

Proposición metodológica para la evaluación y zonificación integrada de riesgos naturales mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica

LUIGI ANDRE BRIGNARDELLO T.

Instituto de Geografía
Pontificia Universidad Católica de Chile

RESUMEN

La comunicación presenta una proposición metodológica para la evaluación y zonificación integrada de riesgos naturales que incluye distintos procedimientos de análisis cartográfico digital y de análisis matricial de bases de datos relacionales en un Sistema de Información Geográfica.

La proposición se sustenta en el tratamiento integrado de diferentes variables y parámetros naturales y antrópicos que condicionan la probabilidad de ocurrencia de desastres naturales. Se consideran a la peligrosidad y a la vulnerabilidad como parámetros que determinan el Riesgo Natural.

ABSTRACT

This paper show a methodological procedure to the natural risk integrated evaluation and zoning. The proposal includes different processes of digital cartographic analysis and management of relational data bases in matrixes work applying a Geographical Information System.

The basis of this procedure is the integrate treatment of different kind of natural and human indicators wich are conditions of the probability of natural disasters occurrence. It is considerate to the dangerously and the vulnerability as a indicators to define the Natural Risk.

Palabras clave: *Riesgos naturales, peligrosidad, vulnerabilidad, Sistemas de Información Geográfica, superposición gráfica y topológica, modelación digital de terreno.*

INTRODUCCION

La amplia experiencia práctica en Chile y en el resto del mundo ha demostrado que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas considerablemente provechosas y técnicamente eficientes para realizar estudios territoriales. Ello se debe a las ventajas operacionales que los SIG poseen y que se relacionan con la integración de la información de carácter espacial en una base de datos digital (Brignardello, L. y A. Gutiérrez, 1996). En efecto, cuando los gestores de las políticas y programas sociales, económicos y ambientales, se han percatado de los valiosos efectos que posee la dimensión espacial de las variables que conforman un sistema dado al momento de analizar, evaluar y tomar decisiones, han depositado en estas herramientas computacionales la tarea de perfeccionar tanto las metodologías de análisis como los resultados alcanzados.

Aunque en Chile la incorporación de estas herramientas computacionales en las instituciones de administración y gestión pública, de consultaría profesional y de investigación, ha sido

rápida, los resultados obtenidos aún no han sido rentables ni eficaces en su totalidad. Persiste, sin embargo, la convicción de que los SIG son la mejor solución técnica al momento de efectuar proyectos y estudios en el ámbito territorial.

Al respecto, uno de los estudios integrados corresponde al de la ordenación del territorio, el cual pretende orientar el uso adecuado del espacio, compatibilizando la intensidad de su ocupación, con la fragilidad (*sensu latu*) del entorno geográfico definiendo así su capacidad de acogida. En este contexto, la identificación, zonificación y evaluación de los riesgos naturales son objetivos fundamentales para la ordenación territorial (Subiabre, A., 1992; Mardones, M. y E. Jaquez, 1996).

Pese a que los llamados "desastres naturales" son eventos frecuentes en nuestro país (Urrutia, R. y C. Lanza, 1993; Jamett, J. y Ferrando, F., 1996), no son muchos los estudios tendientes a la detección, predicción y evaluación de estos hechos. Menos aún son los trabajos de investigación apoyados por SIG en esta materia, siendo aportes importantes los de Hormazábal y Rodríguez (1992), Sánchez (1993) y Castro *et al.*

(1995). Se puede agregar, además, que muy recientemente se ha incorporado el sistema natural en la planificación del territorio y que en el tema de los riesgos naturales su inclusión es aún deficiente (Larraín, P., 1992). Al finalizar el Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, la toma de conciencia de este grave problema ha sido eficaz al momento de establecer acuerdos bilaterales y cooperación multilateral y de implementar otras medidas complementarias (ONU, 1995; Ayala-Carcedo; J. F., 1993), pero se está lejos de establecer una estrategia concreta y de disponer de un plan de acción preciso para mitigar los efectos de los fenómenos peligrosos. A pesar de la incorporación de los SIG en los niveles gubernamentales, tecnócratas y de investigación, los escasos resultados obtenidos mediante su aplicación en materia de riesgos naturales, aún no han sido capaces de persuadir a los gestores políticos la necesidad de realizar estudios territoriales de evaluación y zonificación de riesgos naturales como instrumentos indicativos y normativos del uso del suelo.

En este marco, la presente contribución entrega una secuencia metodológica de aplicación de un Sistema de Información Geográfica para la evaluación y zonificación integrada de riesgos naturales. Como tal, es factible de realizar bajo ciertas restricciones relacionadas, principalmente con la localización geográfica o entorno del área de estudio. En efecto, esta comunicación sintetiza los métodos de estudio trabajados por el autor en distintas áreas geográficas, asociando pasos metodológicos y correlacionando los resultados logrados.

BASES CONCEPTUALES

Si bien es cierto que el sistema natural es dinámico, esta es una característica del paisaje geográfico no siempre considerada por los planificadores del territorio. Chile, por su posición geográfica (al margen de la zona de subducción de placas tectónicas) y por las características del medio natural definidas por su extensión latitudinal y montañoso relieve, es un país constantemente afectado por fenómenos naturales extremos, tanto en intensidad como en magnitud. Estos procesos acontecen por un aporte energético excepcional e inusitado al sistema natural, o bien, por la liberación de energía potencial almacenada en algún componente del conjunto sistémico, superando los umbrales usuales en que tales procesos ocurren en el ciclo dinámico natural. Cuando estos eventos naturales inusuales generan daños en los elementos culturales del paisaje, se producen catástrofes que, por su impacto econó-

mico, social y humano, son difíciles de reparar. Una de las formas de reducir estos desastres naturales es determinar el grado de probabilidad de ocurrencia de estos fenómenos naturales en áreas antropizadas. Esta probabilidad es conocida como riesgo natural, que se puede definir como el producto de la peligrosidad (P) por la vulnerabilidad (V):

$$R = P \cdot V \quad (1)$$

Empero, el riesgo natural no sólo existe en un lugar y tiempo determinados, sino que presenta una graduación de acuerdo a la mayor posibilidad de amenaza por un proceso natural extremo en áreas de mayor vulnerabilidad. La identificación del nivel del riesgo natural es clave en la evaluación del mismo, por lo que es necesario conocer los umbrales de los factores que controlan los procesos naturales.

La peligrosidad (P), por su parte, está dada por la fragilidad (F) del sistema (condicionada por sus elementos internos), la recurrencia del evento detonante (D), y la energía del fenómeno (E) (Castro, C., *et al.*, 1995).

La vulnerabilidad (V), en tanto, corresponde a la susceptibilidad al daño o destrucción de los elementos culturales por un fenómeno extremo. Está condicionada por el grado de exposición al fenómeno (X) y la resistencia (R) a este, en relación inversa (Castro, C., *et al.*, 1995).

Sustituyendo los factores en el axioma (1), tenemos:

$$R = [(F \cdot D \cdot E) (X + R)] \quad (2)$$

Los fenómenos geofísicos peligrosos pueden ser clasificados según su origen y características en: procesos morfodinámicos, considerados aquí como aquellos producidos exclusivamente por agentes externos; y procesos geodinámicos, aquellos producidos por agentes internos.

Entre las manifestaciones morfodinámicas en cuestión, las remociones en masa son las que poseen mayor energía potencial, y de ellas, los desprendimientos y los flujos son los más frecuentes. En la tabla I se observan los tipos de remoción en masa caracterizados según los elementos condicionantes de la fragilidad, el evento que gatilla su activación y la energía relativa que poseen.

Otro agente morfodinámico, las inundaciones, definidas como la colmatación inusitada de agua en un área dada, según su origen, tienen diferentes efectos relacionados con la energía cinética y con el volumen de agua involucrados en el proceso. Así, tsunamis, marejadas, crecidas fluviales

Tabla 1

Clasificación y caracterización de las remociones en masa

Remociones gravitacionales	Características	Energía potencial relativa	Remociones aluvionales	Características	Energía cinética relativa
Derrumbes	En rocas diaclasadas sobre cornisas o laderas de fuerte pendiente (acantilados) las masas rocosas en paquete se desprenden y caen al vacío en un movimiento rápido de desplome	Muy alta	Flujos de barro	Grandes volúmenes de agua se desplazan encauzada por un talweg a gran velocidad en dirección de la pendiente, acarreamo gran cantidad de sedimentos finos a moderadamente gruesos	Muy alta
Deslizamientos	Las rocas en paquete se desprenden y resbalan con celeridad sobre una superficie lisa de gran pendiente	Alta	Flujos de detritos	Grandes volúmenes de agua se desplazan en sentido de la pendiente a gran velocidad, transportando sedimentos moderadamente gruesos y otros clastos	Alta
Corrimientos	Las masas rocosas de diferente granulometría se desprenden y resbalan sobre la ladera de fuerte pendiente, rotando al mismo tiempo respecto al eje horizontal	Moderada	Flujos de escombros	Grandes volúmenes de masas embebidas por agua se desplazan en dirección de la pendiente con celeridad, transportando materiales de gruesa granulometría, incluyendo bloques y materiales orgánicos	Moderada
Desmoronamientos	Las rocas fuertemente meteorizadas en una cornisa se van desprendiendo según su masa y competencia	Baja	Solifluxión	En pendientes moderadas se desplaza el regolito en forma lenta en dirección de la pendiente al embeberse de agua	Baja

Elaborado por el autor en base a Hauser (1993), Jaque (1995), Sheko (1988), Stralher y Strahler (1989).

excepcionales o avenidas, y anegamientos por aguas lluvias, constituyen fenómenos peligrosos.

Los procesos geodinámicos en tanto, además de constituir un fenómeno peligroso *in situ*, pueden ser detonantes de algunos de los procesos naturales antes mencionados. Tanto los sismos como las erupciones volcánicas, a pesar de su menor recurrencia, son fenómenos extremadamente peligrosos por las características de doble amenaza antes anotada.

Por otra parte, las condiciones antrópicas vulnerables tienen directa relación con las infraestructuras y número de personas expuestas a la amenaza. El grado de resistencia, en tanto, está dado por las características internas de los elementos culturales (calidad de las edificaciones, obras de protección o contención).

PROPOSICION METODOLOGICA

Implementación de la mapoteca digital

Toda implementación de un SIG para un estudio territorial comienza con la selección de la información necesaria a ingresar al sistema. El almacenamiento de información adicional inne-

cesaria es una de las fallas frecuentes en la aplicación de SIG en proyectos (Brignardello, L. y A. Gutiérrez, 1996). No está de más agregar aquí que la confección de la mapoteca digital incluye la normalización de la cartografía, verificación y corrección de errores de edición, preparación y llenado de las bases de datos, y creación de la topología y georreferenciación de acuerdo a los requerimientos técnicos de cada *software* específico.

Por otra parte, la generación de *layers* puede tener un origen automatizado si, por ejemplo, la fuente de información es una imagen satelítica o semiautomatizado si procede de cartografía temática o tipográfica convencional e ingresado mediante *scaneo* o digitalización. Los levantamientos integrados con trabajo de campo son más costosos y demorosos, pero poseen la gran ventaja de contar con información más fiable y actualizada. No obstante, en los casos antes anotados, siempre es fundamental el control de terreno.

La segunda etapa corresponde a los procesos de generación de información complementaria que los SIG permiten (ver figura 1). Ello es posible gracias a las funciones de superposición gráfica, topológica y de bases de datos que estas herramientas computacionales poseen y a su capacidad de entregar un valor o atributo a cada

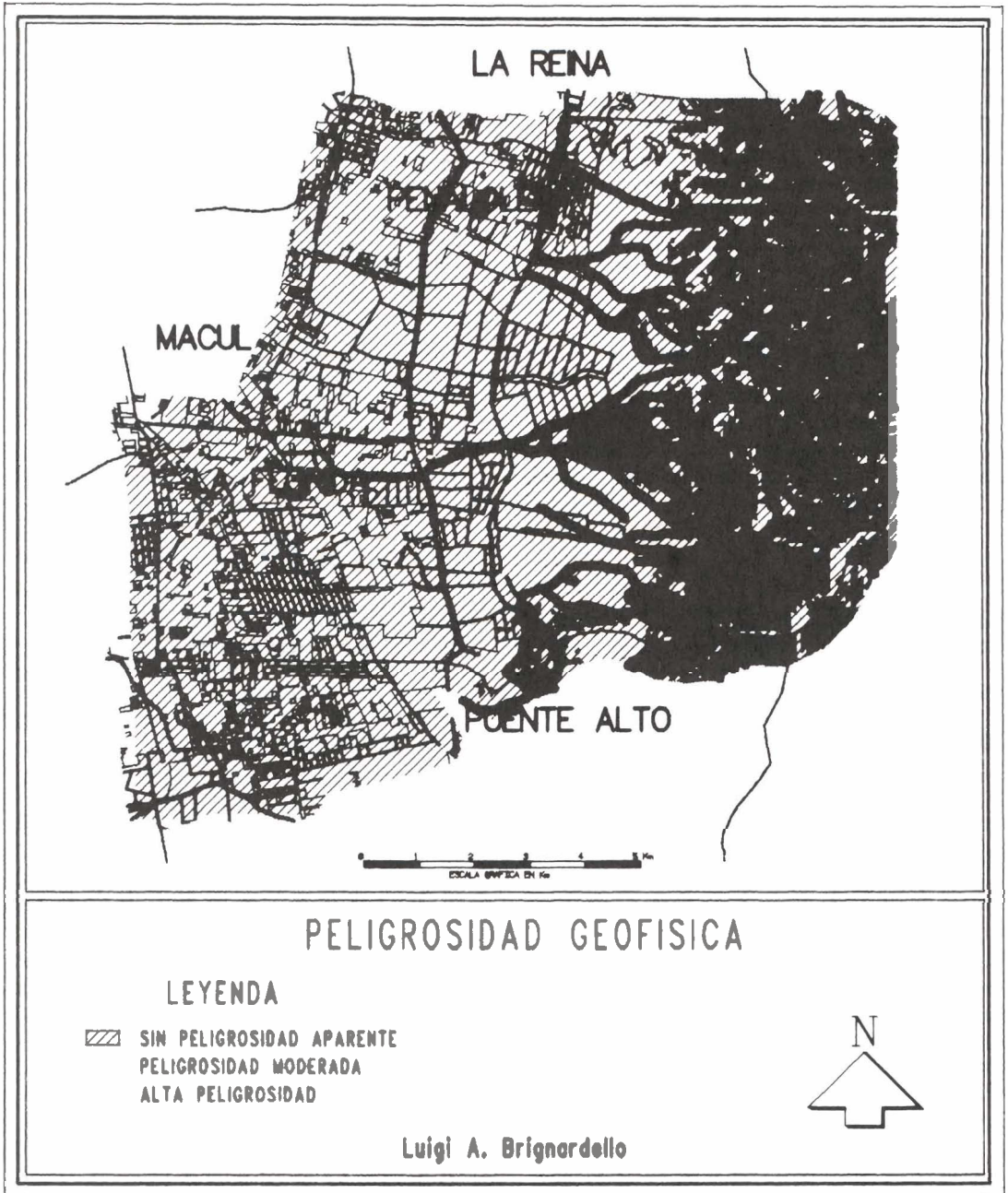


Figura 1.

elemento gráfico, y asociar una base de datos. El proceso de modelación digital del terreno o DEM (*Digital Elevation Model*) es fundamental en esta etapa, ya que permite confeccionar planos de información digital de laderas (exposición, forma y pendientes) y configurar una simulación digital de la realidad tipográfica del área de estudio, a partir del cual se obtiene la fricción de flujos, hipsometría de los elementos geográficos, y otros

parámetros (Brignardello, L.A., 1996). Es importante detenerse en este punto ya que si bien los SIG son herramientas potencialmente poderosas, rápidas y precisas en estos procesos (considerando un elevado grado de automatización en la etapa de implementación), no es menos cierto que la ciencia geográfica ha venido realizando los mismos procedimientos de forma manual desde hace ya varias décadas.

Determinación de la peligrosidad de fenómenos naturales

La identificación de la peligrosidad dependerá del fenómeno natural que la produzca. Es necesario, entonces, considerar secuencias metodológicas independientes, determinando el grado de fragilidad (F) para cada proceso. Mediante el análisis histórico de cada proceso, es posible definir tanto su recurrencia en el área de estudio (D), como el umbral del agente gatillador. La energía del fenómeno (E), por su parte, está dada por el conocimiento empírico (ver ejemplo en la tabla 1).

Fragilidad debida a remociones en masa

Para el caso de las remociones en masa se diferencian aquellas debidas a la inestabilidad de las laderas de aquellas debidas al aporte de agua, en procedimientos metodológicos analíticos independientes.

La información compilada en el trabajo de campo se vierte en las bases de datos. Esta información está referida a la frecuencia con que los distintos procesos se desencadenan bajo ciertas condiciones que determinan la fragilidad (F), principalmente, los tipos de sustratos, y laderas (ver ejemplo en la tabla 2). Siguiendo el ejemplo de la tabla, las coberturas digitales de sustratos, pendientes, orientación de laderas y tipo de laderas son valoradas. La superposición gráfica y de atributos de los *layers* permite definir áreas sensibles y su grado de fragilidad de acuerdo a la sumatoria simple de los valores de cada elemento. Cada polígono (unidad homogénea) generado posee, de esta forma, un nuevo valor (F), definido por:

$$F = V_s + V_p + V_e + V_l \quad (3)$$

donde

- V_s : valor de los sustratos,
- V_p : valor de los rangos de pendiente,
- V_e : valor de la exposición de las laderas, y
- V_l : valor de los tipos de ladera.

Adicionalmente, es posible definir la condición de la fragilidad, esto es, determinar un valor diferencial para cada polígono según el tipo de proceso morfodinámico, ya que es posible, por ejemplo, identificar polígonos muy frágiles a los derrumbes pero moderadamente frágiles a los deslizamientos.

Como los polígonos corresponden a los sectores en las laderas donde se pueden producir procesos de remoción en masa, mediante la selección automática de los polígonos generados, se deben

identificar las áreas llanas antepuestas a los abruptos, donde se depositarán los materiales desprendidos y transportados.

Los flujos, como corresponden a corrientes de agua y de materiales acarreados por ellas, se analizan a partir de las coberturas digitales relacionadas con la red de avenamiento. El nivel de automatización que los SIG poseen permite calcular diferentes indicadores a partir de las coberturas digitales de drenaje, cuencas, pendientes e hipsometría; estos son:

- coeficiente orográfico (*Cr*),
- índice de rugosidad (*Ir*),
- índice de compacidad (*Kc*),
- densidad del drenaje (*Dd*), y
- coeficiente lineal del drenaje (*Cm*).

Los valores para cada cuenca son estandarizados mediante la desviación típica de cada uno de los indicadores, para permitir el análisis de correlación y calcular el índice de torrencialidad. Cada cuenca tendrá un valor de torrencialidad de acuerdo a la tabla 3 y cada dren de la cuenca poseerá el valor de la torrencialidad de la cuenca a la que pertenece, multiplicado por el orden de jerarquía del dren. Para determinar el área afectada, en el SIG se generan corredores de diferente grosor según a este último valor. El ancho estará dado por las evidencias geomorfológicas encontradas en terreno de la geometría del cauce y los indicios del nivel máximo del lecho mayor excepcional.

Para determinar el tipo y cantidad relativa de carga sólida de los flujos, se consideran los sustratos, suelos y la cobertura vegetal. Se calcula la superficie real de las cuencas mediante el DEM y se determina la masa de regolito potencialmente transportable, considerando para ello el espesor de la capa detrítica y el grado de recubrimiento de la cobertura vegetal:

$$\frac{\sum (U_s \cdot e)}{C_v \cdot 1.000} \quad (4)$$

donde

- U_s : superficie de cada unidad de suelo de la cuenca en m²,
- e : espesor de la capa detrítica de cada unidad de suelo en m, y
- C_v : porcentaje del recubrimiento medio de la cobertura vegetal en la cuenca.

Finalmente, con las coberturas de torrencialidad y de masa potencialmente transportable se determinan las áreas afectadas por flujos y su energía cinética relativa.

Tabla 2

Valoración de las variables de la fragilidad de las laderas (Chile Central)

Pendientes	Erosión	Desmoronamientos	Corrimientos	Deslizamientos	Derrumbes	Valor
0 a 5	Libre	Libre	Libre	Libre	Libre	0
5 a 23	Moderada a fuerte	Libre	Libre	Libre	Libre	1
23 a 35	Moderada a leve	Moderado a fuerte	Moderado	Leve a moderado	Leve	2
35 a 55	Leve	Fuerte	Moderado a fuerte	Moderado a fuerte	Moderado a fuerte	3
Más de 55	Leve	Fuerte a moderado	Fuerte	Fuerte	Fuerte	4
Exposición	Erosión	Desmoronamientos	Corrimientos	Deslizamientos	Derrumbes	Valor
N a NE	Moderada a fuerte	Moderado a fuerte	Moderado a fuerte	Moderado a fuerte	Moderado a fuerte	4
NE a E	Leve a moderada	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado a leve	3
E a SE	Leve	Leve a moderado	Leve a moderado	Moderado	Leve	2
SE a S	Leve	Leve	Leve	Moderado a leve	Leve	1
S a SW	Leve	Leve	Leve a moderado	Leve a moderado	Leve a moderado	2
SW a W	Leve a moderada	Leve a moderado	Moderado	Moderado a fuerte	Moderado	3
W a NW	Moderada a fuerte	Moderado	Moderado a fuerte	Fuerte	Moderado a fuerte	4
NW a N	Fuerte	Moderado a fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte	4
Morfometría	Erosión	Desmoronamientos	Corrimientos	Deslizamientos	Derrumbes	Valor
Cóncava	Moderada	Leve	Moderado	Moderado	Fuerte	3
Convexa	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Leve	Moderado	4
Mixta	Fuerte	Moderado	Moderado	Fuerte	Fuerte	4
Rectilínea	Leve	Leve	Moderado	Fuerte	Leve	2
Morfometría	Erosión	Desmoronamientos	Corrimientos	Deslizamientos	Derrumbes	Valor
Roca masiva	Libre	Libre	Leve	Leve	Moderado	1
Roca friable	Leve	Moderado a fuerte	Moderado	Moderado	Fuerte	3
Roca no coherente	Moderado a fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte	4
Depósitos no consolidados	Fuerte	Libre	Moderado	Moderado a fuerte	Moderado	3
Valor	2	3	3	4	4	

Elaborado por el autor en base a Araya y Börgel (1976), Andrade y Castro (1981), Hauser (1993) y Jaque (1995).

La figura 2 muestra una cartografía automatizada de áreas con peligrosidad morfodinámica en dos comunas del piedmont de Santiago (Peñalolén y La Florida), sector considerado de alto riesgo por la peligrosidad de los procesos de flujos y por constituir una zona de expansión urbana.

Fragilidad debida a inundaciones

Para definir las áreas afectadas por inundaciones se construye un modelo en el SIG a partir del DEM, ya que la principal variable a considerar es la pendiente. En el caso de las inundaciones producidas por marejadas se elabora una cobertura

Tabla 3

Ejemplo de valoración de la torrencialidad de las cuencas

Cuenca	Indicadores										Sumatoria	Valor
	Cr		Ir		Kc		Dd		Cm			
1	42,2	1,45	1.785	-1,34	1,33	-0,21	4,04	-0,30	246,9	0,03	-0,37	2
2	35,7	0,91	2.875	-0,72	1,48	-1,77	4,35	-0,07	230,4	0,22	-1,43	2
3	15,1	-0,79	5.113	0,54	1,21	1,04	5,35	0,76	186,9	0,71	2,26	4
4	19,8	-0,40	4.141	-0,01	1,23	0,83	2,39	-1,65	418,4	-1,89	-3,12	1
5	10,8	-1,15	6.898	1,54	1,31	0,00	5,98	1,27	167,2	0,93	2,59	4
x	24,7		4.162,4		1,31		4,42		249,9			
Ds	12,1		1.771,8		0,09		1,23		88,9			

Elaborado por el autor.

de dinámica litoral, en la que se identifican los bordes costeros donde se concentra la energía de acuerdo a la refracción de las olas y la topografía submarina. Se determinan las áreas inundables de acuerdo a la pendiente de la costa, definiendo zonas críticas a aquellas bajo los 3 metros de altitud¹. El grado de fragilidad estará dado por el nivel de concentración de energía en relación directamente proporcional.

Para los tsunamis, la altitud considerada para definir la zona de inundación se determina por la estadística histórica de la magnitud de los terremotos que han afectado el área de estudio. De acuerdo a la escala de Iida, se toma en cuenta la altura de un tsunami probable en el área. Esta altitud, sin embargo, no corresponde a la isohipsa límite del área afectada por el fenómeno, ya que esta se modifica según la distancia entre la isóbata de 100 m y la línea de costa, aumentando o disminuyendo según es menor o mayor la distancia, respectivamente. La tipografía submareal es importante de incluir en el modelo, ya que con ello se incorporan los efectos de la fricción de fondo.

Los desbordes de los ríos y rebalse de cursos artificiales producto de las grandes crecidas afectan en forma desigual las riberas de estos. Definiendo los sectores de desborde (vértice aluvial, bifurcaciones del cauce, confluencia de talwegs, disminución de la altura del canal de escurrimiento), se proyectan, aguas abajo, las zonas ribereñas cuya altitud es inferior al nivel del agua del cauce en período de máxima crecida; ello depende de la inclinación de la pendiente. Se seleccionan las áreas aledañas (definida por el corredor generado según el procedimiento aplicado para los flujos)

al curso fluvial con pendientes menores a 12% y cuya altitud sea inferior a 2 metros del mayor nivel alcanzado por las aguas de máxima crecida.

Similar al procedimiento anterior, para las áreas afectadas por anegamientos por aguas lluvias, se identifican las zonas con pendientes menores a 12% y los sectores de desniveles y honduras. Es importante jerarquizar las áreas según las características texturales del suelo, siendo más frágiles aquellas de textura pesada o las áreas pavimentadas (ver tabla 4).

Fragilidad debida a fenómenos geodinámicos

Los terremotos representan fenómenos geofísicos difíciles de predecir. Siendo Chile un país sísmico, es posible definir áreas susceptibles de ser afectadas cada cierto tiempo por un movimiento telúrico. Realizando una observación sencilla de la localización de los epicentros de sismos históricos de gran magnitud² se pueden determinar seis áreas vulnerables en el país: Norte Grande, con litoral y sector altoandino sísmicos; Norte Chico, con litoral sísmico e interior asísmico; Zona Centro Norte, con litoral e interior sísmicos; Zona Centro Sur, con litoral sísmico e interior asísmico; Zona Sur, con litoral e interior sísmicos; y Zona Austral, con focos litorales discontinuos sísmicos. Cartografiar la intensidad de estos eventos es un muy buen elemento para definir las áreas vulnerables.

Para la incorporación de los fenómenos sísmicos a la propuesta metodológica se parte del supuesto que todo sector incluido en la zonificación anterior es susceptible de experimentar movimientos telúricos de intensidad superior a seis

¹ Altitud máxima determinada para las olas de braveza en la costa de Chile Central (Araya, J., 1976).

² Véase el mapa de Sismicidad del Atlas de la República de Chile confeccionado por Kausel. (IGM, 1983).

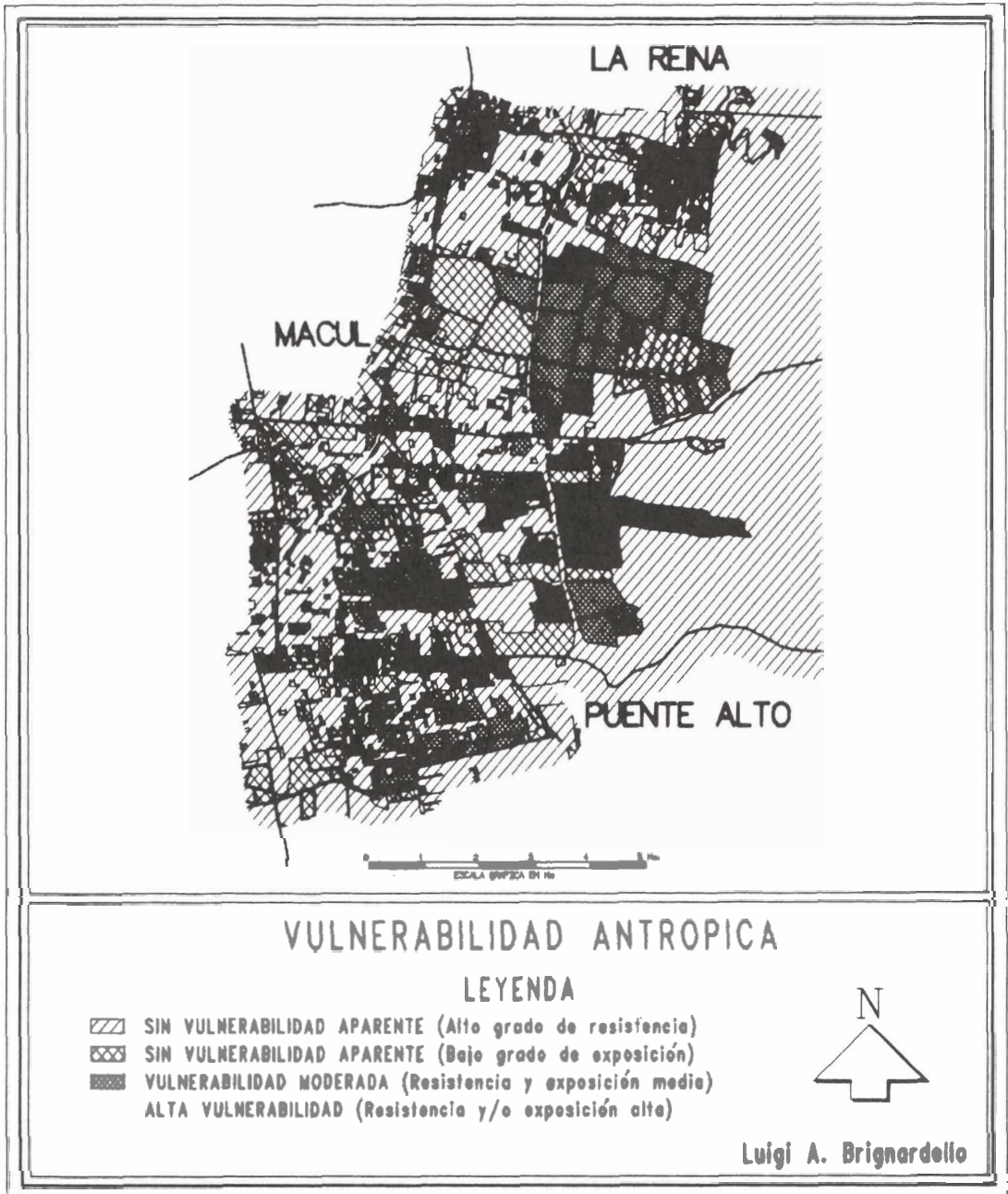


Figura 2.

grados³, y la peligrosidad (P) de estos eventos naturales está condicionada, básicamente, por la fragilidad (F) de los sustratos.

Para definir la fragilidad se analizan las características físicas de los sustratos. Elementos de análisis son: naturaleza de las rocas, su grado de cohesión, la consolidación de las formaciones

superficiales, granulometría de las matrices, profundidad de la roca fundamental, existencia de fracturamientos y diaclasas u otro elemento tectónico de importancia. Cada una de estas variables debe ser anexada a la base de datos de la cobertura digital de sustratos. Mediante el análisis se evalúan los sustratos de acuerdo a su fragilidad intrínseca, valorando cada variable. El resultado es un nuevo *layer* con áreas frágiles a los sismos.

³ Según la escala de intensidad cualitativa de Mercalli, un sismo de seis grados o más produce daños en edificios.

T a b l a 4

Valoración de la susceptibilidad de la capa superficial del terreno a los anegamientos

Tipo de capa superficial	Textura	Permeabilidad	Valor
Dunas y playas	Arenosa	Muy alta	1
Depósitos coluviales	Franco-arenosa	Alta	2
Depósitos aluviales	Franca areno-limosa	Moderada	3
Formaciones superficiales	Franca timo-arcillosa	Leve	4
Afloramientos de roca masiva	n.a.	Restringida	5
Superficies pavimentadas	n.a.	Restringida	5

Elaborado por el autor en base a Cruickshank (1972).

T a b l a 5

Grado de resistencia de la vivienda (ante flujos de barro)

Pared	Características	Calidad	Valor
	Techo		
Ladrillo o concreto	Zinc, losa de hormigón o tejas	Muy buena	1
Adobe	Zinc o tejas	Buena	2
Madera o tabique	Tejuela de madera, pizarreño o fonolita	Regular	3
Barro empajado	Fonolita o paja embarrada	Mala	4
Desechos	Desechos	Deficiente	5

Elaborado por el autor.

Determinación de la vulnerabilidad a los fenómenos naturales

Para definir la vulnerabilidad de un sector a los eventos naturales peligrosos, se consideran dos parámetros esenciales: la existencia de elementos culturales expuestos al fenómeno y la resistencia de ellos frente al evento.

Se incorporan dos planos de información digital a la metodología; la población y la infraestructura. La exposición es entendida como la cantidad de habitantes comprometidos en la ocurrencia de una catástrofe. Un nivel eficiente al que puede cartografiarse la población es la manzana censal, aunque es factible obtener unidades de mayor detalle. Determinar el número de manzanas involucradas en el desastre natural permite evaluar el número potencial de personas implicadas. Se establecen valores de exposición para cada manzana de acuerdo al número de habitantes en ellas; por ejemplo, valor 10 para manzanas con menos de 100 habitantes, valor 20 para aquellas con 100 a 200 habitantes, y valor 30 para las manzanas con más de 200 habitantes.

La resistencia, es decir el factor que se contrapone a la exposición, está determinado por la calidad de las infraestructuras. En este caso, se define por los materiales con que están construidas

las viviendas. La tabla 5 proporciona los valores de los rangos por manzana censal que definen, a modo de ejemplo, el grado de resistencia de las viviendas según su material de construcción. Ello debe ser modificado para cada tipo de fenómeno natural, ya que si bien es cierto una edificación relativamente sólida es resistente a las inundaciones y a los flujos de barro de poca energía cinética, no lo es tanto si se trata de derrumbes o sismos de gran intensidad.

La simple división de los valores de exposición y de resistencia por manzana censal en una matriz permite obtener un *layer* con la vulnerabilidad a los fenómenos naturales y clasificarlos en rangos que puedan ser comparados con aquellos obtenidos para la peligrosidad.

El mapa de la figura 3 muestra la vulnerabilidad de las manzanas censales frente a procesos de inundación y flujos de barro y escombros en las dos comunas de la figura 2.

Evaluación y zonificación de las áreas de riesgo natural

Como resultado de los procedimientos anteriores se han obtenido dos coberturas digitales de síntesis intermedia (ver figuras 2 y 3) que tienen en sus bases de datos la información de todos los

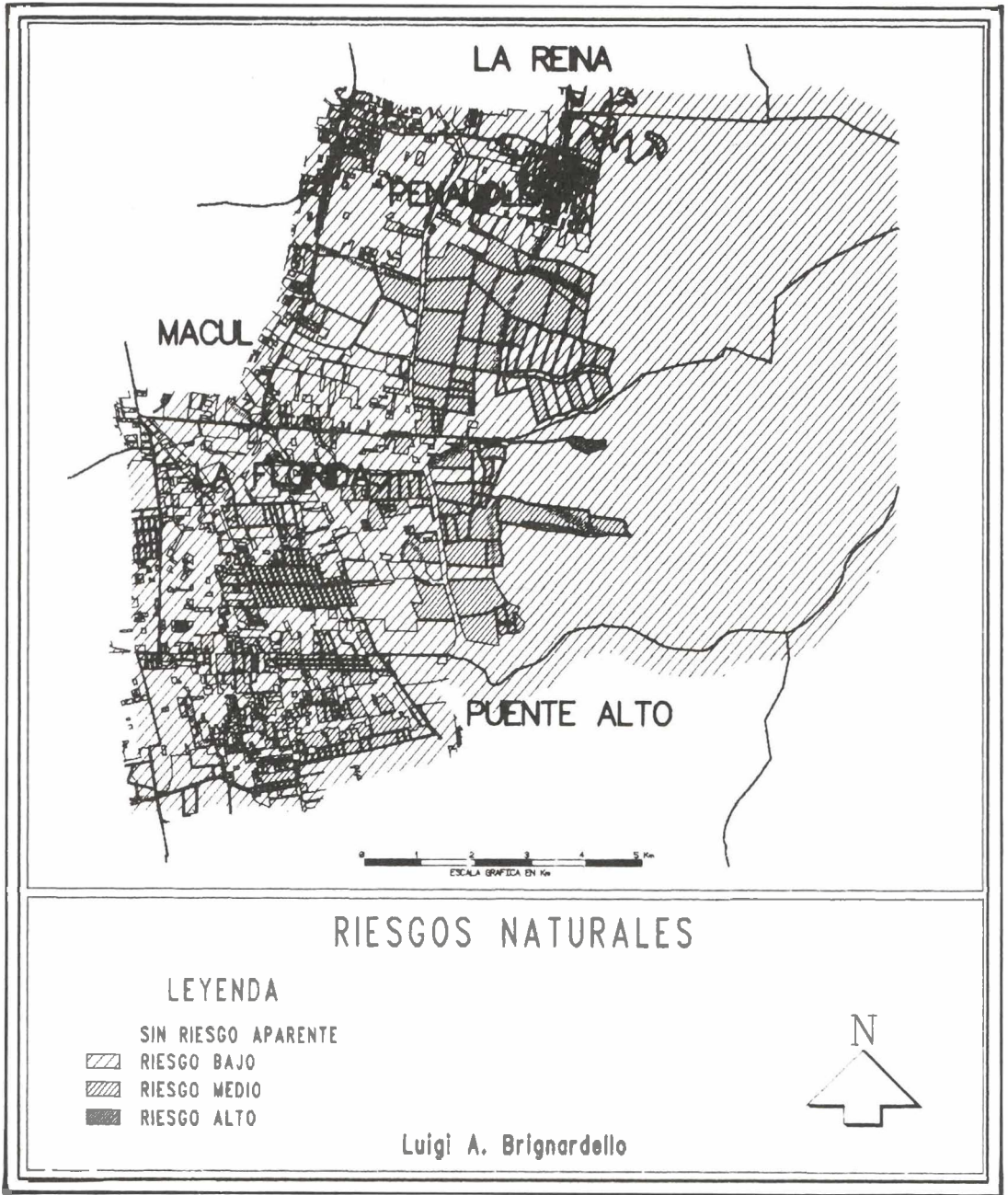


Figura 3.

planos de información digital de base y adicionales que en el proceso SIG las han generado.

Este hecho facilita la evaluación y definición de las zonas de riesgo natural, es decir, la probabilidad de ocurrencia de un desastre natural, ya que del análisis y manipulación de las bases de datos se obtiene la cobertura digital de síntesis final (*layer* de riesgos naturales). De acuerdo a la ecuación metodológica (2) la base de datos asociada a cada polígono del *layer* de riesgos naturales (obtenido por superposición de las coberturas

digitales de peligrosidad y vulnerabilidad), contiene la información de fragilidad (F), recurrencia del evento detonante (D) y energía del fenómeno (E), sintetizada en el valor de la peligrosidad (P); mientras que el valor de la vulnerabilidad (V) expresa la división entre el grado de exposición del fenómeno (X) y la resistencia (R).

Para ilustrar el proceso final, la tabla 6 ilustra los campos y algunos registros de la base de datos de la cobertura de riesgos donde el ítem "Valor_Ri" contiene la ponderación definida por

Tabla 6

Base de datos del *layer* de riesgos

Area	Perimeter	Riesgos_	Riesgos_Id	Valor_Pel	Valor_Vul	Valor_Ri	Riesgo
83152.365941	1181.124582	215	3.000	3	2	6	RM
30012.414233	721.315201	216	4.000	3	4	12	RE
73590.014248	1098.409542	217	2.000	2	1	2	RB
113257.121891	1392.002455	218	3.000	1	3	3	RM
41492.108912	837.393314	219	4.000	2	4	8	RE

el axioma (1) y el ítem “rangos” define la clasificación del nivel de riesgo natural expresados en el mapa de la figura 4, que grafica el ejemplo seguido en esta comunicación.

En el ejemplo se pueden obtener valores límites del riesgo natural del 1 al 12, siendo 1 donde el valor de la peligrosidad y de la vulnerabilidad en un polígono es 1, y 12 donde el valor de la peligrosidad es 3 y el de la vulnerabilidad es 4. Se definen los rangos: sin riesgo aparente (SR) los polígonos con valor 1, riesgo bajo (RB) aquellos con valor 2, riesgo medio (RM) los con valores 3, 4 o 6, y riesgo extremo (RE) los polígonos con valores 8, 9 o 12.

Sin embargo esta evaluación semicuantitativa puede ser complementada con características cualitativas y cuantitativas que el SIG puede entregar desde la base de datos que reúne todas las variables incorporadas en la metodología. Así, siguiendo el ejemplo, un polígono clasificado de riesgo medio puede tener las siguientes características: sustrato deleznable de baja cohesión y potencia de 670 m constituido por materiales aluviales del cono de deyección de Macul, con formación superficial de intemperización reciente, se encuentra a 70 metros del talweg de la quebrada de Macul, tiene una pendiente media de 20° de inclinación; es una manzana censal con 184 habitantes en viviendas con carencias estructurales severas.

CONSIDERACIONES FINALES

El método propuesto se sustenta en un carácter integral de tratamiento de los riesgos naturales. No basta con determinar el grado de peligrosidad de ciertos fenómenos naturales desde el punto de vista físico y establecer las áreas que afectará o, por el contrario, definir sólo los sectores vulnerables a ser afectados por los eventos naturales extremos, sin considerar de qué tipo de fenómenos se trata. El método es integral, tanto en los parámetros y variables consideradas, como en la forma de asociarlos en forma sistémica; es por tanto un método analítico.

Aunque el método puede ser realizado en forma no automatizada, está elaborado para ser llevado a cabo en un Sistemas de Información Geográfica. Las razones de ello son la gran cantidad de información involucrada en los procedimientos que no debe perderse en ningún momento del desarrollo de la metodología, la exactitud y fiabilidad que los SIG poseen al momento de procesar y manejar la información, y la rapidez con que estas herramientas informáticas realizan cada paso de la metodología una vez implementado el SIG (esto es, una vez ingresada la información).

No obstante lo anterior, la confiabilidad y eficacia de los resultados obtenidos dependerá de tres factores a considerar, que en orden de preponderancia son: lo fidedigno de los datos ingresados, lo competente del equipo de investigación en cuanto a su capacitación en el manejo de SIG y experiencia en estudios territoriales, y lo acucioso del contexto organizativo del SIG, que a su vez depende en gran medida de las características técnicas del tipo de *software* y de la capacidad y presteza del *hardware*.

Se han considerado algunas limitantes al método propuesto, que se asocian a las restricciones propias de los SIG, dependiendo si estos son raster o vectoriales. En este sentido, es conveniente aclarar que el establecimiento de un SIG debe ser constante en el tiempo, ya que una garantía que poseen estas herramientas es su capacidad de actualización automática. De esta forma, si alguna variable se modifica (el número de habitantes de una manzana censal, por ejemplo), los resultados también se reforman. Es conveniente aclarar que uno de los objetivos fundamentales del establecimiento de un Sistema de Información Geográfica es la gerencia de gran cantidad de información espacial, por lo que el almacenamiento, procesamiento y manejo de las bases de datos deben ser las funciones más importantes que se deben realizar en un SIG y que, por lo tanto, esta debe ser la labor principal de un geógrafo que utilice estas herramientas informáticas. Las otras funciones de los SIG (ingreso y salida de información) pueden ser realizadas por otros profesionales y técnicos

tal vez más capacitados para ejecutar estas actividades, siendo, nuevamente, tarea del geógrafo la implementación metodológica y el análisis, control y verificación de estas funciones y sus resultados. Es por ello que muchos *softwares* de SIG se especializan en incrementar el desarrollo de ciertas funciones (la salida cartográfica, por ejemplo), sin embargo, el potencial que un SIG posee en el manejo de bases de datos relacionales y en cantidad de herramientas técnicas para su uso y manipulación, hacen de estos los más eficaces y los más "geográficos".

Otro tipo de limitante es la falta de información precisa en un tiempo determinado para todos los parámetros seleccionados. Por otra parte, el método puede ser perfeccionado incorporando variables no consideradas. Asimismo, los resultados alcanzados pueden ser más o menos precisos, estimando otras variables o tomando en cuenta la escala de trabajo.

Finalmente, a modo de recomendación, se sugiere implementar un Sistema de Información Espacial de Riesgos Naturales sustentado en un SIG a nivel local o regional, que sirva como instrumento de orientación para asumir medidas de prevención, como instrumento de regulación para definir el uso adecuado del territorio, y como instrumento de gestión para definir los planes de acción en caso de acontecer un desastre natural y de esta forma reducir la ocurrencia de catástrofes.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ANDRADE, B. y C. CASTRO (1981): "Ensayo y método de detección de unidades morfodinámicas en planicies litorales de Chile Central". En: Rev. Geográfica de Chile *Terra Australis*, 25: 89-98. Inst. Geográfico Militar. Santiago, Chile.
- ARAYA, J.R. y R. BÖRGEL (1970): "El uso de la carta 1: 50.000 del Instituto Geográfico Militar en confección de unidades geográficas físicas" En: I Symposium de Cartografía Temática. pp. 263-269. Inst. Geogr. Militar. Santiago, Chile.
- AYALA-CARCEDO, J.F. (1993): "Estrategias para la reducción de Desastres Naturales". En: Rev. Investigación y Ciencia, N° 200: 6-13. Santiago, Chile.
- BRIGNARDELLO, L.A. (1996): Perspectivas y lineamientos de ordenación territorial en cuencas hidrográficas mediante SIG. El caso del río Cisnes, XI Región de Aysén". Inf. de Práctica Profesional de Geógrafo (inédito). Ministerio de Bienes Nacionales, Instituto de Geografía, PUC. 81 pp. Santiago, Chile.
- BRIGNARDELLO, L. A. y A. GUTIERREZ (1996): "Consideraciones sobre la incorporación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en las actividades universitarias". En: Revista de Geografía Norte Grande, 23: 103-107. Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- CASTRO, C., L. A. BRIGNARDELLO y P. CERECEDA (1995): "Determinación de áreas con riesgo morfodinámico en San Juan Bautista, Isla Robinson Crusoe, Comuna de Juan Fernández, V Región". En: Rev. Geográfica de Chile *Terra Australis*, 40: 43-61. Instituto Geográfico Militar. Santiago, Chile.
- CRUISCKSHANK, J. (1972): "Soil Geography". Ed. David & Charles. New York, EE.UU. 256 pp.
- HAUSER, A. (1993): "Remociones en masa en Chile". Boletín N° 45. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, Chile. 75 pp.
- HORMAZABAL, P. y A. RODRIGUEZ (1992): "Algunas experiencias en el uso de herramientas computacionales y técnicas tradicionales en el análisis del riesgo natural". En: Memorias del II Congreso de Ciencias de la Tierra, pp. 605-616. Inst. Geográfico Militar. Santiago, Chile.
- INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR (1983): Atlas de la República de Chile. Inst. Geogr. Militar. Santiago, Chile.
- JAQUE, E. (1995): "Los factores geográficos en los procesos de derrumbe y deslizamiento. Discusión bibliográfica". En: Rev. Geográfica de Chile *Terra Australis*, 40: 31-42. Instituto Geográfico Militar. Santiago, Chile.
- JAMETT, J. y F. FERRANDO (1996): "Diagnóstico del estado de situación de la Región Metropolitana ante catástrofes". En: Ponencias y Seminarios del IV Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra p. 58. Instituto Geográfico Militar. Santiago, Chile.
- LARRAIN, P. (1992): "El sistema natural en la planificación urbana chilena". En: Revista de Geografía Norte Grande, 19: 59-68. Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- MARDONES, M. y E. JAQUE (1996): "Geomorfología aplicada al ordenamiento del territorio: Análisis de casos en la VIII Región". En: Ponencias y Seminarios del IV Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra. pp. 137-165. Inst. Geográfico Militar. Santiago, Chile.
- ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS (1995): "Estrategia y Plan de Acción de Yokohama para un Mundo más Seguro. La Conferencia Mundial sobre la Reducción de los Desastres Naturales". ONU. Ginebra, Suiza.
- SANCHEZ, M. (1993): "Bases conceptuales y metodológicas para la confección de una cartografía de riesgos". En: Memoria del Seminario Riesgos y Desastres Naturales. pp. 25-28. Inst. Geográfico Militar e Inst. de Geografía de la P. Univ. Católica de Chile. Santiago, Chile.
- SUBIABRE, A. (1992): "Los desastres naturales, factor esencial en una planificación para el uso de ambientes naturales". En: Memorias del II Congreso de Ciencias de la Tierra, pp. 583-586. Inst. Geográfico Militar. Santiago, Chile.
- SHEKO, A. Y. (1988): "Factors involved in the formation and development of landslides and mudflows". En: Landslides and mudflows, Vol 1. UNESCO. Moscú. pp. 14-35.
- STRAHELER, A. N. y A. H. STRAHLER (1989): Geografía Física. Ed. Omega. 3ª Ed. Barcelona, España. 550 pp.
- URRUTIA, R. y C. LANZA. 1993. "Catástrofes en Chile. 1541-1992". Ed. La Noria. Santiago, Chile. 398 pp.