamiento.

Velocidades km/h		
Avenidas	Calles	Pasajes
4,48	2,37	1,48
3,29	1,74	1,09
2,72	1,44	0,90
2,17	1,15	0,72
1,12	0,59	0,37
0,08	0,04	0,03

Fuente: Elaboración propia

<sup>18</sup> Esta ecuación potencial fue utilizada para proyectar los datos de pendiente obtenidos a través de la bibliografía, que no completaban el total de pendientes del área de estudio.

- **Actividad 3:** Como última actividad, se creó un nuevo campo en los ejes viales que fueron anteriormente intersecados con la pendiente, al cual se le llamó “Tiempo”, donde a través de la siguiente ecuación, se calcularon los tiempos de evacuación de cada arco de los ejes viales.

$$T_{\text{tiempo}} = \left( ([\text{Shape\_Length (m)}] + 1000) + [\text{velocidad (m/s)}] \right) \times 3600$$

Ec. 7. Cálculo tiempos de evacuación.

Fuente: Elaboración propia

De esta manera se completó la parte de atributos de los ejes viales que junto con la parte gráfica, conformaron la red vial.

### 9.2.2 FASE II: Definición de áreas de seguridad y tiempos de evacuación, a partir del peor escenario modelado para evento sísmico de magnitud Mw 8.8.

Se modelaron los tiempos de evacuación a través del análisis de redes proporcionado por el SIG ArcGIS 9.3, donde se calcularon áreas de seguridad ante la amenaza de tsunami, que correspondían a tiempos de evacuación y a su vez se designaron las zonas de seguridad. Esto se detalla a continuación en las siguientes actividades:

- **Actividad 1:** El primer paso para la modelación de los tiempos de evacuación mediante el análisis de REDES, es localizar puntos de destino o *facilities*<sup>19</sup>. Estos se localizaron digitalizando puntos en una nueva cobertura y utilizando como criterio, zonas que estuviesen fuera de peligro de inundación de tsunami y remoción en masa y que además poseían una buena accesibilidad a través de las vías.
- **Actividad 2:** Una vez digitalizados los puntos correspondientes a las zonas seguras, se procedió a calcular las áreas de servicio. Para hacer correr la modelación de las áreas de servicio, fue necesario fijar dos parámetros de modelación, el primero fue ingresar los puntos referidos a zonas seguras, como puntos de destino o *facilities*, y el segundo paso fue establecer tiempos críticos los cuales fueron fijados en 10, 15 y 60 minutos<sup>20</sup>. Establecidos estos parámetros, se hizo correr la modelación de cada localidad obteniéndose así las áreas que delimitan tiempos de evacuación hacia zonas seguras desde toda la red vial.

<sup>19</sup> Barrientos, M. Network Analyst, El Análisis de Redes desde Arc GIS 9.2, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Chile 2007

<sup>20</sup> Vargas, G et al. Alzamiento cosísmico asociado al terremoto Mw8.8 en Chile central y efectos del tsunami entre los 33,2°S y 39,8°S. Revista Ingeniería y Ciencias FCFM. 2010.

- **Actividad 3:** Como último paso, se intersecaron las áreas de servicio con el área de inundación del tsunami, generándose así un área afectada zonificada interiormente por tres tiempos de evacuación en 10, 15 y 60 minutos.

### 9.2.3 FASE III: Definición de vías de evacuación en función del trazado urbano, topografía y zonas de seguridad.

Se digitalizó en el SIG Arc GIS 9.3 las vías de evacuación, desde las zonas afectadas por el tsunami hasta las zonas seguras, utilizando como insumo las vías estructurantes propuestas en los PRC, los ejes viales y la pendiente del área de estudio. Esto último se explica en las siguientes actividades:

- **Actividad 1:** Mediante la sobre posición de los PRC de las localidades, la pendiente y la red vial, se digitalizaron en una nueva cobertura las vías que conectasen las áreas afectadas por el tsunami, con su respectivo tiempo de evacuación con las zonas seguras, utilizando como criterio las arterías principales de la red vial, la baja pendiente y las vías estructurantes propuestas en los PRC. El resultado de esta actividad es una cobertura de vías de evacuación longitudinal, ascendente y principal.
- **Actividad 2:** Se procedió a generar una nueva cobertura de puntos, localizada en las intersecciones de las vías de evacuación longitudinal, ascendente y principal, con el fin de proponer lugares estratégicos para la localización de señalética de emergencia.
- **Actividad 3:** Finalmente con las coberturas creadas, se procedió a la confección de la cartografía que para efectos del proyecto fue titulada “Plan de Evacuación ante Tsunami” para San Antonio. La cartografía fue elaborada a una escala 1: 6.500.

## 9.3 Análisis de los resultados

### 9.3.1 Memoria explicativa

#### 9.3.1.1 Zonas seguras y zonas de evacuación

La zonificación de seguridad resultante del análisis de REDES, se define como una zonificación del territorio en dos partes principales. La primera parte la constituyen las zonas seguras que se encuentran en sitios que están fuera el área de inundación del tsunami y en segundo lugar se encuentran las zonas de evacuación, contenidas en el área de inundación del tsunami.

Las **zonas seguras**, se caracterizan por localizarse en lugares de óptimo acceso vial, fuera de áreas de remoción en masa y de inundación de tsunami, en espacios abiertos de gran acogida de público y en zonas de baja pendiente. En varios de los casos estas zonas de seguridad corresponden a espacios abiertos como predios con uso de suelo agrícola (pastizales y barbecho) o en otros casos de uso forestal (bosques y plantaciones). En algunos casos, por no encontrarse idóneos sectores con espacio público, las zonas seguras se localizaron en predios con uso residencial, en cuyo caso para el desarrollo de un plan de evacuación aplicado, dichos terrenos tendrían que estar sujetos a

expropiación. Las zonas seguras poseen una superficie que concentra a un universo determinado de población evacuada de las áreas inundadas.

Al contrario de las zonas seguras, las **zonas de evacuación** dividen el área de inundación del tsunami en tres sub zonas. Éstas se caracterizan por contener tiempos de evacuación hacia zonas seguras de 10, 15 y más de 15 minutos (1 hora), los que delimitan cuales son los sectores de la ciudad que alcanzan a tener una expedita evacuación ante la amenaza de un tsunami, que según las estimaciones<sup>21</sup> manejadas en el proyecto, llegaría entre 10 y 15 minutos.

A continuación se describen las características de cada zona de evacuación.

- **Zona de evacuación en 10 minutos:** Esta sub zona se caracteriza por encontrarse a mayor lejanía de la costa y por lo general bordea las zonas que no fueron inundadas por el tsunami. Su característica más importante es que posee una cobertura de red vial que permite la conectividad relativamente rápida hacia las zonas de seguridad y una buena pendiente para el desplazamiento a pie. Se considera esta sub zona como habitable y apta para el uso residencial.
- **Zona de evacuación en 15 minutos:** Esta sub zona de evacuación está caracterizada por encontrarse a una distancia media de la costa, posee una cobertura vial buena y pendientes medias entre 8° y 11,2°. En algunos sectores con menos cobertura vial, esta sub zona de evacuación bordea las áreas que no fueron afectadas por el tsunami. Está considerada como una zona transicional entre las zonas recomendadas como habitables y las recomendadas como no habitables.
- **Zona de evacuación en más de 15 minutos:** Esta sub zona de evacuación se caracteriza por presentar los mayores problemas de evacuación, debido a que presenta una bajísima cobertura vial, altas pendientes o bien se encuentra a una lejanía considerable de las zonas seguras. Por lo general estas sub zonas se encuentran alejadas a la línea de costa y están consideradas debido a su tiempo de evacuación como zonas no habitables.

### **9.3.1.2 Vías de Evacuación**

Las zonas seguras y las zonas de evacuación, deben presentar una comunicación unilateral entre ellas para hacer efectiva una evacuación. Ésta comunicación es proporcionada por las vías de evacuación propuestas en este trabajo.

Las vías de evacuación son calles de la red vial que se caracterizan por ser estructurantes o principales en el sector donde se emplazan, correspondiendo así a avenidas, carreteras, diagonales, etc. Las vías de evacuación, dependiendo del tramado urbano, conectan las zonas de

---

<sup>21</sup>Vargas, G. Alzamiento cosísmico asociado al terremoto Mw8.8 en Chile central y efectos del tsunami entre los 33,2°S y 39,8°S. *Revista Ingeniería y Ciencias FCFM*. 2010.

evacuación afectadas por el tsunami con las zonas seguras proporcionando un recorrido lo más corto posible y orientado a una “evacuación natural” hacia zonas elevadas. Se distinguen tres tipos de vías de evacuación:

- **Vías de evacuación ascendentes:** caracterizadas por conectar las zonas de evacuación con el interior del tramado urbano, son por lo general perpendiculares a la costa.
- **Vías de evacuación longitudinales:** caracterizadas por unir perpendicularmente a las vías ascendentes y por disponerse paralelas a la costa.
- **Vías de evacuación principales:** representan las vías de evacuación más importantes y se destacan debido a que son un acceso directo a una zona segura y presentan una jerarquía mayor de vialidad.

Complementariamente a las vías de evacuación, se encuentran **los nodos de distribución** que son puntos estratégicos donde localizar una señalética de evacuación ante la amenaza de un tsunami. Estos se encuentran en las intersecciones de las vías de evacuación ascendente, longitudinal y principal.

### 9.3.2 Plan de Evacuación

La unión de las zonas de evacuación, las zonas seguras, las vías de evacuación y los nodos de distribución, dentro de un mismo territorio conforman un plan de evacuación, el que fue aplicado a la ciudad de San Antonio considerando la amenaza de inundación de un tsunami derivado de un sismo de magnitud Mw 8.8.

El resultado de las modelaciones de tsunami, muestra un favorable escenario para la ciudad, ya que debido a su topografía las zonas inundadas serían muy pocas y bajamente pobladas. El sector N no presenta una inundación gracias a la conformación de un farellón costero. No así el sector S, el cual al poseer una menor pendiente sumado a la desembocadura del río Maipo presenta una mayor parte inundada por el tsunami. En este último sector, es donde se enfoca el plan de evacuación, ya que es el que presenta inundación en sectores poblados.

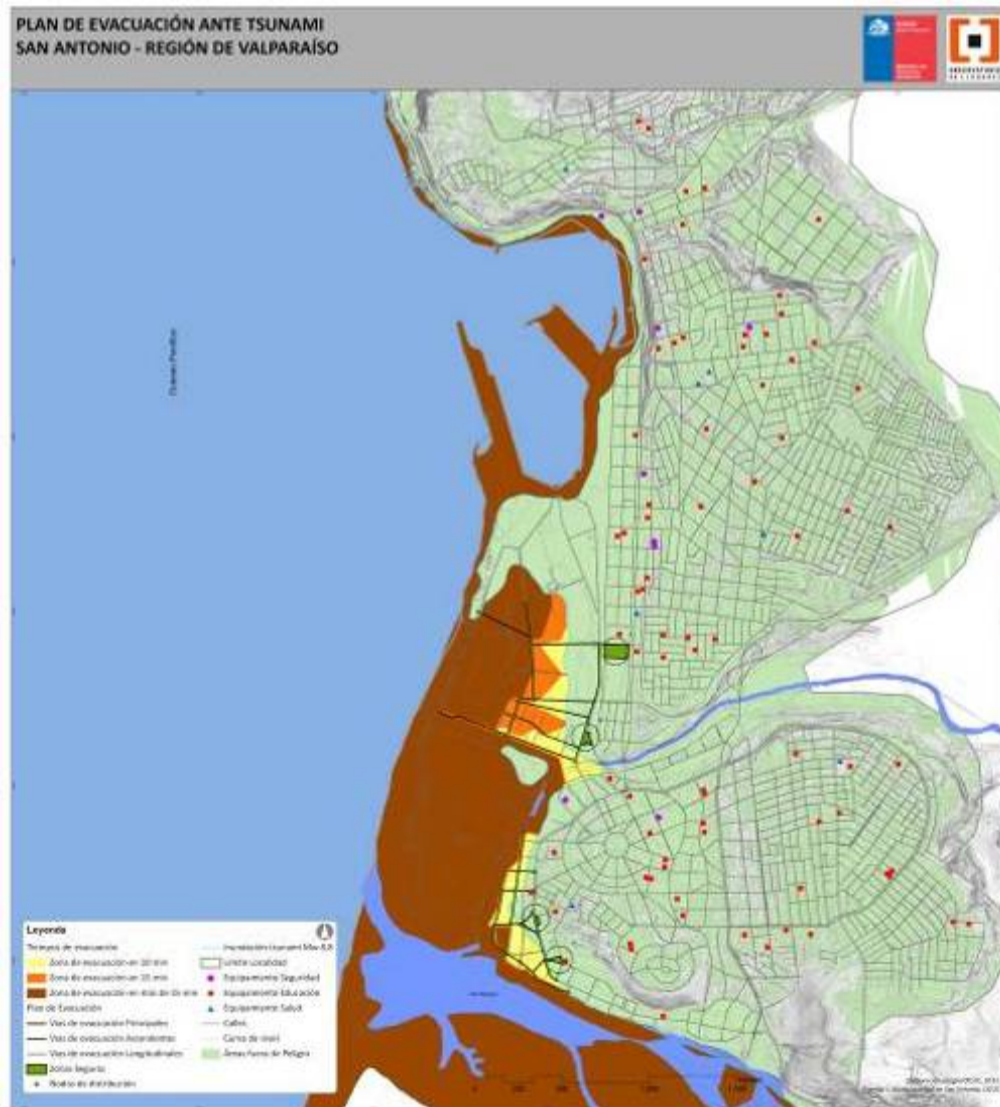
El sector S puede analizarse en dos partes, la zona del puerto y la zona de Lolleo. En la zona del puerto, la inundación del tsunami llegaría a alrededor de los 5 metros de altitud y dada la topografía del lugar éste se inunda casi completamente. Ésta zona se caracteriza por poseer una baja concentración residencial remitida solo al S del puerto. Para evacuar esta zona se disponen dos zonas de seguridad ubicadas cerca del límite de la inundación las cuales corresponden a un predio privado con acogida de público y a una cancha de futbol, las cuales evacúan a escasamente las áreas del puerto, pero completamente la zona residencial.

Por otro lado el sector de Lolleo, presenta mayor desarrollo residencial, por lo que las zonas seguras se dispusieron cercanas a la línea de inundación, estas comprenden una plaza y un predio

privado. Ambas zonas seguras evacuan en menos de 15 minutos a toda el área inundada que posee cobertura vial.

En general, se puede concluir que la inundación del tsunami modelado para un sismo de magnitud Mw 8.8 no se presenta como una gran amenaza para la ciudad, debido a que inunda pocas áreas, las cuales tienen escasas zonas pobladas. Éste escenario es una ventaja para generar un plan de evacuación ya que al ser en un área muy reducida los costos de implementación del plan debieran ser bajos y los resultados eficientes.

En la siguiente figura se presenta el resultado obtenido del plan de evacuación. Para ver en detalle, revisar anexos.



**Figura 101. Plan de evacuación ante Tsunami.**  
Fuente: elaboración propia, OCUC, 2011.

## **10 ANÁLISIS NORMATIVA LOCAL (ESTADO DE AVANCE)**

La tarea de revisión normativa a que se refiere el presente capítulo se desarrolla en tres cuerpos: el primero de ellos, consiste en una **revisión** de las materias contenidas en la **Ley** General de Urbanismo y Construcciones y su Ordenanza General que se refieren al **tratamiento de los riesgos** en general y a los **Instrumentos de Planificación Territorial**; el **segundo** cuerpo se concentra en la normativa contenida en el **Plan Regulador Intercomunal** y por último, en el **tercer** cuerpo se expone las **conclusiones** sobre la revisión de las normas contenidas en el **Plan Regulador Comunal de San Antonio**.

### **10.1 Revisión del tratamiento de las materias relacionadas con Riesgos en la Ley General de Urbanismo y Construcciones y en su Ordenanza General.**

Complementariamente y con el propósito de comprender mejor los alcances de la normativa vigente en el contexto de las recientes interpretaciones señaladas se han intentado extraer las atribuciones que la Ley General de Urbanismo y Construcciones y su Ordenanza otorgan para el tratamiento de los riesgos de origen natural.

El análisis sobre la Ley y su Ordenanza General indicado, se adjunta como anexo y como resultado de dicha revisión se formulan las conclusiones que se desarrollan más adelante.

#### **10.1.1 Conclusiones sobre análisis de la Ley**

La Ley establece normas para la planificación territorial a nivel Intercomunal y urbana a nivel comunal además para las acciones de urbanización y construcción.

Las normas para las acciones de planificación establecen las materias y alcances que deben considerarse en la elaboración de los Instrumentos de Planificación Territorial que es una acción que le compete al Estado.

Para las acciones de urbanización y construcción, la normativa es más extensa y compleja dado que considera acciones del Estado y de los privados. Esta normativa otorga ciertas atribuciones facultativas y discrecionales a las municipalidades y Direcciones de Obras que abarcan materias técnicas y administrativas no contenidas en los Instrumentos de Planificación.

En la planificación a nivel comunal, que corresponde al nivel de detalle en que se inserta el presente estudio, el marco regulatorio revisado establece materias que pueden ser reguladas y los parámetros que rigen para dichas acciones.

El conjunto de normas que contiene el Plan Regulador tienen como propósito establecer “adecuadas condiciones de higiene y seguridad en los edificios y espacios urbanos, y de comodidad en la relación funcional entre las zonas habitacionales, de trabajo, equipamiento y esparcimiento”. Para el cumplimiento del propósito indicado las normas relacionadas con el riesgo contempladas en el nivel comunal serán: la zonificación del territorio urbano estableciendo “iguales condiciones de usos de suelo o de edificación”, establecimiento de los Límites Urbanos,



determinación de prioridades en la urbanización de terrenos para la expansión de la ciudad y la identificación de aquellos terrenos que “por su especial naturaleza y ubicación no sean edificables”.

Para los efectos de establecer las materias indicadas se debe contar con una “Memoria Explicativa” que contendrá los “antecedentes técnicos que sirvieron de base a las proposiciones” y “un estudio de factibilidad para ampliar y dotar de agua potable y alcantarillado...”.

Conforme a lo destacado entre los antecedentes técnicos que forman parte de la memoria explicativa, que constituye uno de los documentos constitutivos del Plan Regulador, se debe incluir el estudio de la “naturaleza y ubicación” de los terrenos en cuanto a su aptitud (y condiciones) para ser “edificables” otorgando adecuadas condiciones de “higiene y seguridad”.

Sin perjuicio que en la Ley no se señala el estudio de riesgos como parte de los antecedentes del Plan Regulador, dicha legislación establece la obligación de los proyectos de cumplir con las normas urbanísticas entre las que se consideran las áreas de riesgo o protección contenidas en los instrumentos de planificación. La Ordenanza General aclara los alcances de la normativa sobre zonas no edificables y áreas de riesgo o protección en que se considera como parte integrante de la memoria explicativa el “Estudio de Riesgos y Protección Ambiental” mediante el cual se establece las zonas no edificables y las áreas de riesgo y protección correspondientes en que se aplican las disposiciones administrativas contenidas en la Ordenanza General que permiten la definición de medidas técnicas que deben cumplirse.

De los tres tipos de zonas y áreas indicadas, conforme a la Ordenanza General, corresponde al Plan Regulador reconocer zonas no edificables establecidas por el ordenamiento jurídico vigente, establecer áreas de riesgo, reconocer las áreas de protección de recursos de valor natural, protegidas por el ordenamiento jurídico vigente, establecer o reconocer áreas de protección de recursos de valor patrimonial cultural según corresponda.

En consecuencia los estudios de riesgo están orientados a definir en el Plan Regulador las áreas afectadas por factores de riesgo y las condiciones que deben cumplir las edificaciones en ellas. No corresponde a este estudio establecer áreas o zonas no edificables por cuanto dicha materia sería atribución de otras legislaciones.

Aunque los propósitos del “Estudio de Riesgos y Protección Ambiental”, es la definición de las materias indicadas en la Ordenanza General, dicho estudio puede aportar antecedentes importantes para la definición de otras materias del Plan Regulador como es la definición de Límite Urbano en comunas que carecen de planificación intercomunal, normas para la edificación y uso de suelo en zonas específicas que no presentan riesgos severos y de alta probabilidad o prioridades en la urbanización de áreas en que se extiende la ciudad.

Complementariamente en las normas que regulan la urbanización y construcción se contemplan algunas acciones exigibles a los proyectos que no están contenidas en los Instrumentos de Planificación y que son atribuciones de la municipalidad y del director de obras.

Para la aplicación de estas disposiciones, en los estudios de riesgo, puede aportarse antecedentes que permitan establecer zonas (probablemente a nivel de ordenanza comunal) en que se exija a los proyectos de urbanización, o a los proyectos de edificación que no están obligados a presentar proyectos de cálculo estructural, un informe sobre la calidad del subsuelo o sobre posibles riesgos provenientes de las áreas circundantes y las medidas que se adoptarán en su caso. Esta zonificación permite identificar las zonas en que en el Certificado de Informaciones Previas se formule la exigencia indicada.

Igualmente se puede zonificar la existencia de “terrenos húmedos, o en los que existen aguas subterráneas a poca profundidad” que no constituyen “áreas de riesgo” por cuanto no tienen características de “zonas inundables o potencialmente inundables” a efectos de que la dirección de obras solicite a través del Certificado de Informaciones Previas las medidas contempladas en el artículo 5.7.13 de la Ordenanza General.

En otro orden de cosas, atendiendo que la consideración de los riesgos es una materia desarrollada a través de la Ordenanza General, es viable que este reglamento sea sometido a una revisión y propuesta de cambios orientados a incorporar procedimientos administrativos que permitan informar a los propietarios adecuadamente sobre riesgos y solicitar los estudios de detalle que permitan establecer las mitigaciones, mediante soluciones técnicas adecuadas, que aseguren adecuadas condiciones de “higiene y seguridad” a los habitantes.

### **10.1.2 Instrumentos de Planificación**

Sin perjuicio que no corresponde a la materia del presente estudio, se ha considerado pertinente referirse a contenidos de recientes circulares emitidas por la DDU del MINVU que repercuten significativamente sobre las materias que pueden ser tratadas por los Planes Reguladores Comunales y las restricciones que tienen dichos instrumentos en especial respecto del tratamiento de materias, que aunque pertenezcan al ámbito de atribuciones del nivel comunal, no corresponden a atribuciones entregadas a dicho nivel por la Ley General de Urbanismo y Construcciones.

Específicamente nos referimos a dos circulares, la DDU 227 distribuida por circular ord. N° 935 de 1 de diciembre de 2009 y DDU 230 circular ord. N° 166 de 24 de febrero de 2010, que entregan directrices precisas respecto del contenido y forma en que dichos contenidos deben ser considerados en la formulación de planes reguladores comunales.

## **10.2 Alcances sobre el contenido del Plan Intercomunal**

En consideración a los documentos señalados a continuación se formulan comentarios generales a los contenidos principales en materia de riesgos del PLAN REGULADOR INTERCOMUNAL DE

VALPARAISO INCORPORANDO EL SATELITE BORDE COSTERO SUR CORRESPONDIENTE A LOS TERRITORIOS DE LAS COMUNAS DE ALGARROBO, EL QUISCO, EL TABO, CARTAGENA Y SAN ANTONIO DE LA PROVINCIA DE SAN ANTONIO, aprobado por Resolución Núm. 31-4 afecta-Valparaíso, 27 de febrero de 2006. Más adelante se formulan comentarios al Plan Regulador vigente de San Antonio.

Para los efectos indicados en los siguientes párrafos se extracta parte de los textos de la Ordenanza del Plan Regulador Intercomunal de Valparaíso que incorpora el Satélite Borde Costero Sur obtenido a través del sitio del MINVU en versión no editable (extensión pdf). El análisis se realiza a través de la inserción de cuadros de texto que contienen comentarios sobre inconsistencias entre el documento revisado y las normas y circulares en referencia.

Para exponer estos alcances, a continuación se extracta el artículo y en cuadro insertado a continuación del texto vigente se indica el comentario pertinente.

#### *Artículo 3.16*

*Para los efectos de aplicación de esta Ordenanza, se entenderá por Quebrada, el fondo mismo del cauce natural y faldeos adyacentes que queden incluidos en fajas de 200 metros, esta distancia se medirá horizontalmente, 100 metros a cada lado del eje de la quebrada, cuando el escurrimiento de aguas sea permanente.*

*En los casos que el escurrimiento de las aguas sea intermitente u ocasional, la Quebrada estará constituida por su fondo y faldeos laterales que queden incluidos en fajas de 50 metros horizontales, medidos a cada lado de su eje.*

*Estas fajas podrán disminuirse a 15 metros horizontales cada una, en el caso que los faldeos correspondientes tengan una pendiente inferior a 40°, si de acuerdo a estudios fundados, elaborados por profesional especialista, cumple los requisitos y condiciones establecidas para ello, incluida la evaluación de impacto ambiental correspondiente.*

*Los Planes Reguladores Comunes y los Planes Seccionales que se confeccionen para el área territorial normada por la presente Ordenanza, indicarán las quebradas o sus ejes según corresponda, pudiendo al mismo tiempo aumentar el ancho de las fajas laterales antes indicadas y determinar otras condiciones de mayor restricción de quebradas y cauces naturales.*

Las Zonas inundables o potencialmente inundables corresponden a una categoría de las áreas de riesgo conforme lo establece el artículo 2.1.17 de la OGUC, por su lado, el fondo de quebrada que corresponda a un cauce determinado conforme a las disposiciones del código de aguas correspondería a un Bien Nacional de Uso Público. Para un cauce determinado conforme a lo señalado corresponde reconocerlo, según el artículo 2.1.18 de la OGUC, como “área de protección de recursos de valor natural” y su ocupación se rige por las disposiciones de la ley

que lo protege sin que el instrumento de planificación de nivel intercomunal o comunal disponga otra condición.

Para el área de riesgo corresponde que el Plan Regulador establezca las condiciones urbanísticas aplicables una vez que se ejecuten las obras determinadas por un estudio fundado conforme al artículo 2.1.17 de la OGUC.

Adicionalmente según las características de los suelos determinadas por el estudio de riesgos un terreno con pendientes de más de 20°, esto es aproximadamente un 45%, podría ser clasificado como “zona propensa a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas” en cuyo caso el Plan Regulador debe establecer las condiciones urbanísticas para su ocupación una vez ejecutadas las obras determinadas por un estudio fundado conforme al artículo 2.1.17 de la OGUC.

#### *PÁRRAFO 10: Cauces naturales y artificiales y sus modificaciones*

##### *Artículo 3.17*

*Cuando las edificaciones, los proyectos de loteo, subdivisión o urbanización contemplen la modificación de los cauces naturales o artificiales, deberá ajustarse a lo dispuesto sobre la materia en el artículo 41, 171 y siguientes del Código de Aguas. Dichos proyectos de edificación, loteo, subdivisión o urbanización sólo podrán ser recibidos por la Dirección de Obras Municipales respectiva, una vez que se encuentren ejecutadas íntegramente las obras de los cauces, las cuales serán aprobadas y recibidas por los Servicios correspondientes.*

#### *PÁRRAFO 11: Edificaciones en terrenos en pendiente*

##### *Artículo 3.18*

*En el territorio normado por el Plan Intercomunal de Valparaíso, los proyectos de loteo, urbanización y/o edificación que se emplacen en terrenos con pendientes deberán cumplir las siguientes normas:*

*En terrenos con pendientes menores a 20° deberán cumplir con lo prescrito en el artículo 134 de la Ley General de Urbanismo y Construcciones, aplicado con las facultades que le confiere al Director de Obras Municipales el artículo 5.1.15 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.*

Conforme al texto de los incisos anteriores, se puede entender que todos los terrenos con pendientes menores a 20° son terrenos con pendiente. Como referencia podemos señalar que la OGUC considera como pasajes en pendiente elevada aquellos ejecutados en terrenos con pendiente de un 20% (9° aprox.) o más, aplicando el mismo criterio establece atribuciones al

IPT para fijar cualquier tamaño a la subdivisión mínima a estos terrenos. Atendiendo a lo señalado podría establecerse las exigencias de los incisos anteriores a terrenos de más de 10° y hasta 20° eximiendo de su cumplimiento a los que presenten pendientes menores a la señalada.

*En los terrenos con pendiente, las soluciones puntuales que ejecuten los particulares y que en esta materia se adopten, deberán ser respaldadas por un informe técnico confeccionado por profesional competente, el cual deberá demostrar que dichas obras no afectarán la estabilidad de los terrenos colindantes y que existirá una adecuada solución para la evacuación de las aguas lluvias o de afloramientos subterráneos.*

*En terrenos con pendientes mayores a 20°, sin perjuicio de lo prescrito en el artículo 134º de la Ley General de Urbanismo y Construcciones y con las facultades que le confiere al Director de Obras Municipales el artículo 5.1.15 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, será obligación para los proyectos de loteo, urbanización y/o edificación, la presentación de proyectos específicos de obras de defensa y contención de suelo y cálculo de mecánica de suelos.*

*Para los efectos de calcular la pendiente de un terreno se aplicará sobre el plano de levantamiento topográfico, con cotas como mínimo a un metro entre ellas, la siguiente fórmula:*

$$S = \frac{I \times L \times 100}{A}$$

*Donde,*

*S = Pendiente promedio del terreno, expresada en porcentaje.*

*I = Distancia vertical en metros entre curvas de nivel sucesivas.*

*L = Sumatoria de las longitudes en metros de las curvas.*

*A = Superficie en m<sup>2</sup> del terreno.*

*Para transformar la pendiente a grados se usará la siguiente fórmula:*

$$G = \frac{45^\circ \times S}{100}$$

*Donde,*

*S = Pendiente promedio del terreno, expresada en porcentaje.*

*G = Pendiente promedio del terreno expresada en grados.*

*En los terrenos que presentan pendientes iguales o superiores a 40° sólo se podrá otorgar permiso de edificación cuando el Plan Regulador Comunal expresamente lo permita en base a estudios fundados, los cuales deberán abordar y compatibilizar, a lo menos, las siguientes materias: calidad del subsuelo y posibles riesgos provenientes de las áreas circundantes, escurrimiento, drenaje y disposición de aguas superficiales y subterráneas.*

*Para los fines señalados en el presente artículo, la medición de las pendientes deberá realizarse sobre la base de un levantamiento topográfico de la situación del terreno natural al momento de proponerse el proyecto, debiéndose medir la máxima pendiente en sentido perpendicular a las curvas de nivel, cualquiera que sea su desarrollo en planta.*

*Los Planos Reguladores Comunales y/o Seccionales podrán establecer fundadamente normas más restrictivas que las establecidas en el presente artículo.*

Al tenor del contenido de este inciso el terreno indicado correspondería a una “zona propensa a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas” respecto del cual se hace la exigencia señalada. En este caso, en el plan regulador, debería establecerse el polígono correspondiente y fijarse las condiciones urbanísticas a aplicarse una vez ejecutadas las obras determinadas por el estudio pertinente.

#### *PÁRRAFO 12: Nivel natural del terreno*

##### *Artículo 3.19*

*Para determinar el nivel de suelo natural en aquellos terrenos que han sido intervenidos artificialmente, se trazará un plano imaginario que lo reemplace, resultante de tomar la información topográfica anterior a la intervención, o bien se deducirá mediante la topografía circundante en un plano refrendado por profesional competente.*

*En el caso de loteos que por razones técnicas justificadas modifiquen los niveles del terreno mediante rellenos o desmontes, el nivel de suelo resultante graficado en el plano de loteo se tomará como suelo natural. En casos puntuales de montículos o depresiones naturales del terreno, que afecten a un sector de un predio, el Director de Obras Municipales podrá autorizar emparejamientos del suelo, considerándose en este caso el terreno emparejado como suelo natural del proyecto.*

*Para estos efectos el propietario y el profesional competente deberán presentar a la Dirección de Obras Municipales un levantamiento topográfico del terreno a escala adecuada a la dimensión del terreno, con curvas de nivel a 5 metros como mínimo y todo referido a coordenadas UTM,*

*indicando, además, todos los accidentes topográficos relevantes, tales como afloramientos rocosos, depresiones, cursos de agua, quebradas, etc., señalando asimismo la ubicación precisa de los árboles relevantes y masas arbustivas existentes en el terreno.*

*En el mencionado plano se deberán indicar las obras que tengan por objeto habilitar el terreno para recibir las obras de urbanización y/o construcción, según corresponda.*

#### *PÁRRAFO 13: Riesgos de origen natural*

##### *Artículo 3.20*

*Las comunas cuyas áreas territoriales estén normadas por esta Ordenanza deberán confeccionar o solicitar los estudios de especialidad que sea necesario para establecer técnicamente, cuando proceda, en sus Planes Reguladores Comunes y Planes Seccionales, áreas de riesgos y determinar las normativas necesarias por constituir un peligro potencial para los asentamientos humanos.*

##### *Artículo 3.21*

*Para la delimitación de las riberas de los cauces de los ríos, lagos y esteros se estará a lo dispuesto en el DS N° 609, Tierras y Colonización del 31/08/78, publicado en el Diario Oficial del 24/01/79, y el Código de Aguas.*

Los dos artículos anteriores corresponden a disposiciones indicativas que estimamos conforme a las recientes instrucciones de la DDU no corresponde incluirlas en esta ordenanza.

#### *PÁRRAFO 14: Restricciones generales*

##### *Artículo 3.22*

*Sin perjuicio de las restricciones que se establecen como área o zonas en el territorio del Plan Intercomunal de Valparaíso, por la presente Ordenanza se reconocen, además, las siguientes, aunque no se grafiquen en los planos:*

*a) Fajas no edificables bajo los tendidos eléctricos, de acuerdo con: El artículo 56° del DFL N° 1, de Minería de 1982, los reglamentos sobre la materia, aprobados por resoluciones de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, las normas contenidas en sus manuales técnicos y otras normas legales sobre la materia; sin perjuicio de lo dispuesto en los artículos 2.1.17 N° 4 y 5.1.9 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones y explicitado en Circular Ord. N° 230, DDU106/2002, de la División de Desarrollo Urbano del MINVU.*

*b) Fajas o senderos de inspección de los canales de riego o acueductos, establecidos en el Código de Aguas, DFL N°1.122 de 1981, del Ministerio de Justicia, (D.O. del 29/10/81).*

*Así como el resguardo a fuentes de abastecimiento de Agua Potable, en que todo proyecto deberá cumplir con las normas establecidas en la ley N°19.300 y su Reglamento.*

*c) Fajas o terrenos de protección de cursos naturales de agua, manantiales y quebradas naturales, de acuerdo a la Ley de Bosques, DS N° 4.363 de 1931, del Ministerio de Tierras y Colonización, (D.O. del 31/07/31) y DS N°609, de 1978, del Ministerio de Tierras y Colonización, (D.O. del 24/01/79).*

*d) Fajas de 25 metros no edificables con viviendas, establecidas por el Reglamento General de Cementerios, DS N°357 de 1970, del Ministerio de Salud (D.O. del 18/06/70), y demás normas pertinentes.*

*e) Las instalaciones de tratamiento y disposición de residuos sólidos domésticos y/o industriales deberán dejar, dentro de su predio, fajas de 300 y 600 metros en torno a ellos, según se trate de viviendas o locales habitables u otros establecimientos según lo señala la resolución N° 02444, del 31/7/80, del Ministerio de Salud.*

*f) Territorios afectados por la proyección de las superficies limitadoras de obstáculos que determine en cada caso la Dirección General de Aeronáutica Civil en los terrenos aledaños a Aeropuertos o Aeródromos, según lo previsto en la ley N° 18.916, del Ministerio de Justicia, que aprueba el Código Aeronáutico.*

*g) Fajas de terrenos adyacentes a trazados de ferrocarriles, según lo previsto en la Ley General de Ferrocarriles, DS N° 1.157, del Ministerio de Fomento, de 1931 (D.O. del 16/09/31).*

*h) Fajas de 500 metros no edificables en torno a lagunas de estabilización, dentro del predio respectivo. Estas fajas deberán ser forestadas con árboles de hoja perenne, y deberán contar con cierros y dispositivos que impidan el libre acceso de personas y animales, en las condiciones que establezca el Servicio competente.*

*i) Terrenos en que se emplazan obras o instalaciones de infraestructura tales como husos de telecomunicaciones, duetos subterráneos, pozos de captación, plantas de filtros y estanques de agua potable, etc., con el objeto de asegurar su buen funcionamiento y proteger la salud de los habitantes. Las normas aplicables a cada uno de estos casos serán las dictadas por los Servicios competentes.*

*j) Lo normado en el artículo 56° de la Ley General de Urbanismo y Construcciones en las áreas rurales.*

*k) Resguardo de las infraestructuras energéticas de oleoductos, gasoductos, poliductos, según lo normado por el DS N° 90 de 1996, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, que aprobó el Reglamento de Seguridad para el Almacenamiento, Refinación, Transporte y Expendio al público de combustibles líquidos derivados del petróleo.*



Las áreas afectadas por las disposiciones de este artículo corresponden en general a “zonas no edificables” conforme al artículo 2.1.17 de la OGUC. Se exceptúa lo señalado en el numeral h) cuya fuente legal o reglamentaria no se identifica. Las “zonas no edificables” deben ser precisadas en los planes reguladores comunales conforme lo indica la DDU 227<sup>22</sup>

#### *Artículo 6.8*

*El Área de Protección del Satélite Borde Costero Sur del Plan Intercomunal de Valparaíso se divide en:*

*Sub Área de Protección del Recurso Natural*

*Sub Área de Protección del Patrimonio Cultural*

#### *Artículo 6.9*

*La Sub Área de Protección del Recurso Natural se conforma con las siguientes zonas que se grafican en el Plano PIV-SBCS-01, y para las cuales se establecen las disposiciones que se indican a continuación:*

*Zona de Protección Costera*

*Esta zona de protección corresponde a la superficie de tierra firme de ancho variable, que se determina gráficamente en el Plano PIV-SBCS-01, y que podrá ser precisada a través los Planes Reguladores Comunales y sus Seccionales.*

*En esta zona regirá lo dispuesto por los respectivos Planos Reguladores Comunales, en tanto no se contraponga con la presente Ordenanza. Con el objeto de asegurar el ecosistema de la zona costera y de prevenir y controlar su deterioro, como asimismo establecer las condiciones técnico urbanísticas para su desarrollo se distinguen las siguientes sub zonas con sus normativas específicas.*

*Sub Zona Borde Costero con Usos Consolidados. ZBC 1*

*Corresponde a los terrenos delimitados entre la línea de más baja marea y la línea trazada paralela a 80 metros desde la línea de más alta marea o vía pública que la limite. Corresponde a los siguientes tramos de Norte a Sur:*

---

<sup>22</sup>“En la Memoria Explicativa se debe dar cuenta de las zonas no edificables existentes en el territorio sujeto a planificación, individualizando las disposiciones del ordenamiento jurídico que las establece, a fin de que éstas se grafiquen en los Planos y sean reconocidas por la Ordenanza Local y destinadas a áreas verdes, vialidad o a los usos determinados por las disposiciones de los organismos competentes”.

- *Desde el estero San Jerónimo, hasta el Santuario de la Naturaleza Peñón Islote Peñablanca en la comuna de Algarrobo.*
- *Desde el estero El Batro al norte de la comuna de El Quisco hasta el estero El Totoral en Punta de Talca, en la comuna de El Quisco.*
- *Desde la bajada de La Tortuga en Isla Negra hasta el límite sur de Playa Blanca en la comuna de El Tabo.*
- *Desde el límite norte de la playa de Los Muertos en la comuna de El Tabo, hasta la quebrada de El Tabo, en la comuna de El Tabo.*
- *Desde el límite norte de Guaylandia en la comuna de El Tabo, hasta el estero El Canelo en Las Cruces, en la comuna de El Tabo.*
- *Desde el límite sur de Playa Blanca, hasta el límite norte de la playa Los Muertos en la comuna de El Tabo.*
- *Desde la quebrada El Tabo, hasta el límite norte de Guaylandia en la comuna de El Tabo.*
- *Desde el estero El Canelo en Las Cruces hasta el límite norte de la caleta Los Pescadores en Las Cruces en la comuna de El Tabo.*
- *Desde el límite norte de caleta Los Pescadores en Las Cruces, comuna de El Tabo hasta el estero Cartagena, en la comuna de Cartagena.*
- *Desde la calle Ignacio Carrera Pinto hasta la prolongación del eje central de la calle Las Toninas en la comuna de Cartagena.*
- *Desde la quebrada Agua Salada, hasta el sector norte de las canteras, en la comuna de San Antonio.*
- *Desde el límite sur del sector de las canteras, hasta el río Maipo en la comuna de San Antonio.*

#### *Uso Generalizado del Suelo:*

*En esta Sub Zona se permite el uso de Equipamiento con el emplazamiento de: balnearios, servicios gastronómicos afines al balneario, servicios de información turística, caletas de pescadores con instalaciones afines, Equipamiento Turístico Cultural sobre temas afines al borde-mar, establecimientos de Educación Superior en la especialidad del recurso marino, clubes de deportes náuticos, marinas, muelles e instalaciones portuarias y de la Defensa Nacional, playas, Áreas Verdes y Espacios Públicos.*

*Usos de Suelo Prohibidos: Todos los no indicados precedentemente.*

*Condiciones generales:*

*Los Planes Reguladores Comunales y sus Seccionales podrán restringir o potenciar a través de sus normativas los usos señalados precedentemente, los que deberán ser acordes con el entorno de la faja costera y contar con la previa evaluación e informe favorable de los Organismos pertinentes, que tienen tuición sobre el borde costero y la variable medio ambiental.*

*De acuerdo a lo dispuesto en el artículo 2.3.5 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, se deberá contemplar a lo largo de toda la Sub Zona una faja no edificable de 20 metros de ancho mínimo, medidos tierra adentro a partir de la línea de más alta marea, para ser destinada exclusivamente a la circulación peatonal.*

*Asimismo es aplicable en esta zona, lo establecido en la Orden Ministerial N° 1 de fecha 3 de enero de 1997 y modificada el 18 de octubre de 1999 por Orden Ministerial N° 48 del Ministerio de Defensa Nacional, Subsecretaría de Marina. También es aplicable en esta zona el art. 5 del DS N° 660, del Ministerio de Defensa Nacional (M), de fecha 14 de junio de 1988, que sustituye el Reglamento sobre Concesiones Marítimas.*

*Sub Zona Borde Costero de Protección por Valor Natural y Paisajístico. ZBC 2.*

*Corresponde a las fajas ribereñas, márgenes costeros rocosos naturales o artificiales, comprendido por la línea paralela a la línea de la más baja marea y paralela trazada a distancia de 80 metros o 100 metros de la línea de la más alta marea, según corresponda y/o hasta el actual trazado de una vía pública existente o con declaratoria pública, cuando el nivel antes citado supere dichas vías.*

*Esta Sub Zona se grafica en el Plano PIV- SBCS -01 y se caracteriza por ofrecer especiales condiciones paisajísticas naturales, de actual y potencial afluencia masiva de público; situación que requiere de una normativa de protección de sus atributos.*

*En mérito de lo cual será mantenida en estado natural, especialmente las dunas borderas, para asegurar y contribuir al equilibrio de calidad del medio ambiente, como asimismo preservar el patrimonio paisajístico. En esta Sub Zona no se permitirá ningún tipo de edificaciones.*

*En el borde costero del Satélite Borde Costero Sur se distingue el tramo desde el estero Casablanca hasta la Playa de Mirasol, en la comuna de Algarrobo.*

*Uso Generalizado del Suelo:*

*Áreas Verdes, Espacios Públicos incluyendo miradores, vialidad peatonal y vehicular.*

*Usos de Suelo Prohibidos:*

*Todos los no indicados precedentemente.*

*Sub Zona Borde Costero con Ocupación Potencial o en Proceso de Consolidación. ZBC3*

*Corresponde a los territorios del borde costero del Satélite Borde Costero Sur graficados en el Plano PIV-SBCS-01, distinguiéndose los siguientes tramos:*

- *Desde la playa de Mirasol hasta la desembocadura del estero San Jerónimo, en la comuna de Algarrobo.*
- *Desde el Peñón Islote Peñablanca hasta el estero El Batro en la comuna de El Quisco.*
- *Desde el estero El Totoral en Punta de Tralca, hasta la proyección del eje central de la bajada de La Tortuga en Isla Negra en la comuna de El Quisco.*
- *Desde el estero Cartagena, hasta la proyección del eje central de la calle Ignacio Carrera Pinto en la playa Grande de Cartagena en la comuna de Cartagena.*
- *Desde la calle Las Toninas en la comuna de Cartagena, hasta la quebrada de Agua Salada, en Pelancura, en la comuna de San Antonio.*
- *Desde el sector norte de las canteras, hasta el sector sur de las mismas, en la comuna de San Antonio.*

*Uso Generalizado del Suelo:*

*Equipamiento, permitiéndose el emplazamiento de balnearios; centros turísticos vacacionales; centros de esparcimiento y recreación, incluyendo actividades deportivas, gastronómicas y de hospedaje; centros de eventos y servicios de información turística; caletas de pescadores con instalaciones afines; clubes de deportes náuticos, incluyendo embarcaderos, ramblas y marinas; culturales sobre temas afines al borde-mar; instalaciones portuarias; Áreas Verdes y Espacios Públicos.*

*Usos de Suelo Prohibidos: Todos los no indicados precedentemente.*

*Condiciones generales:*

*Los Planes Reguladores Comunales y sus Seccionales podrán restringir o potenciar a través de sus normativas los usos señalados precedentemente, los que deberán ser acordes con el entorno de la faja costera y contar con la previa evaluación e informe favorable de los Organismos pertinentes, que tienen tuición sobre el borde costero y la variable medio ambiental.*

*De acuerdo a lo dispuesto en el artículo 2.3.5 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, se deberá contemplar a lo largo de toda la Sub Zona una faja no edificable de 20 metros de ancho mínimo, medidos tierra adentro a partir de la línea de más alta marea, para ser destinada exclusivamente a la circulación peatonal. Se deberá proteger y conservar las dunas borderas y no obstaculizar los corredores de deflación, generando una ocupación transversal y no a lo largo de la costa, conformando ventanas verdes.*

### *Zona de Protección Ecológica. ZPE.*

*Corresponde a aquellos territorios del Satélite Borde Costero Sur que cuentan con recursos de interés ecológico, paisajístico y de patrimonio arqueológico, de ecosistemas frágiles desde el punto de vista de la conservación de la flora y fauna silvestre con características propias del lugar, convenientes de mantener en su estado natural.*

*Esta zona se grafica en el plano PIV-SBCS-01, y corresponde por comunas a los siguientes lugares que se identifican con un código:*

#### *Algarrobo*

*ZPE 1: Islote de los Pájaros Niños; declarado Santuario de la Naturaleza por DS N° 622 (MINEDUC) de 29/06/78.*

*ZPE 2: Peñón - Islote de Peñablanca; declarado Santuario de la Naturaleza por DS N°772 (MINEDUC) de 18/03/82.*

#### *El Tabo*

*ZPE 3: Laguna El Peral, incluyendo una franja perimetral de 100 metros; Santuario de la Naturaleza declarado por DS N° 631 (MINEDUC) de 31/07/75.*

#### *Condiciones generales:*

*Los Planes Reguladores Comunales y sus Seccionales deberán precisar para cada Zona de Protección Ecológica, sus límites, usos de suelo y establecer normativas específicas, las que deberán ser acordes con el entorno natural para cada área y contar con la previa evaluación e informe favorable de los organismos pertinentes, que tienen tuición sobre cada área y la variable medio ambiental. Los criterios mínimos a considerar en la precisión de esta zona son los siguientes:*

- Características y régimen de los cursos y cuerpos de agua.*
- Característica y estado de conservación de la biodiversidad que contiene la zona protegida (ZPE).*
- Definición de protocolos mínimos para las zonas de amortiguación.*
- Identificación de variables de calidad y cantidad de los componentes naturales del área de interés (área a proteger y área de amortiguación).*
- Verificación de la existencia de especies protegidas, vulnerables, raras o insuficientemente conocidas.*
- Característica y estado de conservación de la biodiversidad que contiene la zona protegida (ZPE).*

- *Descripción de las principales funciones y relaciones ecológicas que se verifican en la zona protegida (relativos a la biota) para conservar la biodiversidad de la zona.*
- *Valorización de la calidad del paisaje y su contribución al valor ambiental de la comuna.*

*Zona de Protección por Cauces Naturales y Valor Paisajístico. ZPCP.*

*Corresponde a aquellos territorios del Satélite Borde Costero Sur que conforman cauces de esteros y quebradas, cuencas, hoyas hidrográficas, que requieren de la conservación de la flora y fauna silvestre propias del lugar, convenientes de mantener en su estado natural, así como áreas con pendientes sobre 80%, y áreas naturales de valor paisajístico. Se reconocen los siguientes, graficados en el Plano PIV-SBCS-01*

Las zonas señaladas corresponden a “Áreas de protección de recursos de valor natural” para el caso de los cauces, incluidos los terrenos de playa determinados conforme a la legislación vigente; se incluye en esta categoría además el bosque nativo protegido por la Ley de Bosques que protege las áreas de pendientes de 45% o mayores. Otras medidas de protección del “Valor Paisajístico” solo podrían establecerse mediante atribuciones legales específicas tales como Monumentos, Áreas de Preservación etc.

Adyacentes a cauces, según se determine en estudio de riesgos, pueden existir “Zonas inundables o potencialmente inundables” que pertenecen a las “Áreas de riesgo” y sobre las cuales se debe establecer las condiciones urbanísticas para su ocupación conforme a exigencias del artículo 2.1.17 de la OGUC; conforme al estudio de riesgos también puede identificarse “Zonas propensas a avalanchas” que también forman parte de las “Áreas de riesgo” en que se aplica lo señalado.

*Comuna de Algarrobo:*

- *Estero Casablanca*
- *Quebrada Medialuna*
- *Quebrada Pulgares*
- *Quebrada El Mondingo*
- *Estero Los Pitalles y Quebrada Grande*
- *Estero El Membrillo y su afluente Quebrada Las Raíces*
- *Estero San Jerónimo*

- *Quebrada El Yeco*
- *Quebrada San José*
- *Quebrada El Yugo*

*Comuna de El Quisco:*

- *Quebrada El Quisco*
- *Quebrada Las Petras*
- *Quebrada El Batro*
- *Quebrada Pinomar*
- *Quebrada Punta de Tralca*

*Comuna de El Tabo:*

- *Estero de Córdoba*
- *Estero La Cigüeña*
- *Estero El Ciruelo*
- *Estero El Membrillo*
- *Estero El Canelo*

*Comuna de Cartagena:*

- *Estero Cartagena*

*Comuna de San Antonio:*

- *Río Maipo*
- *Estero San Juan*
- *Estero El Sauce*
- *Estero Nanco*
- *Estero Leyda*

- *Estero Arévalo*
- *Estero Cuncumén*
- *Quebrada El Bajo*
- *Quebrada El Tranque*
- *Quebrada Cementerio*
- *Quebrada Chacrilla*

*Uso Generalizado del Suelo:*

*Forestación nativa o introducida, previa consulta a la Corporación Nacional Forestal; paseos públicos, libres de construcciones y Áreas Verdes.*

*Usos de suelo Prohibidos: Todos los no indicados precedentemente.*

*Condiciones generales:*

*Los Planes Reguladores Comunales y Seccionales podrán precisar sus límites como asimismo establecer condiciones específicas, las que deberán ser acordes con el entorno y contar con la previa evaluación e informe favorable de los Organismos pertinentes, que tienen tuición sobre el territorio y la variable medio ambiental. No obstante lo indicado, los cuerpos de agua deberán considerar al menos un área de protección 100 metros de ancho, medidos desde la cota máxima que alcance el nivel del cuerpo de agua que se protege.*

*Los planes y programas de manejo de estas zonas deberán ser autorizados por CONAF V Región.*

La Ley de Bosques, en los casos que exista bosque nativo, considera la protección de manantiales y cuerpos de agua naturales estableciendo una faja de 200 metros, en que se califica al bosque como de “conservación y protección”.

### **10.3 Alcances al contenido del Plan Regulador Comunal de San Antonio.**

Complementariamente a la consistencia entre Plan Regulador Comunal de San Antonio y su contexto legal y reglamentario, a que se refieren los comentarios que se emiten, es necesario destacar que el actual Plan Regulador de San Antonio se promulgó en un contexto en que no se encontraba vigente el Plan Intercomunal Satélite Borde Costero Sur que en la actualidad rige para la comuna. La promulgación del Plan de nivel Intercomunal indicado provoca cambios al Plan Regulador Comunal derogando tácita y automáticamente diversas regulaciones no concordantes



que pudieran haber sido concebidas como normas supletorias en el plan local y que corresponden al nivel del plan intercomunal. El análisis de consistencia entre estos dos instrumentos de planificación no se ha realizado en el presente estudio, dado que estimamos que escapa a los alcances del trabajo, sin embargo es claro que, por ejemplo, las normas para áreas de extensión urbana dispuestas por el Plan Comunal deben entre otras ser replanteadas por cuanto es una materia propia del nivel intercomunal.

A continuación se exponen las conclusiones derivadas del análisis del Plan Regulador de San Antonio realizado sobre el texto de la Ordenanza Local del Plan Regulador conforme a documento entregado por la contraparte municipal en formato digital no editable (extensión pdf).

En el ítem anexo se expone el análisis realizado mediante la inserción de cuadros de texto que contienen comentarios sobre inconsistencias entre el documento revisado, las normas y circulares en referencia.

Respecto del contenido general de dicha ordenanza se ha realizado una revisión no exhaustiva dado que no se destacan todos los aspectos que llaman la atención. Con mayor detenimiento se han revisado las materias correspondientes a “Áreas de Riesgo” en atención que corresponde a la materia específica del presente estudio. Se debe dejar constancia que los comentarios que se incluyen a continuación buscan analizar el contexto en se sitúa el plan vigente y en ningún caso cuestionan la vigencia de los documentos que forman parte del Plan en comentario.

### **Sobre el contenido en general**

En el Plan Regulador se puede destacar el esfuerzo por generar un “Código o Manual” para la Dirección de Obras lo que da cuenta de una carencia de un documento como el señalado que logre establecer la necesaria compatibilización entre los diversos cuerpos legales y normativos que afectan las acciones de construcción y de utilización del territorio en una comuna y cuya súper vigilancia es responsabilidad de la municipalidad y la Dirección de Obras.

El esfuerzo destacado hace que el Plan en comentario se extienda profusamente en reglamentaciones de materias que conforme a la normativa vigente no corresponden a materias propias de este instrumento generando un cuerpo reglamentario débil en cuanto a su respaldo legal y en cuanto a la vigencia de sus disposiciones.

El plan incorpora además la reglamentación de materias tratadas en la Ley General de Urbanismo y Construcciones cuya competencia no le es entregada por la ley como competencia al nivel comunal.

En el texto de sus diferentes artículos repite numerosas definiciones y disposiciones contenidas en cuerpos legales y reglamentarios de nivel superior al comunal, y que priman sobre las disposiciones dictadas en este nivel, que pueden ser modificadas dificultando en consecuencia la revisión acerca de la vigencia de las disposiciones locales.

Como consecuencia de lo expresado en los párrafos anteriores se considera de alta complejidad introducir cambios parciales en un cuerpo reglamentario que conforme a las pautas vigentes para su confección, presenta un sinnúmero de inconsistencias que puede observarse en los comentarios realizados al articulado.

### **Sobre el control de riesgos y medidas de mitigación.**

En lo relativo a la incorporación de normas urbanísticas orientadas al control de riesgos y medidas de mitigación se observa que existen disposiciones sobre la materia que se encuentran dispersas en diferentes artículos y que no se ajustan a las definiciones y atribuciones vigentes sobre la materia.

Conforme a la OGUC los resultados de los estudios de riesgo deben implementarse mediante regulaciones contenidas en el plan regulador, dichas regulaciones consisten en la fijación de normas urbanísticas aplicables a zonas específicas que deben identificarse en el territorio. Dichas zonas, de acuerdo a las definiciones aplicables consisten en “una porción del territorio” identificado en el instrumento de planificación de nivel intercomunal, cuya delimitación más precisa debe realizarla el Plan Regulador Comunal.

De lo expuesto cabe concluir que el Plan Regulador Comunal debe identificar los polígonos o porciones del territorio que corresponden a las diferentes zonas que forman parte de las “Áreas de Riesgo”.

En cuanto al establecimiento de regulaciones originadas con el propósito de controlar y mitigar riesgos originados por fenómenos de origen natural, la facultad encomendada a la Ley General de Urbanismo y Construcciones, su Ordenanza y sus instrumentos, se refiere a establecer condiciones para ocupar los territorios que presenten diferentes niveles de riesgo de acuerdo al estudio específico.

Las cuatro zonas que forman parte de las áreas de riesgo son específicas y se entiende que los instrumentos de planificación deben atenerse a dichas categorías sin corresponderle establecer diferentes denominaciones. De las cuatro categorías tres corresponden a riesgos originados por causas naturales y por lo tanto las regulaciones debieran ordenarse en torno a dichas categorías a saber, Zonas Inundables o Potencialmente Inundable, Zonas Propensas a Avalanchas, Rodados, Aluviones o Erosiones Acentuadas y Zonas con Peligro de ser Afectadas por Actividad Volcánica, Ríos de Lava o Fallas Geológicas.

Sin perjuicio que las normas se organizan en las categorías señaladas, el estudio puede extenderse sobre áreas o territorios que pudieran encontrarse regulados y/o protegidos por otros cuerpos legales tales como parques, monumentos naturales, playas, riberas, bosques, etc., aunque el Plan Regulador no tenga atribuciones para establecer regulaciones sobre dichas zonas.

Sobre el tratamiento dado a los riesgos comentamos por artículo lo siguiente:

En artículo 24. Se juntan y mezclan disposiciones que corresponden a “áreas de riesgo” con disposiciones para “zonas no edificables”. En letra b) se regulan “zonas de alto riesgo para los asentamientos humanos”, en el numeral 1 de esta letra se establece reglas para autorizar el movimiento de tierra en quebrada pronunciada, para ello en el numeral 2 se identifica zonas de quebradas en que no se permite edificaciones. Las quebradas pronunciadas quedan definidas por omisión en la letra d) del mismo artículo que fija una dimensión máxima de 25 metros medidos desde el eje de la quebrada y una pendiente de más de 20%, complementariamente en el numeral 3 de este artículo se establece que para pendientes que superen el 45% no rige la dimensión máxima.

En el numeral c) se identifica la existencia de zonas con riesgo de daño sísmico en los lugares indicados en el artículo 27 para las que establece exigencias a proyectos de más de 3 pisos, excluyendo a las edificaciones de menor altura (que conforme a la OGUC no deben realizar proyectos de cálculo estructural). En el artículo 27 no se indica nada con respecto a riesgos de daño sísmico.

En el artículo 25 letra c) mezcla diversas áreas “de riesgo”, “de restricción” y “áreas especiales”.

El artículo 26, concordante con el 25 establece zonas denominadas “de riesgo y restricción”, esta última denominación no reconocida por la OGUC conforme se señalara anteriormente.

En el artículo 27 en que se detalla las normas por zona se reglamenta lo siguiente:

Zona ZM – 4. Establece como uso de suelo “área verde” a la franja de terreno que colinda con quebradas pronunciadas, que tenga pendiente de un 20% o mayor y con una extensión de hasta 40 metros medidos desde el borde de la quebrada. La disposición indicada es altamente controvertible dado que no prohíbe el resto de los usos de suelo permitidos en la zona y establece dimensiones y modo de medición distinto al criterio empleado en el artículo 24.

Zona ZP – 1. Establece una faja de 80 y 150 metros medidos desde la línea de playa. La definición de la extensión del área es confusa, las normas que detalla no se entiende como se aplican en bienes nacionales de usos público que serían los únicos que caben en las definiciones entregadas dado que éstas excluyen los predios privados que colinden con el Océano Pacífico.

Zona ZP – 2. Sus disposiciones mezclan territorios que conforme a la OGUC pertenecen a “áreas de protección de recursos de valor natural” establecidas por la ley de bosques, conforme indica la ordenanza local, con terrenos que son “cauces” conforme a la legislación correspondiente, y establece normas para ocupar suelos que conforme a la definición de cauces pueden ser identificados como “playa de río”. En todo caso todas las materias tratadas pertenecen a regulaciones establecidas por leyes diferentes a la Ley General de Urbanismo y Construcciones.

Zona ZE – 4. Incorpora una denominada “zona de restricción” que podría corresponder a una “zona propensa a avalanchas, rodados, aluviones, o erosiones acentuadas” conforme a la OGUC la

que afecta terrenos con pendientes mayores a los 45° (100%). Además exige una serie de estudios a los interesados en desarrollar proyectos en terrenos de más de 2 hectáreas, sin que dichos territorios sean zonificados como áreas de riesgo, los que corresponden a materias que deben ser desarrolladas en una evaluación ambiental, en estudios de impacto vial, estudios de riesgos de inundación, entre otros. Identifica un área de “riesgo eventual de anegación” que podría corresponder a terrenos que la OGUC caracteriza como “zonas inundables o potencialmente inundables” en que se hace la exigencia técnica de edificar sobre pilotes, al margen de tener que cumplir con la exigencia de estudio de riesgo establecida por la OGUC en estos casos.

## 11 BIBLIOGRAFÍA

- Bedient, P. B., and Huber, W. C. 2002. *Hydrology and floodplain analysis, 3rd Ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, EE.UU.*
- Carrión, B., Almar, R., Cienfuegos, R., Burgos, L. & Catalán, P. (2010). *Modelo numérico de la propagación del tsunami del 27 de febrero de 2010: Análisis preliminar del comportamiento hidrodinámico del evento.* Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, 25(1), 7-20. ISSN 0716-3746.
- Catalán, P.A., Cienfuegos, R., Winckler, P., Contreras, M., Almar, R., Domínguez, J.C., Fritz, H.M., Petroff, C.M., Kalligeris, N., Weiss, R., Ebeling, C., Papdopoulos, T., Barrientos, S.E., Synolakis, C. (2010). *Observations by the international tsunamy survey team. Regions VII-VI and V of Chile.* American Geophysical Union Chapman Conference on Giant Earthquakes and Their Tsunamis, Viña del Mar, Chile.
- Chow, V. T. 1988. *Hidráulica de Canales Abiertos. McGraw-Hill, Bogotá, Colombia.*
- Chow, V. T, Maidment, D. R. y Mays, L. W. 1988. *Hidrología Aplicada, McGraw-Hill, Bogotá, Colombia.*
- Cienfuegos, R., Barthelemy, E., & Bonneton, P. (2007). *A fourth order compact finite volume scheme for fully nonlinear and weakly dispersive Boussinesq-type equations - Part II : Boundary Conditions and validation.* Int. J. Num. Meth. Fluids, 53, 1423-1455.
- Cienfuegos, R., Carrión, B., Almar, R. & Catalán, P. (2011). *Numerical modeling and preliminary analysis of the hydrodynamic characteristics of the february 27th, 2010 Tsunami.* 7th International Workshop on Coastal Disaster Prevention organized by the Port and Research Institute. Tokio, Japan, January 2011.
- CIREN. 2007. *Curvas de nivel, equidistancia 10m.*
- CIREN. 1997. *Estudio Agrológico. Descripción de suelos. Materiales y símbolos. Región de Valparaíso.*
- CIREN. 2007. *Curvas de nivel, equidistancia 10 mt. Centro de Información de Recursos Naturales.*
- Comte, D., Eisenberg, A., Lorca, E., Pardo, M., Ponce, L., Saragoni, R., Sing, S. & Suarez, G. (1986). *The great 1985 Central Chile earthquake: A repeat of previous great earthquakes in the region?.* Science, 233: 449-453.

- Delouis, B., Nocquet, J. & Vallée, M. (2010). *Slip distribution of the February 27, 2010 Mw = 8.8 Maule Earthquake, central Chile, from static and high-rate GPS, InSAR, and broadband teleseismic data*. Geophysical research letters, 37, L17305.
- DOH (Dirección de Obras Hidráulicas MOP). (2003). *Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias, San Antonio y Cartagena, V Región*.
- Fritz, H., Petroff, C., Catalán, P., Cienfuegos, R., Winckler, P., Kalligeris, N., Weiss, R., Barrientos, S., Meneses, G., Valderas-Bermejo, C., Ebeling, K., Papadopoulos, A., Contreras, M., Almar, R., Domínguez, J. & Synolakis, C. (2011). *Field Survey of the 27 February 2010 Chile Tsunami*. Pure and Applied Geophysics. DOI:10.1007/s00024-011-0283-5.
- Gallouet, T., Herard, J.-M., & Seguin, N. (2003b). *Some approximate Godunov scheme to compute shallow-water equations with topography*. Computers and Fluids, 32, 479-513.
- Guerra, M. (2010). *Numerical and experimental modeling of extreme flood waves and inundation zones*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica.
- Guerra, M., Cienfuegos, R., Escauriaza, C., Rosas, E. (2010a). *Modelación Numérica 2D de Crecidad Extremas y Zonas de Inundación en Coordenadas Curvilíneas Generalizadas*. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica IAHR, Punta del Este, Uruguay.
- González C. 2005. *Estudio de áreas de riesgo geomorfológico de la zona urbana y de expansión de la comuna de San Antonio, V región. Memoria para optar al título de Geógrafo*. Universidad de Chile
- Hauser, A. 1985. Flujos de barro en la zona preandina de la Región Metropolitana: características, causas, efectos, riesgos y medidas preventivas. Revista Geológica de Chile 24, 75–92.
- Hauser, A. 1993. Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín Nº 45.
- Fawcett T. J, Bates P. D., Horritt M., Hunter N.M. 2008. *Evaluating the effect of scale in flood inundation modelling in urban environments*. Hydrological Processes. 22, 5107-5118.
- Kelleher, J. (1972). Rupture Zones of Large South American Earthquakes and Some Predictions. Journal of Geophysical Research, Vol. 77. No. 11.
- IMSA (Ilustre Municipalidad de San Antonio). (2010). *Efectos de la ola sísmica o tsunami en la laguna Lolleo* [Online]. Disponible en: [http://www.sanantonio.cl/attachments/1402\\_Efectos%20de%20la%20ola%20s%C3%ADsmica%20o%20tsunami%20en%20la%20laguna%20Lolleo.pdf](http://www.sanantonio.cl/attachments/1402_Efectos%20de%20la%20ola%20s%C3%ADsmica%20o%20tsunami%20en%20la%20laguna%20Lolleo.pdf)

- IMSA (Ilustre Municipalidad de San Antonio). (2006). *Plan Regulador Comuna de San Antonio* [Online]. Disponible en: [http://www.sanantonio.cl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=237&Itemid=214](http://www.sanantonio.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=237&Itemid=214)
- IMSA (Ilustre Municipalidad de San Antonio). 2008. *PLADECO San Antonio 2008-2013*
- Kausel, E. (1986). "Proceso Sísmico, Parámetros Focales y Réplicas del Sismo del 3 de Marzo de 1985". Capítulo N°2 de: *El Sismo del 3 de Marzo de 1985-Chile*; Monje J. Acero Comercial, Santiago 1986.
- Kotani, M., Imamura, F. & Shuto, N. (1998). *Tsunami run-up simulation and damage estimation by using geographical information system*. Proceedings Coastal Engineering , JSCE, 45, 365-360.
- Lay, T. et al. (2010). *Teleseismic inversion for rupture process of the 27 February 2010 Chile (Mw 8.8) earthquake*. Geophysical Research Letters, Vol. 37, L13301
- Lazcano, A., Retamal, E., Urbina, L., Espinoza, X. y Contreras, M. (2010). *Identificación de factores relevantes para un diagnóstico ambiental post Tsunami Chile 2010 en el sector costero de Playa Lolleo (33°36'24"S; 71°37'23"W)*. XXX Congreso de Ciencias del Mar, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Octubre 2010.
- Liang, Q., & Marche, F. (2009). *Numerical resolution of well-balanced shallow water equations with complex source terms*. Advances in Water Resources, 32, 873-884.
- Mader, C.L. (2004). *Numerical Modeling of Water Waves*. Segunda Edición CRC Press
- Mansinha, L. y Smylie, D.E. (1971). *The displacement field of inclined faults*. Bulletin Seismological Society of America.
- Maksimovic C., Prodanovic D., Boonya-Aroonnet S., Leitao J. P., Djordjevic S., Allitt R. 2009. *Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding*. *Journal of Hydraulic Research* Vol. 47 N°4, pp.512-523
- Marche, F. (2007). *Derivation of a new two-dimensional viscous shallow water model with varying topography, bottomfriction and capillary effects*. European Journal of Mechanics B/Fluids, 26, 49-63.
- Mignot, E., & Cienfuegos, R. (2009). *On the application of a Boussinesq model to river flows including shocks*. Coastal Engineering, 56, 23-31.
- MINVU y DICTUC. (1996). *Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos : guía de diseño*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Chile.

- MINVU y GC GEOTÉCNICA CONSULTORES (1987). *Análisis de Microzonificación Sísmica de San Antonio*.
- Nishenko S. (1985). Seismic potential for large and great interpolate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of South America: A quantitative reappraisal. *Journal of geophysical Research*, Vol. 90, No. B5. Pp 3589-3615.
- NGDC. (2011). *Tsunami Event Database. Colorado, USA. National Geophysical Data Center [online]*. Disponible en: <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/hazard/tsu.html> [Ingreso en enero y febrero de 2011]
- Okada, Y. (1985). *Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space*. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 75 (4), 1135-1154.
- PRDW-AV. (2011). *Estudio de la Propagación Regional de Tsunamis basados en el Evento de 1730*.
- Rawls, W.J., J.R. Ahuja y D.L. Brakensiek. 1992. Estimating soil hydraulic properties from soils data. *Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, Riverside, CA, Proceedings* p. 329-341.
- Rossman, L. A. 2009. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0, EPA/600/R-05/040, U.S. Environmental Protection Agency, Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Oh*.
- Sait-Venant, A. (1871). *Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit*. *C.R.Acad.Sc.Paris*, 73: 147-154
- Sanders, B. (2002). *Non-reflecting boundary flux function for finite volume shallow-water models*. *Advances in Water Resources*, Vol 25: 195-202
- Sepúlveda, S. y Padilla, C. 2008. Rain-induced debris and mudflow triggering factors assessment in the Santiago cordilleran foothills, Central Chile. *Natural Hazards*, Vol. 47: 201-215.
- Schubert J. Sanders B., Smith M., Wright N. 2008. *Unstructured mesh generation and landcover-based resistance for hydrodynamic modeling of urban flooding*. *Advanced in Water Resources* 31, 1603-1621
- SHOA. N.D. *Tsunamis Registrados en la Costa de Chile [Online]*. Disponible en: [http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/data/tsunamis\\_historico.pdf](http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/data/tsunamis_historico.pdf) [Ingreso el enero de 2011]



- SHOA. (2000a). *Carta de Inundación por Tsunami para Puerto San Antonio y Rada el Algarrobo, Chile. Documento Explicativo.*
- SHOA. (2000b). *Carta Inundación por Tsunami San Antonio [online]*. Disponible en: <http://www.shoa.cl>
- SHOA. 2011. *Certificado y monografía de cota de marea, San Antonio.*
- Shuto, N. (1995). *TIME Proyect-Manual of Numerical Simulations of Tsunamis.*
- SERNAGEOMIN (Servicio nacional e geología y minería). 2010. *Efectos geológicos del sismo del 27 de febreros de 2010: San Antonio y Lolleo, V Región.* (INF-O'Higgins-01)
- Terlien, M. 1998. The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. *Environmental Geology*, Vol. 35: 124-130.
- USGS. (2010). *Magnitude 8.8 - OFFSHORE MAULE, CHILE [Online]*. Disponible en: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes/us2010tfan.php>
- Winckler, P. & Contreras, M. (2010). *Estimación Preliminar de la Zona de Inundación del Tsunami del 27/02/2010 en la Localidad de Lolleo (33°36'22"S; 71°37'31"W)*. Reporte Universidad de Valparaíso y Universidad de Playa Ancha.