



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL TSUNAMI
DEL 27 DE FEBRERO DE 2010
EN EL PUEBLO DE DICHATO, COMUNA DE TOMÉ,
REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
MARÍA JOSÉ MEJÍAS MAC-LEAN

TUTOR PRINCIPAL
M. EN C. JOSÉ ANTONIO QUINTERO PÉREZ
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

MÉXICO, D. F. JUNIO, 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la gran experiencia de participar en el Posgrado en Geografía. Así como al Instituto de Geografía, en especial al Laboratorio de Análisis Geoespacial por haberme acogido estos años.

El presente trabajo fue posible gracias a la beca de maestría otorgada por CONACYT. También, contó con el apoyo del proyecto FONDECYT N° 11090210 “Zonificación del riesgo de tsunamis en el centro sur de Chile: uso combinado de modelación, evidencias geológicas e historia”.

Agradezco sinceramente al M. en C. José Antonio Quintero por haber sido mi asesor y haberme guiado y acompañado en este proceso. Gracias por la amistad, los consejos, la confianza y el apoyo.

Al Dr. Marcelo Lagos, agradezco de todo corazón por darme a conocer el mundo de los riesgos y los tsunamis. También por haber sido co-tutor de este trabajo. Gracias por los consejos, el tiempo y la amistad.

A los integrantes de mi sínodo, Dr. Jorge Prado, M. en G. Ana Rosales y Dra. María Teresa Ramírez por sus valiosos comentarios.

Al Dr. Cristian Henríquez de Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile, por facilitarme la información censal necesaria para realizar mi trabajo.

A los profesores de la Maestría en Geografía por los conocimientos entregados, que han sido un valioso aporte para mi vida profesional.

A mis compañeros de la orientación Geografía Ambiental, en especial a Adolfo Quesada, por acompañarme en este arduo camino y ser un gran amigo.

A mi familia, en especial a mis papás por su apoyo incondicional y por confiar en mis decisiones, sin ustedes nada de esto habría sido posible.

A mi amiga Violeta Rangel por compartir el gusto por los tsunamis y por ser mi cómplice en los sueños profesionales y personales. También a su familia por el apoyo y el cariño.

A todos mis amigos chilenos en México que han sido mi familia en este país, y que han hecho que estar tan lejos sea un poco más fácil.

A mis amigos en Chile, por el cariño a pesar de la distancia. En especial a los de siempre Denisse Contreras, Magdalena Reyes, Loreto Varas, Carmen Miranda, Loreto Pérez y Héctor Millar, simplemente por estar ahí.

A Arturo Figueroa, por haberme acompañado en este proceso, y por toda la paciencia y el apoyo.

Y muy especialmente a mi gran amigo y geógrafo Felipe Herrera (QEPD) por permitirme compartir su gran amor por la geografía y cuya memoria me alentó a continuar aun en los momentos más difíciles.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
<hr/>	
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	4
1.3. Planteamiento del problema	6
1.4. Objetivos e hipótesis	8
 CAPÍTULO II : MARCO CONCEPTUAL	 9
<hr/>	
2.1. Amenaza, vulnerabilidad y riesgo	9
2.2. Los sismos	12
2.2.1. Sismicidad en Chile	13
2.2.2. Calma sísmica Constitución – Concepción	15
2.3. Tsunamis	17
2.3.1. Fases de un tsunami	18
2.3.2. Intensidad de un tsunami	22
2.3.3. Parámetros físicos de un tsunami	24
2.3.4. Tipología de tsunamis según su lugar de origen	25
2.3.5. Daños causados por los tsunamis	25
2.3.6. Tsunamis en Chile	27
 CAPÍTULO III: FUNDAMENTOS TÉCNICO-METODOLÓGICOS	 30
<hr/>	
3.1. Percepción Remota	30
3.1.1. Imágenes de alta resolución	31
3.1.1.1. QuickBird	31
3.1.1.2. World View 2	32
3.1.2. Uso de la Percepción Remota y los SIG en la evaluación de desastres	34
3.2. Evaluación Multicriterio	34

<hr/>	
CAPÍTULO IV: ÁREA DE ESTUDIO	37
<hr/>	
4.1. Población	37
4.2. Vivienda	39
4.3. Infraestructura	40
4.4. Economía	40
4.5. Morfología costera	41
4.6. Caracterización del terremoto y tsunami del 27 de febrero de 2010 .	46
4.6.1. Características del sismo generador	46
4.6.2. Características del tsunami	47
CAPÍTULO V: MATERIALES Y MÉTODOS	49
<hr/>	
5.1. Factores que condicionan el riesgo del pueblo de Dichato frente a la amenaza de tsunami	49
5.1.1. La amenaza de tsunami	49
5.1.2. Susceptibilidad física frente a un tsunami	54
5.2. Zonificación de áreas de riesgo de tsunami	62
5.3. Determinación del impacto del tsunami en el área de estudio	66
5.4. Comparación del resultado de la zonificación de áreas de riesgo de tsunami con el impacto determinado para el área de estudio	67
5.4.1. Comparación estadística	67
5.4.2. Comparación visual	69
CAPÍTULO VI: RESULTADOS	70
<hr/>	
6.1. Factores que condicionan el riesgo del pueblo de Dichato frente a la amenaza de tsunami	70
6.1.1. La amenaza de tsunami	70
6.1.2. Susceptibilidad física frente a un tsunami	74
6.2. Zonificación de áreas de riesgo de tsunami	81
6.2.1. Amenaza de tsunami diferenciada	81
6.2.2. Exposición	82
6.2.3. Susceptibilidad de las viviendas	85
6.2.4. Susceptibilidad física	85
6.2.5. Riesgo de tsunami	88
6.3. Impacto del tsunami en el área de estudio	90
<hr/>	

6.3.1. Dichato antes del 27/02/2010	90
6.3.2. Dichato después del 27/02/2010	91
6.4. Comparación del resultado de la zonificación de áreas de riesgo de tsunami con el impacto determinado para el área de estudio	93
6.4.1. Comparación estadística	93
6.4.2. Comparación visual	109
CAPÍTULO VII: DISCUSIÓN	111
7.1. Zonificación de áreas de riesgo de tsunami	111
7.2. Impacto del tsunami en el área de estudio	115
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
8.1. Conclusiones	118
8.2. Recomendaciones	120
BIBLIOGRAFÍA	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Grados de intensidad de un tsunami según Papadoupoulos e Imamura	22
Tabla 2: Escala de Comparación Continua	63
Tabla 3: Matriz de Comparación por Pares	64
Tabla 4: Clases de comparación de resultados	69
Tabla 5: Profundidad de Inundación Observada y Modelada	71
Tabla 6: Estadísticas descriptivas para la variable dependiente	94
Tabla 7: Estadísticas descriptivas para las variables independientes	97
Tabla 8: Coeficiente de determinación	101
Tabla 9: Coeficientes de correlación de Pearson	103
Tabla 10: Regresión	108
Tabla 11: Análisis de varianza ANOVA	109
Tabla 12: Resultados comparación visual	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Áreas de ruptura de grandes terremotos en Chile	15
Figura 2: Fases de un tsunami	21
Figura 3: Parámetros de un tsunami	24
Figura 4: Respuesta Espectral Imágenes QuickBird	32
Figura 5: Respuesta Espectral Imágenes WorldView 2	33
Figura 6: Vista de Dichato desde Caleta del Medio	39
Figura 7: Caleta de pescadores en Dichato	41
Figura 8: Perfil A-A', perpendicular al eje de la bahía	43
Figura 9: Perfil B-B', perpendicular al eje de la bahía	44
Figura 10: Perfil C-C', perpendicular al estero	44
Figura 11: Perfil D-D', paralelo al estero Dichato	45
Figura 12: Perfil E-E', paralelo al eje de la bahía	46
Figura 13: Zona de Ruptura del Terremoto del 27/02/2010	47
Figura 14: Función para la velocidad de la corriente de un tsunami	52
Figura 15: Función para la profundidad de inundación de un tsunami	53
Figura 16: Función para la fuerza hidrodinámica de la corriente de un tsunami .	53
Figura 17: Función para la altitud	56
Figura 18: Función para la pendiente	57
Figura 19: Función para la distancia a la costa	57
Figura 20: Función para la distancia al estero Dichato	58
Figura 21: Función para la densidad de viviendas por manzana	59
Figura 22: Función para el porcentaje de viviendas precarias	59
Figura 23: Función para el porcentaje de viviendas con materiales poco resistentes	60
Figura 24: Estructura de concreto que resistió el impacto del tsunami en Dichato	61
Figura 25: Grado de daño según tipo de vivienda y profundidad de inundación .	62
Figura 26: Esquema metodológico zonificación de riesgo de tsunami	65
Figura 27: Imágenes satelitales antes y después del tsunami	91
Figura 28: Histograma porcentaje de pérdida	96
Figura 29: Histograma amenaza de tsunami diferenciada	98
Figura 30: Histograma susceptibilidad de las viviendas	99
Figura 31: Histograma exposición	100
Figura 32: Gráfico de regresión, porcentaje de pérdida y amenaza de tsunami diferenciada	104

Figura 33: Gráfico de regresión, porcentaje de pérdida y susceptibilidad de las viviendas	105
Figura 34: Gráfico de regresión, porcentaje de pérdida y exposición	106

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1: Área de estudio	38
Mapa 2: Perfiles topográficos y batimétricos	42
Mapa 3: Áreas homogéneas	50
Mapa 4: Profundidad de inundación	72
Mapa 5: Velocidad de la corriente	73
Mapa 6: Fuerza hidrodinámica de la corriente	74
Mapa 7: Distancia a la costa	75
Mapa 8: Distancia al estero Dichato	76
Mapa 9: Pendiente del terreno	77
Mapa 10: Altitud	78
Mapa 11: Densidad de viviendas por manzana	79
Mapa 12: Porcentaje de viviendas precarias	80
Mapa 13: Porcentaje de viviendas con materiales poco resistentes	81
Mapa 14: Amenaza de tsunami diferenciada	83
Mapa 15: Exposición	84
Mapa 16: Susceptibilidad de las viviendas	86
Mapa 17: Susceptibilidad física	87
Mapa 18: Riesgo de Tsunami	89
Mapa 19: Superficie construida por manzana	90
Mapa 20: Porcentaje destruido por manzana	92
Mapa 21: Clases de comparación de resultados	110

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

A través de los años hemos presenciado cómo nuestro planeta ha sido afectado por diversos eventos naturales extremos, como son las erupciones volcánicas, terremotos, tsunamis, huracanes, etc. Estos eventos son manifestaciones naturales del dinamismo de nuestro planeta, sin embargo, muchas veces alcanzan magnitudes que resultan perjudiciales para la sociedad, además son difíciles de predecir, y en consecuencia, es difícil estar preparados para enfrentarlos.

Chile se encuentra en el borde occidental del continente sudamericano, dentro de la cuenca del Pacífico, por lo que forma parte importante del llamado “Círculo de Fuego del Pacífico” que es una de las regiones tectónicas más activas de la Tierra. Se encuentra en una zona de subducción, donde la placa de Nazca penetra por debajo de la placa Continental Sudamericana. Esta ubicación geográfica hace que Chile sea uno de los países más afectados por terremotos y tsunamis. De acuerdo a los registros instrumentales del s. XX, en promedio se produce un terremoto destructivo, de magnitud de momento (M_w) superior a 8, cada 10 años en algún lugar del territorio (Lomnitz, 1970).

No obstante, esta sismicidad no está repartida de manera uniforme a lo largo del territorio. Los grandes terremotos chilenos se originan en un número limitado de zonas epicentrales, concentradas y orientadas en una línea frente a la costa, cuyos efectos han dañado a diversos asentamientos urbanos, los cuales han sido afectados al menos cinco veces desde el comienzo de su historia, dada su localización en el interior o cerca de las áreas de ruptura (Lomnitz, 1970).

Chile registró en 1960 un terremoto de 9,5 grados de magnitud, acompañado de un gran maremoto, que se ha constituido en el sismo de mayor violencia jamás registrado sobre el planeta (Lagos y Cisternas, 2008; Romero *et al*, 2011).

Desde comienzos de 1970 varios segmentos a lo largo de la costa fueron designados por sismólogos como probables sitios de un futuro gran terremoto (Lomnitz, 1970; Nishenko, 1985). Estas regiones presentaban una relativa calma sísmica, ya que a pesar de tener una extensa historia de sismos, desde las últimas décadas (30 años o más) habían presentado una disminución de la ocurrencia de sismos mayores (Madariaga, 1998).

En 1998, Madariaga identificó a dos sitios de Chile como zonas de calma sísmica, la laguna sísmica del Norte de Chile, entre los 18°S y 23°S y la del Centro-Sur, entre los 35°S y 37°S, en la cual el último terremoto de subducción había ocurrido en 1835 (Campos *et al*, 2002). Esta zona se presentaba como la más antigua del país y por lo tanto, como una zona potencialmente peligrosa, dada la progresiva acumulación de energía, que se traducía en una mayor probabilidad de ruptura en un futuro cercano (Sauter, 1989).

Esta probabilidad se transformó en realidad la madrugada del 27 de febrero de 2010, cuando tuvo lugar un terremoto tsunamigénico, que afectó principalmente las costas del Centro-Sur de Chile, alcanzando una magnitud Mw. 8.8, cuyo epicentro se localizó frente a la costa de la Región del Maule (35.93°S – 72.78°W), a una profundidad de 35 km. Dichato se encuentra aproximadamente a 80 km al SSW del epicentro.

El terremoto y el tsunami cobraron cerca de 521 víctimas y 46 desaparecidos, según el Ministerio del Interior (Nahuelpán y Varas, 2010). Las olas impactaron principalmente a las pequeñas comunidades costeras ubicadas en la zona de ruptura (Lagos *et al*, 2010).

Un equipo de investigadores trabajó en la zona afectada una semana después del gran desastre, en respuesta a la UNESCO-ITST (International Tsunami Survey Team). Recorrieron aproximadamente 400 km a lo largo de la costa, entre Lillole (33.6° S) y la Bahía de Concepción (36.7° S). Principalmente midieron la altura de ola del tsunami y trazaron los perfiles topográficos de la zona de inundación. La

evidencia del efecto del tsunami en la costa se ha registrado usando las marcas que dejó en casas, edificios y árboles, como indicadores del nivel del agua. Las alturas máximas del tsunami se registraron en acantilados costeros, llegando a más de 19 metros, sin embargo, el mayor impacto se produjo en pequeñas bahías y desembocaduras de ríos, donde se produjo la destrucción total de las modestas viviendas (Lagos *et al*, 2010).

El reconocimiento del área posterior al tsunami concuerda con estudios previos que indican el importante papel de la morfología costera en el *runup* alcanzado (máxima distancia vertical) y en las alturas de ola. Se encontraron diferencias entre acantilados, playas abiertas, bahías confinadas, estuarios y valles, siendo los acantilados los menos afectados por la acción del tsunami. También resaltaron la importancia de dunas, estructuras hechas por el hombre y bosques, ya que mostraron tener un rol importante en la protección frente al tsunami (Ramírez *et al*, 2010).

1.2. JUSTIFICACIÓN

Existen diferentes medidas para proteger a la sociedad y su infraestructura frente a las amenazas naturales. Si bien no es posible evitar estos fenómenos que tanto afectan a la sociedad, sí podemos planificar las áreas costeras a fin de minimizar los daños que producen en los asentamientos humanos.

Entre las medidas de protección que se pueden implementar con este fin, existen las estructurales (muros, rompeolas, bosques de mitigación, parques inundables, disminuir la densidad de habitantes del borde, prohibir los usos residenciales, etc.), y las no estructurales (señaléticas, simulacros, educación de la comunidad, evacuación a zonas seguras, etc.) Estas medidas deben realizarse en forma combinada, pero además, cualquier implementación debe partir por conocer el medio físico y biológico que sustenta las actividades humanas del área a intervenir y los cambios que se producen en ésta, ya que cada lugar presenta condiciones específicas que determinan como es influido por un evento en particular, definiendo por ende, su vulnerabilidad (Quintero, 2012).

Es por esto, que es necesario conocer el impacto que tuvo el reciente tsunami en el pueblo de Dichato a escala local: ¿cuáles fueron los factores que se conjugaron para que el área fuera tan afectada?

Una de las tareas de la geografía consiste en aprender y enseñar las lecciones que resultan de estos desastres así como identificar responsabilidades que eviten su repetición. La ocurrencia de estos fenómenos plantea una oportunidad para conocer más sobre ellos, con el fin de intervenir la vulnerabilidad y reducir los daños futuros, así como también se busca aprender tanto como se pueda y recolectar la información necesaria para validar los modelos que se han desarrollado, ya que la historia indica que los tsunamis son eventos recurrentes, y los asentamientos que han sido inundados en el pasado volverán a ser inundados.

La reconstrucción de pueblos y ciudades obliga a un cuidadoso análisis y evaluación de las áreas que se han visto severamente dañadas por el terremoto y tsunami y en las cuáles sería recomendable no volver a instalar viviendas o servicios que congreguen público. Se trata de una oportunidad para refundar ciudades antiguas o las partes de ellas que están mal ubicadas, o generar nuevos asentamientos que sean mejores que los anteriores y que no sólo reduzcan los riesgos naturales sino que también sean modelos de sustentabilidad (Romero *et al*, 2011).

Con este fin, en este trabajo se aplica una zonificación de riesgo de tsunami, basada en el trabajo de Lagos (2012), “Zonificación del riesgo de tsunami en el centro-sur de Chile”, la cual representa un escenario pre-tsunami. Paralelamente, se estima el daño que se produjo en las viviendas del pueblo de Dichato, con el fin de validar estadísticamente el resultado de la zonificación con el impacto real que tuvo el tsunami en el área, identificando las variables que permitan explicar el riesgo y que puedan ser aplicadas en futuras zonificaciones.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El tsunami que se produjo luego del terremoto del 27 de febrero de 2010 tuvo alturas de ola excepcionales (siete u ocho metros en promedio), y solamente cobró la vida de 156 personas y 25 desaparecidos (Emol, 2011). Esto evidencia que la población sí está preparada para enfrentar un evento como éste. El problema es que como país, hace falta ocuparse de tener comunidades costeras preparadas, no sólo en cuanto a educación y alerta temprana, sino también que sean menos vulnerables y así evitar grandes pérdidas. No se trata de no poblar el borde costero, se trata de planificar su ocupación. Debiera ser prioritario que los estudios de riesgo, principalmente las microzonificaciones, sean incorporados en la planificación territorial de manera efectiva, para disminuir las consecuencias negativas que provocan estos fenómenos.

Particularmente, Dichato se encuentra en la Bahía Coliumo que es muy confinada, lo que hace que las ondas se amplifiquen y sean más grandes de lo común. Es por esto que está altamente expuesta frente a los tsunamis, ya que no sólo es afectada por tsunamis de campo cercano, sino que también de campo lejano, como ocurrió con el tsunami de Japón el 11 de marzo de 2011, donde se registraron alturas de casi 5 metros (Lagos y Haro, 2011).

Aunque es muy poco probable que el segmento que rompió el 27 de febrero de 2010 genere un sismo de magnitud similar en el corto plazo, sí es probable que Chile tenga terremotos generadores de tsunami en otros segmentos de la costa, en la zona norte o central del país. Del mismo modo, es necesario considerar que toda la cuenca del Pacífico es susceptible a la generación de grandes terremotos y tsunamis, los cuales también pueden llegar a las costas de Dichato, como ocurrió con el tsunami japonés de 2011.

En Chile se han utilizado diversos métodos para la delimitación de áreas de inundación por tsunami, las cuales han sido la base para estudios de riesgo que caracterizan la vulnerabilidad y el grado de exposición de la población y de la

infraestructura en localidades específicas, sin embargo, hasta ahora, gran parte de de estos estudios presentan dos grandes problemas: I. debilidades en la selección y validación del escenario de inundación, situación que añade relatividad al umbral entre la seguridad y el riesgo; y II. las áreas de inundación definidas no permiten identificar el comportamiento diferenciado del proceso de inundación, sino que se asume que toda el área delimitada se encuentra bajo riesgo de forma homogénea, situación que ha dificultado su real utilización como instrumento de apoyo al ordenamiento de asentamientos costeros (Lagos, 2009).

Lagos (2009), propone en su Metodología Optimizada para la Zonificación de Áreas de Riesgo de Tsunami (MOZART), que un primer paso para comprender el proceso diferenciado de inundaciones generadas por tsunami, sería caracterizar espacial y temporalmente parámetros hidrodinámicos de la inundación, a modo de identificar las máximas variaciones de la peligrosidad de la amenaza al interior del área inundada. Esta información, complementada con aspectos físicos de la vulnerabilidad, que condicionan el “dónde se es vulnerable”, permitiría precisar la identificación de “quiénes son vulnerables” y por lo tanto, optimizar la discriminación del riesgo.

Siguiendo con este planteamiento, se busca conocer la amenaza de tsunami diferenciada dentro del área de estudio, complementada con la susceptibilidad física que fue caracterizada mediante los criterios de exposición y susceptibilidad de las viviendas.

Finalmente, se espera contrastar el resultado de la zonificación de riesgo ante tsunami, con el impacto que tuvo el evento del 27 de febrero de 2010 en el pueblo de Dichato, y así determinar cuánto se acercan los resultados con lo acontecido en realidad.

1.4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo General

- Evaluar el impacto del tsunami del 27 de febrero de 2010 en las viviendas del pueblo de Dichato.

Objetivos Particulares

- Determinar el riesgo de tsunami de Dichato antes del 27/02/2010.
- Determinar el impacto del tsunami en el área de estudio.
- Contrastar los resultados de la susceptibilidad física con el impacto determinado para el área de estudio.

Hipótesis

Se postula que a través de la integración de factores de amenaza y susceptibilidad física es posible explicar el impacto que tuvo el tsunami del 27 de febrero de 2010 en las viviendas del pueblo de Dichato.

CAPÍTULO II: MARCO CONCEPTUAL

2.1. Amenaza, vulnerabilidad y riesgo

Los asentamientos humanos constantemente han visto alterado su normal desarrollo por las diferentes manifestaciones de la naturaleza. El hombre se encuentra sometido en cierta medida al medio natural que lo rodea. Es precisamente la naturaleza, tanto viviente como inanimada, la que proporciona los elementos necesarios para la existencia de las sociedades humanas, al tiempo que lleva consigo toda una gama de dificultades e incluso amenazas, contrarias al bienestar del hombre y, a veces, a su propia supervivencia (Calvo, 1984).

La constante interacción entre vida humana y medio natural, se realiza dentro de unos límites muy variables. Hasta determinados umbrales, diversos tipos de mecanismos de tipo técnico y social nos permiten acomodarnos en nuestro entorno natural, paliando la incidencia de aquellos aspectos que pueden ser perjudiciales en algún grado. Sin embargo, sobrepasados estos umbrales, las formas de adaptación pueden mostrarse insuficientes, derivándose de ello efectos seriamente perjudiciales para los grupos humanos (Calvo, 1984).

Existe riesgo, por tanto, cuando el umbral de cambio tolerable se ve sobrepasado en un plazo más o menos breve y empieza a desencadenarse una situación que conduce a la catástrofe. Pueden clasificarse en ocasiones directamente como riesgos, procesos que forman parte de la dinámica natural, pero hablar de riesgos en un contexto natural no tiene sentido, la medida del riesgo es humana, hasta el punto de que puede ocurrir, y ocurre, que determinados procesos naturales son positivos para el hombre hasta un cierto nivel y terriblemente destructivos si lo sobrepasan (Calvo, 2001).

El riesgo es la probabilidad de que un territorio y la sociedad que lo habita pueda verse afectado por un fenómeno natural de rango extraordinario (Ayala y Olcina,

2002). Para que exista una condición de riesgo, deben interrelacionarse en tiempo y espacio común, factores de amenaza y factores de vulnerabilidad, los cuales son interdependientes y directamente proporcionales (ONEMI, 2009).

Hay que tener en cuenta que el riesgo no puede ser considerado sin la presencia de la población. Por lo tanto, la iniciativa y la acción del hombre son elementos esenciales del riesgo. También se debe tener en cuenta, que no sólo las vidas humanas son elementos en riesgo, ya que nuestra sociedad posee y depende de estructuras básicas muy vulnerables, como son los sistemas de comunicación o las redes de distribución de agua y energía (Chester, 1993; en Ortiz, 2000).

Generalmente se tiende a confundir los términos amenaza y riesgo, pero su principal diferencia es que el riesgo implica la presencia humana y la amenaza se refiere al fenómeno en sí. La amenaza natural sería el fenómeno natural, que en potencia podría afectar al hombre y a su entorno, pero que no necesita del ser humano para desencadenarse, ya que sin la presencia del hombre, es sólo un evento natural extremo.

La amenaza se concibe como un factor externo de riesgo, representado por la potencial ocurrencia de un suceso de origen natural o generado por la actividad humana, que puede manifestarse en un lugar específico, con una intensidad y duración determinadas (ONEMI, 2009).

La vulnerabilidad se concibe como un factor interno de riesgo de un sujeto, objeto o sistema expuesto a una amenaza, que corresponde a su disposición intrínseca a ser dañado. Describe el grado en que un sistema socioeconómico es susceptible al impacto de los fenómenos naturales. Incluye aspectos como el grado de conciencia ante la amenaza, el estado de los asentamientos humanos y la infraestructura, las políticas y la gestión pública y la capacidad de organización en todos los campos del manejo de desastres (ONEMI, 2002).

La vulnerabilidad es la posibilidad de las personas y sus recursos a ser dañadas por una amenaza. La vida y salud de las personas están en riesgo directo de los potenciales efectos destructivos de una amenaza. Gran parte del trabajo de mitigación del desastre centra su atención en reducir la vulnerabilidad y, con este fin, aquellos que planifican el desarrollo deben entender cuáles son los elementos con mayor riesgo de las principales amenazas que han identificado (Coburn *et al*, 1991).

Las amenazas y las vulnerabilidades se localizan y relacionan espacialmente en el territorio y se puede advertir que los desastres tienen lugar en aquellos lugares donde el nivel o magnitud de la amenaza se superpone con las más altas debilidades sociales e institucionales (Romero *et al*, 2011).

La amenaza no es intervenible, no se puede disminuir, es inherente a la naturaleza, por eso se debe intervenir la vulnerabilidad, porque ésta se basa en las características de los asentamientos humanos y de las sociedades.

Frente a las dinámicas propias de la naturaleza, la gestión del riesgo es mucho más factible desde el manejo de la vulnerabilidad, para evitar o mitigar la ocurrencia de emergencias o desastres. En todo contexto y actividad humana, confluyen determinados factores de amenaza y vulnerabilidad, tal vez en su mayoría controlables con una gestión profunda y sostenida, pero no eliminables en su totalidad (ONEMI, 2009).

El riesgo se arraiga en condiciones de susceptibilidad física, social, económica y ambiental que es necesario evaluar y administrar de forma continua. El objetivo primordial es minimizar la exposición a las amenazas mediante el desarrollo de capacidades individuales, institucionales y de la sociedad, que permitan enfrentar las pérdidas o daños. La susceptibilidad es un reflejo de las condiciones físicas, sociales, económicas y ambientales, tanto individuales como colectivas. Éstas se están configurando permanentemente por las actitudes, conductas e influencias culturales, socioeconómicas y políticas de que son objeto las personas, familias,

comunidades y países. Puesto que se rige por la actividad humana, la vulnerabilidad no puede considerarse independientemente de las actividades que se llevan a cabo en pro del desarrollo. Por ese motivo, desempeña un papel decisivo en todos los aspectos relacionados con el desarrollo sostenible (SIEIRD, 2004).

2.2. Los sismos

Los sismos son vibraciones de la superficie de la Tierra causadas por el paso de ondas sísmicas irradiadas desde una fuente de energía elástica (Bolt, 1981). Dependiendo de la magnitud, estos pueden provocar gran cantidad de daño en el lugar donde ocurren, dejando en tan sólo un par de minutos, todos los asentamientos y actividades del hombre convertidas en ruinas. Cuando estas vibraciones no producen daños, son percibidas por las personas como temblores, y en el caso contrario son denominados terremotos, cuando causan una gran destrucción (Sauter, 1989).

Los sismos son clasificados según su modo de generación. Los más comunes son los sismos tectónicos, pero también hay sismos que acompañan a erupciones volcánicas, otros producidos por el colapso de cavernas o producidos por el hombre, pero éstos representan eventos excepcionales.

Un sismo tectónico es causado por el movimiento de las placas tectónicas y por la ruptura de roca en segmentos de falla o en los bordes de las placas litosféricas. La explicación del “donde” y el “por qué” ocurren los sismos está en las corrientes convectivas que se producen en el manto superior y que originan los procesos tectónicos que ponen en movimiento relativo a las placas litosféricas, deformando y conformando la corteza terrestre (Sauter, 1989).

Cuando la roca se fractura, se libera energía acumulada que es disipada principalmente en forma de calor y una menor parte es irradiada en forma de

ondas sísmicas a través de la corteza, cuyas propiedades físicas hacen que ésta vibre elásticamente, propagando las ondas en todas direcciones a partir de la fuente (Sauter,1989).

La principal actividad sísmica mundial se localiza en las zonas de deformación tectónica, ubicadas en los límites entre placas litosféricas. Estos límites se pueden clasificar en bordes convergentes, divergentes y transcurrentes (Sauter, 1989).

Chile se localiza en un borde convergente, de subducción de una placa oceánica, bajo una continental, por lo que sólo se hará referencia a este tipo de borde.

En estas zonas de subducción la actividad sísmica es mayor y con sismos de mayor magnitud. Al hundirse la placa oceánica bajo la placa continental, ocurren en ella fracturas que generan los terremotos superficiales. En el proceso de movimiento descendente se generan esfuerzos adicionales, que producen posteriores deformaciones y fracturas, que dan lugar a focos más profundos. Los sismos profundos que ocurren a lo largo de la placa descendente definen la zona sísmica buzante, en forma de plano inclinado, llamada zona de Benioff (Bolt, 1981). Los focos sísmicos son poco profundos frente a la costa y forman un cinturón continuo a lo largo de los límites de placas, pero tierra adentro, los focos profundos tienden a concentrarse en unas pocas regiones, al igual que los de profundidad intermedia (Lomnitz, 1970).

2.2.1. Sismicidad en Chile

El término sismicidad de acuerdo a Bolt (1981) se refiere a la ocurrencia de sismos en función del espacio y del tiempo.

En Chile el nivel de sismicidad es tal que desde 1962 hasta 1997 se produjeron 4.000 sismos de magnitud superior a cinco (Engdahl *et al*, 1998). Esta actividad

sísmica dominante es consecuencia directa de la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana (Stauder, 1973; Madariaga, 1998).

De acuerdo a Madariaga (1998), la inmensa mayoría de los sismos ocurridos corresponden a mecanismos de falla inversa con un plano de falla que posee un débil ángulo de inclinación, con una profundidad máxima de 60km en esta zona de acoplamiento. Por otra parte, identifica otros tipos diferentes de sismicidad a lo largo del territorio: sismicidad intraplaca, sismicidad debida a la flexión de la placa de Nazca y sismicidad de extensión en el interior de la placa de subducción. Eventos sísmicos como el de 1939 en Chillán o el de 1965 cerca de la ciudad de La Ligua tuvieron lugar en el interior de la placa de Nazca. Estos pueden llegar a ser muy destructivos por localizarse debajo de ciudades densamente pobladas.

En general, las zonas sismogénicas en Chile están bien establecidas: terremotos grandes y superficiales (0 – 50km) de mecanismo de empuje a lo largo de la costa; terremotos grandes y profundos (70 – 100km) de mecanismos de tensión y compresión en la placa de Nazca; y en unos pocos lugares, como la región cordillerana de la zona central, sismicidad muy superficial (0 – 20km) (Barrientos *et al*, 2004).

Barrientos *et al* (2004) en un estudio de eventos sísmicos ocurridos desde 1986 hasta el 2004, en la zona central de Chile (33°S – 34.5°S) mostraron una actividad superficial concentrada principalmente a lo largo del flanco oeste de la cadena montañosa andina, probablemente la expresión superficial de la deformación de la placa superior en respuesta a un acoplamiento diferencial entre placas (subducción plana a escarpada).

En la figura 1 se observan las áreas de ruptura de los grandes terremotos ocurridos en Chile.

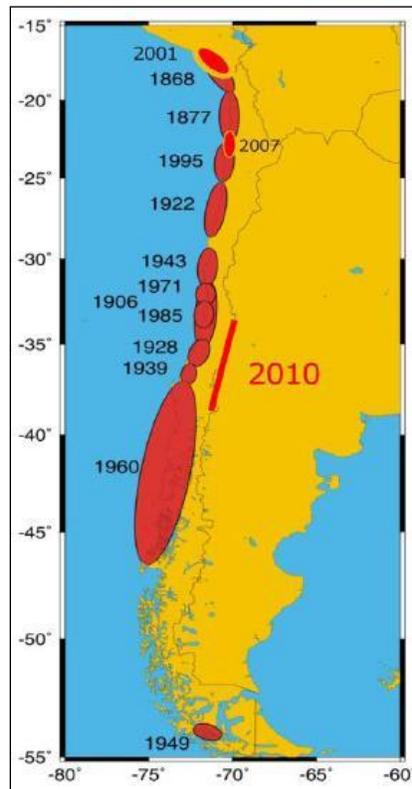


Figura 1: Áreas de ruptura de grandes terremotos en Chile (SSN, 2013).

2.2.2. Calma sísmica Constitución – Concepción

Las brechas o calmas sísmicas se entienden como zonas de falla o de segmentos de borde entre placas litosféricas, de conocida sismicidad histórica e instrumental, en la cual se registra un periodo prolongado de calma o quietud sísmica en la cual se han acumulado progresivamente grandes cantidades de energía elástica de deformación y que, por lo tanto, presenta una mayor probabilidad de ruptura y de ocurrencia de un evento sísmico (Nishenko, 1985; Sauter, 1989). Este concepto es la base para el pronóstico de terremotos a largo plazo.

La brecha sísmica ha sido ampliamente estudiada por autores como McCann *et al* (1979), Kagan y Jackson (1991, 1993, 1995), Nishenko y Sykes (1993), los cuales intentaron encontrar explicación a este fenómeno, conociéndose este proceso

como “desarrollo de la hipótesis de brecha sísmica”. Esta hipótesis propone que segmentos de bordes de placa que históricamente han sido activos y que no han experimentado una ruptura significativa durante las últimas décadas, son sitios probables de un futuro gran evento. Es decir, en general se reconoce que a un mayor periodo de quietud sísmica, corresponde una mayor acumulación de energía elástica de deformación y una mayor magnitud del evento principal (Sauter, 1989).

Sin embargo, existen autores como Satake (1994, 1996) y Bryant (2001) que dudan de la veracidad de la hipótesis de la brecha sísmica, puesto que se han producido tsunamis en lugares donde el sismo mayor no ha presentado la intensidad esperada, o que el tsunami ha sido generado por las réplicas posteriores al sismo principal. Madariaga (1998), por su parte, también reconoce la necesidad de someter a más pruebas la hipótesis de la brecha sísmica, sin embargo, no la descarta.

A pesar de todo, la hipótesis de la brecha sísmica sigue siendo utilizada, pues existen lugares donde estudios han evidenciado la presencia de una anomalía sísmica, es decir, sectores con ausencia importante de movimientos telúricos.

Hasta hace poco, se habían identificado dos grandes lagunas sísmicas en Chile, una ubicada en el norte del país, que coincide con la zona de ruptura del terremoto de 1877 entre Arica y Antofagasta, y la segunda entre Constitución y Concepción (35°S – 37°S). Esta última, había presentado diversos sismos a lo largo de la historia, entre ellos, los eventos de 1730, 1751, 1835 y 1928. Sin embargo, el mayor de todos los ocurridos en la zona correspondía al de 1835. Además, esta área estaba delimitada al sur por la ruptura del evento de 1960 y por el norte la ruptura del evento de 1985 en Valparaíso, quedando así definida la zona de laguna sísmica entre Constitución y Concepción (Campos *et al*, 2002).

Hasta la madrugada del 27 de febrero de 2010, esta zona era considerada la calma sísmica más antigua del país, porque no había ocurrido un sismo de

subducción en 175 años, por lo que la probabilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud era muy alta.

2.3. Tsunamis

Los tsunamis son trenes de olas que viajan a través del océano a grandes velocidades y que se pueden manifestar en la costa de diversas formas, tales como un aumento o disminución del nivel del mar, marejadas o la generación de una enorme muralla de agua de varios metros de altura y con un gran poder destructivo (Sauter, 1989).

La palabra tsunami proviene del japonés, y se divide en “tsu” y “nami”, que significan “bahía” y “onda” respectivamente (SHOA, 2002a) y se define como olas marinas generadas por eventos sísmicos u otros procesos geológicos tales como erupciones volcánicas o deslizamientos, cuyo origen es el fondo oceánico (Sauter, 1989).

Los tsunamis que son asociados a eventos sísmicos con origen bajo el fondo marino, son generados por el desplazamiento tectónico súbito y violento del fondo oceánico, con componente esencialmente vertical, que a su vez produce el desplazamiento de la columna o masa de agua en reposo. Estos movimientos tectónicos tienen lugar principalmente en las zonas de subducción frente a las placas continentales (Sauter, 1989).

Los tsunamis generan un gran impacto en las zonas litorales, pues se trata de áreas altamente frágiles donde confluyen tres ambientes naturales distintos, como lo son el atmosférico, terrestre y marino. A esto se le suma la importancia que ha adquirido el borde costero para el asentamiento humano, en el cual emergen grandes ciudades con una alta densidad poblacional, cuya urbanización, en ocasiones descontrolada, ha forzado a las personas a sobrepoblar áreas

vulnerables frente al accionar de distintos eventos naturales extremos (Lagos, 2002).

Los tsunamis son uno de los eventos naturales que pueden generar grandes destrozos en las zonas costeras, representando un alto riesgo para las comunidades que habitan en el litoral, pues sus efectos pueden cubrir una gran superficie. Sin embargo, se trata de fenómenos con escasa frecuencia (Bryant, 2001), los que suelen ser borrados del consciente colectivo, e incluso en países subdesarrollados, suelen ser excluidos de los instrumentos de planificación y ordenamiento territorial.

2.3.1. Fases de un tsunami

Para entender la dinámica de un tsunami se deben considerar sus tres fases (figura 2):

a) Generación del tsunami o condición inicial:

Como se mencionó anteriormente, los tsunamis se pueden generar por tres razones: por erupciones volcánicas submarinas o en la costa; por deslizamientos de materiales y grandes rocas ancladas precariamente en los taludes continentales o costas; o por alzamientos y hundimientos bruscos del fondo marino. Esta última es la principal generadora de tsunamis, que suelen ser de proporciones oceánicas (Ramírez, 1986).

Aunque los terremotos son el principal mecanismo generador de tsunami, éstos deben reunir ciertas características generadoras, tales como magnitudes superiores a 6,5 en la escala de Richter; hipocentros superficiales (inferiores a 60 km) y epicentros oceánicos o continentales cercanos a la línea de costa (Iida, 1983; en Lagos, 2000).

Sin embargo, existe una modalidad de generación de tsunamis por terremotos que no cumple con las especificaciones mencionadas anteriormente, denominado *sismo-tsunami*, el cual se define como un sismo que genera un tsunami desusadamente grande en comparación con la magnitud del sismo (SHOA, 2002b; Satake, 1994 y 1996; Bryant, 2001).

b) Propagación:

Una de las características principales de los tsunamis es su rápida propagación, alcanzando velocidades de 720 km/hr, a una profundidad media de 4.000 m. Mientras su desplazamiento tiene lugar en aguas profundas, la amplitud de la onda es de unos pocos centímetros, siendo imperceptible para buques en alta mar. Cuando un tsunami se acerca a islas y continentes, el efecto combinado de la disminución de la profundidad y las características topográficas del terreno, hacen por lo general que disminuya su velocidad de propagación y su longitud de onda, manteniendo su enorme energía cinética. El resultado de esta interacción es un aumento de la ola que llega a la costa (SHOA, 2005).

La velocidad de desplazamiento alcanzada por los tsunamis explica su rápida propagación desde un extremo a otro del océano, el cual puede ser cubierto en 24 horas, mientras que en el caso de zonas próximas, la propagación de las ondas puede tardar sólo minutos después de ocurrido el sismo (ONEMI, 2001).

c) Inundación:

La forma en que arriba un tsunami a la costa depende de diversos factores y su interacción entre ellos: las características de las olas en mar abierto; la batimetría; la pendiente del fondo marino; la configuración del contorno de la costa; la refracción, la reflexión, y el entrampamiento de sus olas en las diversas formaciones costeras (bahías, golfos, penínsulas, islas, cabos, deltas fluviales, lagunas costeras, etc.). La multiplicidad de los factores anteriores hace que la evaluación del comportamiento local del arribo de un tsunami sea un problema

complejo y que, aun en distancias cortas, la altura máxima de sus olas varíe considerablemente a lo largo de la costa (CENAPRED, 2005).

De esta manera, una comunidad costera puede que no vea ninguna actividad destructiva de las ondas de tsunami, mientras que en otra comunidad vecina las ondas pueden ser grandes y destructivas. En cuanto a la cobertura de la inundación, ésta se puede extender a más de 300 m tierra adentro, cubriendo extensas zonas con agua y escombros (SHOA, 2002b).

Cuando un tsunami alcanza la costa y se desplaza tierra adentro, el nivel del agua puede elevarse muchos metros. En casos extremos, el nivel del mar ha alcanzado 30 m en tsunamis generados próximos a la costa (SHOA, 2002b). En cuanto a la llegada de la sucesión de olas a la costa, éstas pueden ser detectadas por los habitantes de una zona costera, pues viene precedida por un cambio anómalo en el nivel de mar. En muchos casos se ha observado que el mar se retira a una distancia bastante considerable (Sauter, 1989).

Luego de la recogida del mar, se produce una sucesión rápida de ascensos y descensos alternativos del nivel de las aguas, cuya altura puede variar desde unos pocos centímetros hasta 25 m aproximadamente, aunque han ocurrido maremotos de extraordinaria violencia, durante los cuales se han apreciado alturas de ola superiores a los 30 m. Este aumento en la altura de ola y su posterior efecto en la inundación, se debe a que a medida que aumenta la magnitud de un terremoto, y /o disminuye la profundidad del foco, la magnitud del tsunami se incrementa y sus efectos se verán potenciados por las características batimétricas, distancia del epicentro a la línea de costa y su configuración; estado de la marea y morfología de la topografía en superficie, incluyendo pendientes y grado de rugosidad derivado de construcciones, árboles y otros obstáculos en tierra (Lagos, 2000).

Si el tsunami se acerca a una costa de pendiente suave (por ejemplo una playa), a medida que disminuye la profundidad del fondo marino también decrece su

velocidad, las longitudes de onda se acortan, la energía se concentra y la altura se incrementa, al igual que su potencialidad destructiva (CENAPRED, 2005).

En bahías semicerradas (con forma semejante a una herradura) las olas del tsunami experimentan en el interior reflexiones múltiples y sucesivas en las costas opuestas, amplificando su oscilación y la altura con que invaden las costas. Este fenómeno se denomina amplificación resonante por formación de ondas estacionarias; se genera en olas de tsunami cuya longitud sea igual o múltiplo de las dimensiones horizontales (longitud y anchura) de la bahía. Además, las olas de los tsunamis pueden penetrar por ríos, esteros, arroyos y/o lagunas costeras, y viajar a gran velocidad hasta varios kilómetros tierra adentro (CENAPRED, 2005).

Finalmente, las anomalías en el mar se mantienen varios días después de ocurrido el maremoto, presentándose violentos oleajes y corrientes anormales en el borde costero (SHOA, 2005).



Figura 2: Fases de un tsunami (Modificado de NOAA)

2.3.2. Intensidad de un tsunami

Papadopoulos e Imamura (2001) propusieron una escala de 12 grados de intensidad la cual se organiza de acuerdo a tres factores:

- a) Efectos sobre seres humanos,
- b) Efectos sobre objetos, incluido buques de tamaño variable, y en la naturaleza,
- c) Daños a los edificios.

Esta escala no se rige de acuerdo a la medida de parámetros físicos de un tsunami (como la amplitud de la ola), lo que permite la comparación del impacto entre tsunamis ocurridos en lugares con condiciones de vulnerabilidad muy diferente y es sensible a pequeñas diferencias en los efectos que éste produce, ya que cada grado es lo suficientemente detallado como para cubrir la mayor cantidad posible de tipos de daños que la comunidad y el medio ambiente sufren a causa de los tsunamis.

La descripción de cada grado de intensidad se presenta en la tabla 1.

Intensidad		Descripción de los daños
I	No sentido	a) No se sintió incluso en las circunstancias más favorables. b) Ningún efecto. c) Ningún daño.
II	Apenas sentido	a) Sentido por pocas personas a bordo de pequeñas embarcaciones. No se observó en la costa. b) Ningún efecto. c) Ningún daño.
III	Débil	a) Sentido por la mayoría de las personas a bordo de pequeñas embarcaciones. Observado por pocas personas en la costa. b) Ningún efecto. c) Ningún daño.
IV	Ampliamente observado	a) Sentido por todos a bordo de pequeñas embarcaciones y pocas personas a bordo en grandes buques. Observado por la mayoría de las personas en la costa. b) Pocas embarcaciones pequeñas son arrastradas ligeramente hacia la costa c) Ningún daño.
V	Fuerte	a) Sentido por todos a bordo de buques grandes y observado por todos en la costa. Algunas personas atemorizadas evacúan a tierras

		<p>más altas.</p> <p>b) Muchas embarcaciones pequeñas son fuertemente arrastradas tierra adentro y algunas chocan entre ellas o son volteadas. Trazas de capa de arena son abandonadas en terrenos de condiciones favorables. Límite de la inundación en tierras cultivadas.</p> <p>c) Límite de la inundación en instalaciones al aire libre (por ejemplo, jardines) y estructuras cercanas a la costa.</p>
VI	Ligeramente perjudicial	<p>a) Mucha gente se atemoriza y evacuan a tierras más altas.</p> <p>b) La mayoría de las embarcaciones son violentamente arrastradas tierra adentro, chocan fuertemente entre ellas o son volteadas.</p> <p>c) Daños e inundaciones en estructuras de madera. El efecto es soportado por la mayoría de los edificios de mampostería.</p>
VII	Perjudicial	<p>a) La mayoría de la gente tiene miedo y tratan de correr hacia terrenos más altos.</p> <p>b) Muchas pequeñas embarcaciones dañadas. Algunas embarcaciones grandes oscilan violentamente. Objetos de tamaño variable en el mar pierden estabilidad y van a la deriva. Capas de arena y acumulaciones de guijarros quedan rezagadas.</p> <p>c) Muchas estructuras de madera dañadas, demolidas o arrastrados. Daños de grado 1 e inundaciones en algunos edificios de mampostería.</p>
VIII	Muy perjudicial	<p>a) Todas las personas escapan a tierras más altas, algunos son arrastrados.</p> <p>b) La mayoría de las embarcaciones pequeñas son dañadas. Algunos barcos grandes son llevados a tierra o chocan entre sí. Objetos grandes se van a la deriva. Persiste la remoción de playas, ensuciándolas plenamente. Extensas inundaciones. Leves daños en el bosque de control de tsunamis, que detienen objetos a la deriva.</p> <p>c) Las estructuras de madera son barridas o demolidas. Daños de grado 2 en edificios de mampostería. La mayoría de los edificios de concreto resisten el daño, en algunos se observan daños grado 1 e inundaciones.</p>
IX	Destruutivo	<p>a) Muchas personas son arrastradas por salida del mar en tierra.</p> <p>b) La mayoría de las embarcaciones pequeñas son destruidas o arrastradas. Grandes barcos son llevados violentamente hacia tierra, algunos son destruidos. Remoción extensa de playas, ensuciándolas. Subsistencia local del terreno. Destrucción parcial en bosques anti tsunamis.</p> <p>c) Daños de grado 3 en muchos edificios de mampostería, algunos edificios de concreto con daño grado 2.</p>
X	Muy destructivo	<p>a) Pánico general. La mayoría de las personas son arrastradas por el mar.</p> <p>b) Los grandes barcos se mueven violentamente hacia tierra, muchos se destruyen o colisionan con edificios. Pequeñas rocas del fondo marino son movidas hacia tierra. Arrastre de autos y derrame de combustibles, inicio de incendios. Subsistencia extensiva del terreno.</p> <p>c) Daños de grado 4 en muchos edificios de mampostería. Algunos edificios de concreto sufren daño grado 3. Daños en diques y</p>

		embalses artificiales.
XI	Devastador	b) Líneas vitales interrumpidas. Incendios extensivos. El agua arrastra y desplaza automóviles y otros objetos hacia el mar. Grandes rocas del fondo marino son movidas tierra adentro. c) Daños de grado 5 en muchos edificios de mampostería. Algunos edificios de concreto sufren daño grado 4, muchos sufren daño grado 3
XII	Completamente devastador	c) Prácticamente todos los edificios de mampostería demolidos. La gran mayoría de edificios de concreto sufren daños al menos de grado 3.

Tabla 1: Grados de intensidad de un tsunami según Papadopoulos e Imamura (2001)

2.3.3. Parámetros físicos de un tsunami

La altura de la ola (H) corresponde a la altura del agua sobre el nivel de la marea al momento de arribo del tsunami. La profundidad de la inundación es la altura del agua medida desde el suelo en un lugar específico. El *run-up* es la diferencia entre la elevación o cota de la penetración máxima de un tsunami (línea de inundación) y el nivel del mar en el momento del tsunami. La distancia de inundación es la distancia horizontal en tierra a la que penetra un tsunami, medida en forma perpendicular a la costa. Estos parámetros se pueden observar en la figura 3.

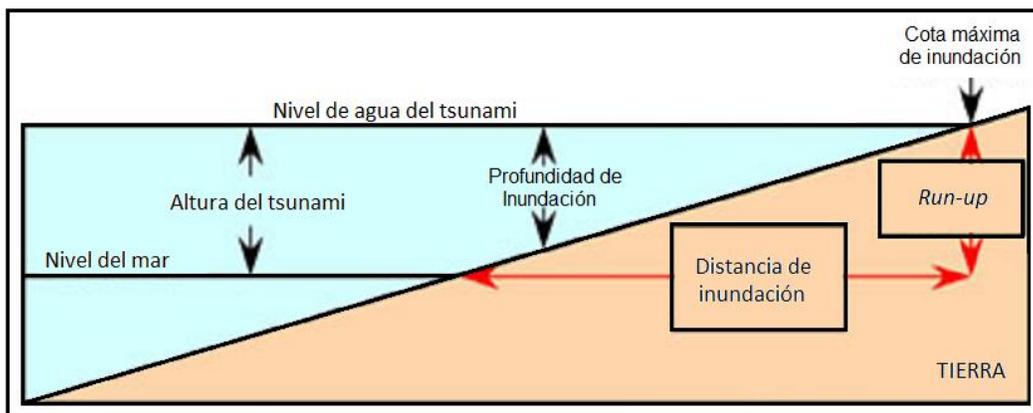


Figura 3: Parámetros de un Tsunami. (Modificado de European Commission, 2010).

2.3.4. Tipología de tsunamis según su lugar de origen

En cuanto a los tipos de tsunamis se pueden mencionar dos, determinados por el lugar en que se originan y la proyección de sus efectos. El primero de ellos se denomina *tsunami de origen cercano*, y son aquellos cuyos focos generadores se localizan próximos a la línea de costa. El segundo grupo es denominado *tsunamis de origen lejano*, debido a que su generación ocurre en sectores apartados (Lagos, 2000).

Esta clasificación permite un mejor funcionamiento del manejo de la emergencia y una oportuna emisión de las advertencias, pues los efectos de un tsunami de origen cercano puede generar daños en la costa en tan sólo minutos, mientras que los tsunamis de origen lejano pueden generar daños en la costa después de horas (Darienzo *et al*, 2005).

En el caso de Chile, los principales responsables de daños son los tsunamis de origen cercano, los cuales pueden afectar también a territorios litorales distantes de la cuenca del Pacífico, como ocurrió con el tsunami de 1960. Asimismo, es posible que tsunamis generados en otras costas de la cuenca del Pacífico afecten las costas chile. Hasta hace poco, no había registros históricos de que tsunamis de campo lejano se hubiesen manifestado en las costas de Chile (Lagos, 2000; Monge, 1993), lo cual se debía principalmente a la inexistencia de investigaciones destinadas al estudio de eventos prehistóricos. Sin embargo, recientemente, se pudo observar que el tsunami japonés del 11 de marzo de 2011 sí inundó algunos sectores de la costa chilena (Lagos y Haro, 2011).

2.3.5. Daños causados por los tsunamis

Los daños que puede producir un tsunami dependerán principalmente del grado de inundación en una zona poblada. Si bien los tsunamis no son frecuentes, son

importantes por la gran pérdida de vidas y por los daños ocasionados (Sauter, 1989).

Según el Centro Internacional de Información de Tsunami – ITIC (2004), los daños pueden ser de varias índoles, pero las principales son las siguientes:

- a) Personas y animales muertas y heridas.
- b) Casas destruidas, en parte o completamente, inundadas o quemadas.
- c) Otros daños a propiedades y pérdidas materiales.
- d) Barcos desplazados tierra adentro, dañados o destruidos.
- e) Maderas trasladadas lejos.
- f) Instalaciones marinas destruidas.
- g) Daño a instalaciones públicas como ferrocarriles, caminos, plantas eléctricas, instalaciones de suministro de agua y otros.

También existen daños secundarios causados por tsunamis, entre ellos:

- h) Daño por incendio de casas, barcos, estanques de petróleo, estaciones de gas y otras instalaciones.
- i) Contaminación medioambiental causada por materiales flotantes, petróleo u otras sustancias.
- j) Surgimiento de enfermedades epidémicas.

En ese mismo sentido, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, SHOA (2002b) afirma que la destrucción causada por los tsunamis proviene principalmente del impacto de las ondas, de la inundación y erosión de las fundaciones de los edificios, de los puentes y de los caminos. El daño se ve aumentado por los despojos flotantes y por los botes y automóviles que chocan con los edificios. Se agregan a esto fuertes corrientes, a veces asociadas con el

tsunami, que liberan grandes troncos y embarcaciones ancladas. Un daño adicional que puede producirse proviene de incendios de derrames de combustibles relacionados con el tsunami y la consiguiente contaminación por estos derrames y por aguas de alcantarillas y productos químicos.

Específicamente en viviendas, las olas de tsunami aplican fuerzas en las estructuras en la forma de presión hidrodinámica, flotabilidad, levantamiento, socavamiento e impacto de objetos arrastrados por la corriente (Lagos, 2009).

2.3.6. Tsunamis en Chile

Desde el siglo XVI hasta nuestros días, el registro histórico y la evidencia instrumental indican la presencia de más de una centena de tsunamis de campo cercano a las costas de Chile generados por terremotos, de los cuales sólo 35 han tenido efectos destructores (Lagos, 2000).

Esta constante amenaza de tsunami sobre las costas de Chile, se sustenta por su localización geográfica frente a una zona de subducción cortical (Lagos, 2000). Esta zona de subducción es uno de los principales sectores generadores de tsunami en el Océano Pacífico, ya que sólo considerando la información instrumental registrada durante el siglo XX, aquí se originaron el 15% del total de los tsunamis de la cuenca, de los cuales, el 74% fueron generados frente a las costas del país (Gusiakov, 2005; en Lagos y Cisternas, 2008). Las costas de Chile abarcan una zona de subducción de unos 4.500 kilómetros de longitud, de los cuales, el 71% corresponde al segmento que históricamente registra grandes terremotos (18° a 46° de latitud Sur) (Lagos y Cisternas, 2008).

Los tsunamis que han afectado las costas de Chile son el fiel reflejo de procesos tectónicos recurrentes en el tiempo. Desde que existe la costa chilena han existido los tsunamis y aplicando el mismo supuesto es posible asegurar que seguirán ocurriendo por millones de años más (Atwater *et al*, 1999).

Lagos (2000) realiza una base de datos de los tsunamis de origen cercano que han afectado a Chile en el periodo 1562 – 2000, considerando la localización del evento, la magnitud (M) del sismo generador, la profundidad del hipocentro, la magnitud (m) del tsunami y la cota máxima de inundación (run-up). El trabajo se basa en diversos listados que se han elaborado en Chile desde hace tres décadas. Entre ellos, se encuentran el de Lomnitz en 1970, el de Godoy en 1975, el de Pilasi en 1978, los de el SHOA, en 1984 y 1995, el de Monge en 1993, y el de Lorca *et al.* en 1994. Además se consultó la base de datos en línea del National Geophysical Data Center (NGDC). El resultado fue una base de datos estándar con 102 registros de tsunamis de origen cercano.

Durante el período de 1550 al año 1800 se registran trece eventos cada quince años en promedio. Predominan los eventos $m=3$ y se destaca el tsunami de 1730 con un $m=4$. Para el período 1800-1900 se incrementan los registros a 21 eventos, caracterizándose este tramo por la ocurrencia de más de un tsunami en un mismo año, es el caso de los eventos de 1849, 1868, 1869, y 1871. Sobresalen los devastadores tsunamis de 1868 y 1877 con magnitudes $m=4$. Durante el período 1900-octubre de 2000 los registros son de 68 tsunamis, predominando eventos que no produjeron daños, este aumento se justifica por la existencia de instrumental capaz de detectarlos. Sobresale el tsunami de 1922 y el destructor evento de mayo de 1960 (Lagos, 2000).

Las mayores cotas de inundación producto de tsunamis, alcanzan los 25 m. sobre la línea de costa y se atribuyen a eventos de magnitud cuatro, los que presentan run-up que fluctúan entre los 15 y 25 m (Lagos, 2000).

Se evidencia la alineación norte-sur coincidente con la zona de subducción y la clara existencia de tsunamis producidos por sismos con epicentros marítimos y continentales. La actividad generadora de tsunamis se extiende desde los $17^{\circ} 50'$ S en el litoral del extremo norte hasta los 45° S, presentándose zonas diferenciadas a lo largo de la línea de costa (Lagos, 2000).

El tsunami más grande registrado en Chile ocurrió el 22 de mayo de 1960, generado por el terremoto de mayor magnitud que haya sido registrado en la historia del planeta, que alcanzó una magnitud Mw 9.5. El tsunami tuvo una magnitud Mt 9.4, el cual arrasó con pueblos y ciudades costeras. El periodo de las ondas generadas fue de 12 a 15 minutos, formándose grupos de tres olas. El resultado final fueron 2000 víctimas fatales y más de US\$ 550.000.000 (dólar de 1960) en pérdidas materiales (Lagos y Cisternas, 2008).

Lagos y Cisternas (2008), plantean que en el centro-sur de Chile, existirían dos escenarios capaces de generar tsunamis, terremotos grandes, como los eventos de 1737 y 1837, con tiempos de recurrencia superiores a los cien años, y terremotos gigantes como el de 1960, con tiempos de recurrencia cercanos a los 300 años. Esto lo demuestran a través de la modelación numérica de ambos tsunamis, donde los resultados muestran claramente la superioridad del tsunami de 1960, alcanzando alturas máximas cercanas a los 20 metros, en cambio, el evento de 1837, en promedio no supera los 5 metros.

CAPÍTULO III: FUNDAMENTOS TÉCNICO-METODOLÓGICOS

3.1. Percepción Remota

En términos generales, la Percepción Remota (PR) permite inferir datos de un objeto o del medio físico sin estar en contacto directo con ellos lo que resulta de gran importancia cuando se requiere información distribuida sobre amplias zonas geográficas (Aguirre, 2009).

Para procesar y analizar los datos recopilados mediante las técnicas de PR, se utilizan programas computacionales como procesadores de imágenes o Sistemas de Información Geográfica, los cuales además permiten realizar funciones de simulación y modelado para crear escenarios posibles (Aguirre, 2009).

Este avance tecnológico ha permitido que en la actualidad estas técnicas rebasen el ámbito de las Ciencias de la Tierra y alcance a todas las ciencias que utilizan datos espacialmente diferenciados (Aguirre, 2009).

La PR, como método de observación a distancia de un sistema físico ha cobrado importancia principalmente con el avance de la tecnología espacial. En la actualidad, la PR cuenta con elementos propios de análisis enmarcados en el método científico que le permiten resolver diversos problemas en la investigación experimental. Los satélites artificiales, los sensores remotos y el manejo de imágenes digitales por medio de computadora, han modificado el estudio de la superficie terrestre y la evaluación de los recursos naturales (Lira, 2003).

3.1.1. Imágenes de alta resolución

3.1.1.1. QuickBird

El satélite QuickBird es el primero en una constelación de sensores submétricos que DigitalGlobe ha desarrollado para ofrecer imágenes comerciales de la Tierra con gran resolución. La colección global de imágenes pancromáticas y multiespectrales está diseñada para apoyar aplicaciones que van desde la edición de mapas, hasta la evaluación de riesgos. Actualmente QuickBird ofrece imágenes con resolución submétrica, alta precisión de localización y gran almacenamiento de datos a bordo (DigitalGlobe, 2012).

El satélite Quickbird entrega una banda pancromática de alta resolución que cubre la mayor parte de la respuesta espectral y cuatro bandas espectrales de menor resolución espacial. Las cuatro bandas multiespectrales están aproximadamente basadas en la serie Landsat, incluyendo las bandas azul, verde, rojo e infrarrojo cercano (DigitalGlobe, 2012).

En la figura 4 se puede observar la respuesta espectral de las imágenes QuickBird.

La imagen que se utilizó para evaluar el escenario pre tsunami es una imagen QuickBird del 16 de febrero de 2010 y tiene una resolución espacial de 0.6 m en la banda pancromática y 2.4 m en las multiespectrales.

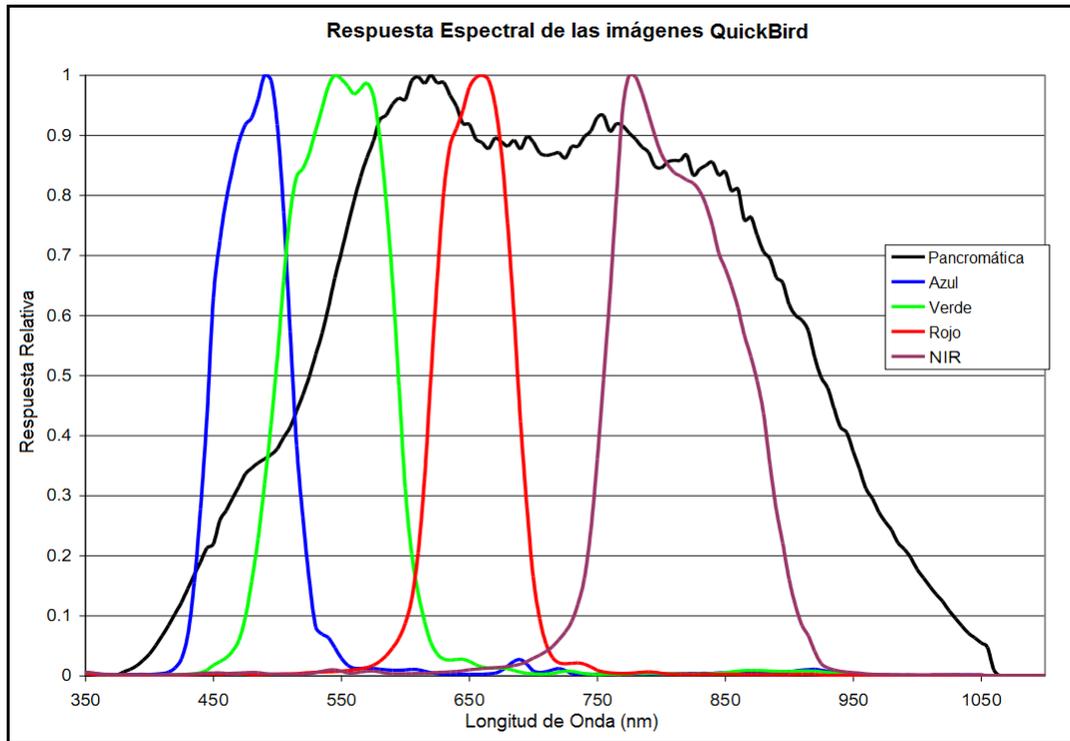


Figura 4: Respuesta Espectral Imágenes QuickBird. (Modificado de DigitalGlobe, 2012).

3.1.1.2. WorldView 2

WorldView 2, lanzado en octubre de 2009, es el primer satélite comercial de alta resolución multispectral, con 8 bandas. Opera a una altitud de 770 kilómetros y provee una resolución de 0.46 m en imágenes pancromáticas y una resolución de 1.85 m en las multispectrales. WorldView 2 tiene una resolución temporal de 1.1 días y es capaz de captar diariamente sobre 785,000 km² de imágenes de 8 bandas. Las imágenes multispectrales son capaces de entregar una alta precisión y bandas para aplicaciones únicas. Las cuatro bandas multispectrales primarias incluyen el azul tradicional, verde, rojo e infrarrojo cercano, similares, pero no idénticas a las imágenes QuickBird. Las cuatro bandas adicionales incluyen una banda azul de longitud de onda corta, llamada la banda costera por sus aplicaciones en estudios del color del agua; una banda amarilla; una banda de borde rojo, situada estratégicamente en el comienzo de la porción de alta

reflectividad de la respuesta de la vegetación; y adicionalmente una banda en el infrarrojo cercano de longitud de onda larga, que es sensible al vapor de agua atmosférico (DigitalGlobe, 2012). En la figura 5 se puede observar la respuesta espectral de las imágenes WorldView 2.

La imagen utilizada para evaluar el escenario post-tsunami es una imagen WorldView 2 del 26 de marzo del 2010, y posee una resolución espacial de 0.46 m en la banda pancromática y 1.85 m en las multiespectrales.

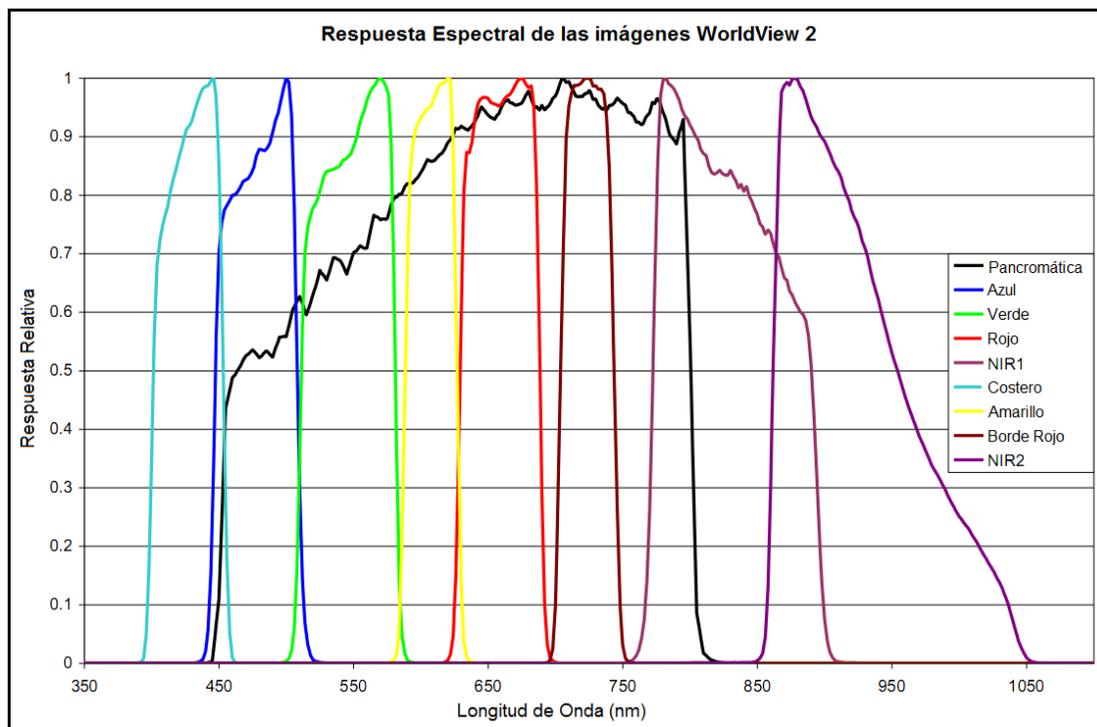


Figura 5: Respuesta Espectral Imágenes WorldView 2. (Modificado de DigitalGlobe, 2012).

3.1.2. Uso de la percepción remota y los sistemas de información geográfica (SIG) en la evaluación de desastres

Existen diversos estudios que avalan la utilización de los SIG y la Percepción Remota en la prevención, gestión, y evaluación de los riesgos, así como en la evaluación del impacto de los desastres después que han ocurrido.

Las imágenes satelitales ofrecen una visión amplia de las áreas afectadas, permitiendo evaluar los daños de manera más rápida que al hacerlo directamente en campo. El problema radica en el acceso a las imágenes, las cuales pueden no estar disponibles para la fecha del desastre o pueden tener una resolución espacial deficiente.

La integración de las imágenes en los SIG permite analizar los daños producidos por el desastre, generando zonificaciones que permitan entender la dinámica de la amenaza que produjo el desastre, así como los factores que pueden aumentar o disminuir los daños. La integración de diferentes capas de información permite visualizar de manera más completa los factores que determinan un desastre, como son el comportamiento de la amenaza y los elementos vulnerables.

3.2. Evaluación Multicriterio

La evaluación multicriterio (EMC) puede definirse como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones (Barredo, 1996).

Según Chen, *et al*, (2001) la toma de decisiones usando evaluación multicriterio generalmente sigue los siguientes pasos:

1. Identificar el problema de la toma de decisiones
2. Identificar los criterios que son relevantes al problema de decisión
3. Asignación de valores a los criterios y conducir la estandarización

4. Determinar pesos entre los criterios
5. Unir criterios y pesos con los métodos EMC
6. Tomar una decisión provisional
7. Realizar un análisis de sensibilidad
8. Interpretación

Estos pasos, son definidos más extensamente por Barredo (1996).

La evaluación multicriterio establece su funcionamiento en la evaluación de una serie de alternativas basándose en una serie de criterios. Un método de EMC puede servir para inventariar, clasificar, analizar y ordenar convenientemente (Eastman *et al*, 1993; en Barredo, 1996) una serie de alternativas a partir de los criterios que se hayan considerado pertinentes en una evaluación (Barredo, 1996).

La mejor organización para representar la relación de criterios y alternativas que define la EMC es una matriz de evaluación. En ella, los criterios ocupan la columna principal y las alternativas, la fila principal. Los valores internos de la matriz son llamados puntuaciones de criterios y representan el valor o nivel de deseabilidad que ha obtenido cada alternativa en cada criterio. Siendo a partir de ahí donde los distintos métodos de EMC basan todo su funcionamiento intrínseco para lograr la evaluación de las alternativas (Barredo, 1996). La asignación de puntuaciones a las alternativas la realiza el centro decisor o el equipo planificador, según preferencias previas.

Una vez construida la matriz de evaluación, otro aspecto a tomar en cuenta es la importancia relativa de cada criterio frente al tipo de evaluación que se pretenda realizar. En el caso que tengan distintas jerarquías para la posterior evaluación, se requiere asignar un valor específico a cada criterio, de acuerdo a su nivel de importancia relativa. Este valor recibe el nombre de peso o ponderación, cuando se expresa cuantitativamente, y jerarquía cuando se realiza de modo cualitativo (Voogd, 1983; en Barredo, 1996).

Una vez asignados los pesos a los criterios, éstos se pueden incluir en una nueva matriz, de prioridades. Una vez establecidas las matrices, es posible acceder a alguno de los procedimientos de EMC, para la asignación de valores a cada alternativa a la luz de los criterios de cada punto de vista, obteniendo la matriz de valoración, en la cual cada alternativa ha obtenido un valor según cada uno de los puntos de vista planteados (Barredo, 1996).

El siguiente paso es elegir un método de EMC, los cuales se diferencian básicamente en los procedimientos aritmético-estadísticos que realizan sobre las matrices de evaluación y de prioridades, con lo cual se obtiene una evaluación final de las alternativas (Barredo, 1996). Este método ha sido recientemente utilizado por Aceves-Quesada *et al* (2006); por Mena *et al* (2006); por Aceves-Quesada *et al* (2007); y por Lagos (2012).

El método de las Jerarquías analíticas tiene la finalidad de comparar la importancia de los factores sobre cada uno de los demás (Mena *et al*, 2006). Este método es conocido en IDRISI como el de Combinación Lineal Ponderada y se basa en el establecimiento de un matriz cuadrada, en la cual el número de filas y columnas estará definido por el número de criterios a ponderar, por lo que es conocida como matriz de comparación simultánea por pares o matriz de comparación pareada. La comparación permite establecer jerarquías o pesos para los criterios, asignando así a cada uno de ellos un valor relativo de ponderación frente a los demás (Aceves-Quesada *et al*, 2006).

CAPÍTULO IV: ÁREA DE ESTUDIO

Dichato está ubicado en la Comuna de Tomé, Región del Biobío, en el centro-sur de Chile, aproximadamente en los 36°33'S y 72°56'W, en la ribera sureste de la bahía Coliumo (Mapa 1).

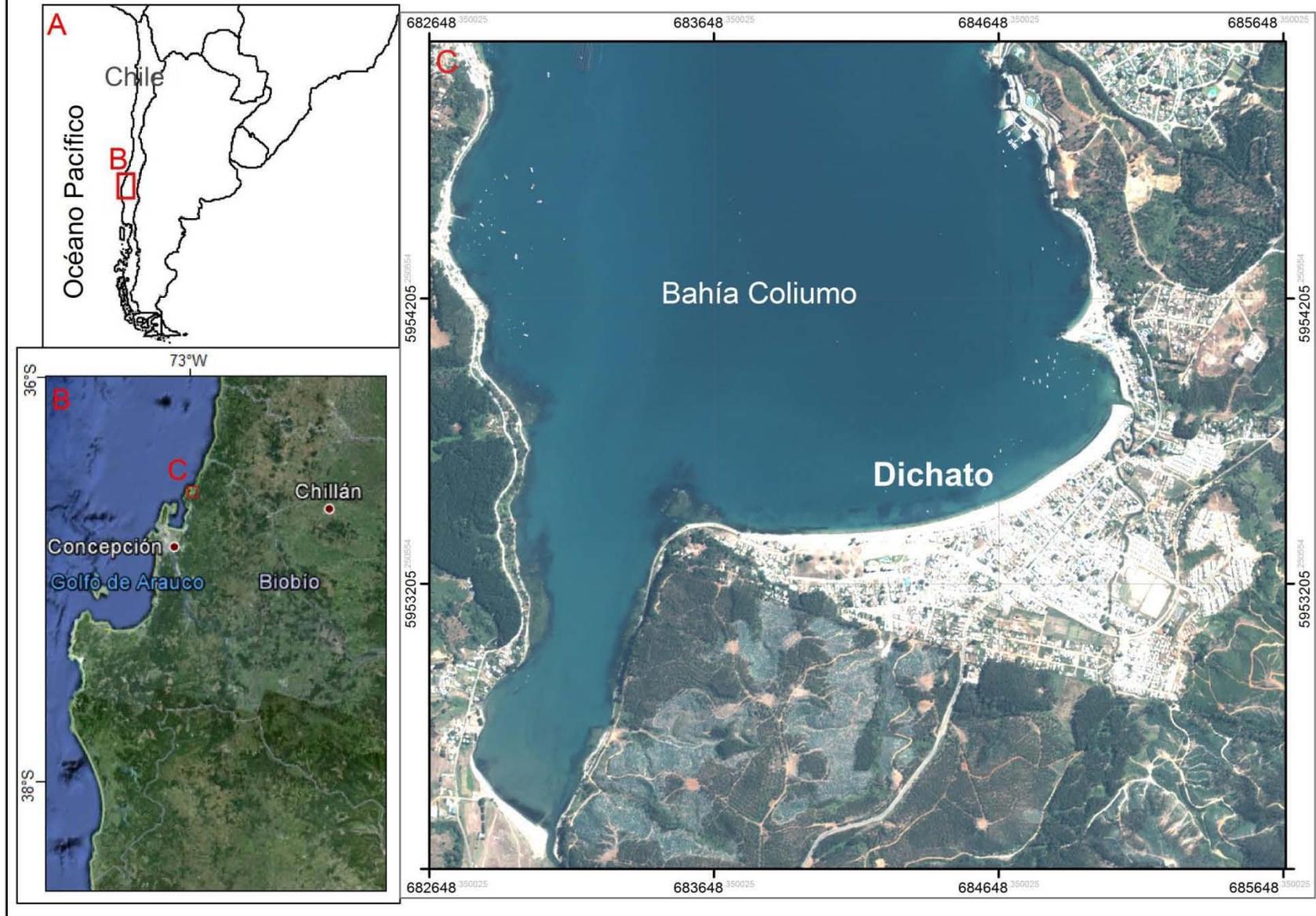
Geomorfológicamente, la comuna de Tomé corresponde principalmente a una planicie litoral, la cual se extiende a lo largo de la Cordillera de la Costa como una franja que se caracteriza por ser homogénea y con planos costeros o terrazas. Estas planicies litorales en general presentan escaso desarrollo y en gran parte la costa baja desaparece, formando una costa acantilada y abrupta formada por niveles de aterramiento.

La bahía Coliumo presenta una configuración de una bahía pequeña y muy cerrada, con orientación norte-sur y su boca está delimitada por Punta Pingueral al este y Punta Blanca al oeste. En ella se encuentra el pueblo de Dichato y las aldeas de Los Morros, Caleta del Medio y Vegas de Coliumo, emplazadas principalmente en la planicie litoral y los pequeños cerros que rodean la bahía (figura 6).

4.1. Población

Según el censo de población realizado el año 2002, Dichato contaba con 3,488 habitantes correspondientes a población urbana y 468 correspondientes a población rural, sin embargo, se estima que para el 27 de febrero de 2010, habría aumentado a 4,046 habitantes (población urbana), con una tasa de crecimiento del 0.16% (PRBC18, 2010; Carstens, y Huepe, 2011).

Área de estudio: Dichato



Mapa 1: Área de Estudio

La población empleada llegaba a un total de 950 personas, de las cuales 216 estarían en el sector primario, 73 en el sector secundario y 661 en el sector terciario (PRBC18, 2010).

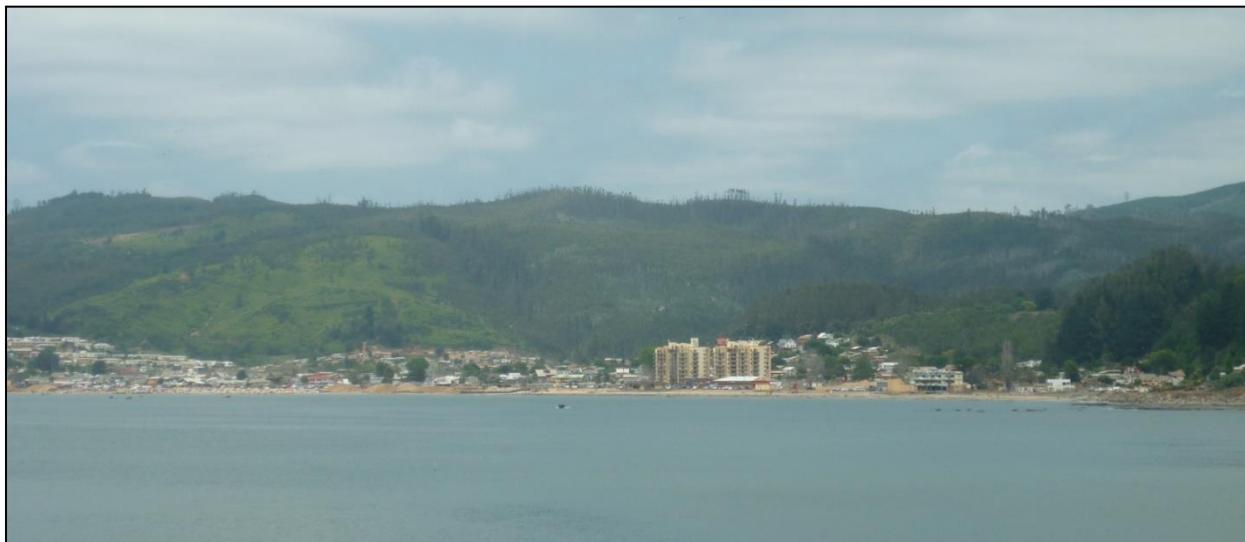


Figura 6: Vista de Dichato desde Caleta del Medio

4.2. Vivienda

En cuanto a la vivienda, para el año 2010 se estimó un total de 1,817 viviendas, y la extensión total del área urbana de Dichato alcanzaba las 122 há (PRBC18, 2010).

Del total de viviendas, un 89.6% contaría con agua potable, un 76.9% con disposición de aguas servidas, un 94.2% con electricidad y un 39.4% tendría acceso a las telecomunicaciones (PRBC18, 2010).

4.3. Infraestructura

En lo que se refiere a infraestructura, existen tres servicios públicos en Dichato, 144 servicios comerciales y ningún servicio financiero. Los espacios públicos con que cuenta el pueblo corresponden a 4.67 m²/hab y las áreas verdes a 1.19 m²/hab (PRBC18, 2010).

En cuanto a equipamiento, cuenta con dos establecimientos deportivos, dos de seguridad, uno de salud, tres establecimientos educacionales y ocho de culto. La infraestructura vial se ha estimado en 3.41 metros lineales de calles pavimentadas por habitante (PRBC18, 2010).

4.4. Economía

Actualmente el motor económico de Dichato se sustenta casi exclusivamente del turismo; tanto en la oferta de servicios especializados -alojamiento, paseos, cocinerías-, como en el fomento del comercio local (Carstens, y Huepe, 2011).

Otras actividades económicas importantes en Dichato son la pesca y la extracción de mariscos, las cuales están catalogadas como la segunda actividad más importante después del turismo, y también muy ligado a éste (figura 7). En la actualidad, la producción pesquera está destinada casi exclusivamente a abastecer a los restaurantes locales, y los pescadores también ofrecen servicios de paseos en bote y de pesca (Carstens, y Huepe, 2011).

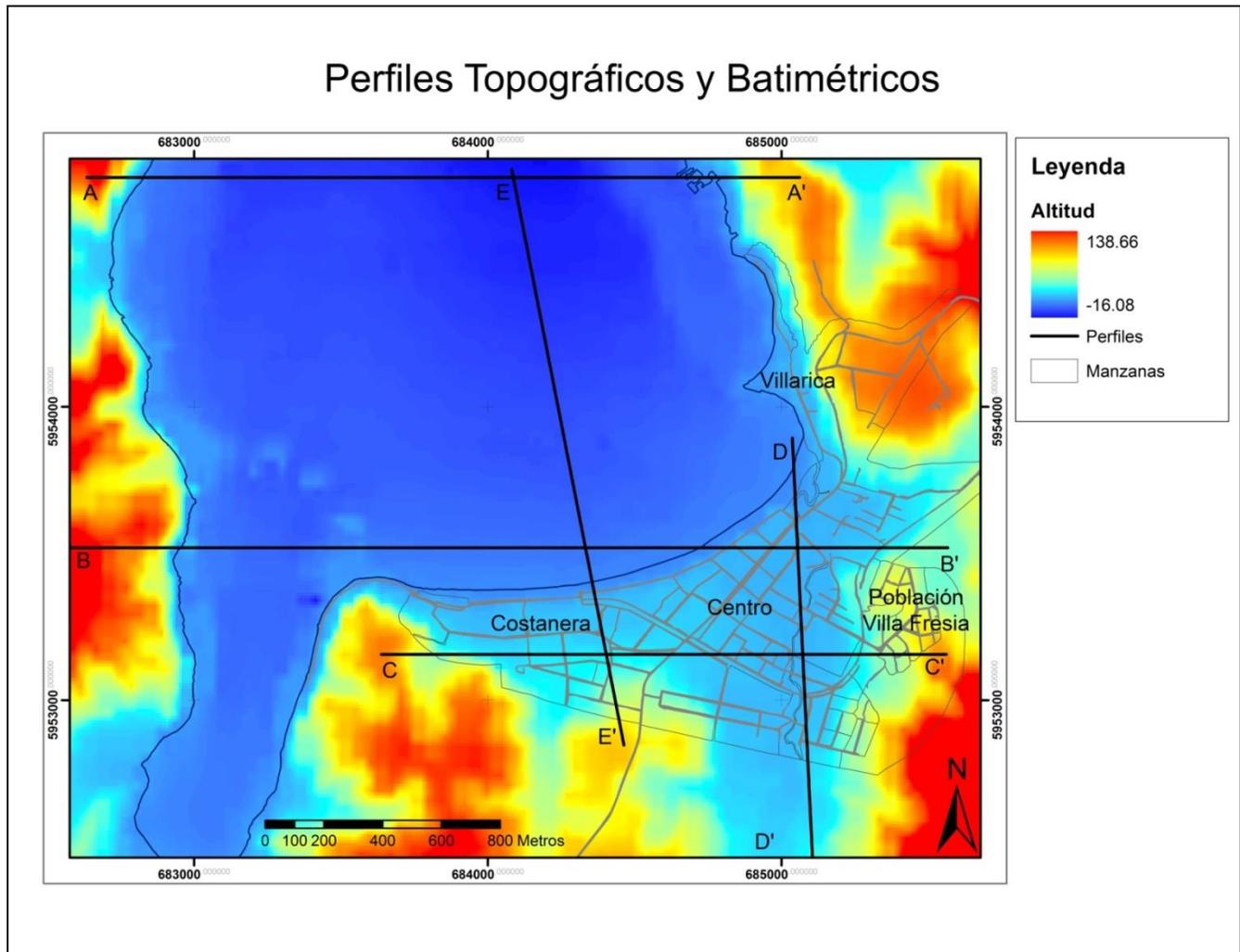


Figura 7: Caleta de pescadores en Dichato

4.5. Morfología costera

Un aspecto importante al evaluar el impacto de un tsunami es considerar las características del fondo marino contiguo al área de estudio. El pueblo de Dichato no se encuentra emplazado en mar abierto, sino que está en la ribera sureste de la bahía Coliumo, lo que le confiere características morfológicas específicas que condicionan la forma en que el tsunami llega a la costa e inunda hacia el interior.

Con el fin de caracterizar la morfología costera de la bahía Coliumo y de Dichato en particular, se generaron cinco perfiles que ilustran la topografía y batimetría del área de estudio. La localización de los perfiles se puede observar en el Mapa 2.



Mapa 2: Perfiles Topográficos y Batimétricos

El perfil A-A' fue trazado en dirección W-E, perpendicular al eje de la bahía, y cerca de la boca de ésta. En él se puede observar que el fondo de la bahía presenta una forma de U, con una base muy plana y poco profunda, con aproximadamente 1.7 km de ancho y una profundidad máxima cercana a los -20 m (Figura 8).

En lechos marinos poco profundos, la altura del tsunami tiende a aumentar, ya que ésta es inversamente proporcional a la profundidad del agua. Así mismo, la

profundidad afecta la velocidad de propagación, cuanto más somera es el agua, más lenta es la propagación. Esto causa concentración del agua por desaceleración y se amplifica el tsunami hacia el interior (COI, 2008).

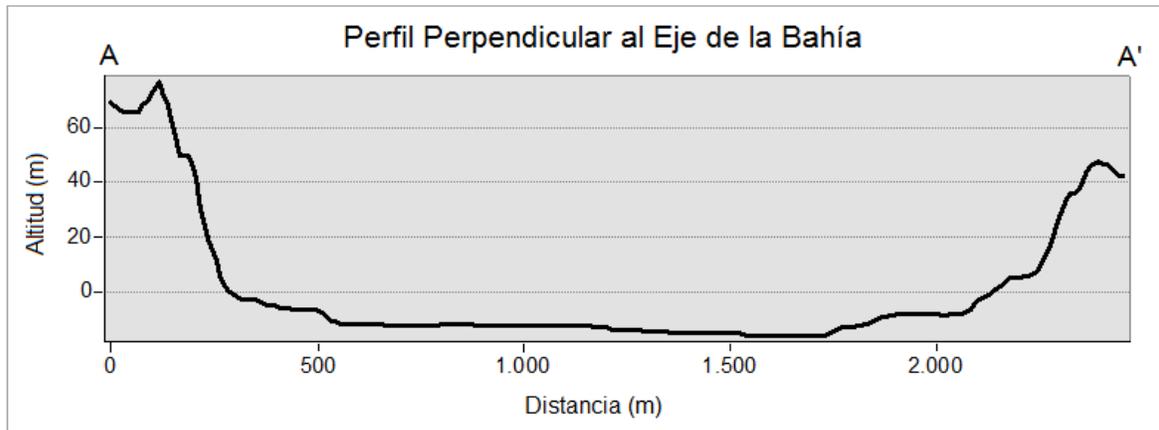


Figura 8: Perfil A-A', perpendicular al eje de la bahía

El perfil B-B' también fue trazado en dirección W-E, perpendicular al eje de la bahía, pero a la altura de la ribera sur, paralelo a la costa de Dichato. La topografía es muy similar al perfil anterior, la bahía presenta un fondo relativamente plano y somero, con una profundidad máxima cercana a los -10 m. En este caso, se puede observar que la ribera oriental de la bahía no es abrupta, sino que se proyecta hacia la superficie con una pendiente muy suave, en lo que corresponde a la planicie litoral, donde se emplaza Dichato (Figura 9).

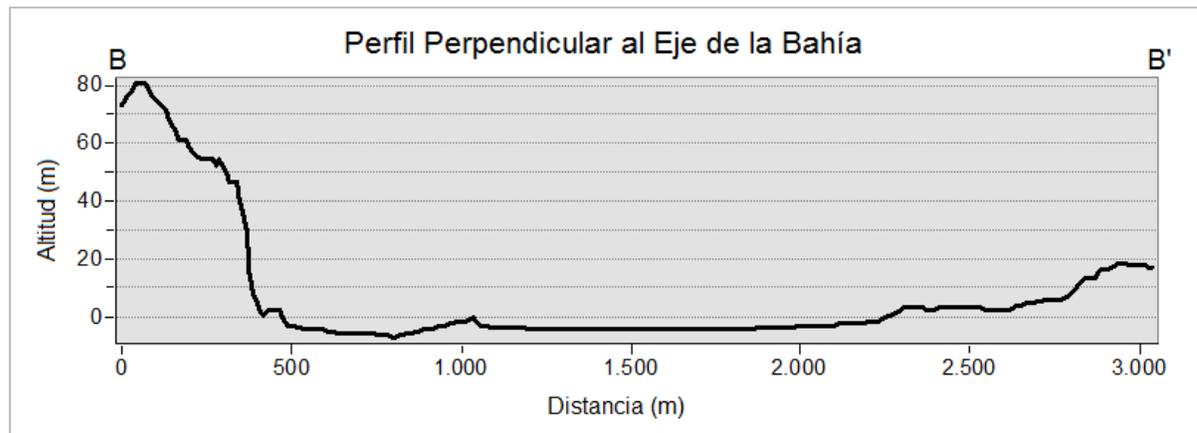


Figura 9: Perfil B-B', perpendicular al eje de la bahía

El perfil C-C' fue trazado paralelo al perfil B-B' y perpendicular al Estero Dichato, cruzando el pueblo de W a E, por lo que se puede observar que prácticamente todo el pueblo se encuentra en un sector plano, que es cruzado en su vertiente oriental por el estero Dichato, donde se presenta un sector más deprimido. (Figura 10).

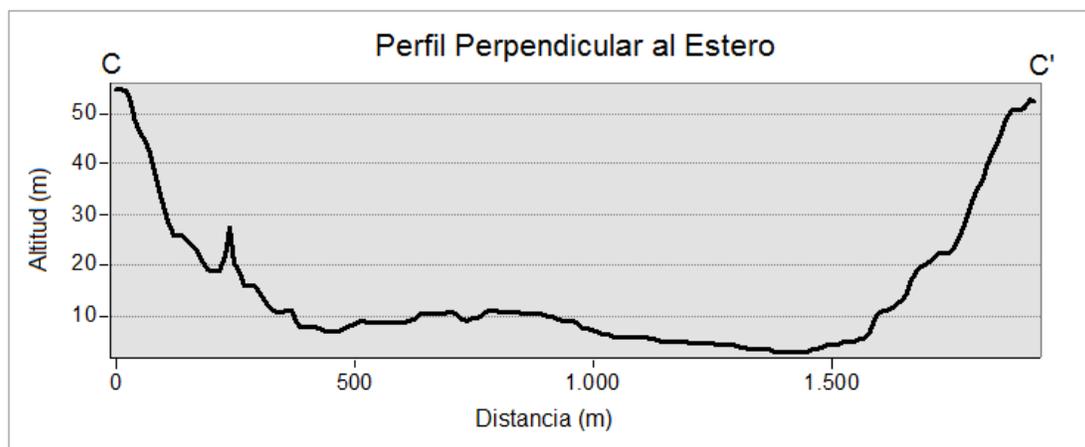


Figura 10: Perfil C-C', perpendicular al estero

El perfil D-D' fue trazado paralelo al estero Dichato y perpendicular a los perfiles B-B' y C-C', en dirección N-S. Los primeros 200 m del perfil se encuentran bajo el nivel del mar, posteriormente se presenta un cambio de pendiente entre los 0 y 2.5 m.s.n.m, correspondiente a la playa de Dichato. A partir de los 250 m aproximadamente desde el inicio del perfil, se puede observar que todo el curso del estero que cruza el pueblo de Dichato es relativamente plano, hasta los 1,200 m desde el inicio del perfil, donde hay un cambio de pendiente, marcando el inicio de los cerros costeros. Se observa que prácticamente todo el curso del estero donde se emplaza gran parte del pueblo se encuentra bajo la cota 10 m (Figura 11).

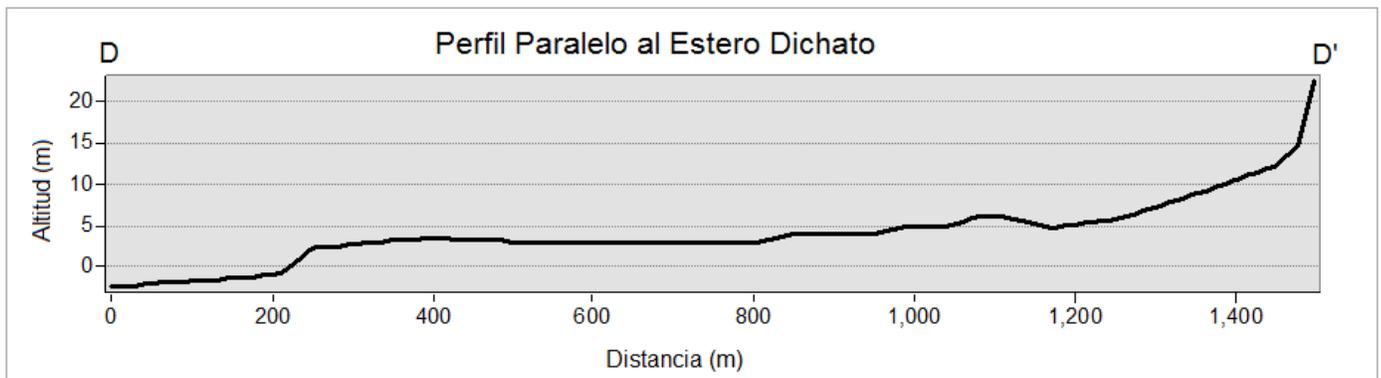


Figura 11: Perfil D-D', paralelo al Estero Dichato

El perfil E-E' fue trazado paralelo al eje de la bahía y casi perpendicular a los tres primeros perfiles, en dirección NW-SE. En él se observa que la bahía es una rampa continua, de aproximadamente 1.5 km de longitud, con pendiente muy suave, presentando un quiebre en la línea de costa, desde donde aumenta su inclinación hacia el interior (Figura 12).

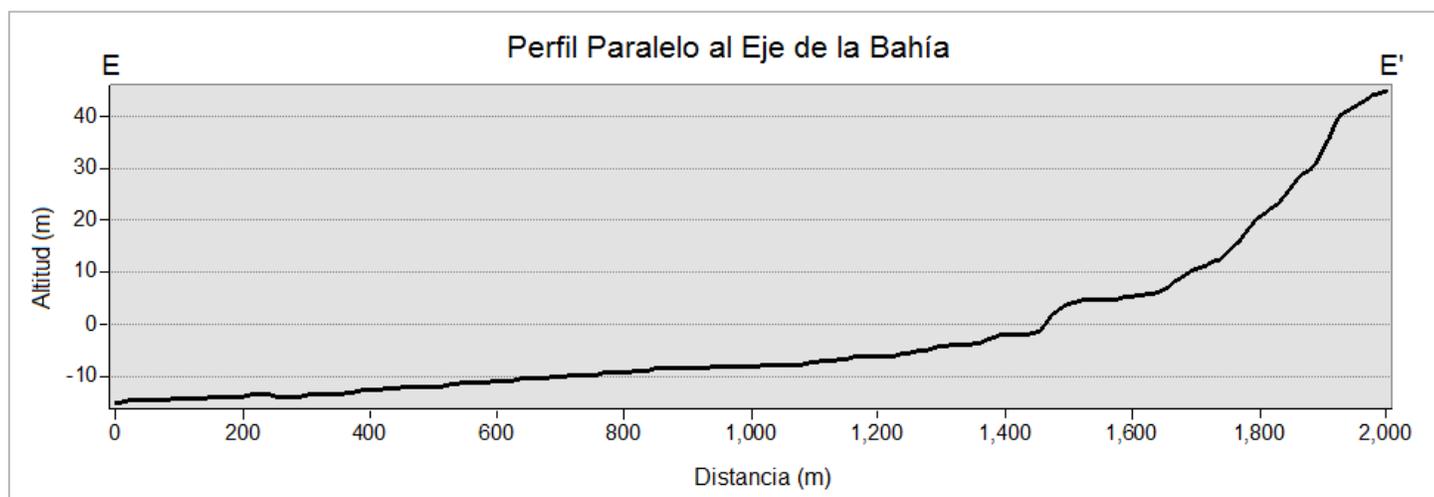


Figura 12: Perfil E-E', paralelo al eje de la bahía

4.6. Caracterización del terremoto y tsunami del 27 de febrero de 2010

4.6.1. Características del sismo generador

El terremoto ocurrido el 27 de febrero de 2010 a las 03:34 a.m. (hora local) en la zona central de Chile tuvo una magnitud M_w de 8.8 y se originó debido al desplazamiento súbito de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana en un área estimada de 450 km de longitud en dirección prácticamente norte-sur, por un ancho de unos 150 km, extendiéndose aproximadamente desde Punta Topocalma en la Región de O'Higgins (34.14°S) hasta Isla Mocha en el sur de la Península de Arauco en la Región de la Araucanía (38.41°S). En la figura 13 se puede observar la ubicación aproximada del área de ruptura. Se estima que el desplazamiento alcanzó más de 10 m. El hipocentro del sismo se ubicó en los $36^\circ 12' 28''$ S y $72^\circ 57' 46''$ W, a una profundidad estimada de 47 km (SSN, 2010; Vargas *et al*, 2011). El epicentro se localizó aproximadamente a 335 km al SW de Santiago, y a 105 km al NNE de Concepción.

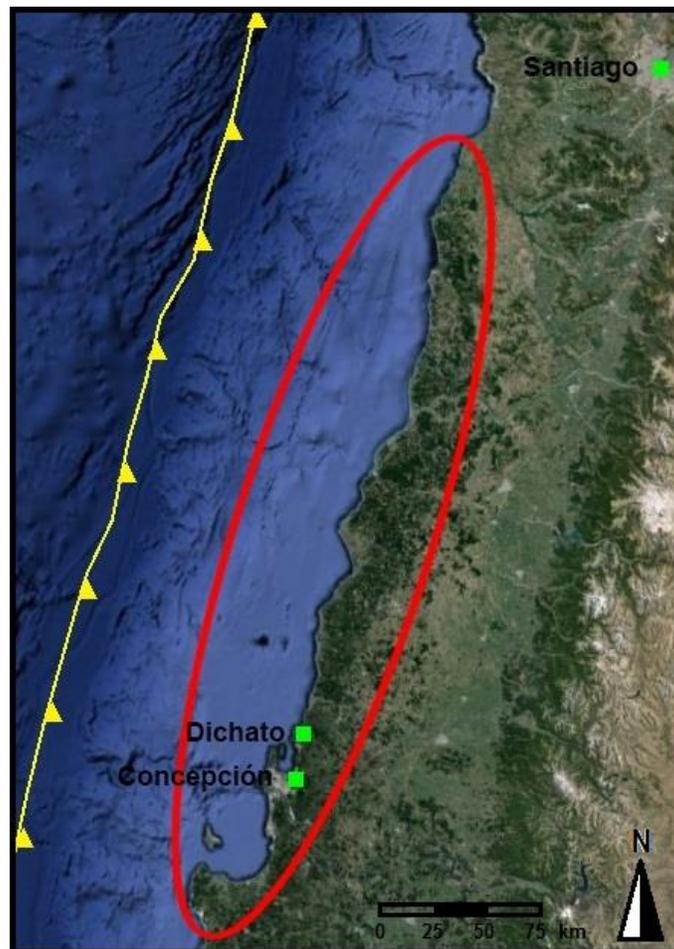


Figura 13: Zona de Ruptura del Terremoto del 27/02/2010 (Basado en Moreno et al, 2010)

4.6.2. Características del tsunami

El terremoto del 27 de febrero de 2012 generó un tsunami destructivo de magnitud 4 (Martínez *et al*, 2011), que es considerado como el último tsunami importante después del ocurrido en 1960 (Lagos *et al.*, 2010), el cual no sólo afectó las costas de Chile, sino que se propagó por el Océano Pacífico, alcanzando las costas de Japón.

Las máximas alturas de tsunami se registraron en acantilados y cerros costeros (superiores a 25 m). Sin embargo, el mayor impacto ocurrió en pequeñas bahías y

desembocaduras de ríos orientadas al norte, teniendo como resultado la destrucción total o parcial de los asentamientos humanos localizados en zonas de baja altitud (Lagos *et al.*, 2010).

Las variaciones de cómo el tsunami afectó diferentes áreas de la bahía Coliumo son dramáticas. Por una parte, las casas localizadas directamente frente al Pacífico en Necochea experimentaron olas pequeñas y daños menores; la mayoría de las casas construidas al interior de la bahía Coliumo fueron barridas completamente, en especial las que se encontraban a menos de 5 m sobre el nivel del mar (GEER Team, 2010).

Según testigos, en Dichato el tsunami llegó a sus costas a las 5:00 am y atacó al menos tres veces (los testimonios varían entre tres y cinco veces) siendo la tercera ola la más grande y destructiva (Koshimura *et al.*, 2010; Villalobos *et al.*, 2011), afectando una superficie estimada de 0.85 km² (Martínez *et al.*, 2011).

Según el GEER Team (2010), la mayoría de los residentes de Dichato concuerda que la primera ola arribó aproximadamente una hora después del terremoto. Un segundo set de olas entró a la bahía Coliumo entre las 6:30 y 7:00 am. Una tercera oleada penetró a la bahía aproximadamente a las 10:00 am. Dependiendo de la localización, las olas más grandes y más destructivas fueron el segundo y tercer set de olas.

CAPÍTULO V: MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Factores que condicionan el riesgo del pueblo de Dichato frente a la amenaza de tsunami

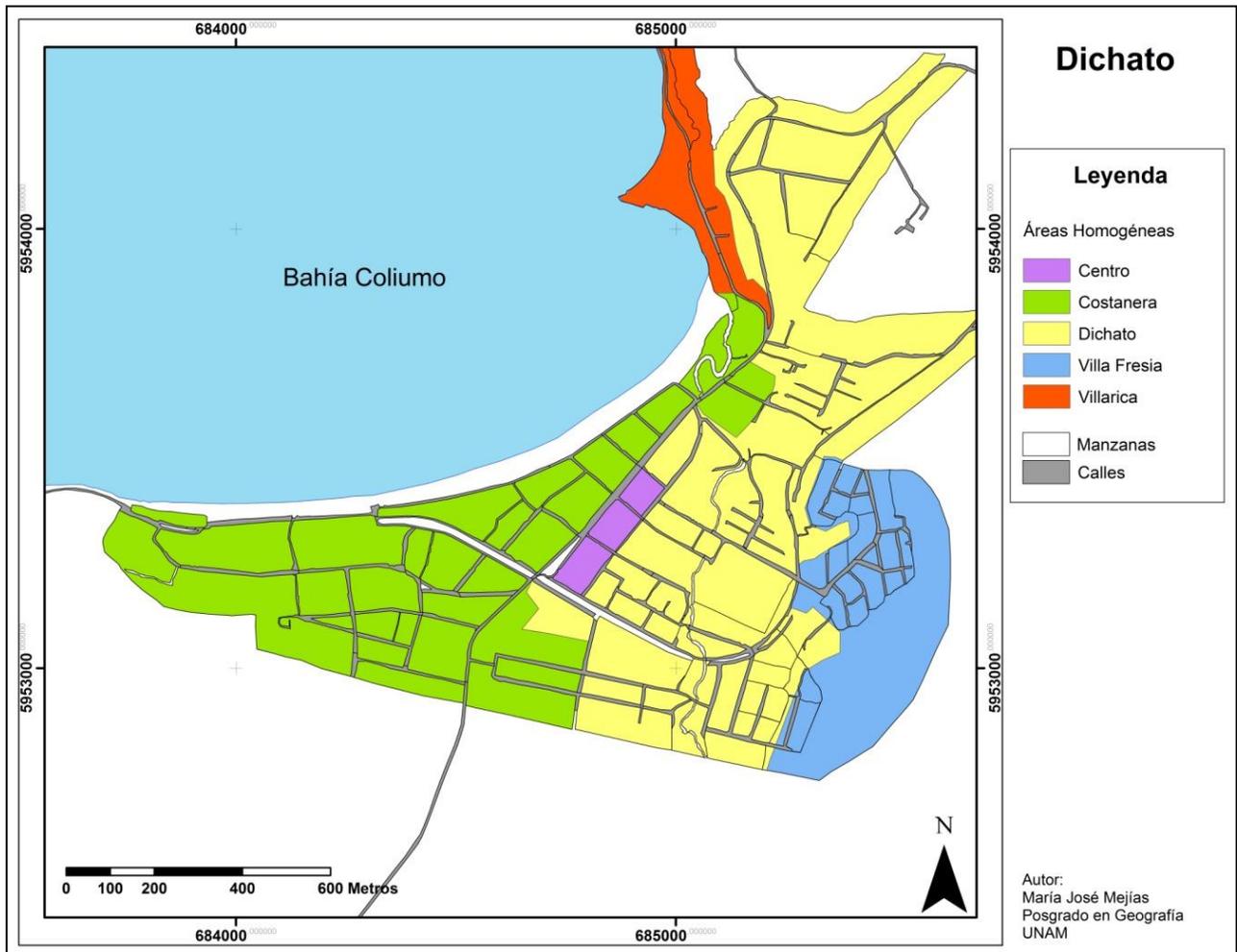
El primer paso para espacializar el riesgo en el pueblo de Dichato fue determinar los factores que permitan discriminar el riesgo de tsunami, los cuales fueron extraídos y modificados de los utilizados por Lagos (2012) y por Koshimura *et al* (2009).

Los factores escogidos se dividieron en dos grandes criterios: amenaza de tsunami y susceptibilidad física frente a un tsunami, los cuales se presentan a continuación.

Para facilitar el análisis de cada factor se consideraron las áreas homogéneas delimitadas por la Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo de la Región del Biobío, en el Diagnóstico y Evaluación del Plano Regulador Comunal de Tomé, las cuales corresponden a los sectores Centro, Costanera, Dichato, Villarica y Villa Fresia (Mapa 3).

5.1.1. Amenaza de tsunami

El escenario utilizado para espacializar la amenaza de tsunami, fue un modelo de inundación de tsunami realizado por el Laboratorio de Investigación de Tsunami del Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Este escenario representa un tsunami generado por un terremoto magnitud 8.8 similar a lo ocurrido el 27 de febrero de 2010.



Mapa 3: Áreas homogéneas

De este modelo, los parámetros hidrodinámicos máximos de la inundación utilizados como factores para caracterizar la amenaza de tsunami fueron profundidad de inundación, fuerza hidrodinámica de la corriente y velocidad de la corriente como principales condicionantes de la peligrosidad.

Según con lo descrito por Lagos (2009), para validar los parámetros hidrodinámicos utilizados, se realizó la determinación del coeficiente de correlación r , entre las profundidades de inundación levantadas en campo por

Koshimura *et al* (2010) y las profundidades de inundación obtenidas en el modelo, donde:

$$r = \frac{\sum_t (O_t - \bar{O}) (M_t - \bar{M})}{\sqrt{\sum_t (O_t - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_t (M_t - \bar{M})^2}}$$

\bar{O} y \bar{M} son las medias de las profundidades de inundación observadas O_t y modeladas M_t . Un valor de r alto (máximo 1.0) implica un buen ajuste entre las profundidades de inundación observadas y modeladas.

Las coberturas digitales de los parámetros hidrodinámicos se encontraban en formato vectorial y con el sistema de coordenadas geográficas (Lat/Long) con el Datum WGS 84, uso 18 sur, por lo que se rasterizaron a una matriz común, compuesta de 214 columnas y 198 filas que cubren el área de estudio con celdas de 10 metros de resolución espacial, y fueron re proyectadas a coordenadas UTM, manteniendo el Datum WGS 84, uso 18 sur, lo cual se realizó en el programa Idrisi Selva.

Para definir la importancia de cada factor, se definieron funciones mediante el método de lógica borrosa (Ghribi, 2005). Estas funciones permitieron definir en cada criterio espacial, el grado de pertenencia que tiene cada pixel a un determinado conjunto; en este caso, el conjunto de datos espaciales que permiten identificar el grado de amenaza y susceptibilidad ante tsunami. Para cada factor, el grado de pertenencia fue normalizado en un rango de valores de celda de 0 a 255. Este proceso se realizó en el módulo FUZZY del SIG IDRISI Selva.

Para la velocidad de la corriente de tsunami, se utilizó una función en forma de J monotónicamente incremental. Los valores de velocidad para determinar los puntos de control se tomaron de Koshimura *et al* (2009), quienes determinan que las viviendas comienzan a ser más susceptibles cuando la velocidad de la corriente alcanza los 2.5 m/s, transformándose en absolutamente destructivos

cerca de los 4 m/s. Como ejemplo, en la figura 14 se muestra el máximo valor modelado para la velocidad de la corriente (9.26 m/s), en las áreas inundadas por el tsunami de 2010 en Dichato.

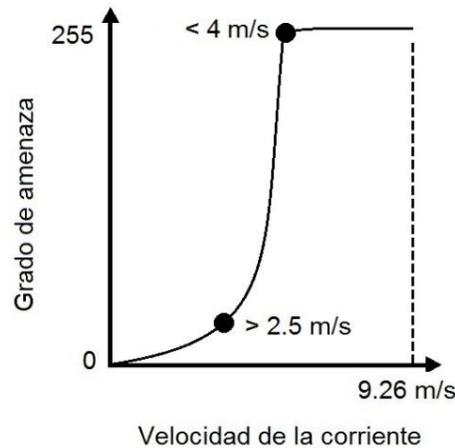


Figura 14: Función para la velocidad de la corriente de un tsunami

Para la profundidad de la inundación también se utilizó una función en forma de J monotónicamente incremental. Según lo descrito por Koshimura y Yanagisawa (2007), se definieron los puntos de control, considerando que las viviendas comienzan a ser afectadas a partir de los 2 metros de profundidad y llegando a ser completamente destruidas a los 5 metros. Se consideró estos valores por ser el promedio de lo propuesto por diversos autores entre ellos Koshimura *et al* (2009), quienes proponen el rango de 2 a 6 metros de profundidad y Reese *et al* (2007), que definieron el rango entre los 2 y 4 metros de profundidad. La figura 15 presenta el máximo valor modelado para la profundidad de la inundación (6.8 m) en Dichato.

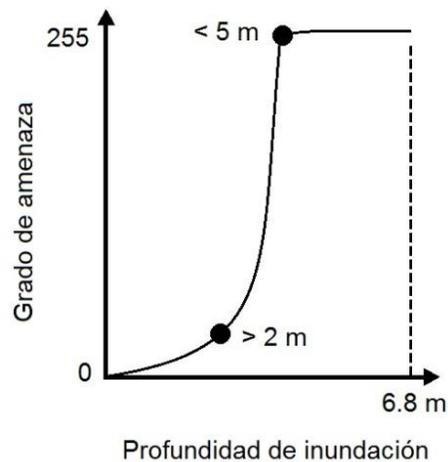


Figura 15: Función para la profundidad de inundación de un tsunami

Para la fuerza hidrodinámica de la corriente se utilizó una función en forma de J monótonicamente incremental, donde los puntos de control se definieron según lo descrito por Koshimura *et al* (2009), quienes consideran que las viviendas son susceptibles a la fuerza hidrodinámica a partir de los 5 kN/m y llegan a ser completamente destruidas a partir de los 15 kN/m. En la figura 16 se puede observar la máxima fuerza hidrodinámica de la corriente modelada para Dichato (116.51 kN/m).

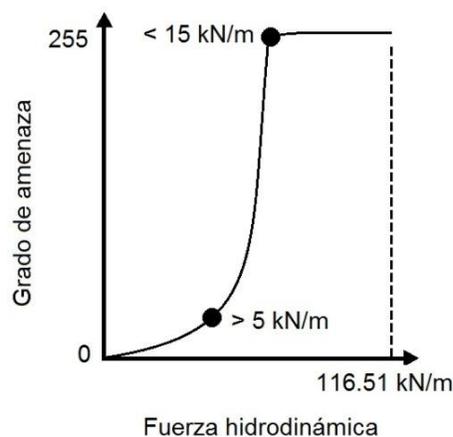


Figura 16: Función para la fuerza hidrodinámica de la corriente de un tsunami

5.1.2. Susceptibilidad física frente a un tsunami

Los factores utilizados para determinar susceptibilidad física hacen referencia principalmente a las condiciones físicas del área de estudio antes del tsunami. Estos factores se agruparon en dos criterios, los cuales son exposición y susceptibilidad de las viviendas.

a) Exposición: Este primer criterio pretende caracterizar cuáles son las condiciones espaciales que hacen a Dichato susceptible frente a la amenaza de tsunami. Los factores considerados son:

- Altitud
- Pendiente
- Distancia a la línea de costa
- Distancia al Estero Dichato

Estos factores fueron calculados en base a un modelo digital de terreno (MDT), generado por el Laboratorio de Investigación de Tsunamis del Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile, el cual tiene una resolución espacial de 10 m. Este modelo digital de terreno fue generado posterior al sismo del 27 de febrero de 2010, sin embargo de acuerdo a Quesada *et al* (2010), no se han encontrado evidencias de deformación co-sísmica en el área, por lo cual el modelo es válido también para caracterizar la topografía de antes del terremoto.

El MDT tenía el sistema de coordenadas geográficas (Lat/Long) con el Datum WGS 84, uso 18 sur, por lo que fue re proyectado a coordenadas UTM, manteniendo el Datum y el uso, en el programa Idrisi Selva.

b) Susceptibilidad de las viviendas: Con este criterio se busca caracterizar las condiciones que hacen más susceptibles a las viviendas de Dichato, frente al impacto del tsunami. Los factores utilizados son:

- Densidad de viviendas por manzana
- Porcentaje de viviendas con materiales poco resistentes
- Porcentaje de viviendas precarias

Estos factores fueron extraídos del Censo 2002, mediante el programa Redatam y se procesaron a nivel de manzanas urbanas, las cuales están definidas por el Censo 2002, realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas de Chile y que corresponden a la mínima unidad de análisis disponible. La cobertura digital de las manzanas urbanas estaba en formato vectorial y se encontraba en coordenadas UTM, en el Datum PSAD 1956, uso 18 sur, por lo que se rasterizaron a una matriz común, compuesta de 214 columnas y 198 filas que cubren el área de estudio con celdas de 10 metros de resolución espacial, y se re proyectó al Datum WGS 84, uso 18 sur, lo cual se realizó en el programa Idrisi Selva.

El pueblo de Dichato es predominantemente residencial, y el poco comercio existente presenta condiciones de materialidad de las construcciones muy similar a las viviendas, por lo que la información censal se extrapola a toda la manzana.

Al igual que en el criterio de amenaza de tsunami, se definió la importancia de cada factor a través de funciones realizadas mediante el método de lógica borrosa (Ghribi, 2005). Para cada factor, el grado de pertenencia fue normalizado en un rango de valores de celda de 0 a 255. Este proceso se realizó en el módulo FUZZY del SIG IDRISI Selva.

La Altitud se consideró como una limitante al ingreso del tsunami tierra adentro, al constituir una forma de fricción al ingreso del agua. Se aplicó una función lineal de forma monotónica decreciente, considerando que a mayor altitud, menor

probabilidad de que ingrese el tsunami, por lo tanto, menor es la exposición. Se debe considerar que gran parte de las manzanas de Dichato se encuentran en sectores bajo la cota 7 m. La figura 17 presenta la máxima altitud (136 m) en el área de estudio.

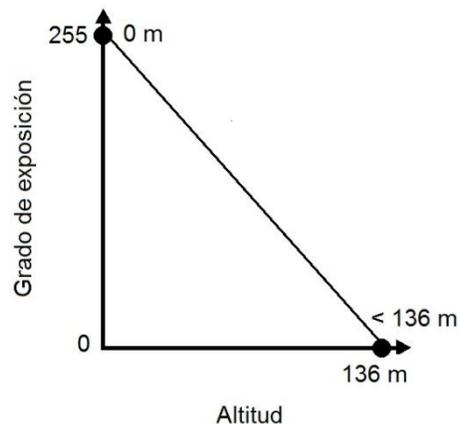


Figura 17: Función para la altitud

La pendiente del terreno también se consideró como un factor que dificulta el ingreso del tsunami. Para ello, se determinó una función lineal de forma monotónica decreciente, donde la exposición disminuye al aumentar la pendiente. En la figura 18 se puede observar la máxima pendiente del terreno en Dichato (49.72°).

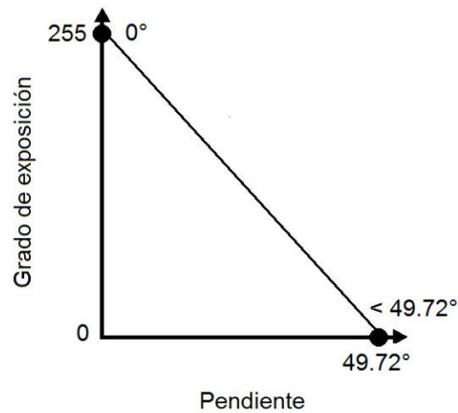


Figura 18: Función para la pendiente del terreno

La distancia a la línea de costa se determinó mediante una función lineal monotónica decreciente, en donde la máxima exposición corresponde a estar ubicado en la línea de costa y disminuye tierra adentro, considerando que con la distancia se está más lejos del origen del tsunami, y por consiguiente éste va perdiendo fuerza al avanzar. El punto de control **a** corresponde a la línea de costa, es decir, distancia cero y el punto de control **b** corresponde a 1,433.30 m, la máxima distancia que se puede alcanzar dentro del área de estudio (Figura 19).

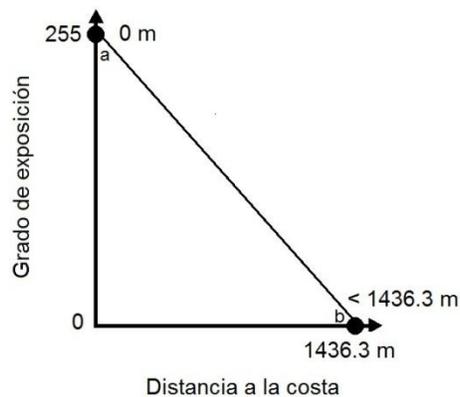


Figura 19: Función para la distancia a la línea de costa

La distancia al Estero Dichato se consideró porque tuvo una importante influencia al encauzar el agua y facilitar su ingreso hacia el interior del área urbana. La distancia al estero se determinó mediante una función lineal monotónica decreciente, donde la máxima exposición corresponde a estar ubicado en los márgenes del río y disminuye a medida que aumenta la distancia. El punto de control **a** corresponde a 0 m, y el punto de control **b**, a 1,492.60 m, que corresponde a la máxima distancia que se puede alcanzar dentro del área de estudio (Figura 20).

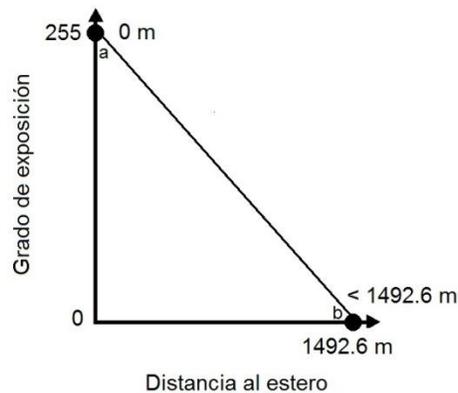


Figura 20: Función para la distancia al estero Dichato

La densidad de viviendas por manzana se determinó mediante una función lineal de forma monotónica incremental. Se consideró que a medida que aumenta la densidad de viviendas, aumenta la susceptibilidad. El punto de control **a** corresponde a una superficie sin viviendas, por lo que su grado de susceptibilidad es 0. A medida que aumenta la densidad, aumenta su grado de susceptibilidad. El punto máximo **b**, corresponde a la mayor densidad registrada en el área de estudio, la cual fue de 55.2 viv/ha (Figura 21).

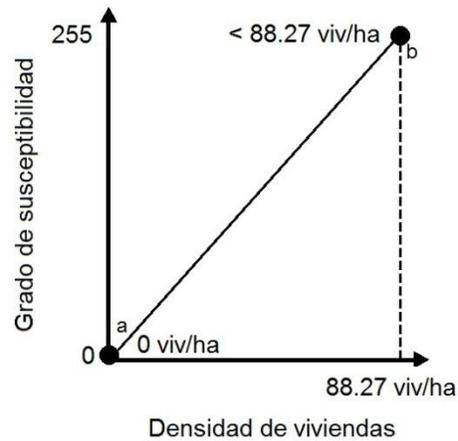


Figura 21: Función para la densidad de viviendas por manzana

El porcentaje de viviendas precarias se consideró como un factor que influye en la resistencia y estabilidad de las casas ante el flujo de agua, por lo tanto se determinó mediante una función lineal monótonica incremental, donde el punto de control **a** corresponde a las manzanas con 0% de viviendas precarias y el punto de control **b** a las manzanas con un 100% de viviendas precarias (Figura 22). Se considera viviendas precarias a las casas con piso de tierra, departamento con piso de tierra, mediagua, chozas, rancho o ruca, de acuerdo al Observatorio Social del Ministerio de Desarrollo Social del Gobierno de Chile (Glosario on line).

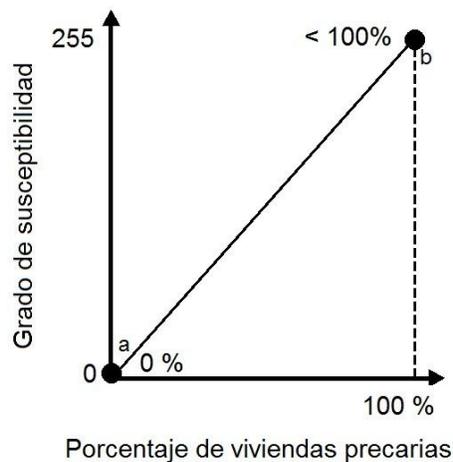


Figura 22: Función para el porcentaje de viviendas precarias

El porcentaje de viviendas con materiales poco resistentes también es un factor que influye en la resistencia y estabilidad de las casas frente al tsunami y se calculó en base al número de viviendas construidas con paredes de madera, tabique forrado, internit, adobe, barro empajado o desechos (lata, cartones, plástico, etc.), sobre el total de viviendas de cada manzana. Se utilizó una función lineal monótonica incremental, donde la mayor susceptibilidad corresponde a un 100% de viviendas con materiales poco resistentes (Figura 23).

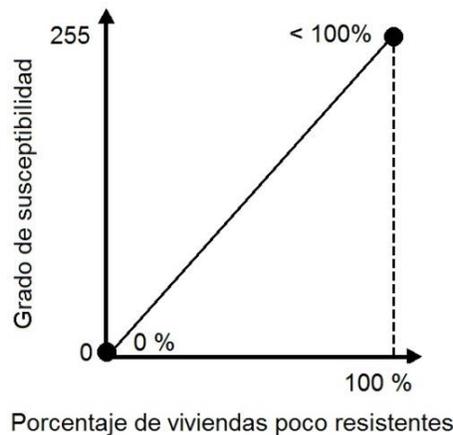


Figura 23: Función para el porcentaje de viviendas con materiales poco resistentes

En la figura 24 se puede observar una vivienda de concreto que resistió el impacto del tsunami, aunque perdió el techo, que probablemente era de madera.



Figura 24: Estructura de concreto que resistió parcialmente el impacto del tsunami en Dichato

Shuto (1993) realiza un análisis del el impacto producido por diferentes tsunamis en viviendas, al relacionar el tipo de construcción y la profundidad de la inundación, donde se puede observar como las construcciones livianas son las más afectadas en comparación con las estructuras de concreto reforzado (Figura 25).

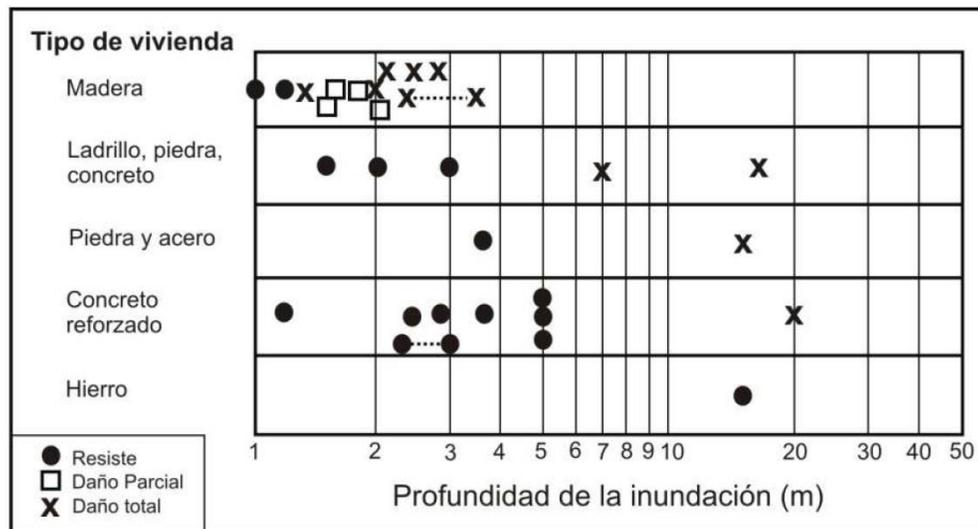


Figura 25: Grado de daño según tipo de vivienda y profundidad de inundación (Shuto, 1993, en Lagos et al, 2008)

5.2. Zonificación de áreas de riesgo de tsunami

De acuerdo a lo propuesto por Lagos (2009), la zonificación de riesgo de tsunami se realizó en el programa IDRISI, mediante la integración de los factores identificados en el punto 3.1.2.

Para llevar a cabo la zonificación se utilizó el método de Evaluación Multicriterio, incluido en el SIG mencionado anteriormente, en el módulo de *Decision Wizard*.

Una vez ponderados y normalizados los factores, se definieron tres capas-objetivo para espacializar: I. la amenaza de tsunami diferenciada (ATD); II. la exposición (E); y III. la susceptibilidad de las viviendas (SV), que corresponden a los criterios utilizados para zonificar el riesgo de tsunami.

Para espacializar la amenaza de tsunami diferenciada (ATD), se integró la profundidad de inundación, la fuerza hidrodinámica de la corriente y la velocidad de la corriente. Considerando que a medida que aumenta la magnitud de las variables, sus potenciales de daño se incrementan. Se asignaron a cada criterio

pesos equivalentes a 0.33, es decir, los tres criterios poseen la misma importancia. Por lo tanto, en las celdas donde se presenten las mayores velocidades de la corriente, las mayores profundidades de inundación y la mayor fuerza hidrodinámica, existirá una mayor amenaza de tsunami.

Debido a que el estudio se realizó a nivel de manzanas urbanas y la amenaza de tsunami diferenciada presentaba variabilidad de valores dentro de una misma manzana, se determinó que cada manzana tomaría el mayor valor de amenaza que presentara dentro de sus límites.

Para determinar la exposición (E) ante la amenaza de tsunami, se integro la altitud; la pendiente del terreno; la distancia a la línea de costa; y la distancia al estero Dichato. En este caso, para atribuir pesos diferenciados a los criterios, se utilizó el algoritmo de Jerarquías Analíticas *AHP* (*Analytical Hierarchy Process*), el cual utiliza una matriz de comparación por pares, en la cual se evalúa la importancia de cada factor respecto a los otros, según la siguiente escala:

Comparación por Pares: Escala de Comparación Continua 9 puntos								
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extremadamente	Muy fuertemente	Fuertemente	Moderadamente	Igual	Moderadamente	Fuertemente	Muy fuertemente	Extremadamente
Menos Importante				Más Importante				

Tabla 2: Escala de Comparación Continua

Al aplicar la escala a los factores que determinan la exposición se obtuvo una matriz, en la que se consideró al factor distancia a la línea de costa como igual de importante al factor distancia al estero Dichato. Ambos factores son moderadamente más importantes que el factor altitud y fuertemente más importantes que el factor pendiente. El factor altitud es moderadamente más importante que el factor pendiente (Tabla 3).

Para determinar los pesos relativos de cada factor se tomaron en consideración los perfiles analizados en el punto 4.5., de manera que estuvieran representadas también las condiciones morfológicas del área de estudio en la generación del criterio exposición.

	Distancia a la línea de costa	Distancia al estero Dichato	Altitud	Pendiente
Distancia a la línea de costa	1			
Distancia al estero Dichato	1	1		
Altitud	1/3	1/3	1	
Pendiente	1/5	1/5	1/3	1

Tabla 3: Matriz de Comparación por Pares

Los pesos asignados a cada criterio fueron: 0.1524 para la altitud; 0.0679 para la pendiente del terreno; 0.3899 para la distancia a la línea de costa y para la distancia al estero Dichato. La validez de los pesos asignados se calculó mediante el Índice de Consistencia propuesto por Saaty (1987), arrojando una razón de consistencia aceptable (IC = 0.02).

Al igual que el resultado de la amenaza de tsunami diferenciada, el resultado de la exposición presentaba diversos valores dentro de una manzana, por lo que se le asignó a cada manzana el máximo valor de exposición que presentaba dentro de sus límites.

Para espacializar la susceptibilidad de las viviendas (SV), se integraron los criterios densidad de viviendas, porcentaje de viviendas con materiales poco resistentes y porcentaje de viviendas precarias en el área de estudio. Considerando que la susceptibilidad ante tsunami aumenta a medida que se

incrementa el valor de los tres factores, se asignaron a cada criterio pesos equivalentes a 0.333, es decir, los tres poseen la misma importancia.

El producto de la exposición (E) y la susceptibilidad de las viviendas (SV), permitió obtener la susceptibilidad física (SF), donde el producto de esta última (SF) con la amenaza de tsunami diferenciada (ATD), permitió zonificar el riesgo de tsunami (ZRT). Para cada mapa resultante, se definieron cinco rangos mediante el método de los quiebres naturales en el SIG ArcGIS 9.3. Los rangos se dividieron en muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo.

El método de los quiebres naturales identifica separaciones naturales en los datos y generando diferentes clases, de acuerdo a esas separaciones. El proceso se realiza iterativamente, eligiendo la mayor separación entre valores adyacentes en una línea numérica como la primera localización del quiebre de clases. La siguiente mayor separación es elegida segunda, y así sucesivamente hasta crear el número de clases deseado (McGrew y Monroe, 2000).

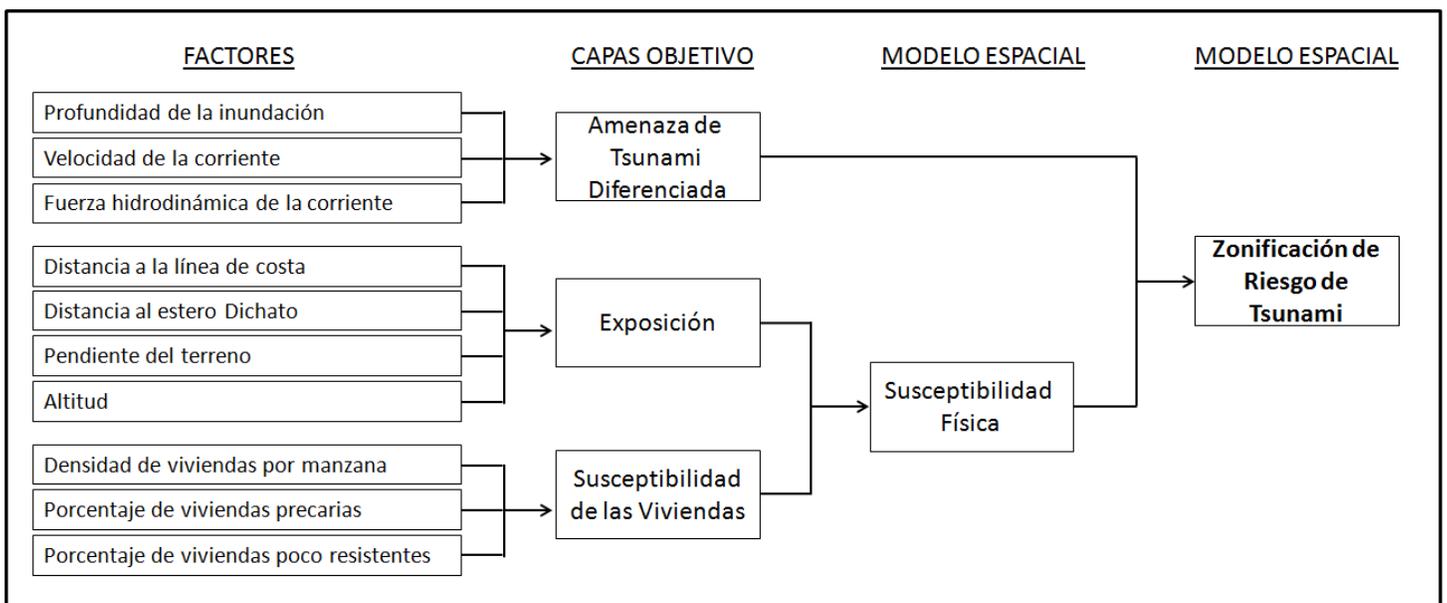


Figura 26: Esquema Metodológico Zonificación de Riesgo de Tsunami

5.3. Determinación del impacto del tsunami en el área de estudio

Para determinar el impacto del tsunami en Dichato, en primer lugar se calculó el área construida por manzana antes del tsunami, utilizando la imagen multiespectral Quickbird del 16 de febrero de 2010. Se realizó una digitalización en pantalla de las construcciones que correspondían a cada manzana y se calculó el área total por manzana, en hectáreas.

Del mismo modo, se digitalizaron en pantalla las construcciones que sobrevivieron al tsunami y se calculó el área total por manzana, en hectáreas.

Finalmente, en base a ambos cálculos se determinó el porcentaje de destrucción por manzana, es decir, qué porcentaje de las construcciones no sobrevivió el impacto del tsunami.

Ya que la determinación del impacto del tsunami en las viviendas se estimó a través de imágenes satelitales, se consideró que las viviendas fueron dañadas por el tsunami en función de la presencia / ausencia de sus techos. A pesar de que este parámetro no es completamente fiable, debido a que hay registro de estructuras seriamente dañadas que conservaron su techo, es una medida aceptada y utilizada en análisis de daños en estructuras realizados a través de la interpretación visual de imágenes satelitales. Así como lo plantean Koshimura *et al* (2009), la utilización de imágenes satelitales de alta resolución permite detectar daños individuales en las estructuras y es reconocida como una de las tecnologías más prometedoras en la investigación de daños post desastres.

Para representar el grado de destrucción se definieron cinco rangos mediante el método de los quiebres naturales en el SIG ArcGIS 9.3. Los rangos se dividieron en muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo.

5.4. Comparación del resultado de la zonificación de áreas de riesgo de tsunami con el impacto determinado para el área de estudio

5.4.1. Comparación estadística

La mayoría de los problemas espaciales en el mundo real implican múltiples variables, y esto es particularmente cierto cuando se construye un modelo para entender por qué algo sucede en un lugar determinado y no en otro. Una manera de abordar este tipo de eventos es utilizar un enfoque de regresión múltiple. Esta prueba estadística modela la media de la distribución de una variable dependiente, como una función de diversas variables independientes (Quintero y Rosales, 2012).

Con el fin de contrastar los resultados obtenidos de la zonificación de áreas de riesgo de tsunami con el impacto determinado para el área de estudio se realizó un análisis estadístico con el programa SPSS 15.0.

Como variable dependiente se utilizó el resultado del impacto determinado para el área de estudio, es decir, el porcentaje de destrucción por manzana, descrito en el punto 5.3. Por otro lado, como variables independientes se utilizaron las capas objetivo resultantes de la Evaluación Multi-criterio: amenaza de tsunami diferenciada, exposición y susceptibilidad de las viviendas, descritas en el punto 5.1.

Se realizaron diferentes pruebas estadísticas para conocer si la información generada en el proceso de zonificación es relevante para explicar la espacialización del impacto en el área de estudio.

Para aplicar el análisis de regresión múltiple, algunos supuestos se tomaron en cuenta: la relación entre la variable dependiente y cada variable independiente debe ser lineal o acercarse a ésta, y cuantitativa; la distribución de cada variable

debe ser normal o cercana con respecto a la línea de regresión teórica; la varianza residual de la distribución no debe variar de los valores ajustados entre el máximo y el mínimo, y los residuos independientes, el valor de un error no se ve afectado por el valor de algún otro error. Con el fin de conocer la naturaleza del conjunto de datos e inferir los supuestos mencionados anteriormente, se determinaron las estadísticas descriptivas de cada variable, analizando las medidas de tendencia central y de dispersión de los datos para conocer la extensión y la forma de la información (Quintero y Rosales, 2012).

Ya que el uso de la regresión sugiere una relación funcional entre variables, las variables independientes necesitan ser evaluadas cuidadosamente para asegurarse de que todas ellas muestran una relación lógica con la variable dependiente. Para cumplir con este objetivo, la estadística descriptiva provee un resumen numérico o cuantitativo conciso de las características de una variable o un conjunto de datos (McGrew y Monroe, 2000). La estadística descriptiva ofrece un panorama general que describe el estado de la distribución espacial de cada variable.

Para llevar a cabo el análisis estadístico, en primer lugar se calculó la estadística descriptiva de cada variable (rango, media, desviación estándar, varianza, asimetría y curtosis).

Si la distribución resultante no fuera la ideal de acuerdo con los supuestos, pero sí significativa, se podrá afirmar que la relación se asemeja a una línea y dar esta variable por buena para una estadística paramétrica procesando todas las variables con la t (*Student*) y F (*Fisher*) (Quintero y Rosales, 2012).

Además se generó una matriz de correlación de *Pearson* que entrega información sobre el tipo de relación que existe entre las variables, así como el grado de significancia entre ellas para poder complementar los supuestos establecidos (Quintero y Rosales, 2012).

También se generaron los estadísticos de bondad de ajuste (R, R², R² ajustado, error típico de la estimación), el análisis de varianza y la estimación de parámetros.

5.4.2. Comparación visual

Paralelamente, se llevó a cabo una comparación visual de los resultados de la zonificación y del impacto calculado para el área de estudio. Esta comparación se realizó con los mapas resultantes de los puntos 3.2.2. y 3.2.3., mediante la visualización de los 5 rangos establecidos a través del método de quiebres naturales, los cuales están definidos como muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto.

De esta forma, se clasificaron las manzanas en 5 clases, de acuerdo a la diferencia de rango que presentaban. La clase 1 la conforman las manzanas que presentan el mismo rango de riesgo que de impacto. La clase 2 corresponde a las manzanas que presentaban mayor riesgo que impacto, siendo la diferencia de un nivel (por ejemplo, de alto a medio, o de bajo a muy bajo). La clase 3 la componen las manzanas que presentan un riesgo menor al impacto en un nivel. La clase 4 corresponde a las manzanas que mostraron un riesgo mayor al impacto en dos o más niveles (por ejemplo, de muy alto a medio, o de alto a bajo). Finalmente, la clase 5 agrupa a las manzanas que presentaron un riesgo menor al impacto en 2 o más niveles (Tabla 4).

Clase	Descripción
1	Riesgo = Impacto
2	Riesgo mayor a impacto en 1 nivel
3	Riesgo menor a impacto en 1 nivel
4	Riesgo mayor a impacto en 2 o más niveles
5	Riesgo menor a impacto en 2 o más niveles

Tabla 4: Clases de comparación de resultados

CAPÍTULO VI: RESULTADOS

6.1. Factores que condicionan el riesgo del pueblo de Dichato frente a la amenaza de tsunami

6.1.1. Amenaza de tsunami

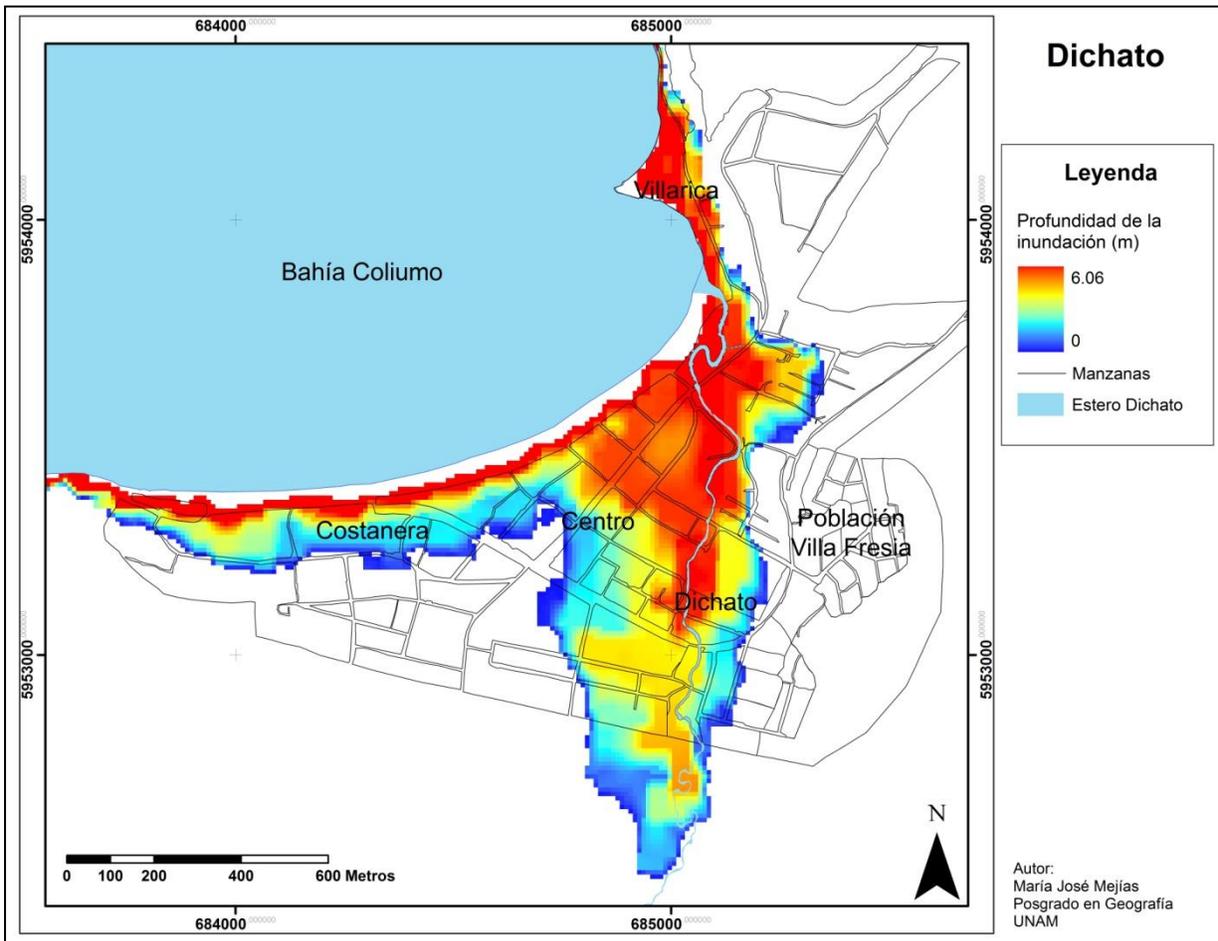
La amenaza de tsunami se espacializó a partir del modelo de inundación de tsunami realizado por el Laboratorio de Investigación de Tsunamis del Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile. El resultado de la validación de los datos de profundidad de inundación realizada mediante el cálculo del coeficiente de determinación dio como resultado un $r = 0.61$, lo cual indica que el modelo se ajusta en un 61% a las observaciones realizadas en terreno.

En la tabla 5 se observan los puntos utilizados para la validación.

La profundidad de inundación en el área de estudio alcanzó un máximo de 6.06 m. Las mayores profundidades se observan en la línea de costa, en los sectores de Costanera, Centro y Villarica y en las áreas planas aledañas al estero Dichato, disminuyendo gradualmente hacia el interior, como en el sector Dichato, donde la profundidad de inundación es menor. Se puede observar claramente cómo el estero Dichato actúa como un canalizador del tsunami hacia el interior, alcanzando profundidades mayores a dos metros a un kilómetro de la costa, lo cual es importante ya que a partir de los dos metros la amenaza comienza a ser considerable. El sector de la Población Villa Fresia se encuentra fuera del área de inundación (Mapa 4).

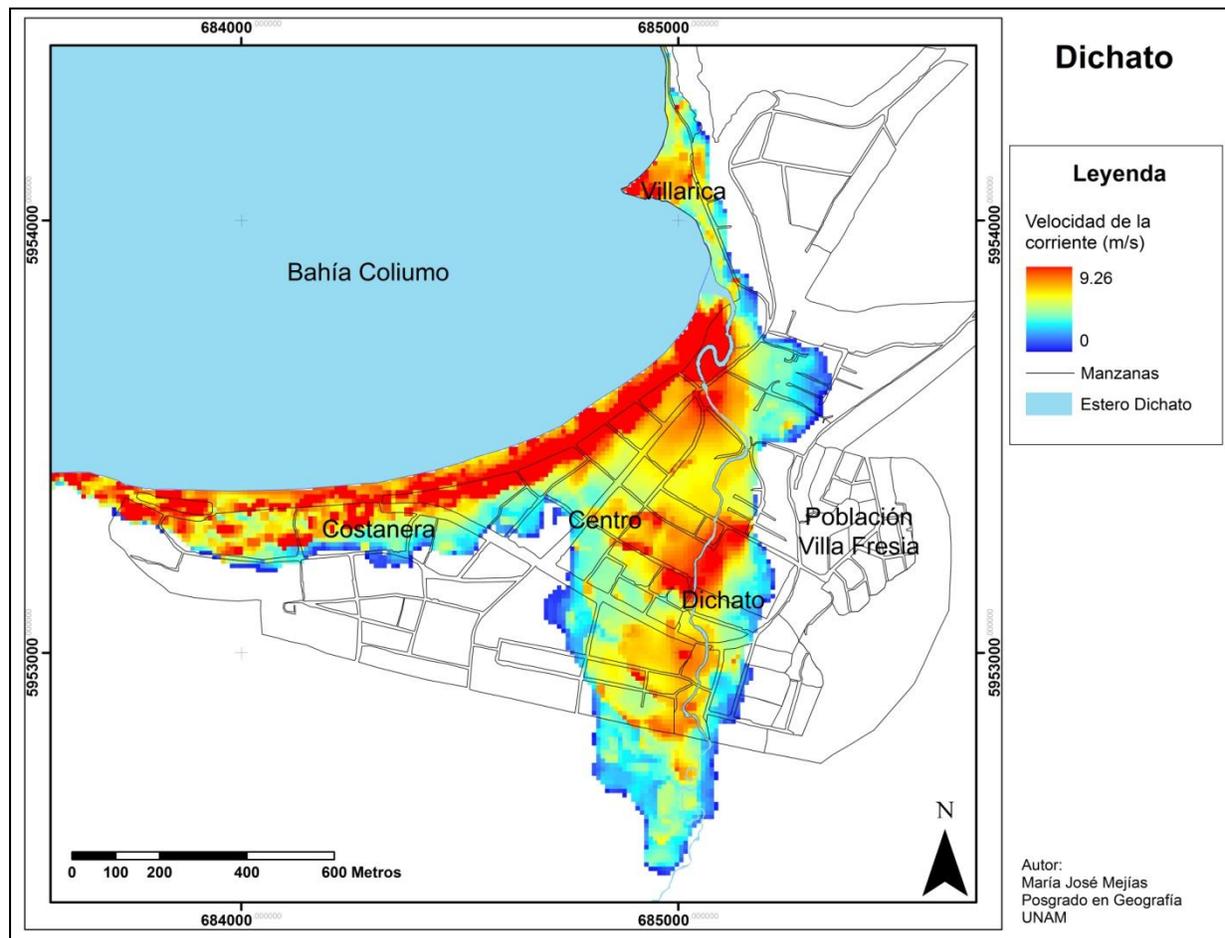
N°	Latitud (°)	Longitud (°)	Profundidad de Inundación (m)	
			Observada	Modelo
98	-36.5484	-72.9303	2	0
100	-36.5456	-72.9325	4.1	2.9
101	-36.5473	-72.9393	3.71	3.37
102	-36.5473	-72.9393	1.87	3.37
103	-36.5475	-72.9393	1.75	2.07
104	-36.5476	-72.9404	1.8	2.48
105	-36.5480	-72.9400	1.78	0.92
106	-36.5485	-72.9411	2.55	0.19
107	-36.5488	-72.9413	1.03	0
108	-36.5486	-72.9395	2.85	0
109	-36.5486	-72.9392	0.58	0
110	-36.5483	-72.9392	1.96	0.97
111	-36.5480	-72.9387	1.48	0.96
112	-36.5482	-72.9384	1.97	0.73
113	-36.5487	-72.9371	1.22	0
114	-36.5484	-72.9361	1.01	0
115	-36.5480	-72.9355	1.95	0.77
116	-36.5477	-72.9350	2.38	0.78
117	-36.5476	-72.9349	2.05	1.57
118	-36.5471	-72.9344	4	2.71
119	-36.5465	-72.9342	2.73	2.86
120	-36.5458	-72.9344	2.21	2.29
121	-36.5459	-72.9345	2.54	2.29

Tabla 5: Profundidad de inundación observada y modelada en puntos específicos de Dichato. Las profundidades observadas fueron recopiladas por Koshimura et al (2010).



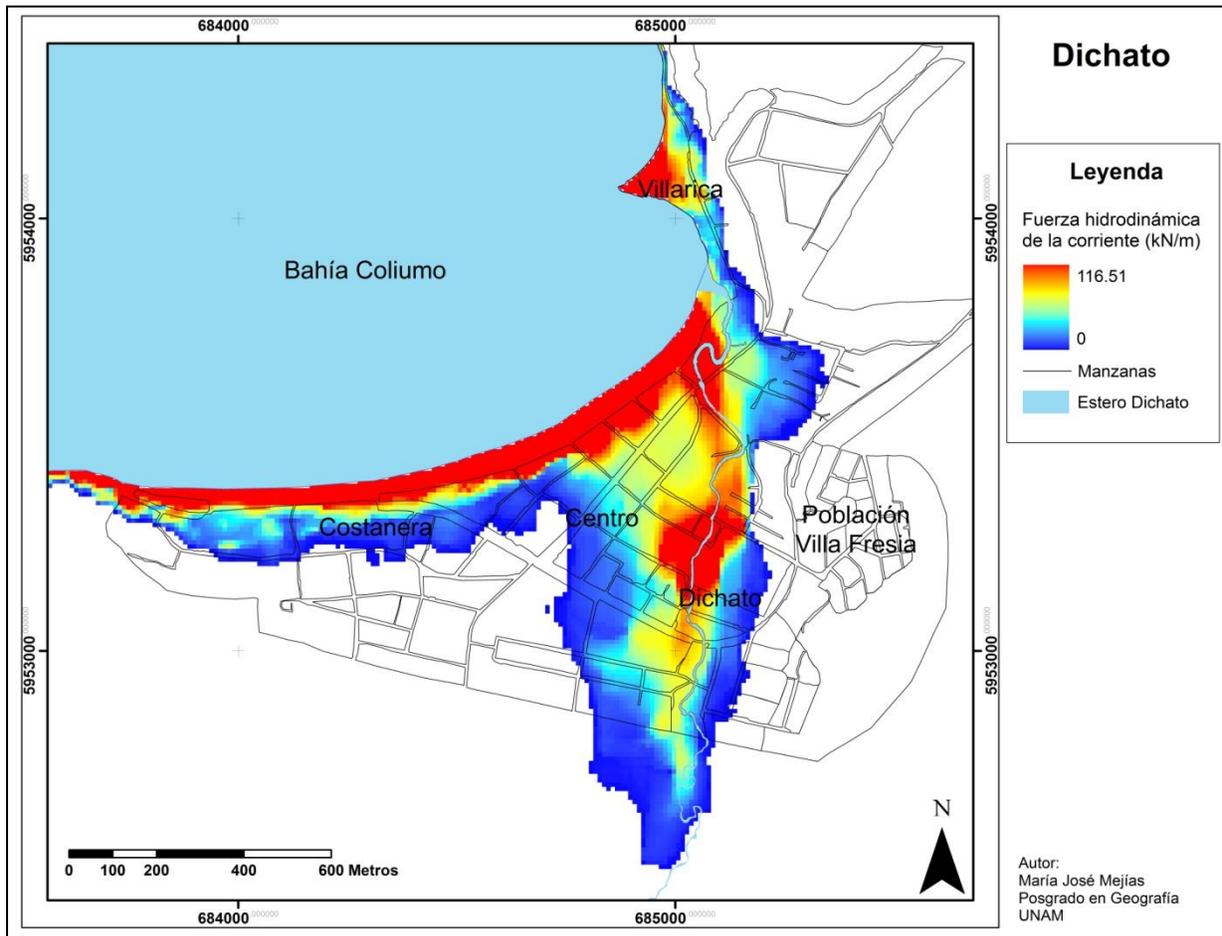
Mapa 4: Profundidad de Inundación

La velocidad de la corriente alcanza un máximo de 9.26 m/s. Los valores más altos se encuentran en las áreas más cercanas a la línea de costa en la desembocadura del estero, y en los sectores Costanera y Villarica y, al igual que en la profundidad de inundación, el cauce del estero Dichato condiciona valores más altos hacia el interior, alcanzando velocidades sobre 2.5 m a una distancia de un kilómetro de la costa. Considerando que el grado de amenaza comienza a ser importante a partir de los 2.5 m/s, se puede observar que una gran parte del área se encuentra bajo una amenaza relativamente alta (Mapa 5).



Mapa 5: Velocidad de la Corriente

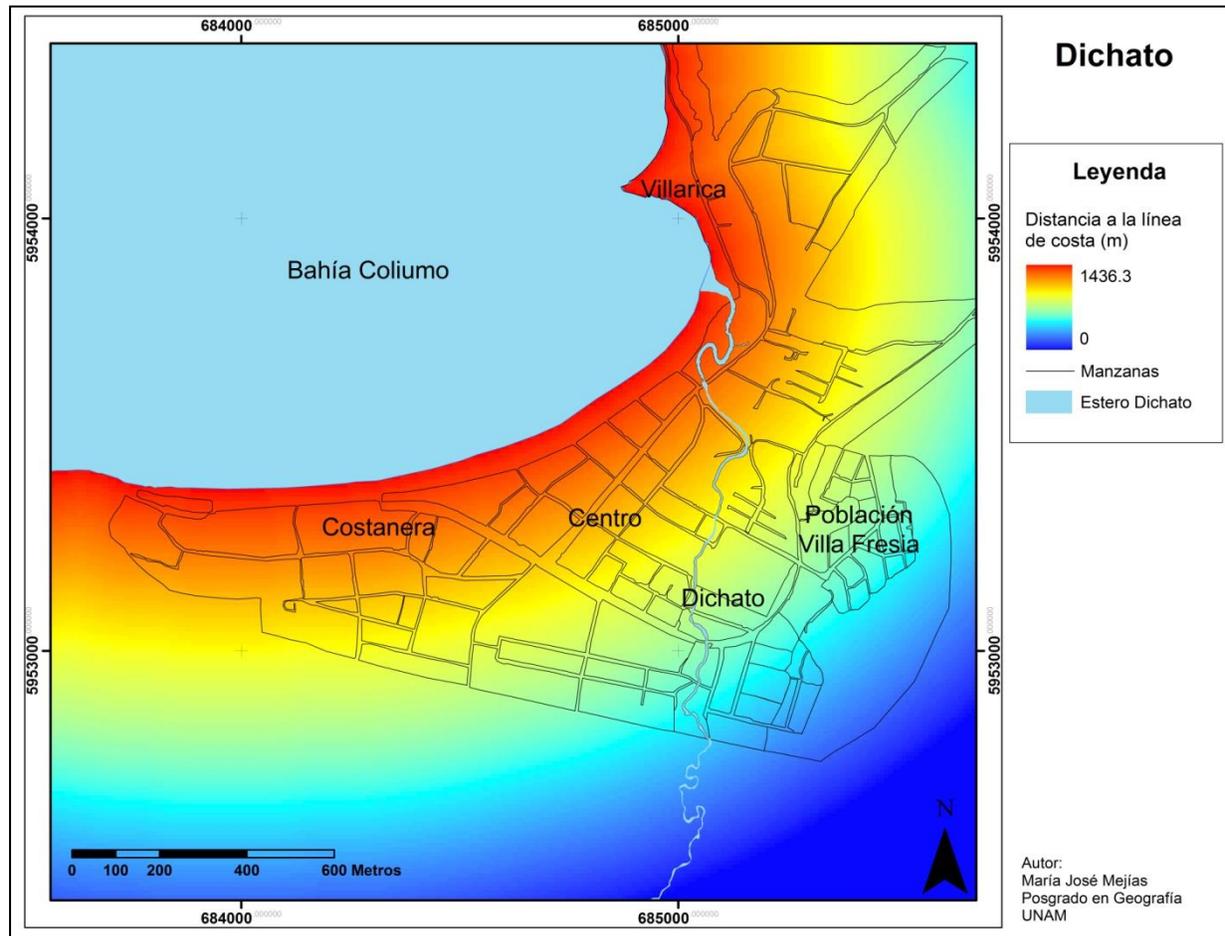
La fuerza hidrodinámica de la corriente alcanza un máximo de 116.51 kN/m y al igual que los dos factores anteriores presenta los valores más altos en las áreas aledañas a la línea de costa, correspondientes a los sectores Costanera y Villarica, y las áreas aledañas al estero Dichato, en donde alcanza valores mayores a 5 kN/m a un kilómetro de la línea de costa, lo cual implica un alto grado de amenaza considerando que a partir de los 5 kN/m comienza a ser destructiva (Mapa 6).



Mapa 6: Fuerza Hidrodinámica de la Corriente

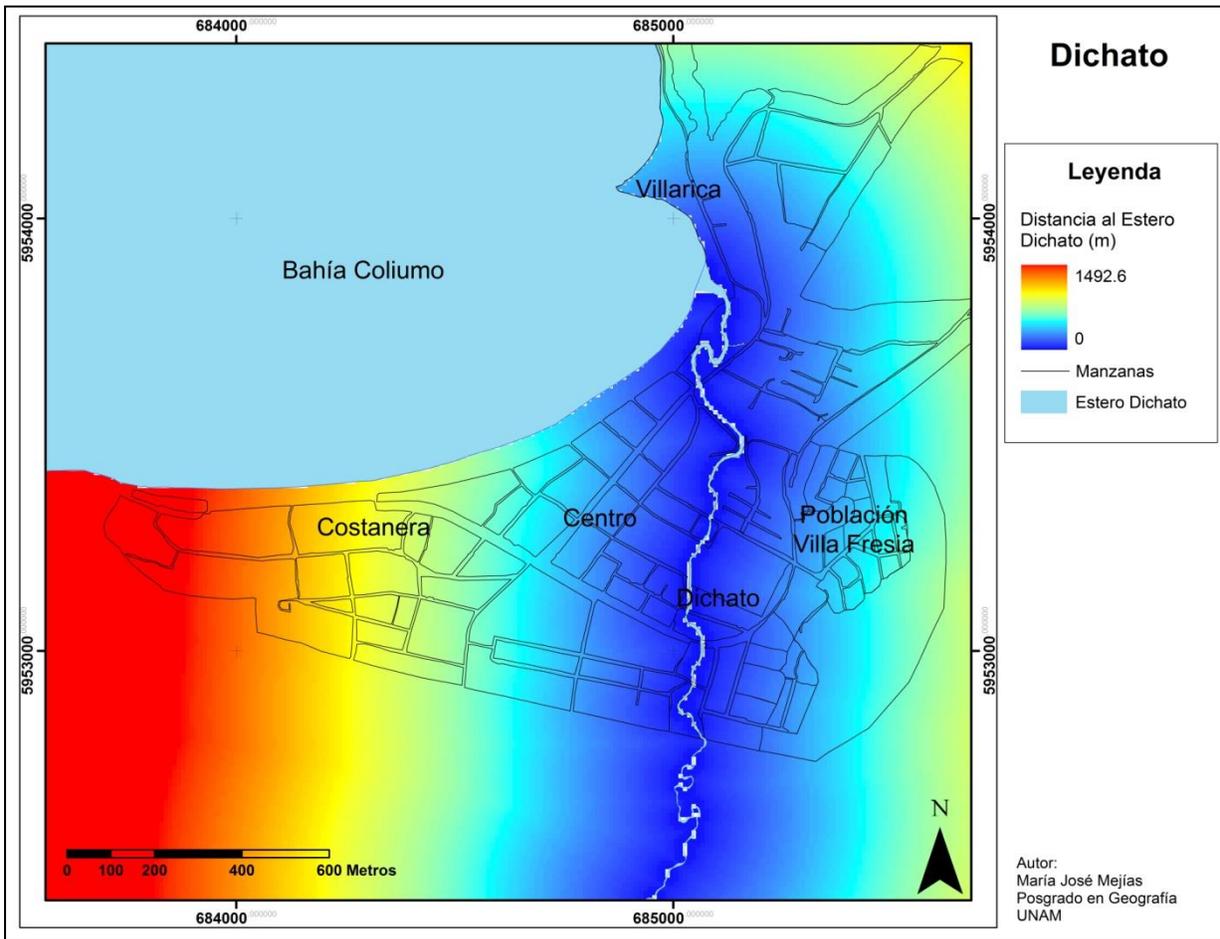
6.1.2. Susceptibilidad física frente a un tsunami

Considerando la distancia a la línea de costa, los sectores Villarrica y Costanera son los que presentan la mayor exposición, seguidos por el sector centro. Los sectores Dichato y Población Villa Fresia son los menos expuestos en términos de distancia a la línea de costa, alcanzando una distancia máxima de aproximadamente 900 m (Mapa 7).



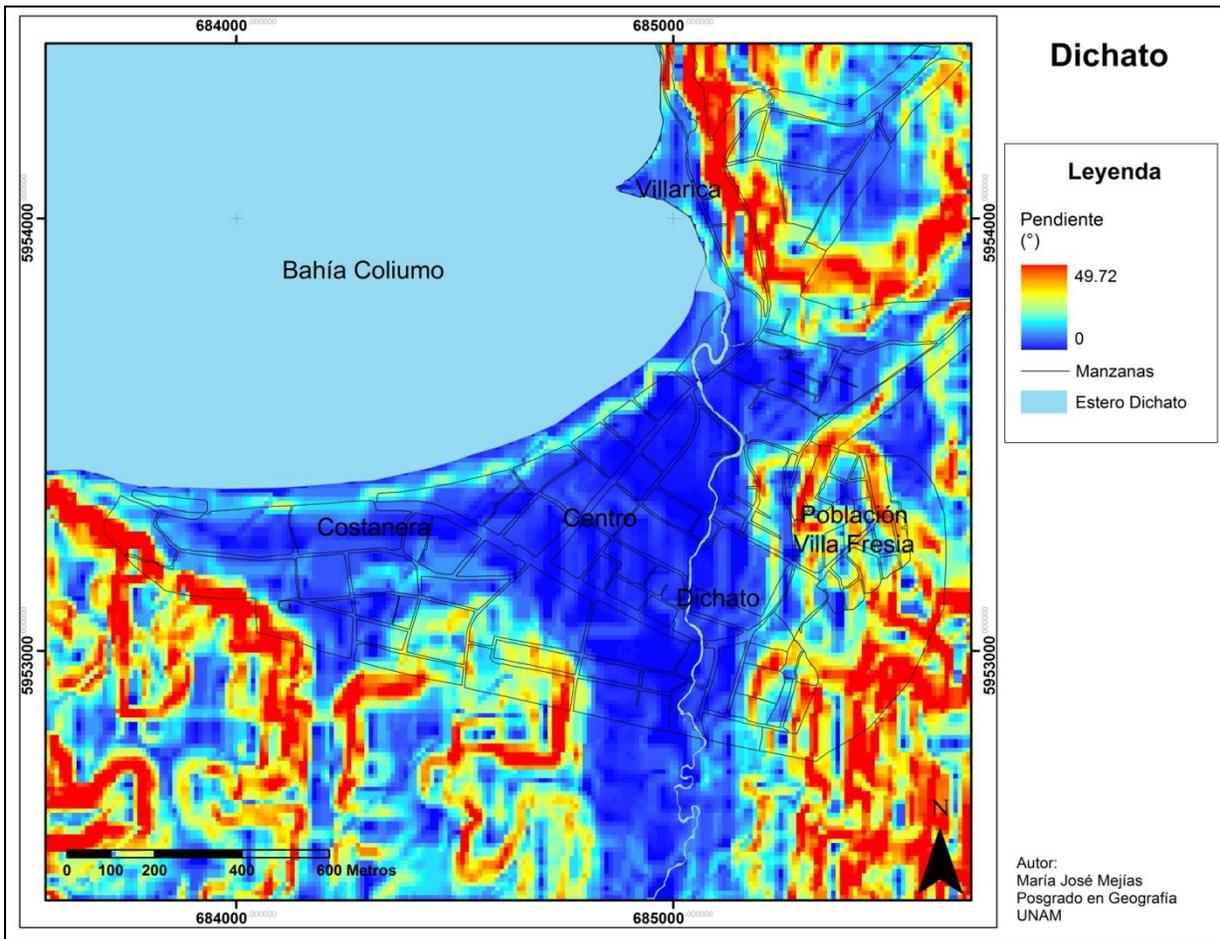
Mapa 7: Distancia a la Costa

El estero Dichato actuó como un corredor que permitió el ingreso del tsunami hacia el interior del pueblo de Dichato, por lo que se debió modificar la idea de que sólo las áreas cercanas a la línea de costa estaban más expuestas. Es por eso la importancia de considerarla en el cálculo de la exposición frente a un tsunami en el caso específico de Dichato. Considerando la distancia al estero Dichato, el sector Dichato es el más expuesto, seguido por Centro, Villarica y Población Villa Fresia. El sector Costanera es el más alejado del estero, y por lo tanto, el menos expuesto (Mapa 8).



Mapa 8: Distancia al Estero Dichato

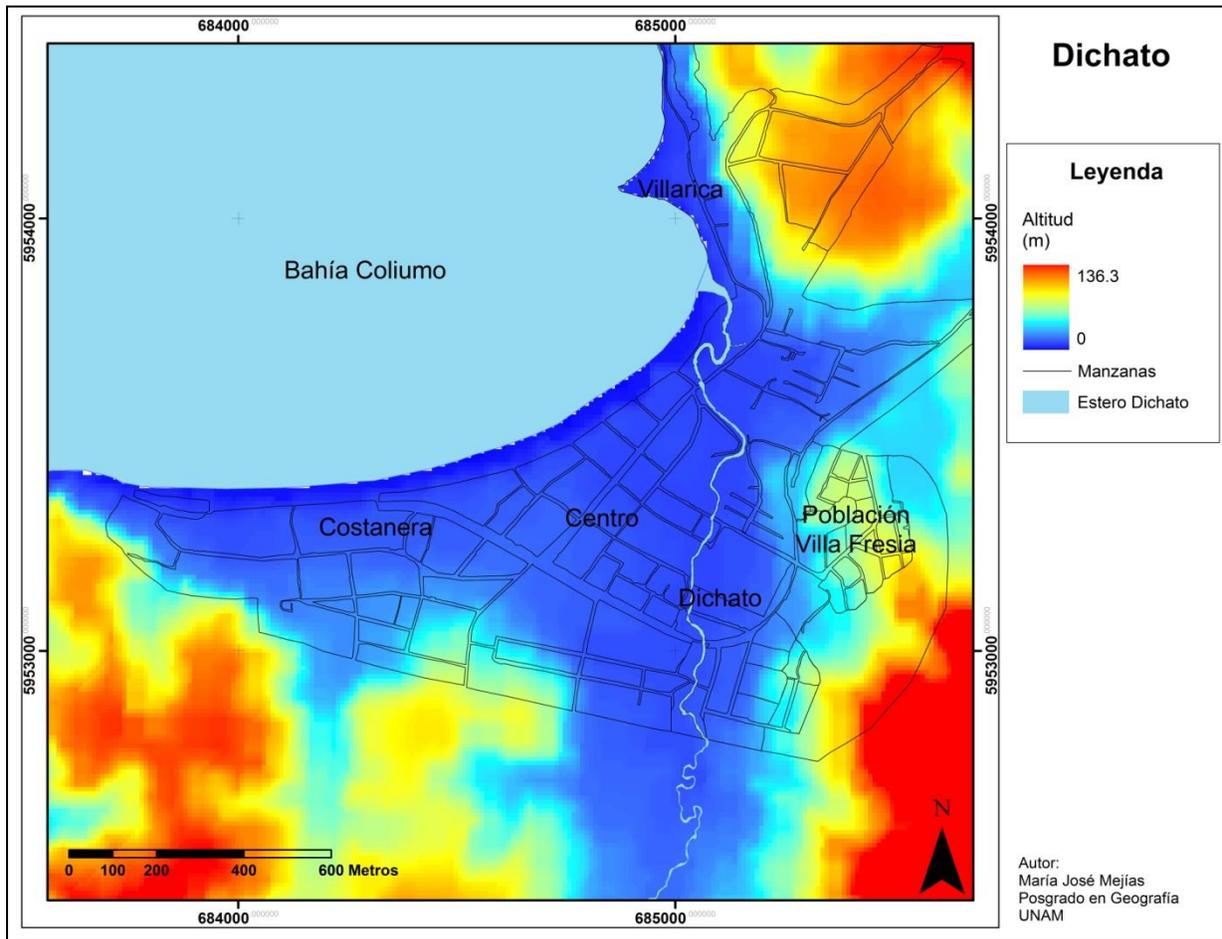
La pendiente del área de estudio presenta dos zonas más o menos marcadas. La primera corresponde a una planicie, que es ocupada por la mayor parte del pueblo de Dichato. Aquí se encuentran los sectores de Costanera, Dichato, Centro y parte de Villarica, lo que hace que estén muy expuestos a la amenaza de tsunami, debido a que las pendientes bajas facilitan el ingreso del tsunami hacia el interior. La segunda zona corresponde al área de cerros que rodean el área plana de Dichato. En esta área se encuentra la Población Villa Fresia y parte de Villarica, por lo que su nivel de exposición es menor (Mapa 9).



Mapa 9: Pendiente del terreno

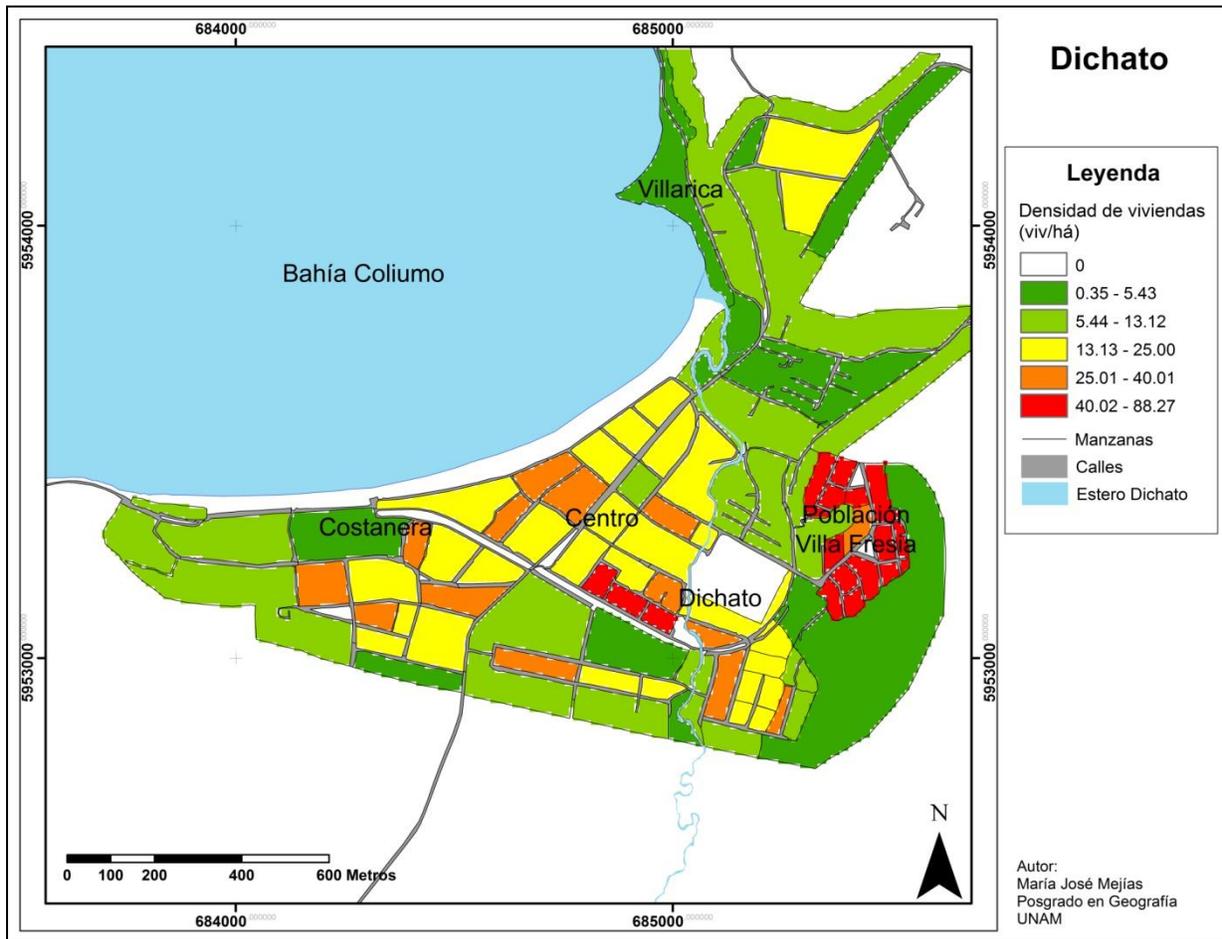
En cuanto a la altitud, gran parte del área urbana de Dichato se encuentra en un sector plano con altitudes menores a 10 m, presenta una forma de embudo, donde la planicie se prolonga hacia el interior siguiendo el cauce del estero Dichato.

Los sectores Costanera, Dichato y Centro presentan un mayor grado de exposición a la amenaza debido a su baja elevación. Una parte importante del sector Villarrica también presenta una altitud muy baja, pero al alejarse de la línea de costa va aumentando considerablemente. Por último, el sector de Villa Fresia es el menos expuesto en términos de altitud (Mapa 10).



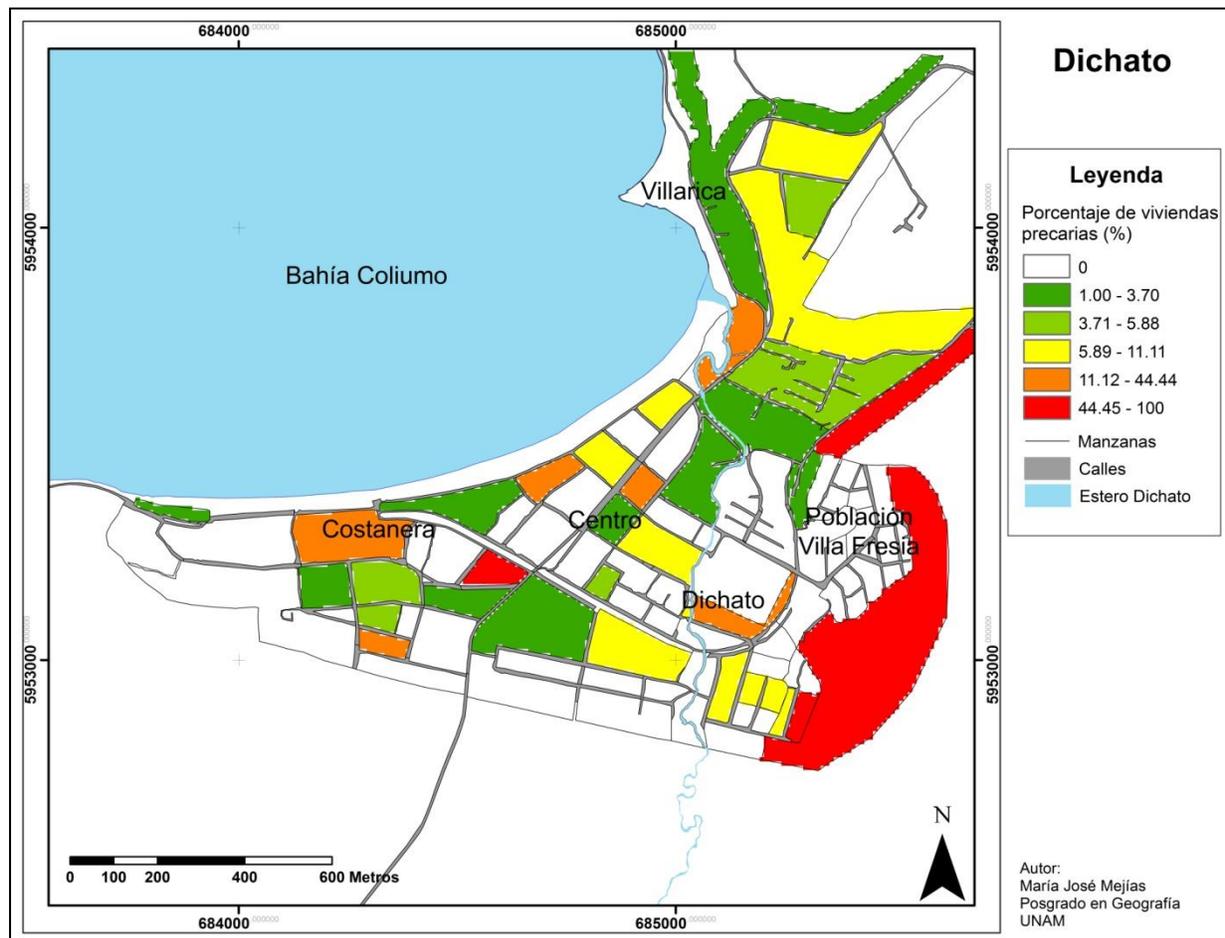
Mapa 10: Altitud

La densidad de las viviendas en general es baja en todo Dichato. El sector Villarica es el que presenta las menores densidades, lo cual hace que sea el sector menos susceptible. El sector Centro presenta valores medios y altos. El sector Costanera presenta valores desde muy bajos a altos. El sector Dichato presenta valores desde bajos a muy altos. El sector Población Villa Fresia es el más susceptible, ya que presenta muchas manzanas con valores de densidad muy altos (Mapa 11).



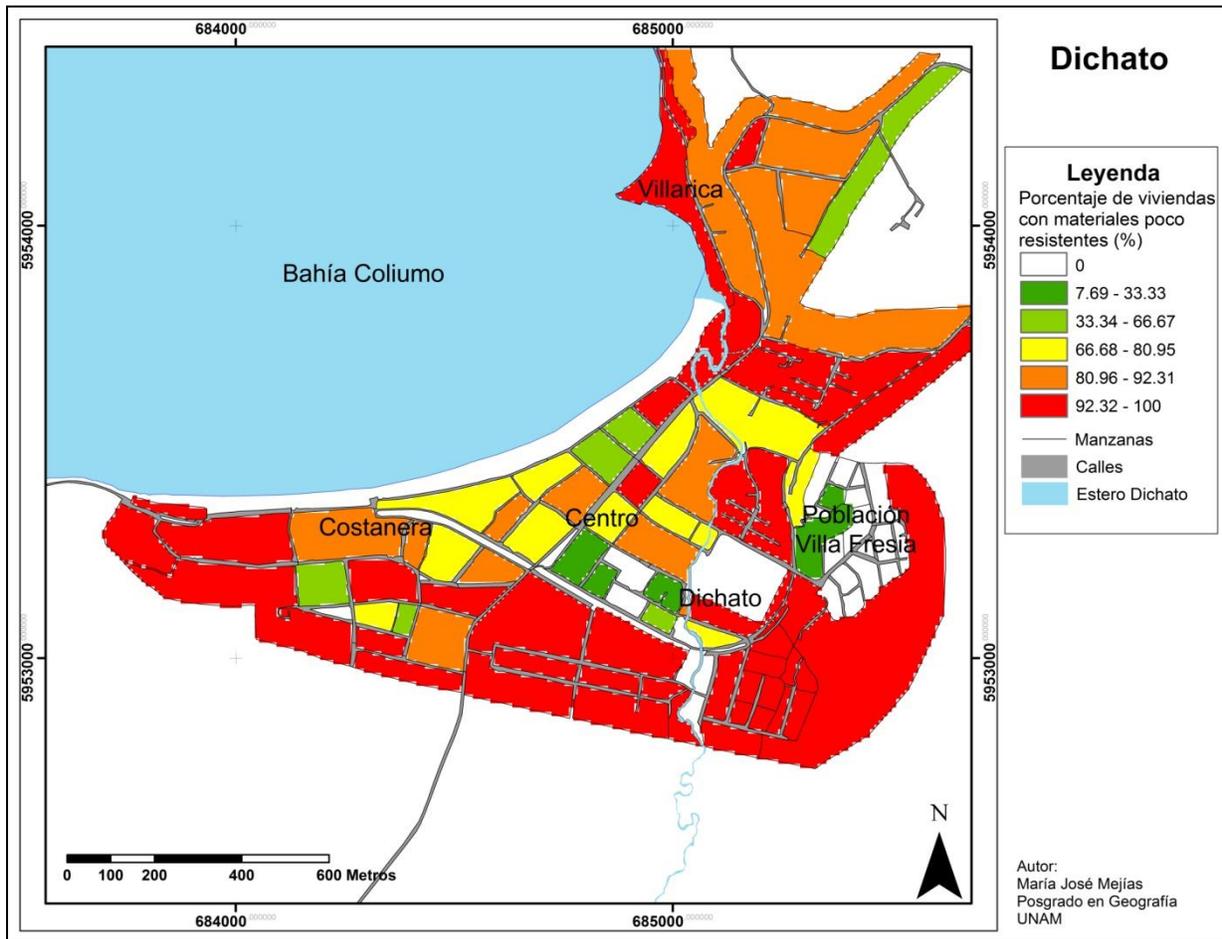
Mapa 11: Densidad de Viviendas por Manzana

El porcentaje de viviendas precarias en Dichato es bajo en general, ya que muchas de las manzanas presentan un 0% de este tipo de viviendas. No existe en patrón de distribución establecido en este factor, en general todos los sectores presentan manzanas con los distintos grados de susceptibilidad (Mapa 12).



Mapa 12: Porcentaje de Viviendas Precarias

El porcentaje de viviendas con materiales poco resistentes se presenta bastante alto en todos los sectores, a excepción de la Población Villa Fresia, y en menor grado en el sector Centro. Esto responde a que gran parte de las viviendas en Dichato están construidas principalmente de madera, material que es altamente susceptible al impacto de un tsunami (Mapa 13).



Mapa 13: Porcentaje de Viviendas Poco Resistentes

6.2. Zonificación de áreas de riesgo de tsunami

6.2.1. Amenaza de tsunami diferenciada

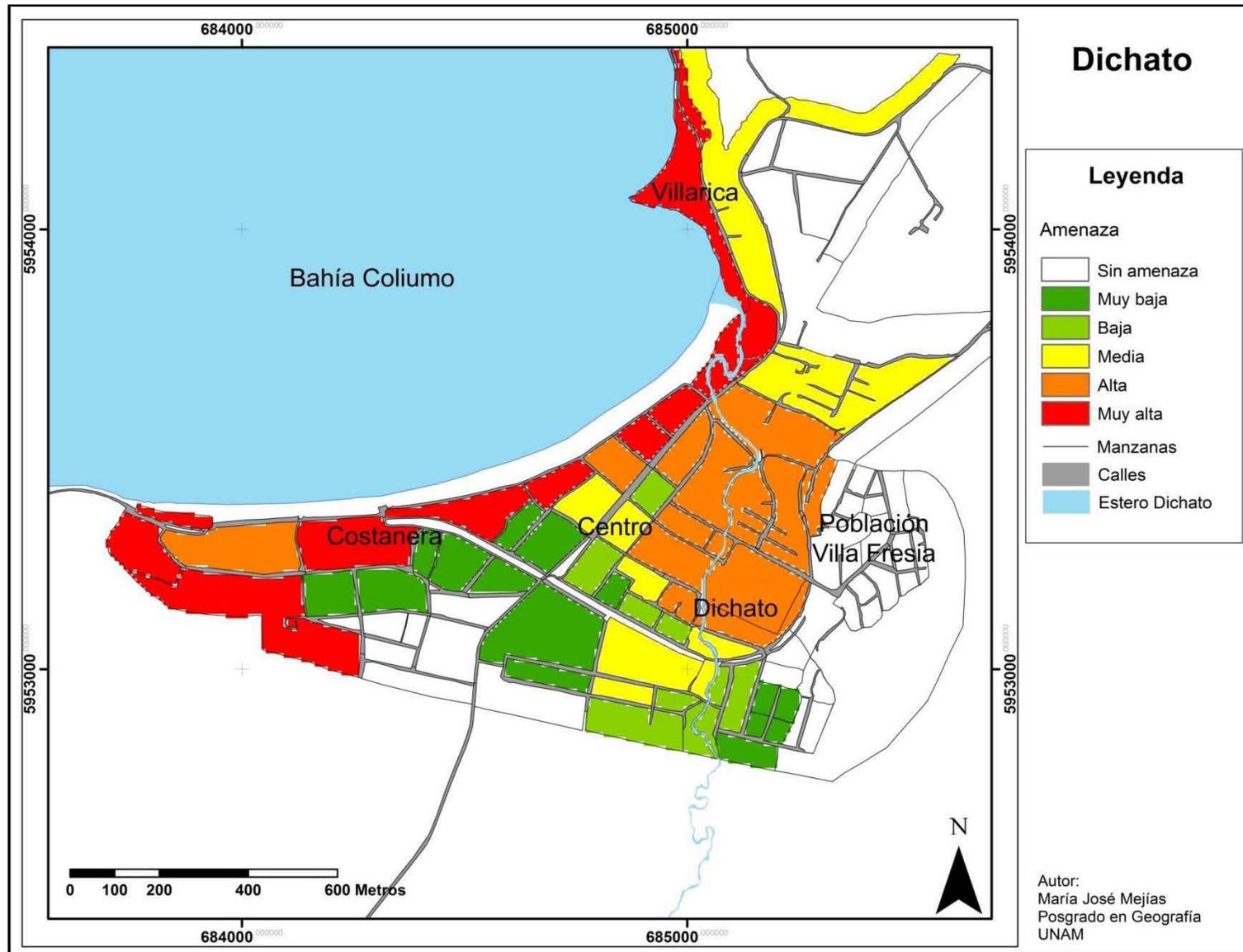
La integración de los factores profundidad de la inundación, velocidad máxima de la corriente y fuerza hidrodinámica de la corriente dio como resultado la espacialización de la amenaza de tsunami diferenciada.

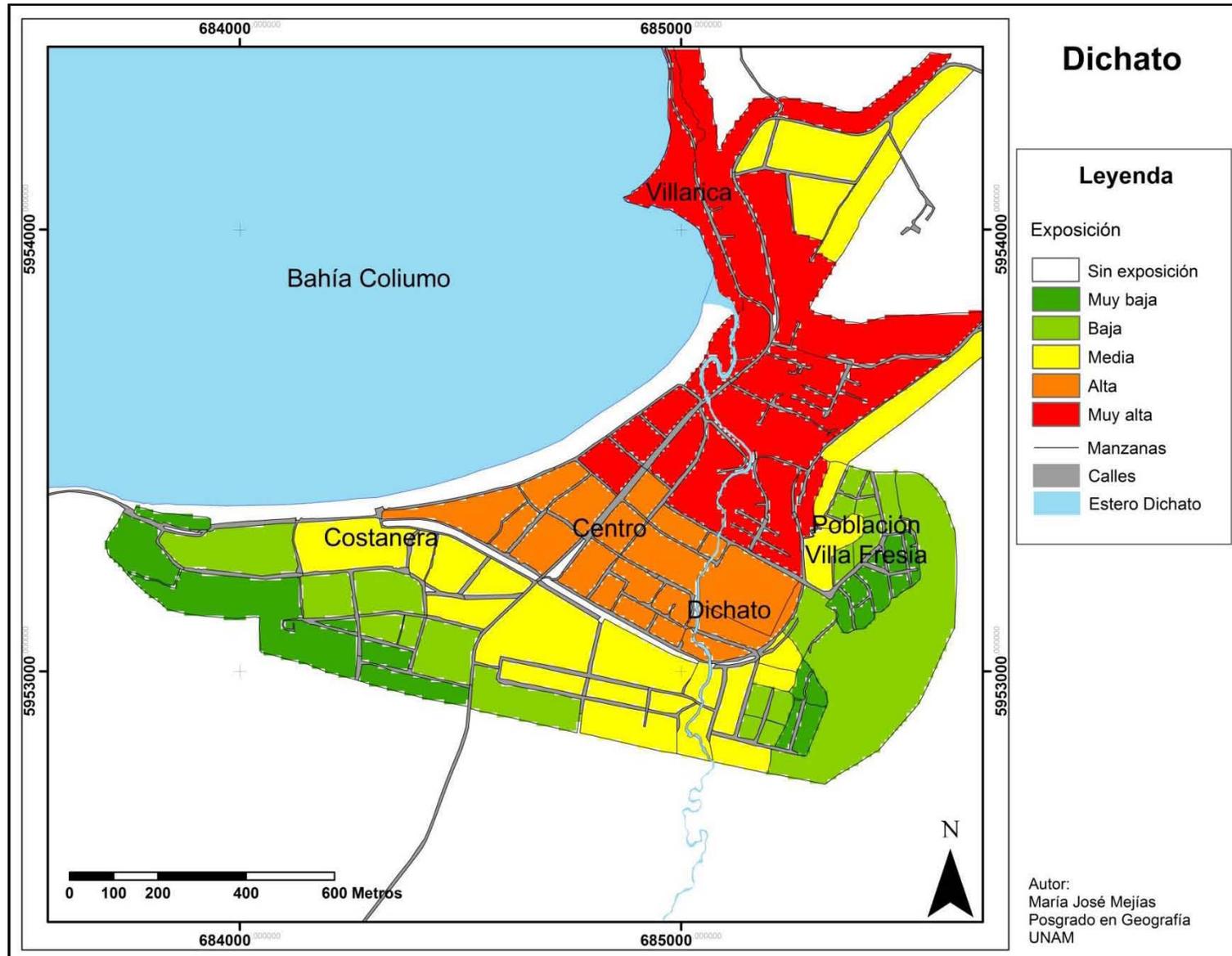
La amenaza de tsunami es particularmente alta en los sectores Costanera y Villarica, así como en menor grado en el sector Centro. Los valores más altos se encuentran en la línea de costa y siguiendo el cauce del estero Dichato, siendo los sectores más afectados Costanera, Villarrica y Dichato. La Población Villa Fresia se encuentra casi por completo fuera del área amenazada (Mapa 14).

6.2.2. Exposición

La integración de los factores altitud, pendiente, distancia a la línea de costa y distancia al estero Dichato dio como resultado la exposición del área de estudio frente a la amenaza de tsunami. El sector más expuesto es Villarrica, seguido de los sectores Centro y Dichato, luego Costanera y finalmente la Población Villa Fresia.

El área que presenta una exposición muy alta conjuga las susceptibilidades más altas en cuanto a que es una zona plana, de escasa altitud, cercana a la línea de costa y al estero Dichato (Mapa 15). Estas condiciones de mayor exposición también pueden observarse en los perfiles topográficos y batimétricos analizados en el punto 4.5., donde se evidencian los sectores planos que fueron inundados por el tsunami, y la forma del cauce del estero Dichato por la que ingresó el tsunami hacia el interior.





Mapa 15: Exposición

6.2.3. Susceptibilidad de las viviendas

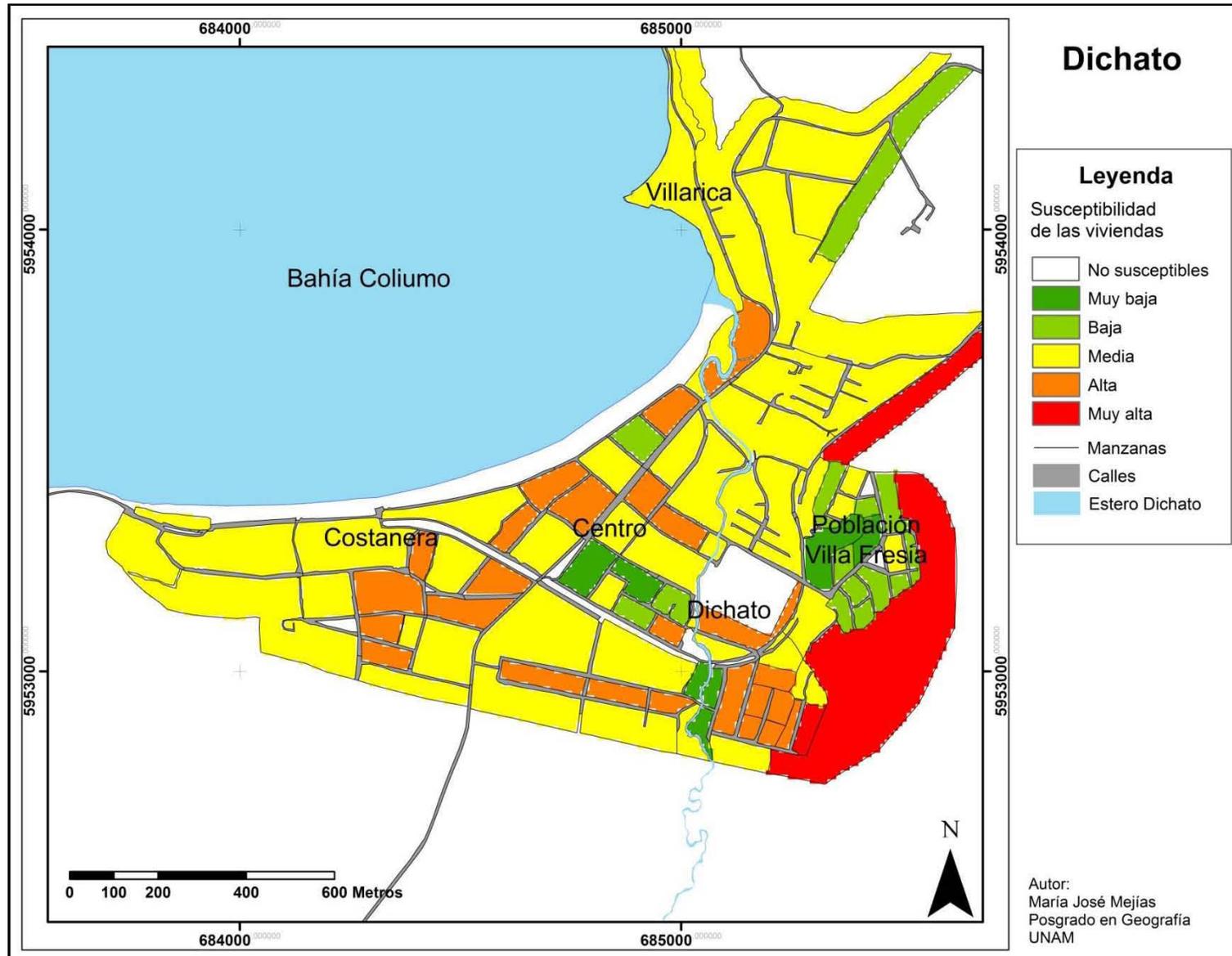
La integración de los factores densidad de las viviendas, porcentaje de viviendas susceptibles y porcentaje de viviendas poco resistentes dio como resultado la espacialización de la susceptibilidad de las viviendas.

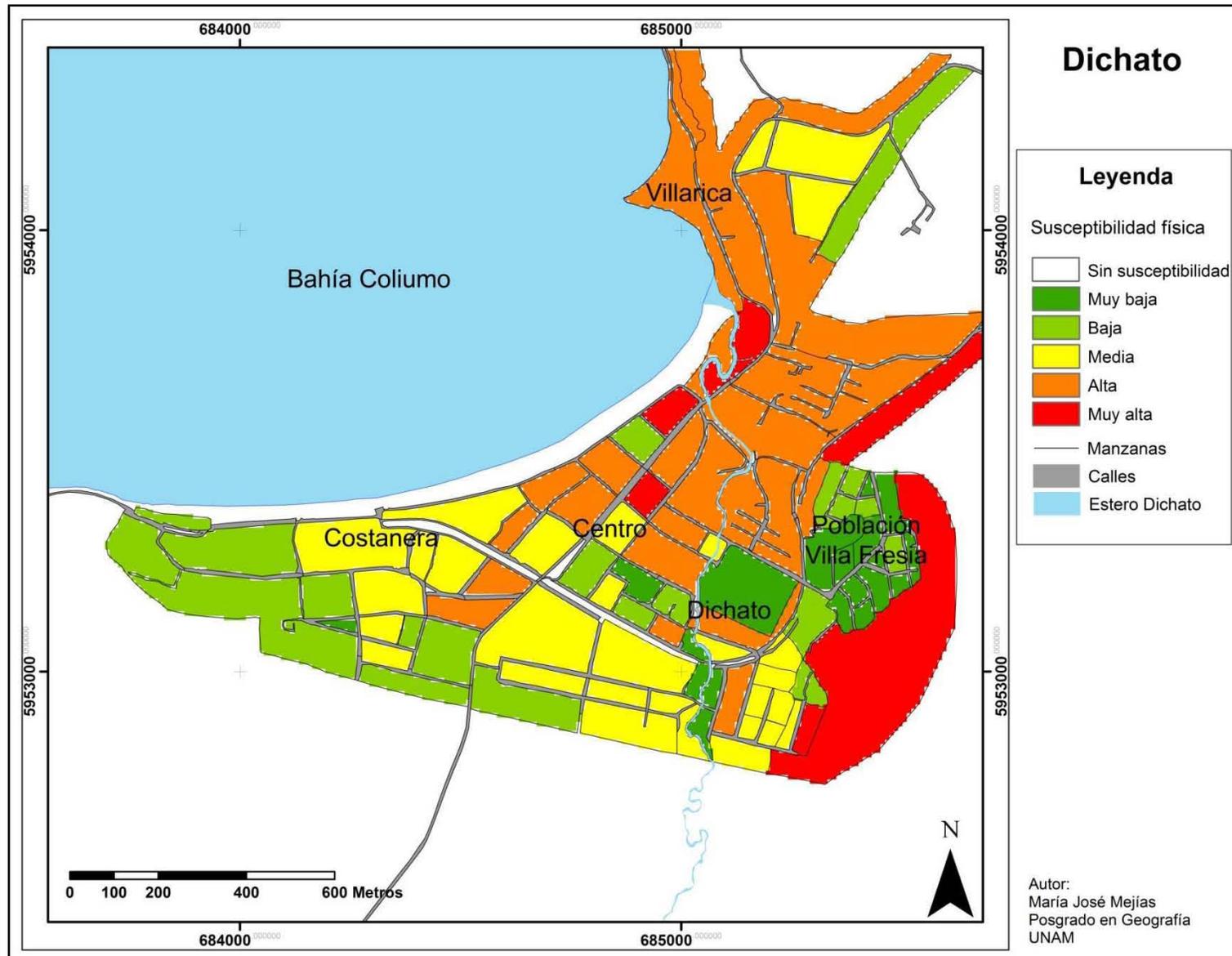
No existe un sector en especial que presente una concentración de las manzanas más susceptibles, sin embargo hay un gran número de manzanas con susceptibilidad media y alta (Mapa 16).

Estos niveles de susceptibilidad se deben principalmente a los altos niveles de viviendas construidas con materiales poco resistentes.

6.2.4. Susceptibilidad física

Los criterios exposición y susceptibilidad de las viviendas fueron integrados, dando como resultado la susceptibilidad física. Los sectores Villarica, Dichato y Centro son los que presentan una mayor susceptibilidad, al igual que parte de la Población Villa Fresia. El sector Costanera presenta una susceptibilidad media, principalmente debido a que presenta un menor grado de exposición (Mapa 17).





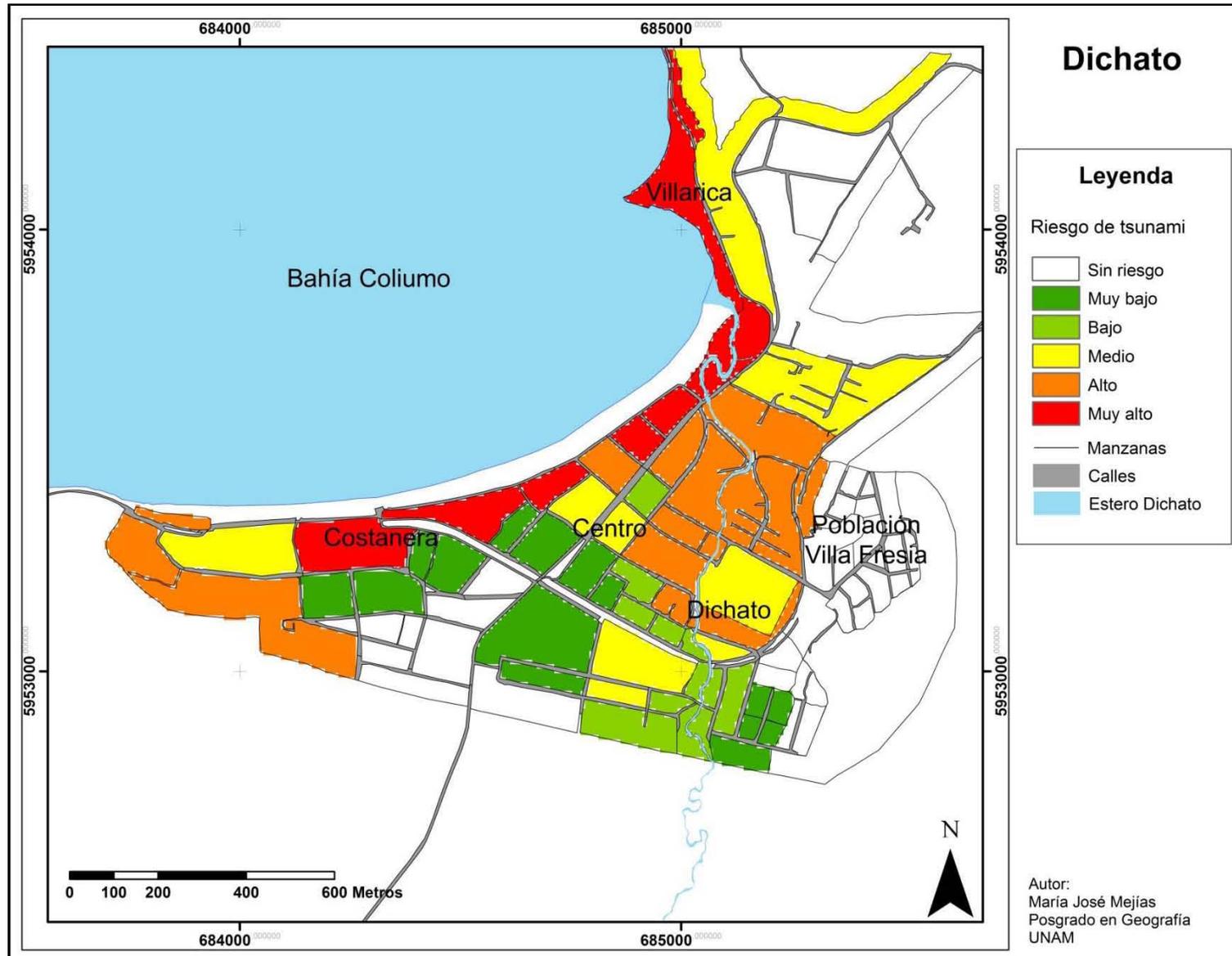
Mapa 17: Susceptibilidad Física

6.2.5. Riesgo de tsunami

Finalmente, se integró los criterios amenaza de tsunami diferenciada y susceptibilidad física, dando como resultado la Zonificación de Áreas de Riesgo de Tsunami (Mapa 18).

Los valores de riesgo más altos se observan en los sectores Costanera, Dichato y Villarica, más específicamente en las áreas aledañas a la línea de costa. Las áreas cercanas al estero presentan un riesgo alto, y gran parte del sector Centro presenta un riesgo de medio a muy bajo.

Por lo que se puede observar del resultado de la zonificación del riesgo en Dichato, la espacialización del riesgo en este caso responde principalmente a los criterios de amenaza de tsunami diferenciada y exposición, ya que la susceptibilidad de las viviendas no presentó una mayor tendencia de distribución que permitiera zonificar en función a ella, además de que no existe gran diferenciación de susceptibilidad entre las manzanas, teniendo una buena parte de ellas un nivel de susceptibilidad medio.

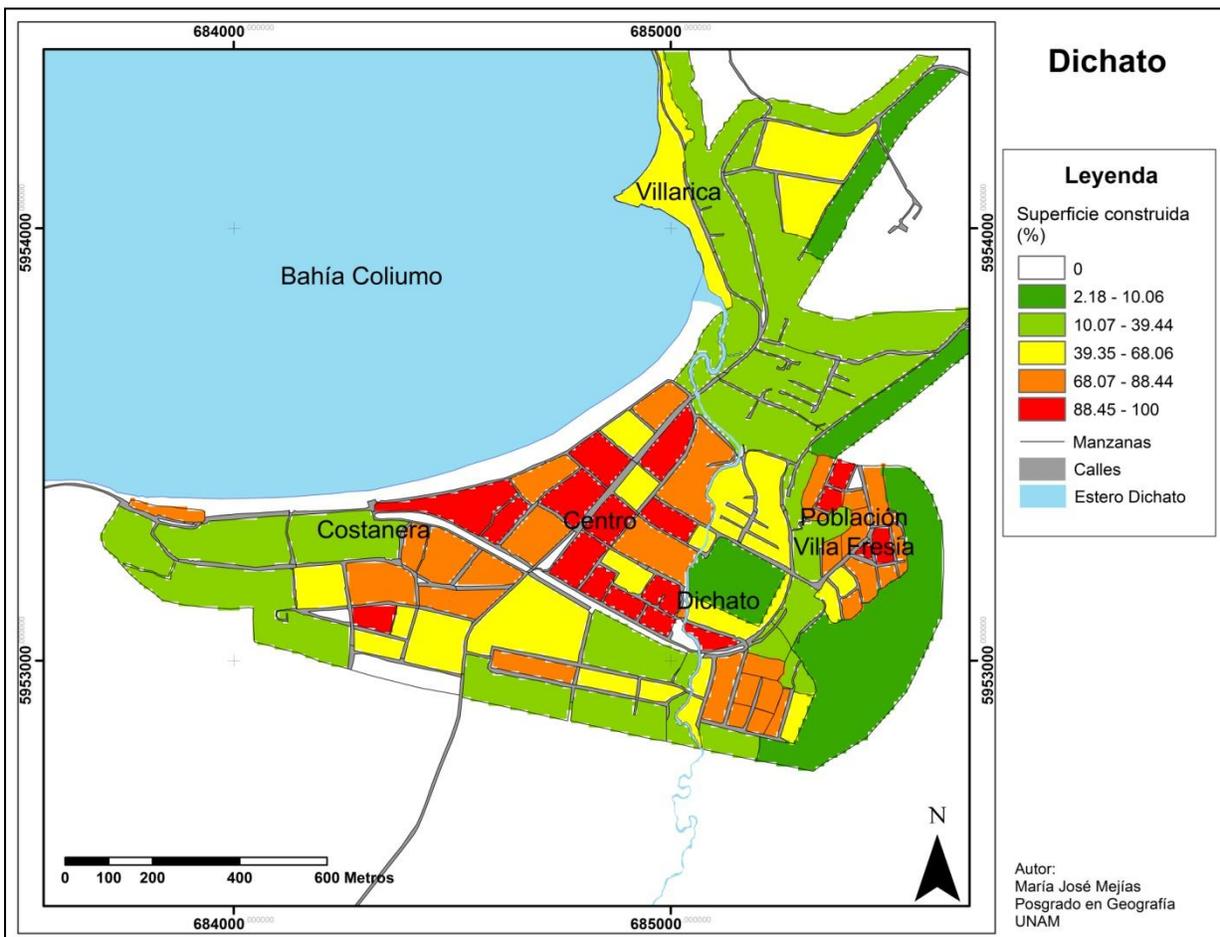


Mapa 18: Riesgo de Tsunami

6.3. Impacto del tsunami en el área de estudio

6.3.1. Dichato antes del 27/02/2010

El porcentaje construido por manzana en el pueblo de Dichato presenta los valores más altos en el sector Centro, en la Población Villa Fresia, así como también en parte de los sectores Costanera y Dichato. El sector Villarica presenta porcentajes menores de construcción (Mapa 19).



Mapa 19: Superficie Construida por Manzana

6.3.2. Dichato después del 27/02/2010

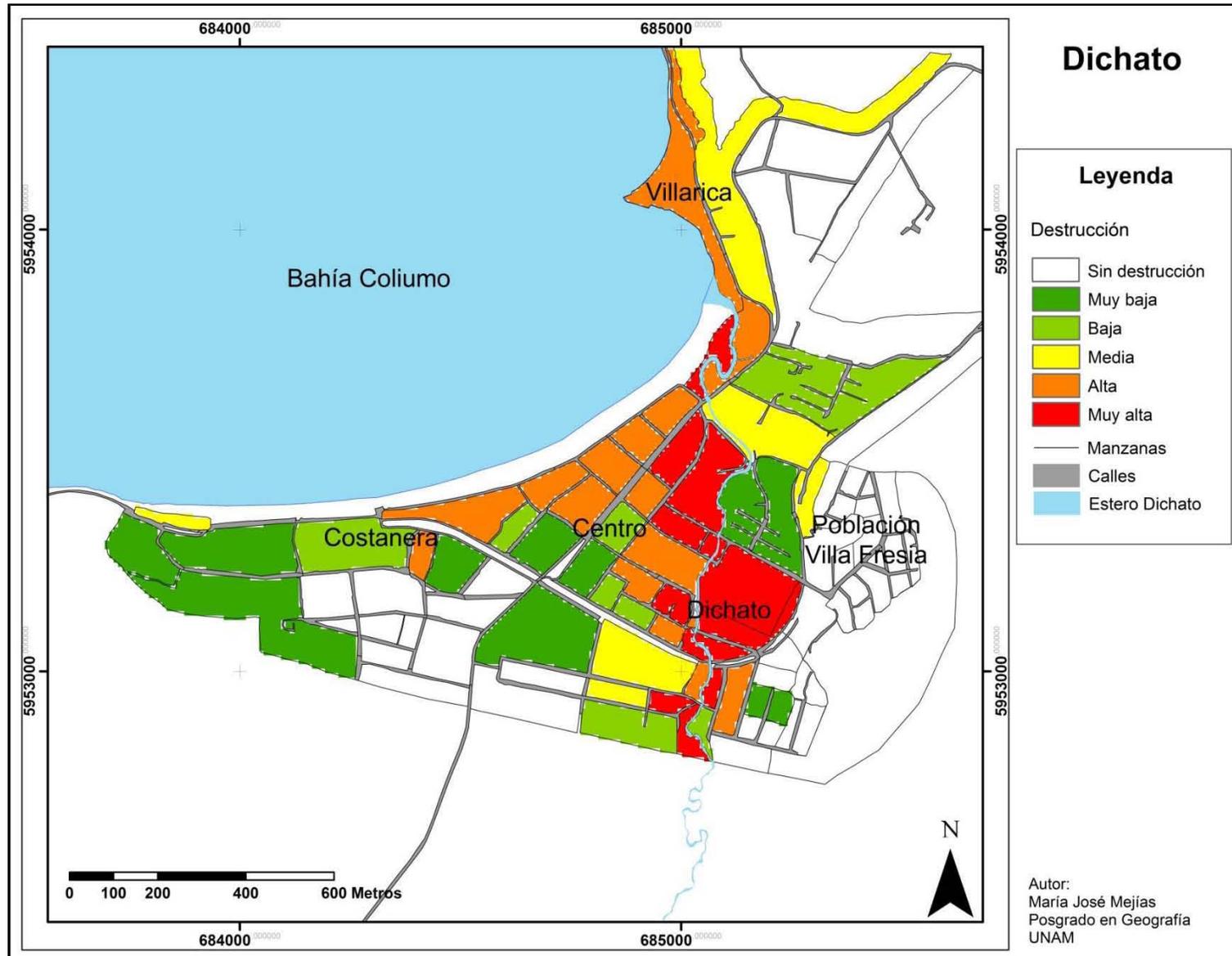
El resultado de la comparación de los escenarios pre y post tsunami se expresó en el grado de destrucción que presentó cada manzana. Los sectores con mayor destrucción fueron Dichato y Villarrica además de una parte del sector Costanera, principalmente las áreas aledañas al estero Dichato, mientras que la población Villa Fresia no sufrió daños que pudieran ser percibidos a través de la imagen satelital (Mapa 20).

Considerando la suma de las superficies construidas de todas las manzanas bajo amenaza antes del tsunami y la suma de las superficies construidas que permanecieron después del evento, se calculó que un 53% de la superficie construida de Dichato sobrevivió al impacto del tsunami.

Es importante señalar que las manzanas que sufrieron mayor daño fueron las que se encuentran en la ribera del estero Dichato, incluso aquellas que se encuentran a una distancia considerable de la línea de costa. En la figura 27 se puede observar parte de las imágenes del antes y el después del tsunami en Dichato, donde se aprecia la destrucción de las construcciones.



Figura 27: Imágenes satelitales antes y después del tsunami



Mapa 20: Destrucción por Manzana

6.4. Comparación del resultado de la zonificación de áreas de riesgo de tsunami con el impacto determinado para el área de estudio

6.4.1. Comparación estadística

El resultado del impacto del tsunami se consideró como variable dependiente y fue analizada en relación con los tres criterios calculados para el riesgo de tsunami: amenaza de tsunami diferenciada, exposición y susceptibilidad de las viviendas (como variables independientes) con la finalidad de establecer una dependencia entre el porcentaje destruido por manzana y los tres criterios utilizados para realizar la zonificación de áreas de riesgo de tsunami.

Los resultados de las estadísticas descriptivas se presentan a continuación. En primer lugar se presenta la variable dependiente (porcentaje destruido por manzana) y a continuación las variables independientes con su respectiva interpretación.

a) Estadísticas descriptivas variable dependiente: Porcentaje destruido

Los resultados de las estadísticas descriptivas de la variable dependiente se observan en la tabla 6.

El rango es la diferencia entre los valores más pequeños y más grandes observados en una variable. Este valor se usa para determinar el número de clases en el histograma y se considera como una medida de la variabilidad (Quintero y Rosales, 2012). En este caso, el valor del rango es 100.

	N Estadístico	Rango Estadístico	Mínimo Estadístico	Máximo Estadístico	Media		Desviación estándar Estadístico	Varianza Estadístico	Asimetría		Curtosis	
					Estadístico	Error estándar			Estadístico	Error estándar o	Estadístico	Error estándar
% DESTRUIDO	104	100	0	100	52.58	3.81	38.86	1509.91	-.213	.237	-1.552	.469
N válido (según lista)	104											

Tabla 6: Estadísticas descriptivas para la variable dependiente

La media (también llamada media aritmética o promedio) es la medida más apropiada de la tendencia central al utilizar datos de intervalo o razón que en este caso resultó en 52.58 e indica donde se encuentra el promedio de la distribución de las frecuencias. El error estándar de la media es la desviación estándar hipotética de N y una medida de qué tanto varía el valor de la media de la distribución utilizada para comparar la media observada con su valor hipotético (Quintero y Rosales, 2012). En este caso el error estándar fue de 3.81.

La desviación estándar representa una medida de dispersión donde es posible conocer el grado de propagación o variabilidad de la media, y entre los valores. Alternativamente, se pueden conocer qué tan fuerte están agrupados los valores (Quintero y Rosales, 2012). Para la variable dependiente la desviación estándar fue de 38.86. Utilizando la media y la desviación estándar se obtiene el valor total de la dispersión de los valores sumando o restando la desviación estándar de la media, por lo que para esta variable, la mayoría de los valores se encuentran dispersos entre 13.72 y 91.44. La varianza que es el cuadrado de la desviación estándar y también indica el valor de la desviación (Quintero y Rosales, 2012).

La asimetría mide el grado de simetría de una distribución de frecuencias mediante la determinación de la amplitud en la que los valores se distribuyen a cada lado de la media, así que el valor del sesgo puede ser positivo (a la izquierda

de la media) o negativo (a la derecha de la media). En ambos casos, cuando los valores se acercan a cero se puede decir que la distribución es casi simétrica o ligeramente simétrica. En general, un valor de asimetría mayor a uno indica una distribución que difiere significativamente de una distribución normal. Dado que muchas pruebas estadísticas asumen que los datos se distribuyen normalmente, este valor es útil para comprobar si es cierto o no (Quintero y Rosales, 2012). La asimetría en este caso tiene un valor de -0.213, lo que indica una distribución casi simétrica y se acerca significativamente a una distribución normal.

La curtosis mide el grado de inclinación en una distribución de frecuencias con respecto a la distribución normal mediante la determinación de la forma de campana. La distribución puede ser leptocúrtica (pico), mesocúrtica (moderada) o platicúrtica (redondeada). Para una distribución normal, el coeficiente de curtosis es cero, mientras que cuando el coeficiente es mayor que cero la curva es muy empinada en el centro o tiene colas relativamente largas y cuando el coeficiente es menor que cero, la curva es plana con colas cortas (Quintero y Rosales, 2012). El valor de curtosis de la variable es de -1.552, por lo que se puede afirmar que la curva es relativamente plana con colas cortas. Sin embargo al ser un valor cercano a cero, se acerca significativamente a una distribución normal (Figura 28).

En términos generales la inspección del resultado del impacto del tsunami como variable dependiente para una regresión lineal múltiple indica que ésta es totalmente apta para el análisis.

Esta variable como tal, en términos espaciales, presenta una alta dispersión relativa con respecto al límite del área de estudio en sí. Esto es importante a considerar contra las variables independientes ya que éstas podrían no estar disponibles o parcialmente presentes espacialmente hablando en toda el área de estudio de manera uniforme presentando diferencias entre dispersión absoluta y relativa de cada una. En términos más simples esta dispersión de los datos tanto numérica como espacial hace referencia a un patrón: si dos manzanas que presentan el mismo valor de la variable dependiente y los mismos valores de las

variables independientes pero muestran un resultado diferente entre sí estamos hablando de que no hay un patrón por características que el espacio mismo impone (relaciones espaciales).

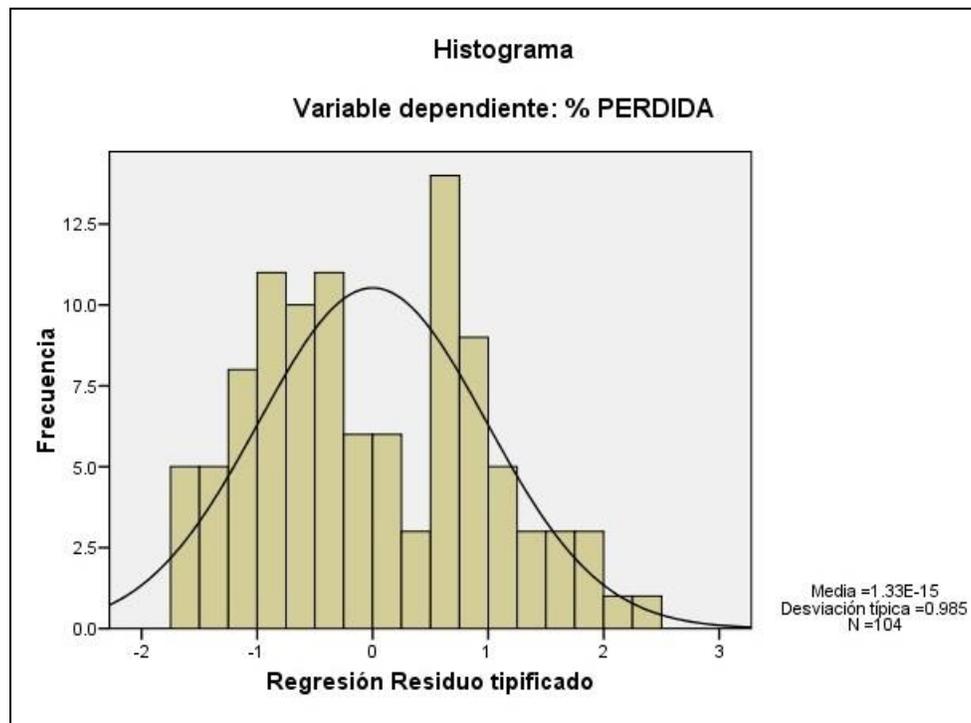


Figura 28: Histograma Porcentaje de pérdida

La interpretación de los datos numéricos sólo indica teóricamente que estos pueden ser usados para el análisis y cuál podría ser su comportamiento de manera teórica. La interpretación de estos mismos datos de forma espacial se tiene que hacer directamente con los resultados en mano para ver caso por caso y discutir si hay un patrón o es totalmente azaroso el evento en función de las dispersiones mencionada más su ubicación en el espacio *per se*.

b) Estadísticas descriptivas variables independientes

Las estadísticas descriptivas de las variables independientes se pueden observar en la tabla 7 y se describen a continuación siguiendo el mismo orden y definiciones utilizadas para describir la variable dependiente, por lo que sólo se presenta la interpretación de los resultados.

	N Estadístico	Rango Estadístico	Mínimo Estadístico	Máximo Estadístico	Media		Desv. típ. Estadístico	Varianza Estadístico	Asimetría		Curtosis	
					Estadístico	Error típico			Estadístico	Error típico	Estadístico	Error típico
Amenaza	104	235	20	255	107.38	7.284	74.286	5518.45	.640	.237	-.847	.469
Susceptibilidad	104	164	6	170	89.95	2.295	23.400	547.58	-1.306	.237	5.027	.469
Exposición	104	91	163	254	216.31	2.003	20.426	417.21	-.429	.237	-.151	.469
N válido (según lista)	104											

Tabla 7: Estadísticas descriptivas para las variables independientes

Se debe considerar que para llegar a estas variables y su elección como tales fue el resultado de un proceso de “variables” que por sí solas no reunían las características necesarias para someterlas a un estudio estadístico como éste, por lo que se decidió utilizar en su lugar las capas objetivo. La distribución espacial de las variables independientes es muy homogénea en el área de estudio como conjunto de datos agrupados en un índice no así las partes que las componen y su variación espacial.

i) Amenaza de tsunami diferenciada

Para la variable amenaza, la media fue de 107.38 y la desviación estándar de 74.286, por lo que utilizando ambos valores se obtiene la dispersión de los valores alrededor de la media, que en este caso fue entre 33.09 y 181.66. Esta alta dispersión indica que los valores están disgregados. La varianza fue de 5518.45. El error estándar de la media fue de 7.284, lo que indica que hay una pequeña diferencia entre la media observada y la teórica. La asimetría fue 0.640 y la curtosis -0.847, lo cual indica que la distribución de frecuencia es casi normal.

De acuerdo con estos valores y con la curva en forma de campana en la gráfica (Figura 29), la distribución de la amenaza en el área de estudio es relativamente homogénea.

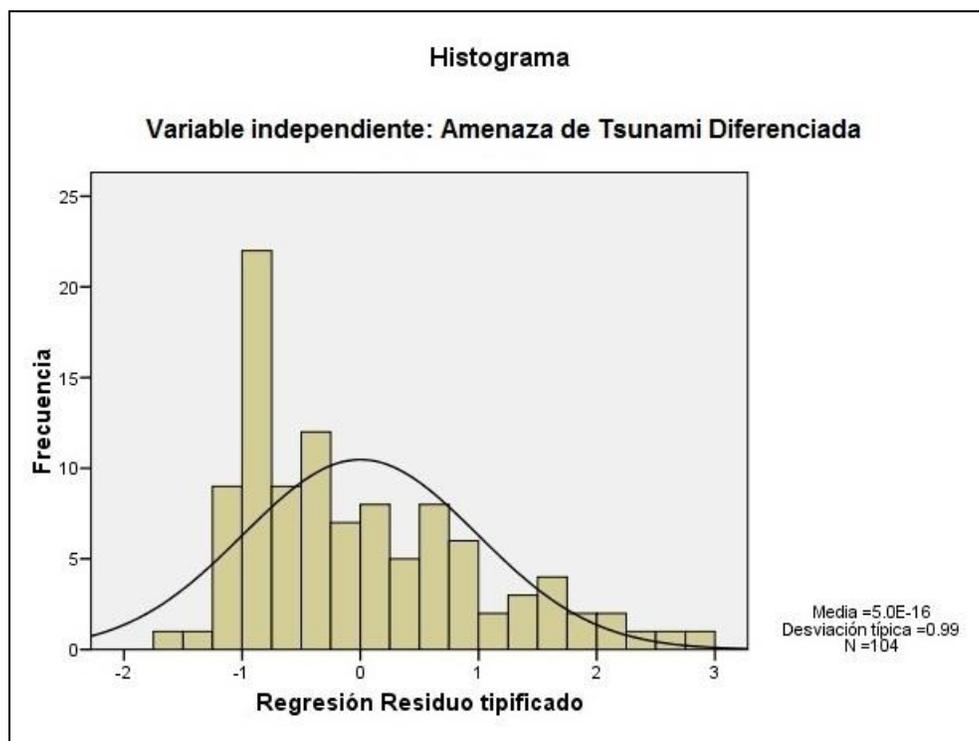


Figura 29: Histograma Amenaza de Tsunami Diferenciada

ii) Susceptibilidad de las viviendas

Para la variable susceptibilidad de las viviendas, la media fue de 89.95 y la desviación estándar de 23.4, por lo que utilizando ambos valores se obtiene la dispersión de los valores alrededor de la media, que en este caso fue entre 66.55 y 113.35. Esta dispersión indica que los valores están más concentrados que la variable anterior. La varianza fue de 547.58. El error estándar de la media fue de 2.295, lo que indica que prácticamente no hay diferencia entre la media observada y la teórica. La asimetría fue -1.306 y la curtosis 5.027, lo cual indica que la distribución de frecuencia está relativamente alejada de una distribución normal, es decir, la curva presenta un sesgo negativo hacia la derecha, con una campana leptocúrtica por encima de la normal (Figura 30).

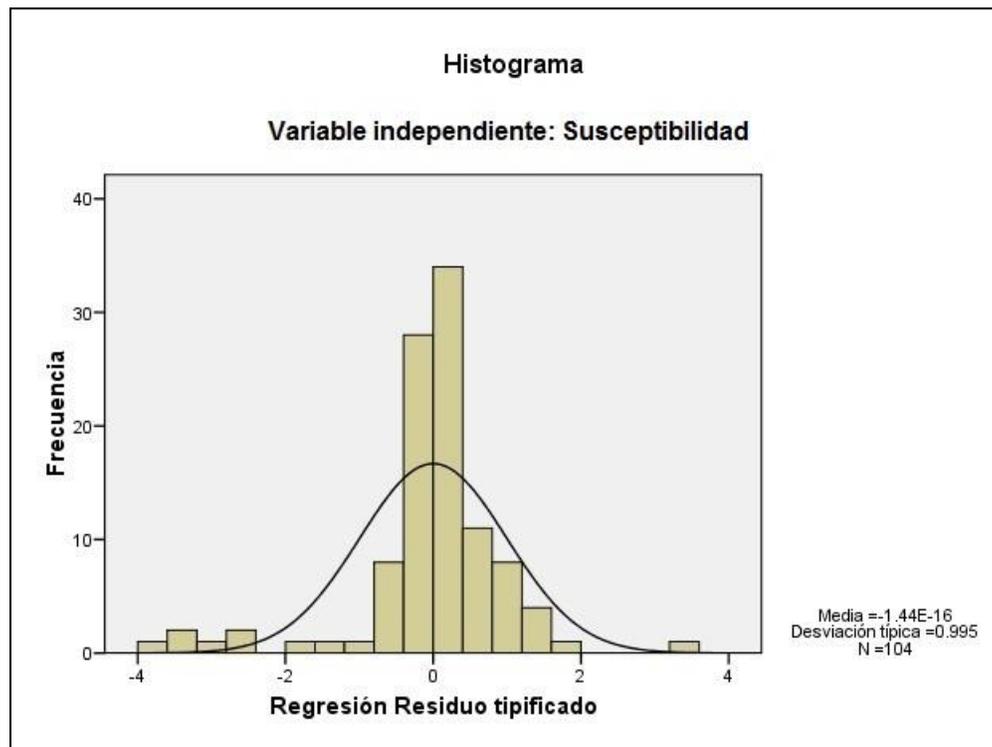


Figura 30: Histograma Susceptibilidad de las viviendas

iii) Exposición

Para la variable exposición, la media fue de 216.31 y la desviación estándar de 20.426, por lo que utilizando ambos valores se obtiene la dispersión de los valores alrededor de la media, que en este caso fue entre 195.884 y 236.736. Esta dispersión indica que los valores están muy concentrados. La varianza fue de 417.21. El error estándar de la media fue de 2.003, lo que indica que casi no hay diferencia entre la media observada y la teórica. La asimetría fue -0.429 y la curtosis -0.151, lo cual indica que la distribución de frecuencia es prácticamente normal.

De acuerdo con estos valores y con la curva en forma de campana en la gráfica (Figura 31), la distribución de la exposición en el área de estudio es relativamente homogénea.

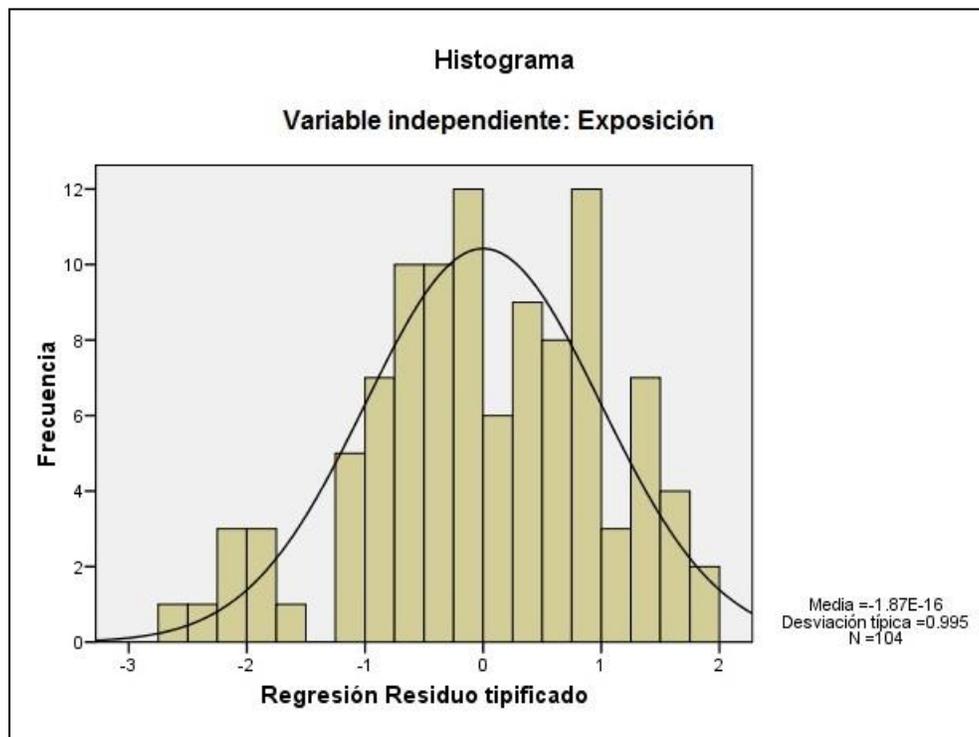


Figura 31: Histograma Exposición

c) Coeficiente de correlación (Tabla 8)

El coeficiente de correlación (R) mide la intensidad de la relación entre el conjunto de las variables independientes y la variable dependiente (Rodríguez y Mora, 2001). En este caso, el valor de R fue de 0.656.

El coeficiente de correlación al cuadrado o coeficiente de determinación (R^2) es una medida de bondad para ajustar un modelo lineal y mide la proporción de la variabilidad de la variable dependiente explicada por el modelo lineal. Sus valores oscilan entre 0 y 1, donde los valores más cercanos a cero indican que el modelo no se ajusta bien a los datos (Quintero y Rosales, 2012). El R^2 de la regresión fue de 0.431.

El coeficiente de determinación ajustado mide lo mismo que R^2 , pero en este caso no queda influenciado por el número de variables introducidas. El R^2 ajustado fue de 0.414.

Por último, el error típico de la predicción indica la parte de la variable dependiente que queda por explicar. A medida que se incrementa el coeficiente de determinación el error desciende (Rodríguez y Mora, 2001). En este caso el error típico de la estimación fue de 29.758.

Resumen del modelo (b)

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	.656(a)	.431	.414	29.758

a Variables predictoras: (Constante), Exposición, Caracterización, Amenaza

b Variable dependiente: % PERDIDA

Tabla 8: Coeficiente de Determinación

d) Matriz de Correlaciones

El análisis de correlaciones provee un medio más objetivo y cuantitativo para medir la asociación entre variables espaciales. La dirección y la fuerza de la asociación entre dos variables se pueden medir estadísticamente (McGrew y Monroe, 2000).

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de asociación lineal entre dos variables. Este coeficiente entrega información sobre la interacción entre las variables independientes y sobre la interacción de cada una de las variables independientes respecto de la variable dependiente. En el primer caso, los coeficientes deben ser bajos, ya que niveles bajos de correlación indican que las variables no son colineales, es decir, dos variables diferentes no explican lo mismo de la variable dependiente. En el segundo caso, las correlaciones deben ser altas, ya que indican que la variable independiente tiene una fuerte relación con la variable dependiente (Rodríguez y Mora, 2001).

Los coeficientes oscilan entre 1 (fuerte asociación lineal positiva: a medida que aumentan los valores de una variable, aumentan los de la otra) y -1 (fuerte asociación lineal negativa: a medida que aumentan los valores de una variable, disminuyen los de la otra). Cuando los valores se aproximan a cero indican que entre las dos variables no existe asociación o ésta es muy débil (Rodríguez y Mora, 2001). El valor absoluto del coeficiente de la correlación indica fuerza; un valor absoluto alto indica una relación más fuerte, mientras los valores absolutos medios indican una relación pobre. Los coeficientes con bajos valores absolutos, cercanos a cero, indican relaciones débiles o nulas. Los coeficientes de correlación en la diagonal principal de la matriz siempre son 1, ya que cada variable tiene una relación positiva lineal con ella misma (Quintero y Rosales, 2012).

Para determinar si la asociación es estadísticamente significativa se debe observar el nivel de significación o p-value. Si este nivel en cada correlación es

menor que el nivel de significación elegido (normalmente 0.05) quiere decir que la correlación es significativa y las dos variables son linealmente dependientes. Por el contrario, si el nivel de significación es relativamente alto, la correlación no es significativa y las dos variables no son linealmente dependientes (Quintero y Rosales, 2012).

En la tabla 9 pueden observarse los coeficientes de correlación y los niveles de significación de las variables independientes y la variable dependiente. De esta tabla se puede inferir que la variable porcentaje destruido y la variable amenaza diferenciada de tsunami presentan una asociación lineal positiva, relativamente fuerte y la relación es estadísticamente significativa, lo que nos indica que la variable amenaza diferenciada de tsunami útil en la predicción de la destrucción de un tsunami. La representación gráfica de la relación entre las dos variables puede observarse en la figura 32.

		% DESTRUIDO	Amenaza	Susceptibilidad	Exposición
% DESTRUIDO	Correlación de Pearson	1	.574(**)	-.051	.495(**)
	Sig. (bilateral)	.	.000	.607	.000
Amenaza	Correlación de Pearson	.574(**)	1	-.085	.341(**)
	Sig. (bilateral)	.000	.	.390	.000
Susceptibilidad	Correlación de Pearson	-.051	-.085	1	-.090
	Sig. (bilateral)	.607	.390	.	.364
Exposición	Correlación de Pearson	.495(**)	.341(**)	-.090	1
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.364	.

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 9: Coeficientes de Correlación de Pearson

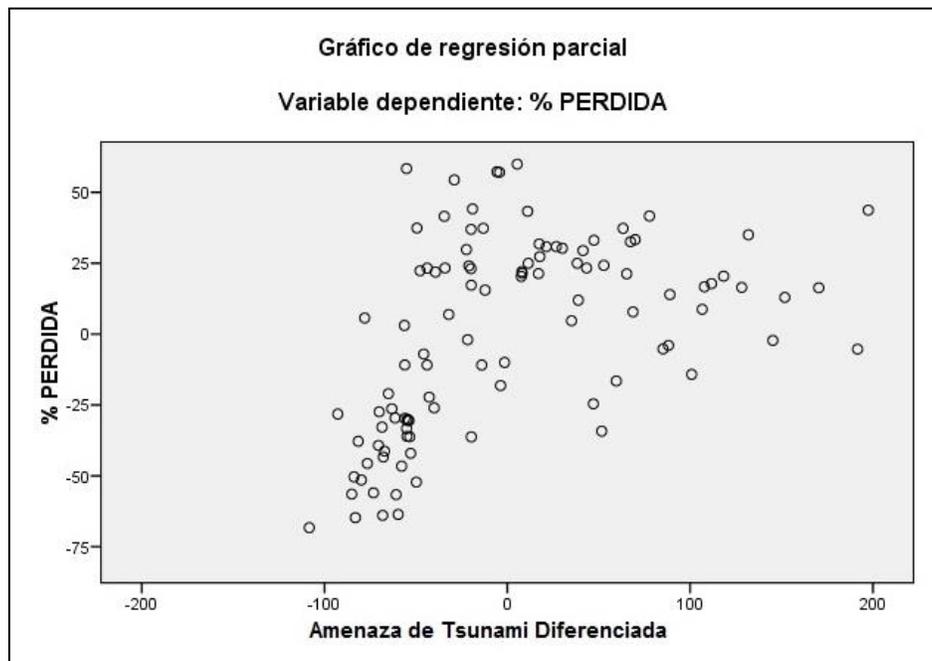


Figura 32: Gráfico de regresión, porcentaje de pérdida y amenaza de tsunami diferenciada

La variable susceptibilidad de las viviendas en relación a la variable porcentaje destruido, presenta una asociación lineal negativa muy débil. Además, resultó no ser una variable significativa para la variable dependiente. Esto quiere decir que la elección de la variable susceptibilidad de las viviendas no necesariamente es indicada para la determinación del impacto del tsunami. La representación gráfica de la relación entre las dos variables puede observarse en la figura 33.

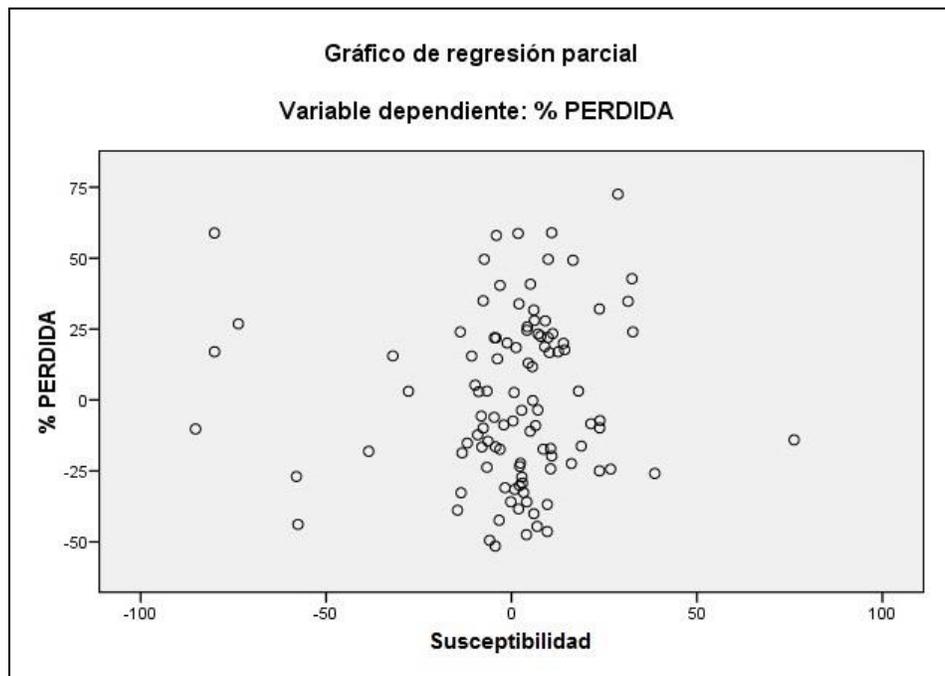


Figura 33: Gráfico de regresión, porcentaje de pérdida y susceptibilidad de las viviendas

En cuanto a la variable exposición, con relación a la variable dependiente, se observa que presenta una asociación lineal positiva, pero no muy fuerte. Sin embargo, su nivel de significancia indica que sí es una variable significativa, lo que quiere decir, que aunque no tiene una relación muy fuerte, sí es adecuada para la determinación de la destrucción del tsunami. La representación gráfica de la relación entre las dos variables puede observarse en la figura 34.

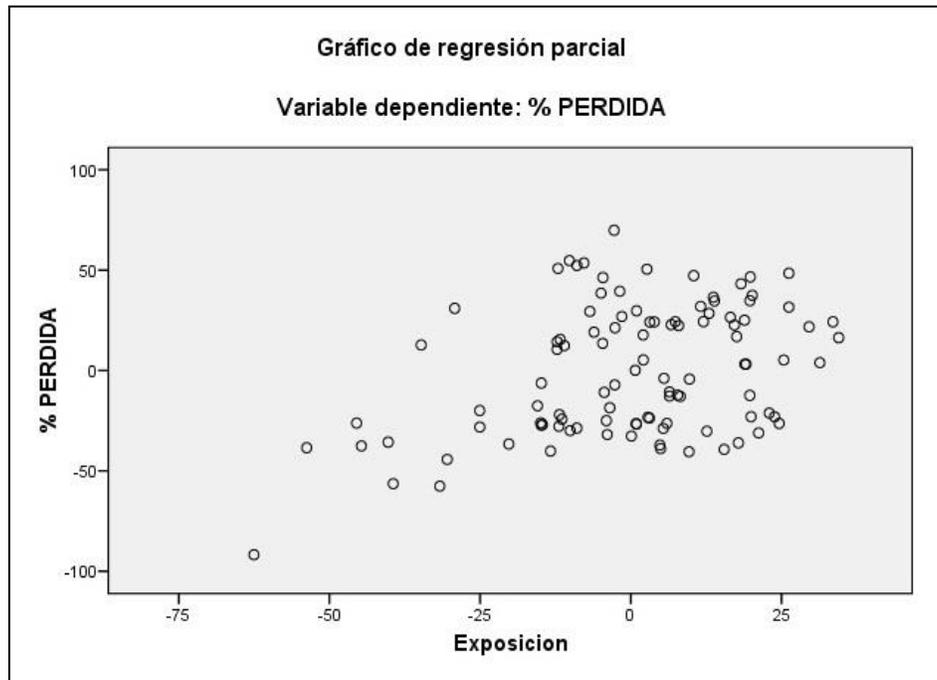


Figura 34: Gráfico de regresión, porcentaje de pérdida y exposición

En cuanto a la relación entre las variables independientes, las variables amenaza de tsunami diferenciada y susceptibilidad de las viviendas presentan una relación lineal negativa muy débil, la cual no es significativa. Al igual que la relación entre las variables susceptibilidad de las viviendas y exposición. Esto indica que las variables no están correlacionadas y no son redundantes.

La relación entre las variables amenaza de tsunami diferenciada y exposición es lineal positiva moderadamente débil. Esto quiere decir, que las variables presentan cierto nivel de correlación, la cual es significativa, lo que indica que podrían estar entregando información redundante. Esta relación puede explicarse debido a que algunas de las características de la inundación (o amenaza) están condicionadas a las condiciones morfológicas a las que hace referencia la variable exposición (altitud, pendiente, distancias).

La matriz de correlaciones es útil para el análisis estadístico, porque en términos generales indica que la información de cada variable es diferente respecto de las otras variables.

e) Regresión Múltiple

El análisis de regresión lineal múltiple permite establecer la relación entre una variable dependiente y un conjunto de variables independientes. El análisis de regresión lineal múltiple se aproxima de mejor manera a situaciones de análisis real que el análisis de regresión lineal simple, puesto que los fenómenos, hechos y procesos, por definición, son complejos y, en consecuencia, deben ser explicados en la medida de lo posible por la serie de variables que, directa e indirectamente, participan en su concreción (Rodríguez y Mora, 2001).

Para realizar la regresión múltiple, se utilizó el método ENTER, el cual utiliza las tres variables independientes ingresadas. Se eligió este método para poder analizar el comportamiento de la variable dependiente en función de las tres variables utilizadas para la zonificación de riesgo de tsunamis.

El estadístico t y su nivel de significancia permiten comprobar si la regresión entre una variable independiente y la dependiente es significativa. Un valor de t igual a cero indica ausencia de relación lineal, por lo que coeficientes significativamente diferentes de cero indican que las variables son relevantes en la regresión. Por otra parte, si la significación asociada al estadístico t es mayor al nivel de significación (normalmente 0.05) rechazaremos que la regresión sea significativa para las dos variables relacionadas.

En la tabla 10, se puede observar que las variables amenaza de tsunami diferenciada y exposición presentan valores de t muy diferentes de cero y niveles de significancia menores de 0.005, lo que indica que la relación de ambas variables con la variable dependiente es significativa. En cambio, el valor de t para

la variable susceptibilidad de las viviendas y su nivel de significación indican que su relación con la variable dependiente no es significativa.

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	-115.827	34.750		-3.333	.001
	Amenaza	.240	.042	.459	5.712	.000
	Caracterización	.031	.126	.019	.247	.806
	Exposición	.646	.153	.340	4.223	.000

a Variable dependiente: % PERDIDA

Tabla 10: Regresión

f) Análisis de Varianza (ANOVA)

La tabla de análisis de varianza permite valorar hasta qué punto es adecuado el modelo de regresión lineal para estimar los valores de la variable dependiente y se basa en que la variabilidad total de la muestra puede descomponerse entre la variabilidad explicada por la regresión y la variabilidad residual (Rodríguez y Mora, 2001). La tabla de ANOVA proporciona el estadístico F que mide si un conjunto de variables contribuye significativamente a la varianza de una respuesta. Si el nivel de significancia asociado al estadístico F es menor que el nivel de significación (normalmente 0.05), entonces las variables independientes hacen un buen trabajo explicando la variación de la variable dependiente, pero si es mayor a 0.05, entonces las variables independientes no explican la variación de la variable dependiente (Quintero y Rosales, 2012).

De acuerdo con la tabla 10, el análisis de varianza del conjunto de variables utilizada indica que las variables independientes le dan una explicación a la

variable dependiente de manera muy aceptable, con un nivel de significancia de 0.000.

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	66967.911	3	22322.637	25.208	.000(a)
	Residual	88552.757	100	885.528		
	Total	155520.668	103			

a Variables predictoras: (Constante), Exposición, Caracterización, Amenaza

b Variable dependiente: % PERDIDA

Tabla 11: Análisis de Varianza ANOVA

6.4.2. Comparación visual

El resultado de la comparación visual se puede observar en la tabla 12.

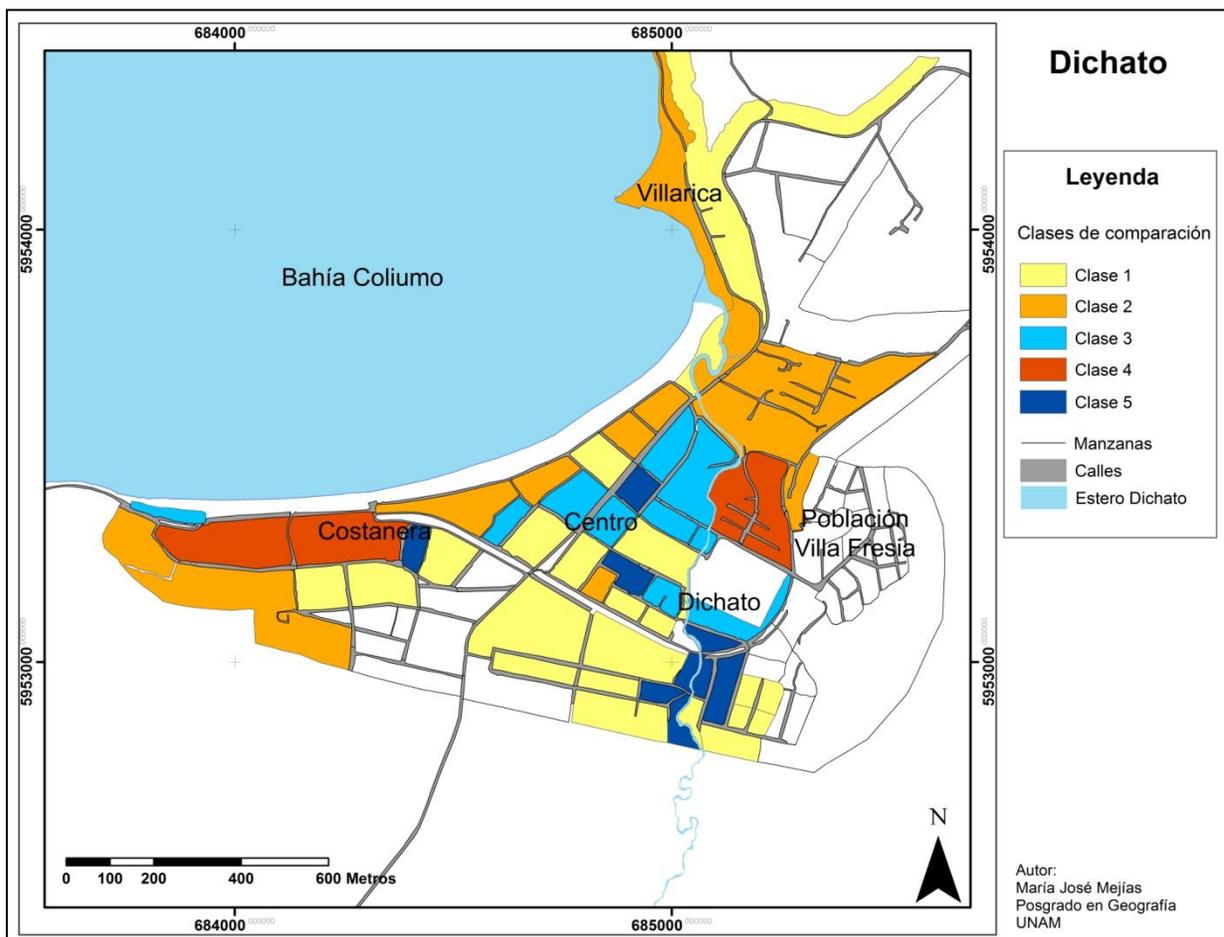
Clase	Descripción	N° de manzanas
1	Riesgo igual que impacto	20
2	Riesgo mayor a impacto en 1 nivel	10
3	Riesgo menor a impacto en 1 nivel	10
4	Riesgo mayor a impacto en 2 o más niveles	3
5	Riesgo menor a impacto en 2 o más niveles	9

Tabla 12: Resultados comparación visual

Al realizar la comparación visual de los mapas de Riesgo de Tsunami y Destrucción, lo primero que salta a la vista es que las manzanas bajo riesgo son las mismas que las que sufrieron algún porcentaje de daño.

En total, son 52 las manzanas afectadas, de las cuales 20 fueron clasificadas en la clase 1, con un riesgo igual que el impacto. En la clase 2, diez manzanas tuvieron un riesgo mayor al impacto en un nivel. En la clase 3, diez manzanas tuvieron un riesgo menor al impacto en un nivel. En la clase 4, tres manzanas tuvieron un riesgo mayor al impacto en dos o más niveles. Finalmente, en la clase 5 hubo nueve manzanas con un riesgo menor al impacto en dos o más niveles.

En el mapa 21 se puede observar la distribución espacial de las clases.



Mapa 21: Clases de comparación de resultados

CAPÍTULO VII: DISCUSIÓN

7.1. Zonificación de áreas de riesgo de tsunami

La zonificación de riesgo de tsunami es el resultado de la integración de los diferentes factores identificados y espacializados para el área de estudio, que caracterizan la amenaza y la susceptibilidad de Dichato antes de la ocurrencia del tsunami del 27 de febrero de 2010.

La selección de los factores utilizados estuvo condicionada principalmente por los estudios previos realizados por diferentes autores, y por la disponibilidad de la información necesaria para el análisis, estando este punto limitado esencialmente a contar con los medios necesarios para evaluar los escenarios de antes y después del tsunami.

Diversos autores han investigado sobre los factores que inciden en los niveles de riesgo de los asentamientos humanos, al igual que se han realizado numerosas investigaciones post tsunami para determinar las causas del impacto que han tenido.

En lo que se refiere a la diferenciación de la amenaza de tsunami, ya en 1993, Shuto consideraba que los parámetros hidrodinámicos profundidad de la inundación y velocidad de la corriente eran los principales responsables del daño producido por los tsunamis. Posteriormente comenzaron a ser usados en la elaboración de mapas de peligro de tsunami y su uso ha sido recomendado por la Guía de Preparación ante Tsunami Dirigida a Planificadores (COI, 2008). En Chile, recientemente fueron utilizados por Lagos (2012).

Sin embargo, estos estudios centran su atención en el riesgo de los habitantes, por lo cual se decidió integrar también el parámetro hidrodinámico fuerza

hidrodinámica de la corriente, debido a que Koshimura *et al* (2009) destacan la importancia de este parámetro en el impacto del tsunami en las construcciones.

Estos tres parámetros hidrodinámicos fueron extraídos de la modelación numérica de un evento similar al tsunami producido por el terremoto 8.8 del 27 de febrero de 2010.

Es importante destacar que la caracterización de la amenaza se consideró como un proceso dinámico, en el cual se reconoce un comportamiento diferenciado dentro del área inundada, ya que anteriores zonificaciones de riesgo de tsunami realizadas en Chile consideraban al área de inundación como un polígono homogéneo, sin diferenciación en su interior, lo cual se aleja considerablemente de la realidad al observar los resultados de la modelación, los cuales concuerdan con lo descrito por diversos autores que realizaron trabajos post-tsunami en Dichato.

El GEER Team (2010) reportó que cerca de la ribera del estero Dichato, permanecieron en pie algunos pinos, en los cuales se observaban algas colgando de sus ramas, aproximadamente a seis metros de altura. También se encontraron ramas recientemente rotas en los pinos, a siete metros del suelo. Las algas en los árboles pueden ser un indicador fiable de que la profundidad de inundación fue de al menos seis metros en esa área. Las ramas de los árboles pueden haber sido rotas por alguno de los botes de pesca que fueron arrastrados tierra adentro. Esta información coincide con los 6.06 metros de profundidad de inundación máxima que se calculó en el modelo.

En cuanto a la cota máxima de inundación, según el modelo alcanzó aproximadamente los siete metros de altitud, mientras que Koshimura *et al* (2010) observaron en campo que habría llegado a los diez metros de altitud, lo cual no coincidiría con lo modelado.

La distancia vertical que alcanzó el tsunami fue de aproximadamente 800 m, según Koshimura *et al* (2010) y de 1300 m según Martínez *et al*, (2011). El modelo indica que podría haber alcanzado los 1300 m en su mayor penetración, la cual siguió principalmente el cauce del estero Dichato.

En lo que se refiere a los factores seleccionados para espacializar la susceptibilidad, se decidió que se haría referencia a las viviendas, ya que para llevar a cabo la comparación con el impacto del tsunami sólo se contaba con las imágenes pre y post tsunami, lo que impedía comparar otros tipos de susceptibilidad, como la susceptibilidad de los habitantes o la susceptibilidad socioeconómica. La caracterización de las viviendas en Dichato permitió identificar que existe una gran homogeneidad espacial en este aspecto, ya que la densidad de las construcciones por manzana en general es baja en todo el pueblo, y en lo que se refiere a materialidad, el uso de la madera sobresale por sobre todos los otros materiales, sin embargo, muy pocas manzanas fueron clasificadas con altos niveles de precariedad. Estas condiciones se reflejan en el resultado de la evaluación multicriterio de la susceptibilidad de las viviendas, donde la mayor parte de las manzanas fueron clasificadas con una susceptibilidad media.

Para diferenciar la susceptibilidad física, también se integraron los factores de exposición, donde se utilizó la pendiente del terreno, altitud, distancia a la costa y distancia al estero Dichato. Estos factores determinan en gran medida que tan expuesto se está frente a la amenaza de tsunami y representan las características físicas del espacio donde se asienta el pueblo de Dichato, las cuales condicionan principalmente el ingreso de la columna de agua hacia el interior. En este punto, es importante destacar el papel que juega el estero Dichato en cuanto representa un canal que permitió el ingreso del tsunami hacia sectores más alejados de la costa. Las características morfológicas que condicionaron la exposición en Dichato también fueron descritas en los perfiles topográficos y batimétricos de la sección 4.5.

Así mismo, Villalobos *et al* (2011) describieron que después del terremoto, hubo una serie de inundaciones cuya forma dependió de la posición y distancia respecto al epicentro, además de la batimetría y topografía. Dichato fue uno de los lugares más devastados a lo largo de la costa. Varias olas barrieron las partes bajas del pueblo, golpeando el frente y la parte de atrás del pueblo, porque las olas entraron a través del estero. Como Dichato está localizado en la Bahía Coliumo, que es cerrada y pequeña, la forma de la bahía probablemente causó una intensa amplificación y resonancia de las corrientes.

El manejo de sistemas de información geográfica constituyó una herramienta básica para la realización de la zonificación de riesgo de tsunami. Dentro de su utilización, cabe destacar el uso de técnicas multicriterio para realizar la zonificación, ya que es una herramienta útil para la integración y ponderación de las diferentes variables discriminadas para calcular el riesgo en el área de estudio.

Mientras el uso generalizado de técnicas de los SIG ha mejorado la cartografía relativa a las amenazas, la inclusión de variables sociales, económicas y ambientales en este tipo de modelos continúa siendo un gran desafío. En el caso de los aspectos sociales y económicos de la vulnerabilidad, a veces no es posible cuantificar algunas de las variables que se analizan en los modelos espaciales de SIG. Además, la diversidad de escalas en que operan los distintos aspectos de susceptibilidad socioeconómica dificulta mucho su representación espacial mediante estas técnicas. Asimismo, en muchos casos no se dispone de información de calidad y detalle requeridos por los SIG (SIEIRD, 2004).

7.2. Impacto del tsunami en el área de estudio

Existen diversas formas de evaluar el impacto producido por un tsunami en zonas costeras, dependiendo principalmente del enfoque que se utilice. Este enfoque puede ser social, económico, estructural o ambiental, entre muchos otros. En este caso, el impacto se consideró en función de las construcciones del pueblo de Dichato.

Como se mencionó anteriormente, esta evaluación estuvo condicionada principalmente por la información disponible para el análisis, que se realizó mediante la comparación de las imágenes satelitales pre y post tsunami. Sin embargo, es importante mencionar que el proceso de clasificación de las imágenes debe estar acompañado por un trabajo de campo exhaustivo que avale lo observado. Aunque en esta oportunidad no se pudo realizar el trabajo de campo, es un punto importante a considerar en futuros estudios de este tipo.

El resultado del impacto del tsunami en el área de estudio demostró que cerca del 53% de las construcciones fueron destruidas, lo cual coincide con lo estimado por Martínez *et al* (2011).

Al realizar la comparación entre la zonificación de riesgo y el impacto del área de estudio, las estadísticas demuestran que la zonificación sí explica la destrucción producida en Dichato por el tsunami del 27 de febrero de 2010, lo cual indica que es una herramienta útil que se debiera considerar en los instrumentos de planificación territorial con el fin de reducir el riesgo de los asentamientos costeros.

Si bien el modelo no se ajusta en un 100% si mostró tener consistencia como método predictivo. Así también reveló que la variable amenaza de tsunami diferenciada es la que más incide en el nivel de destrucción, lo cual reafirma la necesidad de considerar a la inundación como un proceso dinámico y no como un área uniforme.

La variable que mostró tener menor consistencia estadística fue la susceptibilidad de las viviendas, lo cual puede tener diferentes explicaciones. Por una parte, la caracterización de las viviendas responde a diversos factores, muchos de los cuales no pudieron ser considerados en la zonificación, tales como las condiciones de cimentación de las casas o su antigüedad, que constituyen puntos importantes al hacer referencia a la resistencia de las construcciones frente al impacto del tsunami. También la generalización de las condiciones predominantes dentro de cada manzana puede traducirse en un sesgo al momento de evaluar la utilidad de la variable.

Por otra parte, la comparación visual indicó que el 38.5% de las manzanas tuvo un impacto igual que el riesgo calculado en la zonificación, por lo que el restante 61.5% presenta diferencias en el resultado de la comparación, ya sea subestimando o sobreestimando el riesgo. Dentro de estas manzanas que no coincidieron, hay 9 donde es necesario plantear el por qué de la diferencia ya que presentaron un impacto notoriamente mayor al riesgo. Al observar individualmente en cada manzana los valores de cada factor y la imagen satelital anterior al tsunami se puede concluir que esta diferencia se debe a diversos motivos. El más notorio de ellos se debe a la generalización de los datos dentro de cada manzana. Así también se pudo observar que varias de las manzanas que no coinciden presentan niveles muy bajos de construcción, o viviendas aisladas, lo cual pudo condicionar la forma en que fueron impactadas por el tsunami. Por otra parte, es necesario considerar que los datos utilizados para la caracterización de las viviendas fueron extraídos del Censo del año 2002, por lo que algunas de las construcciones pudieron cambiar en el transcurso de ocho años.

Así mismo, es importante resaltar que el daño del tsunami en las estructuras es causado por el impacto o fuerza hidrodinámica y también por el impacto de los escombros que son arrastrados por el agua (Koshimura *et al*, 2009). Este hecho seguramente está reflejado en el daño que presentan las viviendas, pero no está considerado en el resultado del modelo de inundación (los parámetros

hidrodinámicos estimados), lo cual podría explicar que la zonificación de riesgo esté subestimada respecto de la destrucción calculada para cada manzana.

Esta consideración podría explicar por qué las manzanas localizadas en la ribera del estero Dichato hayan presentado un grado de destrucción muy alto, aun estando aproximadamente a 600 m de la línea de costa. Estas manzanas que tuvieron niveles muy diferentes entre la zonificación de riesgo de tsunami y el impacto, presentaron niveles bajos de amenaza, exposición media y la susceptibilidad de las viviendas fue entre muy baja y media. Incluso algunas de ellas presentaban muy buenas condiciones de materialidad y no fueron clasificadas como precarias, y sin embargo, fueron destruidas completamente.

Así mismo, cabe resaltar que las manzanas localizadas en los márgenes del estero en su mayoría presentaron un grado de destrucción muy alto, lo cual podría indicar que el factor distancia al estero Dichato también puede haber estado subestimado.

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

El agua cubre la mayor parte de la superficie del planeta y la gran mayoría de la población mundial vive en zonas costeras. Por lo que es motivo de preocupación que millones de personas estén potencialmente en peligro debido a la amenaza de tsunamis (COI, 2008).

Sin duda hay mucho trabajo por hacer para disminuir el riesgo de las comunidades costeras, y el evento del 27 de febrero de 2010 demostró que hay mucho trabajo atrasado en materia de planificación en función de los riesgos naturales. Debido a que el daño ya se produjo, lo que queda por rescatar es la posibilidad de aprender de lo ocurrido, y una forma de hacerlo es analizando las causas del impacto del tsunami en un determinado lugar, obteniendo además la información necesaria para validar metodologías referentes al riesgo de tsunamis.

La comprensión de cómo se comportó la inundación y cuáles fueron sus consecuencias en una comunidad se transforma en información base no sólo para el ordenamiento territorial de espacios costeros, sino también para el diseño de medidas de mitigación y el manejo de emergencias.

La metodología utilizada para zonificar el riesgo de tsunamis en Dichato mostró ser consistente con los resultados del impacto del tsunami del 27 de febrero de 2010. Si bien es un modelo simplificado y no se ajusta un 100% a la realidad, sí demostró ser una herramienta útil para explicar el impacto del tsunami.

Al igual que en Lagos (2009 y 2012), los resultados de la zonificación de riesgo de tsunamis muestran cómo las características del lugar, su localización, el comportamiento diferenciado de la amenaza y las características de las viviendas condicionaron el impacto del tsunami en Dichato. La información generada en este

tipo de trabajos debe transformarse en la base para futuros estudios de ordenamiento territorial.

Asimismo, es congruente plantear que al momento de considerar la amenaza de tsunami en el ordenamiento territorial, no necesariamente se debe considerar el escenario del 27 de febrero de 2010, sino que un evento extremo, como por ejemplo, el del tsunami de 1960, ya que su impacto en los asentamientos puede ser mucho mayor que el registrado en el evento de 2010. Como lo plantea la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (2008), el considerar el peor escenario promueve la máxima seguridad en materia de planificación.

Como se pudo observar en el trabajo de Lagos (2012), la metodología utilizada se presenta de forma que pueda ser aplicada en otras localidades costeras. Su estructura permite identificar con claridad la información necesaria para su aplicación, compuesta por factores de amenaza y susceptibilidad; su integración mediante técnicas de evaluación multicriterio; el resultado correspondiente a la zonificación de riesgo de tsunami y finalmente, su comparación con el impacto que tuvo el tsunami.

Sin embargo, no se debe olvidar que cada localidad presenta condiciones espaciales específicas que pueden condicionar los factores de amenaza y susceptibilidad del lugar específico. Es por esto, que antes de aplicar esta metodología, se deben evaluar las características del lugar y seleccionar los factores más adecuados a su realidad, como fue en este caso, la elección del factor distancia al estero Dichato.

La principal lección aprendida de este estudio es que si este tipo de metodologías fueran aplicadas antes de que ocurra un desastre, se podrían evitar muchos daños. A futuro, es necesario tomar en cuenta este tipo de zonificaciones en el ordenamiento territorial a fin de construir comunidades costeras menos vulnerables y más preparadas.

Sin embargo, es importante destacar que la aplicación de herramientas como la Evaluación Multicriterio, presentan un grado importante de subjetividad al momento de elegir y ponderar las variables, lo cual es un punto importante a considerar al replicar este tipo de estudios. Asimismo, no se debe olvidar que el riesgo es un concepto complejo, que se compone de diversos factores, de diferente naturaleza (física, económica, social, ambiental, etc.), por lo que es difícil evaluarlo en todas sus facetas. Las zonificaciones de riesgo de tsunami son modelos que simplifican la realidad, y deben ser consideradas como una guía para la evaluación del riesgo, pero no como una verdad absoluta.

Constituye un gran desafío revisar y documentar hasta qué punto las evaluaciones de riesgo han contribuido a modificar el riesgo y la forma en que ellas se están utilizando en el proceso de toma de decisiones (SIEIRD, 2004).

8.2. Recomendaciones

Después de ocurrido el tsunami, comienza la etapa de reconstrucción, la cual es una oportunidad de rectificar las deficiencias pasadas en materia de ordenamiento territorial. En este aspecto es importante considerar las condiciones espaciales de cada localidad y los efectos que tuvo el tsunami para conducir una planificación que responda a las necesidades del lugar, además de ser sustentable y ayude a mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Los instrumentos de planificación existentes deben ser actualizados y adaptados con estos fines.

Según lo planteado por la COI (2008), uno de los elementos clave que se deben establecer para tener comunidades preparadas ante la amenaza de tsunami es el Planeamiento Urbano, con el fin de fortalecer el estado de preparación de las comunidades en riesgo.

Como parte de la reconstrucción se debiera imponer restricciones en las zonas de riesgo para reducir la concentración de edificaciones estructuralmente vulnerables,

mientras que debieran evitarse por completo las nuevas construcciones en dichas áreas. Cualquier construcción en zonas peligrosas debe ser resistente a los tsunamis para prevenir daños a la estructura misma y también reducir la magnitud del daño tierra adentro (COI, 2008). Es así como en el pueblo de Dichato quedó en evidencia que no es posible habitar el borde costero inmediato, al menos en los primeros 50 o 100 metros. De la misma forma, se debiera prohibir las construcciones en la ribera del estero Dichato, en todo el tramo que atraviesa el pueblo. Por otra parte, debiera potenciarse la construcción de viviendas de concreto por sobre otros materiales menos resistentes, como la madera.

Las áreas residenciales deben ser trasladadas a zonas más altas, fuera del área de inundación, y se debe implementar el uso restringido de las tierras, así como también se debe restringir el uso del suelo en áreas que podrían servir como zonas de amortiguamiento. De la misma forma, se debiera trasladar la infraestructura crítica (hospitales, escuelas, bomberos, policía, etc.) hacia zonas fuera del área de inundación.

Otra de las medidas para disminuir los efectos destructivos de los tsunamis que se pueden implementar en Dichato como parte de su reconstrucción, son las estructuras de protección, tales como los cinturones verdes y las edificaciones resistentes a los tsunamis. Existen diversos trabajos que destacan la importancia de los cinturones verdes como mitigadores de tsunamis (Harada, K. e Imamura, F., 2005; Irtem, E., Gedik, N., Kabdasli, M.S., Yasa, N.E., 2009; Tanaka, N., 2009, entre otros). Estos estudios han comprobado que dependiendo de sus características los cinturones verdes pueden ser útiles para detener objetos a la deriva y barcos arrastrados por el tsunami, para reducir la energía del tsunami, para formar dunas de arena que protejan de tsunamis y de marejadas, y para atajar personas que sean arrastradas por el tsunami hacia el mar (Harada, K., e Imamura, F., 2005). En este sentido, estos bosques pueden constituir una forma de disminuir la vulnerabilidad de los asentamientos costeros que se encuentren detrás de ellos.

Es importante recordar que la zonificación de riesgo de tsunami realizada corresponde a la realidad de Dichato anterior al 27 de febrero de 2010, por lo que no debiera ser utilizada para proponer medidas de mitigación en la actualidad, sino que se debería tomar como un antecedente importante en la reconstrucción del pueblo de Dichato.

La realización de este tipo de zonificaciones debiera replicarse en los otros pueblos costeros que fueron o pueden ser afectados por un tsunami, ya que por lo general sólo son aplicados en las ciudades costeras más grandes, olvidando a las localidades más pequeñas.

BIBLIOGRAFÍA

- ACEVES-QUESADA, J., LÓPEZ-BLANCO, J., MARTÍN DEL POZZO, A., 2006, Determinación de Peligros Volcánicos Aplicando Técnicas de Evaluación MultiCriterio y SIG en el área del Nevado de Toluca, centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 23, Nº 2, p. 113-124. México.
- ACEVES-QUESADA, J., DÍAZ-SALGADO, J., LÓPEZ-BLANCO, J., 2007, Vulnerability Assessment in a Volcanic Risk Evaluation in Central Mexico through a Multi-Criteria-GIS Approach. *Natural Hazards*, Nº40, p. 339-356.
- AGUIRRE, R. 2009. Conceptos de Geomática y estudios de caso en México. *Geografía para el Siglo XXI. Serie: Libros de Investigación. Instituto de Geografía, UNAM, México.*
- ATWATER, B., CISTERNAS, M., BOURGEOIS, J., DUDLEY, W., HENDLEY, J., STAUFFER, P. 1999. *Surviving a Tsunami - Lessons from Chile, Hawaii, and Japan. Circular 1187, USGS, p.18.*
- AYALA, F., OLCINA, J. 2002, *Riesgos Naturales*, Editorial Ariel, España.
- BARREDO, J. 1996. *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del Territorio. RA-MA Editorial. España.*
- BARRIENTOS, S., VERA, E., ALVARADO, P., MONFRET, T. 2004. Crustal seismicity in central Chile. *Journal of South American Sciences*. Nº 16, pp. 759 – 768.
- BOLT, B. 1981. *Terremotos. Editorial Reverté, España. 266 p.*
- BRYANT, E. 2001. *Tsunami, the underrated hazard. Press syndicate of the University of Cambridge, Unites Kingdom, 320p.*
- CALVO, F. 1984. *La Geografía de los Riesgos. Geocrítica. Cuadernos críticos de geografía humana. Universidad de Barcelona. Nº54.*
- CALVO, F. 2001. *Sociedades y territorios en riesgo. Ediciones del Serbal, Barcelona, España, p.186.*
- CAMPOS, J., HATZFELD, D., MADARIAGA, R., LÓPEZ, G., KAUSEL, E., ZOLLO, A., IANNACONE, G., FROMM, R., BARRIENTOS, S. y LYON-CAEN, H. 2002. A seismological study of the 1835 seismic gap in south-central Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. V.132. Nº1-3, pp 177-195.
- CARSTENS, C., HUEPE, G. 2011. *Rememorando Dichato; un paseo por paisajes y relatos. Fondo Nacional de Desarrollo Cultural y las Artes. Alerce Talleres Gráficos S.A. Santiago, Chile.*

-
- CHEN, K., BLONG, R., JACOBSON, C. 2001. MCE-RISK: Integrating Multicriteria Evaluation and GIS for Risk Decision-Making in Natural Hazards. *Environmental Modelling & Software* N°16. p. 387 – 387.
- CENAPRED. Centro Nacional de Prevención de Desastres. 2005. Tsunamis. Serie Fascículos. Segunda edición. México. 39 p.
- COBURN, A., SPENCE, R.J., POMONIS, A. 1991. Vulnerabilidad y Evaluación del Riesgo. Programa de Entrenamiento para el Manejo de Desastres. Cambridge Architectural Research Limited. The Oast House, Maling Lane. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD.
- COI. Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO. 2008. Preparación para casos de tsunami – Guía informativa para los planificadores especializados en medidas de contingencia ante catástrofes. Manuales y Guías N°49. UNESCO. 26 p.
- DARIENZO, M., AYA, A., CRAWFORD, G., GIBBS, D., WHITMORE, P., WILDE, T. YANAGI, B. 2005. Local tsunami warning un the Pacific Coastal United States. En *Developing Tsunami- Resilent Communities: The National Tsunami Hazard Mitigation Program*, editor E. Bernard, Springer, USA, pp 111-119.
- DIGITAL GLOBE, 2012. Spectral Response for DigitalGlobe Earth Imaging Instruments [on line], disponible en: www.digitalglobe.com.
- DIVISIÓN OBSERVATORIO SOCIAL. MINISTERIO DE DESARROLLO SOCIAL. GOBIERNO DE CHILE. Indicadores de Caracterización Social: Glosario [on line], disponible en <http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/indicadores/glosario.php>.
- DARIENZO, M., AYA, A., CRAWFORD, G., GIBBS, D., WHITMORE, P., WILDE, T. YANAGI, B. 2005. Local tsunami warning un the Pacific Coastal United States. En *Developing Tsunami- Resilent Communities: The National Tsunami Hazard Mitigation Program*, editor E. Bernard, Springer, USA, pp 111-119.
- EMOL, 2011. Fiscalía logra establecer cifra total de muertos y desaparecidos producto del tsunami, [on line] disponible en: <http://www.emol.com/noticias/nacional/2011/01/26/460704/fiscalia-logra-establecer-cifra-total-de-muertos-y-desaparecidos-producto-del-tsunami.html>
- ENGDAHL, E. R., VAN DER HILST, R. D., BULAND, R. 1998. Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination. *Bulletin Seismological of Society of America*. Vol. 88, pp. 722 – 743.
- EUROPEAN COMMISSION. DIRECTORATE GENERAL JRC. JOINT RESEARCH CENTRE. 2010. Tsunami Chile 27 february 2010. Part 3: Estimation of Coastal Inundation. Italia.
-

-
- GEER TEAM. Geoengineering Extreme Events Reconnaissance Team. 2010. Geo-Engineering reconnaissance of the February 27, 2010, Maule, Chile Earthquake. Report of the National Science Foundation-Sponsored Geoengineering Extreme Events Reconnaissance (GEER) Team. BRAY, J., FROST, D. (Editores). [on line] disponible en www.geerassociation.org.
- GHRIBI, M. 2005. GIS Applications for Monitoring Environmental Change and Supporting Decisionmaking in Developing Countries. International Centre for Science and High Technology, United Nations Industrial Development Organization. 144 p.
- HARADA, K., IMAMURA, F. 2005. Effects of coastal forest on tsunami hazard mitigation – A preliminary investigation. *Case Studies and Recent Developments*. Satake, K., editor. Ed. Springer. pp. 279-292.
- INE. Instituto Nacional de Estadísticas. 2003. Base de datos Censo 2002 [Archivo digital REDATAM].
- IRTEM, E., GEDIK, N., KABDASLI, M.S., YASA, N.E. 2009. Coastal forest effects on tsunami run-up heights. *Ocean Engineering*, N°36. pp. 313-320.
- ITIC. International Tsunami Information Center. 2004. Glosario en español [online]. Disponible en <http://www.prh.noaa.gov>.
- KAGAN, Y., JACKSON, D. 1991. Comment on seismic gap hypothesis: ten years after. *Journal of Geophysical Research*. N°96, pp 419-431.
- KAGAN, Y., JACKSON, D. 1993. Reply on seismic gap hypothesis: ten years after. *Journal of Geophysical Research*. N°98, pp 9917-9920.
- KAGAN, Y., JACKSON, D. 1995. New seismic gap hypothesis: five years after. *Journal of Geophysical Research*. N°100, pp 3943-3959.
- KOSHIMURA S, YANAGISAWA H. 2007. Developing fragility functions for tsunami damage estimation using the numerical model and satellite imagery. 5th International Workshop on Remote Sensing Applications to Natural Hazards. Washington DC, p. 1-6.
- KOSHIMURA, S., OIE, T. YANAGISAWA, H., IMAMURA, F. 2009. Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia. *Coastal Engineering Journal*. Vol. 51, N°3, pp. 243-273.
- KOSHIMURA, S., MATSUOKA, M., MATSUYAMA, M., YOSHII, T., MAS, E., JIMENEZ, C., YAMAZAKI, F. 2010. Field survey of the 2010 tsunami in Chile. En: *2010 Chile Earthquake and Tsunami Technical Report*. JST-JICA SATREPS Perú Project. Chile Earthquake Field Investigation Team.
- LAGOS, M. 2000. Tsunamis de Origen Cercano a las Costas de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*. N°27. pp. 93-102.
- LAGOS, M. 2002. Desastres naturales y desarrollo. Centro EULA – Chile. Programa de Doctorado en Ciencias Ambientales: *Análisis integrado de sistemas urbanos*, Concepción, 7p.
-

-
- LAGOS, M. y CISTERNAS, M. 2008. El nuevo riesgo de tsunami: considerando el peor escenario. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*. Vol. XII, núm. 270 (29).
- LAGOS, M. 2009. Metodología optimizada para la zonificación de áreas de riesgo de tsunami (MOZART) y su aplicación en el estuario del río Maullín, Región de Los Lagos, Chile. Tesis de doctorado. Dirección de Postgrado de la Universidad de Concepción, Chile.
- LAGOS, M., ARCAS, D., RAMÍREZ, M.T. 2010. Reconocimiento post tsunami chileno de 2010. Proyecto FONDECYT 11090210.
- LAGOS, M., HARO, J. 2011. Magnitude and impact from the 2011 Tohoku Tsunami in the coast of Chile, Abstract NH23-1209813. 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, California., 5-9 Dic.
- LAGOS, M. 2012. Zonificación del riesgo de tsunami en el centro sur de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*. N°53, pp. 7-21.
- LIRA, J. 2003. La Percepción Remota: Nuestros ojos desde el espacio. Tercera Edición. La ciencia para todos. Fondo de Cultura Económica. México.
- LOMNITZ, C. 1970. Mayor earthquakes and Tsunamis in Chile during the period 1535 to 1955. *Geological Rundschau*, Vol.59, N°3, pp. 938-960.
- MADARIAGA, R. 1998. Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra* (Madrid), Vol.10, pp. 221-258.
- MCCAN, W., NISHENKO, S., SYKES, L., KRAUSE, J. 1979. Seismic gaps and plate tectonics: seismic potential for major boundaries. *Pure Appl. Geophysical*. N°117, pp 1082-1147.
- MCGREW, J.C. Jr, MONROE, C. 2000. An Introduction to Statistical Problem Solving in Geography. Segunda Edición. Editorial McGraw-Hill Higher Education. EE.UU. 254 p.
- MARTÍNEZ, C., ROJAS, O., JAQUE, E., QUEZADA, J., VÁSQUEZ, D., BELMONTE, A. 2011. Efectos territoriales del tsunami del 27 de febrero de 2010 en la costa de la Región del Bio bío, Chile. *Revista Geográfica de América Central*. Número especial EGAL 2011, Costa Rica, pp. 1-16.
- MENA, C., FAJARDO, J., ORMAZÁBAL, Y., 2006, Modelación Espacial mediante Geomática y Evaluación MultiCriterio para la Ordenación Territorial. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Tarapacá*, vol. 14, N° 1, pp. 81-89. Chile.
- MONGE, J. 1993. Estudios de riesgo de tsunami en costas chilenas. Dpto. Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, pp 1-15.
- MORENO, M., ROSENAU, M., ONCKEN, O. 2010 Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. *Nature* N°467, pp. 198-204.
- NAHUELPAÑ, E., VARAS, J. 2010. El terremoto/tsunami en Chile. Una mirada a las estadísticas médico legales. Servicio Médico Legal, Ministerio de Justicia, Gobierno de Chile [on line]. Disponible en <http://www.sml.cl/proyectos/estadistica/>
-

documentos/EI_terremoto_Tsunami_en_Chile.pdf

- NISHENKO, S. 1985. Seismic Potential for Large and Great Interplate Earthquakes along the Chilean And Southern Peruvian Margins of South America: A Quantitative Reappraisal. *Journal of Geophysical Research*. Vol.90, N°B5, pp. 3589-3615.
- NISHENKO, S., SYKES, L. 1993. Comment on seismic gap hypothesis: ten years after. *Journal of Geophysical Research*, N°98, pp 9909-9916.
- NOAA. National Weather Service, [on line], disponible en: www.tsunami.gov.
- ONEMI. Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior. 2001. Metodología básica para la elaboración de un plan comunal de prevención y respuesta ante tsunami. Departamento de Protección Civil. Chile. 16p.
- ONEMI. Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior. 2002. *Plan Nacional de Protección Civil*. Decreto Supremo 156, del 12 de marzo de 2002. Chile.
- ONEMI. Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior. 2009. *Marco Conceptual en Protección Civil*. Programa de Formación Profesional en Protección Civil. Chile.
- ORTIZ, R. 2000, Riesgo Volcánico. En: Astiz, M. y García, A. (Editores), Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica, Servicio de Publicaciones Excmo. Cabildo Insular de Lanzarote, p. 371-386. España.
- PAPADOPOULOS, G., IMAMURA, F. 2001. A proposal for a new tsunami intensity scale. ITS 2001 Proceedings, Session 5, Number 5-1.
- PRBC18. Plan de Reconstrucción del Borde Costero. 2010. Plan Maestro Dichato. Informe Final – Diciembre 2010. Gobierno de Chile.
- QUESADA, J., JAQUE, E., BELMONTE, A., FERNÁNDEZ, A., VÁSQUEZ, D y MARTÍNEZ, C. 2010. Movimientos cosísmicos verticales y cambios geomorfológicos generados durante el terremoto Mw=8.8 del 27 de febrero de 2010 en el centro-sur de Chile. *Revista Geográfica del Sur*. Vol.1, N°2, pp. 11-45.
- QUINTERO, J. 2012. Propuesta de un modelo de análisis geoespacial de vulnerabilidad con base en la dependencia espacio-temporal de sus relaciones.
- QUINTERO, J.A., ROSALES, A. 2012. Distribución de aves rapaces en Los Tuxtlas: un acercamiento espacio-estadístico. En: Temas Selectos de Geomática: métodos y aplicaciones. Geografía para el Siglo XXI. Serie: Libros de Investigación. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- RAMÍREZ, J. 1986. Tsunami. *Revista Terra Australis*. N°29, pp 29-39.
- RAMIREZ, MT; LAGOS, M; ARCAS, D; GARCIA, C; SEVERINO, R. 2010. Geomorphological effects from the 27 February 2010 tsunami: A post-tsunami survey, central Chile. *American Geophysical Union (AGU) Chapman Conference: Giant earthquakes and their tsunamis*. Scientific program pp. 43.

-
- REESE, S., COUSINS, W., POWER, W., PALMER, N., TEJAKUSUMA, I., NUGRAHADI, S. 2007. Tsunami vulnerability of buildings and people in South Java – field observations after the July 2006 Java tsunami. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Vol.7, pp. 573–589.
- RODRÍGUEZ, M.J., MORA, R. 2001. Análisis de regresión múltiple. En: Estadística informática: casos y ejemplos con el SPSS. Publicaciones de la Universidad de Alicante, España, pp. 3-17.
- ROMERO, H., FUENTES, C., y SMITH, P. 2011. La Geografía de los Riesgos “Naturales” y el Terremoto de Chile del 27 de febrero de 2010. En: Geografía y ambiente en América Latina. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM e Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT.
- SAATY, R. 1987. The analytic hierarchy process: what it is and how it is used. *Mathematical Modeling*. N° 9. Vol. 3, pp. 161-176.
- SATAKE, K. 1994. Mechanism of the 1992 Nicaragua tsunami earthquakes. *Geophysical Research Letters*, Vol 21, N°23. Pp 2519-2522.
- SATAKE, K. 1996 Seismotectonics of tsunami. *International workshop tsunami mitigation and risk assessment*. Petropavlovsky-Kamchatskiy, Rusia, pp. 22-27.
- SAUTER, F. 1989. Fundamentos de Ingeniería Sísmica. Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Vol.1.
- SHOA. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. 2002a. Terremotos y tsunamis o maremotos. Texto de Enseñanza Media. SHOA-Centro Internacional de Informaciones de Tsunami. Chile. 100p.
- SHOA. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. 2002b. Tsunami: las grandes olas. 17p.
- SHOA. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. 2005. Instrucciones oceanográficas N°3: Instrucciones generales sobre el sistema de alarma de maremotos. Quinta Edición, Valparaíso, Chile. 31p.
- SHUTO, N. 1993. Tsunami intensity and disasters. En: Tsunamis in the World, S. Tinti, ed., Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 197-216.
- SIEIRD, Secretaría Interinstitucional de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, 2004. *Vivir con el Riesgo: Informe Mundial sobre las iniciativas para la reducción de Desastres*, Naciones Unidas (EIRD/ONU).
- SSN. Servicio Sismológico Nacional. 2010. Informe técnico. Terremoto Cauquenes 27 de febrero de 2010. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- SSN. Servicio Sismológico Nacional. 2013. Sismicidad y Terremotos en Chile, [on line], disponible en: www.sismología.cl.
-

- STAUDER, W. 1973. Mechanism and spatial distribution of Chilean earthquakes with relation of subduction of the oceanic plate. *Journal of Geophysical Research*. Vol.78. N° 23. pp. 5033-5061.
- TANAKA, N. 2009. Vegetation bioshields for tsunami mitigation: review of the effectiveness, limitations, construction and sustainable management. *Landscape and Ecological Engineering*. Vol. 5, N°1, pp 71-79.
- UNESCO. 2008. Glosario de Tsunamis. Intergovernmental Oceanographic Commission Information document N° 1221. París, Francia.
- VARGAS, G., FARÍAS, M., CARRETIER, S., TASSARA, A., BAIZE, S., MELNICK, D. 2011. Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw 8.8 Maule earthquake in Central Chile. *Andean Geology. Revista Geológica de Chile*. N°38 (1), pp 219-238.
- VILLALOBOS, F., OVANDO, E., MENDOZA, M., ORÓSTEGUI, P. 2011. Damages observed in the 2010 Concepción earthquake related to soil phenomena. *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Paper N°DOCVI. 10 al 13 de enero, 2011. Santiago, Chile.