

# Metodologías para establecer áreas de riesgo por remoción en masa en Chile, en el marco de la elaboración de los Planes de Desarrollo Comunal (PRC)<sup>1</sup>

Claudia Espinoza Lizama<sup>2</sup>

## Introducción

Las regiones más avanzadas del planeta han desarrollado diversos medios de defensa en caso de ocurrencia de un desastre natural, lo que funciona de manera relativamente eficaz. Esto no sucede en países menos desarrollados, pues la mayoría de los países en vías de desarrollo, como en el caso de Chile, no cuentan ni con una adecuada planificación para los asentamientos humanos, ni con medidas de seguridad y sistemas de alerta temprana (medidas de mitigación) (Lavell 1997).

Los desastres naturales corresponden al efecto perturbador que provoca sobre un territorio un episodio natural extraordinario y que, a menudo, supone la pérdida de vidas humanas (Ayala Carcedo y Olcina 2002). Una forma de medir la incidencia de estos fenómenos sobre el paisaje cultural es evaluando el ‘riesgo natural’, definido como la probabilidad de ocurrencia en un lugar y en un momento determinados de un fenómeno natural potencialmente peligroso para la comunidad, capaz de causar daño a las personas y a sus bienes. La magnitud del riesgo de los desastres naturales depende de la amenaza y del grado de vulnerabilidad de la población, los cuales no pueden considerarse de manera independiente; es decir, la amenaza no existe sin que un elemento presente vulnerabilidad ante ella, y viceversa (Chardon 2002).

Para la evaluación del riesgo se ha propuesto una gran cantidad de ecuaciones, siendo la más utilizada por la comunidad científica aquella que define el riesgo en función de la amenaza y la vulnerabilidad:

$$\text{Riesgo (R)} = \text{Amenaza (A)} \times \text{Vulnerabilidad (V)}$$

La ‘amenaza’ es considerada como el peligro latente, o factor de riesgo externo, de un sistema expuesto; puede ser expresada matemáticamente como la probabilidad de exceder el nivel de ocurrencia de un suceso con cierta intensidad, en un sitio específico y en un período de tiempo dado (ONEMI 1996).

La ‘vulnerabilidad’, en tanto, puede definirse como la susceptibilidad al daño o destrucción de los elementos culturales por un fenómeno extremo. Está condicionada por el grado de exposición al fenómeno (que alude a la población medida en número de habitantes o de bienes por unidad de superficie, situados al interior de una zona de peligro) y por la resistencia a este (ONEMI 1996).

Uno de los peligros más recurrentes es el de ‘remoción en masa’, el cual se define como el deslizamiento de una parte del material superficial (suelos, agregados, rocas) de una ladera, por la acción directa de la fuerza de la gravedad, hasta encontrar un nuevo punto de reposo en el que el material alcanza un estado de equilibrio (Cruden 1997). Los principales factores que influyen en los procesos de remoción en masa están asociados a la litología-geología de un lugar, al tipo de suelo, a la pendiente (a mayor pendiente mayor riesgo), a las precipitaciones y condiciones climatológicas (intensidad y cantidad de precipitaciones), a los sismos intensos, a la cobertura y tipo de vegetación, y a las actividades ejercidas por el hombre (deforestación, construcción sin medidas de mitigación, entre otras) (Mardones y Vidal 2001).

Los movimientos de remoción en masa pueden generar graves pérdidas en infraestructura, viviendas, equipamiento y en vidas humanas, lo que eventualmente puede prevenirse mediante la aplicación adecuada de instrumentos de planificación territorial, principalmente de los Planes Reguladores Comunales —en adelante, PRC—, ya que estos llevan a cabo estudios de riesgos geofísicos, en los que se definen zonas con riesgo alto,

---

<sup>1</sup> La investigación se basa en los siguientes estudios realizados para delimitar zonas de riesgo por remoción en masa: el *Estudio de riesgos de sismos y maremotos para comunas costeras de la región del Bío Bío*, desarrollado por la Universidad del Bío Bío y patrocinado por la Subsecretaría de Desarrollo Regional (SUBDERE), entre mayo del 2010 y enero del 2011, en el que la autora participó como jefe de proyecto del tema de estudio; y el *Estudio de riesgo-informe antisísmico: anteproyecto Plan Regulador Comunal (PRC) de Renaico, localidades de Renaico y Tijeral, región de La Araucanía Chile 2010-2011*, elaborado por la Universidad del Bío-Bío, y patrocinado por la Secretaría Ministerial Metropolitana de Vivienda y Urbanismo (SEREMI-MINVU), desarrollado entre octubre del 2010 y mayo del 2011; en el que la autora participó como jefe de proyecto de riesgos.

<sup>2</sup> Geógrafa de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Magíster en Educación de la Universidad La República (Chile) y doctorante en Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sustentable de la Universidad Nacional de Cuyo (Argentina).

medio y bajo de remoción en masa, para que sean consideradas en la zonificación final de usos del suelo (Términos de referencia de la SEREMI-MINVU Araucanía 2011).

Por tanto, es fundamental realizar una adecuada zonificación de las áreas en riesgo por remoción en masa en los PRC. Para esto es necesario establecer un proceso metodológico aplicable en todas las áreas comunales, lo que trata la presente investigación, mediante el estudio de los casos realizados por la Universidad del Bío Bío: *Estudio de riesgos de sismos y maremotos para comunas costeras de la Región del Bío Bío, Chile* (que se enmarca en el Plan Nacional de Reconstrucción, dirigido a enfrentar los daños ocasionados por el sismo del 27 de febrero del 2010 en las comunas costeras de la región), y *Estudio de riesgo-informe antisísmico Anteproyecto PRC de Renaico, localidades de Renaico y Tijeral, Región del Bío Bío, Chile*; proponiendo de tal forma, un modelo metodológico para determinar las áreas en riesgo por remoción en masa, de acuerdo con la diversidad de las características de los territorios, con el fin de generar una adecuada planificación territorial.

## **Metodología**

Para realizar este estudio se establecieron tres etapas:

En primer lugar, una revisión de antecedentes generales y específicos de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones —en adelante, OGUC—, específicamente del título II, capítulo I, artículo 2.1.17, en el que se establece que los PRC deben delimitar las áreas de riesgo para la planificación territorial.

Una segunda etapa, en la que se analizaron los pasos metodológicos empleados para delimitar las áreas de riesgo por remoción en masa en los ya mencionados estudios realizados por la Universidad del Bío Bío.

Finalmente, en una tercera etapa, se estableció un modelo metodológico para realizar estudios que delimitaran áreas con riesgo factible por remoción en masa, según lo que contempla la ordenanza OGUC y lo que se indagó en los estudios desarrollados por la Universidad del Bío Bío.

## **Resultados**

### **1.<sup>ra</sup> etapa: análisis de la OGUC para los PRC**

Los instrumentos encargados del ordenamiento territorial en Chile, a nivel nacional y local, son indicativos y normativos:

*Instrumentos indicativos orientadores del desarrollo:*

- La estrategia regional de desarrollo (nivel meso)
- Los planes de desarrollo comunal (nivel local)
- La zonificación de uso del borde costero (nivel micro)

*Instrumentos normativos de planificación territorial:*

- Plan regulador metropolitano (nivel meso)
- Planos reguladores comunales (nivel local)
- Límite urbano (nivel local)
- Planes seccionales (nivel micro)

Los instrumentos indicativos que ordenan el territorio y que están contemplados en la legislación vigente son de gestión, y tienen por objetivo contribuir a ordenar, sistematizar y orientar el proceso de desarrollo de los territorios según las demandas de la sociedad, para entregar un marco de referencia en el proceso de toma de decisiones. Mientras que los instrumentos normativos reglamentan o regulan el uso del suelo, tanto de los territorios bajo régimen de propiedad privada como de los de propiedad común. Estas regulaciones identifican o autorizan determinados usos del suelo, para ayudar a internalizar efectos externos sobre la sociedad; por ello es el primer requisito para la planificación del uso del suelo, la delimitación de zonas aptas para el asentamiento

humano y sus actividades, según el riesgo potencial, expresado en peligros naturales multiplicado por la vulnerabilidad y la exposición de la población.

A escala local, los instrumentos normativos más importante en Chile han sido los PRC, debido a que la ley estableció —mediante la OGUC, la Dirección de Desarrollo Urbano (DDU) y del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, el 1 de diciembre del 2009— que estos instrumentos tendrían la atribución privativa de definir áreas potenciales de riesgo; para ello, clasificó los tipos de riesgo en:

1. Zonas inundables o potencialmente inundables: debido, entre otras causas, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos.
2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.
3. Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.
4. Zonas o terrenos con riesgo generado por la actividad o intervención humana. (OGUC 2010, t. II c. I a. 2.1.17)

Además, también contempla otras actividades peligrosas, tales como: industrias químicas, plantas de tratamiento de aguas servidas, vertederos y zonas de relleno de escombros, entre otros; en las cuales se restringe la ocupación del suelo para la construcción de viviendas y equipamiento (colegios, centro de salud y otros).

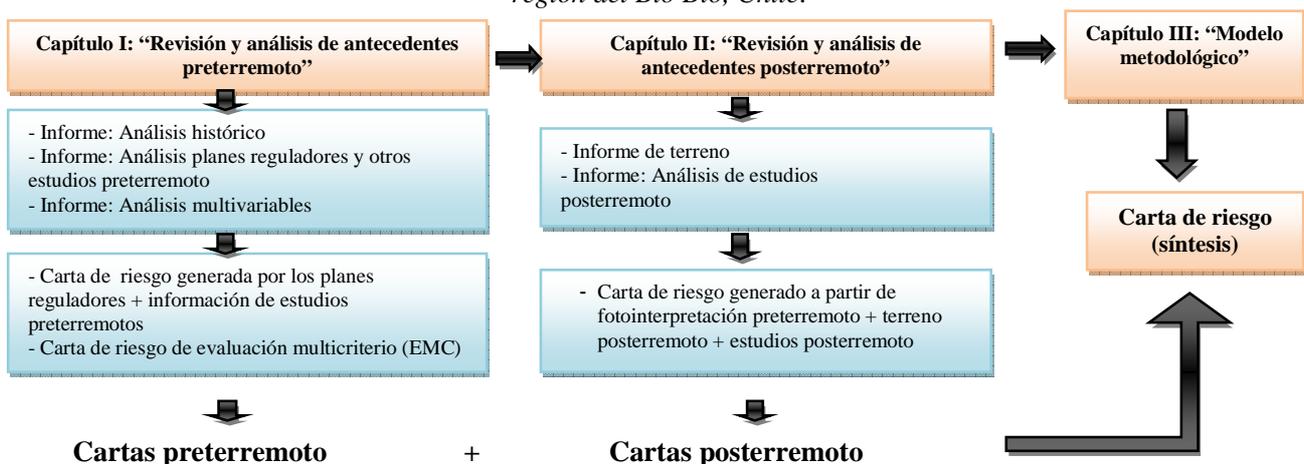
De esta forma, los PRC son definidos como instrumentos normativos que definen el uso de los suelos a escala local, estableciendo, inicialmente, para ello zonas potenciales de riesgo, cuyas áreas susceptibles al proceso de remoción en masa se etiquetan como *zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas*. Sin embargo, esta ley no hace referencia al procedimiento metodológico adecuado para establecer las zonas de riesgo, ni tampoco define las variables y los hechos desencadenantes que deben ser considerados. Por tanto, los PRC se transforman en un instrumento que delimita de forma reactiva, y no de forma predictiva, las áreas de riesgo, puesto que no establece la forma procedimental para hacerlo. Esto no es óptimo para una buena planificación del territorio, derivando en una continua pérdida de información de las zonas latentes a la ocurrencia del fenómeno de remoción en masa.

## 2.<sup>da</sup> etapa: análisis para delimitar áreas de riesgo por remoción en masa en los estudios realizados por la Universidad del Bío Bío

### A. Estudio de riesgo de sismos y maremotos para comunas costeras de la región del Bío Bío, Chile

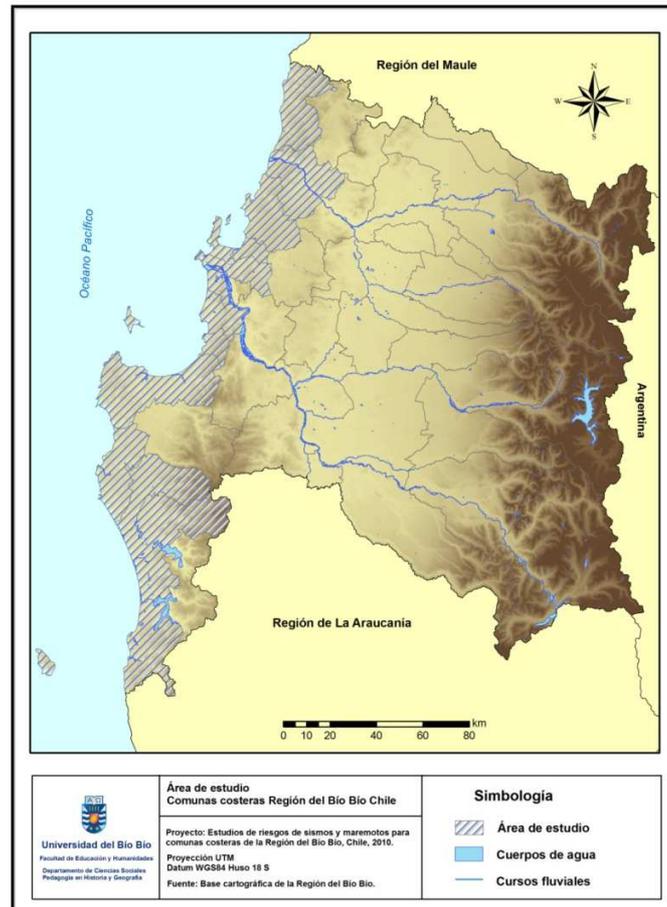
La metodología utilizada para realizar este estudio se detalla en la figura 1:

**Figura 1.** Síntesis metodológica del *Estudio de riesgos de sismos y maremotos para comunas costeras de la región del Bío Bío, Chile.*



## Capítulo I: “Revisión y análisis de antecedentes preterremoto”

Esta etapa tuvo como finalidad realizar un diagnóstico detallado del fenómeno de remoción en masa en las comunas costeras de la región del Bío Bío; para esto, en primer lugar, se localizó el área de estudio: 48 localidades específicas de estudio, en las 15 comunas costeras de la región del Bío Bío y en la comuna de Concepción, también considerada para el estudio (figura 2).



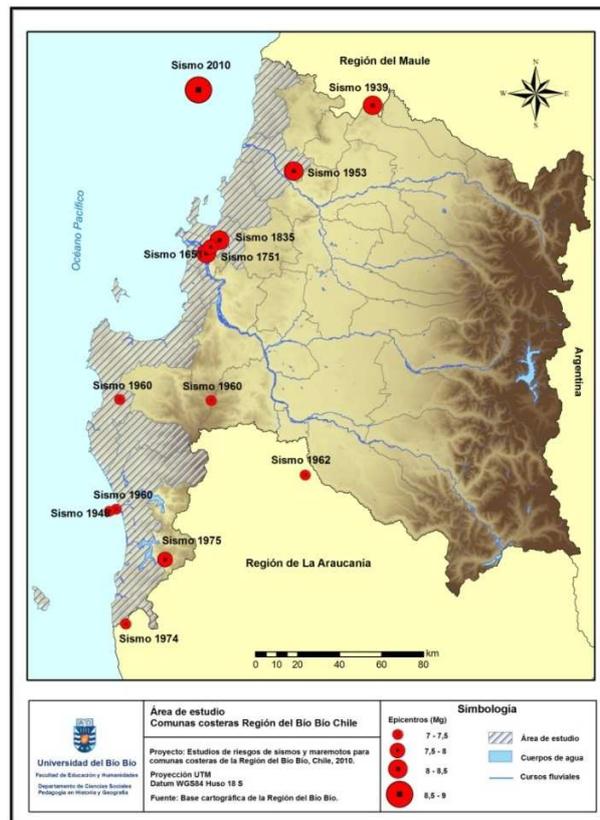
**Figura 2.** Área de estudio.

Se analizaron y verificaron de la siguiente forma los hechos detonantes del fenómeno de remoción en masa ocurridos en el área de estudio:

a) Análisis histórico: se efectuó una descripción histórico-analítica de los terremotos ocurridos en la región del Bío Bío, desde el siglo XVI hasta la actualidad. De esta forma se contempló la revisión exhaustiva del material bibliográfico y documental, discriminándolo entre fuentes de primer orden (primarias) y de segundo orden (secundarias):

- Indagación del estado del arte del tema, a través de un registro.
- Lectura documental-bibliográfica (fuentes de interés e información: periódicos, revistas especializadas, libros de historia, anuarios estadísticos, cartografías y fotografías, entre otros).
- Análisis documental (contraste de fuentes, narratividad).
- Análisis de los registros de sismos del Departamento de Sismología de la Universidad de Chile.
- Entrevistas abiertas hechas a actores relevantes, a especialistas en el tema sísmico y a involucrados en acontecimientos de esta naturaleza, para llegar a la elaboración de una cartografía especializada sobre los fenómenos sísmicos ocurridos en la región del Bío Bío desde el siglo XVI hasta el año 2010 (figura 3).

El tipo de investigación realizada fue de carácter descriptivo analítico; por consiguiente, los resultados dependieron de las fuentes de información y del trabajo intelectual de los investigadores.



**Figura 3.** Síntesis de sismos históricos en la región del Bío Bío, Chile.

b) Análisis de los planes reguladores: se realizó un análisis detallado de los PRC de cada una de las comunas costeras de la región del Bío Bío, enfatizando los siguientes aspectos:

- Revisión de los estudios de riesgo geofísico relacionado con remoción en masa, desarrollados en cada uno de los PRC del borde costero de la región; información que fue sistematizada a través de una ficha de registro.
- Análisis de la incorporación de los estudios de riesgo en la zonificación final de los PRC, para así determinar si los estudios y las recomendaciones fueron total o solo parcialmente consideradas.
- Análisis de la ordenanza de cada uno de los PRC, especialmente de la zonas que, a pesar de existir ciertos riesgos geofísicos, han sido definidas como zonas habitacionales o de equipamiento. Se enfatizó en las normas de construcción y de uso de suelo establecidas, así como también en la obligación de construir obras de mitigación, en el caso de la edificación en terrenos con pendientes (muros de contención, obras de evacuación de agua lluvias, entre otros).
- Determinación de si la metodología utilizada para la definición de áreas de riesgo por remoción en masa fue la adecuada en cada uno de los PRC, en términos de considerar cada uno de los factores que inciden en la ocurrencia de la remoción en masa. Además, se identificó si en estos procesos se habían incluido visitas al terreno para reconocer los asentamientos existentes y los peligros latentes de remoción en masa, principalmente en las viviendas localizadas en laderas o taludes.
- Realización de una cartografía de síntesis de las zonificaciones de áreas de riesgo definidas en los planes reguladores, estableciendo, además, basados en las ya confeccionadas por los PRC, la magnitud del riesgo.

c) Revisión de estudios de riesgo: en esta etapa se realizó una detallada revisión bibliográfica de cada uno de los estudios de riesgo geofísico asociado a la remoción en masa ejecutados en las localidades estudiadas. Para ello se estableció un registro de los datos existentes y se analizaron las siguientes fuentes de información:

- Estudios realizados por municipalidades.
- Estudios realizados por escuelas e institutos de Geografía de universidades chilenas (seminarios de títulos, investigaciones, entre otros).
- Estudios y antecedentes levantados por del Instituto Geográfico Militar.
- Proyectos de centros de investigación nacional e internacional.
- Mecánicas de suelos realizadas en proyectos de urbanización (agua potable, alcantarillado, pavimentación y vivienda).
- Estudio de riesgos de remoción en masa realizados por el Servicio Nacional de Geología y Minería —en adelante, SERNAGEOMIN—.
- Registros de documentales históricos.
- Cartas de riesgos definidas en los PRC.
- Registros fotográficos.
- Registros de otros servicios de gobierno (Centro de Información de Recursos Naturales —en adelante, CIREN—, Corporación de Fomento de la Producción —en adelante, CORFO— y Corporación Nacional Forestal —en adelante, CONAF— entre otros).
- Otros estudios.

d) Análisis de los estudios sobre los factores de la remoción en masa (análisis multivariable): primero se realizó un registro de la información existente sobre las variables que inciden en el proceso de remoción en masa y posteriormente se analizó dicha información de la siguiente forma (tabla 1):

**Tabla 1. Análisis multivariables.**

<b>Variables</b>	<b>Descripción</b>
<b>Climatología</b>	Se revisaron los principales aspectos relacionados con la climatología del área de estudio, registros de precipitaciones y temperaturas en cada una de las comunas costeras de la región. Para ello se usaron los registros de las estaciones meteorológicas más próximas, principalmente los relacionados con precipitaciones anuales, precipitaciones mensuales y precipitaciones máximas en 24 horas, a efectos de determinar las relaciones entre las precipitaciones y los fenómenos de remoción masa. Se analizaron, además, los registros de temperaturas diarias y temperaturas medias mensuales (oscilaciones térmicas diarias y mensuales), para determinar la relación que existe entre los cambios de temperatura y los procesos de meteorización física de las rocas (termoclastia). Otro elemento del clima observado fue el viento, principalmente para establecer en términos generales los crecimientos y desplazamientos de dunas.
<b>Suelos</b>	Se revisaron los estudios de suelos y las clasificaciones de los suelos de cada una de las comunas de estudio (cartas de tipo de suelo CIREN, CORFO y otras), con el fin de determinar los suelos que presentan mayor susceptibilidad a que se produzca remoción en masa (suelos arcillosos, suelos disgregados y suelos no cohesionados). Fue importante en esta etapa analizar de forma integrada las variables de pendientes y cobertura vegetal.
<b>Geología-litología</b>	Se revisaron las cartas y mapas geológicos del SERNAGEOMIN, a distintas escalas (1:100.000 y 1:250.000), así como los estudios detallados de las formaciones geológicas de cada una de las localidades de estudio —correspondientes a informes geológicos, mapas preliminares y boletines y publicaciones de la <i>Revista Geológica de Chile</i> —, con la finalidad de identificar zonas en las que las formaciones presentaban mayor vulnerabilidad y, por consiguiente, mayor probabilidad de que se produjeran remociones en masa. En esta etapa fue importante determinar el estado de meteorización física y química de las rocas, e identificar las fallas locales y el grado de diaclasamiento de las rocas.
<b>Inclinación - pendiente</b>	Se revisaron las cartas topográficas digitales del Instituto Geográfico Militar, escala 1:50.000, para levantar mapas de pendientes a partir de las curvas de nivel. Se complementó la información con el análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales Lidar, para determinar zonas con escasa cobertura vegetal y con pendientes pronunciadas. Además, se recopilaron todos los estudios relacionados con pendientes y remoción en masa desarrollados por centros de investigación, como el SERNAGEOMIN, universidades y otros organismos.
<b>Exposición</b>	A partir del modelo de elevación digital elaborado, se graficó y analizó la exposición de la ladera, con el fin de determinar aquellas zonas que presentaban condiciones de mayor humedad, en relación con la

	exposición a lluvias y radiación solar.
<b>Hidrogeología</b>	Fueron analizados la red de drenaje, el nivel freático y los coeficientes de infiltración, como factores que condicionan la generación de remociones en masa, ya que están directamente relacionados con la incorporación de agua en los suelos o macizos rocosos.
<b>Tipo y cobertura vegetacional</b>	El análisis de la cobertura vegetal se realizó con base en imágenes de satélites y fotografías aéreas de cada una de las localidades en estudio. Se utilizaron fotografías de vuelos del Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile —en adelante, SAF— a escala 1:20.000. A partir de este análisis se determinaron zonas con eventual riesgo de remoción en masa, debido al tipo y cobertura de vegetación. Se hizo especial énfasis en el análisis de las laderas colindantes con asentamientos poblados. De igual manera, se revisaron estudios relacionados con pendientes, cobertura, tipo de vegetación y remoción en masa, desarrollados por centros de investigación, el SERNAGEOMIN y otros organismos, en cada una de las localidades costeras de la región.

e) Distribución y asentamiento de la población: en esta etapa se analizaron los patrones de crecimiento de la población de las localidades de las comunas costeras; para esto se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Revisión de los PRC, planos de loteo y subdivisión y de cartografías en general, para identificar la extensión territorial que ocupan los asentamientos poblados.
- Revisión y análisis de imágenes de satélites y de fotografías aéreas del SAF, a escala 1:20.000, y de otros servicios, nacionales y extranjeros, para realizar una cartografía de los emplazamientos de cada una de las localidades.
- Análisis de los antecedentes demográficos de cada una de las localidades para determinar las tendencias de crecimiento. Para ello, se analizó el crecimiento medio anual y la variación intercensal —entre el censo del año 1992 y el del 2002 (INE 1992 y 2002) — de cada una de las localidades. Además, se recopiló información acerca de futuros proyectos habitacionales, de loteo de terrenos y subdivisiones, que ofrecen indicios acerca del crecimiento futuro de los asentamientos poblados.

Durante esta etapa se generó información relevante para el proceso de zonificación y delimitación de áreas en riesgo por remoción en masa en cada una de las localidades de las comunas costeras de la región del Bío Bío. Esto permitió obtener como producto del capítulo una cartografía preterremoto de las áreas de riesgo en las localidades estudiadas. Esta cartografía fue usada como insumo para el terreno de levantamiento de información de primera fuente, realizado en la siguiente etapa.

## ***Capítulo II: “Revisión y análisis de antecedentes posterremoto”***

Esta etapa se abordó básicamente a través de tres métodos de trabajo:

a) Revisión de información registrada por investigadores posterremoto: se revisó y analizó toda la información registrada por expertos, nacionales e internacionales, con respecto a los fenómenos de remoción en masa producidos durante, y posteriormente a, el terremoto del 27 de febrero del 2010. Para ello se hizo lo siguiente:

- Se examinó la información registrada por investigadores nacionales e internacionales en los días posteriores al terremoto. Se recopiló la información de los resultados publicados en internet, en periódicos y en revistas especializadas, a través de fichas hemerográficas y electrónicas.
- Se realizaron entrevistas a investigadores que levantaron información directamente en el área de estudio, con el fin de determinar y localizar las zonas con frecuencia de procesos de remoción en masa ocurridos como consecuencia del terremoto. Para ello se elaboró un listado con el nombre, profesión y centro de investigación al cual pertenecía cada uno de los investigadores, con el fin de realizar entrevistas abiertas para rescatar información relevante en relación con sitios y áreas de ocurrencia de remoción en masa durante el último terremoto, magnitud y dimensión de las remociones en masa y efectos sobre la población. A cada entrevista se acudió con cartas y planos de cada localidad, a escala 1:5.000 o 1:10.000, con el fin de localizar exactamente los fenómenos descritos.

b) Análisis de fotografías aéreas y de imágenes satelitales: se realizó un trabajo de fotointerpretación comparativo, con el fin de identificar, registrar y mapear zonas en las que se hayan producido procesos de

remoción en masa. Esta información permitió aportar antecedentes para la delimitación precisa de áreas con eventuales riesgos de remoción en masa. Para la fotointerpretación se utilizaron fotografías aéreas del SAF a escala 1:20.000, e imágenes de alta precisión Lidar. El análisis se realizó mediante el método de fotointerpretación con lentes estereoscópicos y a través de tratamiento computacional de imágenes satelitales.

c) Visita de reconocimiento a terreno, registro y medición de fenómenos de remoción en masa: se visitó cada una de las localidades de las 15 comunas costeras de la región del Bío Bío más la comuna de Concepción, contempladas en el estudio, con el fin de corroborar, medir y dimensionar los fenómenos de remoción en masa acaecidos como consecuencia del sismo del 27 de febrero del 2010, de la siguiente manera:

- Se realizó una visita por fenómeno de remoción en masa detectado en gabinete a través del método de fotointerpretación y mediante información recopilada. En esta visita se tomó un registro fotográfico, se georreferenció el sector y se cuantificó la remoción en masa, registrando el tipo de material (arcillas, arenas, lodos, conglomerados, regolitos, roca, etc.) y determinando los principales factores que incidieron en el proceso. De igual modo, se verificó la existencia de obras de mitigación, como muros de contención, terrazas y vegetación, entre otras. Para registrar cada uno de los sitios se empleó una ficha de levantamiento de información para cada fenómeno de remoción en masa observado.
- Se comparó la información con lo registrado en el proceso de fotointerpretación, con el fin de delimitar claramente las áreas homogéneas que eventualmente pueden tener riesgo por remoción en masa.
- Se realizó una cartografía de los fenómenos de remoción en masa resultado del terremoto del 27 de febrero del 2010 y se definieron áreas circundantes homogéneas que pudiesen tener una respuesta similar ante un evento sísmico de gran magnitud (homogéneas en cuanto a pendiente, geología, suelos y cobertura vegetal, entre otros factores).

Al finalizar esta etapa se generó una carta de riesgo posterremoto a partir de la información generada por la fotointerpretación, la observación del terreno y los estudios de expertos en el área tras el terremoto del 2010; lo que permitió corroborar en terreno la información obtenida de la segunda fuente y así generar nueva información.

### **Capítulo III: “Modelo metodológico”**

En esta etapa se confeccionó un modelo para la zonificación de áreas con eventual riesgo de remoción en masa. Para ello se tomaron en consideración los antecedentes y la información recopilada y levantada en el terreno de las 49 localidades (incluida la de Concepción).

Se incorporaron en la modelación los productos cartográficos generados en los capítulos I y II. Cada una de estas coberturas se trabajó con los Sistemas de Información Geográfica (*Environmental Systems Research Institute* [SIG ESRI]), ArcView-ArcGis, a través de la utilización de procesos que permitieran sumar espacialmente la información. El método utilizado para esto se basó en una evaluación multicriterio —en adelante, EMC—, que permitió definir las áreas más susceptibles de desencadenar fenómenos de remoción en masa, ya sean de origen sísmico o por lluvias extremas. Por tanto, se crearon dos modelos (de sismos y de lluvias), que incluyeron una serie de criterios superpuestos, denominados *factores* y *restricciones* (Gómez Delgado y Barredo Cano 2006).

Por lo tanto, se debió asignar peso a cada factor relevante en el proceso de remoción en masa, para lo que se utilizó la información generada en la segunda fuente y corroborada a través del estudio de campo. Esto generó un proceso más relevante, que combina la teorización de un modelo y su aplicación a la realidad.

Una vez aplicado el modelo, se realizó un terreno posterior de verificación de los resultados obtenidos. Además se efectuó una fotointerpretación de las fotografías aéreas a escala 1:20.000 para identificar unidades geomorfológicas asociadas a deslizamiento de materiales —como conos de deyección y derrubios, así como líneas de quiebre de pendientes— y definir áreas de alcance de remoción en masa. Se usó como criterio un *buffer* de 50 metros, lo que generó zonas de *runout*, es decir áreas de alcance potencial de fenómenos de deslizamiento. El resultado final del estudio realizado en estas 15 comunas es un mapa de amenaza del fenómeno de remoción en masa; en él se combinan los criterios propuestos —de alta, media y baja amenaza— a través de una tabulación cruzada de los resultados de la modelación por sismos y lluvias. Mediante la aplicación de la

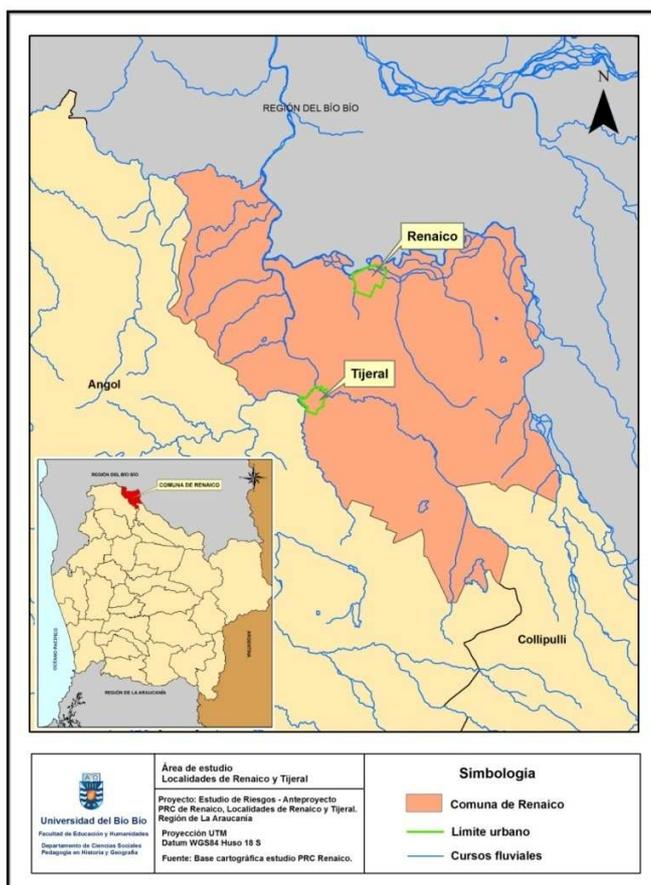
metodología descrita, se pudo confrontar el resultado de la modelación con la información levantada en terreno y corroborada en gabinete.

**B. Estudio de riesgo-informe antisísmico anteproyecto PRC de Renaico, localidad de Renaico y Tijeral, región de la Araucanía, Chile**

Este estudio se llevó a cabo en la comuna de Renaico, novena región de La Araucanía, Chile (figura 4). Esta comuna tiene una superficie de 27.591,82 hectáreas y un poblamiento del área rural comunal dispersa, con áreas despobladas, plantaciones forestales y asentamientos urbanos que han surgido en torno a los caminos principales. Para realizar el estudio de riesgos del PRC de Renaico se dispusieron tres etapas metodológicas, según lo estipulado en los términos de referencia de la SEREMI Araucanía: levantamiento, diagnóstico y modelación (figura 5).



**Figura 5.** Síntesis metodológica del *Estudio de riesgo-informe antisísmico anteproyecto PRC de Renaico, localidad de Renaico y Tijeral, región de La Araucanía Chile.*



**Figura 4.** Localidades de Renaico y Tijeral.

A continuación se describe cada una de estas etapas:

a) Levantamiento: esta etapa contempló todos los levantamientos necesarios, como el estudio del terreno, la síntesis cartográfica, la georreferenciación y el desarrollo de la plataforma SIG.

Para ello se efectuaron visitas de reconocimiento en terreno de procesos peligrosos, identificando las causas generadoras o facilitadoras de procesos (como, por ejemplo, el corte de talud, la pérdida de suelos aterrazados y la obstrucción o dimensión inadecuada de canal de evacuación de aguas lluvias), el tipo de suelo, pendiente, litología, estructuras u otros. Se registró esta información en fichas de terreno. También se realizaron levantamientos de información del estado de las viviendas (anexo 8) y entrevistas abiertas sobre la percepción de la vulnerabilidad de la población a este tipo de amenaza (anexo 9). Se elaboró un registro histórico de riesgo y/o procesos de peligrosidad natural y antrópica, definiéndose procesos de peligrosidad natural, vulnerabilidad y exposición. En esta etapa, solo se identificaron las variables consideradas para la modelación con plataforma SIG.

b) Diagnóstico: consistió en la verificación de los antecedentes existentes, más la integración de la nueva información originada en los acontecimientos ocurridos durante el terremoto del 2010. Con dichos antecedentes se estructuró un diagnóstico, una descripción y un análisis de las variables que caracterizaron el estudio. Las principales variables consideradas fueron (tablas 2 y 3):

**Tabla 2.** Factores desencadenantes.

<b>Climatología</b>	<b>Registro de sismos</b>
Se realizó un análisis de los registros de precipitaciones del área de estudio. Para ello se revisaron los registros de las estaciones meteorológicas más próximas, concentrándose en precipitaciones anuales, precipitaciones mensuales y precipitaciones máximas en 24 horas, a efectos de determinar relaciones entre las precipitaciones y los fenómenos de remoción en masa.	Se analizaron los registros de sismos del Departamento de Sismología de la Universidad de Chile del área de estudio, y se relacionaron con los registros existentes de fenómenos de remoción en masa. Con esta información se pretendió asociar los sismos de gran intensidad con remociones en masa ocurridas en el pasado. Para ello, además, se revisaron archivos fotográficos y registros de remociones en masa de organismos gubernamentales y centros especializados de estudio.

**Tabla 3.** Variables condicionantes (facilitadoras).

<b>VARIABLES</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Suelos</b>	Se revisaron los estudios de suelos y las clasificaciones de los suelos de cada una de las localidades, con el fin de determinar cuáles suelos presentan mayor susceptibilidad a que se produzca remoción en masa (suelos arcillosos, suelos disgregados, suelos no cohesionadas). Importante fue en esta etapa hacer un análisis en el que se integraron las variables de pendientes y de cobertura vegetal.
<b>Geología Litología</b>	Se revisaron las cartas y mapas geológicos del SERNAGEOMIN, a distintas escalas, así como los estudios detallados de las formaciones geológicas del área de estudio —correspondientes a informes geológicos, mapas preliminares, boletines y publicaciones de la <i>Revista Geológica de Chile</i> —, con la finalidad de identificar zonas en las que las formaciones presenten mayor susceptibilidad y, por consiguiente, mayor probabilidad de que se produzcan eventos de remoción en masa. Se determinó en esta etapa el estado de meteorización física y química de las rocas, la identificación de fallas locales, y el grado de diaclasamiento de las rocas.
<b>Pendiente</b>	A partir de cartas topográficas digitales del Instituto Geográfico Militar, escala 1:50.000, y de la información de curvas de nivel del anteproyecto del PRC del 2001, se confeccionó un modelo de elevación digital de la zona de estudio con el fin de clasificar los distintos grados de pendiente de esta.
<b>Exposición</b>	A partir del modelo de elevación digital elaborado, se graficó y analizó la exposición de ladera, con el fin de determinar las zonas que presentan condiciones de mayor humedad, en relación con la exposición a lluvias y radiación solar.
<b>Geomorfología</b>	Mediante fotointerpretación, cartas geomorfológicas y verificación en terreno, se identificaron depósitos de antiguos deslizamientos o flujos, principalmente de los que se encuentran en estado suelto, y se identificaron depósitos coluviales, que se ubican en general a los pies de laderas y quebradas, en donde su condición de equilibrio los hace muy propensos a generar deslizamientos (o flujos).
<b>Hidrogeología</b>	Se analizó la red de drenaje, nivel freático y coeficientes de infiltración, como factores que condicionan la generación de remociones en masa, ya que están directamente relacionados con la incorporación de agua en los suelos o macizos rocosos.

<b>Tipo y cobertura vegetal</b>	Se realizó sobre la base de imágenes de satélites y fotografías aéreas de cada una de las localidades en estudio. Se utilizaron fotografías del SAF, a escala 1:20.000. A partir de este análisis se determinaron zonas con distinto porcentaje de cobertura vegetal.
---------------------------------	---

En esta etapa se realizó un análisis integrado de los factores que influyen en el proceso de remoción en masa en las localidades de Renaico y El Tijeral. Se hizo especial énfasis en determinar, a través de cartografías preliminares, las áreas susceptibles a la ocurrencia de remoción en masa ante eventos de precipitaciones intensas o sismos de gran magnitud.

Desde el punto de vista de la vulnerabilidad, se consideraron: uso del edificio (habitacional, equipamiento, comercial u otro), tipologías constructivas (hormigón-acero, albañilería y madera), estado de las viviendas (bueno, regular o malo), peculiaridades de las viviendas, densidad de población y el catastro estructural de la edificación existente. También se consideró, en el diagnóstico, la legislación vigente aplicable a los instrumentos de planificación territorial, y se hizo un análisis histórico de otros eventos catastróficos ocurridos en la región.

Finalmente, se realizó un diagnóstico integral, en el cual se analizaron los factores de peligrosidad, vulnerabilidad y exposición para la generación de las cartas de riesgo.

c) Modelación: esta etapa consistió, básicamente, en la construcción de un modelo para la obtención de cartas de riesgo para las dos localidades en estudio, y la construcción de planos que señalaran las áreas de riesgos eventuales, susceptibles de ocurrencia, en la localidad identificada. Para ello se realizaron los siguientes pasos:

- Se analizaron las cartas generadas, los fundamentos técnicos, el factor dominante o “gatillante” del proceso, los niveles de riesgo definido por el proceso y las alternativas de manejo y mitigación, separando las situaciones actuales de las potenciales.
- Con los productos del análisis se definieron las áreas de amenaza o peligro, para lo cual se utilizó el método de EMC; esto es, una superposición ponderada de variables espaciales a través del SIG ArcGis 9.3.
- Los mapas de peligro y vulnerabilidad resultantes clasificaron los niveles de riesgo (alto, medio y bajo), considerando para ello la siguiente ecuación:

$$R = P \times V$$

Donde,

*R*: riesgo

*P*: peligro o amenaza

*V*: vulnerabilidad

### **3<sup>ra</sup> etapa: propuesta del modelo metodológico para realizar estudios que delimiten áreas factibles de riesgo por remoción en masa**

Para determinar áreas de riesgo en los PRC, según lo que establece la ordenanza OGUC —en el título II, capítulo I, artículo 2.1.17—, los fenómenos de remoción en masa se deben clasificar en: “zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas”; lo que es factible de asociar al proceso de los fenómenos geofísicos que apunta Cruden, y que, además, son capaces de causar erosión en cualquiera de sus formas (CIREN 2005).

Comparando los dos estudios analizados, en cuanto al procedimiento metodológico que debe establecerse para delimitar áreas potenciales de riesgo por remoción en masa, se define lo siguiente:

1) Etapa de diagnóstico: el proceso de delimitación de zonas con riesgo de remoción en masa debe comenzar por levantar información del área de estudio, tanto de segunda como de primera fuente, y luego analizar los datos obtenidos de forma cuantitativa, cualitativa y espacial, enfatizando, el registro y la verificación de datos en terreno. Se deben obtener, además, productos cartográficos que lleven a una espacialización de la información.

2) Etapa de modelación: debe generarse un modelo que sume algebraicamente la información, a través de un sistema de información geográfica, para, de este modo, obtener una jerarquización de las potenciales áreas de riesgo por remoción en masa. Para esto deben asignarse pesos específicos a las variables facilitadoras y desencadenantes del fenómeno, según los resultados establecidos en la etapa de diagnóstico, pues solamente de

esta forma el modelo final de representación espacial de las zonas de riesgo susceptibles al proceso de remoción en masa será coherente con la realidad.

En la figura 6 se sintetiza la comparación de los estudios analizados:

Antecedentes de análisis	Análisis PRC	Variabes multicriterio	Terreno verificador	Modelación	Áreas de riesgo
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Antecedentes históricos</li> <li>- Imágenes satelitales</li> <li>- Fotografías aéreas</li> <li>- Estudios relacionados</li> <li>- Entrevistas a especialistas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zonificación de las áreas de riesgo</li> <li>- Metodología utilizada para definir áreas de riesgo</li> <li>- Verificación en terreno de las áreas de riesgo</li> <li>- Estudio geofísico de áreas específicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Clima</li> <li>- Suelo</li> <li>- Geología y litología</li> <li>- Inclinação y pendiente</li> <li>- Exposición</li> <li>- Hidrogeología</li> <li>- Tipo y cobertura vegetal</li> <li>- Registro de sismos</li> <li>- Distribución y asentamientos de la población</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Informe de terreno</li> <li>- Verificación de eventos</li> </ul>	Evaluación multicriterio: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geología</li> <li>- Litología</li> <li>- Suelo</li> <li>- Vegetación</li> <li>- Pendiente</li> <li>- Exposición de ladera</li> </ul>	Delimitación áreas de riesgo finales
<b>Producto de la etapa: Cartografía 1</b>	<b>Producto de la etapa Cartografía 2</b>	<b>Producto de la etapa Cartografía 3</b>	<b>Productos cartográficos 1 + 2 + 3 = cartografía a verificar en terreno</b>  <b>Cartografía 4</b>	 <b>Modelación</b>	<b>Suma de los productos cartográficos 4 + 5 = final</b>
<b>Levantamiento</b>			<b>Diagnóstico</b>		

**Análisis cualitativo cuantitativo**

**Análisis espacial**

**Figura 6.** Síntesis de pasos metodológicos para definir áreas de riesgo por remoción en masa.

Según la figura anterior, puede inferirse que los pasos metodológicos para definir áreas de riesgo por remoción en masa deben comenzar con un levantamiento diagnóstico, con el cual se debe obtener un informe detallado del estado del área de estudio —tanto cualitativa como cuantitativa y espacialmente—. Luego debe analizarse la información recopilada a través de un diagnóstico que implique la implementación de la EMC —tanto de las variables facilitadoras condicionantes como desencadenantes—, para, finalmente, establecer una modelación de los resultados mediante la plataforma SIG, la cual clasificará jerárquicamente las áreas susceptibles de remoción en masa.

### Conclusiones

La ordenanza OGUC establece que a escala local el ordenamiento del territorio debe efectuarse a través de la ejecución de los instrumentos de planificación territorial, del Plan Regulador Comunal. Este plan determina los distintos usos asignados al suelo y las restricciones correspondientes a cada uno de ellos. Para esto se determina, como base fundamental de la planificación, los estudios de riesgos; siendo estos los que restringen el uso

potencial del territorio y velan por el desarrollo de este. La OGUC cataloga el riesgo en cuatro categorías; en ellas el fenómeno de la remoción en masa es clasificado según sean las “zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas”.

Esta Ley no contempla una especificación metodológica para delimitar dichas áreas de riesgo, lo que quedó demostrado tras el terremoto y tsunami del 27 de febrero del 2010, pues este evento evidenció la inexactitud metodológica de los PRC al tratar de delimitar áreas susceptibles de riesgo por remoción en masa. De esto se infiere la importancia de actualizar las áreas de riesgo en los PRC, para organizar los asentamientos humanos y la forma en que se debe convivir con los fenómenos naturales, especialmente con aquellos que presentan particularidades dependientes del tiempo y del espacio en que se generen. Por lo tanto, debe realizarse un estudio detallado de acuerdo a cada particularidad del riesgo sobre el territorio.

Para esto, las áreas de riesgo se deben delimitar a través de investigaciones mixtas —es decir, tanto de gabinete, como de campo— mediante la observación directa. Para ello se hace uso de técnicas e instrumentos de acopio de información en terreno, como: entrevistas, encuestas, test y mediciones, entre otros; se debe registrar la información mediante fichas de observación, tanto de transcripción textual como registros de síntesis informativa. También, debe realizarse un análisis integral del levantamiento diagnóstico del estudio —de forma cualitativa, cuantitativa y espacial— para establecer, posteriormente, en los PRC conclusiones predictivas y pragmáticas, expresadas mediante un producto cartográfico elaborado en plataforma SIG. Por consiguiente, en esta etapa es importante integrar los pasos metodológicos del levantamiento y diagnóstico de la información, ya que los espacios geográficos presentan distintas magnitudes que definen el compartimiento de las variables: no todos los modelos se pueden adaptar a ciertas realidades, y no hay que tratar de adaptar la realidad al modelo, sino que se debe cambiar el modelo usado.

En los casos analizados para establecer áreas susceptibles al riesgo por remoción en masa, los PRC adoptan las metodologías establecidas por organismos gubernamentales; en ellos se indica la realización de un levantamiento, seguido de un diagnóstico y finalmente de una modelación cartográfica de la información. Esto es lo más específico registrado hasta el momento, siempre y cuando la información levantada, analizada y modelada cartográficamente se complementa con la realidad local, pues es allí en donde se producen las peculiaridades importante a la hora de realizar la planificación del territorio.

Por tales motivos, debe tomarse en consideración que, para establecer las áreas de riesgo potencial por remoción en masa, el procedimiento metodológico usado debe ajustarse a la realidad y a los procesos naturales que desencadenan esta situación, lo cual debe estar estrechamente relacionado con la indagación de segunda y primera fuente. De esta forma, el ordenamiento territorial será más eficiente y adoptará mejores medidas de restricción, usos especiales o mitigación en las zonas que realmente lo necesiten.

Por último, cabe destacar que para establecer los alcances territoriales superficiales de la ocurrencia del fenómeno de remoción en masa es pertinente realizar un estudio geomecánico acabado en cada una de las áreas definidas con potencialidad de remoción en masa, debido a que las variables desencadenantes y facilitadoras del proceso se comportan de forma diferente de acuerdo con las condiciones particulares de cada zona. Por ende, una modelación cartográfica por sí sola no permite determinar estos alcances, lo que ratifica la hipótesis de la necesidad de complementariedad del estudio en este fenómeno.

## Referencias

Alarcón Fuentes, Gladys Fabiola. 1995. *Evaluación de los riesgos naturales en el área metropolitana de Concepción, a través de la información*. Licenciatura en Educación mención Historia y Geografía. Departamento de Ciencias Históricas y Sociales, Facultad de Educación, Humanidades y Arte, Universidad de Concepción, Chile.

Ayala-Carcedo, Francisco J. 1993. Estrategias para la reducción de desastres naturales. *Investigación y Ciencia* 200:6-13. Barcelona.

Ayala Carcedo y Olcina. 2002. *Riesgos Naturales*. Barcelona: Ariel.

Carrara, Antonini, Fausto Guzzetti, Mauro Cardinali y P. Reichenbach. 1999. Use of GIS Technology in the Prediction and Monitoring of Landslide Hazard. *Natural Hazards* 20:35-57.

Carrara, Alberto y Richard J. Pike. 2008. GIS Technology and Models for Assessing Landslide Hazard and risk. *Geomorphology* 94 (3-4): 257-260.

Cecioni Raspi, Adriano, A. Duyvestein y J. Vargas. 2002. Hydrology of the Bío Bío River. *Zeitschrift für Geomorphologie* 129:31-39.

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 1999. *Estudio agrológico VIII región: descripciones de suelos, materiales y símbolos*. Chile: CIREN.

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2005. *Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile: región del Bío Bío*. Chile: CIREN.

Chardon, Anne-Catherine. 2002. *Un enfoque geográfico de la vulnerabilidad en zonas expuestas a amenazas naturales. El ejemplo andino de Manzales, Colombia*. [http://hdrnet.org/372/1/CHARDON\\_04.pdf](http://hdrnet.org/372/1/CHARDON_04.pdf) (consultado en mayo del 2010).

Cruden, David M. y D. J. Cayó. 1997. *Evaluación del riesgo de deslizamientos*. IUSG Grupo de Trabajo sobre Deslizamientos de Tierra, Comisión de Evaluación de Riesgos, taller 19-21 febrero, Estados Unidos, 1997.

Eastman, J. Ronald. 2003. *IDRISI Kilimanjaro: Guide to GIS and Image Processing*. Estados Unidos: Clark University.

Estudio PRC de Renaico y Tijeral 2010

Gómez Delgado, Montserrat y José I. Barredo Cano. 2006. *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio: en la ordenación del territorio*. España: Alfa y Omega.

Gorsevski, Peter V. y P. Jankowski. 2010. An Optimized Solution of Multi-Criteria Evaluation Analysis of Landslide Susceptibility Using Fuzzy Sets and Kalman Filter. *Computers & Geosciences* 36 (8): 1005-1020.

Hoffstetter, R., H. Fuenzalida y G. Cecioni. 1957. Chile-Chili. En *Lexique Stratigraphic International* 5 (7): 444. París: Centre National de la Recherche Scientifique.

Instituto Nacional de Estadística (INE). 1992. *XVI Censo Nacional de población y V de Vivienda*. Chile: Gobierno de Chile.

Instituto Nacional de Estadística (INE). 2002. *XVII Censo Nacional de población y VI de Vivienda*. Chile: Gobierno de Chile.

Larraín, Patricio y Paul Simpson-Housley. 1994. *Percepción y prevención de catástrofes naturales en Chile*. Chile: Universidad Católica de Chile.

Lavell, A. 1997. *Viviendo en riesgo: comunidades vulnerables y prevención de desastres naturales en América Latina*. La RED: Flacso.

Mardones, María y E. Jaque. 1996. Geomorfología del valle del río Laja. *I Taller Internacional de Geoecología de Montaña y Desarrollo Sustentable de los Andes del Sur*. The United Nations University.

Mardones, María y Claudia Vidal. 2001. La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. *EURE* 27 (81): 97-122.

Mardones, María, M. Rodríguez y J. Soto. 1994. Zonificación y evaluación de riesgos naturales en el área metropolitana de Concepción. *VII Congreso Geológico Chileno*. Chile: Universidad de Concepción.

Mardones, María, et ál. 2005. Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile centro sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área metropolitana de Concepción. *Revista Investigaciones Geográficas* 38:1-25.

Ministerio de Medio Ambiente. 1998. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. España: Ministerio de Medio Ambiente.

Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública (ONEMI). 1996. *Antecedentes preliminares estudio comparativo efectos sobre las personas: eventos de origen antrópico/eventos de origen natural, periodos 1985-1996*. Chile: ONEMI.

Ojeda H., A. Deloire y A. Carbonneau A. 2001. Influence of Water Stress Deficits on Grape Berry Growth. *Vitis* 40:141-145.

Rebolledo, A., H. Garretón y S. Beltrán. 1980. *Análisis cartográfico de los riesgos de incendios forestales en la octava región*. Chile: Universidad de Concepción.

Saaty, Thomas. 1980. *The Analytical Hierarchy Process (AHP)*. Estados Unidos: McGraw Hill. [http://www.booksites.net/download/coyle/student\\_files/AHP\\_Technique.pdf](http://www.booksites.net/download/coyle/student_files/AHP_Technique.pdf)  
SEREMI-MINVU Araucanía 2011

Strahler, Allan H. y Arthur N. Strahler. 1989. *Geografía física*. España: Omega S. A.

Ulloa Bellemans, L. 2007. *Susceptibilidad de los suelos a la licuefacción en la comuna de San Pedro de la Paz*. Tesis de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío, Concepción, Chile.

Universidad del Bío Bío. 2010. *Estudio de riesgos de sismos y maremotos para comunas costeras de la región del Bío Bío, Chile*. Universidad del Bío Bío.

Universidad del Bío Bío. 2011. *Estudio de riesgo-informe antisísmico anteproyecto PRC de Renaico, localidad de Renaico y Tijeral, región de La Araucanía Chile 2010-2011*. Universidad del Bío Bío.