

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesora Patrocinante: Carmen Gloria González Labbé



**UMBRALES EMPÍRICOS DE LLUVIA
PARA EL PRONÓSTICO DE
MOVIMIENTOS EN MASA PARA LA
RUTA CH-156**

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FELIPE TORRES GUZMÁN

CONCEPCIÓN, JULIO 2013

DEDICATORIAS

Esto va dedicado a las personas que nunca dejaron de creer en mí y fueron un apoyo constante en mi formación personal y académica:
“Dios, Familia & Amigos”

NOMENCLATURA

- a) Siglas
 - CRED : Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Centro de investigación epidemiológica de desastres.
 - DGA: Dirección general de Aguas
 - LA: Lluvia acumulada
 - LAA: Lluvia acumulada antecedente
 - mm: milímetros

ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCION.....	2
1.2 Umbrales de Precipitación para la predicción de deslizamientos de taludes.....	2
1.3 Identificación del Problema	3
1.4 Objetivos del Estudio.....	4
• 1.4.1 <i>Objetivo principal</i>	4
• 1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
1.5 Alcances del Proyecto de Título	4
2. REVISION BIBLIOGRAFICA	5
2.1 Descripción del fenómeno de Movimiento en masa debido a precipitaciones.....	5
2.2 Los Umbrales por Precipitación	6
2.3 Valores de lluvia antecedente y lluvia acumulada antecedentes de otros autores	7
2.4 Periodos de precipitación usados por otros autores	9
2.5 Realidad Regional.....	10
3.ASPECTOS METODOLÓGICOS	11
3.1 Base de Datos de movimientos en masa	14
3.2 Base de Datos de precipitación.....	15
4. RESULTADOS Y OBSERVACIONES	17
4.1 Caracterización Ruta 156	17
4.2 Definición De Umbrales Críticos De Lluvia	18
4.3 Propuesta De Centro De Masa Como Umbral.....	21
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	23
5.1 Análisis Caracterización de la Ruta CH-156.....	23
5.2 Análisis Umbrales críticos.....	23
5.3 Análisis comparación de umbrales críticos y umbral de centro de masa.....	25
6. CONCLUSIONES	26
7. OBSERVACIONES	27
8. BIBLIOGRAFÍA.	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Metodología.....	11
Figura N°2: Comparación entre gráficos log-log y cartesiano.....	12
Figura N°3: Relación entre precipitación y deslizamientos.....	13
Figura N°4: Zona de influencia de estaciones meteorológicas y tramos ruta Ch-156.....	17
Figura N°5: Lluvia acumulada de 1 día contra lluvia acumulada antecedente	19
Figura N°6: Lluvia acumulada de 3 día contra lluvia acumulada antecedente	20
Figura N°7: Lluvia acumulada de 5 día contra lluvia acumulada antecedente	20
Figura N°8: Lluvia acumulada de 7 día contra lluvia acumulada antecedente	21

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1 Resumen lluvia acumulada, lluvia acumulada antecedente para umbrales críticos y de centro de masa.....	23
---	----

UMBRALES EMPÍRICOS DE LLUVIA PARA EL PRONÓSTICO DE MOVIMIENTOS EN MASA PARA LA RUTA CH-156

Autor: Felipe Hernán Torres Guzmán

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío,

fhtorres@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Carmen Gloria González Labbé

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío,

cgonzal@ubiobio.cl

RESUMEN

Los movimientos en masa detonados por lluvias son una de las causas más frecuentes de desastres alrededor del mundo, generando pérdidas económicas millonarias debido a una creciente expansión urbana sobre áreas montañosas de estabilidad precaria. Los avances en esta materia han sido aplicados en la determinación de umbrales críticos, definidos a partir de modelos físicos o estadísticos. Dado el historial de deslizamientos en la zona de la ruta CH-156, se hace imprescindible establecer umbrales críticos de precipitación, pues el prever un deslizamiento que no afecte la serviciabilidad de la ruta mejorará la seguridad y gestión de recursos para la vía.

Se escoge un procedimiento empírico, en el cual se construye una base de datos de movimientos en masa y una de datos de precipitaciones, se estimaron lluvia acumulada –LA-(1, 3, 5 y 7 días) y la lluvia acumulada antecedente-LAA-(5, 10, 15, 30, 60 y 90 días) para cada movimiento en masa; se obtiene umbrales críticos y se propone un valor de umbral característico que concentre un valor de centro de masa de los eventos registrados. Los datos indican que los umbrales mínimo es de 10mm para LA de 5días y 27mm de LAA; el umbral máximo 43 mm para LA y 370mm para LAA. Sin embargo, se considera evaluar con más detalle este tipo de umbrales, ya que no se consideran los días que sobrepasado el umbral no se presentaron deslizamientos.

Palabras clave: umbral, empírico, lluvia, movimiento en masa.

7750(palabras)+8*250figuras+1*250tablas=10000 palabras.

1. INTRODUCCION

En este capítulo se presenta una introducción al trabajo desarrollado en cuanto a la identificación del problema, más algunas descripciones necesarias que sustentan la decisión de investigar. Se presentan además objetivo general, objetivos específicos y alcance.

1.2 Umbrales de Precipitación para la predicción de deslizamientos de taludes

Un umbral es el nivel mínimo o máximo de alguna cantidad necesaria para un proceso que tendrá lugar o un cambio de estado (White et al., 1996). Un umbral mínimo define el nivel mínimo por debajo del cual un proceso no se produce. Un umbral máximo representa el nivel por encima del cual un proceso siempre se produce. Por deslizamientos inducidos por lluvia un umbral puede definir la lluvia, la humedad del suelo, o condiciones hidrológicas que, cuando se alcance o se supere, son propensos a desencadenar deslizamientos de tierra. Los umbrales de lluvia se pueden definir en físicos (basado en el proceso, conceptual) o empíricos (basados en registros históricos, estadísticos). Los parámetros de las precipitaciones más comúnmente investigados son: Precipitación total acumulada, Lluvia antecedente, intensidad de las precipitaciones y duración de las lluvias (Ramírez 2010).

Los movimientos en masa son el producto de la reducción progresiva de las resistencias de los geomateriales, tales como meteorización y levantamientos tectónicos, y actividades humanas (Soeters y Van Westen, 1996) y son detonados por factores externos, como la precipitación o los sismos (Wang y Sassa, 2003).

Por ello, los estudios referentes al pronóstico de lluvias, seguimiento en tiempo real de fenómenos potencialmente desastrosos y la definición de umbrales críticos de lluvia se han convertido en herramientas fundamentales para la implementación de sistemas de alerta temprana.

1.3 Identificación del Problema

Los movimientos en masa son eventos potencialmente desastrosos que han ocasionado cuantiosas pérdidas humanas y económicas alrededor del mundo; de acuerdo a las estadísticas presentadas por la CRED (2012), en el año 2011 se han presentado 332 desastres de origen natural alrededor del mundo afectando 244,7 millones de personas que dejaron pérdidas económicas superiores a 246.800 millones de dólares. Del total de desastres ocurridos, el 52,1% corresponden a eventos de origen hidrometeorológico que aportaron un 57,1% del total de víctimas. Estos datos permiten dimensionar la magnitud de la problemática, con el agravante de que una de las principales consecuencias asociadas al cambio climático está en el incremento en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos.

El camino de la Madera es un escenario altamente vulnerable a sufrir afecciones por movimiento en masa, debido a sus características topográficas, puesto en evidencia para los temporales de invierno de 2004, 2006 y 2009, donde el servicio ha tenido que ser interrumpido provocando serios problemas de conectividad; cabe recordar que la ruta de la madera tiene una longitud de 108,4 km, cuyo eje vial principal conecta a las comunas de San Pedro de la Paz y Concepción, con las de Santa Juana, Nacimiento y Coihue, y con los puertos de la región.

En este sentido, esta investigación propone nuevos umbrales críticos de lluvia acumulada y una propuesta de umbral promedio en donde se concentra la mayor concentración de eventos de deslizamientos para el pronóstico de amenaza por deslizamiento de taludes en la ruta 156, a partir de una base de datos de movimiento de masa reportados desde el año 2004 y registrados por la empresa concesionaria “Camino de la Madera S.A”, con el propósito de incorporarlo en la definición en un futuro proyecto de alertas por movimientos de masa detonados por lluvia en la región del Bío Bío.

1.4 Objetivos del Estudio

1.4.1 Objetivo principal

- Establecer un Umbral empírico de precipitaciones para la ruta 156, con el fin de predecir movimientos en masa que afecten la serviciabilidad de la carretera.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar y caracterizar datos de deslizamientos en la ruta 156, según catastro histórico de la empresa concesionaria del camino de la madera.
- Seleccionar metodología para la obtención de umbrales empíricos y comparar con propuesta de concentración de eventos.
- Determinar las precipitaciones necesarias para un deslizamiento de talud que afecte la serviciabilidad de la ruta 156.

1.5 Alcances del Proyecto de Título

En el desarrollo de este trabajo se han considerado los siguientes alcances:

- Los movimientos en masa considerados en el estudio se suponen detonados por lluvia, no obstante otros componentes, principalmente el antrópico, también están asociados a su ocurrencia.
- El área de influencia correspondiente a cada estación de la red hidrometeorológica está determinada en gran medida dada la cercanía de la ruta a las estaciones pluviométricas que no tienen en cuenta la elevación del terreno.
- Los umbrales críticos de lluvia se determinaron visualmente a partir de los patrones de dispersión de los deslizamientos, obtenidos de las diferentes combinaciones de lluvia acumulada y antecedente, de manera que fuese posible establecer la relación entre la ocurrencia de los eventos y la lluvia antecedente.
- Como limitación final es importante destacar que el presente análisis solamente considera los días en los cuales ocurrieron movimiento en masa. No se consideran aquellas días en los cuales, superados los umbrales, no se presentaron movimientos en masa.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

En este capítulo se describen los conceptos básicos asociados al estudio de este proyecto de título, a través de un resumen de los principales conceptos y de investigaciones realizadas anteriormente. El objetivo de este capítulo, es identificar cuáles son las variables que afectan a los deslizamientos debido a precipitaciones y caracterización de los umbrales.

2.1 Descripción del fenómeno de Movimiento en masa debido a precipitaciones

Los deslizamientos de tierra causados por lluvia pueden ser generados por la activación de dos mecanismos: la reducción en la resistencia al corte del suelo debido al incremento de la presión de poro y/o debido a la erosión causada en la superficie por el flujo de lodos (Nadim et al., 2009). Mediciones de campo indican que en su fase inicial, el deslizamiento de tierra se desarrolla típicamente sobre una capa impermeable que puede ser la roca de sustentación o una capa de arcilla impermeable. La resistencia al cortante es controlada entonces por la variación de la presión de poro, la cual a su vez es controlada por el proceso de infiltración a través del talud. Por otro lado, durante una lluvia intensa el flujo de agua puede inducir esfuerzos de corte en la superficie del talud producto de la velocidad de arrastre del flujo de lodos. En este caso, dependiendo de la distribución granulométrica y la densidad específica del material se puede iniciar un proceso de erosión cuando se excede un valor crítico de flujo de agua.

Collins y Znidarcic(2004) proponen dos distintos mecanismos de falla generados por la infiltración de lluvia. En el primer mecanismo la falla ocurre por el aumento en la presión de poros positiva originando licuefacción del material, en tanto que en el segundo mecanismo la falla ocurre a presiones de poros negativas donde el material está aún en estado no saturado y la falla ocurre por reducción de la succión y la masa se comporta en forma similar a un cuerpo rígido. Los suelos de grano fino no tienden a desarrollar presiones de poros positivas y la falla ocurre en general por reducción de la resistencia al cortante causada por pérdidas de succión. Por lo regular los movimientos en masa superficiales están asociados con el desarrollo de presiones de poros positivas, mientras que los movimientos más profundos están asociados a pérdidas de succión.

2.2 Los Umbrales por Precipitación

Reichenbach et al. (1998) definieron el término umbral como el nivel mínimo o máximo de alguna cantidad a partir de la cual un proceso ocurre. En el caso de los umbrales de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa, el umbral mínimo representa la cantidad de lluvia por encima de la cual la probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa se incrementa drásticamente, en tanto que el umbral máximo corresponde a la cantidad de lluvia en la cual ha ocurrido el mayor porcentaje de movimientos en masa.

Las aproximaciones existentes para evaluar valores de umbral por precipitación de lluvia se definen de dos maneras; (a) usando métodos empíricos o estadísticos, muy conocidos dentro de los sistemas de alerta temprana por su fácil implementación, (b) a partir de modelos físicos numéricos, de mayor complejidad en su definición y aplicación (Ramírez, 2010).

Los umbrales definidos por métodos empíricos o estadísticos están basados en datos históricos de lluvias y de movimiento de masa, en general estos métodos relacionan la ocurrencia del evento con la intensidad de lluvia, la duración de la lluvia o la lluvia acumulada antecedente (Ramírez, 2010).

Los umbrales se obtienen habitualmente mediante el trazado de líneas de límite inferior a las condiciones de lluvia que provocado deslizamientos de tierra trazada en coordenadas cartesianas, semi-logarítmicas o logarítmicas. Más comúnmente, los umbrales se dibujan visualmente, es decir, sin ninguna rigurosa matemática, estadísticas, o criterio físico. Guzzetti(2010).

Por otro lado, los umbrales definidos por métodos físicos están basados en modelos numéricos que incorporan el resultado de análisis hidrológicos y geotécnicos que relacionan lluvias, infiltración, presiones de poros y estabilidad de vertientes; para desarrollar este tipo de umbrales se requiere información hidrológica, litológica, morfológica y las características de los suelos que controlan la activación de los movimientos en masa.

En este sentido la combinación de modelos empíricos con modelos físicos permite una adecuada caracterización de la amenaza en términos de probabilidades de ocurrencia en tiempo y espacio.

Los parámetros de la precipitación más investigados en la generación de los movimientos en masa son la lluvia total acumulada, la lluvia antecedente, la intensidad y la duración. A partir de estos parámetros y la combinación de ellos, los umbrales críticos se definen en función de: (a) la

intensidad de lluvia, (b) la duración de la lluvia, (c) la relación intensidad y duración, (d) la lluvia total acumulada en un periodo determinado, (e) la relación entre la lluvia antecedente y la lluvia diaria y (f) la relación entre la lluvia total acumulada y la lluvia promedio anual (Guzzetti, Peruccacci y Rossi, 2005).

En ese sentido los umbrales pueden ser divididos en globales, regionales y locales. los umbrales global intentan establecer un mínimo general por debajo del cual es la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa es baja, independiente de las condiciones regionales y locales de orden litológico, morfológico y del uso del suelo; así como el patrón o comportamiento histórico de las lluvias. Por su parte, los umbrales regionales han sido definidos para áreas que alcanzan hasta miles de kilómetros cuadrados, caracterizadas por presentar condiciones fisiográficas geológica y meteorológica similares. Finalmente los umbrales locales se han definido para áreas que comprenden desde pocos hasta cientos de kilómetros cuadrados, considerando principalmente el régimen climático y el entorno geomorfológico local.

Una limitación de los umbrales de Identificación regionales y locales es el hecho de que los umbrales definidos para una específica región o zona no se pueden exportar fácilmente a las regiones vecinas o áreas similares (Crosta, 1989). Además de las diferencias morfológicas y litológica, esto es debido a la meteorología (Jakob y Weatherly, 2003) y la variabilidad del clima, que no se considera en los umbrales de identificación determinados mediante el estudio de los eventos de lluvia individuales.

2.3 Valores de lluvia antecedente y lluvia acumulada antecedentes de otros autores

Una forma sencilla de utilizar las mediciones de precipitación antecedente consiste en establecer un umbral sobre la base de la cantidad de la precipitación antecedente. Govi et al. (1985) determinaron que 60 días de precipitaciones antecedentes son necesarios para desencadenar deslizamientos de tierra en la región de Piamonte, Italia cuyos resultados variaron estacionalmente con una valor mínimo de 140 mm, y que la precipitación total (es decir, antecedente y precipitaciones de eventos) necesaria para iniciar fallas de pendientes era de al menos 300mm. Cardinali et al. (2005) estableció que deslizamientos de tierra en el suroeste de Umbria, Italia central, es probable que se produzcan movimientos en masa cuando la precipitación antecedente excede los 590 mm durante un período de 3 meses, o 700 mm a lo largo de un período de 4 meses.

Las relaciones más complejas entre la precipitación antecedente y la precipitación del evento han sido propuestas. Pasuto y Silvano (1989), trabajando en el noreste de Italia, examinaron precipitaciones antecedentes para diferentes períodos y la precipitación de eventos de 2 días, y fue relacionado con la ocurrencia de eventos de deslizamientos pasados. Estos autores establecen que cuando la lluvia antecedente de 15 días superó los 200 mm el aumento de deslizamientos de tierra en la cuenca del río Cordevole, dependía de las lluvias de eventos de 2 días. Cuando éste superó los 200 mm, siempre se produjeron deslizamientos de tierra, en el intervalo de 100 y 150 mm, se produjeron deslizamientos de tierra un 57% de las veces, y cuando fue menos de 70 mm raramente ocurrieron deslizamientos de tierra. Kim et al. (1991), en Korea, encontró una relación a la lluvia acumulada de 3 días antes del evento desencadenante con el total de precipitación diaria para el día de la falla de los taludes, y se determinó que los deslizamientos en el centro de Corea del Sur fueron influenciados por la precipitación antecedente, mientras que deslizamientos de tierra en el sur de Corea del Sur fueron controlados por la cantidad y la intensidad de la precipitación diaria. De Vita (2000), con su trabajo en el sur Italia, también relaciona la precipitación total diaria para el día del derrumbe con la precipitación antecedente, por períodos de 1 a 60 días. Este autor establece que para la precipitación antecedente en el rango entre 1 y 19 días antes del deslizamiento de tierra, las lluvias diarias necesarias para desencadenar el evento existe una disminución de la cantidad de la precipitación antecedente. Si se consideran períodos más largos, la precipitaciones diarias requeridas para iniciar deslizamientos de tierra primero disminuyeron y luego se estabilizaron a aproximadamente a 50 mm.

Chleborad (2003), trabajando en el área de Seattle, USA; estableció un umbral de lluvia para predecir con 3 días o más, deslizamientos de tierra sobre la base de dos mediciones de precipitación: la precipitación antecedente de 3 días, y la precipitación total para el período de 15 días antes de la precipitación de eventos de 3 días (Es decir, la precipitación antecedente). Heyerdahl et al. (2003), que trabaja en Nicaragua y El Salvador, definen un umbral para la activación de lahares basado en la precipitación por hora críticos y la precipitación antecedente para un período de 4 días. Para la región del Piamonte, Aleotti (2004) define umbrales de iniciación de deslizamientos basado en la precipitación críticos normalizados entre 7 y 10 días de precipitaciones antecedentes normalizadas. Gabet et al. (2004), trabajando en el Himalaya, ha determinado un umbral empírico para el desencadenamiento de aludes que se basa en la precipitación diaria y acumulada; estos autores determinaron que con un mínimo de 528mm

acumulados de precipitación antecedente y una precipitación diaria mínima de 9 mm deberán ser superadas antes que los derrumbes se desencadenen.

2.4 Periodos de precipitación usados por otros autores

Al usar antecedentes lluvia-mediciones para predecir la ocurrencia de deslizamientos, una dificultad fundamental es la definición del período en el que la acumulación de la precipitación es crítica. La revisión de la literatura revela una dispersión significativa en los períodos considerados. Kim et al. (1991) consideró 3 días, Heyerdahl et al. (2003) consideró 4 días, Crozier (1999) y Glade et al. (2000) considera 10 días, Aleotti (2004) seleccionó 7, 10 y 15 días, y Chleborad (2003) utilizó 18 días (lluvia evento de 3 días y de 15 días precipitaciones antecedente). Terlien (1998) probó 2, 5, 15 y 25 días y se encontró mejores resultados para los períodos más largos de lluvia. De Vita (2000) utiliza períodos antecedentes del 1 a 59 días. Pasuto y Silvano (1989) probó períodos de lluvia de 1 a 120 días, y encontró mejor correlación de la ocurrencia de deslizamientos de tierra con la precipitación antecedente de 15 días. Cardinali et al. (2005) hallaron una correlación entre la ocurrencia de deslizamientos a los 3 meses y la precipitación antecedente de 4 meses.

Esta gran variabilidad puede atribuirse a diferentes factores, incluyendo: (i) diversidad litológica, morfológica, la vegetación y las condiciones del suelo, (ii) los diferentes regímenes climáticos y las circunstancias meteorológicas que conduce la pendiente a inestabilidad, (iii) y la heterogeneidad y el carácter incompleto de los datos de lluvia y deslizamientos de tierra utilizados para determinar los umbrales.

2.5 Realidad Regional

Aunque los umbrales críticos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa han sido ampliamente incorporados en los principales sistemas de alerta temprana por movimientos en masa que operan en el mundo, en Chile, y específicamente en la región del Bío Bío, pocos estudios se han llevado a cabo referente a la influencia de la lluvia como factor desencadenante. Sólo a partir del 2009, gracias al interés del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad del Bío Bío en investigar sobre los eventos catastróficos ocurridos en la década del 2000, se gestó la iniciativa de crear un plan de monitoreo y mantenimiento de taludes para la comuna de Chiguayante (Rivera, 2010) que a la par, Ramírez et al.(2010) generó un estado del arte con respecto a la importancia de la relación lluvia-deslizamientos, informando y dando referencias de estudios internacionales como base a una futura línea investigativa ; luego en el 2011 con el trabajo realizado por Astorga(2010) generó el primer umbral empírico para la autopista del Itata y así abrir el camino para que estos estudios puedan ser incorporados a un sistema de alerta temprana para cooperar con la ONEMI en asuntos preventivos.

3. ASPECTOS METODOLÓGICOS

A continuación se señalan los pasos necesarios para el cumplimiento del objetivo general de este proyecto de título, que es determinar un umbral empírico de precipitación para el camino de la madera, con el fin de predecir deslizamientos en éste sector que afecten la serviciabilidad de la ruta. En primer lugar se explica la metodología adoptada para la obtención de los umbrales, luego se establece como se escoge el tipo de umbral y posteriormente se desarrollan cada uno de los pasos mencionados en la metodología de manera más específica y detallada.

El análisis de umbrales críticos de lluvia para el pronóstico de la amenaza por movimientos en masa en la ruta de la madera, se realizó mediante un procedimiento empírico, en el cual se construyó una base de datos de deslizamientos (1079 datos) con su respectivo tonelaje y se usó una base de datos de precipitación con registros diarios, que pueden observarse en los anexos B2; posteriormente a cada movimiento en masa se le asignó una serie de precipitación histórica correspondiente a la estación de lluvia que comprendiera el área de influencia del lugar donde ocurrió el evento, finalmente se calcularon la lluvia acumulada (1, 3, 5 y 7 días) y la lluvia acumulada antecedente (5, 10, 15, 30 y 90 días) para cada movimiento masa, como lo muestra la figura 1.

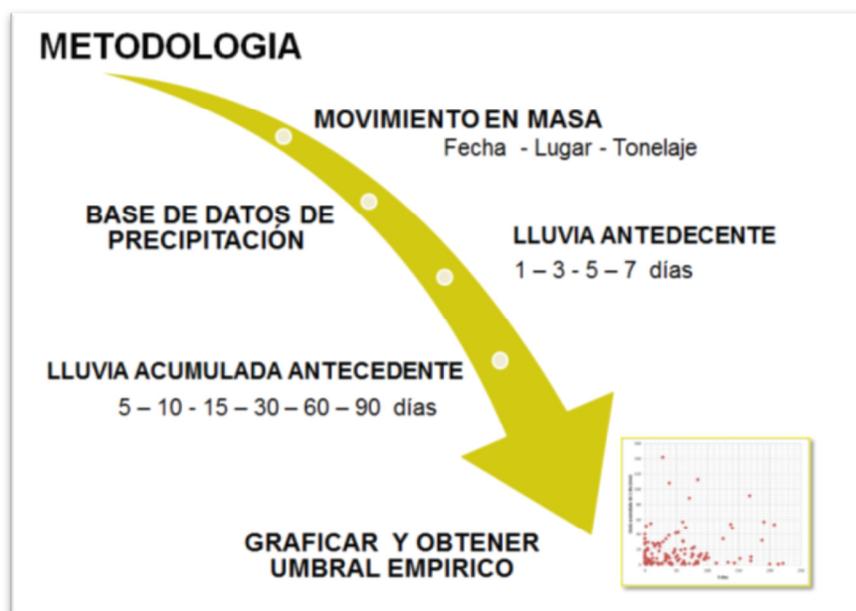


Figura 1. Modelo que representa la metodología para la obtención de umbral empírico de precipitación para la predicción de movimientos en masa para la ruta de la madera, (ruta 156). Fuente propia.

Dado que la confección de los umbrales empíricos son llevados a cabo sin rigurosidad matemática, estadístico o físico (Ramírez 2010); se desarrolla diferentes gráficos debido a las combinaciones de lluvia acumulada y lluvia acumulada antecedente, de los cuales se ha de obtener los umbrales críticos. Para el umbral máximo es necesario tabular los datos en un gráfico cartesiano, se debe dibujar una línea recta en forma visual de manera que la mayor cantidad de puntos queden limitados por ella. Ésta indicará el umbral por debajo del cual ya ha ocurrido el gran porcentaje de movimientos en masa, como se ve en la figura 2; para el caso del umbral mínimo la recta que se dibuja debe limitar el comienzo de la acumulación de puntos, cuando sea posible; de manera que la mayor cantidad de puntos quede sobre esta recta; luego para las mismas combinaciones de lluvia acumulada y lluvia antecedente se tabulan los datos en un gráfico tipo log-log; en donde los ejes están en logaritmo base 10; luego se dibujará un paralelogramo regular en donde se encuentre la mayor concentración de puntos de manera que al obtener el centro de masa de dicho polígono, se pueda estimar un valor central en donde es más común que ocurran deslizamientos; Además es necesario que cada gráfico identifique en un cuadro superior derecho el porcentaje de eventos el cual delimita; la idea es comparar estos umbrales y definir lo útil de saber estos valores.

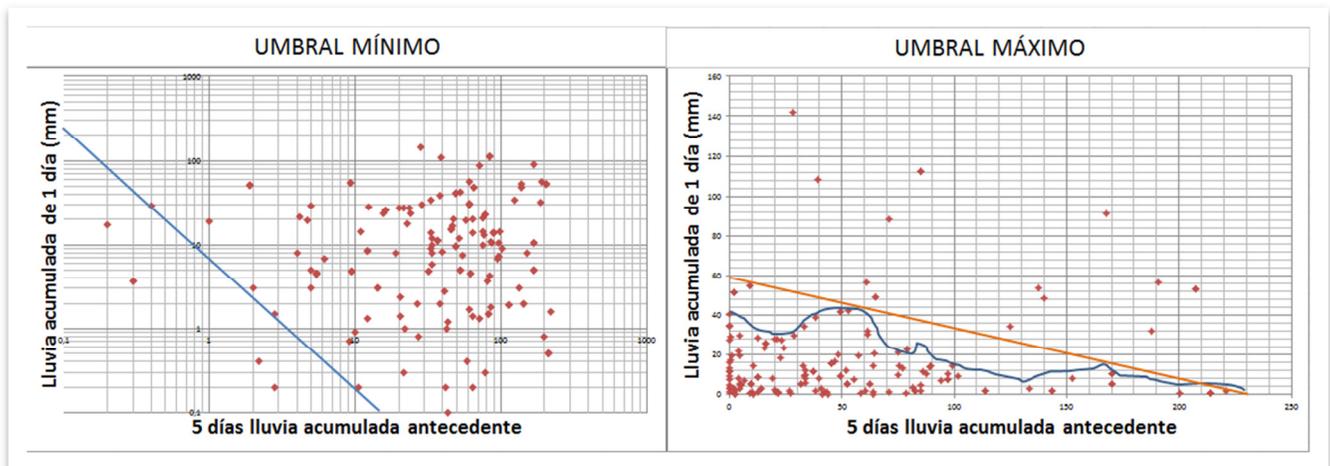


Figura 2. Comparación entre gráficos Log-Log y Cartesiano. (Fuente: Elaboración propia).

Ante este escenario, Se propone que tras el análisis de estos umbrales, se indique claramente cuál es la combinación de lluvia acumulada y lluvia acumulada antecedente que mejor representaría la zona de la ruta 156 y qué umbral es el que permitirá ser usado en un posterior sistema de alerta temprana.

La distribución anual de los deslizamientos reportados para esta investigación es representada por el período lluvioso anual de la región, los cuales corresponde a los meses de invierno, desde mayo hasta septiembre, lo que tiene una incidencia directa sobre el número de movimientos en masa ocurridos cada mes. La figura 3 ilustra este comportamiento.

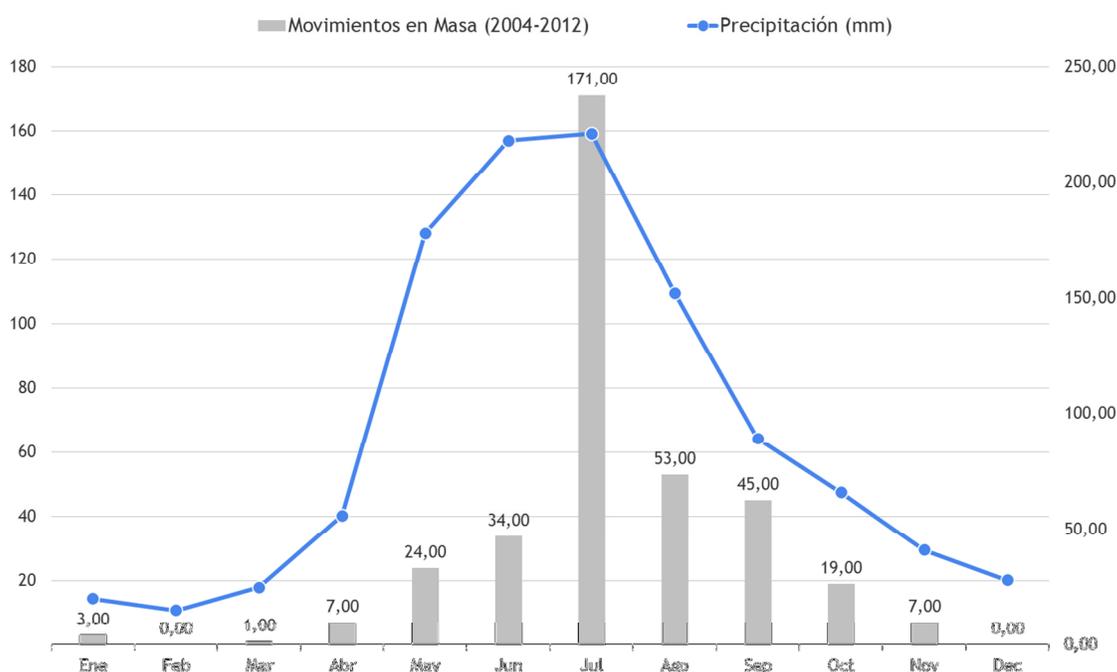


Figura 3. Relación entre la precipitación media mensual en Concepción y los movimientos en masa del periodo 2004-2012. Fuente Propia.

En esta instancia, vale aclarar que tanto para los valores de LA y LAA son calculados según las series de lluvia correspondientes a los días anteriores a cada suceso analizado, es decir, ambos valores podrían tener o no umbrales mínimos cercanos a cero. La distribución de precipitación media de la figura 3 no tiene ninguna relación de ninguna clase con el cálculo de LAA, es decir, no son los valores de lluvia del mes calendario anterior a la ocurrencia del evento los que se consideran en el cálculo de los 30 días de LAA, sino la suma aritmética de los 30 días anteriores.

3.1 Base de Datos de movimientos en masa

Se construyó una base de datos de movimientos en masa detonados por lluvia ocurridos en la ruta 156, a partir informes semestrales para el Ministerio de Obras públicas (MOP) llevadas a cabo por la Concesionaria “Camino de la Madera” desde 2004 hasta 2012; cuyos informes se refieren al ítem “derrumbes” en la cual tienen registro de la fecha y la cantidad de toneladas del retiro de material; se encuentran 1079 registros de movimientos en masa.

Dicha base de datos se depuró usando cuatro criterios: (a) eventos ocurridos entre los años 2004-2012 ya que en dicho periodo presenta mayor asiduidad en la recolección de los datos. (b) eventos en los cuales aparece como causa asociada la precipitación, (c) eventos con información espacial precisa de inicio y final del tramo de deslizamiento. (d) eventos cuyo tonelaje sea mayor a 50 T, pues un tonelaje menor a ésta se desprejará pues en costos y en interrupción de la ruta son considerados como mínimos para la concesionaria; y esto se refleja en la tabla n°1 del anexo A.1 que muestra el tonelaje y el riego en la ruta.

Aplicando estos cuatro criterios, los 1079 movimientos en masa se redujeron a 364 que cumplían satisfactoriamente los criterios de depuración descritos. De esta manera y gracias a la información de inicio y término del deslizamiento en la ruta, se logra filtrar los datos referenciándolos a 4 zonas del camino, que previamente han sido divididas en los informes semestrales de monitoreo Ambiental “Concesión del Camino de la Madera S.A” realizado desde 2007 por el Centro EULA-CHILE perteneciente a la Universidad de Concepción; es así que la ruta queda dividida en tramos de 0 a 25 km, 25 a 50 km, 50 a 75 km y 75 a 108 km. Con esta información es posible caracterizar los tipos de derrumbes según tonelaje y frecuencia de deslizamientos, por ende también permite determinar aquellas estaciones meteorológicas que se encuentren cerca del área de estudio.

3.2 Base de Datos de precipitación

Las series de precipitación histórica se construyeron a partir de los registros obtenidos de la red hidrometeorológica de la cuenca del Río Bío Bío pertenecientes al Dirección general de Aguas (DGA), con información de 4 estaciones de seguimiento instaladas en edificio DGA, desembocadura Hualqui, Laja y Los Ángeles. El registro de cada estación suministra información diaria de las precipitaciones.

Así como los movimientos en masa, se referencian a cada estación de lluvia y se determina el área de influencia, se considera homogénea la distribución de lluvias e igual a la de la estación en la que se mide. Esta hipótesis simplificadora es en rigor una fuente de error en la capacidad de predicción de los umbrales encontrados, la cual ha sido motivo de investigación para diversas universidades en Latinoamérica.

Es por esto, que la distribución de las estaciones queda dada como se muestra en la figura n°4, en la que se observa que para el tramo 1 se considerará las lluvias obtenidas por la DGA, para el tramo 2 se considerará las obtenidas desde Hualqui; para el tramo 3 se tomaran los datos de Laja y para el cuarto tramo se considerará los datos de Los Ángeles.

A partir del procesamiento de los datos de lluvia para cada una de las estaciones de la red hidrometeorológica, la cantidad de movimientos en masa para analizar la lluvia acumulada antecedente se redujeron, es decir, para todas las combinaciones de 1 día de lluvia acumulada, se reducen de 364 datos a 181; para las combinaciones de 3 días de lluvias acumulada se utilizan 288 de 364 datos; en cambio para las combinaciones de 5 días de lluvia acumulada se usan 317 de 364 datos y finalmente para las combinaciones de 7 días de lluvia acumulada se utilizan 333 de 364 datos; debido a que principalmente estos datos eliminados son iguales a cero; por ende, se explica que este movimiento en masa no se produciría por la lluvia.



Figura 4. Ilustración en la que se muestra influencia de las estaciones meteorológicas utilizadas y la subdivisión en tramos de ruta CH-156. Fuente propia en base a mapa DGA.

4. RESULTADOS Y OBSERVACIONES

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos tras la metodología propuesta, cumpliendo así con los objetivos trazados en esta investigación.

4.1 Caracterización Ruta 156

Cabe mencionar que Camino de la Madera es la denominación de la autovía chilena de peaje correspondiente a la Ruta CH-156, que recorre la región del Bío-Bío, en el Sur de Chile, con una longitud de 108.4 km desde San Pedro de la Paz hasta Coihue, bordeando el Río Bío Bío y pasando por el corazón de la Cordillera de Nahuelbuta.

Corresponde a la Concesión *Camino de La Madera Sociedad Concesionaria S.A.*, la primera concesión de carreteras efectuada en el país. Esta concesión se encuentra en tela de juicio producto de repetidos derrumbes en el trazado a raíz de las constantes inundaciones provocadas por las crecidas del río Biobío, y la inseguridad del trazado sumamente sinuoso y altamente utilizado por camiones que transportan madera y productos de la actividad papelera y forestal.

Por lo anterior, estudiar la ruta se hace de gran interés, y dada a la calidad de la información histórica obtenida de la Concesionaria del Camino de la Madera, es posible caracterizar los tipos de deslizamientos en cantidad, localización y tonelaje usados en la investigación llevada a cabo por esta proyecto de título; por ellos, a continuación se muestran los diferentes resultados obtenidos y las gráficas puede se encuentran disponibles en el Anexo A1.

De los 364 derrumbes, el 48% corresponde a eventos localizados en el primer tramo de la ruta, que comprende los primeros 25 kilómetros, luego 21% de los deslizamientos atañe al tramo 4, que comprende desde el kilómetro 75 hasta 108,4; le sigue con un 19% el tramo 3 que comprende el kilómetro 50 hasta el 75 km y finalmente con un 12% el tramo 2. Haciendo una segmentación por tonelaje, cabe destacar la coherencia en la preponderancia de los deslizamientos en el tramo 1; en el cual, para los diferentes tonelajes tiene el mayor números de deslizamientos, en cambio el tramo 2 destaca por la menor cantidad de deslizamientos para todos los tonelajes.

4.2 Definición De Umbrales Críticos De Lluvia

A continuación se presenta los umbrales obtenidos al seguir la metodología planteada anteriormente, determinando los umbrales de lluvia, para este caso máximos y a través de nuestra propuesta del centro de masa de un polígono regular se ha de encontrar la lluvia acumulada y lluvia antecedente que mejor representa a la Ruta CH-156.

En primera instancia, observando las gráficas se ha de explicar que las líneas oscuras representan los umbrales máximos de lluvia ajustados visualmente, a partir de los cuales se presenta el mayor número de movimientos en masa o hasta el cual ya se han presentado la mayor parte de movimientos en masa. En el cuadro superior derecho se presenta el porcentaje con respecto al número total de movimientos en masa que se encuentran dentro de un umbral.

Luego, las figuras 5, 6, 7 y 8 presentan las posibles combinaciones de lluvia acumulada de 1, 3, 5 y 7 días contra la lluvia acumulada antecedente de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días, evaluadas para cada uno de los 364 movimientos en masa para la obtención de umbrales máximos. La Lluvia acumulada (LA), o lluvia de corto plazo, representa la cantidad de lluvia caída en los días inmediatamente previos a la ocurrencia del evento, incluyendo las 24 horas del día de su ocurrencia, mientras que la Lluvia Acumulada Antecedente (LAA), o lluvia del largo plazo, corresponde a la cantidad de lluvia caída en los días precedentes a los que se consideraron en la Lluvia Acumulada (LA).

La LA de 1 día presenta un umbral máximo de 28 mm para todas las combinaciones de lluvia. En tanto que la LAA presenta un máximo que se incrementa a partir de 101mm para la LAA de 5 días hasta 850 mm para la LAA de 90 días.

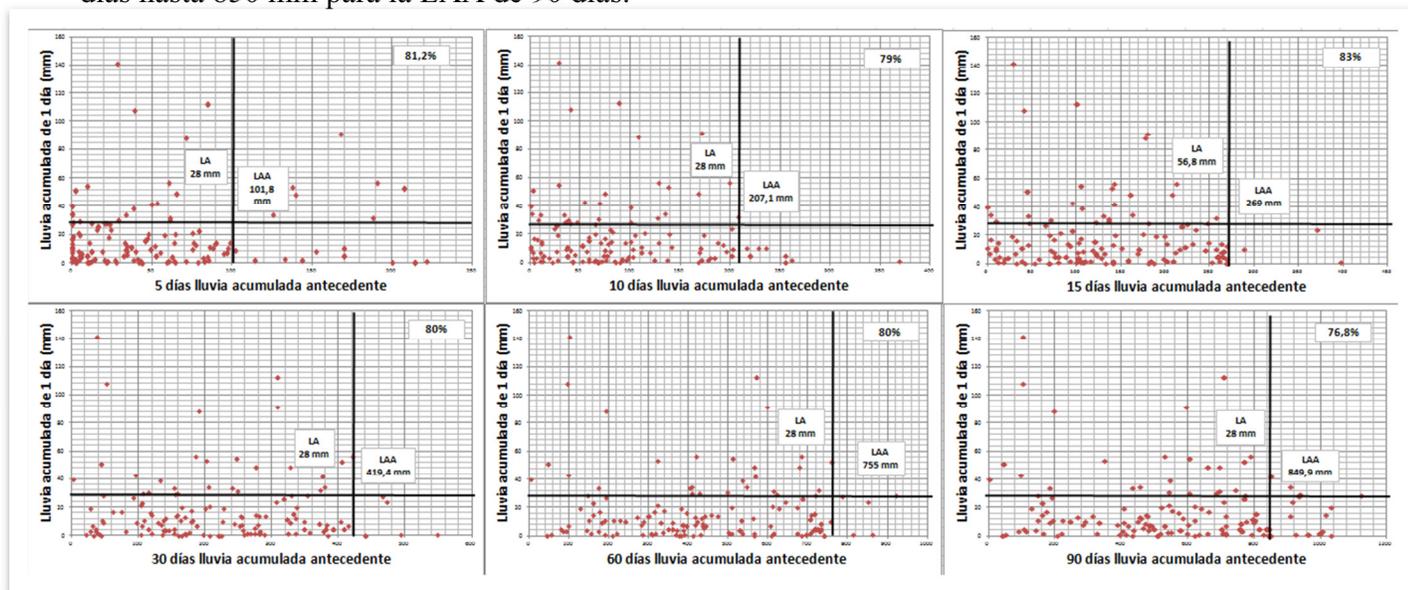


Figura 5. Lluvia Acumulada (LA) de 1 día contra la Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días a la lluvia acumulada (LA) de 1 día. Fuente propia.

La LA de 3 días presenta un umbral máximo de 43 mm para todas las combinaciones de lluvia, por debajo del cual ha ocurrido más del 79% de los deslizamientos. En tanto que la LAA presenta un máximo que se incrementa a partir de 102mm para la LAA de 5 días hasta 935 mm para la LAA de 90 días con un 82% de eventos que ya han ocurrido por debajo de este valor.

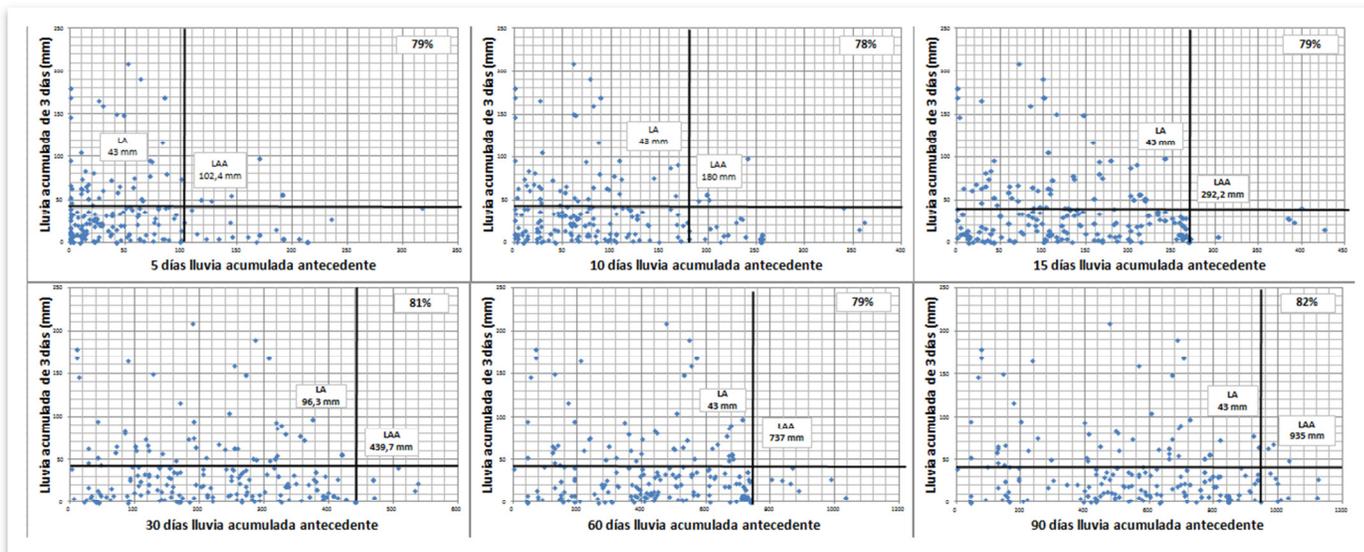


Figura 6. Lluvia Acumulada (LA) de 3 días contra la Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días a la lluvia acumulada (LA) de 3 días. Fuente propia.

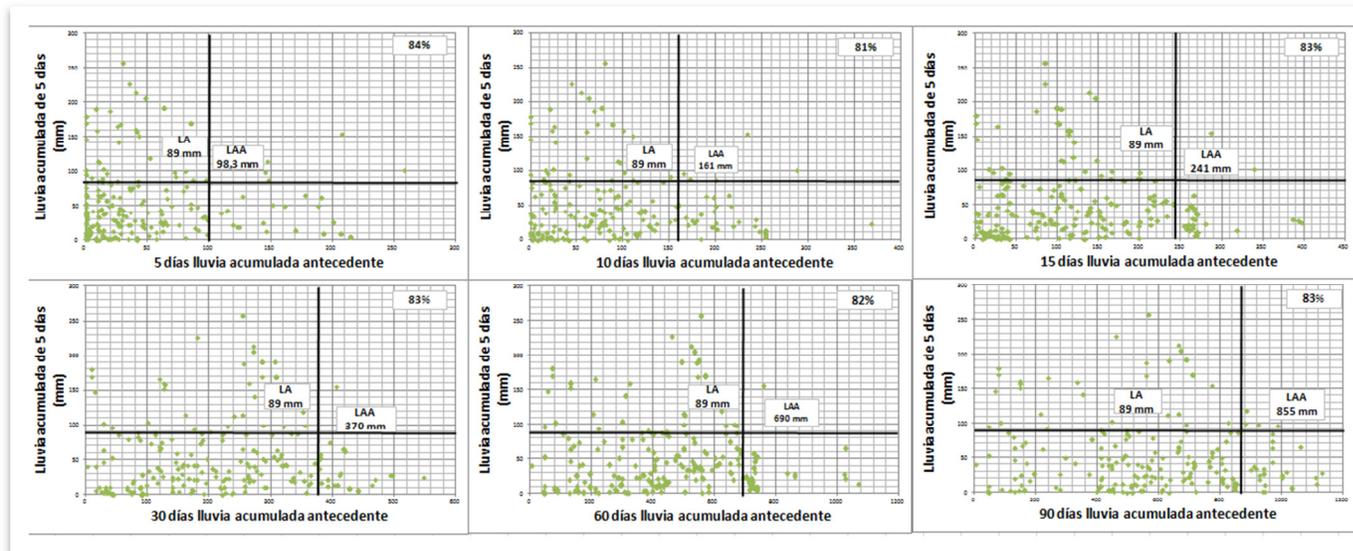


Figura 7. Lluvia Acumulada (LA) de 5 días contra la Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días a la lluvia acumulada (LA) de 5 días. Fuente propia.

La LA de 5 días (figura 7) presenta un umbral máximo de 89 mm para todas las combinaciones de lluvia. En tanto que la LAA presenta un máximo que se incrementa a partir de 98 mm para la LAA de 5 días hasta 855 mm para la LAA de 90 días.

Finalmente, la LA de 7 días presenta un umbral máximo de 127 mm para todas las combinaciones de lluvia. En tanto que la LAA presenta un máximo que se incrementa a partir de 90 mm para la LAA de 5 días hasta 850 mm para la LAA de 90 días.

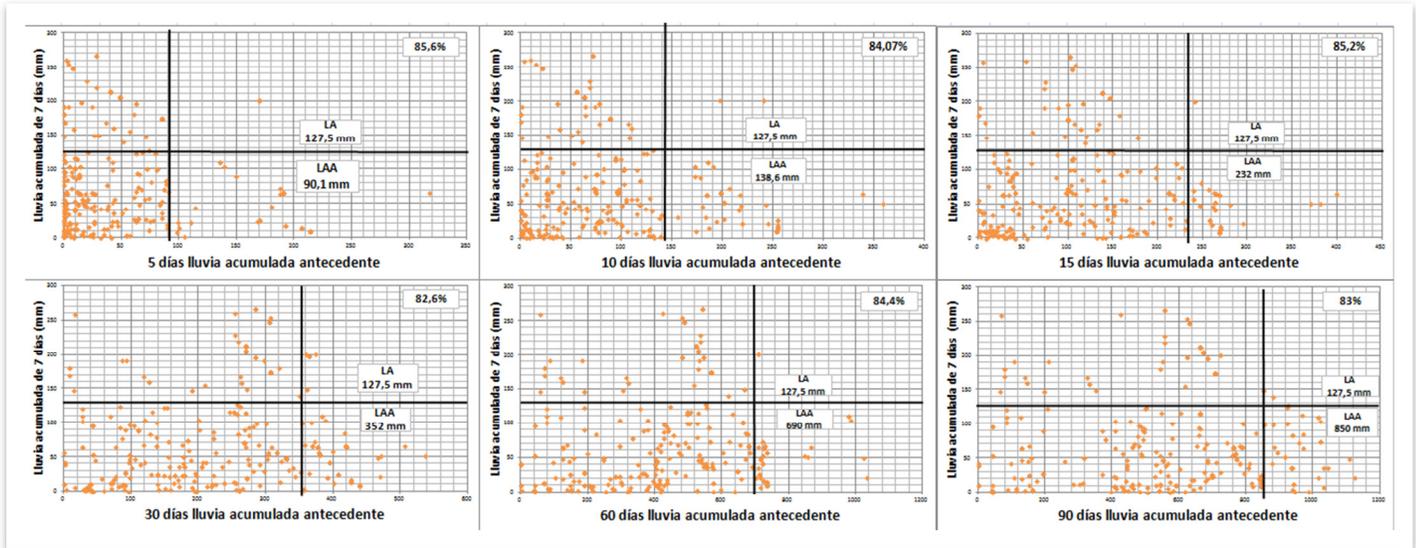


Figura 8. Lluvia Acumulada (LA) de 7 días contra la Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días a la lluvia acumulada (LA) de 7 días. Fuente propia

En términos generales, el umbral máximo de lluvia acumulada (LA) o lluvia de corto plazo varía entre 28 mm cuando se considera 1 día y puede llegar a aumentar hasta 127mm cuando se consideran 7 días, cabe destacar que para cada combinación aumenta la lluvia acumulada al doble del valor anterior, pues para de los 3 días aumenta en 20 mm; para los 5 días aumenta a 46 mm y casi 85 mm para la LA de una semana.

El umbral máximo de lluvia Acumulada Antecedente (LAA) o lluvia de largo plazo, varías desde 90 mm hasta 935 mm el primero registrado para 7 días y el último para los 3 días.

Un elemento importante para destacar es que las combinaciones de lluvia que consideran días de LAA inferiores a 15 días no logran establecer umbrales mínimos de lluvia, solamente cuando se consideran periodos mayores, a partir de 30 días, es posible diferenciar umbrales mínimos similares para todas las combinaciones de lluvia.

Para las combinaciones de 1 día de LA se tiene un umbral mínimo de 1,5 mm mientras que la LAA necesaria para iniciar proceso de deslizamientos va desde 26 mm para 30 días hasta 90 mm para 90 días de LAA.

Para las combinaciones de 3 días de LA se tiene un umbral mínimo de 5 mm mientras que la LAA se inicia desde 24 mm hasta 95 mm para el caso de los 90 días de LAA.

Para las combinaciones de 5 días de LA se tiene un umbral mínimo de 10 mm al igual que las combinaciones para 7 días; mientras tanto LAA comienza con 27mm hasta 43 mm en el caso de la LA de 5 días y desde 24 hasta 95 para el caso de LA de 7 días.

4.3 Propuesta De Centro De Masa Como Umbral

Como parte de una propuesta local, se propone obtener valores de lluvia acumulada y lluvia acumulada antecedente para una nube de puntos dentro de un gráfico log-log, en ella se dibujará un paralelogramo de sección regular, para su fácil obtención del centro de masa, tratando de abarcar la presencia de mayor aglomeración de puntos, con la finalidad de que este valor entregue la combinación de lluvia acumulada y lluvia acumulada antecedente que mejor represente un umbral promedio para el inicio de deslizamientos para la ruta CH-156.

Las figuras del anexo B2, B4, B6 y B8 representan los gráficos antes mencionados con distintas combinaciones de LA y LAA, cuyos resultados se han tabulados para hacer una comparación entre los valores de los Umbrales máximos y mínimos, con los valores de centro de masa, que se presentan en la tabla n°2.

La LA de 1 día presenta un centro de masa desde 70 mm y va disminuyendo hasta 27 mm para los 90 días de LA, por lo que al aumentar la cantidad de días en la LAA disminuye la precipitación diaria para la posibilidad de deslizamiento, mientras que el umbral para la LAA va aumentando desde 104 mm para 5 días hasta llegar a 323 mm a los 90 días.

Tabla 2. Resumen Lluvia acumulada y Lluvia acumulada antecedente para umbrales críticos y de centro de masa.

Gráfico		Centro masa		Umbral mínimo		Umbral máximo		
LA	LAA	LA	LAA	LA	LAA	LA	LAA	%
1	5	70,55	104,9	-	-	28	101,8	82%
	10	63,3	118,3	-	-	28	207,1	79%
	15	28	111,55	-	-	28	269	83%
	30	27,85	190,1	1,5	26	28	419,4	80%
	60	26,35	227,95	1,5	76	28	755	80%
	90	27,85	323,3	1,5	90	28	849,9	77%
3	5	56,9	95	-	-	43	102,4	79%
	10	46,1	108,85	-	-	43	180	78%
	15	118,95	105,35	-	-	43	292,2	79%
	30	49,1	152,15	5	24	43	439,7	81%
	60	51,3	234,05	5	72	43	737	79%
	90	48,05	332	5	95	43	935	82%
5	5	99,5	20,3	-	-	89	98,3	84%
	10	109,2	97,5	-	-	89	161	81%
	15	74,95	110,1	-	-	89	241	83%
	30	55,25	143,6	10	27	89	370	83%
	60	55,25	242	10	40	89	690	82%
	90	55,25	284,5	10	43	89	855	83%
7	5	91,2	40,5	-	-	127,5	90,1	86%
	10	127	44,65	-	-	127,5	138,6	84%
	15	26,2	103,35	-	-	127,5	269,2	85%
	30	130,25	234,3	10	26	127,5	439,7	83%
	60	130	273,5	10	78	127,5	737	84%
	90	130	402,5	10	83	127,5	1045,2	83%

A modo de observación queda que la propuesta de centro de masa como umbral de referencia, no tiene ninguna base bibliográfica y solamente responde a la inquietud del investigador, que cree pertinente hacer comparaciones del umbral máximo con alguna otra forma que no sea la de una recta máxima o mínima, cuyos valores no consideran la tendencia de los eventos.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se describe el análisis de los datos históricos obtenidos y procesados de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente. Se realizarán tres análisis uno sobre la caracterización de la ruta, otro con respecto a los umbrales críticos y al umbral de centro de masa, para finalmente terminar con un análisis de la comparación entre estos umbrales.

5.1 Análisis Caracterización de la Ruta CH-156

En consideración a los resultados obtenidos de la depuración de los datos, se destaca el primer tramo, que corresponde a los primeros 25km de la ruta, en la que predominan los deslizamientos con casi la mitad de los eventos de toda vía; además el 79% los deslizamientos mayores de 500 toneladas se producen en este tramo; lo que lleva a deducir que esta zona es de relevancia para estudios geomecánicos y de estabilidad de taludes, además de incorporar investigación acerca de la geomorfología y la hidrogeología del sector para un futuro umbral físico del sector.

5.2 Análisis Umbrales críticos

La definición de amenaza comprende un elemento fundamental: la probabilidad, en términos de tiempo y espacio. Estos umbrales empíricos o estadísticos, como son conocidos en la literatura son un excelente indicador de tiempo, ya que pretenden responder a la pregunta de cuándo ocurrirán los movimientos en masa, sin embargo, no intentan responder al segundo elemento, dónde ocurrirán. Para la aplicación de umbrales de lluvia empíricos es fundamental, además de encontrar los umbrales propios para cada región de acuerdo a sus condiciones locales, combinarlos con cartografía detallada de las condiciones de amenaza y vulnerabilidad de la región para la cual fueron definidos. Con estas herramientas sería posible con antelación tomar acciones preventivas y de mitigación que logren minimizar los impactos generados por la ocurrencia de los movimientos en masa.

En general, se observa que de los resultados obtenidos, la lluvia antecedente de los días más recientes a la ocurrencia del movimiento en masa permite diferenciar umbrales de lluvia máximos; mientras tanto los umbrales de lluvia mínimos solamente se diferencian cuando se consideran combinaciones de lluvia acumulada antecedente superiores a 30 días, y estos pertenecen constantes para cualquier combinación de LA.

El hecho de que no se logre diferenciar umbrales de lluvia mínimos para la LA y se presenten en masa desde valores de LA cercanos a los cero milímetros (0 mm) aparentemente indica una

mayor influencia de la LAA. Es decir, la lluvia de los días inmediatamente anterior a la ocurrencia de eventos en la ruta de la madera. El elemento fundamental en la ocurrencia de los movimientos en masa parece estar controlado por la lluvia estacional, es decir, la cantidad de lluvia que ha caído en el mes anterior (30 días de LAA), los dos meses anteriores (60 días de LAA) y los tres meses anteriores (90 días de LAA).

Los umbrales máximo de LA, para todas las combinaciones de lluvia antecedente, aparentemente indican la poca influencia de la lluvia inmediatamente anterior al evento. La combinación de 1 día de LA y 5 días de LAA (ver figura anexo B1) correspondería a la combinación que debe mostrar la influencia de la LA, ya que los días de lluvia antecedente considerados son muy pocos; en caso de existir una fuerte influencia de la LA o de la cantidad de lluvia que cae en sólo un evento, se debería observar puntos en la margen superior izquierda de la gráfica con registros de lluvia antecedente muy altos para 1 día (exceptos los puntos detonados para julio del 2006), por ende solo existen puntualidades y no generalidades. Además se presenta un umbral cercano a 30 mm, lo cual no representa un evento de lluvia capaz de incrementar por si solo las presiones de poro positivas o reducir la succión lo suficiente para detonar un movimiento en masa. Menos del 10% de los movimientos en masa ocurrieron bajo condiciones de lluvia mayores de 30 mm, es decir, probablemente tan solo este número de movimientos en masa, relativamente muy bajo, fue detonado por lluvias intensas en solo un día, sin importar la lluvia antecedente o las condiciones previas de presión de poros del talud. Es necesario también en este caso evaluar con detalle los resultados, ya que 30 mm en 24 horas podría no ser crítico, pero en términos de intensidad, es decir, en períodos más cortos, podrían ser eventos con la suficiente capacidad de detonar movimientos en masa sin importar las condiciones antecedentes.

De acuerdo con los porcentajes de movimientos en masa dentro de los umbrales de lluvia establecidos, se propone que las combinaciones de lluvia que consideran la LA de 5 días son las que mejor pueden representar los umbrales de lluvia, específicamente las combinaciones de LA de 5 días y LAA de 30, 60 y 90 días, bajo los argumentos: se mantienen valores cercanos de LAA para el umbral mínimo, para el umbral máximo tiene el mayor porcentaje de eventos bajo el umbral y las que tienen menos diferencia entre sí, el valor del umbral centro de masa se encuentra a la mitad del umbral máximo, lo que indicaría que los eventos tienden a iniciar el proceso de deslizamiento a la mitad de cantidad de agua de LAA; además que para las combinaciones de 5 días, disminuyen los valores iguales a ceros que son eliminados de la tabulación y su gráfica es

mejor con respecto a la de 7 días, pues en esta última se logra ver mayor dispersión de los eventos.

5.3 Análisis comparación de umbrales críticos y umbral de centro de masa.

En esta instancia, cabe destacar que los umbrales máximos son de poca utilidad para sistemas de alerta temprana, ya que solo indican el umbral por debajo del cual ya han ocurrido gran porcentaje de movimientos en masa. La situación es diferente para los umbrales mínimos, los cuales son determinantes para los sistemas de alerta temprana, ya que estos indican la cantidad de lluvia por encima de la cual se incrementan de modo drástico las probabilidades de ocurrencia de deslizamiento. Ante esto, nace la propuesta de generar un umbral a través del centro de masa de un polígono regular como forma de obtener una medida de tendencia central, que tiene carácter de investigativo y del afán de comparar valores de los umbrales críticos con la tendencia de ocurrencia de los deslizamientos, pues al ser muy extremos tienden a no concentrar lo que en tendencia ocurre.

En general, se desprende de la investigación que dicha propuesta debe mejorarse, tanto en metodología y en respaldo científico, pero aun así, este umbral de centro de masa nos permite determinar la distancia en que se encuentran los puntos más concentrados dentro de la gráfica con los umbrales, es decir, aporta en la disminución del umbral máximo y en el aumento del umbral mínimo sin la exageración de sacar un promedio entre estas últimas, dando un carácter más representativo a los movimientos en masa.

6. CONCLUSIONES

Tras el análisis realizado a los datos obtenidos de la concesionaria se concluye que la zona más afectada de la ruta es el primer tramo, que considera los primeros 25 kilómetros, pues concentra el 48% de los eventos más significativos que afectaron la serviciabilidad de la ruta.

Además, el presente estudio llevó a cabo un análisis para la determinación de umbrales críticos de lluvia, el método seleccionado fue el más utilizado, el método empírico, usando movimientos en masa y estaciones de lluvia cercanos a la ruta CH-156. Los resultados indican que el mayor condicionante para la ocurrencia de movimientos en masa en esta zona es la lluvia acumulada antecedente (LAA) o lluvia de largo plazo.

La combinación de LA más representativa para la ruta es la de 5 días, pues contiene a un 87% del total de los datos válidamente obtenidos, los porcentajes de probabilidad de ocurrencia son mayores al 81% para los umbrales críticos; mientras que la combinación de 30,60 y 90 días son más representativos para la lluvia acumulada antecedente, pues en ellas es fácilmente obtenible los umbrales críticos.

Considerando el umbral mínimo, los datos indican que los deslizamientos que afectarían la serviciabilidad de la ruta ocurrieron para LAA superiores a los 27 mm para 30 días, 40 mm para 60 días y 43mm para 90 días; esto se sugiere que en un sistema de alerta fuese considerado como una advertencia y se tomaran medidas de precaución.

Considerando el uso del método propuesto de centro de masa se obtiene que para las lluvias acumuladas antecedentes escogidos, se tiene que la tendencia es que para una lluvia acumulada de 55mm en 5 días se tiene una LAA de 143mm para 30 días, 242 mm para 60 días y 285 mm para 90 días; con estos datos se sugiere que en un sistema de alerta fuese considerado como una alerta inminente de deslizamiento.

En el caso de umbrales máximos, los resultados obtenidos para la combinación escogida son de una lluvia acumulada de 89 mm en 5 días y lluvia acumulada antecedente de 370 mm para 30 días, 690 mm para 60 días y 855 mm para 90 días; al ser superado estos valores, solo queda verificar donde ocurrió el deslizamiento para su posterior análisis.

7. OBSERVACIONES

Estos datos podrían proponerse como umbrales para la ruta CH-156, sin embargo, las limitaciones propias del método y de los datos exigen más investigaciones y trabajos de campo que verifiquen o rechacen las observaciones obtenidas a partir de los datos usados o de las nuevas bases de datos. Este tipo de análisis, ampliamente realizados en el mundo, en los cuales no se consideran los días de lluvia que no se presentaron movimientos en masa, limitan en gran medida las observaciones y conclusiones realizadas, ya que son claramente sesgados desde el punto de vista de los movimientos en masa, y no permiten conocer en realidad la importancia de los umbrales, pues no estiman el número de casos fallidos, en los cuales se supera el umbral y no se presenta deslizamientos, es decir, el porcentaje de error o capacidad de predicción.

Por ello, deberán emprenderse nuevos trabajos en este sentido, que permitan evaluar los umbrales críticos de lluvia basados en las series de lluvia, probabilidades de excedencia, y corroborando los días de evento o no evento en las bases de datos de movimientos en masa, este puede ser mejor acercamiento a la realidad de los umbrales de lluvia críticos definidos por métodos empíricos.

Además se debe mejorar el procedimiento y metodología para la utilización del umbral de centro de masa, para generar una propuesta de tendencia de los eventos ocurridos en una zona específica o tal vez crear una nueva generando más opciones dentro de los umbrales empíricos.

Debido a que los umbrales revisten una gran importancia en los sistemas de alertas tempranas, se sugiere avanzar en la generación de propuestas, que permitan predecir movimientos en masa debido a precipitaciones basados en umbrales tanto empíricos como físicos dentro de la región.

8. BIBLIOGRAFÍA.

- ARISTIZÁBAL E., H. MARTÍNEZ & J. I. VÉLEZ: Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Rev. Acad. Colombia*.
- ARISTIZÁBAL E., H. GONZALEZ & J. I. MONTOYA: Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el valle de Aburrá, Colombia.
- CAINE, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler*, 62A (1-2). p. 23-27.
- CHLEBORAD A. F. (2000). Preliminary method for anticipating the occurrence of precipitation-induced landslides in Seattle, Washington. U.S. Geological Survey open-file report 00-469.
- CHLEBORAD A. F. (2003). Preliminary evaluation of a precipitation threshold for anticipating the occurrence of landslides in the Seattle, Washington, Area. U.S.
- CROZIER, M. (1999). Prediction of rainfall-triggering landslides: a test of the antecedent water status model. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, p. 825-833.
- CRUDEN, D. M. and VARNES, D. J. (1996). Landslides types and processes. In: *Landslides investigation and mitigations*. Transportation Research Board Special report 24. Turner y Shuster (eds.), p. 36-75.
- ECHEVERRI, O. y VALENCIA, Y. (2004). Análisis de los deslizamientos en la cuenca de la quebrada La Iguaná de la ciudad de Medellín a partir de la integración lluvia-pendiente-formación geológica. *Dyna*, Universidad Nacional de Colombia, p. 33-45.
- GUZZETTI F., PERUCCACCI S. Y ROSSI M. action 1.16 definition of critical threshold for different scenarios [en línea] RISK AWARE RISK – Advanced Weather forecast system to Advise on Risk Events And management publicado el 18 de Julio 2005, IRPI CNR, Perugia Italy.
- KEEFER, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 95, p. 406-421.
- LAMBE, T. WILLIAM Y WHITMAN. *Mecánica de Suelos*, Limusa México 1972.
- MORENO, H. A.; Vélez, M. V.; Montoya, J. D. y Rhenals, R. L. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*, No 5, p. 59-69.
- PATHAK, S., NILSEN, B. Probabilistic rock slope stability analysis for Himalayan condition. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* No. 63, 2004 p. 25-32.
- PRIETO, C., (1985). Inestabilidades y erosión de laderas asociadas a riadas. *Geología y prevención de riesgos por inundaciones*, Instituto Geológico y Minero de España, p. 117-192.
- POPESCU, M.E., 2002. Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options. Keynote Lecture, Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures, Singapore, p. 61-81.

- RAMÍREZ Araneda, Suhelen B. estudio de la relación lluvia – deslizamiento en la Estabilidad de taludes. Tesis (título de ingeniero civil). Concepción, Chile. Universidad del Biobío, Depto. De Ingeniería civil, 2010. 157h.
- TRANSPORT RESEARCH LABORATORY. OVERSEAS DEVELOPMENT ADMINISTRATION. Overseas Road Note 14. Hidrological Design Manual for slope Stability in the Tropics. UK.1997.
- VALDOVINOS Claudio; PARRA Oscar, La Cuenca del Río Biobío, Historia Natural de un Ecosistema de uso Múltiple, Centro de Ciencias Ambientales EULA, Universidad de Concepción.
- VARNES D.J. (1978). “Slope movement types and processes”. Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., p.11-33.
- WIECZOREK, G. F., 1996. Landslide Triggering Mechanisms in Landslides – Investigations and Mitigation. Special Report 247. A. K. Turner y R. L. Schuster, Editores. Transportation Research Board. National Research Council, National Academic Press, Washington, DC, USA, p.76-90.
- WIECZOREK, G.F. MORGAN B.A., Campbell, R.H. Debrisflow hazards in the Blue Ridge of Central Virginia, Environ. Eng. Geosci., 2000. p. 3-23.
- YOSHIDA, Y., KUWANO, J., KUWANO, R. Rain-induced slope failures caused by reduction in soil strength. Soil and Foundations, vol 31, No. 4, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1991, p. 187-193.

Índice Anexos

- A1. Tabla condición de peligro Ruta CH-156 según tonelaje
- A2. Gráficos Caracterización Ruta CH-156
- B1. Gráficos Umbrales Críticos para combinación LA de 1 día.
- B2. Gráficos Umbrales Centro de masa para combinación LA de 1 día.
- B3. Gráficos Umbrales Críticos para combinación LA de 3 días.
- B4. Gráficos Umbrales Centro de masa para combinación LA de 3 días.
- B5. Gráficos Umbrales Críticos para combinación LA de 5 días.
- B6. Gráficos Umbrales Centro de masa para combinación LA de 5 días.
- B7. Gráficos Umbrales Críticos para combinación LA de 7 días.
- B8. Gráficos Umbrales Centro de masa para combinación LA de 7 días.
- C. Marco Teórico
- D. Tablas combinaciones de lluvia.

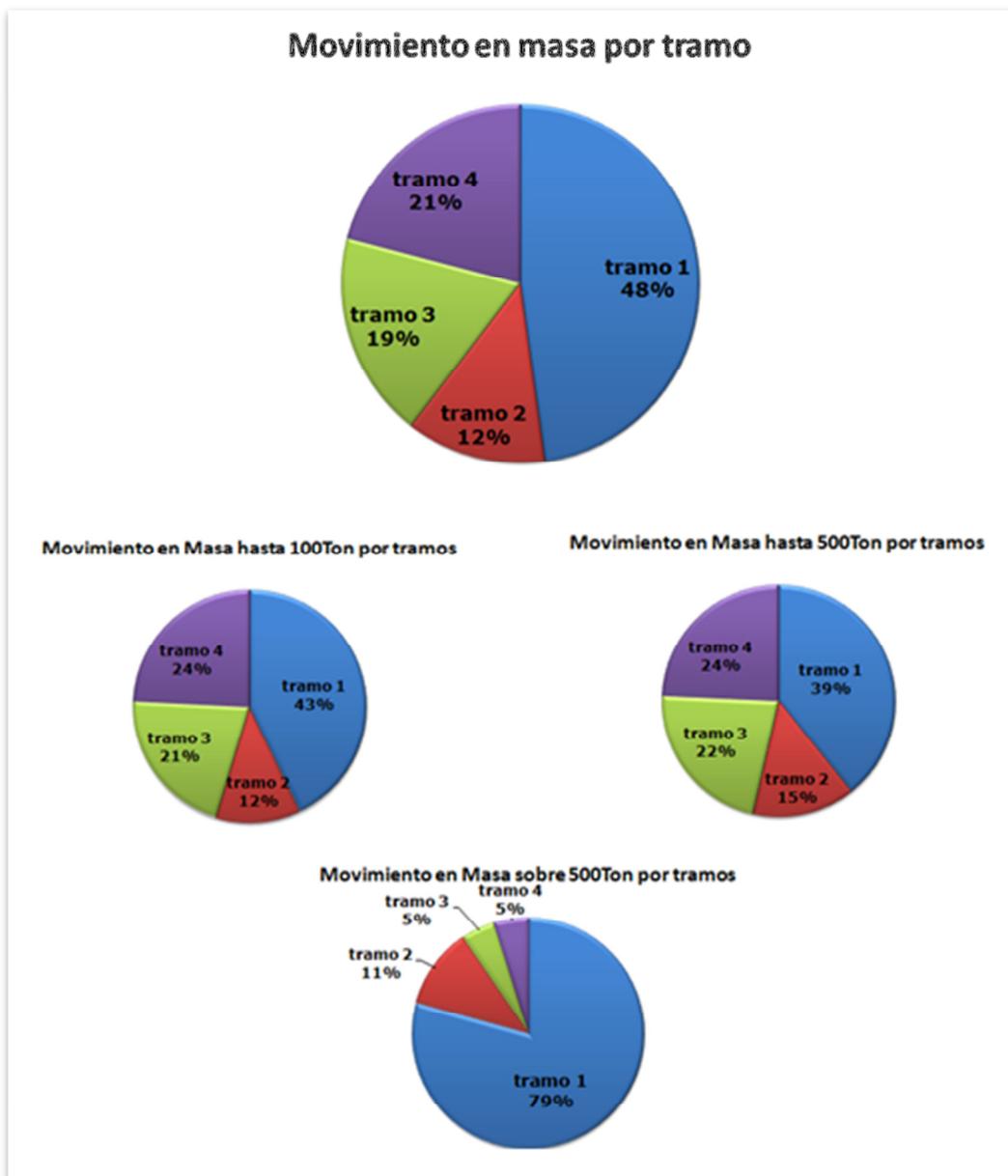
Anexos A1: Tabla condición de peligro Ruta CH-156 según tonelaje

Tabla N°1: condición de peligro en la ruta de la madera según tonelaje de deslizamiento

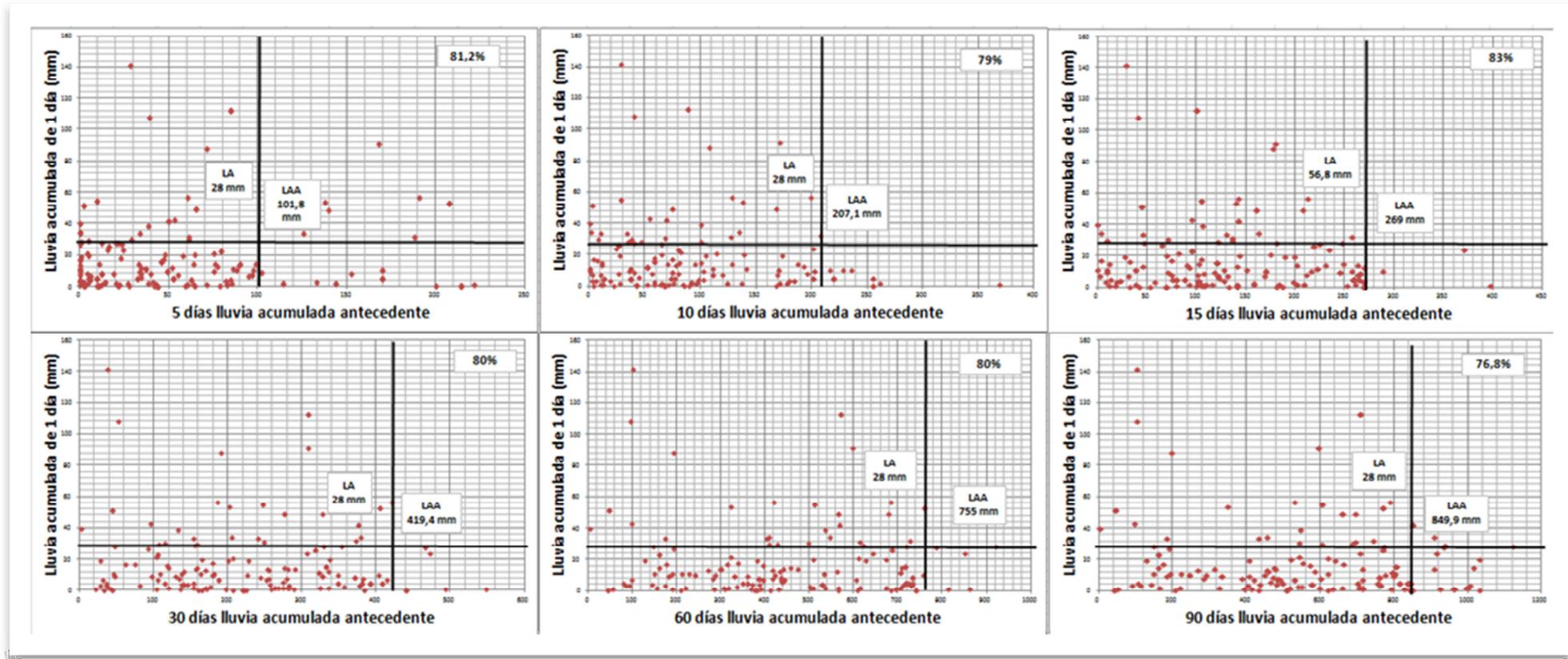
TONELAJE DE DESLIZAMIENTOS			CONDICIÓN DE PELIGRO EN LA RUTA
0	-	50 T	Menor
50T	-	500T	Leve
500T	-	1000T	Moderada
1000T	-	5000T	Grave
+5000T	-		Catástrofe

Fuente: Luis Cosme Echeverría Zambrano, Gerente Técnico, Camino De La Madera S.C.S.A.

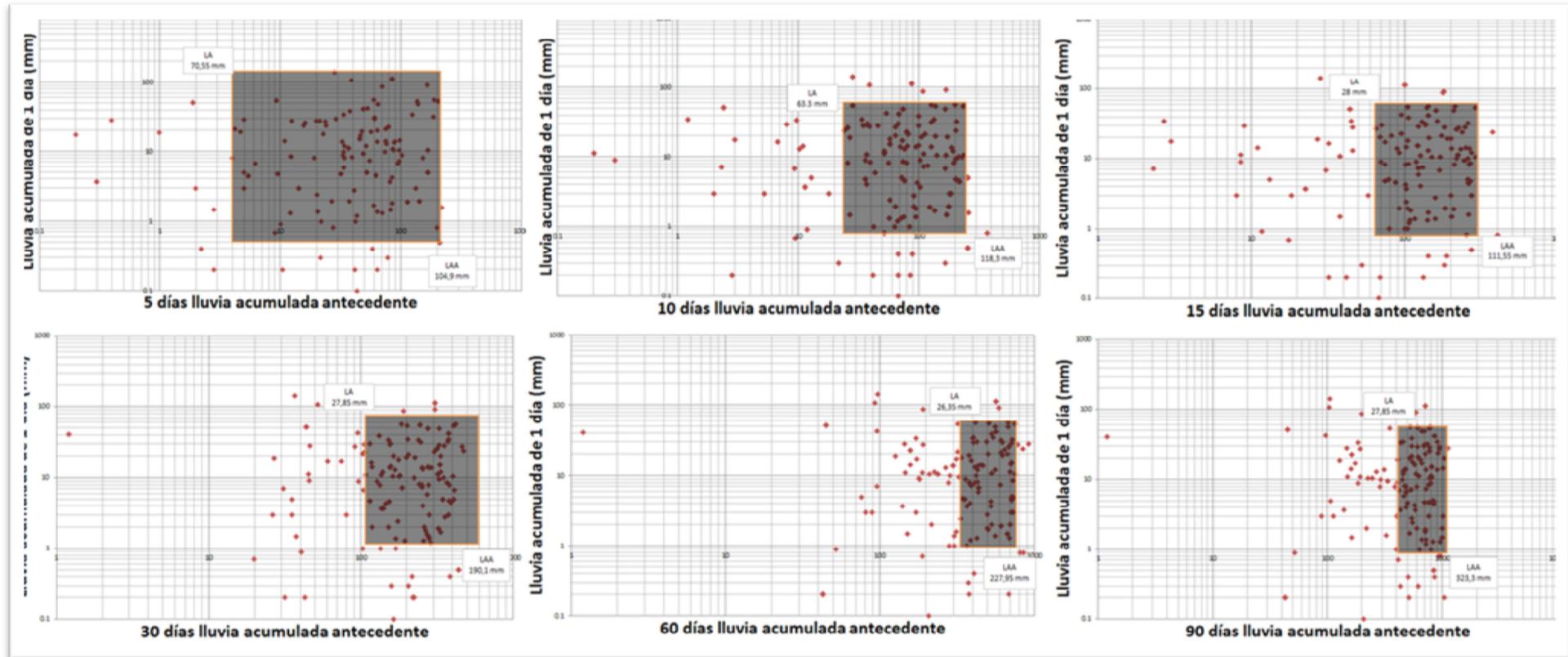
Anexos A2: Gráficos Caracterización Ruta CH-156



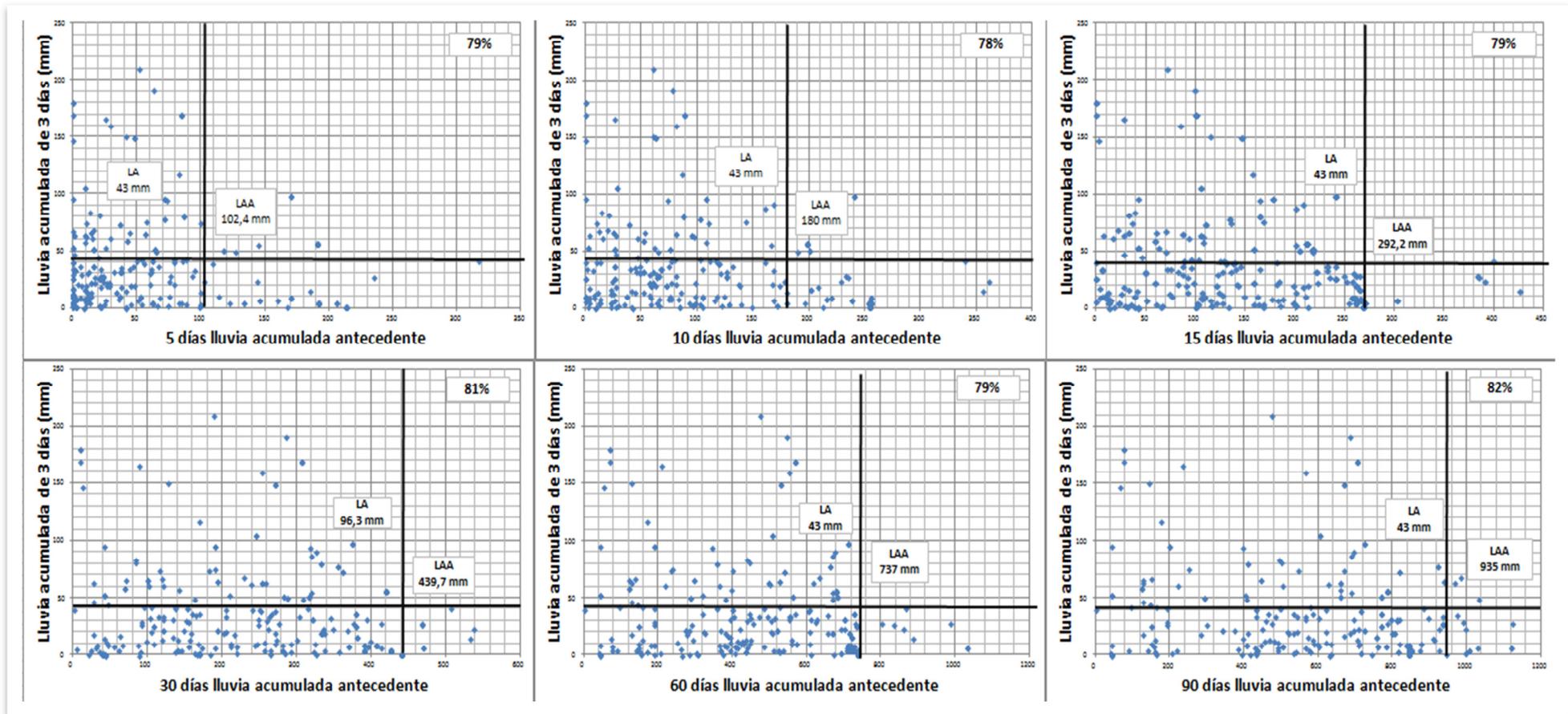
Anexo B1: Gráficos Umbrales Críticos para combinación LA de 1 día.



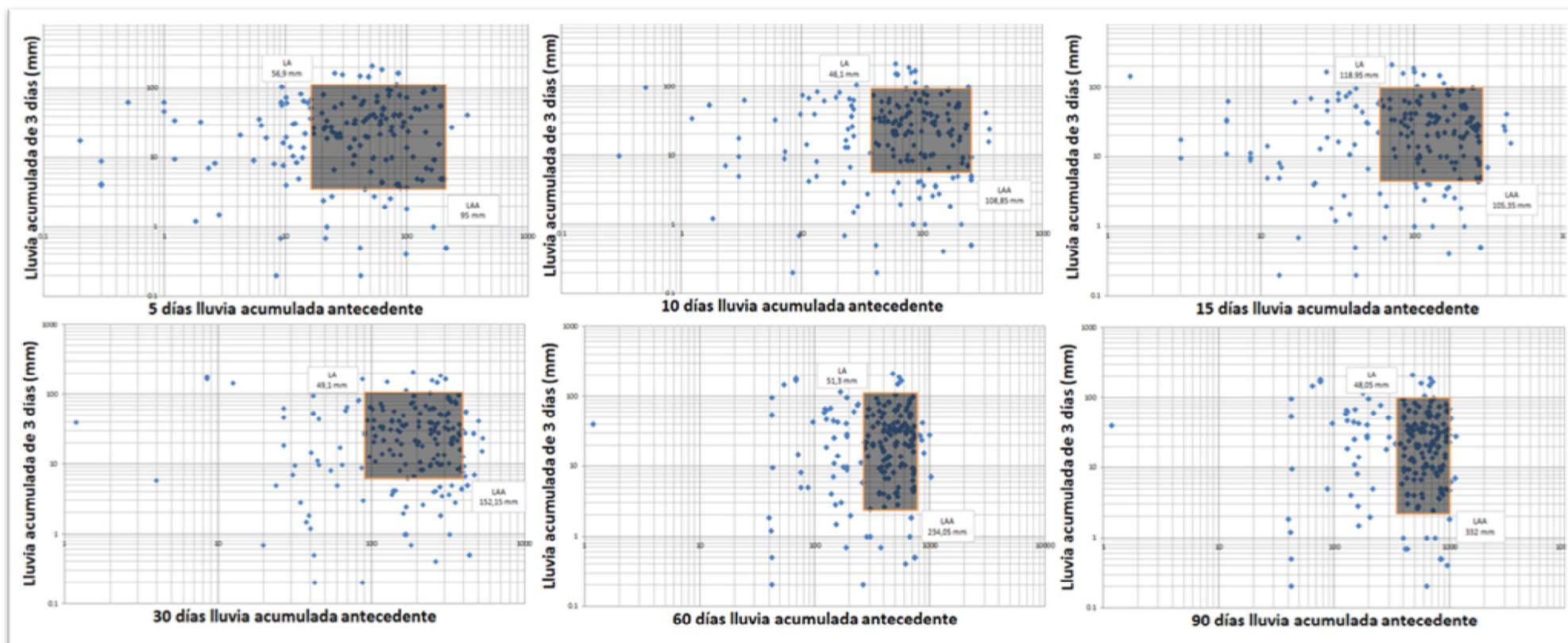
Anexo B2: Gráficos Umbrales centro de masa para combinación LA de 1 día.



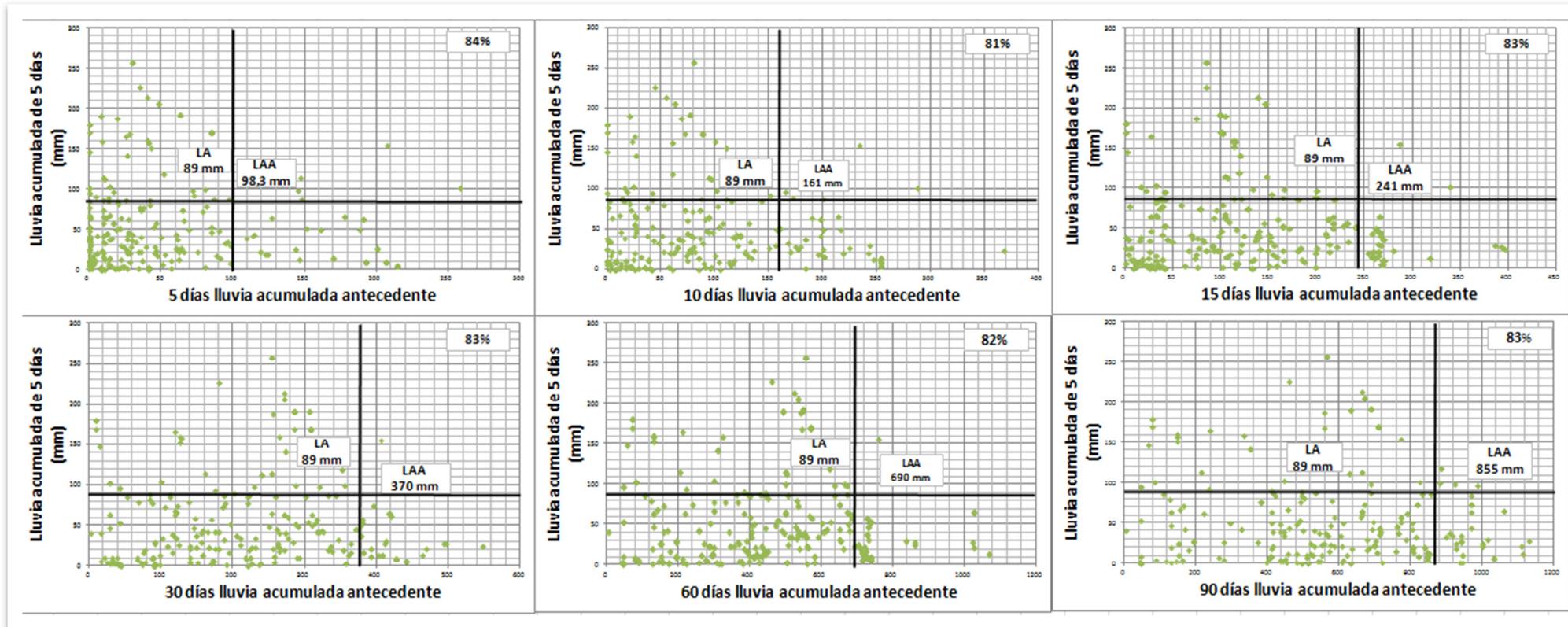
Anexo B3: Gráficos Umbrales Críticos para combinación LA de 3 días.



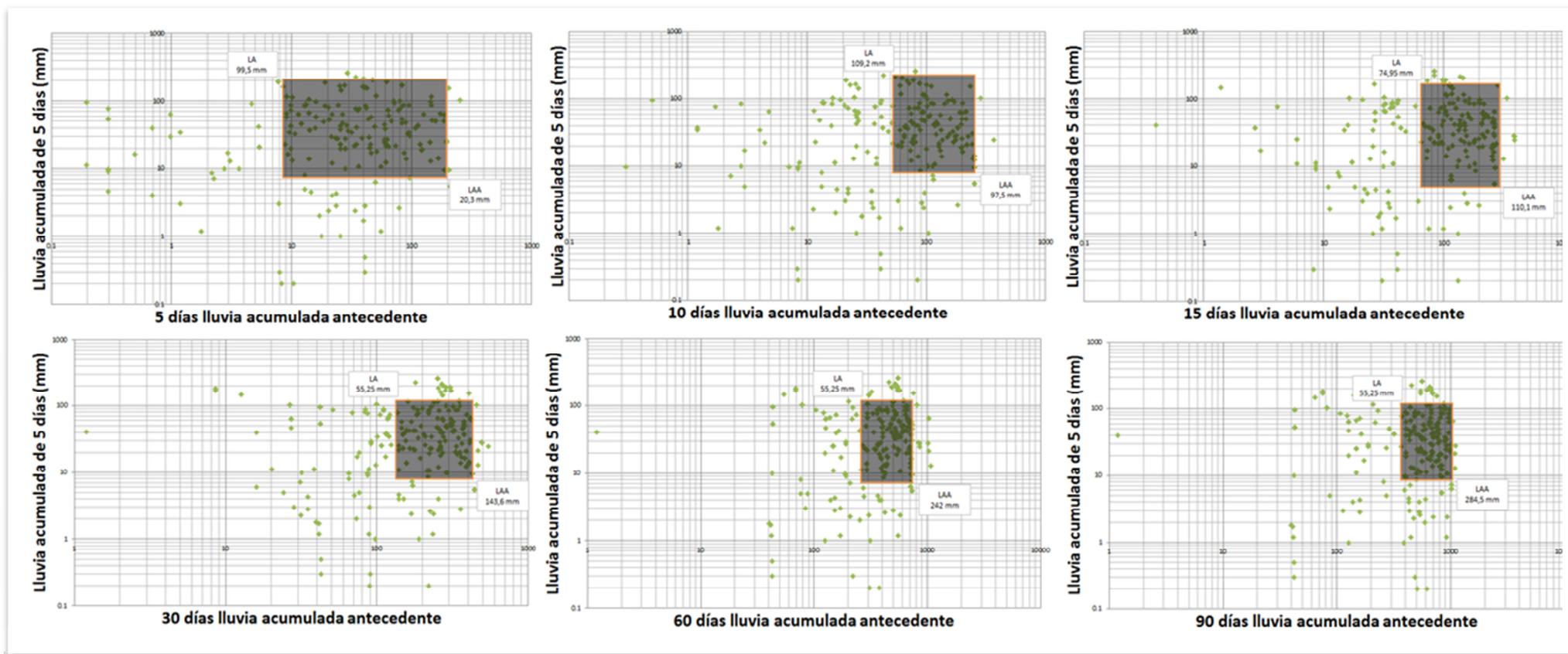
Anexo B4: Gráficos Umbrales Centro de masa para combinación LA de 3 días.



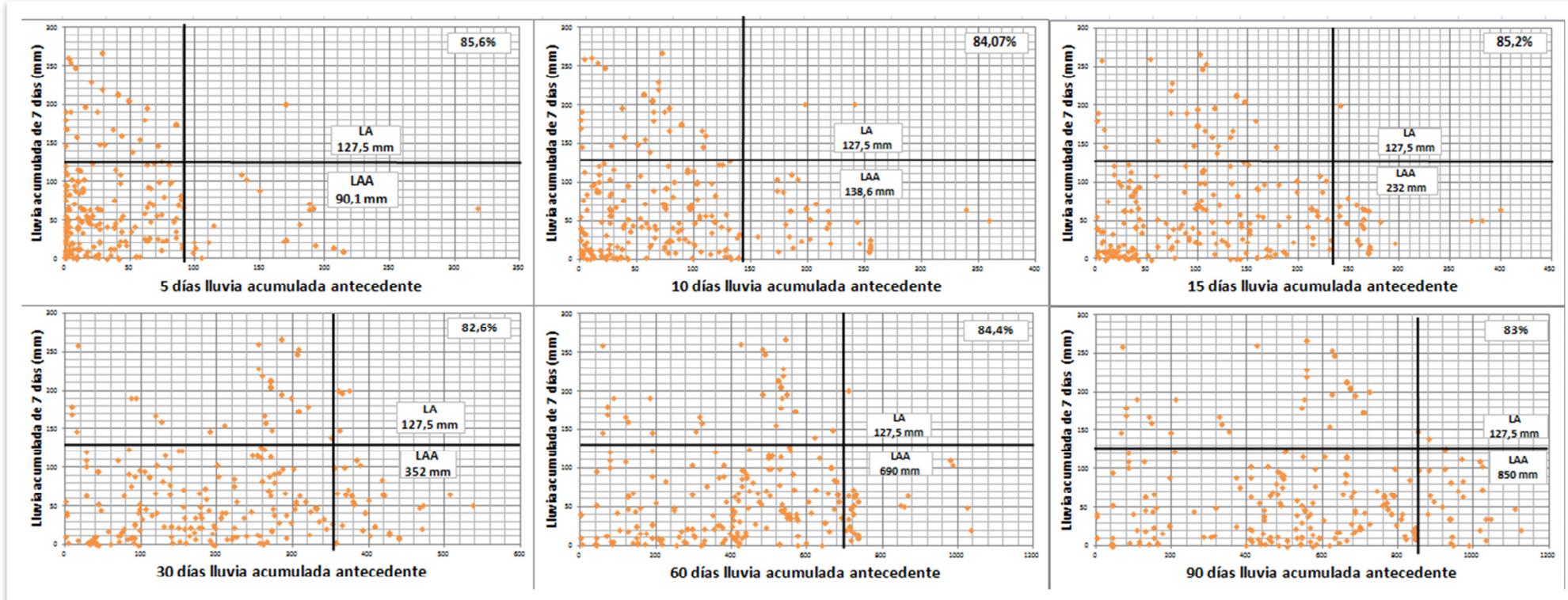
Anexo B5: Gráficos Umbrales Crítico para combinación LA de 5 días.



Anexo B6: Gráficos Umbrales Centro de masa para combinación LA de 5 días



Anexo B7: Gráficos Umbrales Crítico para combinación LA de 7 días



Anexo B8: Gráficos Umbrales Centro de masa para combinación LA de 7 días

