

ANÁLISIS INTEGRADO DE LAS CONDICIONES DE AMENAZA NATURAL EN EL MEDIO AMBIENTE COSTERO SEMIÁRIDO DE CHILE. LA SERENA, COQUIMBO¹

María-Victoria Soto²

mvsoto@uchilefau.cl

Michael Märker^{3,4}

Carmen Paz Castro²

Giuliano Rodolfi⁵

RESUMEN

Se identifican las unidades de paisaje más propensas a los desastres naturales en las terrazas marinas cuaternarias de la bahía de Coquimbo. La investigación se sustentó en los procesos geomorfológicos y en la capacidad de infiltración del suelo. Además, se utilizaron algunos *proxies* específicos realizados a través de SIG. Las terrazas marinas más altas no están sujetos las inundaciones y riesgo de flujo de detrito; la terraza marina más baja presenta las peores condiciones de amenaza en relación a las inundaciones provocadas por el desborde fluvial como por la baja permeabilidad del suelo.

Palabras clave: amenazas, flujos de detritos, inundaciones, suelo, SIG

ABSTRACT

We identify the landscape units most prone to natural hazards that frequently strike the Coquimbo bay. The research was based on geomorphological processes and soil infiltration

Fecha de recepción: febrero 2013.

Fecha de aceptación: enero 2014.

1 Proyecto FONDECYT 1100223.

2 Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Chile

3 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Florencia, Italia

4 Academia de Ciencias y Humanidades de Heidelberg, Alemania

5 Universidad de Florencia, Italy

capacity. Also, some proxies realized by means of GIS techniques have been used. The highest marine terraces are not subject floods and debris flow hazard; the lowest marine terrace present the worst hazard conditions to floods due overflowing river and the low soil permeability.

Key words: hazard, debrisflow, flood, soil, GIS.

I. INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto de investigación «Nuevos escenarios de fragilidad ambiental asociados al aumento del riesgo y la degradación en ciudades intermedias de Chile», la ciudad de La Serena ha sido especialmente abordada debido a que durante las últimas décadas ha estado sujeta a procesos de crecimiento urbano y desarrollo inmobiliario (Ortiz *et al.*, 2002, Castro y Ortiz 2003, Ortiz y Escolano 2005), ocupando terrenos del borde costero y de las terrazas marinas altas.

La ciudad de La Serena localizada en el semiárido costero está sujeta a cambios ambientales, tanto de origen antrópico como naturales, generando nuevos escenarios de cambio climático, tal como modelizado por CONAMA (2006), Garreaux *et al.* (2008). Estos escenarios de cambio climático y consecuentemente de modificaciones territoriales, no han sido sólo una condición actual y de estimaciones futuras, si no que a través de estudios arqueológicos realizados en el semiárido chileno, se ha demostrado la ocurrencia de fluctuaciones climáticas, más húmeda, que explicarían entre otras causas el poblamiento costero durante el Holoceno temprano (Maldonado *et al.* 2010). A partir de ello Schimdt (2010) y Boulter *et al.* (2010) resaltan la importancia del estudio de los paleo climas como vía de comparación y evaluación de los cambios climáticos futuros.

Las modelizaciones de cambio climático dan cuenta que en el presente siglo ocurrirían variaciones en las precipitaciones y temperaturas de las cuencas andinas, lo que generaría el aumento de la condición de amenaza por inundaciones fluviales, y una mayor torrencialidad de las precipitaciones para el semiárido, como también la ocurrencia de precipitaciones episódicas y concentradas propiciando inundaciones y remoción en masa. A ello se debe agregar la ocurrencia del fenómeno ENSO (El Niño, La Niña) y la Oscilación Decadal del Pacífico (Sarricolea & Martín-Vide 2012; Romero & Mendoca, 2011; Romero *et al.*, 2011).

Las condiciones de precipitación de la zona costera de Coquimbo se caracteriza por lluvias estacionales invernales, con un promedio anual del orden de los 75mm (Díaz, 2011), pero sin embargo durante eventos El Niño estos montos aumentan considerablemente. Trabajos anteriores en el semiárido chileno han demostrado que estos eventos pluviométricos son generadores de amenaza de origen natural (Castro *et al.* 2009; Soto *et al.*, 2012). Estas condiciones han sido analizadas para el desierto costero en Antofagasta (27°S) por Vargas *et al.* (2000), Sepúlveda *et al.* (2006).

Por otro lado, las condiciones endógenas en el área estudiada contribuyen sinérgicamente en la geodinámica exógena del paisaje, y son por sí mismas agentes generadoras de procesos que derivan en condiciones de amenaza. En el caso de la ciudad de La Serena esta situación cobra relevancia toda vez que existe una brecha sísmica. La sección del borde costero comprendida entre los 25°-32°S corresponde tectónicamente a un segmento de subducción

de bajo ángulo a profundidades intermedias (Pardo *et al.*, 2002a) que presenta antecedentes históricos de sismicidad en la zona costera. Se divide en dos segmentos o brechas sísmicas, la de Copiapó y la Brecha de Coquimbo (Vigny *et al.*, 2009) o Illapel (Pardo *et al.*, 2002b). Las recurrencias de grandes sismos, del orden de 60 y 150 años en Coquimbo, sugieren que estas zonas pueden considerarse como brechas sísmicas con potencial de activarse en un futuro cercano, considerando que los últimos grandes terremotos fueron hace 88 y 67 años. En la zona de Coquimbo, estudios recientes de sismicidad y deformación cortical (Vigny *et al.*, 2009) muestran que la zona se está cargando para un futuro evento interplaca.

En este escenario complejo se emplaza el paisaje geomorfológico de la bahía de Coquimbo, conformada por terrazas marinas plio-cuaternarias, descritas y datadas por Paskoff (1970, 1999). Estas terrazas conforman una secuencia de escarpes y superficies de terrazas escalonadas, constituidas por materiales inconsolidados, de textura variada, desde las gravas a los limos y arcillas, estos últimos, en la terraza holocénica, denominada como el nivel de vega o nivel palustre. La topografía de La Serena se asocia a las variaciones glacio eustáticas del nivel del mar como factor dominante en la génesis de las terrazas, y a los movimientos de solevantamiento que han separado las terrazas formadas durante cada época interglacial (Paskoff 1999). Saillard *et al.* (2009) dan cuenta que el solevantamiento episódico de la costa chilena pleistocena (31°lat S) resultarían de procesos relacionados a la subducción, tales como pulsos de acreción tectónica en la bases del borde del antearco.

De lo anteriormente expuesto se deriva que el territorio en que se emplaza la ciudad de La Serena presenta condiciones de base y desencadenantes, tanto endógenas como exógenas, que propicias para la generación de procesos dinámicos a los que se asocian amenazas de origen natural. Ello implica que en el área de estudio existan además condiciones de riesgo, entendido este como la exposición a procesos naturales de una comunidad (Helmholtz Association, 2007), toda vez que el desarrollo urbano está ocurriendo en área con amenazas. En la actualidad, el riesgo natural es considerado un problema socio ambiental, no resuelto (Cardona, 2009).

En el contexto de las amenazas existentes y de los procesos expansión urbana que se está desarrollando en La Serena, Ortiz *et al.* (2011), concluyeron que existe una escasa percepción del riesgo de los habitantes de la ciudad, asociados tanto a amenazas endógenas (terremoto y tsunami), como exógenas (remociones en masa e inundaciones), hecho que es similar en la población flotante (turistas) que demandan el borde costero (Whyndham, 2012).

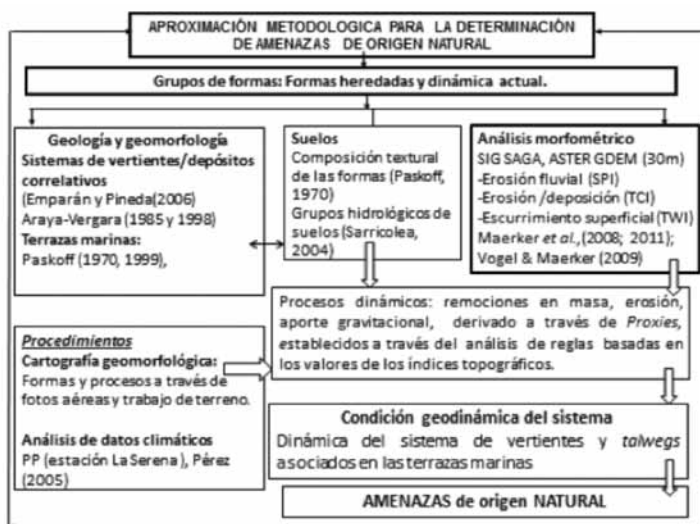
El propósito de esta investigación es a través de un análisis integrado de variables geográficas físicas, principalmente geomorfología, suelos y la topografía, identificar las áreas susceptibles de sufrir proceso geodinámicos que se reviertan en una condición de amenaza. La representación cartográfica y la modelización SIG son parte fundamental de este trabajo. Se analizan las inundaciones asociadas al drenaje del suelo, la actividad torrencial de los *talwegs* y la susceptibilidad a ocurrencia de remociones en masa. Se excluyen de esta presentación las amenazas de tsunami que obedecen a otros procesos morfogenéticos.

II. MATERIALES Y METODOS

A partir del análisis de trabajos anteriores, principalmente a la geomorfología realizada por Paskoff (1970), se llevó a cabo trabajo de fotointerpretación y de terreno a fin de identi-

ficar las formas esenciales indicadoras de dinámica endógena asociada a la amenaza natural. En relación a la cartografía de amenazas, esta se construyó en base a la información geomorfológica ya citada, a la información de los grupos hidrológicos de los suelos, de Sarricolea (2004). Se realizó procesamiento SIG de la información topográfica (Fig. 1).

Figura 1
ESQUEMA METODOLÓGICO



Sistemas de vertientes/depositos correlativos, fueron analizados a partir de la carta de Paskoff (1970), incorporando los tipos de vertientes y los conos aluviales. Para las vertientes se recurrió a la información geológica de Emparán & Pineda (2006), constituyendo junto a la interpretación aerofotogramétrica, la bases la aplicar la clasificación de vertientes de Araya-Vergara (1985). De este mismo autor se extrae la noción de depositos correlativos asociados a las vertientes, que en este caso corresponden a conos aluviales de pequeño tamaño, aunque de carácter torrencial.

Lechos fluviales, es importante destacar que para esta investigación, vinculada a las amenazas de origen natural, no se ha considerado explícitamente la morfología de lechos y canales fluviales del río Elqui, que drena por medio del área urbana de la ciudad, toda vez que, desde la construcción del Embalse Puclaro (1999) no existen crecidas fluviales en la sección distal del río. No obstante ello, la morfología fluvial existente es indicativa del régimen de crecidas hasta antes de la construcción del embalse. Sarricolea (2004) identificó las áreas de inundación fluvial asociadas a los desbordes del río Elqui.

Suelos, han sido considerados de importancia en el análisis de las condiciones de amenaza, toda vez que el área de estudio corresponde a terrazas marinas heredadas del Cuaternario, en donde las condiciones texturales diferentes generan respuestas particulares a las precipitaciones, más aún en dominio semiárido. En este sentido Holliday & Rawling (2006), Alvarez-Rogel *et al.* (2006), Ben-Dora *et al.* (2006) dan cuenta la respuesta actual a las pre-

precipitaciones y vegetación en los suelos. Paskoff (1970) destaca la presencia del denominado nivel de vega, la terraza del Holoceno, a nivel del mar, en donde además drenan los *talwegs* provenientes desde las terrazas altas. En este contexto, se aplicó la identificación de Grupos Hidrológicos de suelos realizada por Sarricolea (2004), como una primera aproximación del comportamiento hídrico de éstos.

Análisis morfométrico en ambiente SIG. Se aplicó la metodología de Märker *et al.* (2001, 2008, 2011). Se trabajó con un GDEM raster (resolución 25m). El modelo fue procesado eliminando la infraestructura, como los edificios de gran altura y áreas con vegetación. Posteriormente el modelo fue corregido hidrológicamente según el algoritmo de Planchón & Darboux (2001) y reprocesado para un análisis de terreno a través del SIG SAGA. Se modelizaron los procesos relacionados a los agentes subaéreos de erosión hídrica aplicando cuatro índices topográficos, *Stream Power Index* (SPI), *Topographic Wetness Index* (TWI), *Transport Capacity Index* (TCI) y *Modified Catchment Area* (MCA). La modelización realizada parte del supuesto que el paisaje posee substrato geológico homogéneo e indiferenciado. Los índices fueron derivados directamente de la topografía.

II.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a la bahía de Coquimbo, en la Región homónima y comprende el área urbana y de expansión urbana propuesta (Fig. 2).

Figura 2
ÁREA DE ESTUDIO



La Región se inserta en una zona de transición climática entre el clima mediterráneo desértico y el semidesierto, húmedo y nuboso en la costa y estepario cálido en el interior (Díaz, 2011), con una zona costera con un 85% de humedad, temperatura moderada con una media de 14,7° y muy baja amplitud térmica. Las precipitaciones promedio anual son del orden de los 75-84mm. Sin embargo, cuando ocurren en las costas de Chile el fenómeno de El Niño, estos valores de precipitaciones se alteran considerablemente.

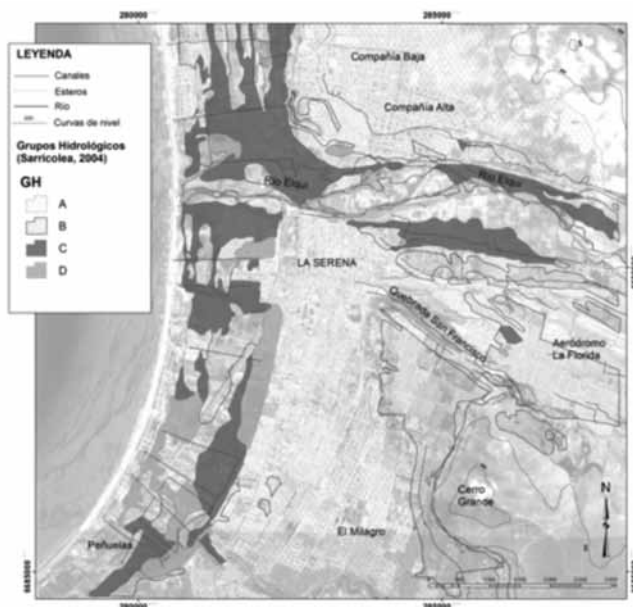
Paskoff (1970) identificó en la bahía de Coquimbo la presencia de terrazas marinas, cinco niveles escalonados, que fueron esculpidos desde la Formación Coquimbo (Plioceno Medio-Superior), durante el Pleistoceno, hasta el Holoceno, en el nivel denominado por el autor como Veguense. Estos niveles de terrazas están constituidos por rodados principalmente (T II, T III y T IV), arenas, sedimentos biogénicos y arcillas, en el Actual y Holoceno. Ello implica materiales de calibre, composición y estado diferente según los niveles de terrazas (Tabla 1), y en consecuencia un paisaje heredado susceptible de presentar actividad dinámica actual.

Tabla 1
 EDADES DE LAS TERRAZAS MARINAS DE COQUIMBO
 (PASKOFF, 1999)

Etapas Marinas	Mayor elevación (m)	Período propuesto
Vega	5-7	Holoceno
Herradura II	15-20	Último interglaciar
Herradura I	35-40	Pleistoceno medio
Serena II	75-80	Pleistoceno Antiguo
Serena I	120-130	Pleistoceno Antiguo

Consecuente con la geomorfología se han desarrollado suelos de características diferentes. Éstos fueron tratados por Sarricolea (2004), estableciendo los grupos hidrológicos. Las series se agrupan en cuatro categorías, a saber, Grupo A, suelos con bajo potencial de escorrentía y alta infiltración, aunque estén completamente húmedos. Compuestos principalmente de arenas o gravas profundas, de drenaje bueno a excesivo; Grupo B, suelos con infiltración moderada aunque estén completamente húmedos. Son moderadamente profundos a profundos, de moderado a buen drenaje. Textura moderadamente fina a media; Grupo C, suelos con baja infiltración aunque estén completamente húmedos, tienen una capa que impide el movimiento descendente del agua. Son suelos con textura de moderadamente fina a muy fina y, Grupo D, suelos con un alto potencial de escorrentía. Tienen una muy baja capacidad de infiltración, aunque estén completamente húmedos. Son suelos arcillosos con un alto potencial de expansión y nivel freático superficial. Los grupos hidrológicos a los que se asocia una condición de amenaza de inundación son los grupos C y D (Fig.3).

Figura 3
GRUPOS HIDROLÓGICOS DE SUELOS (SARRICOLEA, 2004)



III. RESULTADOS

III.1. Procesos geodinámicos actuales

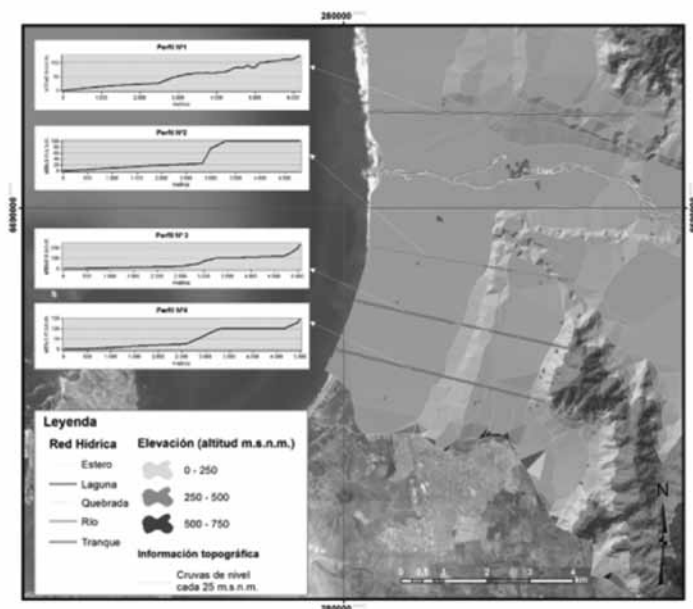
Como proceso geodinámicos actuales se han considerado los eventos subaéreos, relacionados con eventos pluviométricos concentrados; estos generan condiciones de estrés y ruptura de equilibrio de los sistemas morfológicos del semiárido costero, tales como la activación de *talwegs*, escurrimiento superficial en conos aluviales, erosión de escarpes de terrazas, e inundaciones.

La carta geomorfológica de Paskoff (1970) da cuenta de un paisaje de formas heredadas del Cuaternario, que si bien no están en morfogénesis actual, se activan bajo ciertas condiciones de umbral pluviométrico. Las terrazas marinas en La Serena presentan sus escarpes muy bien delimitados y preservados, generando un paisaje escalonado con los niveles altimétricos claramente diferenciados (Fig. 4) y que se correlacionan con edades de formación distinta.

La noción de niveles de terraplenamiento asociados a los movimientos glacio-eustáticos durante el Cuaternario, genera una conformación morfológica con material sedimentario diferente, sea, desde las coquinas de la Formación Coquimbo, hasta los sedimentos arcillosos del Holoceno en el nivel de vega.

A partir del análisis de las unidades geomorfológica identificadas por Paskokk (1970) se derivaron los procesos dinámicos actuales, como potenciales generadores de amenazas de origen natural. En este contexto, los *talwegs* que disectan el área han sido considerados como

Figura 4
PERFILES TRANSVERSALES DE LAS TERRAZAS MARINAS DE LA SERENA



de carácter torrencial, dado que presentan incisión de sus cauces y contenido de materiales en curso. Los conos aluviales han sido identificados como formas susceptibles de generar flujos de detritos, al igual que los escarpes de las terrazas. Tal asociación de procesos se sustenta en los criterios de Cruden y Varnes, (1996, en Sepúlveda *et al.* (2006) y los de Vargas *et al* (2000), que relacionan la naturaleza del substrato y la pendiente de las formas.

Las unidades territoriales más extensas son las superficies de terraplenamiento de las terrazas marinas, que presentan una muy baja pendiente, del orden de los 0° - 2° y $2,1^{\circ}$ - 5° y a partir de esta información es posible asumir que tales unidades geomorfológicas no están sujetas a remociones en masa, salvo donde se presenten *talwegs* y conos aluviales. Sin embargo, en la zona norte, Compañías Bajas y parte de Compañías Altas, la terraza más alta está en contacto directo con las vertientes de la Cordillera de la Costa, cuyos *talwegs* de carácter torrencial son potenciales generadores de flujos sobresaturados, y donde la pendiente es favorable para el escurrimiento superficial: la terraza alta $5,1^{\circ}$ - 10° y las zonas de contacto con las vertientes, $20,1^{\circ}$ - 30° (perfil 1 de la figura 4).

III.2. La integración de la información de suelos

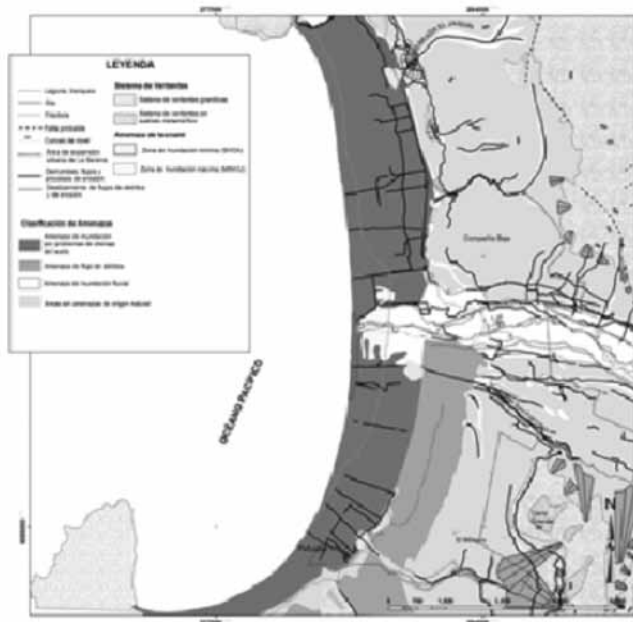
En la integración de la cartografía de los grupos hidrológicos de suelos, se consideró como relevante la distribución de los grupos C y D, en la medida que poseen una condición de inundabilidad debido a sus características de mal drenaje, asociado a la textura fina y baja capacidad de infiltración.

Los resultados de la superposición de geomorfología y series de suelo son coherentes con las formas ya descritas, herencia de la evolución cuaternaria de la bahía, es decir, las zonas de la terraza holocénica, de muy baja pendiente, correspondiente al nivel de vega, en que aún se evidencia la presencia de cordones de playa y zonas palustres, coincide con el desarrollo de los grupos C y D. Esto ratifica la condición de inundación debido a las condiciones del suelo con una muy baja capacidad de infiltración, situación que se agudiza durante eventos pluviométricos concentrados.

En las unidades de terrazas altas el resultado arroja que no existen condiciones de inundación importantes asociadas a los Grupos Hidrológicos, lo que se debe a la naturaleza de estas unidades, de material sedimentario constituido por arenas y gravas, texturalmente con buenas condiciones de infiltración, aún en eventos pluviométricos concentrados, durante los que no se supera la capacidad de saturación del suelo. De esta manera las superficies de terrazas pleistocénicas deben ser consideradas según la geomorfología y las condiciones el suelo, sin amenaza de origen natural de carácter exógeno (Fig. 5).

Figura 5

CARTA DE AMENAZAS DE ORIGEN NATURAL, BAHÍA DE COQUIMBO, A PARTIR DE LA GEOMORFOLOGÍA LEVANTADA SEGÚN FOTOINTERPRETACIÓN Y TRABAJO DE TERRENO, CON BASE EN LA CARTA GEOMORFOLÓGICA DE PASKOFF (1970) Y GRUPOS HIDROLÓGICOS DE SARICOLEA (2004)

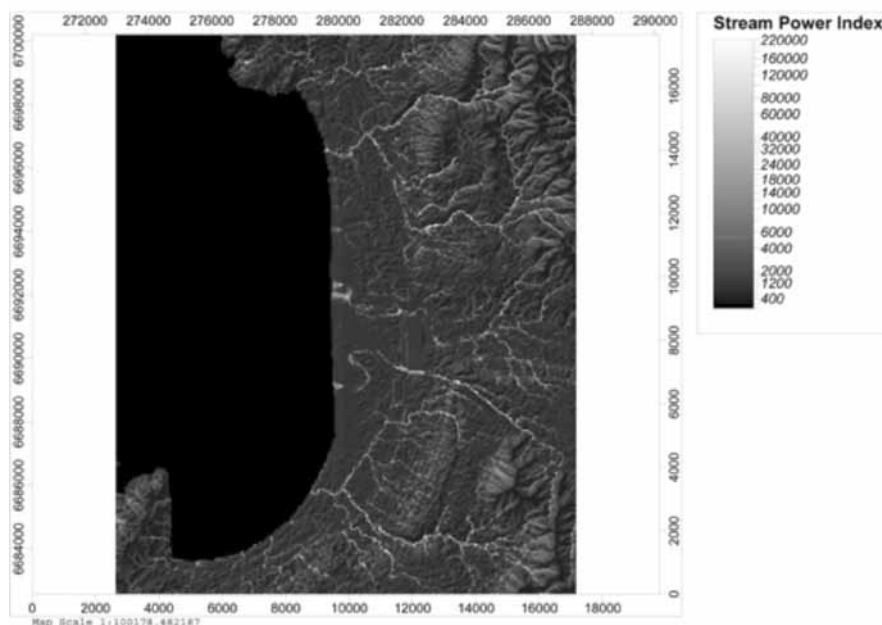


III.3. Modelamiento de información topográfica

Los índices morfométricos derivados a través de procesamiento SIG se han utilizado como indicadores relativos de la amenaza natural.

El índice *Stream Power Index* (SPI), permite describir los efectos de los procesos de erosión fluvial lineal, tales como cárcavas, quebradas y erosión lateral de lechos. En el área estudiada, dada la conformación de las terrazas marinas el paisaje presenta un relieve más bien suavizado, a pesar que estas terrazas han sido sollevantadas tectónicamente. En este sentido el SPI destaca la incisión de los *talwegs*, que en el caso de La Serena pone de manifiesto la condición de amenaza sobre todo en los sistemas de vertientes graníticas y en los escarpes de las terrazas, en el área de Las Compañías y en el escarpe de la terraza principal del río Elqui. Destaca la relación existente entre las áreas aportantes de las vertientes aledañas y cómo éstas cambian y se acomodan a la topografía de las terrazas (fig. 6).

Figura 6
 STREAM POWER INDEX (SPI) APLICADO A LA BAHÍA DE COQUIMBO.
 LAS FLECHAS INDICAN LA MANERA COMO LOS PRINCIPALES CURSOS DE AGUA
 SE ACOMODAN A LA TOPOGRAFÍA DE CORDILLERA Y TERRAZAS MARINAS

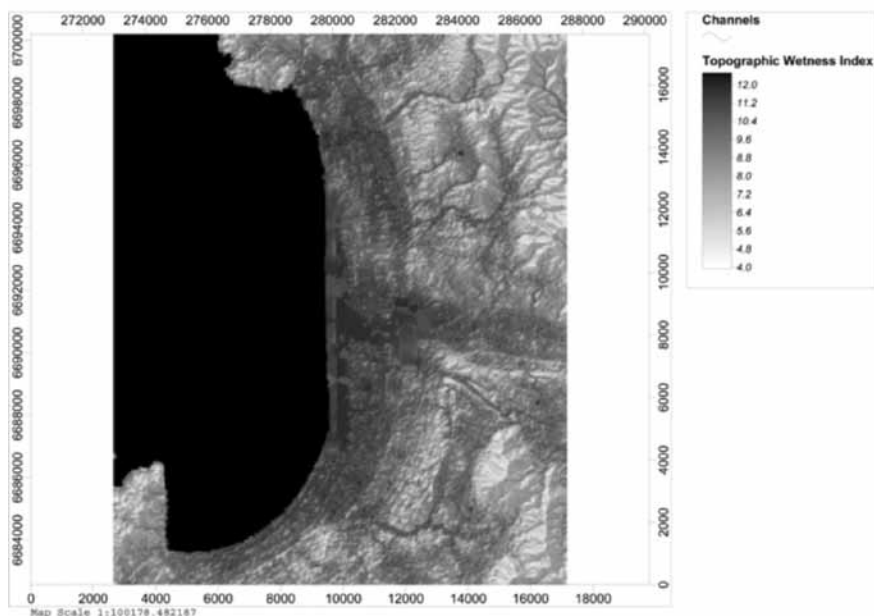


El *Topographic Wetness Index* (TWI), corresponde a una modelización que se realiza bajo el supuesto de la existencia de un substrato uniforme, en litología y profundidad, en donde la topografía es el factor dominante. El TWI proporciona la información relativa a la acumulación de agua y la saturación del suelo y el substrato, y consecuentemente permiten derivar información de los procesos de escorrentía superficial e inundaciones. La aplicación de este índice a la bahía de Coquimbo, expresa las áreas potencialmente susceptibles de acumular agua, que se distribuyen en la terraza baja holocénica (Veguense), en los *talwegs* y en las terrazas altas, en las superficies de terraplanamiento de las mismas, destacando las irregularidades topográficas existente, de tal manera que

las depresiones en estas unidades serían potencialmente área de acumulación de agua, sólo por efecto de la topografía, tal como lo expresa el índice (Fig. 7).

Sin embargo, en el sector de Compañía Baja la interpretación debe ser diferente porque ahí la pendiente es mayor y los *talwegs* provienen desde las vertientes cercanas del entorno (este sector está siendo urbanizado intensamente). Igual situación se aprecia en Compañía Alta, que está fuera del área de expansión urbana.

Figura 7
TOPOGRAPHIC WETNESS INDEX (TWI), APLICADO A LA BAHÍA DE COQUIMBO



El *Transport Capacity Index* (TCI) da cuenta de las áreas afectadas por erosión laminar, transporte de sedimentos y procesos de depositación asociados. Los resultados que aporta este índice da cuenta de la importancia en la relación de aporte de masa de las vertientes del entorno urbano de la ciudad de La Serena y de los cauces de los *talwegs*, cobrando relevancia en términos de la amenaza, los que drenan el área urbana. Las superficies de las terrazas no están exentas de amenaza, en este caso las terrazas pleistocénicas que Paskoff (1970) denominó HI y SI en la parte norte de la ciudad. En la zona norte, Compañía Baja presenta similares características, sobre todo en los escarpes de las terrazas y las vertientes (Fig. 8). Los patrones observados en la figura 10 señalan los lugares en los que de acuerdo a la modelización topográfica realizada se produce erosión, difusión de masa sedimentaria y acumulación, resaltando la función geodinámica de los escarpes de las terrazas y los *talwegs*. Esto se aprecia también en los resultados obtenidos por los índices SPI y TWI, de las figuras 6 y 7.

La cuenca modificada (MCA) está basada en cálculos que toman en cuenta el patrón del flujo. Como resultado se estima el flujo potencial más alto en comparación con la acu-

Figura 8
TRANSPORT CAPACITY INDEX (TCI), APLICADO A LA BAHÍA DE COQUIMBO

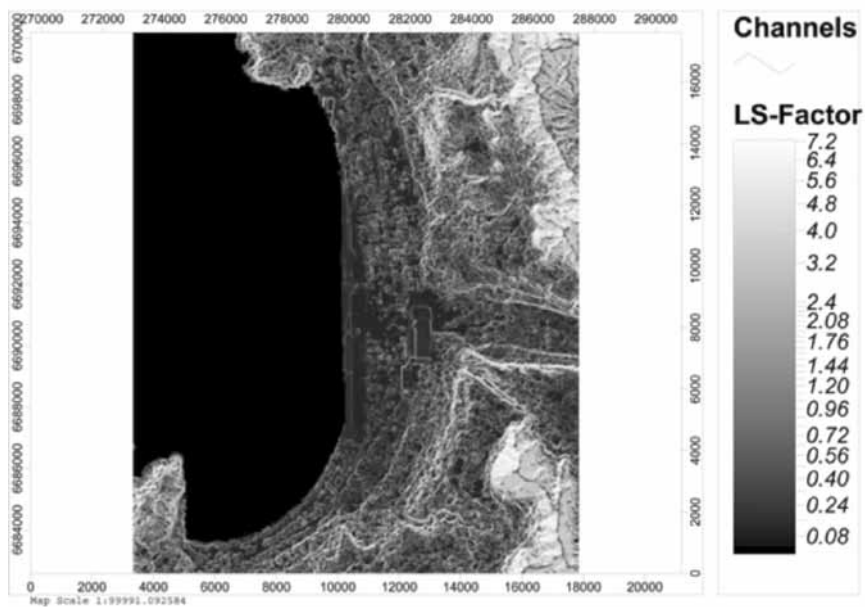
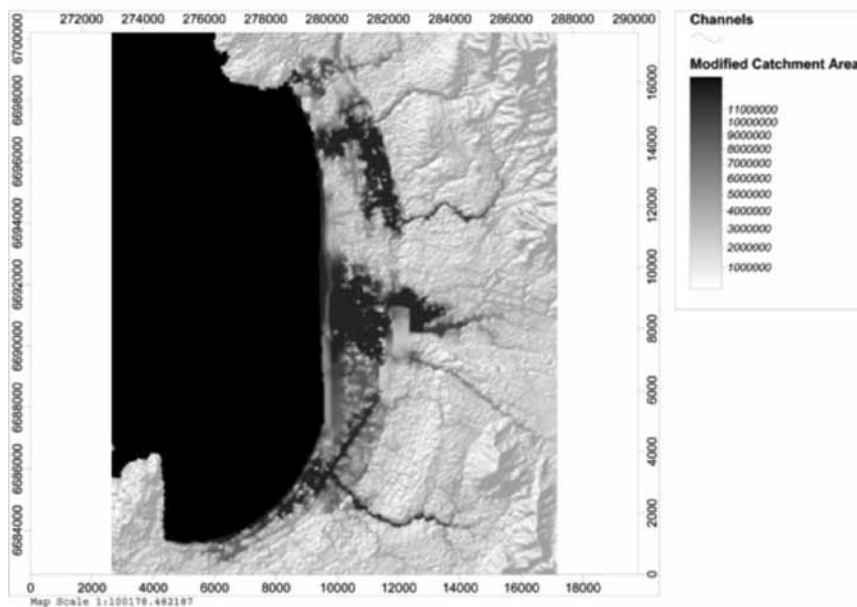


Figura 9
INDICADOR CUENCA MODIFICADA (MCA) APLICADA A LA BAHÍA DE COQUIMBO



mulación del flujo estándar (Böhner *et al.*, 2001). La MCA proporciona una estimación aproximada de las zonas potencialmente inundables en eventos pluviométricos extremos. La figura 9 da cuenta cómo las áreas asociadas a las quebradas descritas en la geomorfología (Quebradas San Francisco y Peñuelas), y la terraza baja, de suelos pertenecientes a los grupos hidrológicos CyD, son los más inundables.

III.4. Identificación de la amenaza de origen natural asociada a agentes exógenos

La superposición de la geomorfología y suelo, y la información derivada de los indicadores topográficos modelados a través de herramientas SIG, permiten establecer patrones naturales en relación a la potencialidad del paisaje para generar amenazas.

La zona baja de la ciudad, correspondiente al nivel palustre presenta desde el punto de vista de la geomorfología, suelos y topografía, las mejores condiciones para la ocurrencia de procesos de inundación asociados específicamente a la dificultad topográfica y textural para el drenaje e infiltración del agua asociada a precipitaciones concentradas. Este nivel de terraza se extiende en toda la bahía.

Las otras áreas con patrones de amenaza muy claros son los *talwegs*, a los que se pueden asociar inundaciones y flujos de detritos y erosión. Las quebradas presentes en el área urbana, como la Quebrada San Francisco presenta un cauce delimitado por terrazas escarpadas que denotan su génesis tectónica, cuyo lecho comienza en la terrazas altas y desde los conos aluviales del sector Cerro Grande, flanco norte, los que han sido identificados como área de flujos de detritos; esta quebrada drena superficialmente la ciudad sólo en la parte alta y desagua en la terraza más baja, el nivel palustre. La Quebrada Peñuelas, con una marcada forma asociada a la epigénesis, presenta un patrón de meandros encajados, de actividad episódica, de acuerdo a las características de los bancos fluviales actuales encontrados. Este *talwegs* nace en los conos aluviales del Cerro Grande, en su flanco oeste y drena las terrazas altas desaguando en el nivel palustre, desde donde es canalizada hasta la playa arenosa adjunta. Las amenazas asociadas son los la formación de cárcavas y pequeños flujos de detritos en los escarpes del cauce, y de inundación fluvial en la parte baja debido al desborde del canal y a la sobre carga de masa por un evento pluviométrico concentrado.

III.5. Condiciones desencadenantes

Si bien las características geomorfológicas, de los suelos y de la topografía proporcionan información concreta de los procesos que pueden generarse es estas, se considera como agente desencadenante las precipitaciones concentradas, las que ocurren en el semiárido chileno asociadas al fenómeno El Niño principalmente y a la Oscilación Decadal del Pacífico.

Los montos de precipitaciones anuales en La Serena son del orden de los 75mm, pero cuando ocurren en las costas de Chile el fenómeno de El Niño, estos valores de precipitaciones se alteran considerablemente, tal como se aprecia en la Tabla 2, cuando en el período de horas se alcanza y supera el promedio anual de precipitaciones.

Las precipitaciones intensas de 2011, cómo se deriva de Romero & Mendoca (2011), estaría asociado a la Oscilación Decadal del Pacífico, evento pluviométrico que generó un gran impacto en la ciudad, sobre todo por las inundaciones asociadas a problemas de drenaje del suelo.

Estos valores permiten comprender la manera en que el sistema morfológico semiárido de La Serena presenta umbrales de precipitaciones que pueden desencadenar procesos subaéreos que constituyen una condición de amenaza de origen natural. En este contexto, al aplicar los umbrales de precipitaciones que desencadenaron los flujos de detritos en Antofagasta en el año 1991 y en el piedmont de Santiago, en 1993, se valida tal aseveración. Según Hauser (1997, en Sepulveda *et al.* 2006), el día 18 de junio de 1991 en Antofagasta precipitaron 42 mm y el día 3 de mayo de 1993, en Santiago, 35,8 mm; en La Serena, ambos umbrales de precipitación han sido superados.

Tabla 2
PRECIPITACIONES CONCENTRADAS EN AÑOS EL NIÑO EN LA SERENA

Año	Precipitaciones El Niño	Otros registros
1983	160,1 mm total anual 69,5 mm/24 hrs/julio	
1984		148,8 mm total anual 40 mm/24 hrs/julio
1997	221,8 mm total anual Julio 100 mm 30 mm/24 hrs 11 de julio 30 mm/24 hrs 12 de julio 40 mm/24 hrs 15 de agosto	
2011		70 mm/13 hrs/junio 96 mm/24 hrs/junio

IV. DISCUSIÓN

Las bahía de Coquimbo y la ciudad de La Serena se insertan en un paisaje particular controlado por la topografía de los niveles diferenciales de terrazas marinas escalonadas como consecuencia de la evolución glacio-eustática y tectónica del litoral chileno semiárido (Paskoff, (1970), Quezada *et al.*, (2007), Saillard *et al.*, (2009). Consecuentemente la incisión de los cursos de agua en las terrazas se presenta como gargantas epigénicas, con una dinámica fluvial actual asociada solo a períodos con ocurrencia de precipitaciones.

La superposición de la información de geomorfología de Paskoff (1970) y de los grupos hidrológicos de suelos desarrollados por Sarricolea (2004) es consistente entre sí dada la relación genética entre ambos, pero al mismo tiempo, aporta antecedentes propios del paisaje de la zona de estudio. En este contexto, la terraza baja, en el Veguense holocénico de Paskoff (1970), es donde se presentan los grupos hidrológicos C y D, es decir, aquellos de muy mal drenaje y que consecuentemente corresponde a áreas de inundación. Castro y Ortiz (2003) comprobaron que el sector de Avenida del Mar y la urbanización existente quedó completamente inundada, sobre todo en aquellos sectores con cotas inferiores, durante un evento pluviométrico ocurrido en el año 2003.

En relación a la dinámica de los *talwegs*, éstos han sido considerados como activos y asociados a flujos de detritos. Tal consideración se sustenta en el grado de incisión de los

mismos y la presencia de material en curso, pero condicionados a la ocurrencia y magnitud de eventos pluviométricos, tal como ha sido verificado para el semiárido por Castro *et al.*, (2009), Soto *et al.*, (2010, 2012) Vidal (2012), Märker *et al.*, (2012) y en el desierto costero del dominio árido por Vargas *et al.*, (2000) y Sepúlveda *et al.*, (2006).

La modelización realizada a través de herramientas SIG resaltó aquellos aspectos topográficos de las terrazas marinas y los *talwegs*, constituyéndose en áreas potenciales para el transporte de masa y el escurrimiento superficial. A través de éstas modelizaciones se ratifica la condición de amenaza de inundación del sector comprendido entre la línea de costa y el escarpe de la terraza, junto a la Ruta 5. Destaca también la acción de los *talwegs* torrenciales en el área que drenan hacia la zona de inundación, el nivel palustre. La condición de terrazas escalonadas se traduce en una favorable condiciones de gradiente para el escurrimiento superficial, característico en zonas semiáridas costeras (Soto *et al.* 2012).

No obstante lo anterior, la modelización de datos topográficos aplicada a las superficies de las terrazas, no es concordante con la realidad de los suelos, toda vez que Sarricolea (2004) demostró que presentan buenas condiciones de drenaje en función a la naturaleza textural de gravas y arenas descrita por Paskoff (1970). En la zona urbana norte, Compañía Baja y Compañía Alta, la modelización de los datos resalta la relación existente entre la terraza alta con un rango de pendiente de 5.1°-10.0° y 10.1° a 20.0°, que recibe los aportes desde los *talwegs* y conos aluviales de las vertientes graníticas aledañas, lo cual le imprime una condición de amenaza de flujos asociado a los *talwegs*.

Consecuentemente con las características de geomorfología, topografía y suelo existen condiciones de amenaza de origen natural, y también las condiciones climáticas que puedan desencadenarlas. Peña *et al.*, (1993, en Sarricolea 2004) señala que intensidades de precipitación diaria superiores a 80 mm y acumulación de lluvia en 3 días consecutivos superior a 140 mm, producen graves procesos de inundación. Estos valores son posibles de encontrar en La Serena en años El Niño y también La Niña (Tabla 2). En este mismo contexto, y de acuerdo a Vargas *et al.*, (2000) y Sepúlveda *et al.*, (2006), son las precipitaciones concentradas las que generan flujos de detritos. Sarricolea & Martín-Vide (2012) dan cuenta que las precipitaciones concentradas alcanzan sus valores máximos en La Serena, medidas a través del Índice de Concentración, concluyendo que las mayores concentraciones de precipitaciones se observan en Chile donde el clima es mediterráneo con mayor o menor aridez y gran parte de las lluvias se concentran en pocos días.

V. CONCLUSIONES

En la bahía de Coquimbo, la ciudad de La Serena presenta las condiciones de geomorfología, suelos y topografía necesarios para la generación de amenazas de origen natural asociada a fenómenos subaéreos, los cuales se relacionan con las inundaciones y los flujos de detritos.

Las inundaciones son susceptibles de ocurrir en las terrazas baja, donde se han desarrollado las últimas etapas de expansión urbana asociado al borde costero. El área comprendida entre Avenida del Mar y la ruta 5, está sujeta a inundaciones debido a problemas de drenaje del suelo. Las otras superficies de terrazas no están sometidas a esta amenaza debido a las condiciones de buen drenaje.

En cuanto a los flujos de detritos. Estos se pueden generar en los *talwegs*, que han sido considerados como torrenciales, destacando las quebradas San Francisco y Peñuelas y en el sector norte, en Compañías Bajas y Compañías Alta, ésta última situación, estaría implicando además una condición de vulnerabilidad, debido a la expansión urbana experimentada en el sector, en donde los *talwegs* que provienen desde los sistemas de vertientes graníticas drenan en un terreno con pendiente favorable para escurrimiento superficial y consecuentemente, flujos.

Todos estos eventos sólo son posibles de ser generados cuando ocurren precipitaciones concentradas, como se ha registrado para los años El Niño y también La Niña con ocurrencia de la Oscilación Decadal del Pacífico.

REFERENCIAS

- ÁLVAREZ-ROGEL, J.M., CARRASCO, L., MARÍN, C.M. y MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J.J. (2007): «Soil of a dune coastal salt marsh system in relation to groundwater level, micro-topography and vegetation under semiarid Mediterranean climate in SE Spain». *Catena* Vol. 69, n°2, 111-121.
- ARAYA-VERGARA, J.F. (1985): «Análisis de la carta geomorfológica de la cuenca del Mapocho». *Revista Informaciones Geográficas*. 1985, N°32, 31-44.
- BOEHNER, J., KOETHE, R., CONRAD, O., GROSS, J., RINGELER, A. y SELIGE, T. (2002): «Soil Regionalisation by Means of Terrain Analysis and Process Parameterisation». En: Micheli, E., Nachtergaele, F., Montanarella, L. [Ed.]: *Soil Classification 2001*. European Soil Bureau, Research Report No. 7, EUR 20398 EN, Luxembourg. pp. 213-222.
- BOULTER, C., BATEMAN, M.D. y FREDERICK, C.D. (2010): «Understanding geomorphic responses to environmental change: a 19.000 year case study from semi-arid central Texas, USA». *Journal of Quaternary Science*, Vol. 25. N° 6, 889-902.
- CARDONA, O.D. (2009): «Teoría del Riesgos y Desastres». En: *Gestión Integral de Riesgos y Desastres. Curso de Educación Superior*. Universidad Internacional de Florida. Inédito.
- CASTRO, C.P. y ORTIZ, J. (2003): «Expansión urbana y niveles de vulnerabilidad a amenazas naturales en una ciudad de tamaño medio: La Serena, Región IV de Coquimbo». In: 51° Congreso Internacional de Americanista, Santiago.
- CASTRO, C.P., SOTO, M.V., FERNANDEZ, R., MAERKER, M. y RODOLFI, G. (2009) : « Impacto de la geodinámica actual del valle de Nantoco, cuenca del río Copiapó, asociado a la reconversión productiva ». *Revista de Geografía Norte Grande*. n°42, 81-99.
- CONAMA. (2006): Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. En: *Informe Final*. Realizado por el Departamento de Geofísica, Universidad de Chile
- DÍAZ, C. (2005): «cambio climático: vulnerabilidad, adaptación y rol institucional. Estudio de casos en el Valle del Elqui». Memoria para optar al título de ingeniero Civil Ambiental. Universidad de la Serena. Inédito. p-203.
- BEN-DORA, E., LEVIN, N., SINGER, A., KARNIELI, A., BRAUND, O. y KIDRON, G.J. (2006): «Quantitative mapping of the soil rubification process on sand dunes using an airborne hyperspectral sensor». *Geoderma* N° 131, 1-21.
- EMPARÁN, C. y PINEDA, G. (2006): «Geología del área Andacollo Puerto Aldea . Región de Coquimbo». *Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica*, n° 96. Servicio Nacional de Geología y Minería. Chile.

- GARREAU, R., ACEITUNO, P., MUÑOZ, R., ROJAS, M. y MONTECINOS, A. (2008): «El clima de Chile está cambiando». *Comunicación del Proyecto ACT-19. Variabilidad climática en Chile: evaluación, interpretación y proyecciones*. Departamento de GF, Universidad de Chile. Santiago.
- HELMHOLTZ ASSOCIATION. (2007): Risk Habitat Megacity. En: *Proyecto Risk Habitat Megacity. ¿Sostenibilidad en Riesgo? A Helmholtz Research Initiative, 2007 – 2013. Research Plan I. march 2007*. Inédito.
- HOLLIDAY, V. y RAWLING III, J.E. (2006): «Soil-geomorphic relations of lamellae in eolian sand on the High Plains of Texas and Mexico». *Geoderma*. n° 131,154-180.
- MALDONADO, A., MENDEZ, C., UGALDE, P, JACKSON, D., SEGUEL, R. y LATO- RRE, C. (2010): «Early Holocene climate change and human occupation along the semi- arid coast of north-central Chile». *Journal of Quaternary Science*. Vol. 25. n°6, 985-988.
- MÄRKER, M.; MORETTI, S. y RODOLFI, G. (2001): «Assessment of water erosion pro- cesses and dynamics in semi - arid regions of Southern Africa (kwazulu / Natal, RSA, and Swaziland) using the Erosion Response Units concept (ERU)». *Geografía Física e Dinamica Quaternaria*, N° 24, 71-83.
- MÄRKER, M.; CASTRO, C.P.; PELACANI, S. y SOTO, M.V. (2008) : « Assesment of degradation susceptibility in the Chacabuco Province of central using a morphometric based response units approach». *Geografía Física e Dinamica Quaternaria*. n° 31, 47-53.
- MÄRKER, M.; PELACANI, S. y SCHRÖDER, B. A. (2011) : « Functional entity approach to predict soil erosion processes in a small Plio-Pleistocene Mediterranean catchment in Northern Chianti, Italy». *Geomorph*. 010.10.022. DOI: 10.1016/J.
- MÄRKER, M.; DANGEL, F.; SOTO, M.V. y GIULIANO, R. (2012): «Assesmente of natu- ral hazard and vulnerability in the rio Copiapó catchement: A case study in the ungauged Quebrada Cinchado catchement». *Investigaciones Geográficas*. n° 44, 17-28.
- PARDO, M., COMTE, D. y MONFRET, T.(2002a): «Seismotectonic and stress distribution in the central Chile subduction zone». *Journal of South American Earth Sciences*, n° 15, 11-22.
- PARDO, M., COMTE, D., MONFRET, T., BOROSCHEK, R. & ASTROZA, M. (2002b): «The October 15, 1997 Punitaqui earthquake (Mw=7.1): a destructive event within the subducting Nazca plate in central Chile». *Tectonophysics*. N° 345, 199-210.
- PASKOFF, R. (1970): «Recherches geomorphologiques dans le Chili semi-aride». Bor- deaux: Biscaye Frères.
- PASKOFF, R. (1999): «Contribuciones recientes al conocimiento del Cuaternario marino del centro y norte de Chile». *Revista de Geografía Norte Grande*, n° 26, 43-50.
- PLANCHON, O. y DARBOUX, F. A. (2001): «Fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models». *Catena*, n° 46, 159-176.
- QUEZADA, J.; GONZÁLEZ, G.; DUNAI, T.; JENSEN, A. y JUEZ-LARRÉ, J. (2007): «Alza- miento litoral pleistocénico del norte de Chile. Edades 21NE de la terraza costera más alta del área de Caldera-Bahía Inglesa». *Revista Geológica de Chile*, Vol. 34, n° 1, 81-96.
- ROMERO, H. y MENDOCA, M. (2011): «Ondas de frío registradas en invierno de 2010: necesidad de una perspectiva regional integrada para la climatología latinoamericana». *Revista Geográfica de América Central*. Número especial EGAL 2011, 1-13.

- ROMERO, H., MENDOCA, M., MENDEZ, M. y SMITH, P. (2011): «Multiescalaridad, relaciones espaciales y desafíos ecológico-sociales de la climatología sudamericana. El caso del Desierto de Atacama». *Revista Brasileira de Climatología*, vol. 8, 7-29.
- SAILLARD, M., HALL, S.R., AUDIN, L., FRABER, D.L., HERAIL, G., MARTINOD, J., REGARD, V., FINKEL, R.C. y BONDOUX, F. (2009): «Non-stady long-term uplift rates and Pleistocene marine terrace development along the Andean margin of Chile (31°S) inferred from ¹⁰Be dating». *Earth Planetary Sciences letters*, n° 277, 50-63.
- SARRICOLEA, P. (2004): «Niveles de Vulnerabilidad a Amenazas Naturales en una Ciudad Intermedia y sus Áreas de Expansión: el caso de la Serena, IV Región de Coquimbo». Memoria para optar al Título de Geógrafo. Universidad de Chile. Inédito.
- SARRICOLEA, P. y MARTÍN-VIDE, J. (2012): «Distribución espacial de las precipitaciones diarias en Chile mediante el índice de concentración a resolución de 1 mm, entre 1965-2005». En: *Cambio climático, extremos e impactos*. (Ed.) J.M. Cuadrat, P. Dorta, M. J. Estrela, F. González Rouco, J. A. López Díaz, J. C. García Codrón, F. Sánchez Rodrigo, J. Martín Vide y R. García Herrera. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Salamanca, España, pp. 631-639.
- SHMIDT, G.A. (2010): «Enhancing the relevance of paleoclimate model/data comparison for assessments of future climate change». *Journal of Quaternary Science*. Vol 25, N° 1, 79-87.
- SEPÚLVEDA, S., REBOLLEDO, S. y VARGAS, G. (2006): «Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response». *Quaternary International*, n° 158, 83-95.
- SOTO, M.V., MÄRKER, M., ARRIAGADA, J., CASTRO, C.P. y RODOLFI, G. (2010): «Evaluación de la amenaza natural en ambiente semiárido sustentada en la geomorfología y el modelamiento de índices topográficos. Salamanca, Región de Coquimbo, Chile». *Investigaciones Geográficas*, n° 42, 19-36.
- SOTO, MV., MÄRKER, M., CASTRO, C.P. y RODOLFI, G. (2012): «Dinámica actual de microcuencas del desierto costero de Atacama y su influencia en la generación de amenazas». *Geografía Física e Dinámica Cuaternaria*, n° 35, 79-89.
- ORTIZ, J., CASTRO, C.P. y ESCOLANO, S. (2002): «Procesos de reestructuración urbana y niveles de vulnerabilidad a amenazas naturales en una ciudad de tamaño medio del sistema urbano chileno: el caso de La Serena, en la Región IV de Coquimbo». *Investigaciones Geográficas*, n° 36, 17-42.
- ORTIZ, J. y ESCOLANO, S. (2005): «Crecimiento periférico del Gran Santiago. ¿hacia la desconcentración funcional de la ciudad». <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-194-04.htm>
- ORTIZ, W., CASTRO, C.P. y RUGIERO, V. (2011): «Percepción del riesgo en la comuna de la Serena». *Revista INVI*, n° 75, 105-142.
- VARGAS, G., ORTLIEB, L. y RUTLAND, J. (2000): «Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur». *Rev. Geol. Chile*. Vol. 27, N° 2, 385-394.
- VIDAL, P. (2012): «Caracterización de las condiciones geodinámicas del área urbana y periurbana de la Comuna de Caldera. Desierto marginal de la Región de Atacama». Memoria para optar al Título de Geógrafo. Universidad de Chile. Inédito.
- VIGNY, C., RUDLOFF, A., RUEGG, J.C., MADARIAGA, R., CAMPOS, J. y ALVAREZ, M. (2009): «Upper plate deformation measured by GPS in the Coquimbo Gap, Chile». *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, n° 175, 86-95.

- VOGEL, S. y MÄRKER, M. (2010): «Reconstruction of the pre-Eruption AD 79 Paleotopography and Paleo-environment of the Sarno River Basin (Italy) using Stratigraphical Core Drillings and Data Mining Technologies». *Geomorphology*, vol. 115, n°1-2, 67-77.
- WYNDAM, K. (2012): *Análisis de la vulnerabilidad y riesgo del sector turístico y la población flotante en la comuna de La Serena frente a la ocurrencia de una amenaza de origen natural. IV Región de Coquimbo*. Memoria para optar al Título de Geógrafa. Universidad de Chile. Inédito. p. 178.

