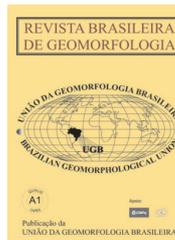


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 21, nº 3 (2020)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1743>



MAPEO DE SUCEPTIBILIDAD DE FLUJO DE DETRITOS PARA LA PROVINCIA DE CHAÑARAL – CHILE

DEBRIS FLOW SUSCEPTIBILITY MAP OF THE CHAÑARAL PROVINCE – CHILE

Keyla Manuela Alencar da Silva Alves

Departamento de Industria, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Metropolitana

Dieciocho 161, Santiago. CEP 7800002. Chile

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7635-2430>

E-mail: keyla.dasilva@utem.cl

Daniel Rodrigues de Lira

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Sergipe

Av. Vereador Olímpio Grande, s/n, Aracaju, Sergipe. CEP: 49506-036. Brasil

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9559-2480>

E-mail: dniellira@gmail.com

Maria Carolina Parodi D'Avila

Departamento de Industria, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Metropolitana

Dieciocho 161, Santiago. CEP 7800002. Chile

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2132-5168>

E-mail: cparodi@utem.cl

Kleython de Araújo Monteiro

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Alagoas

Av. Lourival Melo Mota, Maceió, Alagoas. CEP: 57072-970. Brasil

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4829-3722>

E-mail: geokleython@gmail.com

Antonio Carlos de Barros Corrêa

Departamento de Ciências Geográficas, Universidade Federal de Pernambuco

Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Recife, Pernambuco. CEP: 50670-901. Brasil

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9578-7501>

E-mail: dbiase2001@terra.com.br

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
15/01/2020

Aceito (Accepted):
29/04/2020

Resumen:

Los flujos de detritos son eventos geomorfológicos conocidos en Chile como aluviones. Son flujos de agua que transportan grandes cargas de detritos y sedimentos, pudiendo causar un flujo con volumen 2 o 3 veces mayor que un caudal (inundación). La provincia de Chañaral posee características geomorfológicas, hidrológicas, y antrópicas que favorecen la ocurrencia de flujos de detritos en

Palavras Clave:

Flujo de Detritos; Aluvi3n; Susceptibilidad; Chañaral; Chile; Algebra de Mapas.

Keywords:

Debris Flow; Alluvium; Susceptibility; Chañaral; Chile; Map Algebra.

caso de fuertes precipitaciones. El factor antr3pico se refleja como un factor potencial del riesgo por cuenta del tipo de uso del suelo desarrollado. Gran parte de la zona urbana de las comunas est3n construidas en el cauce del r3o El Salado, o muy cercano al r3o, como tambi3n sobre los abanicos aluviales. Las comunas de la provincia de Chañaral fueron afectadas por un evento de tales caracter3sticas en los d3as 24 y 25 de marzo de 2015. Estas comunas presentan un hist3rico de ocurrencias de flujos de detritos, siendo esta la principal raz3n para la creaci3n de un mapeo de susceptibilidad para la provincia. Las p3rdidas econ3micas, humanas y dem3s impactos generados en 2015 fueron extremos, lo que lleva a una necesidad

de identificar los territorios que son m3s susceptibles al riesgo, para as3 fomentar la mitigaci3n y la resiliencia de los afectados. El objetivo de este estudio es mapear zonas susceptibles a la ocurrencia de flujos de detritos a trav3s del uso de 3lgebra de mapas en SIG. Se pudo zonificar las 3reas susceptibles por rangos y correlacionar los sectores de mayor susceptibilidad con los sectores m3s afectados por el flujo de detritos del 2015. La correlaci3n demostr3 que las zonas identificadas por el mapeo aplicando algebra de mapas coincide con las zonas afectadas por el evento de flujo de detritos analizado.

Abstract:

Debris flows are geomorphological events known in Chile as “aluviones”. They are water flows that carry large loads of debris and sediment, and can cause a flow with a volume 2 or 3 times greater than a normal flood. The Chañaral province has geomorphological, hydrological, and anthropic characteristics that favor the occurrence of debris flows in case of heavy rainfall. The anthropic factor is reflected as a potential risk factor due to the type of land use developed. Much of the communities urban area are settled either in El Salado riverbed or too close to fluvial terraces or even in alluvial fans. Chañaral province communities were affected by an event of this nature on March 24 and 25, 2015. These communities present a history of occurrences of debris flow events, which is the main reason to create this province a susceptibility map In 2015 human, economic and losses of other nature were extreme, leading to urgent identification of the most susceptible debris flow risk territories and in order to promote resilience and mitigation for those affected, in order to promote the mitigation and resilience of those affected. The objective of this study is to map areas susceptible to the occurrence of debris flows through the use of algebra maps in GIS. The susceptible areas were zoned by ranges and the most susceptible sectors were correlated with the sectors most affected by the 2015 debris flow event. The correlation demonstrated that the areas identified by mapping, using map algebra, overlap the areas affected by the debris flow event analyzed.

1. Introducci3n

Los flujos de detritos son procesos geomorfol3gicos comunes en las regiones de alto relieve (IVERSON, 1997; DE HAAS *et al.*, 2015). Son masas de tierra y rocas cargadas de agua con concentraciones volum3tricas de sedimentos que generalmente exceden el 40% del total de la masa transportada por el flujo (HUNGR y EVANS, 2001; HUNGR y EVANS, 2004; IVERSON, 2012; DE HAAS *et al.*, 2018). La deposici3n de sedimentos en flujos repetidos genera la formaci3n de abanicos aluviales, cuya forma semic3nica se obtiene por corte epis3dico del canal activo en un v3rtice fijo del abanico (BLACKWELDER, 1928; HOOKE, 1967; SCHUMM *et al.*, 1987; BLAIR y MCPHERSON, 1994; DE HAAS *et al.*, 2016)

La transformaci3n del canal activo en diferentes rutas de transporte provoca un pequeñu n3mero de sectores geomorfol3gicamente distintos en la superficie del abanico, los que presentan evidencia de flujo de detritos durante un per3odo de tiempo particular (DÜHNFOR-TH *et al.*, 2007; DE HAAS *et al.* 2014; SCHÜRCH *et al.*, 2016; DÜHNFOR-TH *et al.*, 2017). Los flujos de detritos que surgen del canal principal, generalmente, representan la mayor amenaza para los asentamientos y la infraestructura de los que habitan el 3rea de los abanicos aluviales, pues las medidas de mitigaci3n, como las represas y las cuencas de retenci3n, con frecuencia se aplican solo a los canales permanentemente activos y no a aquellos espor3dicos. (PEDERSON *et al.*, 2015; DE HAAS *et al.*, 2016b).

La continua ocupación humana en regiones montañosas ha aumentado considerablemente los efectos peligrosos de los flujos de detritos (PEDERSON *et al.*, 2015), ya que los abanicos formados por los depósitos de estos flujos son, habitualmente, los sitios preferidos para los asentamientos (CAVALLI y MARCHI, 2008). La dispersión del flujo de detritos en los abanicos puede devastar las poblaciones que habitan sobre estos sitios o cercanos a ellos (WIECZOREK *et al.*, 2001; DOWLING y SANTI, 2014; IVERSON, 2014). Además, el cambio climático puede aumentar el número y el volumen de los flujos de detritos y, por lo tanto, los riesgos, debido al aumento de eventos de precipitación extrema (JAKOB y FRIELE, 2010; STOFFEL *et al.*, 2014; DE HAAS *et al.*, 2015).

Por consiguiente, es primordial comprender los procesos que rigen la dinámica de los flujos de detritos, para identificar las zonas de susceptibilidad. Además, la evaluación de los elementos que componen el paisaje fundamenta el análisis de riesgo geomorfológico, que consecuentemente es esencial para el desarrollo de estrategias y medidas estructurales que contribuyan a la reducción del riesgo (KÖHLE, 2016).

En empleo de mapeo de riesgos y susceptibilidades de eventos geomorfológicos se ha convertido en una herramienta indispensables en la gestión territorial y en la prevención de desastres. Los métodos y técnicas aplicados para este tipo de mapeo son diversos, no obstante, el uso de técnicas de álgebra de mapas en SIG son ampliamente utilizados en Chile, principalmente en estudios morfodinámicos, tales como zonificación de movimientos en masa (BÄUERLE *et al.*, 2010; MARDONES y ROJAS, 2012; COFRÉ *et al.*, 2016).

La provincia de Chañaral fue drásticamente afectada por un flujo de detritos durante los días 24 y 25 de marzo de 2015, producto de fuertes precipitaciones. Este trabajo tiene como objetivo mapear las zonas susceptibles a asociado a tal flujo a través del uso de álgebra de mapas en SIG.

2. Flujos de Detritos en Chile

Chile es un país reconocido por los diversos eventos geológicos y geomorfológicos que intervienen en el paisaje, en conjunto con la interacción de otros eventos físicos. Según SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería – Chile, 2015) entre 1990 y 2015 ocurrieron 13 eventos extremos de flujos de detritos,

que generaron grandes pérdidas humanas y materiales. Las personas afectadas por pérdidas materiales por los eventos sumaron un total de 1.843.385; siendo 80 personas desaparecidas y 173 fallecidos.

Los flujos de detritos que ocurren en zonas climáticamente secas, en general, están asociados al intemperismo físico del deshielo o lluvias concentradas, este proceso contribuye con la desagregación de rocas, dando origen a sedimentos de granulometría gruesa. Además, a medida que los asentamientos humanos se expanden en las zonas áridas y semiáridas los flujos de detritos son cada vez más reconocidos como peligro potencial (WEBB *et al.*, 2013; GALLARDAY y MALCA, 2014; STOLLE *et al.*, 2015; ZHOU *et al.*, 2016).

En ese sentido, Vargas *et al.* (2000; 2006) realizó estudios sobre los flujos de detritos ocurridas en la región de Antofagasta, ubicada al norte de Chile, zona de características geomorfológicas de desierto. Y estableció una relación entre los eventos de flujos de detritos y las precipitaciones torrenciales ocurridas en períodos de El Niño. Concluyó que los eventos de flujos de detritos coinciden con los períodos de aumento de anomalías regionales de la temperatura del aire, como también con el aumento de las anomalías positivas de la temperatura superficial del mar, fenómenos que son previos al calentamiento estival de las aguas del Pacífico sureste que caracteriza a estos episodios. Sin embargo, los flujos de detritos pueden ocurrir en cualquier época del año desde que las áreas susceptibles a los flujos sean afectadas por precipitaciones torrenciales. Eventos extremos de precipitación se producen a partir de la acción de distintos tipos de sistemas atmosféricos (KARZULOVIC, 2015; HENRÍQUEZ, ASPEE y QUENSE, 2016).

3. Materiales y Métodos

3.1 Caracterización geológica y geomorfológica del área de estudio

La provincia de Chañaral se ubica al norte de la región de Atacama y posee una superficie de 24.436,2 km². La geología de la cuenca del río Salado incorpora gran cantidad de depósitos no consolidados donde se ubican las quebradas, así como formaciones rocosas de edades Paleozoicas a Cenozoicas. La litología, en general, está dividida entre rocas intrusivas y estratificadas (sedimentarias y volcanosedimentarias) (Figura 1). (CORNEJO *et al.*, 1998a; CORNEJO *et al.*, 1998b; GODOY y LARA, 2005).

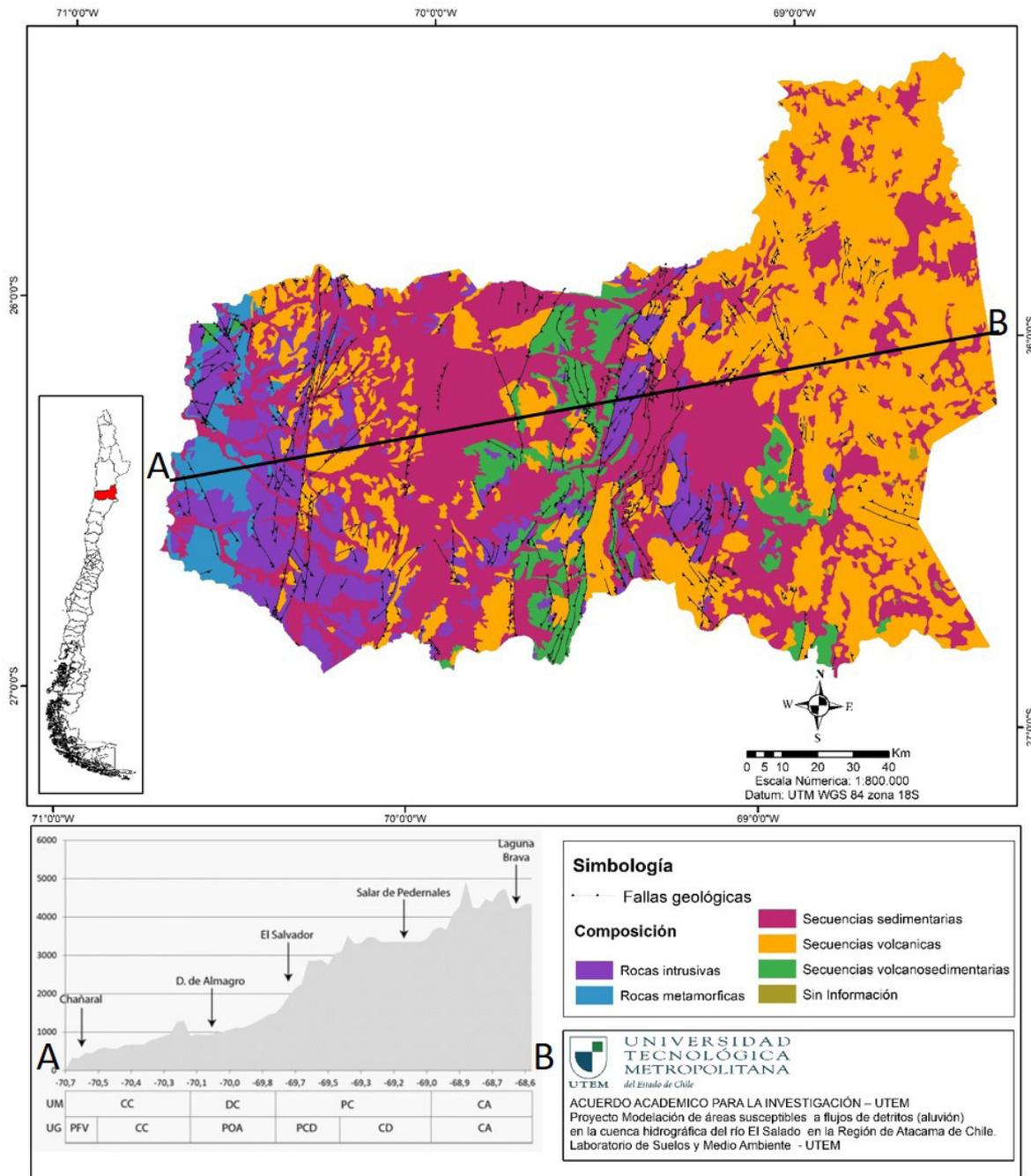


Figura 1 - Mapa litológico de la Provincia de Chañaral. Perfil de elevación en la Provincia de Chañaral (27°S). UM (unidades morfoestructurales): CC: Cordillera de la Costa; DC: Depresión Central; PC: Pre-Cordillera; CA: Cordillera de los Andes). UG (unidades geomorfológicas): PFV: Planicies Fluvio-Marinas; CC: Cordillera de la Costa; POA: Pampa Ondulada Austral; PCD: Pre-Cordillera de Domeyko; CD: Cordillera de Domeyko; CA: Cuencas Altiplánicas. Fuente: Base de datos geológicos de SERNAGEOMIN; Gómes, 2016.

A lo largo del río Salado, las fallas geológicas cruzan los canales del río, modelando los aspectos morfológicos de los valles de la zona. El sistema de fallas de Atacama se destaca en trazas norte sur y fallas secundarias de sentido

noreste (falla Cerro Salado) entre las comunas de Chañaral y Diego de Almagro, donde se observa un manto hacia el este de las formaciones del Jurásico (formación La Negra) y del Cretácico (Formación Llanta).

Entre las formaciones del cuaternario se destacan los depósitos eólicos y de playa de arenas finas; los depósitos coluviales de composición monomítica ubicado en las laderas de los cerros; los depósitos aluviales compuestos por gravas, arenas y limos de granulometría variada asociados a los flujos de detritos (GODOY *et al.*, 2011); y los depósitos salinos recientes del salar de Pedernales compuestos de limos y halitas (TOMLINSON *et al.*, 1999). Se incluyen también los depósitos antrópicos (Holoceno) asociados a depósitos de relave del yacimiento El Salvador (CORNEJO *et al.*, 1998b).

Las unidades geomorfológicas presentes son la Cordillera de la costa con la plataforma litoral, el Valle Longitudinal, la Precordillera, la Depresión de los salares y la Cordillera de los Andes. Además, por ubicarse en el sistema orogénico andino de tectónica activa, existen en la alta cordillera volcanes activos, del tipo estratovolcanes y grandes llanuras de material extrusivo (LORCA, 2016).

La altitud aumenta desde las Planicies Fluvioamarinas hacia la Cordillera de Domeyko, aumentando gradualmente hasta la Pampa Ondulada. La Cordillera de la Costa no suele superar los 1500 m, y la Cordillera de Domeyko alcanza los 3.000 m, donde los cauces de los ríos se orientan en dirección norte-sur, principalmente por influencia de las fallas (Figura 1). Los suelos predominantes de las zonas donde están los asentamientos humanos, comunas de Chañaral y Diego de Almagro, son los yermosoles cálcicos y los cambisoles óricos, respectivamente. En las proximidades del salar de Pedernales predominan los fluvisoles (GÓMES, 2016).

3.2 Aspectos meteorológicos del estudio de caso

En los días 24 y 25 de marzo de 2015 las comunas de Chañaral y Diego de Almagro, ambas ubicadas en la Provincia de Chañaral, fueron afectadas por la ocurrencia de un flujo de detritos (aluvión) del caudal del río Salado, causando impactos severos. Según datos del Ministerio de Justicia, fallecieron en esta ocasión 31 personas, 16 desaparecidas y 16.588 damnificados (ONEMI, 2015; SML, 2017). La selección de este evento de flujo de detritos para el estudio de caso se debe a que fue el más severo desde 1980.

Las causas meteorológicas relacionadas al flujo de detritos son inusuales, según el Diagnóstico preliminar *Adaptación ambiental y salud pública post aluvión:*

Chañaral y Atacama (CIGIDEN, 2015) se produce por una debilidad del anticiclón semipermanente del Pacífico Sur oriental, que habitualmente está presente en el norte de Chile. Tal debilidad favoreció el acceso de un sistema de baja presión desde el suroeste hacia el desierto de Atacama, lo que dio origen a un núcleo frío en altura. La entrada del aire húmedo desde el noroeste (producto de las anomalías en la temperatura del mar), desencadenó este evento de precipitaciones. Además, se observó la ocurrencia de precipitaciones líquidas en alturas donde normalmente ocurren precipitaciones nivales (Gómes, 2016; Bozkurt *et al.*, 2016). Esta condición se explica por la elevación en la isoterma 0°C, producto del aumento de las temperaturas, que también reduce la capacidad de almacenar nieve (Godoy *et al.*, 2011; Barret *et al.*, 2016).

Bozkurt (*op. cit.*) hace mención especial a la fuerte influencia que la Temperatura de la Superficie del Mar (TSM) posee en la formación del evento extremo de los días 24 y 25 de marzo. Este fue el evento de mayor extensión espacial ocurrido en el norte de Chile desde 1980, presentando valores extremos de total de vapor de agua y de estabilidad entre los niveles 900 y 500 hPa.

Según el informe realizado por SERNAGEOMIN (2015) con las características meteorológicas del evento, las precipitaciones se concentraron entre los días 24 y 25 de marzo, aumentando de intensidad durante el día 25. Durante el día 24 las precipitaciones fueron superiores a 50mm en 24 hrs, y se concentraron en la cabecera de la cuenca del río Salado. Por otra parte, durante el 25 las precipitaciones se expandieron sobre los sectores más elevados de la cuenca (Figura 2). La máxima pluviométrica registrada por las estaciones CODELCO fue 77,40 mm y por las estaciones DGA fue de 80 mm.

No obstante, es importante destacar que la zona de estudio presenta un histórico no menor de eventos extremos de precipitaciones. Algunos de los eventos registrados están asociados a los sistemas climáticos descritos anteriormente, pero también hay autores que asocian las fuertes precipitaciones a los fenómenos ENOS (QUEZADA, 2016; EASTON y CAURAPÁN, 2018). Y entre los eventos de máxima precipitación que produjeron flujos en la cuenca de Chañaral se destacan los ocurridos en: 18 de junio de 1991: 41,4 mm; 12 de junio de 1997: 148,7 mm; 24 y 25 de mayo de 2015: 80mm.

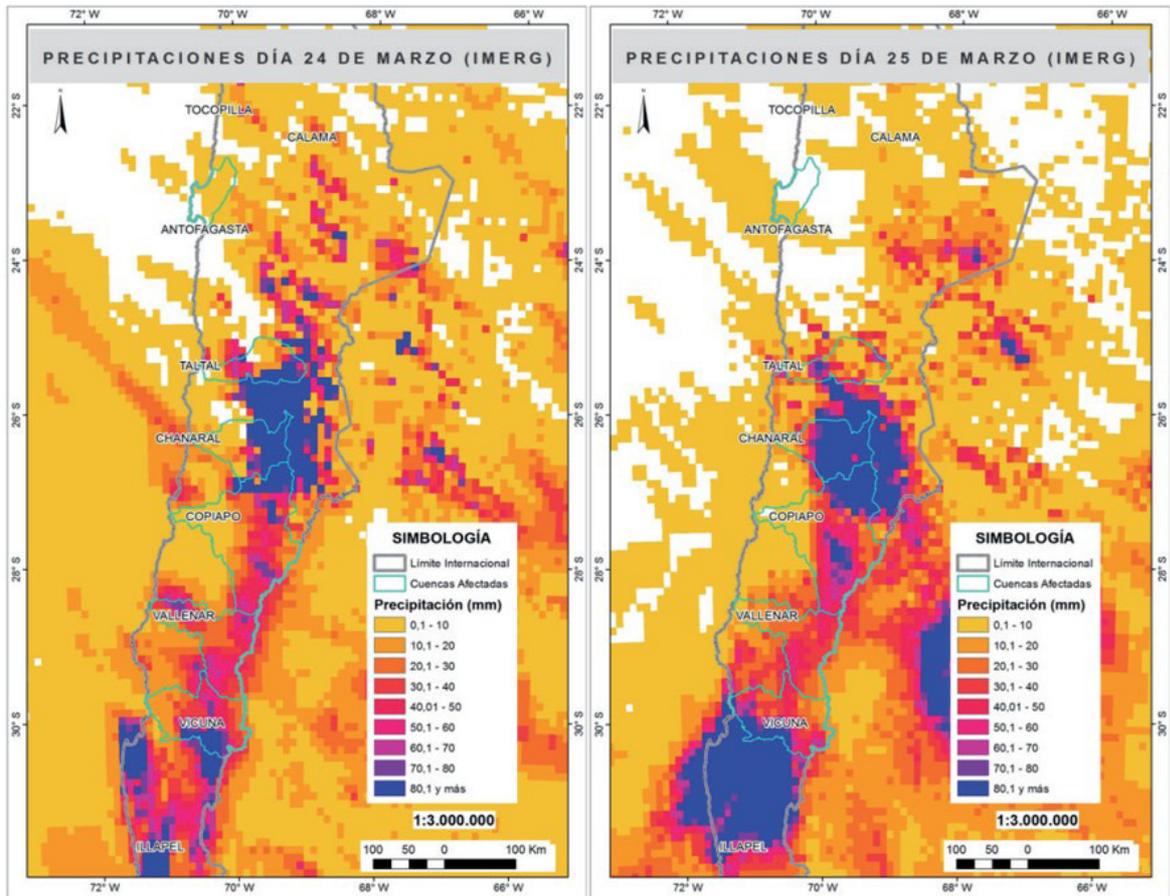


Figura 2 - Distribución espacial de las precipitaciones durante los días 24 y 25 de marzo de 2015. Fuente: Olea-Encinal y Tejada, 2015.

3.3 Procedimientos técnicos

La cartografía de amenazas, riesgos y susceptibilidades tienen como objetivo principal presentar el máximo de información relacionada a diferentes elementos que figuren como riesgo de una determinada área en un sólo mapa. Por lo tanto, mapear las zonas susceptibles al riesgo de movimientos de masa contribuye directamente a la planificación estratégica en favor de la mitigación de impactos generados por eventos naturales peligrosos. Así como también apoya la gestión de emergencia. Es por medio de la cartografía de riesgo que se puede cuantificar y representar la magnitud, frecuencia y área de impactos de los movimientos de masa (ZHANG y MATSUSHIMA, 2018).

La elaboración de la metodología aplicada en este estudio se sustentó en el álgebra de mapas, que es un conjunto de procedimientos técnicos que operan sobre una o varias capas en formato ráster, permitiendo obtener informaciones derivadas (ZAVALA-CRUZ et al, 2016; COFRÉ et al, 2016). Para realizar el álgebra de mapas entre las capas que representan las variables

ambientales se aplicó la función local, cuya expresión aritmética es:

$$Y = \sum_{i=1}^n Z_i K_i ; K_i \in \mathbb{N} \tag{1}$$

donde:

n= número de capas

Z_i= valor de la distancia entre las capas

K_i= kernel de la convolución

i= posición entre las capas

i_n= valor máximo de las capas

i₁= valor mínimo de las capas

Cada una de las capas representativas de las variables ambientales posee la misma resolución espacial (30x30m pixel) para que el resultado del álgebra de mapas sea representativo. Además, todas las capas se transformaron a formato ráster. La ejecución del pro-

cedimiento se hizo utilizando la *calculadora ráster* del programa Arcgis 10.4.

a. Selección de las variables ambientales

Las variables ambientales seleccionadas representan los factores determinantes del flujo de detritos. Estos factores se refieren al escenario previo al evento meteo-

rológico gatillante. Existe un conjunto de estos factores ambientales, que, en interacción combinada, permite determinar la posibilidad de ocurrencia de este tipo de flujo, como también, definir las zonas susceptibles y la magnitud asociada. En general, para las cuencas del norte árido y semiárido de Chile se atribuyen tres factores determinantes genéricos: condicionantes, gatillantes e intensificadores (HAUG *et al.*, 2010) (Figura 3).



Figura 3 - Descripción de los principales factores determinantes para ocurrencia del flujo de detritos. Fuente: Elaboración propia.

La elección de las variables para la elaboración del mapa de susceptibilidad residió en la influencia que cada una tiene en la formación y dinámica de los flujos de detritos. Las variables fueron seleccionadas tomando como referencia otras producciones científicas que las destacan como componentes importantes para la formación de los flujos. (NARANJO y VARELA, 1996; VAN, 1996; GEMMA, 2007; JAKOB e FRIELE, 2010; STOFFLE, 2010; DE HAAS *et al.*, 2017; SUWA, 2017). Los datos de algunas variables fueran obtenidos en bancos de datos del gobierno de Chile (Ministerio de Bienes Nacionales) y otros fueron generados por los autores. Dentro de las variables de destacan: 1. Red de drenaje; 2. Precipitación; 3. Pendientes; 4. Uso de suelo y 5. Unidades geomorfológicas.

1. La red de drenaje de la provincia fue generada a partir de la recolección de datos de una imagen SRTM de resolución reducida a 30x30 el pixel. Para este procedimiento fue utilizado el programa Arcgis 10.4. El archivo de la red de drenaje fue guardado en formato ráster. Se aplicó el método Strahler para jerarquizar y clasificar los canales de acuerdo con su capacidad de carga (STRAHLER, 1964; LEE y EVANGELISTA, 2008; CARDOZO, 2013).

2. Los datos de precipitación fueron descargados en formato ráster desde la página del Ministerio de Bienes Nacionales y, contienen la información del total precipitado durante el año de 2015, y la altitud de la cuenca. Ambos datos fueron cruzados con el objetivo de identificar las cuotas más elevadas donde hubo precipitaciones líquidas. El método de interpolación aplicado en el cruce de informaciones fue el KRIG (RICKENMANN, 1999; STOFFEL y BOLLSCHWEILER, 2008; Mayer, 2010).
3. La información de pendiente fue generada por los autores a partir del modelo digital de elevación (MDE), utilizando una imagen SRTM de resolución reducida a 30x30 el pixel. La capa de pendiente fue clasificada por medio del método propuesto por Demek (1972). Se eligió aplicar esta metodología en primero momento por ser la metodología de la Unión Geográfica Internacional, y también por considerar que es ampliamente aplicada en estudios de mapeos geomorfológicos y en estudios de zonificación de áreas susceptibles a dinámicas de movimientos en masa.
4. Para la obtención de los datos de uso de suelo se aplicó el método de clasificación por mínima

distancia de Mahalanobis en una imagen landsat 8 (resolución de 30x30 pixel) de día 05/03/2017 (REGOS *et al.*, 2012).

La información de las unidades geomorfológicas fue descargada de la página del Ministerio de Bienes Nacionales. La caracterización geomorfológica fue extraída de la capa sectorizada de las unidades geomorfológicas de la región de Atacama (KARZULOVIC, 2015).

b. Ponderación de las variables ambientales

Los flujos de detritos son muy comunes en las zonas de cordillera, principalmente en los valles. La red de drenaje en estas zonas se encuentra encajada en las quebradas y son las que producen el transporte de una gran cantidad de sedimentos durante la ocurrencia de fuertes precipitaciones. Para cuantificar y mapear la susceptibilidad de los flujos es fundamental identificar la pendiente del área de estudio, siendo esta una variable geomorfológica determinante en la zonificación de las áreas de máxima y mínima susceptibilidad (MAYER, 2010; SERNAGEOMIN, 2015).

El uso del suelo se conforma como otra variable muy importante en este estudio, una vez que se debe considerar que el área de estudio se ubica en una zona

desértica, donde la vegetación es escasa o inexistente, lo que contribuye directamente con la erosión hídrica/pluvial del suelo, y corrobora con el transporte potencial del material durante el flujo.

Se atribuyeron ponderaciones a cada una de las variables que contribuyen a la ocurrencia de los flujos de detritos. Estas ponderaciones son útiles en la aplicación del álgebra de mapas en la calculadora ráster, donde se atribuyen mayores valores a las variables que presentan mayor influencia en la formación de los flujos de detritos. Los pesos fueron atribuidos en base a estudios del Grupo de Estándares para Movimientos de Masa en zona Andina (GEMMA, 2007), que indican el potencial de influencia de cada variable ambiental en el desarrollo de flujos de detritos. El cálculo de la algebra de mapas se hizo en base a estos valores. Donde se reclasificó cada variable en tres clases que destacara los sectores, según sus características físicas, de menor, mediana y mayor susceptibilidad de ocurrencia de los flujos.

Teniendo en cuenta las especificidades de cada variable, se realizó una reclasificación de estas para que todas tuvieran igual cantidad de clases. Posterior a esto, se convirtieron a formato ráster, para que se pudiera realizar el álgebra de mapas utilizando la calculadora de dicho formato (Cuadro 1).

Cuadro 1: Ponderaciones de variables en porcentaje. Donde los colores (verde/menor, amarillo/medio y rojo/alt) indican el grado de susceptibilidad.

Variabes	peso	Clases
Red de drenaje	0,3	orden 7
		orden 8
		orden 9
Precipitación	0,2	0-50mm
		50-100mm
		100-150mm
Pendiente	0,2	0-25%
		25-50%
		50-100%
Uso de suelo	0,2	cuerpos de agua, nieve, hielo
		cobertura con vegetación
		cobertura sin vegetación
Unidades geomorfológicas	0,1	cordilleras/farelon/precordillera
		pampas/pediplanos
		planicies/lanos

Fuente: GEMMA, 2007. Adaptado por autores

Las variables ambientales fueron ponderadas de acuerdo con el factor de influencia determinado por el Grupo de Estándares para Movimientos de Masa (GEMMA, 2007) en la propuesta de metodología de análisis de zonas de ocurrencias de flujos de detritos. Siendo la ecuación aplicada en la calculadora ráster:

$$FD = Rd*0.3 + Pr*0.2 + G*0.1 + Pe*0.2 + Us*0.2 \quad (2)$$

donde:

FD = flujo de detritos

Rd = Red de drenaje

Pr = Precipitación

G = Unidades geomorfológicas

Pe = Pendiente

Us = Uso de suelo

Las variables que representan los factores condicionantes poseen mayor ponderación por ser los factores que van a determinar la susceptibilidad del paisaje a la ocurrencia de los flujos de detritos o no. La hidrología en zona andina posee una fuerte influencia en el desarrollo y magnitud de tales eventos por tener los canales de drenaje encauzados en las quebradas de alta pendiente, lo que hace con que los flujos en estas zonas sean más potentes ya que el factor de inclinación contribuye con el aumento de la velocidad del transporte del material erosionado. Por esta razón a esta variable se le atribuye el peso máximo. Las variables de pendiente y uso de suelo poseen el mismo valor de ponderación, por ser variables condicionantes secundarias. La precipitación es la variable que en este estudio gatilla la ocurrencia del flujo, y por tal importancia, a esta se le atribuyo peso igual a las variables condicionantes secundarias. La variable de unidades geomorfológicas se considera de menor influencia, no menor importancia, no obstante, se observa que los flujos se originan en las distintas unidades geomorfológicas de la zona, desde que posean canales hídricos encajados. Las demás variables tendrán ponderación estándar, que sumando todas dará el total de 1.

4. Resultados y Discusiones

4.1 Análisis de las variables ambientales

Según los resultados obtenidos por medio del análisis de cada una de las variables ambientales,

la geomorfología de la provincia –que en el mapeo está representada por las capas de las macro unidades geomorfológicas y la pendiente– se destaca por presentar cambios de pendiente en toda la provincia de Chañaral. Existen cambios abruptos de pendiente en el paso de la Precordillera a Depresión Central, indicando una variación altimétrica de 1.800 m en sólo 40 km, donde también se encuentran valles incisos (Figuras 4a y 4c).

La jerarquización de los canales del río Salado y de sus principales afluentes presentó canales de orden 7, 8 y 9. Se observó que los tributarios van uniéndose al río Salado, principalmente en la zona de la cordillera Domeyko, antes del salar de Pedernales, donde los caudales de séptima y octava orden (dirección norte-sur) se unen al caudal principal del río con dirección este-oeste. Así encausan a todos los tributarios en un solo canal al llegar a la comuna de Chañaral (Figura 4d).

También se observó que la cuenca hidrográfica del río Salado desemboca en una única quebrada en la bahía de Chañaral, donde el material detrítico y sedimentario transportado de las zonas más elevadas de la provincia, es encauzado a un solo canal. Entonces, el canal principal recibe aporte de todos los afluentes y, el transporte finaliza en la comuna de Chañaral, lo que hace más intenso los flujos de detritos en la zona.

Respecto a las precipitaciones se observó que estas se presentan concentradas en las áreas más elevadas de la provincia, lo que genera el transporte de sedimentos desde la Cordillera de los Andes hasta la depresión central y las terrazas marinas. Las precipitaciones líquidas sobre la isohieta 0 son caracterizadas como el tipo de precipitación gatillante de flujos de detritos (Figura 4e). Además, se comprobó la ausencia de vegetación en las zonas de mayor altitud y precipitación lo que contribuye directamente con el impacto del agua sobre el suelo, facilitando el transporte de detritos y sedimentos (Figura 4b).

Posterior a los análisis de cada uno de los resultados observados en las capas, todas ellas fueron reclasificadas antes del procedimiento del álgebra de mapas, con el fin de que fueran compatibles en escala espacial y cantidad de clases.

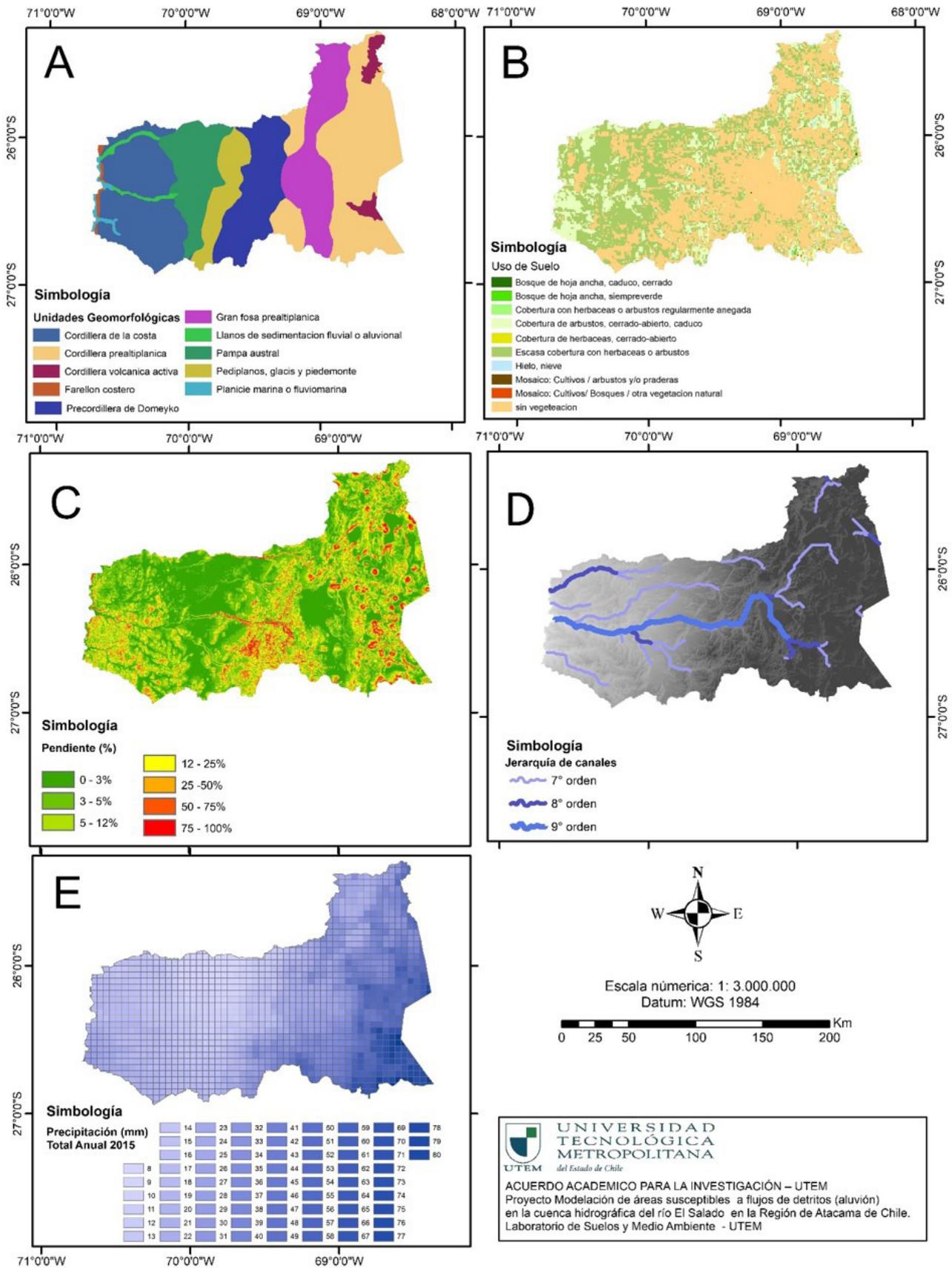


Figura 4 - Capas de las variables en formato ráster. Fuente: Elaboración propia.

4.2 Mapa de susceptibilidad de flujos de detritos

El resultado final del análisis de la susceptibilidad a flujos de detritos representa el conjunto de las variables ambientales, donde fue posible observar la influencia de variables específicas como factor determinante para la ocurrencia de los flujos, tales como la pendiente y la red de drenaje. El mapeo fue ajustado para demostrar

especialmente las áreas donde los flujos de detritos presentan mayor susceptibilidad de ocurrencia, y consecuentemente alto impacto. La aplicación de la calculadora ráster permitió identificar, por medio de la suma de las variables seleccionadas, las áreas que representan mayor y menor susceptibilidad frente a la acción de un flujo de detritos (Figura 5). Fuente: Elaboración propia.

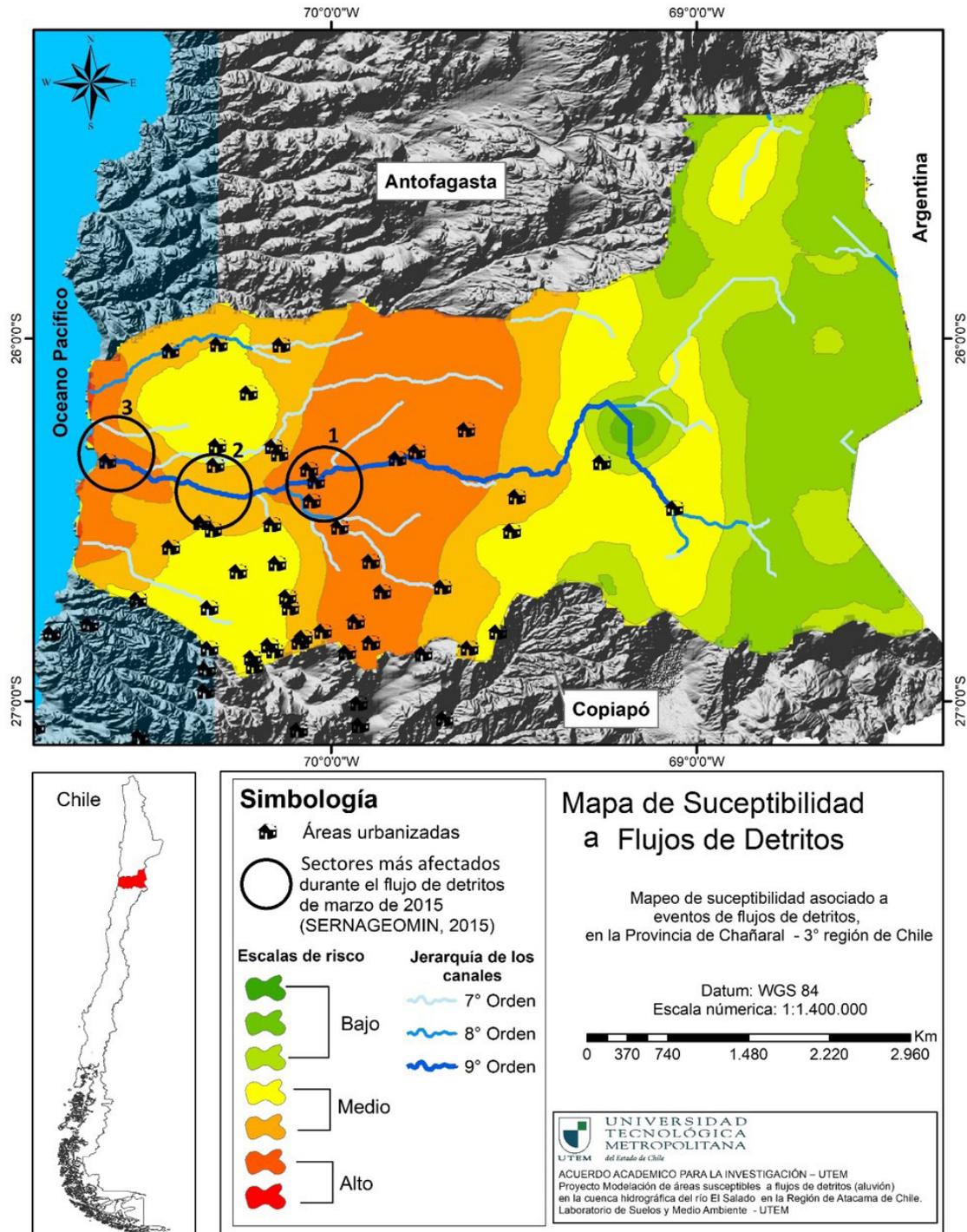


Figura 5 - Mapa de susceptibilidad de flujo de detritos para la provincia de Chañaral.

Las áreas cercanas a los canales principales y de mayor pendiente son las que representan mayor susceptibilidad. Y estas mismas son las que se encuentran ocupadas por viviendas, potencializando así la exposición de las personas al riesgo. La fuerza del flujo de detritos proviene de los cambios de pendiente entre la Precordillera y la Depresión central, ya que el arrastre de detritos y sedimentos empieza en las alturas más elevadas, continúa descendiendo en dirección al cauce del río Salado, para finalmente llegar a la planicie litoral provocando inundación y generando los depósitos del aluvión.

Parte del sector urbano de las comunas de Chañaral y Diego de Almagro están ubicadas en las zonas más afectadas por los flujos de detritos. Además, las comunas no cuentan con piscinas de decantación ni tampoco con barreras fluviales en el río Salado, lo que deja aún más expuesta a la población a los impactos generados por los flujos. Según los resultados del mapeo, casi 100% de las viviendas de la comuna de Chañaral, y un 80% de las viviendas de la comuna de Diego de Almagro se encuentran en zona de riesgo moderado o alto. Esto se refleja en los impactos observados en el último evento de flujo ocurrido en los días 24 y 25 de marzo de 2015.

Los tres círculos en negros dispuestos en el mapa representan los sectores más afectados. En dichos sectores el Ministerio de Vivienda y Urbanismo realizó el catastro de las viviendas que presentaron daños reparables y no reparables, y/o estructuras dañadas. (INF – ATACAMA 02 - 30/03/2015).

Comparando los resultados del mapeo con las observaciones de los informes [INF – ATACAMA 02 (30/03/2015) e INF- ATACAMA 03 (31/03/2015)] fue posible concluir que los puntos críticos definidos por el informe coinciden con las áreas de mayor susceptibilidad. El círculo 1 destaca el sector más dañado de la comuna de Diego de Almagro, donde se registraron dos flujos, el primero a las 06h y el segundo a las 23h, del mismo día 25/03/2015.

Se evidencia que los flujos desbordaron la canalización de la quebrada del Salado, ocupando el valle aluvial de la quebrada, causando destrucción en un 80% de los inmuebles ubicados en la llanura de inundación de la quebrada. En el círculo 2 está ubicada la localidad de El Salado (Comuna de Chañaral), donde hubo severos daños a estructuras viales, pues las mismas fueron construidas sobre el cauce del río Salado.

Los flujos sobrepasaron la ruta principal, provocando socavamientos. El círculo 3 se encuentra en la comuna de Chañaral, allí los flujos de detritos se encauzaron por la quebrada ocupando todo el ancho de esta. Se observó una nueva configuración del curso de agua post-flujo y formación de nuevos depósitos aluviales que en algunos puntos superan 5m.

Parte de la construcción urbana de las comunas de Chañaral y Diego de Almagro está sobre el cauce del río Salado, lo que representó uno de los factores que intensificaron el desborde del río y el colapso en las zonas urbanas. Otra característica de la arquitectura urbana de las comunas que contribuyó con la exposición al riesgo fue la orientación de las calles (norte – sur), siendo las calles principales poco anchas y otras perpendiculares, que durante el momento del evento actuaron como pequeños nuevos cauces del río, favoreciendo la inundación y el depósito de sedimentos en puntos críticos de las comunas.

El resultado del mapeo de riesgo de flujos de detritos demuestra que los aspectos físicos del paisaje, representadas por las variables ambientales que componen este mapeo, generan zonas de alto susceptibilidad que no pueden ser ocupadas por construcciones urbanas.

Conclusiones

Se observó que el método planteado cumple con el objetivo y con el tipo de mapeo propuesto. No obstante, es importante destacar que este método es adecuado solamente para la escala regional, ya que para aplicarlo a escalas menores es necesario tener capas con resoluciones menores y más detalladas. La técnica de mapeo por medio del álgebra puede ser aplicada a distintos tipos de escalas, así como también se puede adoptar por otras variables ambientales de acuerdo con los tipos de áreas de estudio y eventos naturales que serán analizados.

También se concluyó que las áreas que presentaron susceptibilidad moderada y alta fueron las más afectadas por el flujo de detritos ocurrido en marzo de 2015. Y estas áreas coinciden con las zonas de mayor densidad urbana. La presencia de las viviendas en zonas de susceptibilidad moderada y alta potencializa el riesgo y la exposición de las personas al impacto.

El mapeo de susceptibilidades de eventos geomorfológicos dinámicos tiene una función fundamental en la gestión del riesgo. Este estudio contribuye como

referente científico-metodológico en la construcción de elementos que corroborarán con la planificación territorial y la gestión del riesgo en la Provincia de Chañaral.

Agradecimientos

A la Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM) de Chile por el apoyo y financiamiento por medio del Acuerdo Académico para la investigación del proyecto “Modelación de áreas susceptibles a flujos de detritos (aluvión) en la cuenca hidrográfica del río Salado en la región de Atacama de Chile”. Se agradece también al Laboratorio de Suelos y Medio Ambiente, dependiente del Departamento de Industria, Facultad de Ingeniería de la UTEM, por el apoyo en la ejecución del proyecto.

Referencias

- BARRET, S. B.; CAMPOS, D. A.; VELOSO, V. J.; RONDANELLI, R. Extreme temperature and precipitation events in March 2015 in central and northern Chile. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, p.3405-3420. 2016.
- BÄUERLE, M. V. S.; MÄRKER, M.; GONZÁLEZ, J. A.; CORREA, C. P. C.; RODOLFI, G. 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**, v. 42, p. 19-36. 2010.
- BLACKWELDER, E. Mudflow as a geologic agent in semiarid mountains. **Geol. Soc. Am. Bull.**, p.465-484. 1928.
- BLAIR, T. C.; MCPHERSON, J. C. Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages. **Sediment. Res.**, p.450-489. 1994.
- BOZKURT, D.; RONDANELLI, R.; GARREAUD, R.; ARRIAGADA, A. Impact of warmer eastern tropical Pacific SST on the March 2015 Atacama floods. **American Meteorological Society**, p.4441-4460. 2016.
- CARDOZO, C. **Zonación de susceptibilidad por procesos de movimientos en masa en la cuenca del río Tartagal Salta (Argentina) - Tese de Magister en Aplicaciones Apicales de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias**. Córdoba, Argentina: Facultad de Matemática, Astronomía y Física, 2013.
- CAVALLI, M.; MARCHI, L. Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, p.232-333. 2008.
- CIGIDEN. **Dianóstico preliminar: Adaptación ambiental y salud pública post aluvión: Chañaral y Atacama**. Coquimbo: Universidad Católica de Norte, 2015.
- COFRÉ, I.; CORREA, C.; SOTO, M.; RAULD, R. Geomorfología aplicada a la evaluación de amenazas de origen natural en la zona sur de la comuna de Pichilemu, Región de O'Higgins, Chile. **Investigaciones Geográficas**, p.61-80. 2016.
- CORNEJO, P.; MPODOZIS, C.; TOMLINSON, A. J. **Hoja Salar de Maricunga, Región de Atacama, Chile. Esc.1:100.000**. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, 1998^a
- CORNEJO, P.; RIQUELME, R.; MPODOZIS, A. J. **Mapa Geológico de la Hoja Salvador, Región de Atacama, Chile. Esc 1:100.000. Color**. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, 1998b.
- DE HAAS, T.; VAN WOERKOM, T. Bed scour by debris flows: experimental investigation of effects of debris flows composition. **Earth Surf. Process. Landf.**, p.1951-1966. 2016a.
- DE HAAS, T.; BERG, W.; BRAAT, L.; KLEINHANS, M. G. Autogenic avulsion, channelization and backfilling dynamic of debris-flow fans. **Sedimentology**, p.1596-1619. 2016b.
- DE HAAS, T.; BRAAT, L.; LEUVEN, J. F.; LOKHORST, T. R.; KLEINHANS, M. G. Effects of debris-flows composition and topography on runout distance, depositional mechanisms and deposit morphology. **J. Geophys. Res. Earth Surf.**, p.1949-1972. 2015.
- DE HAAS, T.; CARVONNEAU, P. E.; KLEINHANS, M. G. Debris-flow dominance of alluvial fans masked by runoff reworking and weathering. **Geomorphology**, p.165-181. 2014.
- DE HAAS, T.; DENSMORE, A. L.; STOFFEL, M.; SUWA, H.; IMAIZUMI, F.; BALLESTEROS-CÁNOVAS, J. A. Avulsions and the spatio-temporal evolution of debris-flow fans. **Earth-Science Reviews**, p.53-75. 2017.
- DE HAAS, T.; DENSMORE, A. L.; STOFFEL, M.; SUWA, H.; IMAIZUMI, F.; BALLESTEROS-CÁNOVAS, J. A. Avulsions and spatio-temporal evolution of debris-flows fans. **Earth-Science Reviews**, p.53-75. 2018.
- DEMEK, J. **Manual of Detailed Geomorphological Mapping**. Prague: Academia Prague, 1972.
- DOWLING, C. A.; SANTI, P. M. Debris flows and their toll on human life: a global analysis debris flows fatalities from 1950 to 2011. **Nat. Hazards**, p.203-227. 2014.
- DÜHNFORTH, M.; DENSMORE, L. A.; IVY-OCHS, S.;

- ALLEN, P. A.; KUBIK, P. W. Timing and patterns of debris flow deposition on shepherd and symmes creek fans, Owens Valley, California, deduced from Cosmogenic ¹⁰Be. **J. Geophys. Res. Earth Surf.**, p.2003-2012. 2007.
- DÜHNFORTH, M.; DENSMORE, L. A.; IVY-OCHS, S.; ALLEN, P. A.; KUBIK, P. W. Early to late Pleistocene history of debris flow fan evolution in western Death Valley (California) using cosmogenic ¹⁰Be. **Geomorphology**, 2017, p.53-65.
- EASTON, Gabriel Vargas; CAURAPÁN, Cristina Ortega. El aluvión de marzo de 2015, El Niño y los mayores episodios históricos en Chañaral de las Ánimas, Atacama. **ALUVIONES y RESILIENCIA en ATACAMA**, p. 35. 2018. ISBN Digital: 978-956-19-1115-4
- GALLARDAY, T.; MALCA, N. Flujos de detritos y dispersores de energía en la torrentera Juan Carossio Chosica - Lima. **Revista del Instituto de Investigación (RIIGEO) FIGMMG - UNMSM**, p.39-44. 2014.
- GEMMA, P. M. **Movimientos de Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas**. Canada: Publicación Geológica Multinacional, 2007.
- GODOY, A. A.; CAMPETELLA, C. M.; POSSIA, N. E. Un caso de Baja Segregada en los niveles altos en el sur de sudamérica: Descripción del ciclo de vida y su relación con la precipitación. **Revista Brasileira de Meteorologia**, p.491-502. 2011.
- GODOY, E.; LARA, L. **Hoja El Salvador Occidental Región de Atacama. Chile. Esc 1:250.000**. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, 2005.
- GOMÉZ, V. **Geología y análisis histórico - meteorológico del aluvión de marzo de 2015 en Chañaral, Atacama**. Santiago de Chile: Memoria para optar al título de Geólogo - Universidad de Chile, 2016.
- HAUG, E. W.; KRAAL, E. R.; SEWALL, J. O.; DIJK, M. V.; DIAS, G. C. Climatic and geomorphic interactions on alluvial fans in the Atacama Desert, Chile. **Geomorphology**, p.184-196. 2010.
- HENRÍQUEZ, C.; ASPEE, N.; QUENSE, J. Zonas de catástrofe por eventos hidrometeorológicos en Chile y aportes para un índice de riesgo climático. **Revista de Geografía Norte Grande**, p.27-44. 2016.
- HOOKE, R. L. Processes on arid-region alluvial fans. **J. Geol.**, p.438-460. 1967.
- HUNGR, O.; EVANS, S. Entrainment of debris in rock avalanches: an analysis of a long run-out mechanism. **Geological Society of American Bulletin**, p.1240-1252. 2004.
- HUNGR, O.; EVANS, S.; BOVIS, M.; HUTCHINSON, J. Review of the classification of landslides of the flow type. **Environmental and Engineering Geoscience**, p.22-238. 2001,
- IVERSON, R. M. The physics of debris flows. **Rev. Geophys.**, p.245-296. 1997.
- IVERSON, R. M. Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches. **J. Geophys Res. Earth Surf.**, p.117. 2012.
- IVERSON, R. M. Debris flows: behaviours and hazard assessment. **Geol. Today**, p.15-20. 2014.
- JAKOB, M.; FRIELE, P. Frequency and magnitude of debris flows on Cheekye River, British Columbia. **Geomorphology**, p.382-395. 2010.
- KARZULOVIC KOKOT, J. **Informe hidrológico de la región de Chañaral**. Santiago : CIREN, 2015.
- KÖHLE, M. P. Vulnerability curves vs. vulnerability indicators: application of indicator-based methodology for debris-flow hazards. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, p.1771-1790. 2016.
- LEE, S.; EVANGELISTA, D. **Landslide susceptibility mapping using probability and statistics models in Baguio City**. Korea: Institute of Geoscience and Mineral Resources Philippines Geoscience Information Center, 2008.
- LORCA, M. Proyecciones del legado minero-industrial en la Provincia de Chañaral, región de Atacama, Chile. **Diálogo Andino**, p.45-56. 2016.
- MARDONES, F. M.; ROJAS, H. J. Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile. **Revista de geografía Norte Grande**, v. 53, p. 57-74. 2012.
- MAYER, B.; STOFFEL, M.; BOLLSCHWEILER, M.; HÜBL, J.; RUDOLF-MIKLAU, F. Frequency and spread of debris foodson fans: a dendrogeomorphic case study from a dolomite catchment in the Austrian Alps. **Geomorphology**, p.199-206. 2010.
- NARANJO, J. S.; VARELA, J. B. **Debris enad mud flows which affects the eastern sector of Santiago, 3 May 1993**. Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, 1996.
- OLEA, P.; QUEVEDO, D. Distribución espacio-temporal de la precipitación durante el evento meteorológico del 24 a 26 de marzo de 2015 y sus efectos sobre la generación de flujos aluviales. En **Congreso Geológico Chileno**. p. 789 - 792. 2015.

- ORTIZ, M.; FALCÓN, M. F.; MERINO, R.; COLOMA, F. **INF - Atacama - 02 - Efectos Geológicos Del Evento Meteorológico del 24 y 25 De Marzo De 2015**. Santiago : Servicio Nacional de Geología y Minería, 2015.
- ORTIZ, M.; FALCÓN, M. F.; MERINO, R.; COLOMA, F. **INF - Atacama - 03 - Efectos Geológicos Del Evento Meteorológico Del 24 Y 25 De Marzo 2015**. Santiago : Servicio Nacional de Geología y Minería, 2015.
- PEDERSON, C. A.; SANTI, P. M.; PYLES, D. R. Relating the compositional stacking of debris flow fans to characteristics of their underlying stratigraphy: implications for geologic hazard assessment mitigation. **Geomorphology**, p.47-56. 2015.
- QUEZADA, J. Fenómenos climáticos anómalos en el litoral del Norte de Chile y su impacto en el relieve. En **Congreso Geológico Chileno**. p. 133-136. 2006.
- REGOS, A.; NINYEROLA, M.; MORÉ, G.; PONS, X. Evaluación de las dinámicas temporales de cubiertas y usos del suelo mediante comparación post-clasificación e índices de área relativa. **XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica**, p.19-21. Madrid: AGE - CSIC. 2012.
- RICKENMANN, D. Empirical relationships for debris flows. **Natural hazards and earth system sciences**, p.47-77. 1999.
- SCHUMM, S.; MOSLEY, M.; WEAVER, W. **Experimental Fluvial Geomorphology**. New York: John Wiley and Sons, 1987.
- SCHÜRCH, P.; DENSMORE, A. L.; IVY-OCHS, S.; ROSSER, N. J.; KOBER, F.; SCHLUNEGGER, F.; ALFIMOV, V. Quantitative reconstruction of late Holocene surface evolution on an Alpine debris-flow fan. **Geomorphology**, p.46-57. 2016.
- SERNAGEOMIN. **Informe Efecto geológico del evento meteorológico del 24 y 25 de marzo de 2015 en la Región de Atacama**. Santiago : Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, 2015.
- SML. **Servicio Medico Legal**. Obtenido de Servicio Medico Legal: <http://www.sml.gob.cl/> en 10 de abril de 2017.
- STRAHLER, A. **Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks in Chot**. New York: Handbook of applied hydrology, 1964.
- STOFFEL, M. Magnitude-frequency relationship of debrisflows a case study based on field surveys and tree-ring records. **Geomorphology**, p.67-76. 2010.
- STOFFEL, M.; BOLLSCHWEILER, M. Tree-ring analysis in natural hazards research-an overview. **Natural hazards and earth system sciences**, 2008, p.187-202.
- STOFFEL, M.; MENDELIK, T.; SCHENUWLY-BOLLSHWEILER, M.; GOBIET, A. Possible impacts of climate change on debris-flow activity in the Swiss Alps. **Clim. Change**, p.141-155. 2014.
- STOLLE, A.; LANGER, M.; BLÖTHER, J.; KOORUP, O. On predicting debris flows in arid mountain belts. **Glob. Planet. Chang**, p.1-13. 2015.
- SUWA, H. Pulsation in debris flows and its mechanism. **J. Erosion Control Eng.**, p.16-23. 2017.
- TOMLINSON, A. J.; NORNEJO, P.; MPODOZIS, C. **Hoja Potrerillos, Región de Atacama. Chile. Esc 1:100.000**. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, 1999.
- VAN STEJIN, H. Debris-flow magnitude-frequency relationship for mountainous regions of Central and Northwest Europe. **Geomorphology**, p.259-273. 1996.
- VARGAS, G.; ORTLIEB, L.; RUTTLANT, J. Aluviones Históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. **Revista Geológica de Chile**, p.155-174. 2000.
- VARGAS, G.; RUTTLANT, J.; ORTLIEB, L. ENSO tropical-extratropical climate teleconnections and mechanisms for Holocene debris flows along the hyperarid coast of western South America (17° - 24°S). **Earth and Planetary Science Letters**, p.155-174. 2006.
- WEBB, R.; LEAKE, S.; MALLOY, R. Geologic, Hydrologic, and urban hazards for design in desert environments. En J. Brock, & R. Malloy, **Design with the Desert: Conservation and sustainable development**, p.91-118. CRC Press. 2013.
- WIECZOREK, G. F.; LARSEN, M.; EATON, L.; MORGAN, B.; BLAIR, J. Debris-flow and flooding hazards associated with the December 1999 storm in Coastal Venezuela and strategies for migration. **Tech. Rep. U.S. Geological Survey**, p.01-44. 2001.
- ZAVALA-CRUZ, J.; MORALES-GARDUZA, M.; VARGAS-VILLAMIL, L.; PALMA-LOPEZ, D.; ORTIZ-SOLORIO, C. Capacidad de uso de suelo urbano en planicie fluvial costera: el caso de Villahermosa, Tabasco, México. **Interciencia**, p.296-310. 2016.
- ZHANG, N.; MATSUSHIMA, T. Numerical investigation of debris materials prior to debris flow hazards using satellite images. **Geomorphology**, p.54-63. 2018.
- ZHOU, H.; WANG, X.; YUAN, Y.; WANG, D.; XU, Y.; PAN, J.; KIERATH, S. Adapting against disasters in a changing climate. En R. Nadin, S. Opitz-Stapleton, & Y. Xu, **Climate risk and resilience in China**, p.63-94. New York: Routledge. 2016.