

GEOAMENAZAS HIDRO-GEOMORFOLÓGICAS EN SUBCUENCAS DE LOS ANDES COSTEROS DE CHILE SEMIÁRIDO

María Victoria Soto^{1*}, Joselyn Arriagada¹, Misael Cabello², Martina Molina² y Michael Maerker³

RESUMEN

Se analiza la dinámica geomorfológica de cuencas y subcuenca de la Región de Coquimbo, Chile, para establecer las condiciones que generan los eventos de 'flashflood' de verano-otoño, asociado a eventos de precipitaciones extremas. Se consideran los eventos ENSO como antecedentes previos de precipitaciones extremas, de invierno. El trabajo realizado se sustenta en la geomorfología de las laderas, de las formas de depositación y de erosión, dinámica de lechos y canales, como formas heredadas desde el Mioceno y Pleistoceno con una condición dinámica actual, más su vinculación implícita al Antropoceno. Se realizó trabajo de fotointerpretación y modelación de proxies dinámicos de escurrimiento en las subcuencas. Los resultados fueron levantados y contrastados en terreno. Como resultados se estableció que en la cuenca Santa Gracia, se presenta dos secciones, denominadas como *knickpoints* (Knp 1 y 2), que marcan diferencias dinámicas. La subcuenca, del mismo nombre, drena hacia el curso principal en Knp1. A partir de este umbral geomorfodinámico y estructural, se establecen las áreas con amenazas de inundación, siendo identificada en el lecho del Holoceno, la localidad de Lambert, que histórica y recurrentemente es afectada por estos eventos hidrogeomorfológicos y potencialmente en el futuro, también.

PALABRAS CLAVES

Alvéolo; Subcuenca; Pediment; Chile

HIDROGEOMORFOLOGICAL GEOHAZARD IN COASTAL ANDES MICRO CATCHMENTS IN THE SEMIARID CHILE

ABSTRACT

The coastal Andes catchments and sub-catchments in the semiarid Chile present a geomorphological dynamic that becomes relevant when analyzing summer-autumn flashflood events linked to extreme precipitation, mainly by establishing the physical-natural conditions in these processes. The research was focused and based on the geomorphology of slopes, depositional and erosional features, the dynamics of ravines beds and channels, as forms inherited from the Miocene-Pleistocene, as well as the conditions of the current dynamics, together with an implicit link to Anthropocene time and processes. The material was worked based on photo-interpretation and GIS modeling of dynamic runoff proxies, considering the ENSO events that occurred prior to extreme winter precipitations. In addition, the cabinet results were recorded and fed new information during fieldwork. Thus, the main results were established: 1) The Santa Gracia basin presents two sections with dynamic differences, which were called kinckpoints (Knp 1 and 2); and 2) the flood hazard areas based on the geomorphodynamic and structural threshold, is the holocenic riverbed in Lambert village, affected by extreme hydro meteorological events, not only today, but historically and on the future potentially, as well.

KEYWORDS

Alveolo; Micro catchments; Pediments; Chile

1. Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

2. Laboratorio Geografía Física y Análisis Territorial, Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

3. Department of Earth and Environmental Sciences, University of Pavia, Italy.

*Autor de correspondencia: mvsoto@uchilefau.cl

DOI:

<http://doi.org/10.55467/reder.v6i2.96>

RECIBIDO

6 de mayo de 2022

ACEPTADO

18 de junio de 2022

PUBLICADO

1 de julio de 2022

Formato cita

Recomendada (APA): Soto, M.V., Arriagada, J., Cabello, M., Molina, M. & Maerker, M. (2022). Geoamenazas Hidro-Geomorfológicas en subcuencas de los Andes Costeros de Chile Semiárido. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 6(2), 47-59. <http://doi.org/10.55467/reder.v6i2.96>



Todos los artículos publicados en REDER siguen una política de Acceso Abierto y se respaldan en una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres (REDER)

Diseño: Lupe Bezzina

INTRODUCCIÓN

Las cuencas costeras de ambientes semiáridos de la Cordillera de Los Andes, constituyen territorios que deben ser abordados a través de esquemas evolutivos y taxonómicos adecuados a: 1) La realidad morfoclimática actual; 2) El análisis de las geoformas heredadas; 3) Las tendencias de cambio naturales y antropogénicos del tiempo Antropoceno (Steffen et al., 2010; Wilcox et al., 2011; Zalasiewicz et al., 2019); y 4) Impactos del cambio climático (Rahman Bhuiyan et al., 2021) (Rahman Bhuiyan, Choy, Muhamad, & Pereira, 2021).

Las modificaciones del medio ambiente natural asociadas al tiempo Holoceno y Reciente están en interacción con aquellas del Antropoceno, derivando en cambios del sistema morfológico y social (Bently et al., 2016). Las amenazas de origen natural y los riesgos asociados son algunas de las manifestaciones dinámicas de ello, tal como fue evidenciado directa o indirectamente por Lara et al., (2020), Gallardo et al., (2019).

El desarrollo de nuevos escenarios territoriales es una realidad inherente al Chile contemporáneo y futuro. Los procesos derivados de la globalización, la economía y la valorización de territorios con recursos con demanda del mercado mundial, generan modificaciones que desestabilizan el funcionamiento de los sistemas naturales (Huang et al., 2010, Soto et al., 2019). Los cambios de usos del suelo y ocupación de territorios con distintos grados de fragilidad ambiental y condiciones de vulnerabilidad generan condiciones de exposición a las amenazas y riesgos de origen natural (Zope et al., 2017).

Los riesgos de origen natural son una consecuencia de la intervención humana no regulada que ha afectado directamente al medio ambiente, ya sea por: 1) La ejecución de actividades intensivas en el territorio; 2) Desigualdades generadas por el sistema político-económico imperante; y 3) por lógicas de ocupación del territorio (Castro et al., 2009, 2015; Coy 2010), generando externalidades negativas del desarrollo (Cardona 2009).

A lo anterior se suman los escenarios de cambio climático, las amenazas hidro-geomorfológicas asociadas a éste (Lei & Wang 2014) y el impacto en los asentamientos humanos (ciudades o pequeñas comunidades rurales) (Barton & Irarrázabal 2016; Schmidt-Thomé 2017). Banks et al., (2014) afirmaba que las inundaciones fluviales constituían el evento natural de mayor impacto a nivel global. En 2021, la ONU-EHS, plantea la noción de Riesgo de Catástrofes Interconectadas, a través del informe homónimo (ONU-EHS, 2020-2021).

El estudio de las amenazas de origen natural y del riesgo asociado cobra relevancia debido a las pérdidas humanas y económicas que generan (Sarmiento et al., 2015), cuya tendencia es al aumento (UN, 2019).

En el contexto anterior, los ambientes de montaña cobran relevancia en la medida que son particularmente sensibles a los procesos dinámicos activados por las precipitaciones y más aún, por los eventos extremos. La condición elemental de pendiente y de la potencialidad de carga sedimentaria en laderas y valles, generan escenarios de geodinámica estacional u ocasional por eventos de precipitaciones extremas. Si, además, se considera el análisis de subcuencas o cuencas de pequeño tamaño, las respuestas geodinámicas son rápidas, intensas y muchas veces ignoradas (Rahman Bhuiyan et al., 2021), afectando con daños y pérdidas de carácter socioeconómico a ciudades muy pobladas. En Chile, esta situación es similar debido al impacto de los *flashflood*, con la diferencia que, en las subcuencas, suelen encontrarse asentamientos poblados muy pequeños, rurales y muy vulnerables socialmente.

El impacto de eventos de precipitaciones extremas y la generación de *flashflood* en cuencas pequeñas con afectación a la población, es una necesidad de estudio conducente a la alerta temprana de estos eventos (Wenlin Yuan et al., 2019, (Yuan, Liu, & Wan, 2019). A lo anterior se debe añadir los siguientes efectos: 1) prácticas de usos del suelo no adecuadas; 2) la explotación de los recursos naturales; 3) la carencia de políticas públicas efectivas para la conservación de los recursos; e 4) instrumentos de planificación del territorio, que contribuyen a que la dinámica geomorfológica natural activada por eventos climáticos extremos, generen escenarios de geoamenazas (Debortoli et al., 2017, Soto et al., 2017), a escala local y de carácter más bien recurrente.

La región semiárida de Coquimbo (29°18' lat S-32°17' lat S) se caracteriza por una geomorfología de cuencas andinas en cuyos valles se ha desarrollado una agricultura intensiva,

que coexiste con una actividad extractiva de minería metálica, en contacto territorial con aquellas áreas que están sujetas a un desarrollo urbano sostenido. A este escenario se suma el impacto de la desertización/desertificación y la escasez hídrica.

Este contexto aplica a la sección costera de la cuenca del río Elqui (30°S) y en esta investigación se analiza la dinámica natural de una subcuenca que genera condiciones de geoamenazas y daños a la población local, de carácter rural y socialmente vulnerable. El caso de estudio es la subcuenca costera de Santa Gracia, tributaria proximal del río Elqui y con influencia indirecta en las inundaciones fluviales a la capital regional de Coquimbo, la ciudad de La Serena (Figura 1). Los objetivos del trabajo están orientados a identificar y caracterizar, en las subcuencas costeras, las áreas susceptibles de activación hidrogeomorfológica frente a eventos de precipitaciones extremas.

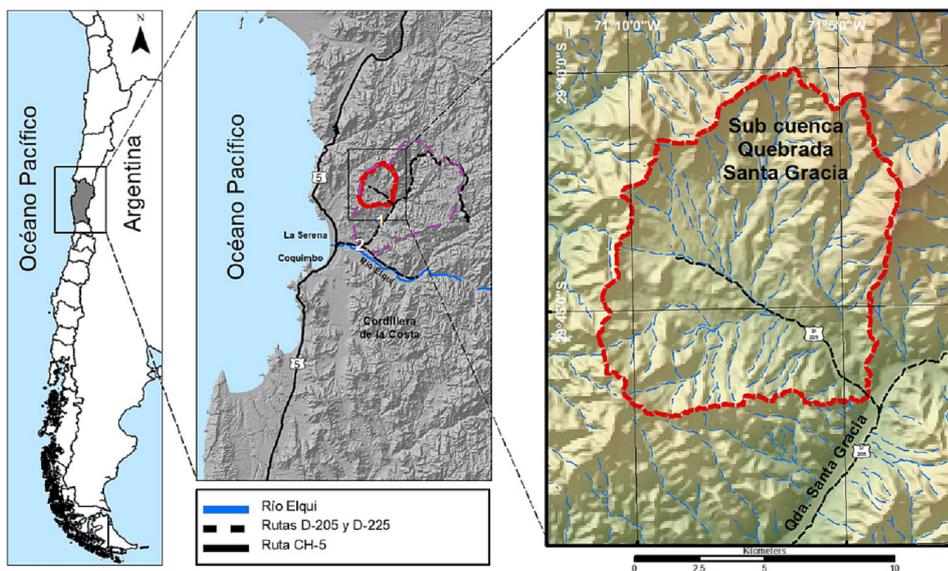


Figura 1. Área de Estudio

Fuente: Autores, 2022, Proyecto Enlace VID.

Nota: En color lila se ha marcado la cuenca Quebrada Santa Gracia o Lambert y en color rojo, la subcuenca Quebrada Santa Gracia. Los números en blanco indican: 1) Lambert y 2) El Islón

Investigaciones previas en áreas semiáridas de Chile ilustran que eventos de precipitación extrema, activan procesos geomorfológicos en subcuencas generando geoamenazas de flujos detríticos e hiper-concentrados, inundaciones rápidas (avenidas o *flashflood*) e inundaciones fluviales (Castro et al., 2009; Maerker et al., 2012; Soto et al., 2010, 2012, 2015, 2017). Por otro lado, se ha modelizado que en la zona semiárida chilena serán más frecuentes las sequías extremas (Vicuña 2011; Souvignet et al., 2012). Sarricolea & Martín-Vide (2014) establecieron que en la región se presenta el mayor nivel de concentración de las precipitaciones, hecho de gran incidencia en la dinámica actual de los sistemas geomorfológicos.

Los eventos climáticos extremos evidenciados se asocian a la variabilidad de baja frecuencia, como las fases cálidas del ENSO y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) (Soto et al., 2014, 2015, 2017; Sarricolea & Martín-Vide 2014), que inciden en la frecuencia de sistemas frontales, además de otras anomalías no frontales, tales como los ríos atmosféricos o las tormentas cálidas (Bajas Segregadas o Cut-off Lows (COL), Ruiz-Barahona, 2016; Pinheiro et al., 2017; Ortega et al., 2019), que son más frecuentes en otoño y primavera. Evidencias de tales eventos se registraron en 2015 y 2017, con gran impacto económico y social (Naranjo & Olea-Encina 2015; Contreras et al., 2015; SERNAGEOMIN 2015; Valdés-Pineda et al., 2017; Soto et al., 2017).

METODOLOGÍA

El objetivo de esta investigación y su base metodológica se sustenta en la geomorfología tratada a través de la teledetección y la validación en terreno de la información, con apoyo de las herramientas SIG para la modelación de ciertos *proxies*, con un enfoque epistemológico de la geomorfología aplicada o social, desafío actual de las ciencias sociales y de la tierra, para poder enfrentar los escenarios complejos del Reciente y del Antropoceno. El esquema metodológico general, se observa en la Figura 2.

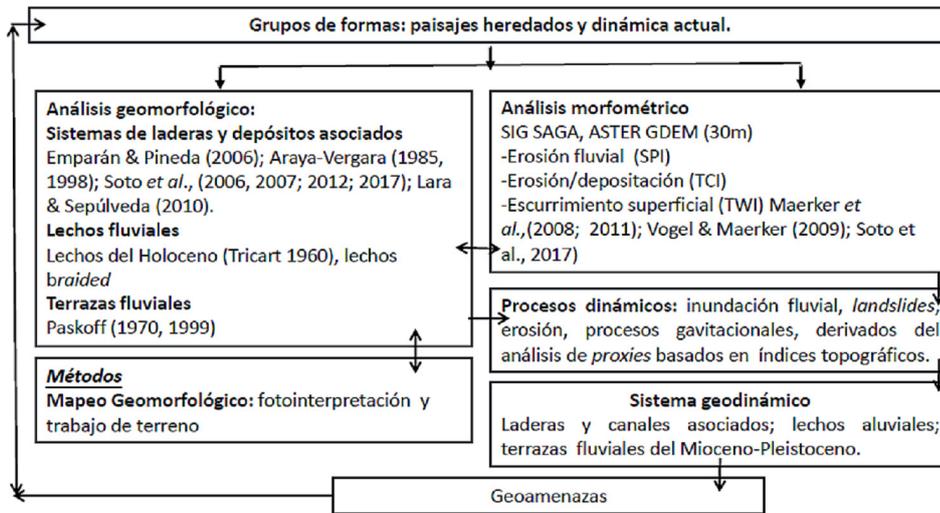


Figura 2. Esquema metodológico general
Fuente: Autores, 2022.

Formas y Procesos

El análisis geomorfológico de la sub cuenca Quebrada Santa Gracia, tributaria de la cuenca del mismo nombre (Figura 2), se realizó mediante la generación de una carta geomorfológica basada en la identificación de grupos de formas, según (Araya-Vergara, 1985) y adaptado a ambientes semiáridos por Soto et al., (2010, 2012). El paisaje se caracteriza particularmente por la relación entre los sistemas de laderas determinados por su litología y la contribución potencial de masa a la red de drenaje. La información geológica fue extraída de (Emparán & Pineda, 2000).

- » Las terrazas fluviales se mapearon en base a la fotointerpretación y utilización de imágenes satelitales de Google Earth, con el respaldo de los trabajos de Emparán & Pineda (2000), Paskoff (1970), para efectos de dataciones.
- » Los abanicos aluviales, formados en los niveles de base local de las subcuencas interiores, son formas a las que se asocian la generación de flujos de detritos, también de edad Pleistocena, pero dinámicos y funcionales en la transferencia de materiales entre laderas y fondos de valle, cuando ocurren eventos de precipitaciones extremas ENSO o COL.
- » Las formas de pediments fueron identificadas como herencias geodinámicas de ambiente húmedo (Goudie 2013) a los que se les atribuye una edad del Mioceno (Aguilar et al., 2011, 2013) principalmente y, a los que se asocia en la actualidad, una condición de escorrentía superficial episódica y erosión de suelos.
- » Los sistemas fluviales semiáridos a escala local, presentan una dinámica de canales y lechos en cuencas y subcuencas, con un marcado patrón *braided* (trenzado), constituyendo así un indicador del balance de depositación-dissección de fondos de valle y depresiones, de acuerdo a los resultados de Inbar (2011). Las terrazas holocénicas según Tricart (1960) fueron mapeadas como lechos de inundación recurrente (T°) y lechos de inundación periódica (T'), según resultados de Soto et al., (2017) para el semiárido de Chile. La geomorfología fue validada en trabajo de terreno.

Análisis SIG e indicadores topográficos

Los índices topográficos fueron usados como *proxies* para evaluar la susceptibilidad para ciertas amenazas naturales. Tales índices topográficos permiten describir el comportamiento de los procesos hídricos en función de la geometría de las laderas y las pendientes (Märker et al., 2008, 2011; Zakerinejad & Märker, 2014). Para la modelación de datos se usó un Modelo Digital de Terreno (DEM), con una resolución de 30 m. La obtención de los índices se realizó a través del procesamiento de la información con el software GIS SAGA (*System for automated Geoscientific Analyses*).

- » Se usó el índice topográfico Stream Power Index (SPI), que permite determinar el poder de la erosión lineal producida por flujos concentrados y constituye un indicador de la

energía disponible para el desprendimiento y el transporte de las partículas del suelo, desarrollando flujos turbulentos (Mäerker et al., 2010; Soto et al., 2017).

- » Transport capacity Index (TCI), conocido también como LS_Factor de la USLE (Renard et al., 1996), es una variable específica en 3D del factor de longitud de la pendiente, que caracteriza las zonas afectadas por erosión laminar, pérdida de suelo, transporte de sedimentos y procesos de depositación. Constituye un indicador de la distribución espacial más propensas a flujos (Mäerker et al., 2010; Soto et al., 2017).
- » Topographic Wetness Index (TWI), se utilizó para estimar las áreas susceptibles a ser inundadas por escorrentía potencial y exceso de saturación. Este índice proporciona información sobre la acumulación de agua y la saturación del suelo y el substrato, siendo en consecuencia un indicador de la distribución espacial de la escorrentía superficial e inundaciones (Mäerker et al., 2010; Soto et al., 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contexto Geomorfológico

El área de estudio, la cuenca andina costera de Santa Gracia o de Lambert, tributaria del río Elqui, corresponden a sistemas de laderas esculpidas en rocas plutónicas y secuencias de rocas sedimentario-volcánicas del período Jurásico Cretácico (Emparán & Pineda 2000).

Soto et al., (2017) establecieron a nivel de la cuenca principal las áreas de inundación fluvial. Investigaciones posteriores han permitido identificar que existen unidades dinámicamente diferenciadas en la cuenca, que presentan respuestas morfológicas variadas frente a eventos pluviométricos extremos, ya sea de invierno (ENSO) o de verano/otoño (COL). En la cuenca, se pudo establecer que existen dos grandes sectores, cuyos puntos de inflexión han sido denominado como *knickpoint* morfoestructurales y morfodinámicos, que actúan como reguladores en la generación de crecidas fluviales en las diferentes secciones de cuenca (Figura 3). Dichos *knickpoint* han sido mapeados sobre el modelo 3D, en el que se ha modelizado el área de inundación fluvial en las cuencas de Santa Gracia y Marquesa. En el recuadro inferior de la Figura 3 A se aprecia la relación de tributación desde las subcuencas costeras Santa Gracia y Marquesa el sistema general del río Elqui, a 12 y 30 km respectivamente, y como se insertan en éste. La escala y dimensión de estas cuencas, sobre todo el de área de estudio, justifica la importancia en el estudio de amenazas, tanto a nivel local de la cuenca como para el sistema distal del río Elqui, ya que La Serena (capital regional), se localiza en la zona de desembocadura.

El *knickpoint* 1 (*Kp1*) corresponde a la sección media-alta de la cuenca, que marca el área de generación de mayores crecidas fluviales, del tipo *flashflood* en dirección aguas abajo de la cuenca. El área afectada por esta dinámica es el poblado de Lambert y así como asentamientos informales en el lecho fluvial. Este sector, coincide con un patrón geométrico de inflexión del dren principal y también, con un cambio notable en la pendiente de la sección longitudinal del mismo, que explica la presencia de un amplio lecho fluvial con sobre carga de masa, con un característico patrón fluvial *braided*, propio de áreas de baja pendiente con cuencas aportantes de masa; la amplitud del lecho es parte de la herencia paleo ambiental. Aguas arriba del *Kp1*, el lecho fluvial es estrecho, encajado en las laderas rocosas del valle y con un patrón que asemeja al meandriforme. El trabajo en terreno, realizado con posterioridad al evento extremo de 2017, permitió establecer la localización relativa del *Kp1*, basado en la evidencia de la acción del agua en las terrazas holocénicas, muy estrechas, pero con marcas de erosión lateral por las crecidas. La persistencia de estas formas efímeras del Holoceno, hace presumir un comportamiento diferencial de las precipitaciones en la cuenca.

El *knickpoint* 2 (*Kp2*) ha sido identificado en el área de confluencia de la quebrada Santa Gracia con el Río Elqui, en donde existe un marcado estrechamiento del valle, que condiciona el aumento del nivel del agua durante los eventos pluviométricos extremos y la consecuente inundación por desborde en el sector y hacia aguas arriba (Figura 3 B). Es importante destacar que en el sector del *Kp2*, hay un cambio de pendiente y de cota; en el lecho de Santa Gracia se calculó 0,60% y en el río Elqui 0,75%. Sin embargo, en la zona de confluencia ambos lechos están muy intervenidos antrópicamente, ya sea por obras de control de lechos después del *flashflood* de 2015 y 2017, como por extracción de áridos en el río Elqui, lo que indica que tales valores de pendiente deben ser considerados con precaución. En la Figura 3 B, las áreas en rojo corresponden al lecho

de inundación, compuesto por las terrazas del Holoceno T° y T¹, con las siguientes amplitudes de los cauces, medidas en los perfiles transversales siguientes: Perfil A 477m; Perfil B 354m; Perfil C 137m; Perfil D 54m.

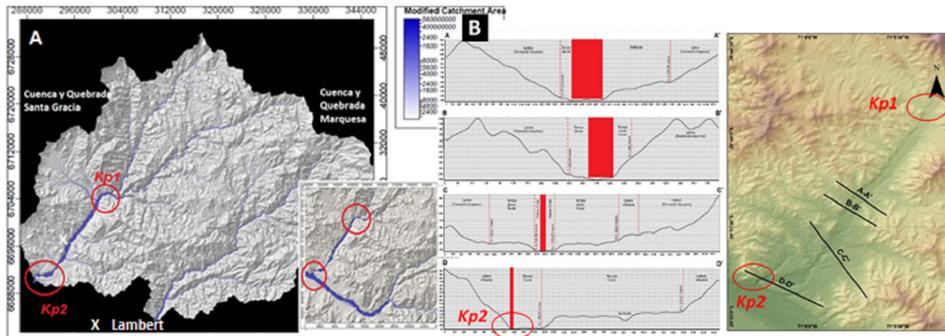


Figura 3. Localización de los denominados *knickpoint* morfoestructurales y morfodinámicos, Kp1 y Kp2 y su relación con amplitud de los lechos fluviales
Fuente: Autores, 2022, Proyecto Enlace VID.
Nota: El color rojo indica el ancho del cauce.

La modelación de datos con herramientas SIG realizada por Soto et al., (2017) para la cuenca principal (Figura 3 A) y el trabajo de terreno entre 2013-2020, permitió establecer que durante los eventos extremos COL de 2015 y 2017, en las cabeceras de la cuenca hubo condiciones de infiltración del suelo, de tal manera que no existen evidencias de erosión de riberas o desborde de lechos fluviales. Sin embargo, durante los mismos eventos, desde el área del Kp1, de manera recurrente y coincidente en ambos años, hubo crecidas fluviales del tipo *flashflood*. En años anteriores, con fenómeno ENSO, como en 1997, hubo enormes crecidas fluviales, desbordes e inundaciones que afectaron al poblado de Lambert, El Islón y la ciudad de La Serena (Figura 1). El poblado El Islón se localiza en el valle del Elqui, en la confluencia con la quebrada Santa Gracia.

A partir de estas evidencias hidrogeomorfológicas, se consideró hacer el análisis a escala local, con foco en la subcuenca Santa Gracia (nombre homónimo de la cuenca mayor) y del lecho principal, pues ambos conforman un sistema interconectado asociado al complejo geomorfológico de un sistema de laderas, denominada como alvéolo de erosión (Figura 4), que tributa en el sector del Kp1, al que también se le atribuye aporte de masa al lecho principal.

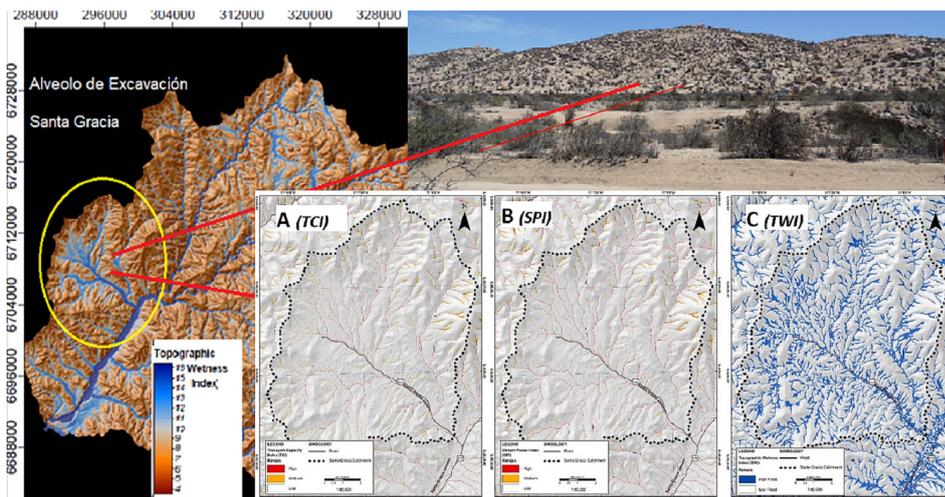


Figura 4. Morfología general de la subcuenca Santa Gracia, denominada como alvéolo de excavación, en donde predominan los procesos ligados al transporte de masa. Se aprecia el área de caos de rocas por alteración profunda del granito con enormes rocas esferoidales en ambiente de alteración hidrotermal. Las Figuras A, B, C, corresponden a los resultados del index Transport capacity Index (TCI), Stream Power Index (SPI) y Topographic Wetness Index (TWI).
Fuente: Autores, 2022, Proyecto Enlace VID.

El concepto de alveolo fue empleado para la sección costera Los Andes de Chile por Araya-Vergara (1985), para definir sistemas de laderas de excavación, modeladas por la erosión intensa, con abundante disponibilidad de material lítico en superficie. Si bien son formas definidas como heredadas de condiciones morfoclimáticas del Pleistoceno y Mioceno (Araya-Vergara 1985, Soto

et al., 2006, 2007), la intensa disección de las laderas, la cobertura detrítica de variada textura y la pendiente, son características de base que favorecen la activación geomorfológica por eventos pluviométricos intensos, concentrados y extremos, en la actualidad.

El análisis de datos SIG para establecer las condiciones potenciales de escurrimiento superficial por saturación del suelo, evidenció el alto valor que alcanza el TWI en el lecho *braided* de la quebrada Santa Gracia, como también del sistema asociado al alvéolo. La Figura 4, representa la red de drenaje del alveolo de Santa Gracia y en las cuencas, en donde el color azul indica el nivel de trabajo hidrológico. Este es un patrón morfogénico heredado, presumiblemente del clima tropical que operó en la región durante el Mioceno, que generó una red de drenaje con un alto nivel de incisión y disección en los lechos y de erosión lineal en las laderas. Ello explica la configuración de una red hídrica con ese desarrollo, como forma heredada, pero con capacidad de activación geodinámica en la actualidad. Esto es aún más relevante frente al escenario de cambio climático y a los eventos pluviométricos extremos y concentrados, como lo modelado para la región semiárida de Chile por Sarricolea & Martín-Vide (2014).

Destaca la geometría de la forma y la densidad de la red drenaje, tal como se expresa en el color azul del modelo 3D del índice de TWI, (Figura 4) realizado para la cuenca principal, expresando una distribución espacial potencial de la escorrentía superficial e inundaciones. El desarrollo del alveolo como forma de excavación y su red de drenaje, es especialmente notable en la cuenca, más aún al identificarla como forma única y particularmente en la zona de confluencia con Kp1. La acción erosiva heredada se manifiesta en las formas de pediment al interior del alveolo, en los abanicos aluviales en los niveles de base locales de las subcuencas y en la profunda alteración del material plutónico (Figura 4, foto superior), ayudado por alteración hidrotermal, documentada por Emparán & Pineda (2000).

En el contexto del alveolo, se aplicaron los index *Transport capacity Index (TCI)*, *Stream Power Index (SPI)* y *Topographic Wetness Index (TWI)*, tal como se observa en la Figura 4 A, B, C, generando una muy buena correlación entre los dos primeros, evidenciando así la importancia de las quebradas como agentes de erosión lineal y su potencialidad en la difusión de flujos. El Topographic Wetness Index (TWI), es el indicador más evidente de las áreas susceptibles de inundación por escorrentía y exceso de saturación. Estas áreas fueron validadas en terreno, siendo las formas fluviales esenciales, los indicadores, tales como bancos de gravas y arenas gruesas, con micro escarpes frescos y disección lateral de lechos y canales. Las formas de conos aluviales locales, también presentan evidencias de erosión lineal y disección longitudinal.

Geomorfología dinámica y geoamenazas

La subcuenca Santa Gracia está modelada en rocas plutónicas, con un importante sector afectado por alteración hidrotermal (Emparán & Pineda 2000). Geomorfológicamente la zona ha sido considerada como un alvéolo de excavación, conformado por sistemas de laderas de baja altura (máximas alturas entre 1.154 m.s.n.m y 1.384 m.s.n.m), con una delgada capa de suelo y vegetación de matorral xerófico de baja densidad. Son muy frecuentes los afloramientos del substrato plutónico, como también las evidencias de alteración esferoidal, caos de bloques y abundante y profundo saprolito, en laderas y fondos de valle (Figura 4).

Los grupos de formas identificadas fueron mapeadas en la carta geomorfológica (Figura 5), la que, si bien es de carácter general, permite identificar y caracterizar las siguientes morfologías:

Sistemas de laderas, modeladas en rocas plutónicas, con cimas más bien suavizadas debido en parte al recubrimiento del saprolito, como producto de la intensa erosión. Se ha delimitado también en la Figura 5 el área de alteración hidrotermal, que se caracteriza por un paisaje de rocas graníticas con alteración esferoidal, caos de rocas y tors de gran tamaño (Figura 4). Estas áreas son productoras de bloques redondeados a los lechos principales. La trazabilidad de estos bloques se observa tanto en la subcuenca como en el lecho principal y en dirección a la confluencia. La gradación textural de los bloques redondeados es conforme a la distancia del área fuente identificada.

Formas de pediment, asociado a la dinámica de las laderas graníticas y del saprolito, destacan las áreas de pediment, como formas heredadas del Mioceno, producto de la intensa denudación de climas más húmedos que los actuales, que también explicarían los intensos procesos de excavación y erosión de las laderas.

Las formas de pediment se observan en las secciones medias de la cuenca y específicamente, en las partes medias y distales de los sistemas de laderas. Algunas superficies de pediment presentan varios niveles de altura, como niveles de terrazas que se imbrican en las áreas distales, con las quebradas y los abanicos aluviales del Pleistoceno. Es muy importante destacar el hecho que la forma denominada por Emparan & Pineda (2000) como perteneciente a la Formación Confluencia (Plio-Mioceno), de origen fluvio-aluvial, corresponde a una forma de pediment, netamente aluvial. En trabajo en terreno se analizó la composición textural del depósito de erosión, con algún patrón de estratificación y con detritos angulosos en una matriz saprolítica de textura arenosa. La posición de esta terraza, que se ha denominado pediment, es la misma de las otras superficies de pediment con una conformación interna, similar. Si bien las cimas de las laderas son muy suavizadas, los sistemas de laderas están muy incididas, siendo ello posible de ser atribuible a la acción aluvio-pluvial de los paleo ambientes heredados ya mencionados y referenciados por Emparán y Pineda (2000), Soto et al., (2017), tanto en las laderas como en los pediments.

Red de drenaje, se presenta muy marcado, evidenciando la profunda disección y excavación de los lechos y canales, independientes de su jerarquía. Hay un contraste entre laderas muy suavizadas y quebradas muy incididas, pero con lechos con abundancia de material en el curso, que aumenta aguas abajo. Los patrones *braided* en los fondos de los lechos, independiente de su orden de magnitud, son la evidencia morfosedimentológica de la acción de erosión y rebaje de los sistemas de laderas y del aporte hacia los lechos, formando bancos de arenas gruesas, grava y bloques (redondeados) de litología plutónica.

Los sistemas de laderas y las superficies de pediment son productoras de masa dada la evolución morfogenética de las formas. La evolución de las extensas superficies de saprolitos asociado a la litología plutónica, además con alteración hidrotermal, son otro factor de aporte de potencial de masa. A su vez el sistema de canales asociados, poseen material en curso provenientes desde laderas y pediment. En los niveles de base locales de dichos sistemas de canales, se han desarrollado abanicos aluviales, no muy cóncavos, pero si estabilizados, que dan cuenta de un flujo no muy torrencial vinculadas a condiciones ambientales templadas a semiáridas, como se presume para el semiárido costero durante el Pleistoceno (Soto 2017).

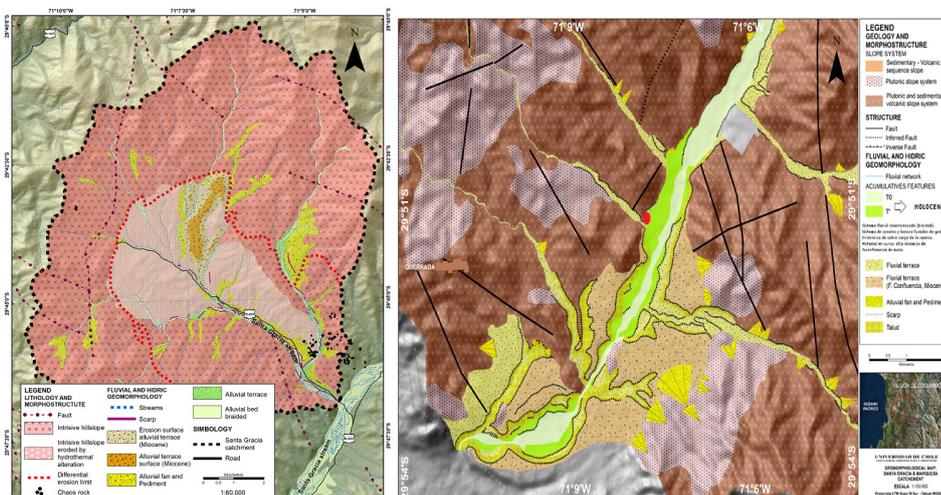


Figura 5. Carta geomorfológica de la subcuenca y alveolo de Santa Gracia y de la sección media de la quebrada Santa Gracia, en la localidad de Lambert (punto color rojo). Fuente: Autores, 2022, Proyecto Enlace VID.

Si bien la zona es semi-árida y actualmente en condiciones de mega sequía desde el 2010 (Alvarez-Garretón et al., 2021) (Alvarez-Garretón, Boisier, Garreaud, & Seibert, 2021), durante los eventos pluviométricos denominados Baja Segregada, de 2015 y 2017, la red de drenaje se activó rápidamente y por muy corto tiempo. Sin embargo, en los eventos ENSO (1997) la acción de la red de canales tanto del alveolo como de la cuenca principal, se activó de manera singular (Soto et al., 2017).

Aguas abajo del valle, se localiza el poblado de Lambert construido en las terrazas fluviales holocenas, principalmente del lecho de la Quebrada Santa Gracia. Las formas fluviales aludidas fueron descritas y datadas por Paskoff (1970). La Figura 5 muestra el valle, circunscrito por

sistemas de laderas modeladas en rocas principalmente plutónicas. Destaca el amplio lecho fluvial, asociado a una morfogénesis heredada, al igual que los diferentes niveles de terrazas fluviales, datados desde el Mioceno hasta el Pleistoceno (Paskorff, 1970; Emparán & Pineda, 2012). Llamamos la atención los abanicos aluviales sobreyaciendo a las terrazas del Mioceno y finalmente, el lecho fluvial, que marca el Holoceno. Se han delimitado el lecho mayor (T^o) y el lecho mayor episódico (T^e). La localidad de Lambert se encuentra en las terrazas T^e y T^o , en áreas de amenazas de inundación fluvial y *flashflood*, con las implicancias socio territoriales que ello conlleva.

La situación más compleja ocurre con la escuela de Lambert, localizada entre la terraza T^e , rellena artificialmente y el lecho propiamente tal. Según SERNAGEOMIN (2017), el año 1997 la crecida fluvial alcanzó el poblado y el actual emplazamiento de la escuela. En la Figura 6 se destaca la localización de la Escuela y del camino de acceso que cruza el valle, ambos en área de inundación fluvial. Sin embargo, llama la atención la construcción de un muro de defensa fluvial, hecho con material arrastrado desde el lecho y que solo lo protegería temporalmente de la erosión basal local, pero no de algún desborde aguas arriba.



Figura 6. Vistas del poblado de Lambert y del comedor de la escuela local, localizada en el lecho de inundación
Fuente: Luis Lara, 2019.

A este respecto y desde el punto de vista morfodinámico, cabe el cuestionamiento de la localización de la escuela en su actual emplazamiento, toda vez que el área ya había sido inundada por una crecida fluvial en el evento ENSO 1997; posteriormente, en 2017, se identifica el impacto del *flashflood* de ese año. El comedor de la escuela fue construido con posterioridad al último evento (Figura 7). En dicha figura se hace necesario observar el calibre de los bloques transportados por el flujo, grandes bloques rocosos que, junto a la erosión lateral del escarpe, dan cuenta de la energía de un flujo con sobre carga de masa, de características torrenciales y con gran capacidad de erosión y de destrucción.

El impacto de este tipo de procesos, con génesis local ($Kp1$) y debido a eventos de precipitaciones extremas, genera impactos en la población local, que en el caso de Lambert son trabajadores agrícolas, mineros y recientemente, población llegada al lugar, conformado asentamientos informales en las riberas de la Quebrada Lambert (Figura 7).

Las dinámicas geomorfológicas de las formas descritas y formas heredadas han sido analizadas desde el punto de vista de la actividad actual asociada a umbrales de precipitaciones extremas, según valores conocidos en los últimos eventos, es decir 26,8 mm/24hrs el 11 de mayo y 74mm/24hrs el 12 de mayo ambos en 2017(SERNAGEOMIN 2017).

Soto et al. (2017) ya había mapeado dichas áreas como de inundación, sustentado en el análisis de la geomorfología local y la modelización de la cuenca, con umbrales coincidentes con el evento de otoño de 2015.



Figura 7. A. En la foto superior señala el lugar de construcción del comedor de la Escuela de Lambert (flecha roja gruesa). La foto inferior, tomada aguas arriba de la Escuela, muestra el nivel de la erosión lateral del río durante una crecida, el retroceso de las terrazas del holoceno T' y la destrucción del lecho de inundación o terraza T'. Fuente: Autores, 2022, en base a fotografías de SERNAGEOMIN (2017), Proyecto Enlace VID.

CONCLUSIONES

Las unidades geomorfológicas menores, sean subcuenca o subcuenca en subcuenca, que presentan formas heredadas de condiciones climáticas diferentes de las actuales, deben ser vistas como unidades territoriales potencialmente dinámicas. Son las pequeñas subcuencas las que primero racionan a un input de precipitaciones extremas. Luego esta dinámica se propaga en el sistema interconectado de subcuenca/cuenca. En el área de estudio la subcuenca de Santa Gracia permite comprobar esta dinámica, en la que intervienen los sistemas de laderas y el alvéolo de excavación, como también las superficies de pediment.

Las formas heredadas, son una evidencia de las condiciones climáticas del Mioceno y del Pleistoceno, dominadas por la acción pluvial. En la actualidad, con dominio semiárido y con la ocurrencia de eventos de precipitaciones extremas, estas formas, laderas, pediment, conos aluviales y la red de drenaje se reactiva de manera casi instantánea, generando *flashflood*. Es muy importante destacar que la acción de las precipitaciones es absolutamente concordante con la morfología heredada.

El sistema fluvial debe ser considerado en sus diferentes escalas. En las subcuencas, en su rol como agente transportador de masa (saprolito, gravas) es proporcional a su competencia y además pueden incidir en la dinámica fluvial del sistema de mayor jerarquía. En el caso de la Quebrada Santa Gracia, la dinámica actual observada con los eventos pluviométricos de 2015 y 2017 los lechos y canales *braided* de la subcuenca Santa Gracia presentan claras evidencias de actividad aportando efectivamente a la dinámica de la subcuenca mayor.

La subcuenca principal, Santa Gracia o Lambert, es un enorme lecho *braided* que se activa en eventos extremos y es afectado por *flashflood*, cuya zona de origen está asociado al sector denominado *Kp1*, consecuente con el cambio de pendiente, de fisiografía general de la cuenca y por las evidencias de reactivación fluvial vistas en terreno. Las terrazas fluviales bajas de este curso fluvial son altamente vulnerables a inundaciones y erosión basal, afectando la localidad de Lambert.

Finalmente, se considera que los aportes de este trabajo puedan ayudar a la comprensión de los paisajes actuales a la luz de las herencias climáticas y más aún ante los escenarios de cambio climático. Además, se debe tener en consideración el aumento de asentamientos informales, sobre todos en las zonas ribereñas. En el caso de Santa Gracia o Lambert, no es ajeno, pues en los últimos 4 años se ha observado cómo se ha formado un verdadero poblado informal.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto Enlace VID, 2018 Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo, de la Universidad de Chile, Chile

REFERENCIAS

- Aguilera, G., Riquelme, R., Martinod, J., & Darrozes, J. (2013). Rol del clima y la tectónica en la evolución geomorfológica de los Andes Semiáridos chilenos entre los 27-32 S. *Andean Geology, Revista Geológica de Chile*, 40(1), 79-101. <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV40n1-a04>
- Aguilera, G., Riquelme, R., Martinod, J., Darrozes, J., & Maire, E. (2011). Erosion rates variability on landscape's transience state in the semiarid Chilean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 1736-1748.
- Alvarez-Garretón, C., Boisier, J., Garreaud, R., & Seibert, J. (2021). Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 429-446. <https://doi.org/10.5194/hess-25-429-2021>
- Araya-Vergara, J. (1985). Análisis de la carta geomorfológica de la cuenca del río Mapocho. *Revista Informaciones Geográficas*, 32, 31-44.
- Barton, J., & Irrarrazabal, F. (2016). Adaptación al cambio climático y gestión de riesgos naturales: buscando síntesis en la planificación urbana. *Revista de Geografía Norte Grande*, 63, 87-110. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022016000100006>
- Bentley, S., Blum, M., Maloney, J., Pond, L., & Pailsell, R. (2016). The Mississippi River source-to-sink system: Perspectives on tectonic, climatiz, and anthropogenic influences, Miocene to Anthropocene. *Earth Science Reviews*, 153, 139-174. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.001>
- Cardona, O. (2009). Teoría del Riesgo y Desastre. En Universidad Internacional de Florida (Ed.), *Gestión Integral de Riesgos y Desastres*. Curso de Educación Superior, FIU.
- Castro, C., Soto, M., Fernández, R., Märker, M., & Rodolfi, G. (2009). Impacto en la geodinámica actual del valle de Nantuco, cuenca del río Copiapó, asociado a al renovación productiva. *Revista de Geografía Norte Grande*, 42, 81-99. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022009000100006>
- Coy, M. (2010). Los estudios del riesgo y de la vulnerabilidad desde la geografía humana. Su relevancia para América Latina. *Población y sociedad*, 17, 9-28.
- Debortoli, N., Camarinha, P., Marengo, J., & Rodrigues, R. (2017). An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. *Natural Hazards*, 86, 557-582. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2705-2>
- Emparan, C., & Pineda, G. (2000). *Área La Serena-LaHiguera, Región de Coquimbo. Mapas Geológicos 18, Escala 1:100.000*. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).
- Gallardo, L., Rudnick, A., Barraza, J., & Fleming, Z. (2019). *El Antropoceno en Chile: evidencias y formas de avanzar*. Santiago: CR2.
- Goudie, A. (2013). *Arid and Semi-Arid Geomorphology*. Cambridge University Press.
- Huang, S., Yen, C.-T., & Chang, L.-F. (2010). The transition to an urbanizing world and the demand for natural resources. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2(3), 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.06.004>
- Inbar, M. (2012). Short-term channel changes after flash floods in the Upper Jordan River, Israel. *Horizons in Geography*, 79/80, 26-36. <https://www.jstor.org/stable/23718579>
- Lara, A., Villalba, R., Urrutia-Jalabert, R., González-Reyes, A., Aravena, J., Luckman, B., . . . Wolodarsky-Franke, A. (2020). + A 5680-year tree-ring temperature record for southern South America. *Quaternary Science Reviews*, 228, 106087. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106087>
- Lei, Y., & Wnag, J. (2014). A preliminary discussion on the opportunities and challenges of linking climate change adaptation with disaster risk reduction. *Natural Hazards*, 71, 1587-1597. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0966-6>
- Maerker, M., Castro, C., Pelacani, S., & Soto, M. (2008). Assessment of soil degradation susceptibility in the Chacabuco province of central Chile using a morphometry based response units approach. *Geografía Física e Dinámica Cuaternaria*, 31, 47-53. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/117860>
- Märker, M., Dangel, F., Soto, M., & Rodolfi, R. (2012). Assessment of Natural Hazards and Vulnerability in the Rio Copiapó Catchment: A case study in the ungauged Quebrada Cinchado Catchment. *Investigaciones Geográficas*, 44, 17-28. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/117991>

- Naciones Unidas (UN). (2019, 7 noviembre). Los desastres son la nueva normalidad. UN News. <https://news.un.org/es/interview/2019/11/1465021>
- ONU-EHS. (2021). *Interconnected Disaster Risks*. United Nations University. <https://webassets.eurac.edu/31538/1632298428-unuinterconnecteddisasterrisksreport210908.pdf>
- Paskoff, R. (1970). *Geomorfología de Chile Semiarido*. La Serena: Universidad de La Serena, Facultad de Humanidades.
- Rahman Bhuiyan, T., Choy, E., Muhamad, N., & Pereira, J. (2021). The socioeconomic impact of climate-related hazards: flash flood impact assessment in Kuala Lumpur, Malaysia. *Natural Hazards*, 109, 1509-1538. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04887-3>
- Sarmiento, J., Hoberman, G., Ilcheva, M., Agary, A., Majano, A., Poggione, S., & Duran, L. (2015). Private sector and disaster risk reduction: the cases of Bogota, Miami, Kingston, San Jose, Santiago, and Vancouver. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14(3), 237-255. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.09.008>
- Sarricolea, P., & Martí-Vide, J. (2014). Spatial analysis of rainfall daily trends and concentration in Chile. *Investigaciones Geográficas*, 47, 53-66. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2014.32995>
- Schmidt-Thomé, P. (2017). Towards Applying Climate Change Adaptation. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, 67, 49-60. <https://www.redalyc.org/journal/176/17651756003/html/>
- Soto, M. (2017). Assessment of process dynamics and evolutionary trend of the western part of the arid Chilean coastal range: relationships between river catchments and coastal dynamics of the Coquimbo bay system, Chile. PhD Thesis, Eberhard Karls Universität Tübingen.
- Soto, M., Arratia, P., Cabello, M., Moreno, R., & Whyndam, K. (2019). Amenazas de origen natural y exposición de obras de conectividad estratégica en territorios extremos. Fiordo Comau, Norpatagonia de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 73, 57-75. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022019000200057>
- Soto, M., Castro, C., Fernández, R., Rodolfi, G., Maerker, M., & Rugiero, V. (2007). Carta geomorfológica de la sección central y occidental de la Región Metropolitana de Santiago. *Investigaciones Geográficas*, 39, 91-99. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2007.27763>
- Soto, M., Castro, C., Märker, M., & Rodolfi, G. (2012). Dinámica actual de microcuencas del desierto costero de Atacama (Caldera, Chile) y su influencia en la generación de amenaza. *Geografía Física e Dinámica Cuaternaria*, 35(1), 79-89. <http://hdl.handle.net/2158/826134>
- Soto, M., Castro, C., Rodolfi, G., Maerker, M., & Padilla, R. (2006). Procesos geodinámicos actuales en media y baja montaña, corde meridional de la Cuenca del río Maipo, Región Metropolitana de Santiago. *Geografía Norte Grande*, 35, 77-95. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022006000100006>
- Soto, M., Maerker, M., Castrp, C., & Rodolfi, G. (2015). Análisis integrado de las condiciones de amenaza natural en el medio ambiente costero semiárido de Chile. La Serena, Coquimbo. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 67, 213-231. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/132640>
- Soto, M., Maerker, M., Rodolfi, G., & Sepúlveda, S. (2014). Assessment of geomorphic processes affecting the paleo-landscape of tongoy bay, Coquimbo region, central Chile. *Geografía Física e Dinámica Cuaternaria*, 37(1), 51-66. <http://doi.org/10.4461/GFDQ.2014.37.6>
- Soto, M., Märker, M., Sarricolea, P., Sepúlveda, S., Rodolfi, G., & Cabello, M. (2017). Assessment of hydro-geomorphological hazard in the Chilean semiarid coastal range and its impacts on La Serena city, Coquimbo Region. *Natural Hazards*, 88(1), 431-452.
- Soto, M., Märker, M., Arriagada, J., Castro, C., & Rodolfi, R. (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*, 42, 19-36. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2010.21867>
- Tricart, J. (1960). Los tipos de lechos fluviales. *Revista Geográfica Universidad de los Andes*, 2(5-6), 7-19.
- United States Department of Agriculture (USDA). (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical release 55* (Second Edition). USDA.
- Yuan, W., Liu, M., & Wan, F. (2019). Study on the impact of rainfall pattern in small watersheds on rainfall warning index of flash flood event. *Natural Hazards*, 97, 665-682. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03666-5>
- Zakerinejad, R., & Maerker, M. (2015). An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. *Natural Hazards*, 79, 25-50. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1700-3>

Zope, P., Eldho, T., & Jothiprakash, V. (2017). Hydrological impacts of land use–land cover change and detention basins on urban flood hazard: a case study of Poisar River basin, Mumbai, India. *Natural Hazard*, 87, 1267–1283. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2816-4>