

UMBRALES DE PRECIPITACIÓN Y SU RELACIÓN GEOLÓGICA EN EL DESENCADENAMIENTO DE REMOCIONES EN MASA EN COMUNAS DE LA PROVINCIA DE CONCEPCIÓN, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE

G. Maldonado Vargas¹, R. W. King² y D. Caamaño Avendaño³

RESUMEN:

La Provincia de Concepción posee un clima mediterráneo en el que los periodos de lluvia se extienden por 7 meses. Los caminos y sectores urbanos de las comunas, se ven anualmente expuestos a una cantidad recurrente de remociones en masa. Las consecuencias de estos eventos perturban la rutina de los habitantes de la ciudad y producen anualmente daños materiales, damnificados y víctimas fatales.

A partir de una base de datos de deslizamiento se calcularon umbrales de precipitación considerando la lluvia acumulada el día del evento y también los milímetros acumulados en los días anteriores al día de los deslizamientos. Se intentó determinar un umbral específico para agrupaciones de datos según orientación, pendiente y tipo de roca de los taludes.

Se logró obtener curvas umbral (críticas) para los días 1,2,3 y 4 de precipitación antecedentes. También se sometió a prueba el umbral mediante una base de datos secundaria, la cual arrojó resultados positivos, validando los umbrales. No fue posible obtener umbrales específicos para los grupos de datos (orientación, pendiente y tipo de roca de los taludes).

Se logró identificar que el mayor porcentaje de los deslizamientos se concentra en eventos bajo los 40 mm, correspondiendo a los puntos repetitivos del registro. Se recomienda enfocar futuros estudios de vulnerabilidad a estos eventos de menor escala, pero que son de carácter reiterativo.

PALABRAS CLAVES: umbral, precipitaciones, remociones en masa.

ABSTRACT:

The Province of Concepción has a mediterranean climate with a rainy period that extends for 7 months. The urban sectors and roads of the communities are annually exposed to a recurring amounts of mass movements. The consequences of these events disturb the routine of the inhabitants of the city and produces property damage, victims and fatalities. From a database of landslides, precipitation thresholds were calculated considering the accumulated rainfall on the day of the event and also the millimeters accumulated in the days preceding the day of the landslides. An attempt was made to determine a specific threshold for data groupings according to the slope orientation, angle and rock type.

It was possible to obtain threshold curves for 1, 2, 3 and 4 days of prior precipitation. The threshold was also tested using a secondary database, which yielded positive results, validating the thresholds. It was not possible to obtain specific thresholds for the data groups (slope orientation, angle and rock type).

It was possible to identify that the highest percentage of landslides is concentrated in events under 40 mm, corresponding to the repetitive points of the record. It is recommended to focus future vulnerability studies on these smaller-scale events but are repetitive in nature.

KEYWORDS: threshold, rainfall, mass movements.

¹ Gabriela Maldonado, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, gmaldonado@ing.ucsc.cl

² Robert King, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl

³ Diego Caamaño, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dcaamano@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos o procesos de remoción en masa (PRM) corresponden a movimientos de roca, tierra y escombros pendiente abajo debido a la fuerza de la gravedad (Cruden, 1991). El daño que los deslizamientos pueden causar depende mucho de la velocidad del movimiento, de la ubicación y de la proximidad de ocurrencia a la población y a los emplazamientos urbanos (Di Martire *et al.* 2012). Los múltiples factores que influyen en el desencadenamiento de un deslizamiento, así como la gran variabilidad de cada uno de estos corresponde a unos de las mayores problemáticas al momento de estudiar éste tipo de evento (CHC, 2014; Highland *et al.* 2008).

A nivel mundial, los costos económicos y de vidas alcanzan altos valores. Según el informe del World Meteorological Organization (2014), durante el período de 1970 al 2012 se registran 544,92 eventos corresponden a remociones en masa, con 43.687 víctimas fatales y una pérdida económica de US\$31 billones de dólares (WMO, 2014). En la Provincia de Concepción, región del Bío Bío, el escenario se repite en menor escala con víctimas fatales, damnificados, el potencial riesgo de la población, las pérdidas económicas y la interrupción de la rutina de los habitantes de las distintas comunas como consecuencias directas e indirectas de estos sucesos.

El agua es el factor más común asociado a fallas de taludes. La relación agua-PRM ha sido estudiada por varios autores debido a que la mayoría de los deslizamientos ocurren después de eventos de lluvias fuertes o durante períodos lluviosos (Cruden, 2004).

La caída de las precipitaciones sobre el terreno, produce un aumento en las presiones intersticiales, un aumento en el peso debido al aporte del agua, además de un efecto erosivo en la capa de suelo (González *et al.* 2002). Esto se traduce en una disminución de la resistencia del suelo pudiendo generar deslizamientos.

El establecimiento de un umbral desencadenante de procesos de remoción en masa tiene como fin el acercar una predicción de los eventos de éste tipo y generar protocolos de emergencia, mapas de riesgos, y sistemas de alerta que permitan disminuir las pérdidas materiales, económicas y humanas.

Mardones *et al.* (2006) analiza los eventos de remoción en masa asociados a las lluvias del año 2005 en la Provincia de Concepción, donde se analizaron lluvias de hasta 24 horas de duración entre los años 1971-1999. Los daños fueron ocasionados por una lluvia de 158 mm en 20 horas, donde se constata que, para valores sobre 150 mm en 24 horas, se producen eventos de una mayor magnitud de daños (graves) y sobre los 100 mm se producen deslizamientos (umbral). Para valores menores a éste umbral los eventos son debidos a la acumulación 3 días consecutivos de lluvia se producen un 43%, sobre los 100 mm en 24 horas bajo el efecto del fenómeno del niño.

Bravo *et al.* (2017) realizó un registro de deslizamientos a partir de la cual se completó una base de datos mediante regresión lineal de los datos de precipitaciones diarias correspondientes a estaciones meteorológicas de la Provincia de Concepción. Con esta información se analizó la relación de las precipitaciones acumuladas con respecto a la pendiente, agrupando los datos según la orientación de los taludes. En el trabajo, se recomienda la utilización de más variables, que completen el estudio como el tipo de suelo y la vegetación (Bravo *et al.*, 2017). Además, se enfatiza en incluir el efecto de las precipitaciones acumuladas en el estudio como un factor importante en la generación de remociones en masa (Bravo *et al.*, 2017).

En el presente trabajo para 9 comunas en la Provincia de Concepción se realiza la estimación del umbral de precipitación considerando la influencia de la precipitación acumulada y la influencia de la precipitación antecedente de hasta 4 días. Se obtiene una envolvente, que corresponde a un umbral mínimo de precipitaciones que puede activar un deslizamiento.

Se busca encontrar un umbral específico para los distintos grupos como; tipos de roca, orientación del talud y pendiente. También confirmar si para efectos probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones que provocan deslizamientos, existe una separación característica que encierre a estos eventos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Movimientos en masa

2.1.1 Definición y clasificación

La definición de deslizamientos o procesos de remoción en masa (PRM) se refiere a movimientos pendiente abajo, debido a la fuerza de la gravedad (Cruden,1991). Éstos materiales pueden moverse de distinta forma lo que permite clasificarlos como caídas, deslizamientos, volcamientos, extensiones, flujos y movimientos complejos (Tabla 1) (Varnes,1996). Dentro de ésta clasificación, estos procesos pueden sub-clasificarse según el tipo de material que transportan como rocas, suelos/tierra y detritos/escombros (Tabla 1) (Varnes,1978).

Tabla 1: Clasificación basada en tipo de movimiento y materiales (PMA:GCA, 2007).

Tipo	Subtipo
Caídas	Caída de roca (detritos o suelo)
Volcamiento	Volcamiento de roca (bloque) Volcamiento flexural de roca o del macizo rocoso
Deslizamiento de roca o suelo	Deslizamiento traslacional, deslizamiento en cuña Deslizamiento rotacional
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral por licuación (rápida)
Flujo	Flujo de detritos Crecida de detritos Flujo de lodo Flujo de tierra Flujo de turba Avalancha de detritos Avalancha de rocas Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación (de arena, limo, detritos, roca fracturada)
Reptación	Reptación de suelos Soliflucción, geliflucción (en permafrost)
Deformaciones gravitacionales profundas	

2.1.2 Factores detonantes

El desencadenamiento de las remociones en masa se debe a causas de origen natural y de origen antrópico, y muchas veces por una combinación de estos dos gatillantes. Son muchos los factores que condicionan la generación de estos procesos, tales como el relieve, la litología, estructuras geológicas, la deforestación, la meteorización, actividad volcánica, etc. (Tabla 2) (González *et al.* 2002). Dentro de las causas naturales se identifican mayormente 2 mecanismos; el agua y la actividad sísmica como las más importantes (Cruden, et al 2004).

Tabla 2: Listado de algunos de los factores desencadenantes y condicionantes en PRM (Modificado de González *et al.* 2002).

Factores			
Condicionantes	Relieve	Detonantes	Precipitaciones
	Geología		Sismos
	Condición hidrogeológica		Vulcanismo
	Estructura		Hielo y deshielo
	Meteorización		Erosión
			Actividad antrópica

2.1.3 Procesos de remoción en masa por precipitación

El agua es uno de los factores más comúnmente asociado en la generación de deslizamientos a nivel mundial. En Chile la acumulación de precipitaciones en los meses de invierno, generan la mayor parte de los PRM y la recurrencia interanual permite el estudio del comportamiento de las precipitaciones. Es común que las lluvias se concentren con gran magnitud por periodos cortos de tiempo por lo que es importante considerar la intensidad como variable generadora. Por otro lado, las precipitaciones en unos pocos días pueden acumular agua subterránea progresivamente ocasionando un aumento del nivel freático, lo cual también debe considerarse en la relación de precipitaciones.

Para el trabajo de PRM gatillados por precipitaciones, se puede establecer umbrales, los cuales definen la cantidad de humedad, precipitación, entre otras características hidrológicas las cuales que al ser alcanzadas tienen como resultado la activación de procesos de remoción en masa (Reichenbach *et al.* (1998)). Esto pueden definirse físicamente en base a modelos conceptuales o empíricamente formulado a partir de registros históricos (Guzzetti *et al.* 2008).

Es posible añadir características a nivel local de precipitaciones y para los cuales se considera el efecto del clima de la zona en específico y el efecto de la litología presente entre otros parámetros, teniendo validez para sectores en específico. El análisis de precipitaciones acumuladas en la búsqueda de umbral de precipitaciones entrega un nivel para el cual los deslizamientos se activan (Moreno *et al.* 2006). El autor anterior trabajó las precipitaciones para el día 11 y para el trabajo de precipitaciones antecedente se utilizan las precipitaciones acumuladas en 1,3,5, 7,9,10 y 11 días de lluvia. En los estudios realizados por Mardones *et. al* (2006) se confirma la tesis de un umbral en relación a la intensidad de lluvia caída en 24 horas (Mardones *et. al*, 1994) donde se señala que a partir de los 100 mm estos procesos de deslizamientos mayores se gatillan.

Para el establecimiento de umbrales, se utilizan gráficos donde se analiza el comportamiento de las precipitaciones acumuladas, antecedentes, índices de precipitación, entre otras variables, como los realizados en Torres (2013). Donde en el trabajo anterior se asignan valores constantes para una dispersión de datos en los cuales los deslizamientos inician, identificando así los umbrales de precipitación. Pradenas (2013) de forma similar estima umbrales para la ruta de la madera y la autopista del Itata, en los resultados de ambos estudios se verifica el umbral definido por Mardones *et. al*, (1994).

La definición de curvas umbral o curvas críticas desarrollada por Aboschi (1979, en Pradenas (2013)), a partir del mismo tipo de gráfico para diferentes escalas de deslizamiento genera a diferencia los otros autores, una curva como umbral de deslizamiento, esto refuerza la idea de que las variables de lluvia acumulada y antecedente pueden presentar una relación en cuanto a una zona determinada, la cual presenta una forma distinta a las mencionadas anteriormente (Figura 1).

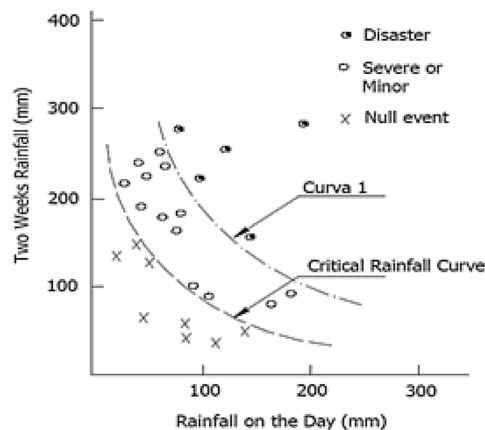


Figura 1: Curva de lluvia crítica (Aboschi, 1979).

2.2 Área de estudio

2.2.1 Ubicación

El estudio es enfocado en la Provincia de Concepción, Región del Bío Bío, comprendido entre los $36^{\circ} 26,57'$ - $37^{\circ} 27,16'$ latitud Sur y $73^{\circ} 33,55'$ - $72^{\circ} 32,21'$ longitud Oeste y aproximadamente a 400 km de Santiago (Figura 1a). La Provincia de Concepción está constituida por 11 comunas (Figura 1b). Debido a que la base de datos disponible para este estudio no considera datos en 3 comunas, se concentró el estudio en las comunas Concepción, Coronel, Chiguayante, Hualqui, Talcahuano y Tomé (Figura 1b).

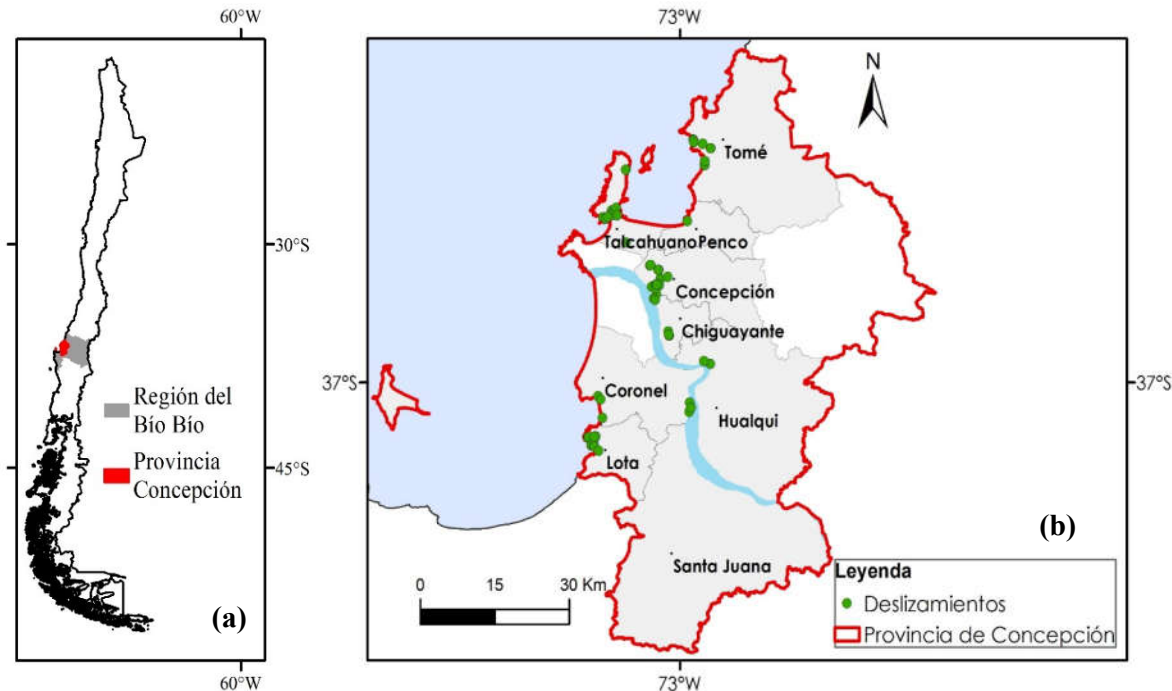


Figura 2: (a) Mapa de región de estudio en relación al territorio de Chile continental.
 (b) Mapa del área de estudio y distribución de deslizamientos

2.2.2 Clima

El clima de la zona es de régimen templado donde la estación húmeda tiene de 7 a 8 meses de duración y una corta estación seca en verano (Peña, 1995). La temperatura media estimada, según la estación meteorológica del aeropuerto Carriel Sur es cercana a los 13°C , donde se alcanza un promedio máximo en el mes de enero con 18°C y una mínima de 8°C en Julio (Dirección meteorológica de Chile, 2018).

Las precipitaciones tienen una media anual de 1.222,1 mm y registran valores máximos absolutos en 24 horas de 148,9 mm (25 de noviembre de 1986). (Dirección meteorológica de Chile, 2018). Se ha registrado una precipitación acumulada en tres días consecutivos de 242,2 mm (24, 25 y 26 de junio de 1974), (Peña *et al.* 1993). El comportamiento de las precipitaciones en presencia del fenómeno “El Niño” (ENOS) sufre valores anómalos, correspondiente a altos niveles de pluviosidad, como por ejemplo las lluvias de junio del 2005 (Mardones *et al.* 2006).

2.2.3 Geología

La distribución geológica de la Provincia de Concepción en donde se encuentran rocas, metamórficas, ígneas sedimentarias y depósitos de material no consolidado (Figura 3). La provincia se encuentra en un margen marino continental, donde se encierra debido a la cordillera de la Costa, donde alcanza mayores alturas.

Los sectores de Talcahuano esta dominados por la presencia de rocas metamórficas perteneciente al Basamento Metamórfico de edad Paleozoica. Las rocas corresponden a filitas con distintos estados de meteorización y fracturadas. En las comunas de Coronel y Lota se puede observar también afloramientos de éste Basamento Metamórfico (Figura 3).

La geología ígnea predominante en la zona corresponde a las comunas Concepción, Chiguayante, y Hualqui al E de la provincia (Figura 3). Se aprecia el afloramiento de rocas graníticas del Paleozoico Superior, pertenecientes a la Cordillera de la Costa (Batolito de la Costa). En algunos sectores las rocas graníticas poseen un alto grado de meteorización, presentándose como un material disgregado de compacidad variable y conocido como “maicillo” (Figura 3).

Rocas sedimentarias afloran en la Comuna de Sta. Juana con la presencia de la Formación Santa Juana (Triásica) (Creixell, 2001). En las comunas de Concepción, Penco y Talcahuano numerosos cerros están caracterizados por la Formación Quiriquina (Cretácica); la Formación Curanilahue (Paleocena-Eocena) y la Formación Andalién (Pliocena). Las rocas sedimentarias son principalmente areniscas con contenidos de limo y arcilla, de origen marino continental (Figura 3).

Los depósitos cuaternarios y terrazas fluviales presentes en la zona, se distribuyen en los costados actuales de los ríos Andalién y Bío Bío, así como en su desembocadura (Figura 3).

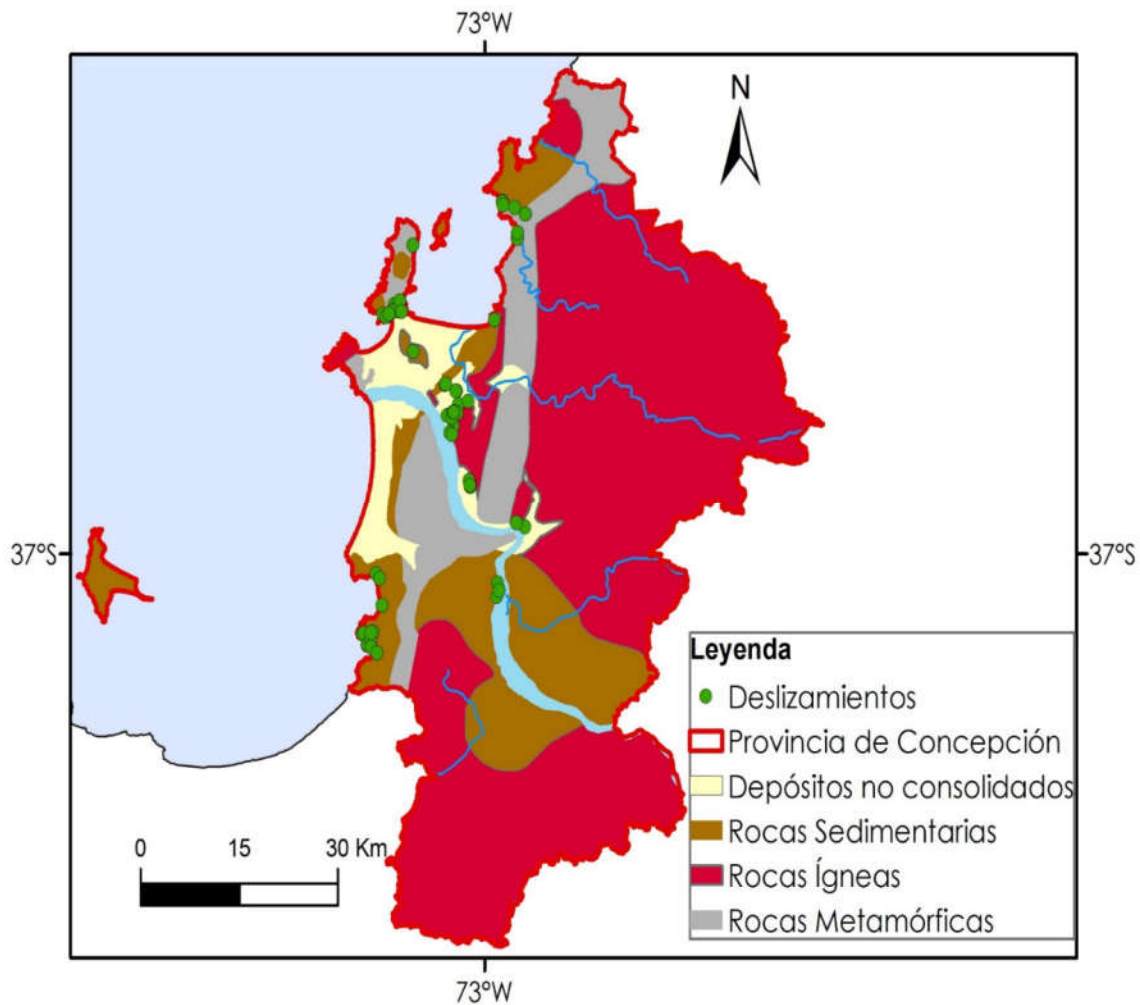


Figura 3: Mapa geológico de la Provincia de Concepción. Modificado de Gajardo (1981), Veyl (1961), Vivallos (2010), Sernageomin (2003)

2.2.4 PRM en el área de estudio

En las comunas del área de estudio según la información recopilada por Sernageomin (2016) y Sernageomin (2015), a partir del año 1999 se registraron más de 22 eventos de PRM que han ocasionado daños a la población y un total de 17 víctimas fatales. La creciente ocupación de los cerros y taludes para dar acceso a nuevos sectores urbanos, dan como consecuencia el potencial de este tipo de movimiento en masa, gatillada por una fuerte influencia del factor antrópico entre otros. Asociados con 2 de las mayores autopistas de la provincia, existen numerosos registros de deslizamientos en la Ruta De la Madera CH-156 (Naranjo *et al.* 2005; Naranjo *et al.* 2005; Torres, 2013) y la Ruta del Itata CH-152 (Pradenas, 2013). En el ambiente urbano en sectores emplazados sobre maicillo, rocas sedimentarias y rocas metamórficas como Agüita de la Perdiz (Figura 4a) y Cerro La Unión (Figura 4b) son zona de acumulación de éste tipo de eventos (en Prensa; Tauran, 2010; Cid, 2014; Hillman, 2017).



Figura 4: Fotografía de deslizamientos en el área: **(a)** Sector Agüita de la Perdiz, Concepción (Cid, 2004), **(b)** Sector cerro la Unión (Obtención en terreno).

3. METODOLOGÍA

3.1 Base de datos

La construcción de la base de datos de deslizamientos en las diferentes comunas de la Provincia de Concepción se obtuvo de Alarcón (1995) en un estudio de vulnerabilidad de la zona. Se agregaron los puntos recopilados por Naranjo *et al.* (2005). Del total de los 99 puntos se utilizaron 98 pertenecientes a la Provincia de Concepción discriminando un dato perteneciente a la Provincia de Arauco.

Para la generación y llenado del registro de datos se utilizó el Software Arcgis 10.4. Ésta herramienta mediante la distribución espacial permite extraer la información de precipitación, pendiente, orientación y geología de cada deslizamiento.

3.2 Estimación de datos faltantes de precipitación

Para el estudio se utilizaron los datos de 7 estaciones meteorológicas principales y 4 estaciones auxiliares cercanas al área de estudio (Figura 5). La utilización de las estaciones auxiliares se fundamenta en la falta de datos para períodos de precipitación en las estaciones escogidas. Se utiliza la técnica de regresión lineal para tomando 4 estaciones auxiliares y se correlacionan linealmente con cada estación obteniendo una función lineal la cual permite obtener para cada estación las precipitaciones diarias faltantes según las áreas de influencia definidos por polígonos de Thiessen generados en Arcmap 10.4. De las cuatro estaciones utilizadas se escoge las de mayor coeficiente de correlación ($r > 0.5$), y en el caso de que dicha estación auxiliar no cuente con datos para la fecha se utiliza la que sigue en correlación.

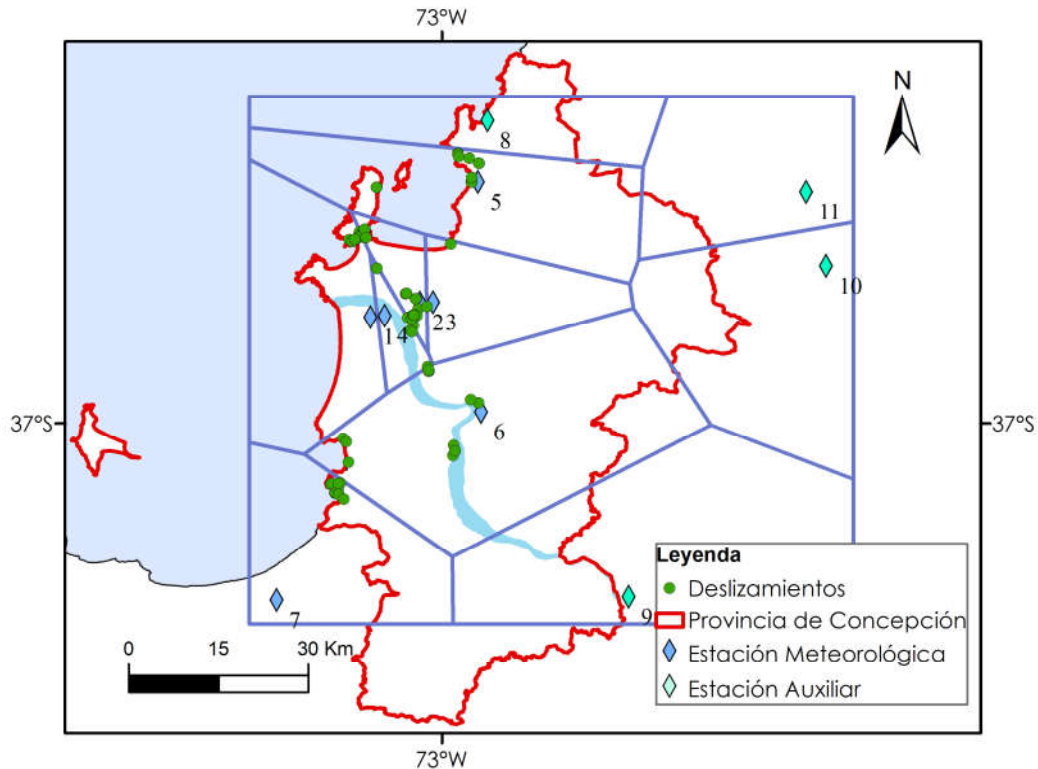


Figura 5: Mapa ubicación estaciones meteorológicas utilizadas (azules) y estaciones auxiliares (celestes). 1. Estación Concepción DGA. 2. Estación Concepción Edif. MOP, 3. Estación Estero Nonguén Frente U. Del Bío Bío, 4. Estación Río Bío Bío En Desembocadura 5. Estación Estero Bellavista En Tome, 6. Estación Estero Hualqui En Desembocadura, 7. Estación Carampangue, 8. Estación Dichato, 9. Estación Laja, 10. Estación Chillancito, 11. Estación Nueva Aldea.

3.3 Cálculo de precipitaciones acumuladas y antecedentes

La obtención de la lluvia acumulada se realizó para 1 día de precipitación (1a), donde se asume que para tal día ocurrió el evento de deslizamiento. Dicho valor de lluvia se obtiene del registro diario de precipitaciones generado en el punto anterior, una vez escogida la regresión lineal e identificando el polígono de Thiessen que encierra a cada deslizamiento.

La precipitación antecedente se calcula sumando los n días de lluvia acumulada anteriores al día del deslizamiento. Para el presente estudio se utilizaron datos de precipitación antecedente de 1 hasta 4 días (previos al evento) designándose los valores para cada día como 1aa, 2aa, 3aa y 4aa.

Esta información de lluvia se analiza mediante gráficos de dispersión. Para poder visualizar mejor los datos se graficaron ambos ejes en escala logarítmica. De ésta forma los puntos cuyos valores 0 mm, se dejan fuera de la gráfica, quedando con 75 deslizamientos.

3.4 Datos orientación y pendiente

La obtención de los datos de orientación de buzamiento y ángulo de pendiente de los deslizamientos se realizó mediante la extracción de datos espaciales utilizando Arcmap, en donde se utilizó la información topográfica del NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second. Los datos se agruparon en rangos (Tabla 3) para ser visualizados de forma más clara en los gráficos a realizar.

Tabla 3: Clasificación de deslizamientos según orientación de buzamiento y ángulo pendiente.

Orientación (Dip Dir)	Pendiente
N-NE-NO	0°-10°
S-SE-SO	10°-20°
E-SE-NE	20°-30°
O-SO-NO	30°-40°
	40°-53°

3.5 Datos geología

Para los datos de la geología se realizó la georreferenciación de los mapas de distintos autores Gajardo (1981), Veyl (1961), Vivallos *et al.* (2010), Sernageomin (2003). Sin embargo, dentro de la zona existen puntos que fue imposible determinar mediante simple superposición de mapas por encontrarse en límites litológicos, por lo que se requirió una verificación en campañas de terreno. Se agruparon los datos según origen petrológico (Tabla 4).

Tabla 4: Clasificación de deslizamientos tipo de roca.

Origen Petroológico
Igneo
Metamórfico
Sedimentario

La mayoría de los datos (50%) corresponden al Basamento Metamórfico en un estado de meteorización media a alta cubriendo afloramientos de la roca intacta. Un (22%) corresponde al Batolito Costero el cual se presenta en varios estados de meteorización, el cual sobre los 20° de pendiente genera cárcavas debido al arrastre de sedimentos (Vivallos, 2010). La presencia de rocas sedimentarias (28%) se aprecia en depósitos Triásicos de la Formación Santa Juana en forma de arcillas y arcillolitas (Creixell, 2001) con presencia de clastos filíticos. En la Formación Quiriquina como areniscas, conglomerados y calciruditas fosilíferas con cemento calcáreo y niveles de concreciones, en la Formación Curanilahue como areniscas, arcosas líticas y lutitas, intercaladas con mantos de carbón y niveles conglomerádicos.

Debido al número de datos en cada formación, donde se une la información de los sectores sedimentarios de manera de lograr un porcentaje más representativo de datos.

3.6 Calculo de la curva crítica

El ajuste de la curva crítica, se trabajó por rangos de precipitación antecedente (Eje X), y de éste rango se escogieron los valores mínimos de precipitación acumulada (Eje Y). Como primer intento se trató tomar la misma cantidad de puntos mínimos por intervalo, pero debido a que éstos se concentran entre 10 y 100 mm se escogieron, 4 puntos mínimos entre 10 y 100 mm y 2 puntos mínimos para valores bajo 10 mm y sobre los 100 mm (eje X) (Figura 6). Una vez obtenidos los datos a utilizar, se ajusta la función potencia.

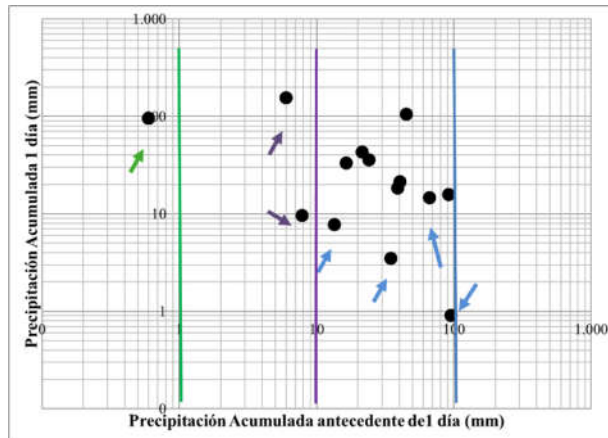


Figura 6: Elección de puntos para ajuste de curva.

3.7 Período de retorno y probabilidad de ocurrencia de eventos.

Los eventos de precipitación tienen un período en el cual se repiten en el tiempo y están asociados a una probabilidad de ocurrencia. Para obtener el período de retorno (años) del registro de deslizamientos, se utilizó la estación Carriel Sur (Dirección Meteorológica de Chile).

Mediante la ecuación de Hazen (Guerra et al. 1980 en Alarcón, 1995) se obtiene el período de retorno (T) y la probabilidad de que ocurran los eventos de lluvia que desencadenan deslizamientos (Ecuación 1). Al ordenar el registro de eventos en orden decreciente se asocia un número de orden (M), para un registro de (N) años lo que permite realizar el cálculo (Ecuación 1).

$$T = \frac{2N}{2M-1} \quad (1)$$

4. RESULTADOS

4.1 Resumen de curvas umbral

El umbral de precipitaciones a partir del registro de deslizamientos se obtiene mediante el ajuste de la curva crítica. Se realizó el ajuste, para la curva crítica, a los puntos mínimos tomados cada cierto intervalo, ajustando una función potencia para cada gráfico (Tabla 5). En la Tabla 5, se observa que las pendientes correspondientes a los exponentes de cada función disminuyen desde el día 1 hasta el día 3, lo que se refleja en la pendiente de cada curva como se puede apreciar en la Figura 6. Sin embargo, a partir del día 4 la pendiente vuelve a aumentar.

La generación de umbrales específicos para distintos tipos de roca, rangos de pendiente y orientación se vio truncada debido a no encontrar una agrupación significativa como se esperaba. Los distintos grupos no se acercan o separan a la curva umbral como se esperaba, además la poca cantidad de datos no permitió un ajuste confiable.

Tabla 5: Ecuaciones de umbrales obtenidos de los gráficos de dispersión.

Días de pp antecedente	Curva crítica (umbral)
1	$y = 48,989x^{-0.915}$
2	$y = 33,996x^{-0.526}$
3	$y = 15,933x^{-0.426}$
4	$y = 11,599x^{-0.438}$

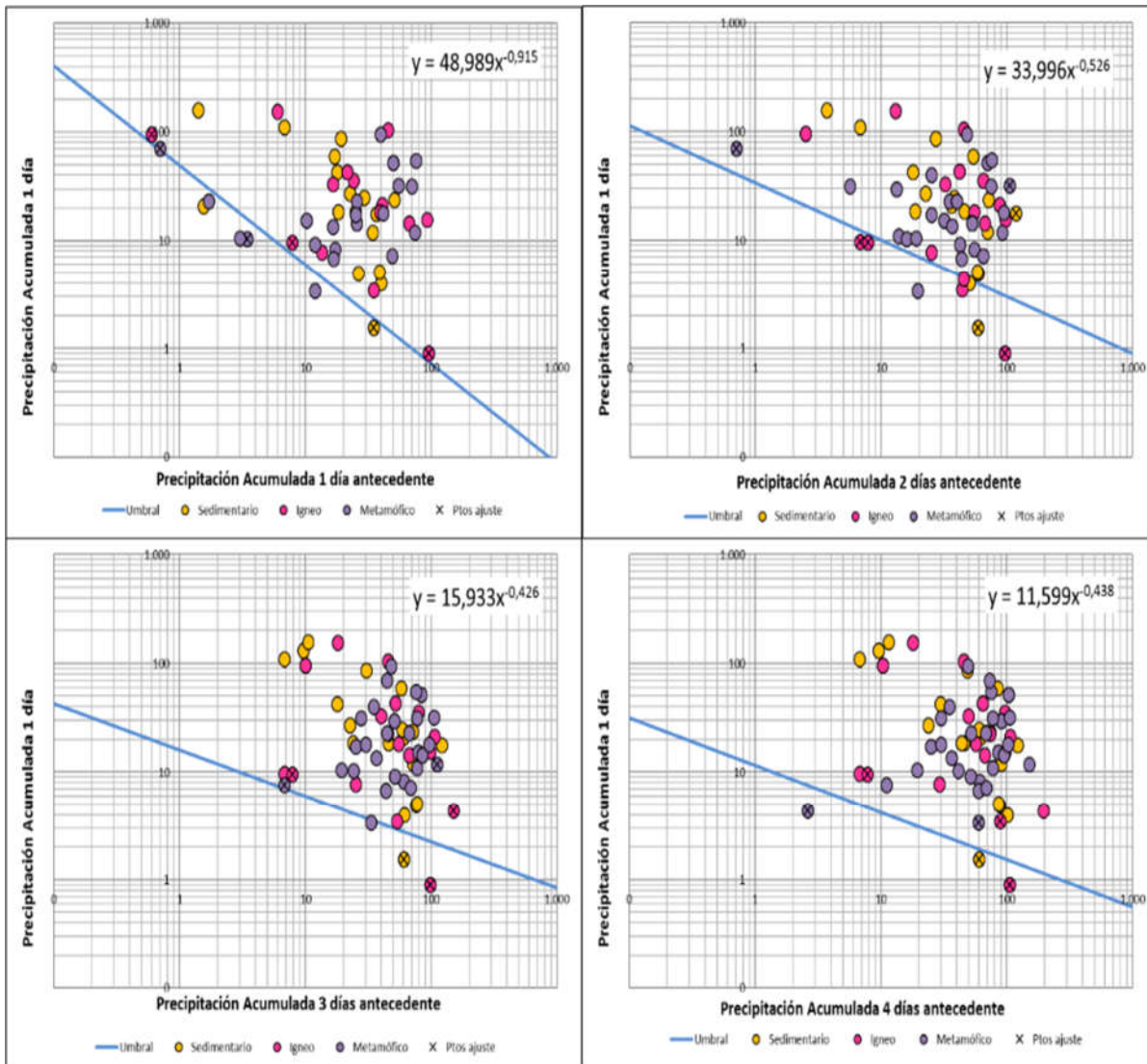


Figura 6: Umbrales en gráficos precipitación acumulada (a1) v/s precipitación antecedente de 1, 2, 3 y 4 días, por tipo de roca.

4.2 Gráficos de dispersión agrupados por tipo de roca

Los datos pasan de una distribución con sesgo positivo a negativo con excepción de las rocas sedimentarias donde la asimetría se conserva. Esto significa que los valores más frecuentes de precipitación acumulada son menores que el promedio de datos. Esto adelanta que el comportamiento de los datos no posee una distribución normal. A medida que aumentan los días de precipitación antecedente los datos empiezan a alcanzar los valores cercanos a 100 mm (Figura 7). Este estrechamiento de datos, en los puntos metamórficos se ve parcializado, en donde a medida que avanza la precipitación acumulada la desviación estándar disminuye indicando que hay una cantidad de datos que no aumenta. El caso contrario se presenta en las rocas ígneas donde la dispersión de datos disminuye al menos hasta el día 3 de precipitación antecedente (Figura 7). Para las rocas sedimentarias el valor de la desviación estándar sube para el día 2, y disminuye nuevamente para los días siguientes. En cuanto a la dispersión de lluvia acumulada el día de los deslizamientos los valores se mantienen más cercanos a la media en las zonas metamórficas siendo casi la mitad de la desviación estándar de los otros tipos de roca.

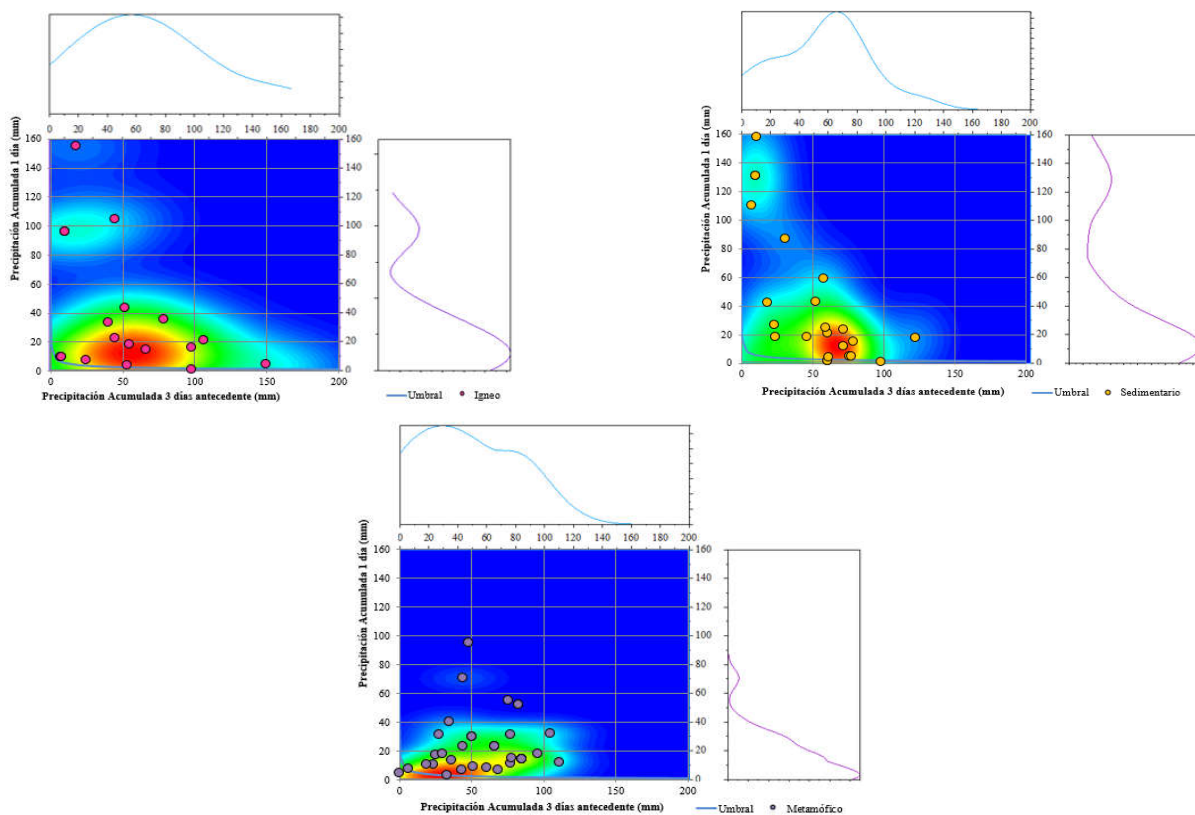


Figura 7: Gráfico Kernel de precipitación acumulada (a1) v/s precipitación antecedente de 3 días, agrupación por tipo de roca, las curvas en cada eje representan el comportamiento de las frecuencias de datos.

4.3 Gráficos de dispersión agrupados por pendiente de talud

En el intervalo de 0° - 10° los datos son uniformes y presentan normalidad entre los 10° - 20° . En adelante adoptan una asimetría negativa. Entre 20° - 30° la asimetría es positiva, hasta volverse uniforme. En el intervalo 30° - 40° la asimetría positiva se invierte en el 3aa hasta 4aa (Figura 8). Entre 40° - 53° la asimetría positiva se mantiene para los 4 días de precipitación acumulada. Los puntos para los 0° - 10° se dispersan hasta el día 2 de precipitación antecedente y vuelven a juntarse hasta el 4aa. Para el resto de rangos, los puntos aumentan su dispersión hasta 2aa y luego se estrechan al día 3aa y vuelven a dispersarse para el día 4aa la dispersión de datos aumenta (Figura 8).

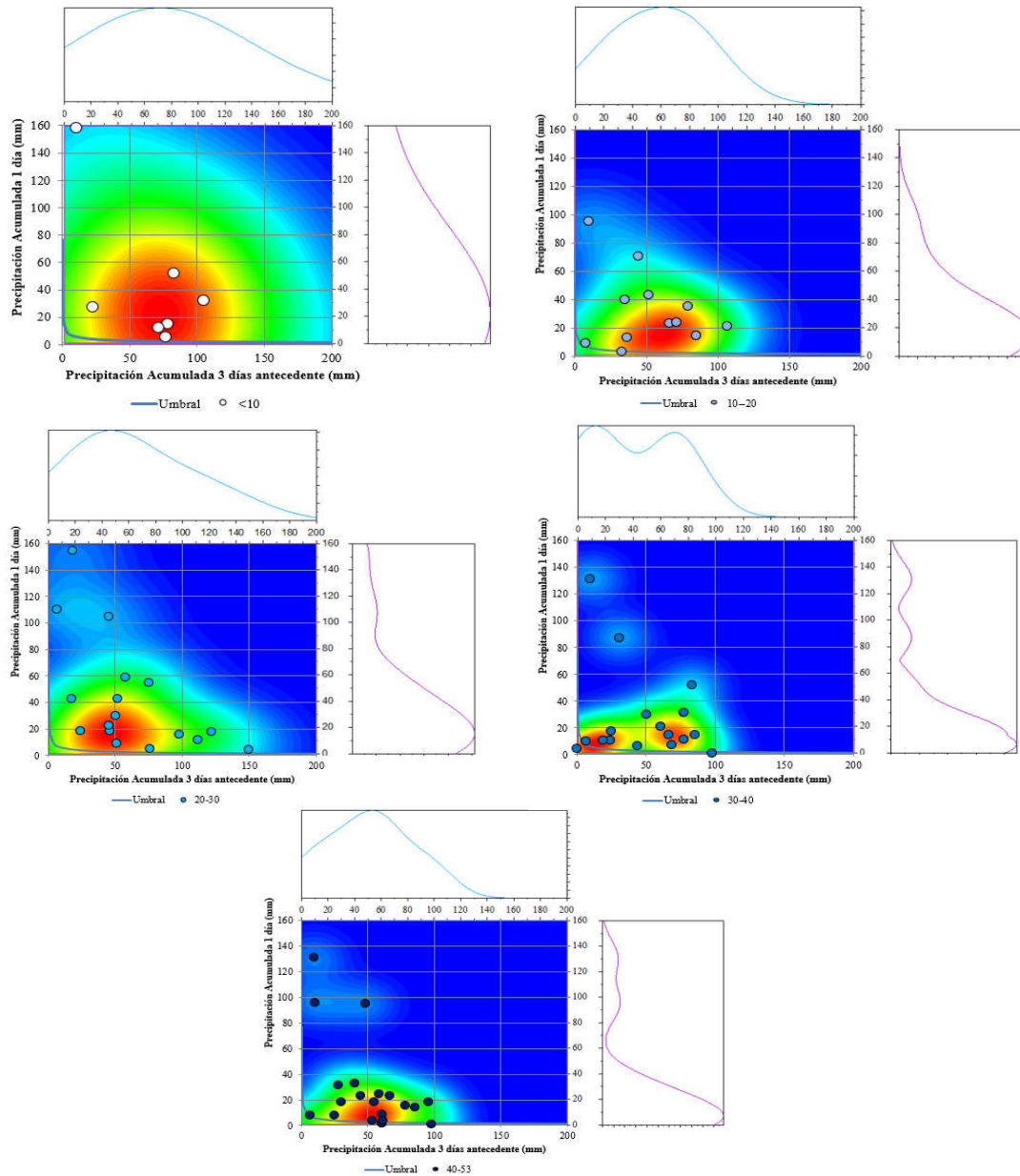


Figura 8: Gráfico Kernel de precipitación acumulada (a1) v/s precipitación antecedente de 3 días, agrupación por ángulo de pendiente, las curvas en cada eje representan el comportamiento de las frecuencias de datos.

4.4 Gráficos de dispersión agrupados por orientación

Los gráficos de la figura 8 muestra gráficos de precipitación acumulada versus precipitación antecedente basado en la orientación de los taludes. Los datos con orientación N muestran una distribución uniforme y no presentan valores reiterativos de precipitación. Esto no se considera representativo debido al bajo porcentaje que representan estos puntos con respecto al total del registro (12%). La simetría de los datos continúa varían de positiva a negativa, donde el cambio de polaridad se ve a partir del día 3 de precipitación antecedente. La orientación E mantiene hasta el día 4, su simetría positiva.

La dispersión de datos disminuye para N y O, juntándose los datos hacia los 100 mm, en el día 3aa (Figura 9), y vuelven a separarse para el día 4aa. Las direcciones S y E aumenta la dispersión hasta 2aa, disminuye para el día 3aa y vuelve a aumentar para 4aa. El caso de orientación S-E, los valores se encuentran más concentrados, esto puede deberse a que ambos poseen un porcentaje mayor de los datos como se observa en la Figura 9.

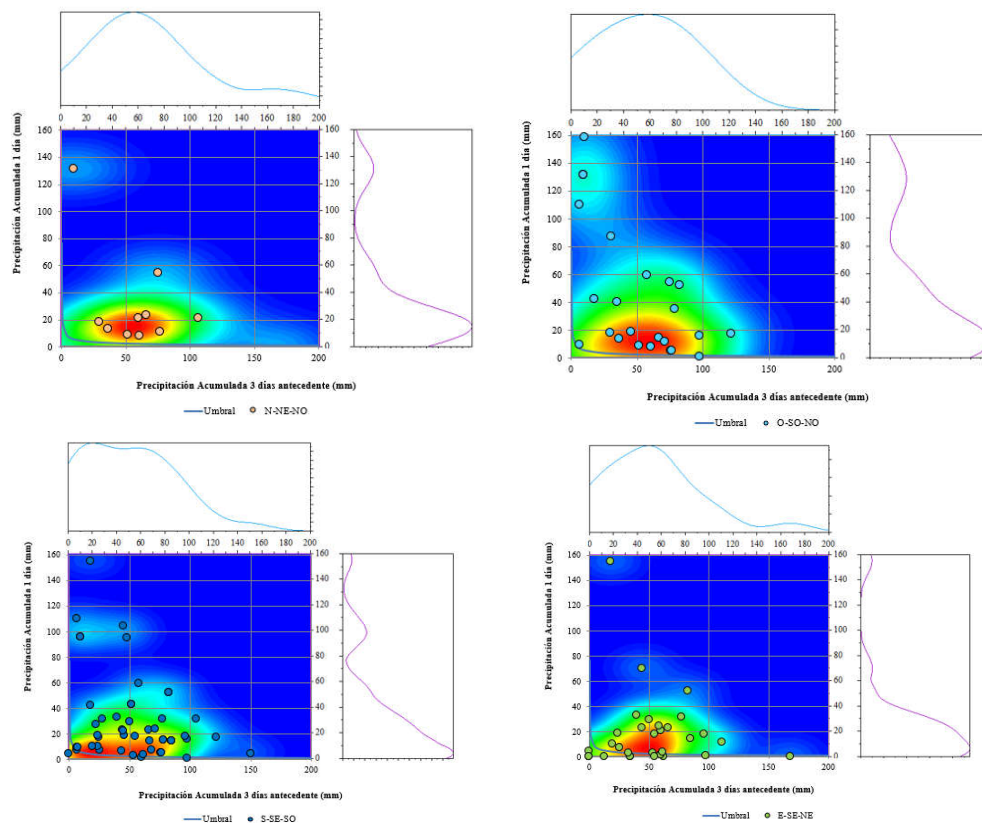


Figura 9: Gráfico Kernel de precipitación acumulada (a1) v/s precipitación antecedente de 3 días, agrupación por orientación de buzamiento de talud, las curvas en cada eje representan el comportamiento de las frecuencias de datos.

4.5 Origen petrológico y orientación

La Figura 10 grafica la orientación preferente de cada tipo de roca. Dentro de la totalidad de datos se puede ver que un 66% de los datos se encuentra con buzamiento hacia el S-SE-SO. En la Figura 10, el radio representa la precipitación correspondiente a 3 días de precipitación acumulada. Para éste día los niveles de precipitaciones alcanzados se encuentran bajo los 100 mm, para todas las orientaciones y sólo 6 puntos se escapan de éste límite. Se puede observar (Figura 10) que los deslizamientos en rocas ígneas poseen una orientación de buzamiento preferente hacia el S y SE, al igual que los puntos sedimentarios. Por otro lado, las rocas metamórficas extienden mayor distribución hacia el O y N.

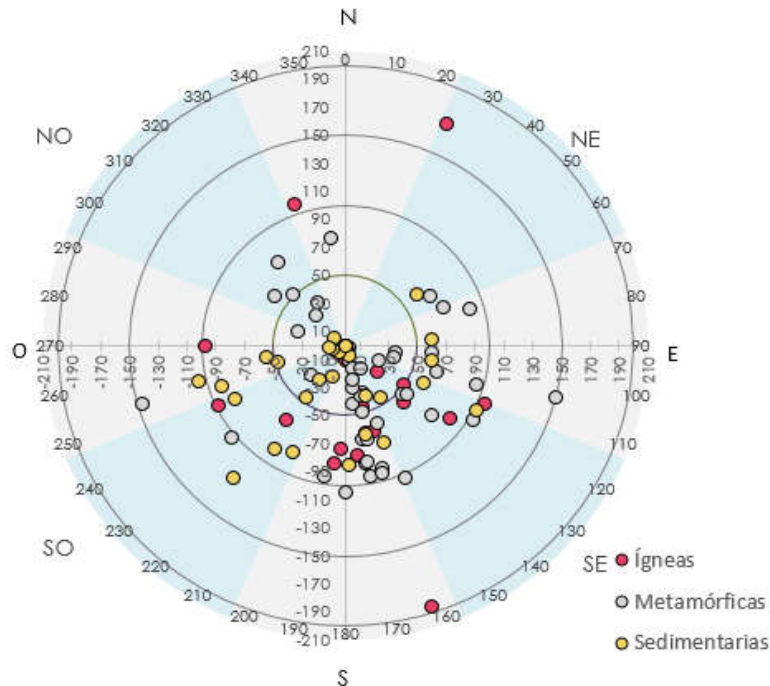


Figura 10: Gráfico orientación y precipitación acumulada antecedente (aa3) según agrupación de origen petrológico.

4.6 Frecuencia bivariada

El gráfico de dispersión Kernel se obtuvo mediante el uso del Software Origin 2018b, y arrojó buenos resultados al menos en escala lineal. En la Figura 11 se observa que las mayores frecuencias de datos se concentran en las zonas rojas y amarillas, donde ocurren la mayor cantidad de deslizamientos. La densidad de datos se mueve desde el día 1aa bajo los 40 mm hasta el día 4 donde la precipitación acumulada antecedente alcanza los 100-110 mm (Figura 11). A medida que aumentan los días de precipitación antecedente los datos forman cúmulos separándose en 2 para el día 4 (Figura 11). Se observa el umbral que Mardones *et al.* (1994) estableció a los 100 mm de precipitación acumulada en 24 hrs. y encierra los datos por debajo de éste nivel, en la Figura 9 se puede ver que corresponde a 100 o 110 mm. Los eventos por sobre los 150 mm corresponden a los eventos a eventos de carácter grave atribuidos a las lluvias extraordinarias del año 2005, relacionadas con el fenómeno ENOS (“El Niño”).

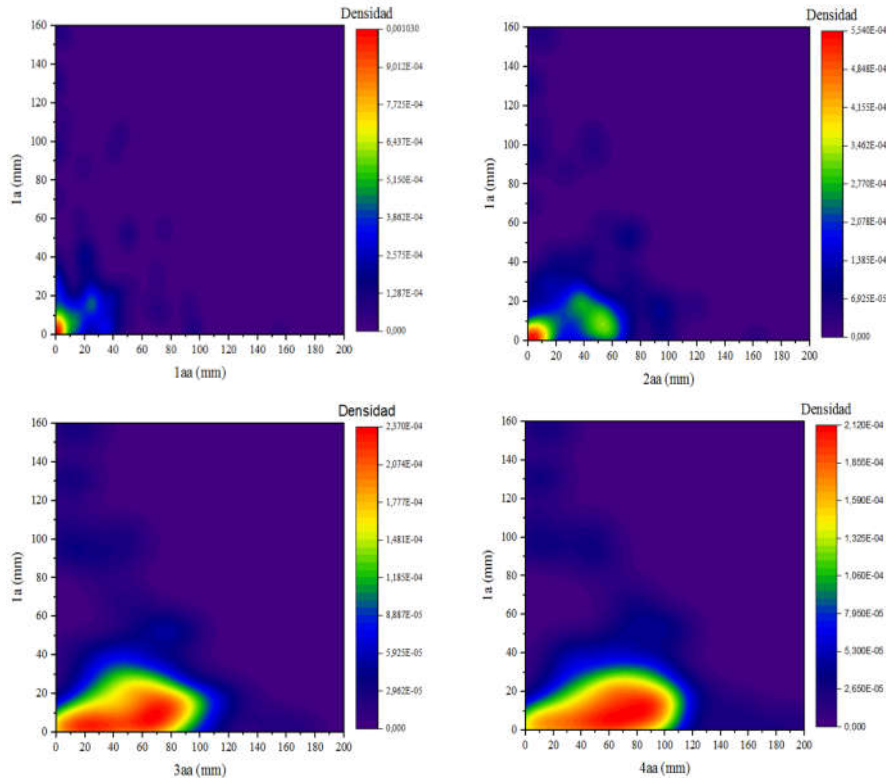


Figura 11: Gráfico de densidad Kernel, mediante el uso de Origin.

En la Figura 12 (b), se observa la ubicación del umbral de Mardones *et al.* 1995 con relación al umbral obtenido en este estudio. Éstos umbrales tienen finalidades distintas ya que entre éstos se engloba la totalidad de eventos de deslizamientos. Se puede ver (Figura 12 (a)) que el clúster de datos más importante (rojo-amarillo) que encierra por bajo los 40 mm y representa al 76% de los datos, por lo que podría ser un buen estimativo de un umbral medio que sirva de piso para la vulnerabilidad de eventos graves de precipitación, y de máximo para eventos de menos envergadura que son los más frecuentes.

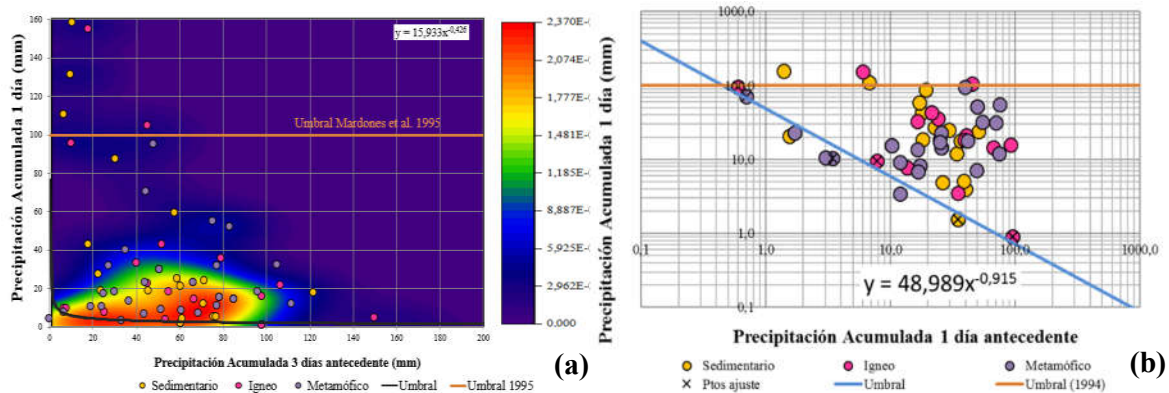


Figura 12: (a) Umbral de Mardones *et al.* (1995) gráfico de densidad Kernel; (b) gráfico de dispersión escala log-log.

4.7 Base de datos de prueba

Se recopiló para validar el umbral un registro secundario de deslizamientos mediante información de los medios de prensa digital y redes de emergencia. Los datos corresponden al período 2010-2018, donde se completaron los datos de precipitación acumulada y antecedente para cada evento (Tabla 6).

Tabla 6: Base de datos de deslizamientos de prueba.

N°	Fecha	Comuna	Estación	a1 (mm)	aa1 (mm)	aa2 (mm)	aa3 (mm)	aa4 (mm)
1	27-06-2010	San Pedro de La Paz	RIO BIOBIO EN DESEMBOCADURA	0,1	11,9	16,9	47,6	74,6
2	03-06-2014	Chiguayante	RIO BIOBIO EN DESEMBOCADURA	31,3	69	69,5	69,5	69,5
3	21-06-2017	Concepción	ESTERO NONGUEN FRENTE U. DEL BIO BIO	46,4	5	5	5	6
4	24-06-2017	Coronel	ESTERO HUALQUI EN DESEMBOCADURA	29,6	0	1,8	37,5	40,9
5	25-06-2017	Talcahuano	CONCEPCION DGA.	11,4	38,6	39,3	43,8	92,3
6	26-06-2017	Chiguayante	RIO BIOBIO EN DESEMBOCADURA	11,9	5	35,7	35,7	38,9
7	05-10-2017	Penco	ESTERO BELLAVISTA EN TOMÉ	30,5	2,9	29	34,4	36,1
8	05-10-2017	Coronel	ESTERO HUALQUI EN DESEMBOCADURA	19,3	0,5	24,9	30,5	31,7
9	17-03-2018	Talcahuano	CONCEPCION DGA.	0,4	38,6	38,6	42,8	42,8
10	17-03-2018	Concepción	ANDALIÉN	17	45	45	54	54
11	27-06-2018	Coronel	ESTERO HUALQUI EN DESEMBOCADURA	4,9	35,3	38,2	38,3	38,3
12	04-07-2018	Hualqui	ESTERO HUALQUI EN DESEMBOCADURA	13,2	27,8	28,4	39,5	40
13	06-07-2018	Chiguayante	ESTERO HUALQUI EN DESEMBOCADURA	10,1	21,4	34,6	62,4	63
14	25-09-2018	Concepción	ESTERO NONGUEN FRENTE U. DEL BIO BIO	0,1	0	0	0,1	0,1

En la Tabla 6 se aprecian los deslizamientos de prueba, identificando 3 valores bajo el umbral. Se puede apreciar 2 eventos (verde) los cuales mostraban valores extremadamente bajos los cuales no corresponden a las precipitaciones reales observadas en esas fechas (0,1 mm para la lluvia acumulada el día del deslizamiento).

Para el evento N° 10 fue posible verificar esta información comparando con la Estación Andalién, la cual se encuentra más cercana. Los valores se muestran más consistentes para ésta estación por lo que fueron utilizados en la prueba del umbral, ubicándose sobre la curva crítica. Para el evento N°14 los valores aún no se encuentran actualizados en la base de datos de la DGA.

El punto N°4 se pierde en la Figura 11, para 1 día de acumulada antecedente, debido al uso de la escala logarítmica la cual no considera los valores 0 mm de precipitación. Sin embargo, para los días 2,3 y 4 de lluvia acumulada antecedente se ubica por sobre el umbral. Para el punto N°1 es válido considerar la fecha de ocurrencia del evento (27-06-2010) ya que el terremoto ocurrido en ese período podría tener influencia en el desencadenamiento de éste punto en particular.

Para el total de los datos probados (14) al menos 11 se encuentran por sobre el umbral, lo que corresponde al 79% de la base de prueba lo que da un buen resultado como estimativo de la evaluación del umbral.

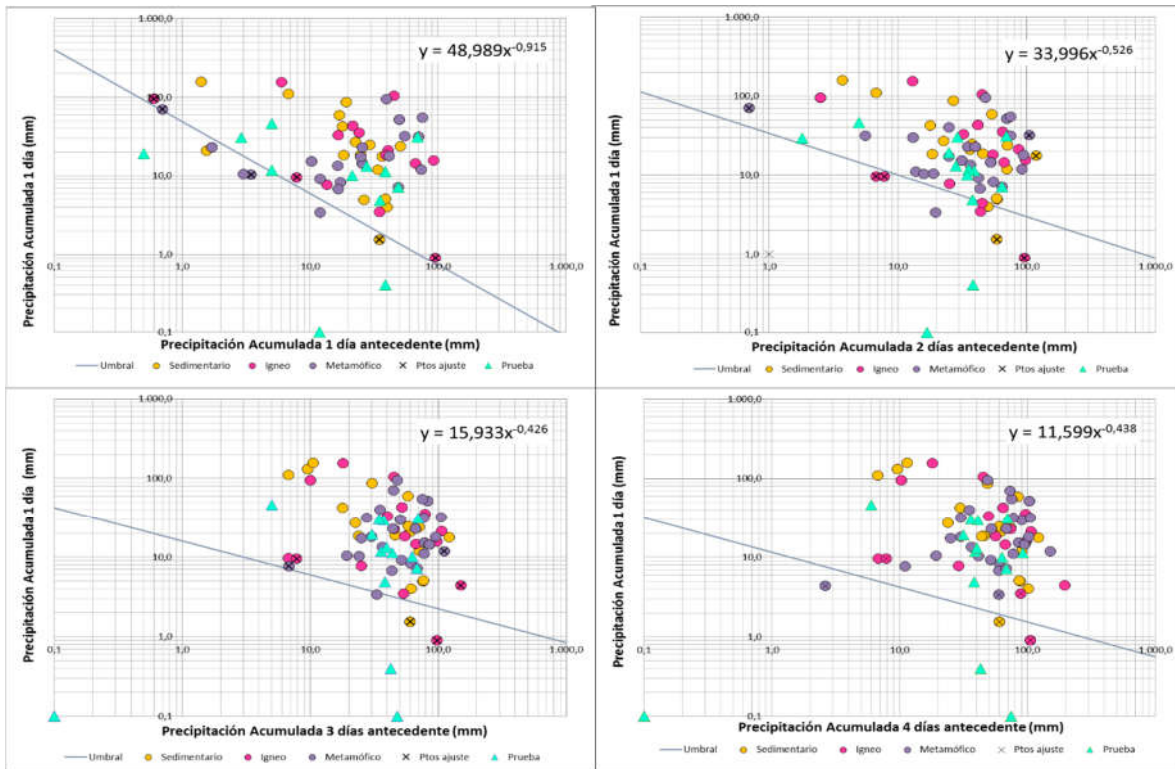


Figura 11: Gráfico precipitación acumulada (a1) v/s precipitación antecedente de 1, 2,3 y 4 días agrupados por orientación de buzamiento de talud.

4.8 Períodos de retorno y probabilidad de ocurrencia

La Tabla 7 muestra los valores máximos de precipitación diaria entre los años 1950 y 2017 obtenidos de la DMC (Estación Carriel Sur), permitió obtener los períodos de retorno y su correspondiente probabilidad. Para la Figura 12, se utilizaron éstos valores, donde se ve que un 6% de los datos se encuentra sobre el umbral de 100 mm (umbral de Mardones *et al.* 1994), un 13% de los datos se haya entre los 100 mm de precipitación acumulada y los 40 mm de precipitación y un 82% de los deslizamientos ocurrieron por valores menos a 40 mm de lluvia acumulada diaria.

Tabla 7: Períodos de retorno y Probabilidad de ocurrencia.

a1 (mm/día)	N	M	T (años)	P(%)
40	68	65	1,1	94,9
60	68	48	1,4	69,9
80	68	25	2,8	36,0
100	68	13	5,4	18,4
160	68	2	45,3	2,2

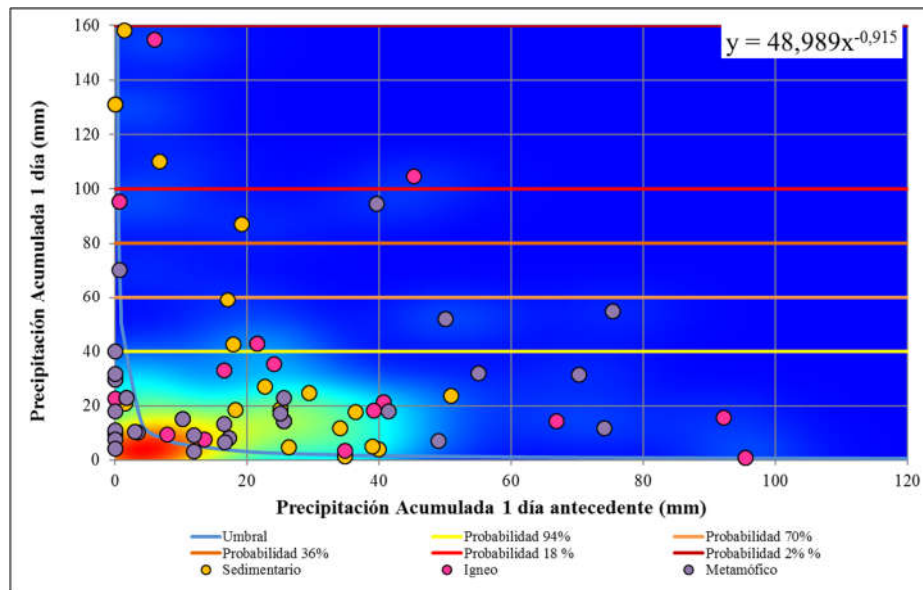


Figura 12: Gráfico de dispersión con porcentajes de probabilidad de ocurrencia.

5. CONCLUSIONES

Para los valores de precipitación acumulada correspondiente a 1 día asociados a lluvias antecedentes de 1,2,3,4 días es posible definir una curva umbral o curva crítica por sobre la cual se incrementa la posibilidad de que los deslizamientos se desencadenen. Estos valores son representables mediante a una función potencia (Tabla 3) donde la mayor pendiente se presenta para los valores de 1 día antecedente, y disminuye hasta el día 3 de precipitación antecedente. A partir del día 4 ésta pendiente vuelve a aumentar.

El comportamiento decreciente de las pendientes de las curvas, permite inferir que para un mismo valor de precipitación acumulada se necesita una mayor cantidad (mm) de lluvia antecedente. También se puede apreciar que para un mismo valor de precipitación antecedente se necesita menos cantidad de precipitación acumulada en un día de lluvia.

Los valores de precipitación no poseen un comportamiento normal de distribución y la asimetría varía para los distintos clústeres de datos.

Los datos se tienen a agrupar a medida que aumentan los días de precipitación antecedente llegando a valores cercanos a los 100 mm de precipitación antecedente donde se estanca el avance.

Del resultado de prueba de la segunda base de datos confeccionada demuestra que para los umbrales solo 3 quedaron bajo la curva quedando el 79% de la muestra sobre éstos.

Las orientaciones de buzamiento de los deslizamientos se presentaron preferentemente hacia el S-SE-SO.

Los datos de los grupos de pendiente, orientación y tipo de roca no presentaron un comportamiento distintivo acercándose o alejándose de la curva umbral. Debido posiblemente al bajo número de datos que posee el registro.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda aumentar el registro de datos para que el porcentaje ayude a validez el comportamiento de éste umbral.
- Se recomienda análisis de vulnerabilidad para eventos de riesgo medio, en dónde se propone 40 mm como umbral máximo de precipitación acumulada.

7. REFERENCIAS

- Alarcón, G. y Mardones, M.** (1995). Evaluación de los riesgos naturales en el área metropolitana de Concepción, a través de la información de diario El Sur. Memoria para optar al título de Licenciado en Educación con mención en Historia y Geografía. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias Sociales e Historia (Inédito): 87 pp. Concepción.
- Bravo, C., Caamaño D., y R. King.** (2017). Umbral de precipitación de procesos de remoción en masa, en la Provincia de Concepción. Simposio de Habilitación Profesional Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Católica de la Santísima Concepción. Concepción.
- Cid, P.** (11 de junio de 2014). Deslizamiento de tierra en sector Agüita de la Perdiz afecta a tres viviendas en Concepción. *BioBíoChile*.
- CHC, Congressional Hazards Caucus.** (2014). "Congressional Hazards Caucus Fact Sheet: Landslides".
- Creixell, C.** (2001). Petrología y Geotermobarometría de las rocas intrusivas de la Cordillera de la costa en los 36°30' y 38°00'S. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 149 pp. Concepción.
- Cruden, D. M.** (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin International Association for Engineering Geology*, 43: pp 27–29.
- Cruden, D. M.** (2004). Landslide types and processes, U.S. Geological Survey, Fact Sheet 2004-3072
- Gajardo, A.** (1981). Mapas Geológicos Preliminares de Chile. Hoja Concepción-Chillán escala 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas, 32 pp. 1 mapa escala 1:250.000.
- González De Vallejo, L.I.; Ferrer, M.; Ortuño, L. y Oteo, C.** (2002). Ingeniería Geológica. Editorial Prentice Hall: 744 pp. Madrid.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. and Stark, C. P.** (2008). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update, *Landslides*, 5(1), pp. 3–17.
- Highland, L.M., and Bobrowsky, P.** (2008). The landslide handbook - A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 pp.
- Hillman, K.** (17 de junio de 2017). Vecino de Curanilahue: "Amanecí sacando barro". *La Tercera*.
- Mardones, M. y Vidal, C.** (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. *Eure (Santiago)*. Vol.27, n.81, pp. 97-122. ISSN 0250-7161.
- Mardones F, M.F. Echeverría C. y C. Jara B.** (2006). Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área Metropolitana de Concepción. *Revista Investigaciones Geográficas*. Vol. 38, pp.1-25.
- Mardones, M., Ilabaca, P., Jaque, E. y P. Hormazabal.** (1994). Informe Final Proyecto Fondecyt No 92-025 I. "Evaluación y zonificación de riesgos naturales en el área metropolitana de las ciudades de Concepción y Talcahuano" (Inédito).
- Moreno, H. A.; Vélez, M. V.; Montoya, J. D. & Garrido, R. L.** (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, interanual y diaria. *Revista EIA*, n.5: pp. 59–69. Medellín.
- Naranjo, J. A.; Clavero, J.; Hauser, A. y Ramírez, P.** (2005). Informe geológico sobre las remociones en masa causadas por las lluvias torrenciales de los días 26 y 27 de junio 2005 en Concepción, VIII Región. Informe Inédito, Servicio Nacional de Geología y Minería, 26 pp.
- Pradenas, M.** (2014). "Umbral empírico de deslizamiento por precipitación, para la provincia de Concepción". Proyecto de título, Universidad del Bío-Bío, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Concepción.
- Peña, F.** (1995). Geomorfología de la ribera norte del río Biobío en su curso inferior. Limitaciones y potencialidades del área. *Revista de Geografía Norte Grande*, 22: pp. 27-33.

Peña, F.; Tavares, C. y M. Mardones (1993). Las condiciones climáticas como factor de riesgo en la comuna de Talcahuano. Revista Geográfica de Chile Terra Australis, 38: pp. 83-107.

Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA: GCA). (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas. Publicación Geológica Multinacional. No.4.

Reichenbach, P., Cardinali, M., De Vita, P., Guzzetti, F. (1998). Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (Central Italy). Environmental Geology 35.

Tauran, E. (23 de junio de 2010). Vecinos de Agüita de la Perdiz en Concepción sufren nuevos deslizamientos. de tierra. BioBioChile.

Torres, F. (2013). Umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa para la ruta ch-156. Proyecto de título ingeniería civil. Universidad del Biobío, Depto. de Ingeniería civil. Concepción, Chile.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds. Schuster, R L, and Krizek, R J). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D.C., pp.11–33.

Veyl, C. (1961). Contribución al conocimiento de la geología regional de la Provincia de Concepción. Informe preliminar. Minerales, Vol. 26, N° 72. pp. 21-71. 1 mapa escala 1:500.000.

Vivallos, J.; Ramírez, P. y Fonseca, A. (2010). Carta Geológica de Chile, escala 1:20.000. Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Concepción, Región del Biobío. Serie Geología Ambiental, N° 12, Servicio Nacional de Geología y Minería, 3 mapas en una hoja escala 1:20.000. Santiago.

World Meteorological Organization. (2004). Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970-2012).