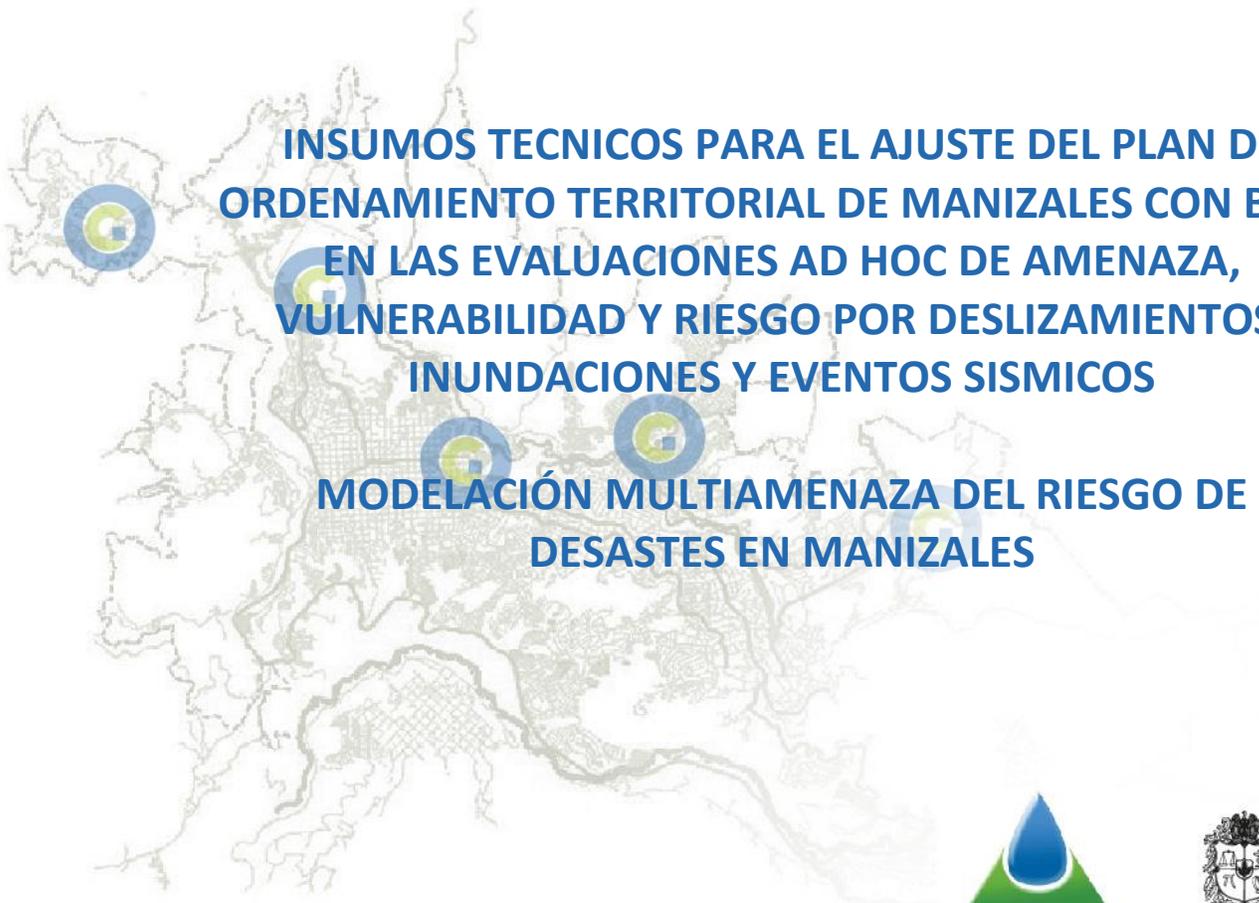




Gestión del Riesgo

Manizales - Colombia



**INSUMOS TECNICOS PARA EL AJUSTE DEL PLAN DE
ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE MANIZALES CON BASE
EN LAS EVALUACIONES AD HOC DE AMENAZA,
VULNERABILIDAD Y RIESGO POR DESLIZAMIENTOS,
INUNDACIONES Y EVENTOS SISMICOS**

**MODELACIÓN MULTIAMENAZA DEL RIESGO DE
DESASTES EN MANIZALES**

AUNAR ESFUERZOS PARA MEJORAR LA GESTIÓN DEL RIESGO MEDIANTE EL CONOCIMIENTO Y EL DESARROLLO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN EN EL MUNICIPIO DE MANIZALES, CONTRATO INTERADMINISTRATIVO NO. 179/2012

INSUMOS TECNICOS PARA EL AJUSTE DEL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE MANIZALES CON BASE EN LAS EVALUACIONES AD HOC DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR DESLIZAMIENTOS, INUNDACIONES Y EVENTOS SISMICOS

MODELACIÓN MULTIAMENAZA DEL RIESGO DE DESASTES EN MANIZALES

CONTRATISTA

GABRIEL ANDRÉS BERNAL GRANADOS

**INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES**

**MANIZALES
ENERO 2015**

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	7
Presentación.....	7
Objetivos	8
2. MARCO TEÓRICO DE LA EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO.....	10
Amenaza.....	10
Elementos expuestos	11
Vulnerabilidad de los elementos expuestos	12
Cálculo del riesgo	13
Métricas del riesgo.....	15
3. EVALUACIÓN DEL RIESGO POR DESLIZAMIENTOS.....	18
Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos	18
Evaluación de la amenaza de deslizamiento.....	19
Detonante sísmico.....	21
Detonante por lluvias intensas.....	26
Tasa anual de ocurrencia de deslizamientos	35
Evaluación del riesgo.....	36
4. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN MULTIAMENAZA.....	37
Pérdidas por sismo (sin deslizamientos)	37
Pérdidas por deslizamientos detonados por sismo	39
Pérdidas totales por deslizamientos detonados por lluvia	41
Pérdidas totales por sismo	43
Resultados por comuna y portafolio.....	45
5. REFERENCIAS.....	1
ANEXO 1. REPRESENTACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO	2



ÍNDICE FIGURAS

FIGURA 1. EJEMPLO DE UNA FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD.....	13
FIGURA 2. MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD PARA LA CIUDAD DE MANIZALES (TOMADO DE LONDOÑO, 2014)	19
FIGURA 3. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA MEDIANA DE PGA (CM/S ²) PARA UN TERREMOTO DE MAGNITUD 7.8 OCURRIENDO EN LA FALLA FRONTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL.....	23
FIGURA 4. ESQUEMA DEL BLOQUE INCLINADO EN EL ANÁLISIS DE NEWMARK.....	24
FIGURA 5. ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL MÉTODO DEL TALUD INFINITO.....	25
FIGURA 6. AC PARA LA ZONA URBANA DE MANIZALES	26
FIGURA 7. ESCENARIO DE PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ.....	33
FIGURA 8. CÁLCULO DE UMBRAL PARA 25 DÍAS EN LA CIUDAD DE MANIZALES.....	34
FIGURA 9. TASA ANUAL DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS PARA LA CIUDAD DE MANIZALES.....	35
FIGURA 10. CURVA DE PML POR SISMO PARA MANIZALES	38
FIGURA 11. MAPA DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA POR SISMO PARA LAS EDIFICACIONES DE MANIZALES.....	39
FIGURA 12. CURVA DE PML POR DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR SISMO PARA MANIZALES	40
FIGURA 13. MAPA DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA POR DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR SISMO PARA LAS EDIFICACIONES DE MANIZALES.....	41
FIGURA 14. CURVA DE PML TOTAL POR DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR LLUVIAS PARA MANIZALES.....	42
FIGURA 15. MAPA DE PÉRDIDA ANUAL ESPERADA TOTAL POR DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR LLUVIAS PARA LAS EDIFICACIONES DE MANIZALES	43
FIGURA 16. CURVA DE PML TOTAL POR SISMO PARA MANIZALES	44
FIGURA 17. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UN EVENTO ARBITRARIO A DENTRO DEL ESPACIO DE MUESTRO DE PÉRDIDAS S.	2
FIGURA 18. SUBDIVISIÓN DEL ESPACIO DE MUESTRO S EN EVENTOS BASE B.....	3
FIGURA 19. INTERSECCIONES ENTRE EL EVENTO A Y LOS EVENTOS BASE B.....	4

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DETERMINACIÓN DE PATRONES SINTÉTICOS ESPACIALES	32
TABLA 2. PÉRDIDA ANUAL ESPERADA POR SISMO EN MANIZALES.	37
TABLA 3. PÉRDIDAS MÁXIMAS PROBABLES POR SISMO EN MANIZALES.....	38
TABLA 4. PÉRDIDA ANUAL ESPERADA POR DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR SISMO EN MANIZALES.....	39
TABLA 5. PÉRDIDAS MÁXIMAS PROBABLES POR DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR SISMO EN MANIZALES.....	40
TABLA 6. PÉRDIDA ANUAL ESPERADA POR DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR LLUVIAS EN MANIZALES.....	41
TABLA 7. PÉRDIDAS MÁXIMAS PROBABLES POR DESLIZAMIENTOS DETONADOS POR LLUVIAS EN MANIZALES.	42
TABLA 8. PÉRDIDA ANUAL ESPERADA TOTAL POR SISMO EN MANIZALES.....	43
TABLA 9. PÉRDIDAS MÁXIMAS PROBABLES TOTALES POR SISMO EN MANIZALES.....	44
TABLA 10. PÉRDIDAS ANUALES ESPERADAS POR COMUNA EN MANIZALES.....	1
TABLA 11. PÉRDIDAS ANUALES ESPERADAS POR COMUNA PARA EL PORTAFOLIO RESIDENCIAL EN MANIZALES.....	1
TABLA 12. PÉRDIDAS ANUALES ESPERADAS POR COMUNA PARA EL PORTAFOLIO COMERCIAL EN MANIZALES.	2
TABLA 13. PÉRDIDAS ANUALES ESPERADAS POR COMUNA PARA EL PORTAFOLIO INDUSTRIAL EN MANIZALES.....	2
TABLA 14. PÉRDIDAS ANUALES ESPERADAS POR COMUNA PARA EL PORTAFOLIO INSTITUCIONAL EN MANIZALES.	3
TABLA 15. PÉRDIDAS ANUALES ESPERADAS POR COMUNA PARA EL PORTAFOLIO SALUD EN MANIZALES.	3
TABLA 16. PÉRDIDAS ANUALES ESPERADAS POR COMUNA PARA EL PORTAFOLIO EDUCACIÓN EN MANIZALES.....	4
TABLA 17. EVENTOS ARBITRARIOS A Y SU MEDIDA DE PROBABILIDAD.....	5

1. INTRODUCCIÓN

Presentación

El crecimiento de los asentamientos humanos deriva inevitablemente en exponer las construcciones e infraestructura al potencial efecto destructivo de diversos fenómenos naturales. Si bien no es adecuado restringir el desarrollo de las comunidades, tampoco lo es exponerlas deliberadamente a futuros desastres. Por lo tanto, el proceso de desarrollo de las comunidades debe incorporar de manera consiente el riesgo que se deriva de las actividades humanas y maneras para gestionarlo.

La gestión del riesgo de desastres comprende todo el conjunto de acciones que pueden ser ejecutadas con el fin de reducir el impacto negativo de los desastres en el desarrollo humano. Se trata entonces de una estrategia de desarrollo que debe ser concebida desde las esferas más altas de la administración pública y trascender a todos los niveles institucionales y territoriales de un país. Diversas son las acciones que hacen parte de una adecuada gestión del riesgo, desde la planificación del territorio, hasta la creación de mecanismos de protección financiera para el estado, pasando por la definición de códigos de construcción, la creación de sistemas de alerta y la preparación para la atención a emergencias. Todas estas son igualmente importantes dado que atienden diferentes niveles de riesgo. Sin embargo, el primer paso para una correcta gestión del riesgo es identificarlo y cuantificarlo. El conocimiento del riesgo es entonces un componente fundamental dentro del desarrollo sostenible.

Para conocer el riesgo deben conocerse sus componentes: la amenaza, los elementos expuestos y su vulnerabilidad. La amenaza se refiere a la ocurrencia de un fenómeno natural y la violencia con que impacta una región específica. Los elementos expuestos son el conjunto de bienes o activos que se encuentran expuestos a la amenaza y pueden llegar a sufrir daños que deriven en pérdidas económicas o afectación a la población. Por último, la vulnerabilidad es esa medida de susceptibilidad a sufrir daño que tienen los elementos expuestos, tras la manifestación de la amenaza en su ubicación.

La evaluación del riesgo resulta entonces de la combinación de sus tres componentes. Si bien existen varias propuestas sobre como evaluar y cuantificar el riesgo, se destaca la metodología de análisis probabilista dado que permite incorporar las incertidumbres asociadas a la evaluación de la amenaza y la vulnerabilidad, dándole un tratamiento racional al problema. Dentro de esta metodología, es común calcular la pérdida en términos económicos debido a sus directas aplicaciones en la ciencia actuarial y el

mercado de seguros y reaseguros, aunque puede aplicarse también dentro del dominio social y ambiental.

Dentro del contrato interadministrativo No. 240-2012 con otrosi No. 1-2014 suscrito entre la Universidad Nacional De Colombia Sede Manizales y la Corporación Autónoma Regional De Caldas – Corpocaldas, se tiene como obligación contractual la tarea “insumos técnicos para el ajuste del plan de ordenamiento territorial de Manizales con base en las evaluaciones ad hoc de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por deslizamientos, inundaciones y eventos sísmicos” donde uno de sus productos contractuales es: “Evaluar el riesgo de desastre por deslizamientos, inundaciones, eventos sísmicos e incendios en la ciudad”.

Con el fin de dar cumplimiento a dicha obligación, la Universidad Nacional De Colombia Sede Manizales suscribió la orden de servicios ODS 252 de 2014, cuyo objetivo es la evaluación de riesgo físico, multi-amenaza, para la ciudad de Manizales, con fines del análisis holístico del riesgo, en aras de tomar decisiones en la planificación de Manizales.

La intención de la evaluación es obtener indicadores de riesgo físico, así como información de pérdidas probables frente a diferentes tipos de amenazas, como sismos y deslizamientos, entre otros, que permitan orientar la toma de decisiones desde la administración municipal para desarrollar estrategias de reducción del riesgo de desastre.

Objetivos

Con el fin de dar cumplimiento al objetivo principal de este trabajo: “Evaluación de riesgo físico, multi-amenaza, para la ciudad de Manizales, con fines del análisis holístico del riesgo, en aras de tomar decisiones en la planificación de Manizales”, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Revisar los resultados de los estudios de amenaza por sismo, deslizamientos, inundación, erupciones volcánicas y otros realizados en el marco del proyecto y extraer los resultados como insumos para el desarrollo de las demás actividades
- Cálculo del riesgo catastrófico por deslizamientos inducidos por lluvias y por terremotos, haciendo uso de evaluaciones previas de la susceptibilidad a los deslizamientos realizadas en el marco del proyecto.
- Desarrollar una evaluación de riesgo físico multi-amenaza para la ciudad de Manizales, considerando las principales amenazas que afectan a la ciudad, y haciendo uso de la mejor información disponible respecto al portafolio de edificaciones de Manizales y su vulnerabilidad.
- Obtener resultados de pérdidas por ubicación en términos de la pérdida anual esperada, y para todo el portafolio de edificaciones de Manizales, en términos de las curva de

excedencia de pérdidas, curva de pérdidas máximas probables y curvas de probabilidad de quiebra, así como otras métricas que considere relevantes.

- Desarrollo de un software de escritorio para la consulta de los resultados de riesgo, para todo el portafolio y por ubicación, en el cual se presente de manera detallada la información relevante para la toma de decisiones en el contexto de la planificación del territorio, así como una herramienta básica de evaluación de primas bajo un esquema simple de aseguramiento.
- Realizar un análisis de las implicaciones de los resultados para la planificación en el municipio y la toma de decisiones para la reducción y gestión del riesgo en la ciudad.

2. MARCO TEÓRICO DE LA EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO

La evaluación probabilista del riesgo tiene como objetivo estimar la distribución de probabilidad de la pérdida económica que puede presentarse en un conjunto de elementos expuestos, dada la ocurrencia de un fenómeno natural particular. El riesgo se deriva de la combinación de tres componentes principales:

- *La amenaza*, la cual se representa por medio de una colección de escenarios, generados de manera estocástica, los cuales representan de manera integral, y en términos de probabilidad, la amenaza de una región. Cada escenario tiene asociada una frecuencia de ocurrencia y contiene la distribución espacial de parámetros que permiten construir la distribución de probabilidad de las intensidades producidas por su ocurrencia.
- *Los elementos expuestos*, que son el conjunto de bienes o activos (construcciones) susceptibles de sufrir daños y producir pérdidas, dada la ocurrencia de los escenarios que definen la amenaza. Estos elementos se caracterizan por su ubicación geográfica, su valor de reposición y la clase estructural a la que pertenecen.
- *La vulnerabilidad*, la cual es una característica intrínseca de los elementos expuestos y que caracteriza el comportamiento de la construcción durante la ocurrencia de un evento de amenaza. Está definida mediante curvas de vulnerabilidad, las cuales relacionan los momentos de probabilidad (valor esperado y varianza) de la pérdida en el elemento expuesto, como función de la intensidad del fenómeno que ocurra en su ubicación.

Amenaza

La amenaza se mide usando su frecuencia de ocurrencia y su severidad, esta última siendo caracterizada a través de parámetros de intensidad calculados en cada ubicación geográfica. La evaluación del riesgo se basa en la frecuencia histórica de ocurrencia de los eventos amenazantes y la intensidad que producen en el territorio. Una vez que los parámetros que caracterizan la ocurrencia del fenómeno se definen desde un punto de vista físico, es necesario generar un conjunto de escenarios estocásticos que, analíticamente hablando, permiten definir todas las formas posibles en que la amenaza puede manifestarse en la región de análisis, en función de su frecuencia y severidad.

La amenaza se caracteriza entonces, en cada punto de análisis en el territorio de estudio, a través de la distribución de la probabilidad de la medida de intensidad asociada a su

severidad, definida en términos de su valor central y su medida de dispersión, la cual da cuenta de la incertidumbre asociada con la ocurrencia de dicho grado de intensidad en el territorio.

La razón por la cual debe representarse la amenaza como una colección de escenarios está relacionada directamente con la evaluación del riesgo. Esta representación permite aplicar la metodología probabilista de análisis de riesgo de manera directa, y permite incluir de manera racional las incertidumbres asociadas a la amenaza. En el Anexo 1 se presentan mayores detalles de las características necesarias en la representación de la amenaza para llevar a cabo una evaluación probabilista del riesgo.

Elementos expuestos

En general, puede definirse como elemento expuesto cualquier objeto, geográficamente referenciado, que sea susceptible de sufrir algún tipo de afectación por causa de la ocurrencia de un evento de amenaza. Una vez identificado cada uno de los elementos expuestos, es necesario asignar como mínimo un valor económico de reposición, una ocupación humana y una definición de su vulnerabilidad.

Los elementos expuestos son fundamentales dentro del análisis de riesgo, debido a que comprenden los objetos sobre los cuales se evalúan las pérdidas, es decir, son la fuente de las pérdidas potenciales debido al hecho de estar expuestos a una amenaza y ser susceptibles de sufrir un daño. En términos matemáticos, los elementos expuestos proveen individualmente el valor absoluto máximo posible de la pérdida en su ubicación, así como los sumandos de la función de densidad de probabilidad de la pérdida de un escenario de amenaza. Es decir, son en primera medida el elemento integrador de la amenaza y la vulnerabilidad en su ubicación, y en segunda medida, el elemento integrador de las pérdidas totales para un escenario. Su adecuada caracterización es de gran importancia para la adecuada estimación de las pérdidas.

Adicionalmente, los elementos expuestos tienen implícito un componente asociado a la responsabilidad sobre las pérdidas. Si, por ejemplo, los elementos expuestos de un análisis de riesgo corresponden a centros públicos de salud, entonces las pérdidas causadas por la ocurrencia de fenómenos de amenaza serán responsabilidad de la institución de salud pública correspondiente. En caso que los elementos expuestos sean, por ejemplo, las viviendas de los estratos socio-económicos más bajos, estamos hablando de una responsabilidad fiscal del estado, dada la imposibilidad de los propietarios de dichas viviendas privadas de responder a la situación de desastre. Es por esto importante determinar la responsabilidad sobre las pérdidas directamente en la definición de los elementos expuestos. Por esta razón los elementos expuestos se agrupan en *portafolios*, los cuales permiten determinar de manera general dicha responsabilidad. Es posible

entonces contar dentro de una misma evaluación del riesgo con portafolios de, por ejemplo, centros públicos de salud, centros educativos, viviendas, edificaciones institucionales, infraestructura vial, infraestructura de comunicaciones, etc. En definitiva deben definirse tantos portafolios como haya entidades o instituciones responsables sobre las pérdidas.

Vulnerabilidad de los elementos expuestos

La vulnerabilidad de los elementos expuestos se caracteriza mediante curvas de vulnerabilidad, las cuales caracterizan el comportamiento de una construcción durante la ocurrencia de un terremoto. Las funciones de vulnerabilidad definen la distribución de probabilidad de la pérdida (p) como función de la intensidad producida durante un escenario específico, es decir, condicional a la ocurrencia de un nivel de intensidad (s) en la ubicación del elemento expuesto. La pérdida p generalmente se entiende como la pérdida relativa al valor de reposición del elemento expuesto.

Estas funciones de vulnerabilidad se definen entonces mediante curvas que relacionan el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno (ver Figura 1). La pérdida se asume típicamente como distribuida Beta, con su función de densidad de probabilidad dada como (Ordaz 2008),

$$f(p|s) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} p^{a-1} (1-p)^{b-1} \quad (\text{Ec. 1})$$

en donde Γ es la función Gamma y los parámetros a y b están dados por,

$$a = \frac{1 - (1 + c^2(p|s)) \cdot E(p|s)}{c^2(p|s)} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$b = a \cdot \frac{1 - E(p|s)}{E(p|s)} \quad (\text{Ec. 3})$$

en donde $E(p|s)$ es el valor esperado de la pérdida y $c(p|s)$ es su coeficiente de variación, dada la intensidad del fenómeno en el sitio. ($c(p|s) = \sigma(p|s)/E(p|s)$, en donde $\sigma(p|s)$ es la desviación estándar de la pérdida).

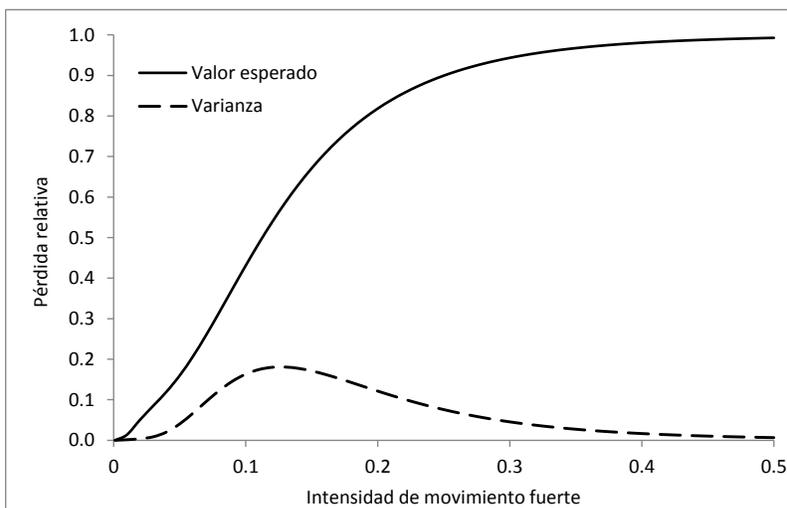


Figura 1. Ejemplo de una función de vulnerabilidad.

Cálculo del riesgo

El riesgo se determina mediante la convolución entre la amenaza y la vulnerabilidad, en la ubicación ocupada por los elementos expuestos y para la totalidad de los mismos. Como se ha mencionado anteriormente, en el cálculo probabilista de las pérdidas la amenaza y la vulnerabilidad están representadas también de manera probabilista. La amenaza tiene una representación probabilista tanto temporal como espacial. La ocurrencia en el tiempo de los escenarios de amenaza se modela como un proceso de Poisson, lo que conlleva a modelar mediante una distribución de probabilidad exponencial el tiempo que transcurre entre los escenarios. Por otra parte, la medida de intensidad en cada ubicación modela como una variable aleatoria, definida por sus dos primeros momentos de probabilidad. La vulnerabilidad se define también por medio de dos momentos de probabilidad los cuales define la distribución de probabilidad Beta asignada a la pérdida.

Las incertidumbres asociadas a la amenaza y a la vulnerabilidad son entonces definidas en su propia naturaleza; temporal y espacial para la amenaza y dependiente de la intensidad para la vulnerabilidad. De esta manera, el principal resultado del modelo es una distribución de probabilidad específica de la pérdida para cada escenario de riesgo. De acuerdo con el procedimiento analítico propuesto por Ordaz (2000), la función de densidad de probabilidad de la pérdida en el elemento j , condicional a la ocurrencia del escenario i , $f(p_j | E_i)$, se calcula como,

$$f(p_j | E_i) = \int_0^{\infty} f(p_j | s) f(s | E_i) ds \quad (\text{Ec. 4})$$

en donde el primer término de la integral tiene que ver con la vulnerabilidad ($f(p_j|s)$, la densidad de probabilidad de la pérdida dada una intensidad de amenaza s) y la segunda parte tiene que ver con la amenaza ($f(s|E_i)$, la densidad de probabilidad de la intensidad de movimiento, dada la ocurrencia de un escenario).

La pérdida total del escenario i corresponde a la suma de todas las pérdidas individuales (p_j) de los elementos expuestos. Dado que los sumandos son variables aleatorias, debe usarse la aritmética correcta para determinar la pérdida del escenario i . La suma se hace sobre los momentos de probabilidad de las variables p_j como se indica a continuación.

$$E(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} E(p_j) \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\sigma^2(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} \sigma^2(p_j) + 2 \sum_{\substack{k=1 \\ k < j}}^{NE-1} \sum_{j=2}^{NE} \text{cov}(p_k, p_j) \quad (\text{Ec. 6})$$

en donde $E(p|E_i)$ es el valor esperado de la pérdida del escenario i , $\sigma^2(p|E_i)$ es su varianza, NE es el número total de elementos expuestos, $E(p_j)$ es el valor esperado de la pérdida en el elemento j , $\sigma^2(p_j)$ es su varianza, y $\text{cov}(p_k, p_j)$ es la covarianza de la pérdida de dos elementos expuestos diferentes. Dado que es prácticamente imposible establecer con toda certeza la correlación de la pérdida entre dos elementos expuestos, se asume un coeficiente de correlación $\rho_{k,j}$ de 0.3. La ecuación 12 puede escribirse entonces como,

$$\sigma^2(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} \sigma^2(p_j) + 2 \sum_{\substack{k=1 \\ k < j}}^{NE-1} \sum_{j=2}^{NE} \rho_{k,j} \sigma(p_k) \sigma(p_j) \quad (\text{Ec. 7})$$

De esta manera queda completamente determinada, en términos de probabilidad, la pérdida asociada a la ocurrencia del escenario i .

El riesgo es comúnmente descrito mediante la llamada *curva de excedencia de pérdidas* la cual especifica las frecuencias de ocurrencia de eventos en que se exceda un valor específico de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como *tasa de excedencia*, y se calcula de la siguiente manera,

$$v(p) = \sum_{i=1}^N \Pr(P > p|E_i) \cdot F_A(E_i) \quad (\text{Ec. 8})$$

en donde $\nu(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida p , N es el número total de escenarios de amenaza, $F_A(E_i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del escenario i , y $\Pr(P > p | E_i)$ es la probabilidad de que p sea excedida dado que ocurrió el escenario i . La suma cubre todos los escenarios de amenaza que pueden generar pérdidas. El inverso de $\nu(p)$ es el periodo de retorno de la pérdida p , identificado como Tr . La curva de excedencia de pérdidas contiene toda la información necesaria para caracterizar, en términos de probabilidad, el proceso de ocurrencia de las pérdidas asociadas a fenómenos naturales. Nótese que la ecuación 11 es, en esencia, igual a la ecuación 3.

Es importante hacer notar que la curva de excedencia de pérdidas no tiene incertidumbre. Es práctica común por parte de los usuarios de los resultados de riesgo, el intentar asociarlos de a un nivel de confianza o de variabilidad de los mismos. Pues bien, las tasas de excedencia calculadas en un modelo probabilista de riesgo consideran directamente la incertidumbre en las pérdidas, por lo cual dichas tasas de excedencia no pueden tener una incertidumbre o variabilidad propia. Esto debido a que, en términos matemáticos, son una medida de probabilidad calculada para una cantidad de pérdida específica. En el contexto de la modelación del riesgo, la pérdida es la variable aleatoria, no las tasas anuales de excedencia.

Métricas del riesgo

A partir de la curva de excedencia de pérdidas es posible obtener diversas métricas del riesgo, las cuales son útiles para diferentes fines dentro de la toma de decisiones y la gestión del riesgo. Estas métricas pretenden proporcionar una representación integral del riesgo, por lo general condensada en uno o unos pocos números, en lugar de proporcionar todo el conjunto de las pérdidas por escenarios o la curva de excedencia de pérdidas completa.

La pérdida anual esperada (PAE)

La PAE corresponde al valor esperado de la pérdida anual. Indica el valor anual que debe pagarse para compensar, en el largo plazo, todas las pérdidas futuras. En un esquema simple de seguro, la PAE sería la prima pura anual justa. Se calcula como la integral de la curva de excedencia de pérdidas,

$$PAE = \int_0^{\infty} \nu(p) dp \quad (\text{Ec. 9})$$

Desde el conjunto de evento de pérdida, puede determinarse la PAE como,

$$PAE = \sum_{i=1}^N E(P|E_i)F_A(E_i) \quad (\text{Ec. 10})$$

La pérdida anual esperada es un indicador importante dado que integra en un único valor el efecto, en términos de pérdida, de la ocurrencia de los escenarios de amenaza sobre los elementos expuestos vulnerables. Se considera como el indicador más robusto de riesgo, no solo por su capacidad de resumir el proceso de generación de pérdidas en un solo número, sino por ser insensible a la incertidumbre, debido a que determina la esperanza matemática de las pérdidas en una base anual, y no su incertidumbre.

La pérdida máxima probable (PML)

Se denota PML por sus siglas en inglés (Probable Maximum Loss). Corresponde a una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un periodo de retorno grande. Como se indicó anteriormente, el periodo de retorno es el inverso de la tasa de excedencia de pérdidas,

$$Tr(p) = \frac{1}{v(p)} \quad (\text{Ec. 11})$$

En realidad la PML es una curva que relaciona las pérdidas a su correspondiente periodo de retorno. No obstante, es práctica común definir la PML como un único valor. La selección del periodo de retorno de la PML depende exclusivamente de la aversión al riesgo del tomador de decisiones. Por ejemplo, en la industria aseguradora el periodo de retorno de la PML se toma usualmente entre 200 y 1500 años. Mayores detalles sobre el significado y aplicación de la PML pueden encontrarse en Marulanda (2013).

La probabilidad de quiebra (P_Q)

Asumiendo que el proceso de ocurrencia de las pérdidas en el tiempo sigue un proceso de Poisson, es posible determinar la probabilidad de alcanzar o exceder un nivel de pérdida dado, en un periodo de exposición particular,

$$\Pr(P > p)_T = 1 - e^{-v(p)T} \quad (\text{Ec. 12})$$

en donde $\Pr(P > p)_T$ es la probabilidad de excedencia de la pérdida p , en el lapso de tiempo T (dado en años). Si la pérdida p corresponde a la PML, se obtiene lo que se conoce como la probabilidad de quiebra (P_Q), la cual no es más que la probabilidad de exceder la PML en un lapso de tiempo T .

$$P_Q = 1 - e^{-T/Tr(PML)} \quad (\text{Ec. 13})$$

Otras métricas del riesgo

Como se mencionó anteriormente, la curva de excedencia de pérdidas contiene toda la información necesaria para caracterizar de manera rigurosa la ocurrencia de pérdidas. Es posible determinar directamente de $v(p)$ otras métricas del riesgo que pueden ser relevantes para la toma de decisiones. Acá se presentan algunos ejemplos.

La función de densidad de probabilidad de la pérdida durante el próximo evento, o un evento tomado al azar, se obtiene como,

$$f(p) = -\frac{1}{v(0)} \frac{dv(p)}{dp} \quad (\text{Ec. 14})$$

La probabilidad de exceder un nivel de pérdida particular tras la ocurrencia del próximo evento, o un evento tomado al azar, se puede calcular como,

$$\Pr(P > p) = \frac{v(p)}{v(0)} \quad (\text{Ec. 15})$$

La función de densidad de probabilidad del tiempo hasta la ocurrencia del próximo evento (t) es exponencial y se define como,

$$f(t) = v(p)e^{-v(p)t} \quad (\text{Ec. 16})$$

El número de eventos (N) que ocurrirán en un lapso de tiempo T , que igualan o exceden la pérdida p , se distribuye Poisson, por lo cual la probabilidad que ese número sea igual a n es,

$$\Pr(N = n) = \frac{(v(p)T)^n e^{-v(p)T}}{n!} \quad (\text{Ec. 17})$$

3. EVALUACIÓN DEL RIESGO POR DESLIZAMIENTOS

La probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento se modela como una función de la susceptibilidad natural de la ladera a deslizarse y la probabilidad de ocurrencia de un evento (sismo o aguacero) en el cual se exceda un nivel de intensidad tal que induzca el deslizamiento. Este cálculo se realiza para un conjunto de eventos detonantes determinados de manera estocástica, los cuales representan todas las maneras como la amenaza sísmica y por lluvias intensas puede manifestarse en el territorio de análisis. Esto deriva en una representación integral de la amenaza por deslizamiento que considera todos los posibles eventos detonantes. El riesgo por deslizamientos se calcula entonces como función de la amenaza y del valor de los elementos expuestos, asumiendo saturación en la vulnerabilidad de los mismos.

Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos

La susceptibilidad a los deslizamientos corresponde a la probabilidad natural de ocurrencia de un deslizamiento en una ubicación específica, en función de las características naturales y antrópicas de la ladera. Esta susceptibilidad para la ciudad de Manizales es calculada por Londoño (2014) mediante una red neuronal artificial, tomando como insumo la mejor información temática disponible para la ciudad y entrenando la red con la base de datos de deslizamientos más actualizada a la fecha. En la Figura 2 se presenta el modelo de susceptibilidad obtenido para la ciudad de Manizales mediante un modelo de Redes Neuronales, a partir de 29 parámetros de entrada.

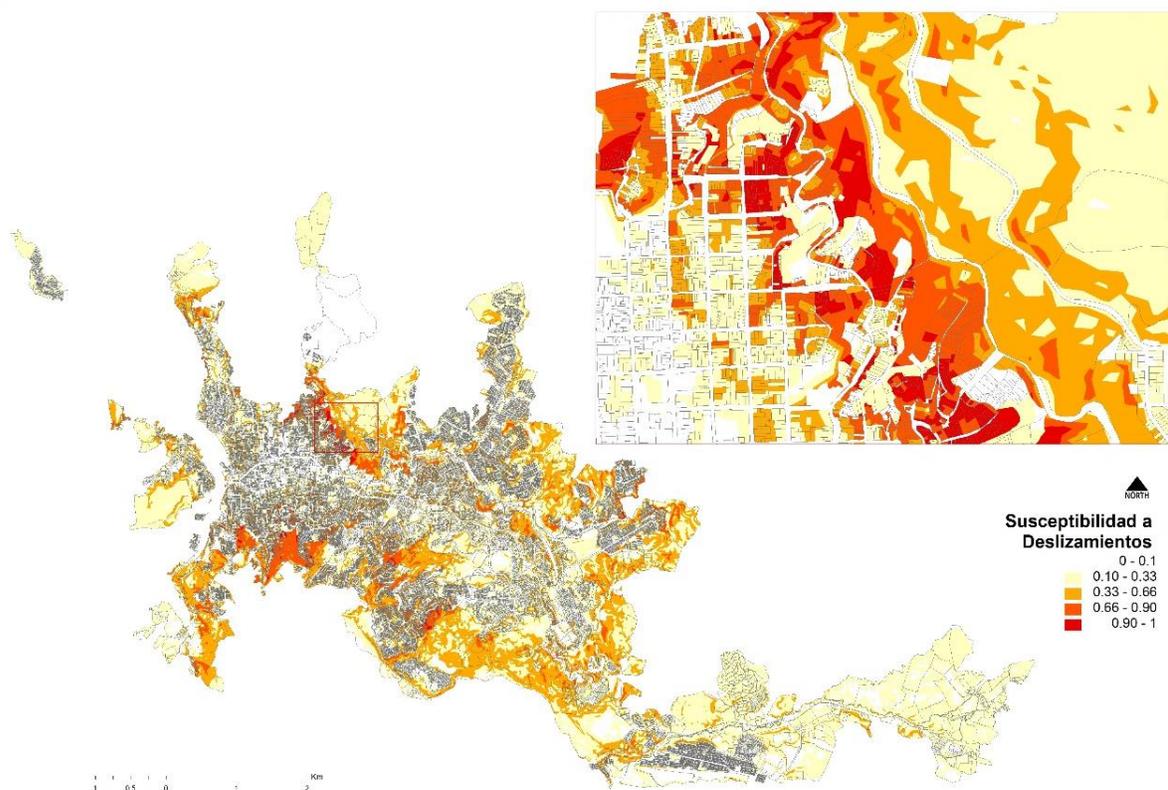


Figura 2. Modelo de Susceptibilidad para la ciudad de Manizales (tomado de Londoño, 2014)

Evaluación de la amenaza de deslizamiento

La amenaza de deslizamiento se define como la ocurrencia o no de un deslizamiento de tierra en un lugar determinado. En un dominio numérico, la ocurrencia de deslizamientos se clasifica como 1 y no ocurrencia como 0. Después de esta definición, la amenaza de deslizamiento se puede definir, en términos probabilistas, como una variable aleatoria con distribución Bernoulli.

La susceptibilidad a los deslizamientos también sigue una distribución Bernoulli. La susceptibilidad puede interpretarse como la probabilidad de ocurrencia, en condiciones estáticas, de un deslizamiento de tierra. Dado que es una representación probabilista de las condiciones actuales de un sitio o región, no está garantizando la ocurrencia de deslizamientos de tierra en un lugar determinado, sino sólo su probabilidad de ocurrencia.

Por otra parte, el factor detonante también puede definirse de manera probabilista. Los fenómenos detonantes deben caracterizarse entonces mediante una probabilidad temporal y una espacial. Los fenómenos detonantes son entonces amenazas externas que

influyen en la ocurrencia de deslizamientos en cada ubicación de análisis. Estos fenómenos se modelan como un conjunto de eventos generados de manera estocástica, cada uno caracterizado por una frecuencia anual ocurrencia, y que proporcionan la distribución espacial de los momentos estadísticos de la intensidad. Por lo tanto, la intensidad asociada a la ocurrencia de un evento detonante no se modela como la distribución de valores escalares, sino de las funciones de densidad de probabilidad de la intensidad de la amenaza. Estos son distribuciones de probabilidad continuas. Por último, un valor umbral de intensidad debe estar definido para cada ubicación con el fin de establecer el nivel de intensidad que puede detonar los deslizamientos.

En términos matemáticos, la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento en un sitio seleccionado (Pr_L) puede determinarse como:

$$Pr_L = Pr_S \cdot Pr(I > I_T) \quad (\text{Ec. 18})$$

en donde Pr_S es la susceptibilidad de ocurrencia de deslizamientos y $Pr(I > I_T)$ es la probabilidad que la intensidad del evento supere el umbral de intensidad detonante I_T . Dado que las amenazas detonantes se modelan como un conjunto de eventos estocásticos, entonces la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos se puede calcular para cada uno de esos eventos. Por lo tanto, se construye un conjunto de escenarios de deslizamiento, en donde cada escenario tiene la misma frecuencia de ocurrencia anual que el escenario detonante, y en donde la intensidad se define por dos momentos estadísticos: la media y la varianza. Asumiendo una distribución Bernoulli, la media y la varianza se definen como:

$$Media = Pr_L \quad (\text{Ec. 19})$$

$$Varianza = Pr_L \cdot (1 - Pr_L) \quad (\text{Ec. 20})$$

La probabilidad total de la amenaza puede ser calculada como la suma, para cada escenario de deslizamiento, de la probabilidad de ocurrencia del deslizamiento, multiplicada por la frecuencia anual de ocurrencia del escenario. El resultado es la tasa anual de ocurrencia de deslizamientos en cada lugar de análisis (v_L).

$$v_L = \sum_{i=1}^N Pr_L \cdot F_i \quad (\text{Ec. 21})$$

Esto proporciona una representación probabilista de la amenaza de deslizamiento, en términos de tasas de ocurrencia. El período de retorno se puede calcular para cada sitio como el inverso de la tasa de anual de ocurrencia.

Detonante sísmico

La ocurrencia de terremotos es un factor de alta incidencia en la ocurrencia de deslizamientos. Para tener en cuenta de manera adecuada dicha incidencia, debe contarse con un modelo de amenaza sísmica que permita construir un conjunto de escenarios sísmicos que representen de manera integral la amenaza de la ciudad.

El cálculo de la amenaza sísmica permite establecer el nivel de peligro esperado en un sitio o zona determinada, bajo la influencia de la actividad sísmica de fuentes aledañas. Históricamente los ingenieros, geólogos y sismólogos se han preocupado por desarrollar metodologías de cálculo que representan cada vez mejor el comportamiento de las fuentes, el tránsito de las ondas dentro del medio rocoso, la respuesta de los suelos y la respuesta estructural en el sitio de interés.

En las últimas décadas se ha desarrollado el enfoque probabilista en los análisis de amenaza sísmica, con el fin de involucrar de manera analítica la incertidumbre asociada con las variables que intervienen en el peligro sísmico de una región. Parámetros como la frecuencia de ocurrencia de determinado sismo, la probabilidad de que ocurra en un sitio específico, probabilidades de excedencia de intensidades sísmicas, entre otros, son incluidos en los modelos de cálculo, para conformar un análisis probabilista de amenaza sísmica (PSHA por sus siglas en inglés).

La evaluación probabilista de la amenaza sísmica se basa en la ecuación propuesta por Esteva (1970) para el cálculo de tasas de excedencia de medidas de intensidad de movimiento sísmico, como función de las características de generación de los terremotos y la atenuación de las ondas sísmicas a su paso por la corteza terrestre, la cual a su vez es una aplicación del teorema de la probabilidad total. Por lo tanto la tasa de excedencia de alguna medida de intensidad asociada a la ocurrencia de un evento de amenaza, en un punto particular del territorio de análisis, se puede calcular como la suma ponderada de la probabilidad de excedencia del nivel de intensidad para el cual se está calculando, para todos los escenarios que definen la amenaza, usando como factores de ponderación las frecuencias anuales de ocurrencia de los terremotos.

Por lo tanto, para calcular las tasas de excedencia de valores de intensidad es necesario construir un conjunto de escenarios estocásticos, mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos, cada uno con una distribución geográfica de momentos de probabilidad que caractericen las medidas de intensidad de movimiento fuerte.

Desde hace más de 30 años se ha desarrollado una metodología robusta de evaluación probabilista de la amenaza sísmica, mediante la cual es posible involucrar de manera analítica la incertidumbre asociada a variables como la tasa de ocurrencia de terremotos en una región, la magnitud y ubicación de los sismos y la atenuación de la energía del

movimiento fuerte. La metodología de evaluación probabilista de la amenaza sísmica fue establecida inicialmente por Cornell (1968) y Esteva (1970), y puede resumirse en cuatro pasos principales:

- Caracterización de las fuentes generadoras de terremotos con influencia en el sitio de análisis, en términos de su geometría y distribución de probabilidad de inicio de la ruptura en el área definida.
- Definición de la sismicidad de las fuentes consideradas, a partir del registro histórico de eventos ocurridos sobre su geometría (catálogo sísmico) y sus características sismotectónicas. Existen diferentes modelos de recurrencia de magnitudes para caracterizar la tasa de ocurrencia de terremotos.
- Estimación de parámetros de movimiento fuerte en el sitio de análisis. Esto se lleva a cabo empleando funciones de atenuación de movimiento que consideren la incertidumbre asociada a la estimación de los parámetros.
- Finalmente se combinan las incertidumbres asociadas a localización, tamaño y atenuación y se obtienen las tasas anuales de excedencia de parámetros de movimiento fuerte.

En este proyecto se hará uso de la información más reciente y actualizada de amenaza sísmica para Colombia, con el fin de determinar el conjunto de escenarios sísmicos que definen la amenaza para Manizales.

Con el fin de incluir de manera directa el resultado de la evaluación de la amenaza sísmica en el cálculo de la amenaza por deslizamientos, manteniendo de manera rigurosa la representación por escenarios, dicho resultado debe almacenarse en el formato .AME (Torres et.al. 2013), el cual es un formato raster multicapa diseñado específicamente para amenazas naturales. Como muestra de lo que constituye un escenario sísmico, la Figura 3 presenta la distribución espacial de la mediana de la aceleración máxima del terreno para un terremoto hipotético de magnitud M_w 7.8 ocurriendo en la falla Frontal de la Cordillera Oriental.

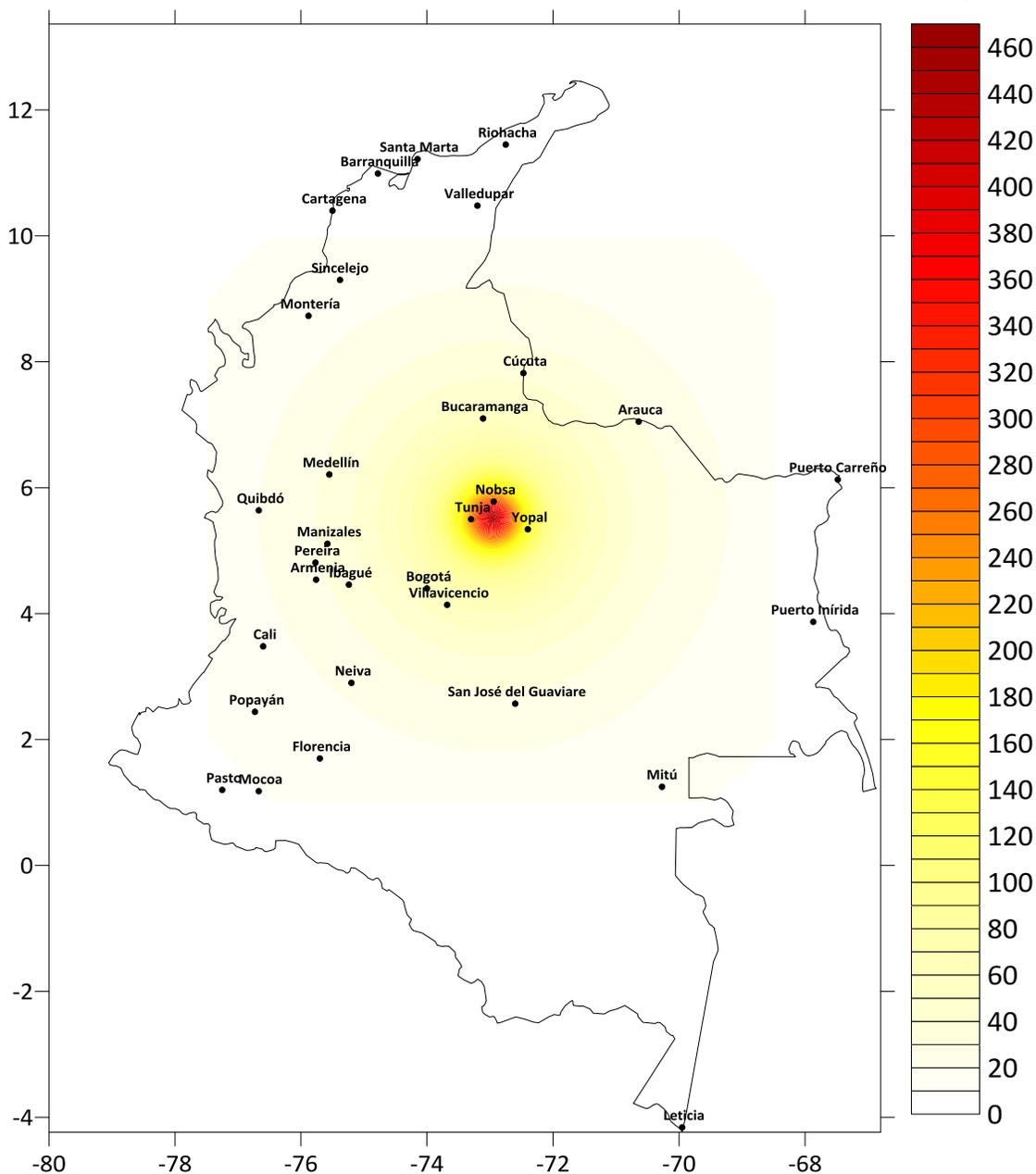


Figura 3. Distribución espacial de la mediana de PGA (cm/s²) para un terremoto de magnitud 7.8 ocurriendo en la falla Frontal de la Cordillera Oriental.

Umbral del detonante sísmico

Para determinar la aceleración crítica que determina si una ladera puede deslizarse o no, se propone usar el concepto de aceleración crítica desarrollado por Newmark en 1965. El trabajo de Newmark consiste en modelar un deslizamiento como un bloque rígido y

friccionante sobre un plano inclinado (Figura 4). El bloque tiene una aceleración crítica que representa el umbral de aceleración requerido para superar la resistencia cortante y detonar el deslizamiento.

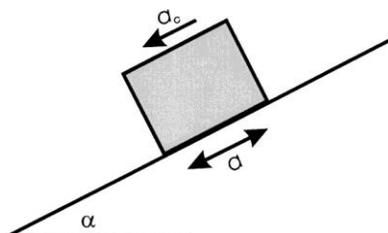


Figura 4. Esquema del bloque inclinado en el análisis de Newmark.

La aceleración crítica es función del factor de seguridad estático y de la geometría del deslizamiento. Puede ser expresada como:

$$a_c = (FS - 1)sen\alpha \quad (Ec. 22)$$

en donde a_c es la aceleración crítica (en términos de g , la aceleración de la gravedad), FS es el factor de seguridad en condiciones estáticas y α es el ángulo de inclinación del terreno.

Para determinar el factor de seguridad en cada punto dentro de la ciudad, se propone el uso de una metodología simplificada de análisis de falla plana, basada en propiedades geotécnicas inferidas de la mejor información disponible.

El método de análisis de estabilidad de talud infinito (Taylor, 1948), ha sido ampliamente utilizado en la literatura técnica para zonificaciones regionales de peligro y riesgo (Van Westen y Terlien, 1996; Jibson *et al.*, 2000; Luzi *et al.*, 2000; Alcántara-Ayala, 2004). Esto se debe a la sencillez del método, a su fácil integración en un SIG además de que a escala regional es casi imposible la utilización de métodos más precisos, debido a la falta de datos geotécnicos y al desconocimiento de los mecanismos precisos de movimiento (Luzi *et al.*, 2000).

En las condiciones en las cuales se presenta una falla paralela a la superficie del talud, a una determinada profundidad y la longitud de la falla es larga comparada con su espesor, se puede utilizar en forma aproximada, el análisis de talud infinito (Figura 5). Es un método muy rápido y sencillo para calcular, suponiendo un talud largo con una capa de suelo, detritos o roca, en el cual cualquier tamaño de columna de material es representativo de todo el talud.

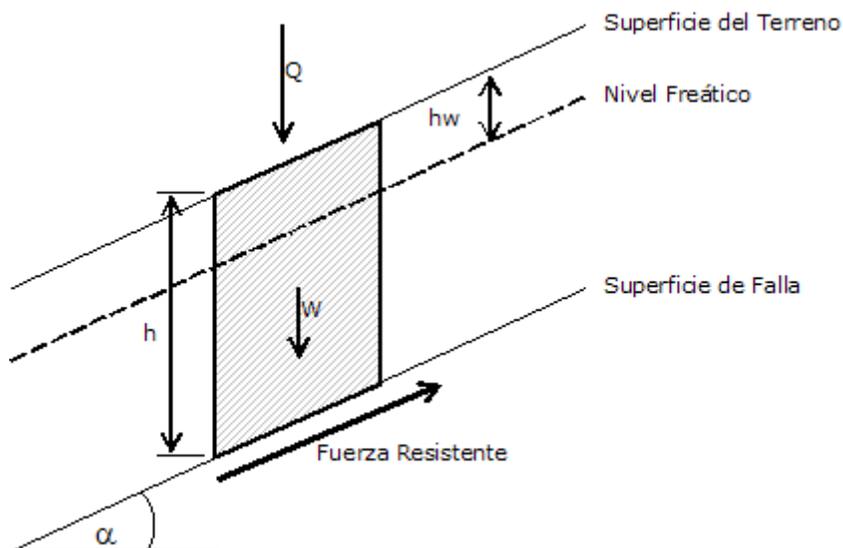


Figura 5. Esquema simplificado del método del talud infinito.

El cálculo se hace por medio de un análisis celda por celda y calculando la relación entre las fuerzas actuantes y las resistentes a lo largo del plano de falla. En los cálculos se desprecia el efecto de la fuerza horizontal entre tajadas, el cual se anula en forma aproximada entre tajada y tajada.

Los términos que intervienen en los cálculos son los siguientes:

1. La altura del primer estrato que define el plano de deslizamiento y que está determinado según la información geotécnica disponible.
2. La cohesión entre estratos, también definida por la información geotécnica.
3. El coseno y el seno del ángulo de la superficie con la horizontal, el cual depende de la topografía.

El factor de seguridad se determina como

$$FS = \frac{C / \gamma h + (1 - K \text{Sen} \alpha / g) \text{Cosa} \tan \phi}{\text{Sen} \alpha + K \text{Cosa} / g} \quad (\text{Ec. 23})$$

en donde α es el ángulo de inclinación del plano de falla, C la cohesión del suelo, W el peso del bloque deslizante, ϕ el ángulo de fricción interna del suelo, γ el peso específico del suelo, K el factor de fricción estática y g la aceleración gravitacional.

La Figura 9 presenta el mapa de Aceleración Crítica (Ac) para toda el área urbana de Manizales, calculado según lo indicado anteriormente. Esta aceleración indica el umbral a partir del cual puede esperarse que se generen deslizamientos en la ciudad.

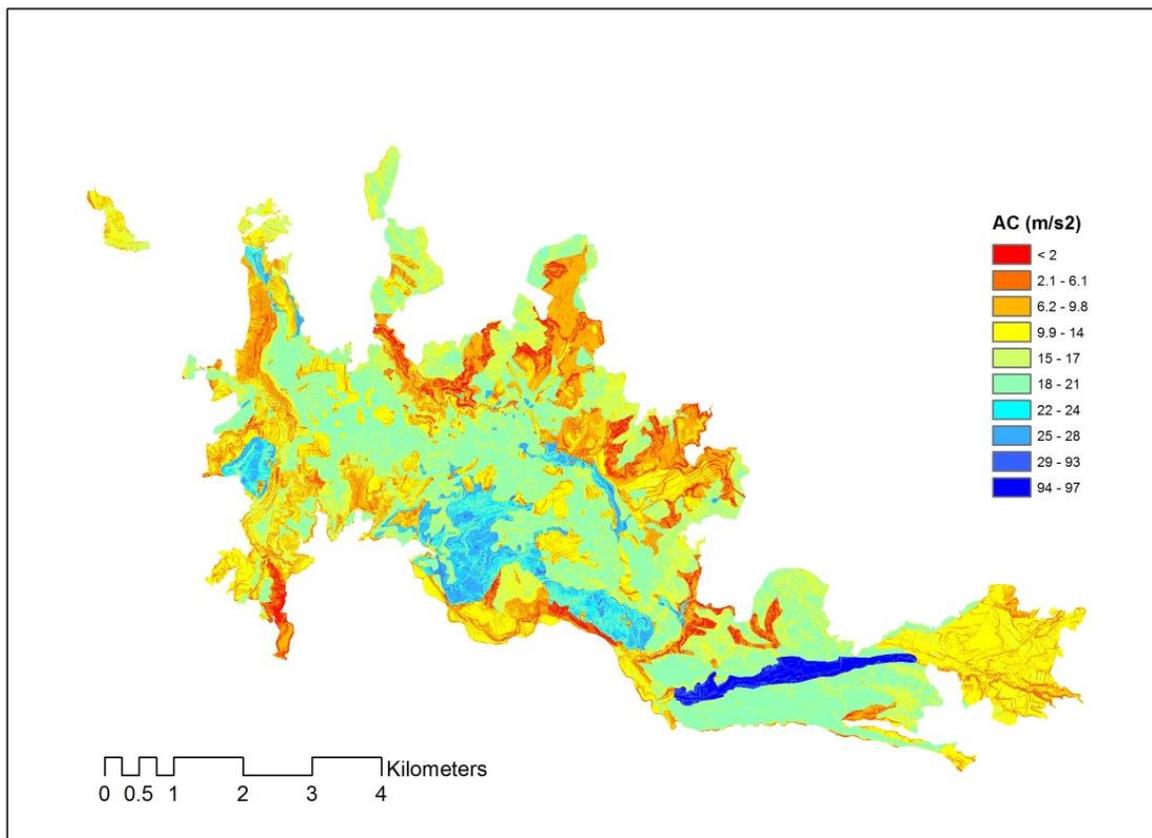


Figura 6. Ac para la zona urbana de Manizales

Detonante por lluvias intensas

Las lluvias se modelan mediante la generación estocástica de aguaceros que sean consistentes con la información pluviométrica disponible. Para este fin se construyen curvas PADF (Profundidad-Área-Duración-Frecuencia), las cuales dan cuenta del comportamiento espacial de la precipitación dentro de una región que pueda considerarse como de régimen uniforme.

El objetivo del modelo es establecer las relaciones entre la profundidad máxima de precipitación promedio (P), el área (A) sobre la cual cae esta profundidad, la duración (D) durante la cual se produce esa precipitación y la frecuencia (F) con la cual se presenta ese evento con esas características de profundidad, cobertura espacial y duración. Esto corresponde a las curvas profundidad – área – duración – frecuencia (PADF). El análisis PAD determina las cantidades máximas de precipitación sobre áreas de diferentes

tamaños y para varias duraciones de precipitación. Estas curvas deben ser características de las áreas homogéneas mencionadas anteriormente. Un aspecto adicional relacionado con esas curvas es el análisis y definición de patrones geométricos (p.e. de distribución espacial de la precipitación, los cuales se hacen a partir del estudio de mapas de curvas isoyetas de eventos de tormentas considerados, identificando centros de tormentas y zonas asociadas con hipocentros, es decir áreas consistentemente de menor precipitación). Otra consideración que debe tomarse en cuenta, es la distribución temporal de los eventos espacialmente distribuidos. Criterios para el análisis espacial de precipitaciones máximas se describen a continuación:

1. Definición de área mínima por debajo de la cual la precipitación se considera como puntual y definición adicional de área máxima (en razón a que el número de tormentas de gran extensión puede ser escaso dentro de tormentas históricas disponibles y por lo tanto las series anuales correspondientes pueden resultar no suficientemente largas para realizar análisis de frecuencia de igual confiabilidad que para el resto de eventos disponibles de menor extensión).
2. Definición del número mínimo de estaciones pluviométricas y/o pluviográficas que registren un determinado aguacero para la generación de los mapas de isoyetas correspondientes (este número podría estar alrededor de 10 pero depende indudablemente de la densidad de estaciones en cada caso de estudio), de tal manera que éstos sean confiables para la descripción espacial del evento.
3. Definición de un valor umbral para la selección de un evento para ser considerado como significativo, es decir que, además que este evento esté registrado en el número mínimo de estaciones definido en el punto 2, la precipitación registrada en cada una de estas estaciones supere ese valor umbral (p.e. mayor que 10 mm en 24 horas).
4. Por razones de consistencia, se debe utilizar la misma distribución de probabilidad y el mismo método de estimación de parámetros que el definido para los análisis puntuales de frecuencia.
5. El análisis de la distribución espacial de la precipitación para los eventos considerados debe permitir establecer el o los patrones geométricos más representativos para su caracterización genérica (p.e. patrón circular, patrón elíptico, etc) con localizaciones preferenciales de hiper e hipocentros, además de alineamientos del patrón, al igual que relaciones funcionales entre parámetros del patrón (p.e. relación entre eje mayor y eje menor en patrón elíptico entre 2 y 3).
6. La distribución temporal de los aguaceros con extensión espacial debe obtenerse del comportamiento temporal de las tormentas registradas en áreas extensas en conjunto con

las estaciones pluviométricas y pluviográficas, y no exclusivamente de los registros de estas últimas de manera individual. Así se puede garantizar la consistencia de los patrones temporales y espaciales obtenidos del análisis de precipitaciones máximas en áreas extensas.

La metodología para la determinación de relaciones PAD y PADF debe basarse en procedimientos propuestos en la literatura, como por ejemplo el de la OMM (1969). El rango de variación de las áreas se debe establecer a partir de los mapas de isoyetas generados para cada uno de los eventos disponibles, desde el valor mínimo equivalente puntual, hasta la mayor de las extensiones cubiertas por estos eventos. Eventualmente, puede ser necesario extrapolar curvas PAD Y PADF para valores mayores a este máximo histórico en el área. Al igual que se considera adecuada la distribución Gumbel con MPP para los análisis puntuales, ésta también se considera adecuada para los análisis espaciales.

Para la determinación de los datos de precipitación para los análisis de curvas PAD y PADF, se deben establecer las fechas para las cuales en alguna o algunas de las estaciones se registraron profundidades significativas, para luego completarlas con los registros de las demás estaciones. De esta manera se tiene, para cada fecha, el conjunto de valores de precipitación registrados en todas las estaciones de la zona homogénea, los cuales, graficados mediante isoyetas permiten establecer la distribución espacial de la precipitación en la fecha respectiva. Análisis adicionales similares permitirían desagregar la información diaria con duraciones menores, en la medida con que exista información pluviográfica, pudiéndose establecer distribuciones espaciales y temporales para cada uno de los sub-intervalos. De igual manera, la información diaria se puede agregar para duraciones mayores, pudiéndose identificar la distribución espacial y temporal en cada una de éstas. Como consecuencia de lo anterior, para todas las fechas históricas con eventos significativos se construyen las curvas PAD (una por cada evento y por cada duración) a partir de las cuales se realiza el análisis de frecuencia correspondiente para varios valores de área. El resultado de lo anterior es la curva PADF para la zona hidrológica homogénea.

Para construir una curva PAD en una zona hidrológicamente homogénea, se establece primero la duración considerada; a continuación se recopilan o generan los mapas de isoyetas de los eventos históricos para esta duración. En seguida, cada mapa se procesa para identificar el o los sitios de mayor pluviosidad, calculando la precipitación promedio correspondiente y midiendo el área cubierta respectiva. Esto se repite sucesivamente, extendiendo las áreas de cubrimiento de las isoyetas (progresivamente con valores mayores a menores), calculando la precipitación promedio sobre las isoyetas consideradas y midiendo las áreas respectivas. Así, en la medida en que se amplía la cobertura de isoyetas, la profundidad promedio disminuye progresivamente y el área aumenta,

definiéndose así una relación inversa entre área y precipitación máxima promedio. El algoritmo del procedimiento se describe a continuación:

1. Para cada año seleccionar los eventos intensos de precipitación con extensión espacial. Los pasos 2 a 16 corresponden al análisis de eventos de cada año con información disponible.
2. Para cada evento elaborar mapas de isoyetas para una duración D utilizando herramientas computacionales. Deben involucrarse estaciones periféricas que no hayan registrado precipitación.
3. Identificar las isoyetas de mayor valor. Sea este mayor valor de precipitación p_1 , y sea m_1 el número de isoyetas con valor p_1 .
4. Medir las áreas encerradas en las isoyetas con valor p_1 , y denotar estas áreas como a_1 , con i desde 1 hasta m_1 .
5. Estimar el valor promedio de precipitación en a_1 como $h_1 = p_1 + (p_{max} - p_1)/3$, donde p_{max} es el valor máximo puntual de precipitación dentro del área a_1 .

6. Sumar las áreas a_1 . Es decir $A_1 = \sum_{i=1}^{m_1} a_i$.

7. Para el área agregada A_1 , calcular la profundidad de precipitación promedio como:

8.
$$H_1 = \frac{\sum_{i=1}^{m_1} h_i a_i}{A_1} \quad (\text{Ec. 24})$$

9. Identificar la(s) isoyeta(s) con valor inmediatamente inferior a p_1 , y sea este valor p_2 . Sea m_2 el número de isoyetas con valor p_2 .

10. Medir cada una de las áreas internas a las isoyetas con valor p_2 . Sean estas áreas a_2 .

11. Estimar el valor promedio de precipitación en a_2 como:

12.
$$h_{2i} = \frac{h_i a_i + 0.5[p_2 + p_1][a_{2i} - a_i]}{a_{2i}} \quad (\text{Ec. 25})$$

13. Sumar las áreas a_2 . Es decir $A_2 = \sum_{i=1}^{m_2} a_{2i}$.

14. Para el área agregada A_2 , calcular la profundidad de precipitación promedio como:

$$15. H_2 = \frac{\sum_{i=1}^{m_2} h_{2i} a_{2i}}{A_2} \quad (\text{Ec. 26})$$

16. Continuar con las curvas isoyetas subsiguientes mediante un procedimiento similar. Para la isoyeta n con un valor de precipitación p_n y con áreas encerradas a_n , estimar h_n como:

$$17. h_{ni} = \frac{h_{1i} \cdot a_{1i} + \sum_{j=2}^n 0.5 [p_j + p_{j-1}] [a_{ji} - a_{(j-1)i}]}{a_n} \quad (\text{Ec. 27})$$

18. Sumar las áreas a_n . Es decir $A_n = \sum_{i=1}^{m_n} a_{ni}$

19. Para el área agregada A_n , calcular la profundidad promedio como:

$$20. H_n = \frac{\sum_{i=1}^{m_n} h_{ni} a_{ni}}{A_n} \quad (\text{Ec. 28})$$

21. Graficar A_j vs. H_j .

22. Repetir el procedimiento descrito entre los pasos 2 a 16 para todos los eventos de precipitación de duración D disponibles en ese año.

23. Superponer las gráficas A_j vs. H_j del paso 16 para todos los eventos de ese año de duración D .

24. Establecer la envolvente superior de precipitación para la superposición del paso anterior. Esta envolvente representa la relación entre la precipitación máxima y la extensión espacial para ese año y esa duración o curva PAD. En esta envolvente determinar los valores de precipitación máxima para valores predeterminados de área.

25. Repetir los pasos 2 a 19 para cada uno de los demás años disponibles.

26. Conformar las series anuales de precipitación máxima de duración D para cada una de las áreas predeterminadas del paso 19. Hacer análisis de frecuencia con esta serie usando la misma distribución de probabilidad y mismo método de estimación de parámetros aplicados en los análisis puntuales.
27. Repetir pasos 2 a 21 para otras duraciones D .
28. Con los resultados de los análisis de frecuencia de los pasos 21 y 22 conformar las curvas PADF.

Como resultado de los análisis anteriores se disponen de curvas PADF representativas de las zonas homogéneas correspondientes. Además, los análisis de curvas isoyetas históricas permiten establecer patrones típicos de distribución espacial de eventos de precipitación, que pueden ser diferenciados según su origen sea por huracanes o por lluvias intensas. De manera complementaria a lo anterior, se pueden determinar ubicaciones preferenciales de estos patrones dentro del área. Los tres ingredientes anteriores (i.e., curvas PADF, patrones típicos y ubicación preferencial), permiten establecer procedimientos para la generación sintética de eventos de precipitación. Para esto y de manera aleatoria controlada, se puede generar la ubicación de los eventos espaciales de precipitación con características, también aleatorias, controladas de tamaño y forma que cumplan con las relaciones contenidas en las curvas PADF. Así, el procedimiento es:

- 1 Seleccionar un determinado período de retorno T
- 2 Determinar aleatoriamente una duración D
- 3 Seleccionar valores de área, A_i , dentro del rango cubierto por la curva PADF correspondiente a la duración D y frecuencia T anteriores
- 4 Con base en la curva PADF determinar los respectivos valores de profundidad máxima promedio P_i
- 5 Generar aleatoriamente la ubicación, forma y tamaño del patrón de precipitación;
- 6 Generar con el patrón típico las correspondientes curvas isoyetas que preserven para las anteriores áreas A_i las respectivas profundidades de precipitación P_i

En la Tabla 1 se presentan las ecuaciones para confeccionar un patrón espacial circular o elíptico, pues una elipse está definida por los semiejes menor y mayor, a y b respectivamente, y se puede expresar el uno en función del otro como $b = Ka$. En la Tabla 1 las dos primeras columnas corresponden a los valores de áreas y precipitaciones máximas promedio adoptados de la curva PADF (pasos 3 y 4), con las áreas ordenadas de menor a mayor. La tercera columna muestra las ecuaciones para determinar el valor correspondiente de la isoyeta del patrón elíptico. Las columnas 4 y 5 permiten calcular los valores para cada isoyeta de los semiejes mayor y menor.

Tabla 1 Determinación de patrones sintéticos espaciales

A_i	P_i	Valor isoyeta, h_i	Semieje menor a_i	Semieje mayor b_i
A_1	P_1	$h_1 = P_1$	$a_1 = \left(\frac{A_1}{\pi K}\right)^{0.5}$	$b_1 = Ka_1$
A_2	P_2	$h_2 = \frac{2(P_2 A_2 - P_1 A_1)}{A_2 - A_1} - h_1$	$a_2 = \left(\frac{A_2}{\pi K}\right)^{0.5}$	$b_2 = Ka_2$
A_3	P_3	$h_3 = \frac{2(P_3 A_3 - P_2 A_2)}{A_3 - A_2} - h_2$	$a_3 = \left(\frac{A_3}{\pi K}\right)^{0.5}$	$b_3 = Ka_3$
...
A_n	P_n	$h_n = \frac{2(P_n A_n - P_{n-1} A_{n-1})}{A_n - A_{n-1}} - h_{n-1}$	$a_n = \left(\frac{A_n}{\pi K}\right)^{0.5}$	$b_n = Ka_n$

Para la generación sintética de eventos de precipitación máxima, es necesario definir tres elementos complementarios a lo anteriormente descrito: (1) la ubicación espacial del centro de la tormenta; (2) el valor de K , y (3) la dirección del eje mayor. En relación con la ubicación espacial del centro de tormenta, con base en los mapas históricos de isoyetas se debe identificar la o las zonas de mayor frecuencia de ubicación, las cuales se pueden representar mediante polígonos. Por lo tanto, es dentro de estos polígonos donde se deben generar centros aleatorios de tormentas. Con respecto al valor K , nuevamente del análisis de mapas históricos de isoyetas se pueden determinar rangos de valores de K más representativos, ajustando una distribución uniforme o triangular simétrica, por ejemplo. Para la dirección del eje mayor, los mapas históricos de isoyetas permiten establecer alineamientos preferenciales de los patrones de tormentas, a partir de los cuales se pueden definir rangos de valores de azimut del eje mayor, dentro de los cuales se deben generar valores aleatorios. La Figura 7 muestra un escenario de precipitación hipotético generado para la cuenca del río Chinchiná.

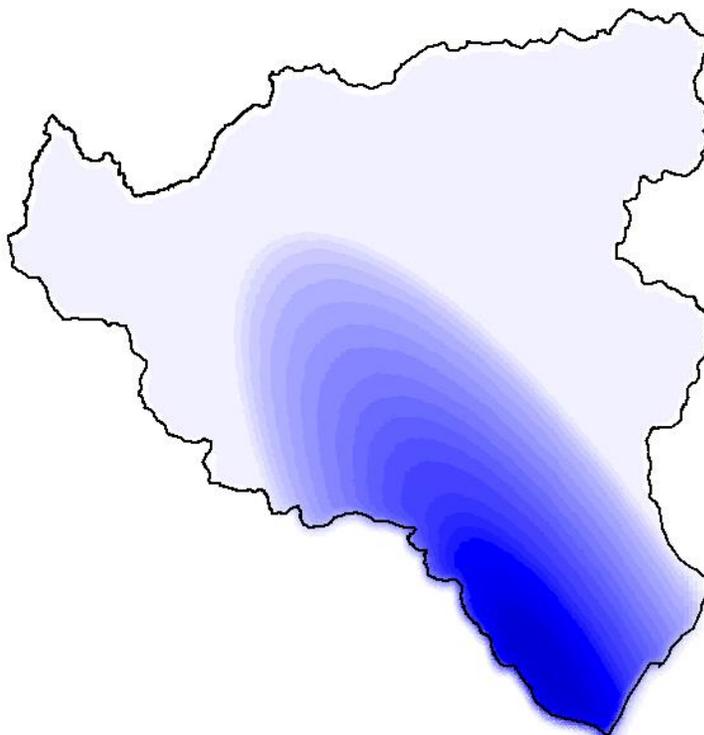


Figura 7. Escenario de precipitación en la cuenca del río Chinchiná.

Umbral del detonante por lluvias intensas

El umbral por lluvias intensas debe establecerse a partir de un análisis de las precipitaciones que han producido deslizamientos anteriormente. Para tal efecto, es importante que el inventario de deslizamientos contenga las fechas exactas de la ocurrencia de los mismos y sea exhaustivo. Deben obtenerse los valores de precipitación diaria acumulada para varios días previos al evento, con el fin de analizar varios períodos antecedentes y verificar cuál es el que mejor se ajusta a la dinámica lluvia-deslizamiento de la zona de estudio.

A cada serie de lluvia antecedente se asigna una función de densidad de probabilidad. A modo de ejemplo, en la Figura 8 se presentan los datos de precipitación antecedente de 25 días para la ciudad de Manizales (Londoño 2014). En este caso se ha utilizado la familia Generalized Extreme Value Distribution (usada para modelar valores extremos de eventos independientes – en este caso, aguaceros) y específicamente la distribución de Fréchet (línea continua en la figura). El umbral mínimo para 25 días, a partir del cual se empiezan a presentar deslizamientos, se ha estimado como $\mu - 1$; en el caso de 25 días, el umbral correspondiente es 150 mm aproximadamente.

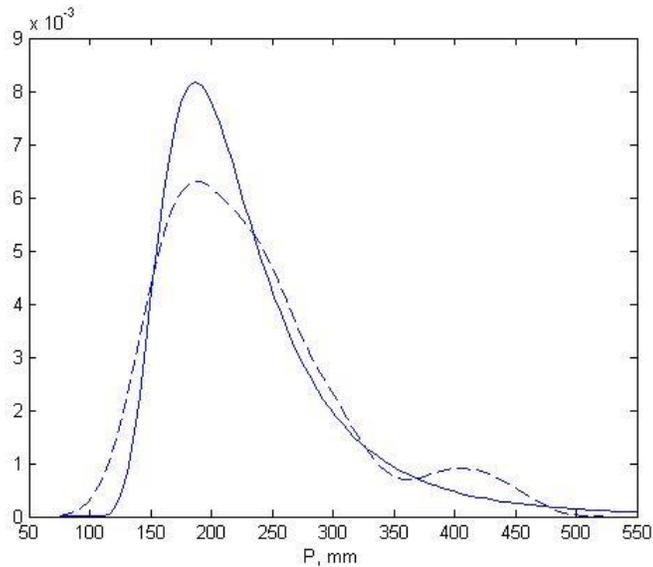


Figura 8. Cálculo de umbral para 25 días en la ciudad de Manizales

Dada la naturaleza del umbral, no es posible aplicar directamente la formulación presentada anteriormente para la generación de los escenarios, debido a que se trata de un umbral de lluvia antecedente de varios días (por ejemplo 25), y no a uno de lluvia diaria acumulada. Dado que lo que interesa es la lluvia antecedente, deben realizarse permutaciones que permitan considerar la ocurrencia conjunta de tormentas de duración máxima de 1 día, dentro del intervalo de tiempo para el cual sea definido el umbral. Esto implica asumir lo siguiente:

- Todos los escenarios de lluvia son independientes.
- La lluvia que aporta un escenario dentro del periodo dado no está correlacionada con la que aporta cualquier otro escenario en el mismo periodo.
- Si bien los escenarios son mutuamente excluyentes, lo cual indica que no pueden ocurrir simultáneamente (es decir, su intersección es el conjunto vacío), se asume que la ocurrencia dentro del periodo de tiempo definido no implica simultaneidad. Es decir, los escenarios ocurren en momentos (días) diferentes.

Dada la duración de las tormentas (por ejemplo 1 día) y la duración determinada para el umbral de lluvia antecedente, se requiere entonces determinar los conjuntos de tormentas que pueden ocurrir en el espacio de tiempo dado, con duración dada. El número de combinaciones se determina aplicando la definición del coeficiente binomial, el cual determina el número de subconjuntos de k elementos, escogidos de un conjunto con n elementos.

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

(Ec. 29)

en donde el operador ! indica el factorial del número correspondiente.

Tasa anual de ocurrencia de deslizamientos

Una vez definida la susceptibilidad a los deslizamientos a partir de las características intrínsecas de las laderas, y los fenómenos detonantes como un conjunto de escenarios y una intensidad umbral en cada ubicación, se procede a determinar la tasa anual de ocurrencia de los deslizamientos, de la manera como se indica en la ecuación 4. La Figura 9 presenta la tasa anual de ocurrencia de deslizamientos detonados por lluvia obtenida para la ciudad de Manizales. En términos prácticos, el mapa está indicando cuantas veces por año, en promedio, ocurren deslizamientos en cada ubicación.

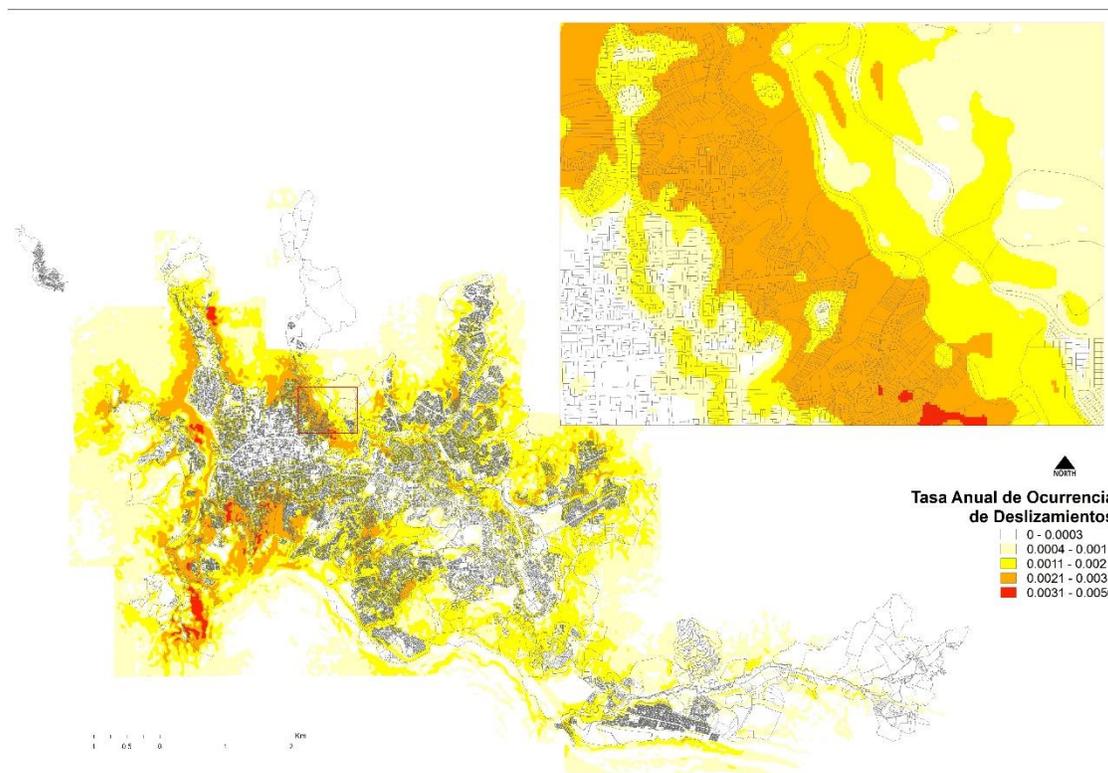


Figura 9. Tasa anual de ocurrencia de deslizamientos para la ciudad de Manizales

Evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo requiere en principio de un modelo de exposición, en el que se encuentren georreferenciados los elementos que componen el sistema, así como valorados en términos de su valor de reposición. La evaluación del riesgo por deslizamientos se basa en un supuesto principal: la vulnerabilidad de cualquier elemento expuesto es total. En otras palabras, cuando ocurre un deslizamiento en la ubicación de un activo, todo su valor de reposición se pierde, independiente del tipo de elemento expuesto en cuestión, y del tipo, magnitud, volumen o velocidad del deslizamiento. Esto implica que otras características de los elementos expuestos, como su material, dimensiones, etc, no resultan relevantes dentro del análisis de riesgo por deslizamientos.

El riesgo por deslizamiento puede expresarse entonces en términos probabilistas para cada escenario del detonante. Los momentos estadísticos para la pérdida total para cada escenario de puede obtenerse mediante las siguientes expresiones:

$$E(p) = \sum_{i=1}^{NE} Val \cdot Pr_L \quad (\text{Ec. 30})$$

$$Var(p) = \sum_{i=1}^{NE} (Val - E(p))^2 \cdot Pr_L \quad (\text{Ec. 31})$$

Donde *Val* es el valor expuesto, Pr_L es la probabilidad de ocurrencia de deslizamiento en la ubicación del elemento expuesto y *NE* es el número total de elementos expuestos. Dado que la pérdida está definida probabilísticamente para cada escenario de deslizamiento, el riesgo puede integrarse siguiendo las métricas probabilistas para obtener una curva de excedencia de pérdidas y de allí las métricas de riesgo usuales, como la Pérdida Máxima Probable, la Pérdida Anual Esperada, la probabilidad de quiebra, etc, las cuales son comunes en la evaluación del riesgo de otros tipos de amenazas.

4. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN MULTIAMENAZA

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación del riesgo multiamenaza en Manizales, incluyendo sismo¹, deslizamientos detonados por sismo y deslizamientos detonados por lluvia. Los resultados se presentan en términos de la pérdida anual esperada (AAL por sus siglas en inglés: Average Annual Loss) y las pérdidas máximas probables (PML por sus siglas en inglés: Probable Maximum Loss).

Es importante recordar que la pérdida anual esperada es una cantidad que anualiza los valores asociados a las pérdidas futuras que pueden ocurrir en la ciudad, considerando que los tiempos de ocurrencia y las pérdidas causadas en los futuros eventos son totalmente inciertos. Debe entenderse por lo tanto como una normalización en el tiempo de las pérdidas futuras, es decir, que no está indicando que en efecto ese valor vaya a perderse cada año de manera exacta. Por otra parte, la pérdida máxima probable es una cantidad de pérdida asociada a algún periodo de retorno. Típicamente son de interés los periodos de retorno largos (de más de 500 años) pues dan idea de la cuantía de las pérdidas esperada durante eventos catastróficos. De esta manera, los resultados de riesgo deben leerse siempre de manera integral, pues es importante cuantificar el riesgo desde la óptica de la amortización anual de las pérdidas futuras, así como del potencial de pérdida en eventos catastróficos.

Pérdidas por sismo (sin deslizamientos)

Las pérdidas causadas por terremotos se presentan de manera totalizada en las siguientes Tablas. La Tabla 3 presenta el valor expuesto total y el valor de la pérdida anual esperada, tanto en valor monetario como relativa al valor expuesto total de las edificaciones de Manizales (expresada como una cantidad al millar). Por otra parte, la Tabla 4 presenta los valores de las pérdidas máximas probables para diferentes periodos de retorno, expresadas como cuantía de pérdida y en porcentaje respecto al valor expuesto total.

Tabla 2. Pérdida anual esperada por sismo en Manizales.

Valor expuesto	\$ 7,852,689,221,951
----------------	----------------------

¹ Se hace uso de evaluaciones previas desarrolladas por especialistas en la materia, dentro del desarrollo de otras actividades asociadas al contrato interadministrativo No. 240-2012 con otrosi No. 1-2014 suscrito entre la Universidad Nacional De Colombia Sede Manizales y la Corporación Autónoma Regional De Caldas – Corpocaldas.

AAL	\$ 53,239,335,845
AAL ‰	6.78

Tabla 3. Pérdidas máximas probables por sismo en Manizales.

Periodo de retorno (años)	PML	PML %
50	\$ 180,611,852,105	2.3%
100	\$ 321,960,258,100	4.1%
250	\$ 561,467,279,370	7.1%
500	\$ 777,416,232,973	9.9%
1000	\$ 1,020,849,598,854	13.0%
2500	\$ 1,358,515,235,398	17.3%

La Figura 13 muestra la curva de PML por sismo para Manizales. De esta curva puede obtenerse el valor de PML para otros periodos de retorno no contenidos en la Tabla 4. Por otra parte, la Figura 14 muestra el mapa de pérdidas anuales esperadas en las edificaciones de Manizales, asociadas a la ocurrencia de terremotos.

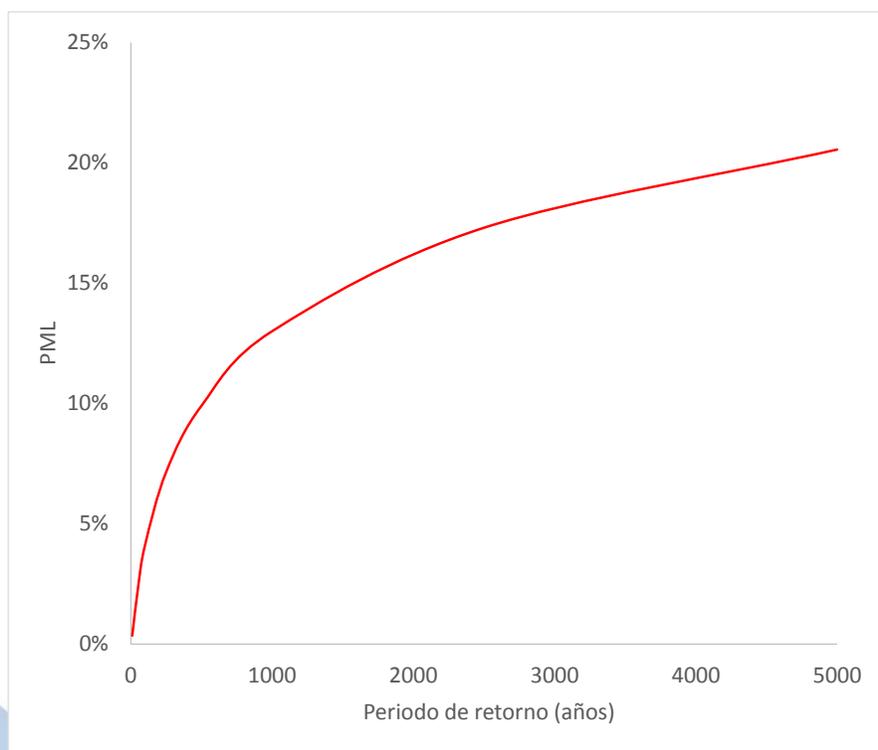
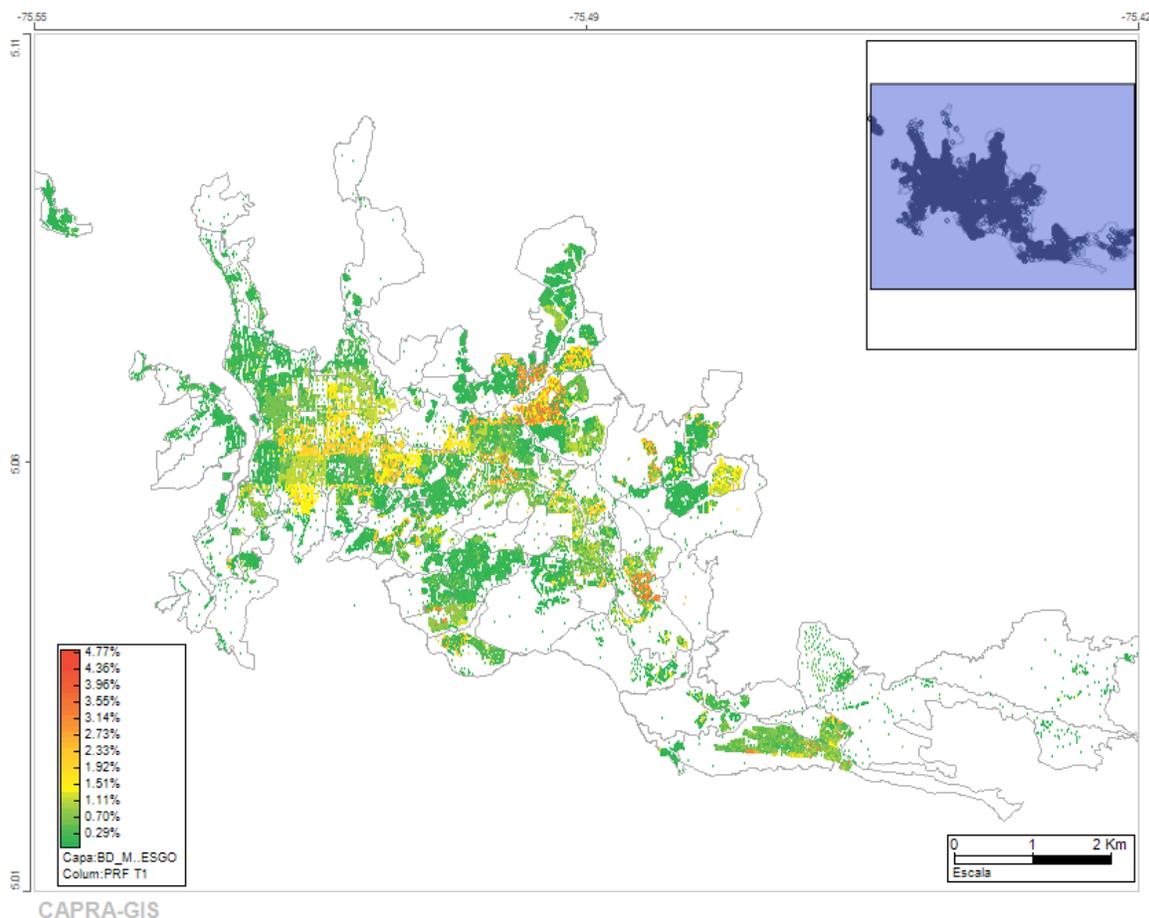


Figura 10. Curva de PML por sismo para Manizales



CAPRA-GIS

Figura 11. Mapa de pérdida anual esperada por sismo para las edificaciones de Manizales

Pérdidas por deslizamientos detonados por sismo

Las pérdidas causadas por deslizamientos detonados por terremotos se presentan de manera totalizada en las siguientes Tablas. La Tabla 5 presenta el valor expuesto total y el valor de la pérdida anual esperada, tanto en valor monetario como relativa al valor expuesto total de las edificaciones de Manizales (expresada como una cantidad al millar). Por otra parte, la Tabla 6 presenta los valores de las pérdidas máximas probables para diferentes periodos de retorno, expresadas como cuantía de pérdida y en porcentaje respecto al valor expuesto total.

Tabla 4. Pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por sismo en Manizales.

Valor expuesto	\$ 7,852,689,221,951
AAL	\$ 3,310,562,350
AAL ‰	0.42

Tabla 5. Pérdidas máximas probables por deslizamientos detonados por sismo en Manizales.

Periodo de retorno (años)	PML	PML %
10	\$ 6,282,151,378	0.08%
50	\$ 12,564,302,755	0.16%
100	\$ 16,098,012,905	0.21%
250	\$ 22,615,744,959	0.29%
500	\$ 29,447,584,582	0.38%
1000	\$ 38,870,811,649	0.50%
2500	\$ 58,109,900,242	0.74%
5000	\$ 83,238,505,753	1.06%

La Figura 15 muestra las curva de PML por deslizamientos detonados por sismo para Manizales. De esta curva puede obtenerse el valor de PML para otros periodos de retorno no contenidos en la Tabla 6. Por otra parte, la Figura 16 muestra el mapa de pérdidas anuales esperadas en las edificaciones de Manizales, asociadas a la ocurrencia de deslizamientos detonados por terremotos.

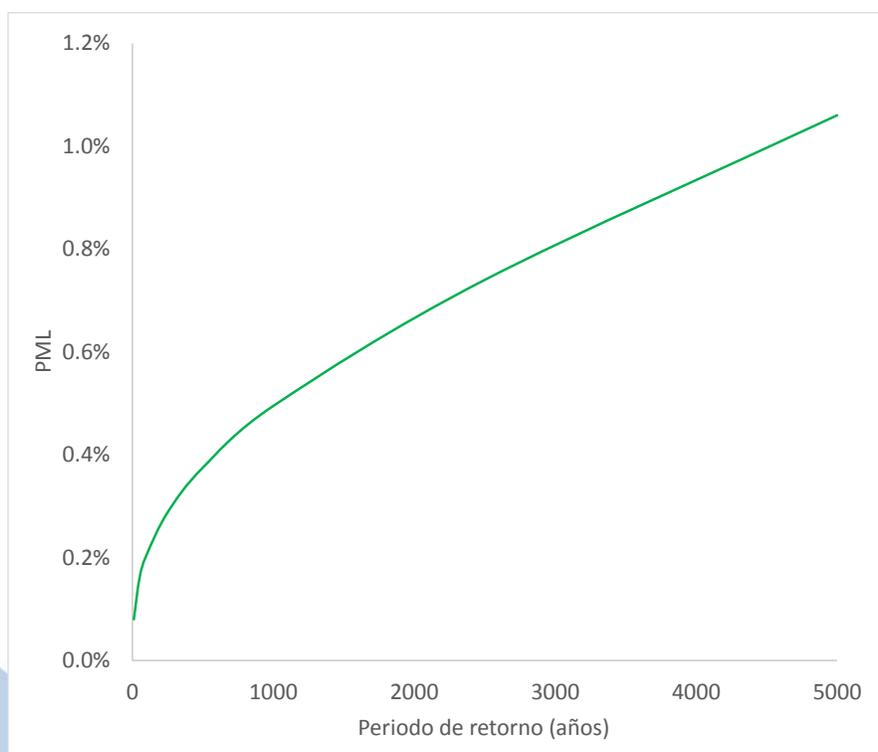


Figura 12. Curva de PML por deslizamientos detonados por sismo para Manizales

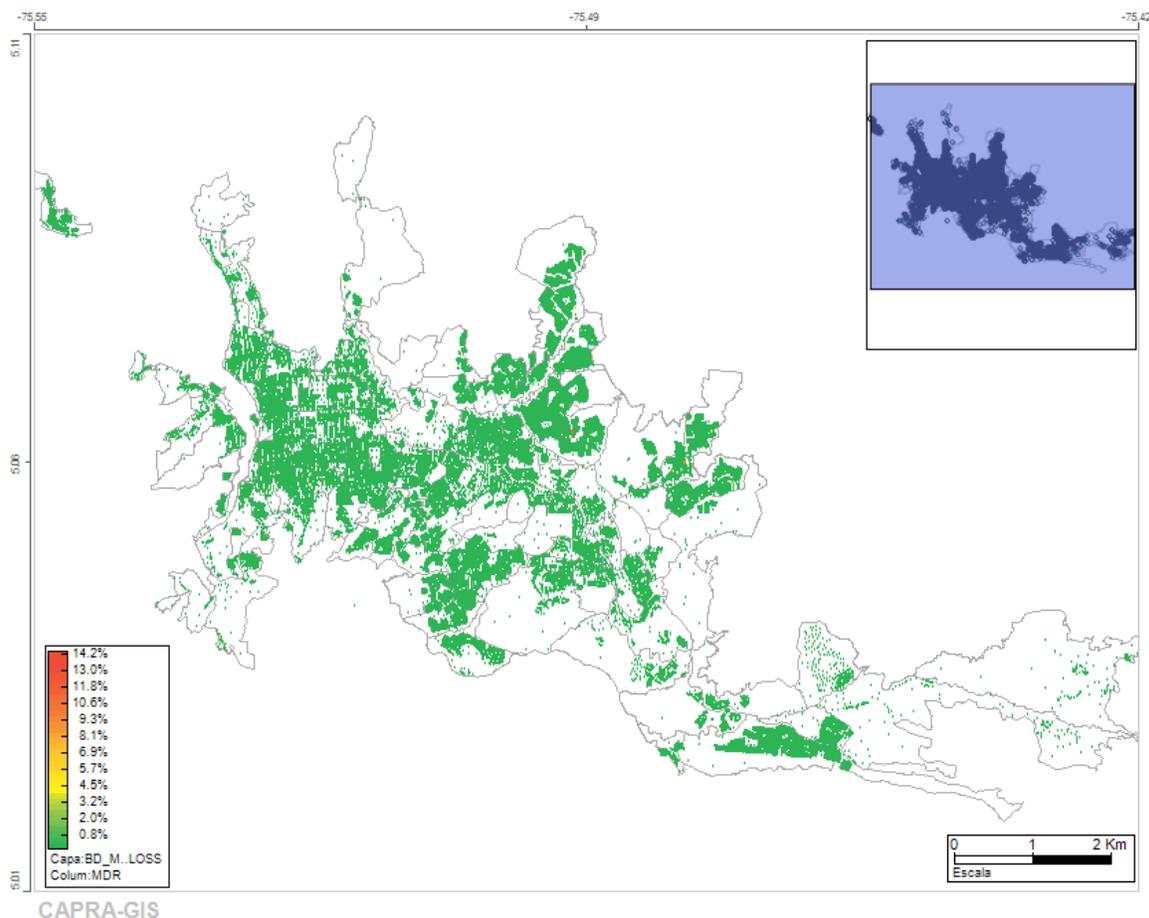


Figura 13. Mapa de pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por sismo para las edificaciones de Manizales

Pérdidas totales por deslizamientos detonados por lluvia

Las pérdidas causadas por los deslizamientos detonados por lluvias intensas se presentan de manera totalizada en las siguientes Tablas. La Tabla 7 presenta el valor expuesto total y el valor de la pérdida anual esperada, tanto en valor monetario como relativa al valor expuesto total de las edificaciones de Manizales (expresada como una cantidad al millar). Por otra parte, la Tabla 8 presenta los valores de las pérdidas máximas probables para diferentes periodos de retorno, expresadas como cuantía de pérdida y en porcentaje respecto al valor expuesto total.

Tabla 6. Pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por lluvias en Manizales.

Valor expuesto	\$ 7,852,689,221,951
AAL	\$ 5,062,314,885
AAL ‰	0.64

Tabla 7. Pérdidas máximas probables por deslizamientos detonados por lluvias en Manizales.

Periodo de retorno (años)	PML	PML %
10	\$ 10,000,000	0.0001%
50	\$ 78,526,892	0.001%
100	\$ 47,116,135,332	0.6%
250	\$ 455,455,974,873	5.8%
500	\$ 918,764,638,968	11.7%
1000	\$ 1,232,872,207,846	15.7%
2500	\$ 1,476,305,573,727	18.8%
5000	\$ 1,601,948,601,278	20.4%

La Figura 17 muestra las curva de PML por deslizamientos detonados por lluvias intensas para Manizales. De esta curva puede obtenerse el valor de PML para otros periodos de retorno no contenidos en la Tabla 8. Por otra parte, la Figura 19 muestra el mapa de pérdidas anuales esperadas en las edificaciones de Manizales, asociadas a la ocurrencia de deslizamientos detonados por aguaceros intensos.

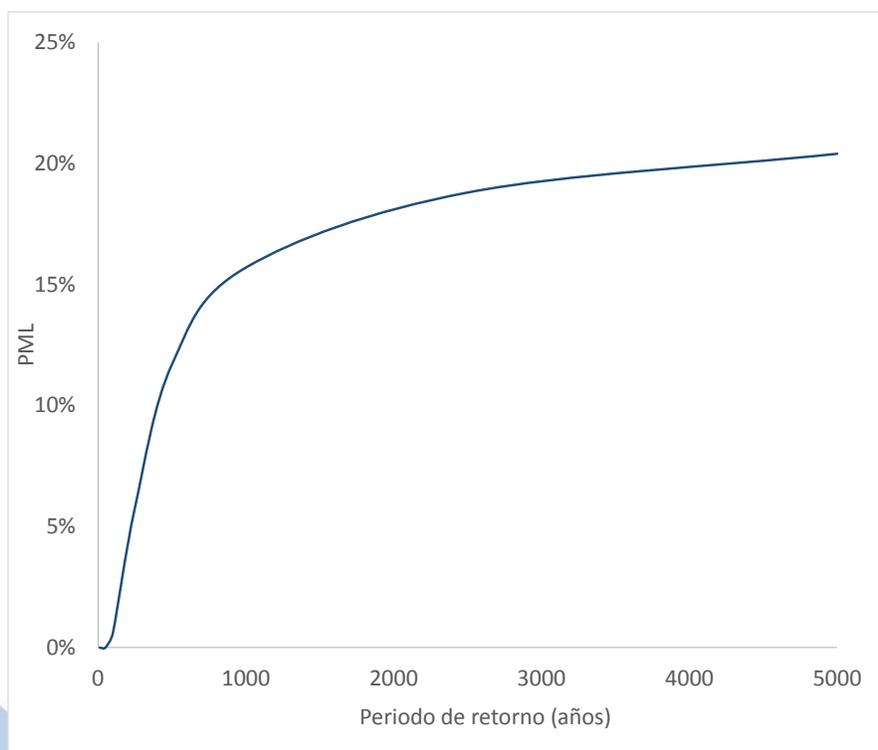


Figura 14. Curva de PML total por deslizamientos detonados por lluvias para Manizales

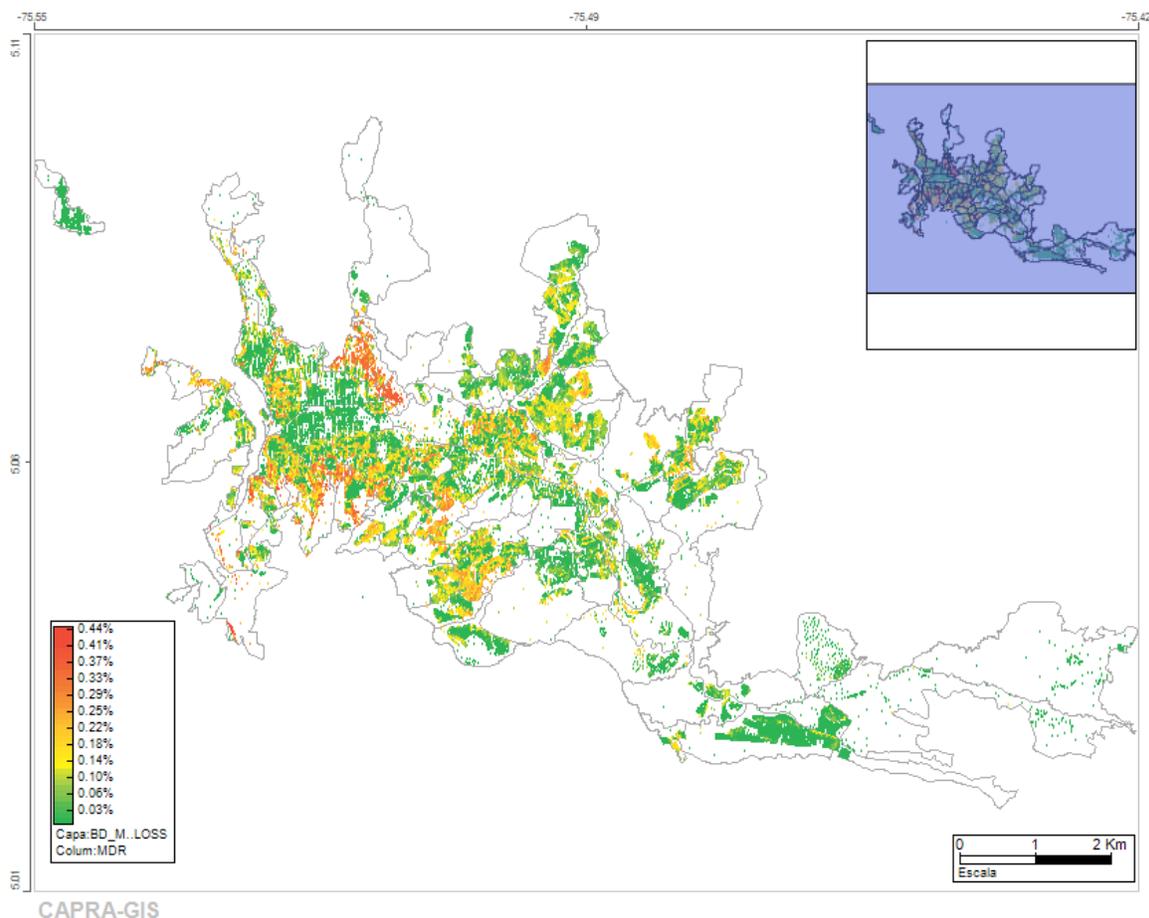


Figura 15. Mapa de pérdida anual esperada total por deslizamientos detonados por lluvias para las edificaciones de Manizales

Pérdidas totales por sismo

Las pérdidas causadas por terremotos, incluyendo los deslizamientos detonados, se presentan de manera totalizada en las siguientes Tablas. La Tabla 9 presenta el valor expuesto total y el valor de la pérdida anual esperada, tanto en valor monetario como relativa al valor expuesto total de las edificaciones de Manizales (expresada como una cantidad al millar). Por otra parte, la Tabla 10 presenta los valores de las pérdidas máximas probables para diferentes periodos de retorno, expresadas como cuantía de pérdida y en porcentaje respecto al valor expuesto total.

Tabla 8. Pérdida anual esperada total por sismo en Manizales.

Valor expuesto	\$ 7,852,689,221,951
AAL	\$ 54,603,637,643
AAL ‰	6.95

Tabla 9. Pérdidas máximas probables totales por sismo en Manizales.

Periodo de retorno (años)	PML	PML %
10	\$ 29,447,584,582	0.4%
50	\$ 188,464,541,327	2.4%
100	\$ 329,812,947,322	4.2%
250	\$ 577,172,657,813	7.4%
500	\$ 800,974,300,639	10.2%
1000	\$ 1,060,113,044,963	13.5%
2500	\$ 1,389,925,992,285	17.7%
5000	\$ 1,652,991,081,221	21.1%

La Figura 19 muestra las curva de PML total por sismo para Manizales. De esta curva puede obtenerse el valor de PML para otros periodos de retorno no contenidos en la Tabla 10.

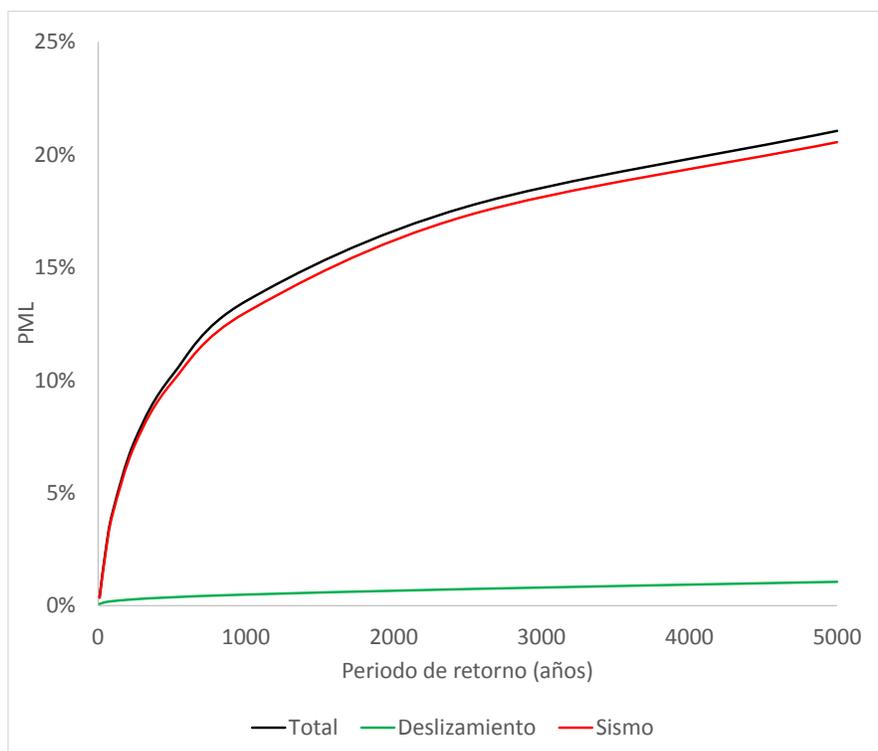


Figura 16. Curva de PML total por sismo para Manizales

Resultados por comuna y portafolio

Los resultados pueden ser calculados por comuna y por portafolio de edificaciones, con el fin de presentar la información de manera desagregada en la ciudad. Cabe mencionar que esta desagregación solo puede realizarse sobre la pérdida anual esperada, dado que es una cantidad que cumple con los principios de superposición y homogeneidad de los operadores lineales. Las pérdidas máximas probables, por tratarse de percentiles altos de una distribución de probabilidad, no pueden ser desagregadas.

La Tabla 11 presenta las pérdidas por comuna en Manizales, para todos los portafolios de edificaciones. Los resultados desagregados por comuna y portafolio se presentan de la Tabla 12 a la Tabla 17. Estos resultados son de vital importancia para el cálculo del riesgo desde una perspectiva integral u holística, en donde se incluyan variables de orden social que agraven la situación potencial de riesgo físico que se presenta en este informe. No obstante el alcance de este contrato no incluye la evaluación holística, se presentan los resultados de manera desagregada con el fin de permitir este tipo de evaluación con base a lo aquí consignado.

En las tablas siguientes, la columna VALFIS corresponde al valor expuesto total de cada comuna, según el portafolio presentado. Los valores en las columnas nombradas según la amenaza son las pérdidas anuales esperadas, tanto en valor monetario (pesos colombianos) como al millar relativo al valor expuesto de la comuna.

Tabla 10. Pérdidas anuales esperadas por comuna en Manizales.

COMUNA	VALFIS	DESLIZAMIENTO LLUVIA		DESLIZAMIENTO SISMO		SISMO		TOTAL SISMO	
	COP	COP	%	COP	%	COP	%	COP	%
Comuna Palogrande	\$ 1,986,519,776,356	\$ 1,264,018,081	0.64	\$ 275,597,548	0.14	\$ 13,389,853,921	6.74	\$ 13,665,451,468	6.88
Comuna Ciudadela del Norte	\$ 483,402,592,455	\$ 372,877,947	0.77	\$ 308,585,324	0.64	\$ 3,977,018,839	8.23	\$ 4,285,604,163	8.87
Comuna Ecoturístico Cerro de Oro	\$ 661,388,074,747	\$ 378,092,953	0.57	\$ 51,463,297	0.08	\$ 4,828,699,093	7.30	\$ 4,880,162,390	7.38
Comuna Estación	\$ 720,576,198,489	\$ 477,522,006	0.66	\$ 21,119,594	0.03	\$ 5,353,150,446	7.43	\$ 5,374,270,040	7.46
Comuna Atardeceres	\$ 811,027,397,683	\$ 572,292,418	0.71	\$ 154,553,626	0.19	\$ 2,285,657,846	2.82	\$ 2,440,211,472	3.01
Comuna la Macarena	\$ 410,994,283,055	\$ 435,793,839	1.06	\$ 53,034,797	0.13	\$ 2,871,173,546	6.99	\$ 2,924,208,343	7.11
Comuna Cumanday	\$ 1,095,149,715,208	\$ 425,792,978	0.39	\$ 1,780,551	0.00	\$ 11,332,863,629	10.35	\$ 11,334,644,180	10.35
Comuna Tesorito	\$ 635,908,262,466	\$ 90,046,381	0.14	\$ 2,830,125	0.00	\$ 2,614,001,830	4.11	\$ 2,616,831,955	4.12
Comuna Universitaria	\$ 328,724,612,057	\$ 281,732,458	0.86	\$ 1,281,366	0.00	\$ 1,479,641,426	4.50	\$ 1,480,922,792	4.51
Comuna La Fuente	\$ 425,706,538,847	\$ 440,958,925	1.04	\$ 19,865,904	0.05	\$ 3,067,704,109	7.21	\$ 3,087,570,013	7.25
Comuna san José	\$ 291,717,463,589	\$ 319,985,810	1.10	\$ 2,477,794	0.01	\$ 2,037,116,148	6.98	\$ 2,039,593,942	6.99

Tabla 11. Pérdidas anuales esperadas por comuna para el portafolio RESIDENCIAL en Manizales.

COMUNA	RESIDENCIAL								
	VALFIS	DESLIZAMIENTO LLUVIA		DESLIZAMIENTO SISMO		SISMO		TOTAL SISMO	
	COP	COP	%	COP	%	COP	%	COP	%
Comuna Palogrande	\$ 1,422,272,176,947	\$ 1,020,511,449	0.72	\$ 259,549,341	0.18	\$ 10,092,489,768	7.10	\$ 10,352,039,108	7.28
Comuna Ciudadela del Norte	\$ 463,767,316,727	\$ 362,098,675	0.78	\$ 276,497,891	0.60	\$ 3,921,499,879	8.46	\$ 4,197,997,770	9.05
Comuna Ecoturístico Cerro de Oro	\$ 517,971,424,888	\$ 342,171,486	0.66	\$ 35,350,252	0.07	\$ 4,198,157,611	8.10	\$ 4,233,507,863	8.17
Comuna Estación	\$ 496,103,264,649	\$ 407,600,373	0.82	\$ 17,570,391	0.04	\$ 4,001,662,957	8.07	\$ 4,019,233,348	8.10
Comuna Atardeceres	\$ 651,050,116,637	\$ 523,401,601	0.80	\$ 151,610,511	0.23	\$ 1,839,818,331	2.83	\$ 1,991,428,842	3.06
Comuna la Macarena	\$ 317,620,208,613	\$ 378,841,953	1.19	\$ 49,816,566	0.16	\$ 2,182,538,785	6.87	\$ 2,232,355,351	7.03
Comuna Cumanday	\$ 466,480,109,044	\$ 288,872,690	0.62	\$ 686,037	0.00	\$ 5,372,099,429	11.52	\$ 5,372,785,466	11.52
Comuna Tesorito	\$ 326,351,973,915	\$ 71,230,723	0.22	\$ 901,186	0.00	\$ 2,005,246,156	6.14	\$ 2,006,147,343	6.15
Comuna Universitaria	\$ 276,289,253,338	\$ 255,004,767	0.92	\$ 1,243,677	0.00	\$ 1,348,985,405	4.88	\$ 1,350,229,082	4.89
Comuna La Fuente	\$ 385,769,215,275	\$ 405,401,218	1.05	\$ 19,412,841	0.05	\$ 2,792,684,880	7.24	\$ 2,812,097,721	7.29
Comuna san José	\$ 123,933,829,696	\$ 119,580,890	0.96	\$ 1,778,303	0.01	\$ 1,206,015,041	9.73	\$ 1,207,793,344	9.75
TOTAL	\$ 5,447,608,889,730	\$ 4,174,715,825	0.77	\$ 814,416,995	0.15	\$ 38,961,198,242	7.15	\$ 39,775,615,236	7.30

Tabla 12. Pérdidas anuales esperadas por comuna para el portafolio COMERCIAL en Manizales.

COMERCIAL									
COMUNA	VALFIS	DESPLAZAMIENTO LLUVIA		DESPLAZAMIENTO SISMO		SISMO		TOTAL SISMO	
	COP	COP	‰	COP	‰	COP	‰	COP	‰
Comuna Palogrande	\$ 316,111,517,602	\$ 153,469,490	0.49	\$ 15,612,098	0.05	\$ 1,944,860,151	6.15	\$ 1,960,472,249	6.20
Comuna Ciudadela del Norte	\$ 3,371,295,181	\$ 1,856,356	0.55	\$ 31,227,275	9.26	\$ 8,413,654	2.50	\$ 39,640,929	11.76
Comuna Ecoturístico Cerro de Oro	\$ 53,575,309,263	\$ 19,459,369	0.36	\$ 180,300	0.00	\$ 179,566,097	3.35	\$ 179,746,397	3.36
Comuna Estación	\$ 107,068,417,043	\$ 37,366,662	0.35	\$ 937,901	0.01	\$ 563,596,615	5.26	\$ 564,534,517	5.27
Comuna Atardeceres	\$ 29,843,345,513	\$ 23,294,733	0.78	\$ 2,238,765	0.08	\$ 111,154,516	3.72	\$ 113,393,280	3.80
Comuna la Macarena	\$ 43,681,448,919	\$ 23,861,873	0.55	\$ 2,162,853	0.05	\$ 392,529,157	8.99	\$ 394,692,010	9.04
Comuna Cumanday	\$ 529,977,308,945	\$ 105,450,837	0.20	\$ 916,721	0.00	\$ 5,191,998,149	9.80	\$ 5,192,914,869	9.80
Comuna Tesorito	\$ 74,891,581,641	\$ 3,235,203	0.04	\$ 30,726	0.00	\$ 191,744,636	2.56	\$ 191,775,362	2.56
Comuna Universitaria	\$ 29,144,365,926	\$ 19,541,409	0.67	\$ 8,971	0.00	\$ 57,095,894	1.96	\$ 57,104,865	1.96
Comuna La Fuente	\$ 17,606,664,000	\$ 16,252,290	0.92	\$ 113,923	0.01	\$ 124,454,905	7.07	\$ 124,568,828	7.08
Comuna san José	\$ 128,250,430,724	\$ 195,327,209	1.52	\$ 407,690	0.00	\$ 531,060,711	4.14	\$ 531,468,401	4.14
TOTAL	\$ 1,333,521,684,756	\$ 599,115,431	0.45	\$ 53,837,223	0.04	\$ 9,296,474,484	6.97	\$ 9,350,311,707	7.01

Tabla 13. Pérdidas anuales esperadas por comuna para el portafolio INDUSTRIAL en Manizales.

INDUSTRIAL									
COMUNA	VALFIS	DESPLAZAMIENTO LLUVIA		DESPLAZAMIENTO SISMO		SISMO		TOTAL SISMO	
	COP	COP	‰	COP	‰	COP	‰	COP	‰
Comuna Palogrande	\$ 26,312,674,303	\$ 20,899,553	0.79	\$ 34,111	0.00	\$ 176,328,933	6.70	\$ 176,363,044	6.70
Comuna Ciudadela del Norte	\$ 1,129,934,547	\$ 1,224,164	1.08	\$ 11,936	0.01	\$ 3,162,274	2.80	\$ 3,174,210	2.81
Comuna Ecoturístico Cerro de Oro	\$ 53,229,939,364	\$ 825,187	0.02	\$ 154,356	0.00	\$ 226,526,506	4.26	\$ 226,680,862	4.26
Comuna Estación	\$ 31,424,397,978	\$ 14,146,219	0.45	\$ 2,452,281	0.08	\$ 180,709,810	5.75	\$ 183,162,092	5.83
Comuna Atardeceres	\$ 50,282,126,051	\$ 18,631,663	0.37	\$ 407,907	0.01	\$ 93,043,649	1.85	\$ 93,451,555	1.86
Comuna la Macarena	\$ 21,159,897,446	\$ 9,212,543	0.44	\$ 559,068	0.03	\$ 114,998,032	5.43	\$ 115,557,100	5.46
Comuna Cumanday	\$ 39,820,741,501	\$ 15,452,127	0.39	\$ 66,999	0.00	\$ 436,396,706	10.96	\$ 436,463,705	10.96
Comuna Tesorito	\$ 202,436,733,230	\$ 9,113,271	0.05	\$ 1,886,469	0.01	\$ 353,486,254	1.75	\$ 355,372,724	1.76
Comuna Universitaria	\$ 7,512,224,929	\$ 441,450	0.06	\$ 13,832	0.00	\$ 19,957,192	2.66	\$ 19,971,025	2.66
Comuna La Fuente	\$ 8,353,505,911	\$ 6,679,432	0.80	\$ 15,345	0.00	\$ 55,124,157	6.60	\$ 55,139,502	6.60
Comuna san José	\$ 27,879,432,062	\$ 3,398,436	0.12	\$ 266,758	0.01	\$ 223,432,962	8.01	\$ 223,699,720	8.02
TOTAL	\$ 469,541,607,323	\$ 100,024,045	0.21	\$ 5,869,062	0.01	\$ 1,883,166,476	4.01	\$ 1,889,035,538	4.02

Tabla 14. Pérdidas anuales esperadas por comuna para el portafolio INSTITUCIONAL en Manizales.

COMUNA	INSTITUCIONAL								
	VALFIS	DESPLAZAMIENTO LLUVIA		DESPLAZAMIENTO SISMO		SISMO		TOTAL SISMO	
	COP	COP	%	COP	%	COP	%	COP	%
Comuna Palogrande	\$ 45,618,826,468	\$ 6,811,522	0.15	\$ 217,193	0.00	\$ 271,711,539	5.96	\$ 271,928,732	5.96
Comuna Ciudadela del Norte	\$ 2,128,270,000	\$ 1,345,316	0.63	\$ 298,005	0.14	\$ 21,017,595	9.88	\$ 21,315,599	10.02
Comuna Ecoturístico Cerro de Oro	\$ 4,325,782,610	\$ 1,015,193	0.23	\$ 17,945	0.00	\$ 15,201,292	3.51	\$ 15,219,237	3.52
Comuna Estación	\$ 4,770,293,604	\$ 1,012,434	0.21	\$ 14,140	0.00	\$ 17,207,029	3.61	\$ 17,221,169	3.61
Comuna Atardeceres	\$ 7,876,008,648	\$ 1,631,926	0.21	\$ 35,101	0.00	\$ 8,247,652	1.05	\$ 8,282,754	1.05
Comuna la Macarena	\$ 11,581,735,293	\$ 2,958,205	0.26	\$ 36,037	0.00	\$ 37,583,063	3.25	\$ 37,619,101	3.25
Comuna Cumanday	\$ 22,263,156,000	\$ 1,685,132	0.08	\$ 57,062	0.00	\$ 111,173,708	4.99	\$ 111,230,770	5.00
Comuna Tesorito	\$ 3,886,766,000	\$ 727,264	0.19	\$ 829	0.00	\$ 8,446,036	2.17	\$ 8,446,865	2.17
Comuna Universitaria	\$ 2,129,904,980	\$ 905,595	0.43	\$ 3,456	0.00	\$ 5,260,985	2.47	\$ 5,264,441	2.47
Comuna La Fuente	\$ 909,649,000	\$ 297,909	0.33	\$ 9,294	0.01	\$ 2,336,573	2.57	\$ 2,345,868	2.58
Comuna san José	\$ 1,101,009,000	\$ 140,478	0.13	\$ 2,513	0.00	\$ 8,432,778	7.66	\$ 8,435,290	7.66
TOTAL	\$ 106,591,401,603	\$ 18,530,973	0.17	\$ 691,574	0.01	\$ 506,618,251	4.75	\$ 507,309,825	4.76

Tabla 15. Pérdidas anuales esperadas por comuna para el portafolio SALUD en Manizales.

COMUNA	SALUD								
	VALFIS	DESPLAZAMIENTO LLUVIA		DESPLAZAMIENTO SISMO		SISMO		TOTAL SISMO	
	COP	COP	%	COP	%	COP	%	COP	%
Comuna Palogrande	\$ 12,353,470,970	\$ 9,940,129	0.80	\$ 8,985	0.00	\$ 33,619,570	2.72	\$ 33,628,555	2.72
Comuna Ciudadela del Norte	\$ 606,494,000	\$ 311,162	0.51	\$ 39,853	0.07	\$ 1,780,728	2.94	\$ 1,820,581	3.00
Comuna Ecoturístico Cerro de Oro	\$ 1,744,739,000	\$ 1,873,677	1.07	\$ 2,499	0.00	\$ 3,294,503	1.89	\$ 3,297,002	1.89
Comuna Estación	\$ 49,038,860,412	\$ 7,037,503	0.14	\$ 26,648	0.00	\$ 347,819,621	7.09	\$ 347,846,269	7.09
Comuna Atardeceres	\$ 37,355,057,000	\$ 1,823,949	0.05	\$ 162,228	0.00	\$ 182,320,196	4.88	\$ 182,482,424	4.89
Comuna la Macarena	\$ 2,967,440,000	\$ 7,959,152	2.68	\$ 9,235	0.00	\$ 16,434,947	5.54	\$ 16,444,182	5.54
Comuna Cumanday	\$ 3,677,878,000	\$ 285,668	0.08	\$ 26,906	0.01	\$ 38,249,312	10.40	\$ 38,276,218	10.41
Comuna Tesorito	\$ 4,414,544,922	\$ 320,159	0.07	\$ 1,417	0.00	\$ 8,870,102	2.01	\$ 8,871,519	2.01
Comuna Universitaria	\$ 513,361,000	\$ 68,121	0.13	\$ 495	0.00	\$ 583,318	1.14	\$ 583,813	1.14
Comuna La Fuente	\$ 5,233,053,534	\$ 3,254,915	0.62	\$ 226,461	0.04	\$ 56,223,621	10.74	\$ 56,450,082	10.79
Comuna san José	\$ 732,066,000	\$ 171,259	0.23	\$ 3,821	0.01	\$ 3,695,763	5.05	\$ 3,699,583	5.05
TOTAL	\$ 118,636,964,837	\$ 33,045,696	0.28	\$ 508,548	0.00	\$ 692,891,681	5.84	\$ 693,400,229	5.84

Tabla 16. Pérdidas anuales esperadas por comuna para el portafolio EDUCACIÓN en Manizales.

COMUNA	EDUCACIÓN								
	VALFIS	DESlizAMIENTO LLUVIA		DESlizAMIENTO SISMO		SISMO		TOTAL SISMO	
	COP	COP	%	COP	%	COP	%	COP	%
Comuna Palogrande	\$ 163,851,110,065	\$ 52,385,937	0.32	\$ 175,820	0.00	\$ 870,843,960	5.31	\$ 871,019,780	5.32
Comuna Ciudadela del Norte	\$ 12,399,282,000	\$ 6,042,273	0.49	\$ 510,364	0.04	\$ 21,144,709	1.71	\$ 21,655,073	1.75
Comuna Ecoturístico Cerro de Oro	\$ 30,540,879,622	\$ 12,748,041	0.42	\$ 15,757,945	0.52	\$ 205,953,084	6.74	\$ 221,711,030	7.26
Comuna Estación	\$ 32,170,964,803	\$ 10,358,816	0.32	\$ 118,233	0.00	\$ 242,154,414	7.53	\$ 242,272,646	7.53
Comuna Atardeceres	\$ 34,620,743,834	\$ 3,508,545	0.10	\$ 99,115	0.00	\$ 51,073,502	1.48	\$ 51,172,617	1.48
Comuna la Macarena	\$ 13,983,552,785	\$ 12,960,113	0.93	\$ 451,039	0.03	\$ 127,089,561	9.09	\$ 127,540,600	9.12
Comuna Cumanday	\$ 32,930,521,718	\$ 14,046,524	0.43	\$ 26,825	0.00	\$ 182,946,326	5.56	\$ 182,973,152	5.56
Comuna Tesorito	\$ 23,926,662,758	\$ 5,419,760	0.23	\$ 9,496	0.00	\$ 46,208,645	1.93	\$ 46,218,142	1.93
Comuna Universitaria	\$ 13,135,501,884	\$ 5,771,116	0.44	\$ 10,936	0.00	\$ 47,758,631	3.64	\$ 47,769,567	3.64
Comuna La Fuente	\$ 7,834,451,126	\$ 9,073,162	1.16	\$ 88,040	0.01	\$ 36,879,972	4.71	\$ 36,968,012	4.72
Comuna san José	\$ 9,820,696,108	\$ 1,367,538	0.14	\$ 18,710	0.00	\$ 64,478,893	6.57	\$ 64,497,603	6.57
TOTAL	\$ 375,214,366,702	\$ 133,681,825	0.36	\$ 17,266,523	0.05	\$ 1,896,531,699	5.05	\$ 1,913,798,222	5.10

5. REFERENCIAS

- Alcántara-Ayala, I. (2004). Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology*, 61, 19-14.
- Cornell, C.A. 1968. Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, pp. 1583-1606
- Esteva, L. 1970. Seismic Risk and Seismic Design Decisions. En: Hansen, R. J. (ed.). *Seismic Design of Nuclear Power Plant*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- Jibson R. (2007), Regression models for estimating coseismic landslide displacement, *Engineering Geology*, Vol. 91, pp. 209-218. John F. England Jr, Mark L. Velleux, Pierre Y.
- Londoño, J. P. (2014), Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos en la ciudad de Manizales.
- Luzi L., Pergalani F. y Terlien M.T.J. (2000), Slope vulnerability to earthquakes at subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems, *Engineering Geology*, Vol. 58, pp. 313-336.
- Marulanda, M., C. 2013. Modelación probabilista de pérdidas económicas por sismo para la estimación de la vulnerabilidad fiscal del estado y la gestión financiera del riesgo. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Newmark N. (1965), Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique* Vol. 15, pp.137-160.
- Ordaz, M. 2000. Metodología para la evaluación del riesgo sísmico enfocada a la gerencia de seguros por terremoto. Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.
- Ordaz, M. 2008. Relaciones entre curvas de fragilidad, matrices de probabilidad y funciones de vulnerabilidad. Nota técnica ERN Ingenieros Consultores S.C.
- Organización Meteorológica Mundial, OMM, 1969. Manual for Depth – Area – Duration Analysis for Storm Precipitation, WMO – No. 237, TP 129, Ginebra, Suiza, 1969.
- Torres, M. A., Jaimes, M. A., Reinoso, E., Ordaz, M. 2013. Event-based approach for probabilistic flood risk assessment. *International Journal of River Basin Management*. DOI: 10.1080/15715124.2013.847844

ANEXO 1. REPRESENTACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO

El objetivo del análisis probabilista del riesgo es la caracterización, también probabilista, de las pérdidas esperadas sobre un conjunto de elementos expuestos, dada la ocurrencia de fenómenos naturales. Dado que hay incertidumbre en la estimación de la pérdida, esta es entonces modelada como una variable aleatoria. En términos generales, interesa conocer lo siguiente acerca de la pérdida:

- El universo de todas las pérdidas posibles, es decir, el dominio de la variable aleatoria que describe la pérdida.
- La función de densidad de probabilidad de la pérdida, la cual está definida dentro del dominio de la variable.

En términos generales, un evento de pérdida A , definido dentro del universo de todas las pérdidas posibles (o espacio de muestreo) S , se puede representar en un diagrama de conjuntos como se muestra en la Figura 17. El evento A es un subconjunto de S , el cual es definido de manera totalmente arbitraria, es decir, su definición depende exclusivamente de a que pregunta se quiere contestar. En este sentido, el evento A puede estar definido, por ejemplo, como el conjunto de pérdidas mayores a 10 millones, o como el conjunto de pérdidas menores a 100 millones, o incluso como el conjunto de pérdidas entre 10 y 100 millones. Esto significa que A es definido por el tomador de decisiones, en función del tipo de decisiones que quiera tomar. Ahora bien, la definición de A en sí misma no es de interés; interesa conocer la probabilidad de A , denotada como $P(A)$. Entonces si, por ejemplo, A está definido como el conjunto de pérdidas mayores a 10 millones, lo que realmente interesa conocer es la probabilidad de que la pérdida sea mayor a 10 millones, es decir $P(A)$.

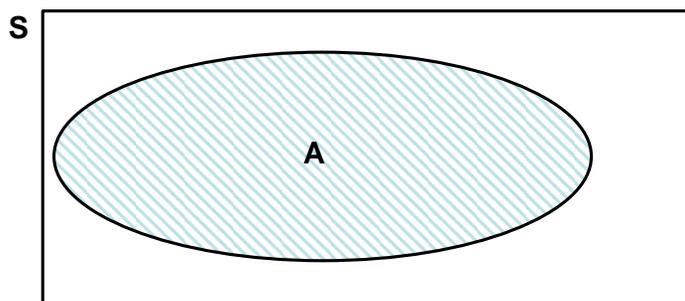


Figura 17. Representación gráfica de un evento arbitrario A dentro del espacio de muestreo de pérdidas S .

Dado que los eventos A son definidos de manera arbitraria, resulta inconveniente realizar el análisis de riesgo para un conjunto A específico. Se requiere encontrar una manera mediante la cual sea posible determinar $P(A)$ para cualquier evento A de interés. Esto se logra subdividiendo el espacio de muestreo S en un número finito de eventos base conocidos, B (Figura 18).

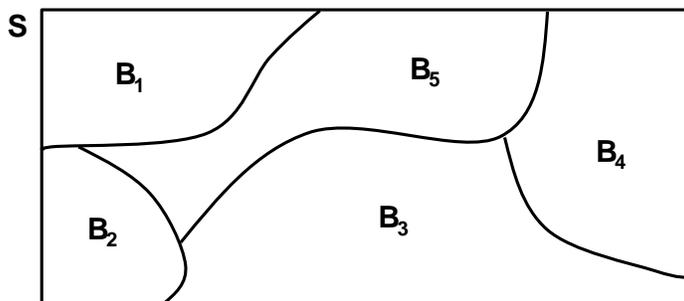


Figura 18. Subdivisión del espacio de muestreo S en eventos base B .

Los eventos base B deben cumplir las siguientes características:

- Ser *mutuamente excluyentes*. En términos matemáticos esto significa que los conjuntos nunca se intersectan, es decir, su intersección es el conjunto vacío. En términos del análisis de riesgo esto quiere decir que los eventos de pérdida B no pueden ocurrir simultáneamente.
- Ser *colectivamente exhaustivos*. En términos matemáticos esto implica que la unión de todos los conjuntos B es igual al espacio de muestreo S . En términos del análisis de riesgo esto significa que los eventos B , en conjunto, representan de manera integral el universo de todas las pérdidas posibles.

Ahora bien, para poder determinar $P(A)$, para un evento A cualquiera, hacemos uso de las intersecciones que se producen entre el evento A y los eventos base B (Figura 19).

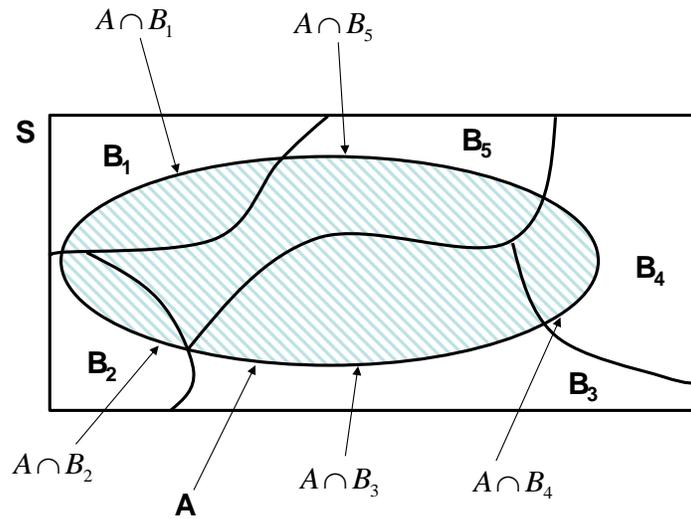


Figura 19. Intersecciones entre el evento A y los eventos base B.

Dado que el evento A se puede definir como la unión de sus intersecciones con los eventos base B , y recurriendo al tercer axioma de la teoría de la probabilidad², podemos definir a $P(A)$ como la suma, para todos los eventos base B , de la probabilidad de ocurrencia de las intersecciones:

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(A \cap B_j) \quad (\text{Ec. 32})$$

Para cualquier evento base B_j , definimos la probabilidad $P(A|B_j)$ como la probabilidad condicional de A , dado que B_j ha ocurrido. Esta probabilidad condicional está dada por:

$$P(A|B_j) = \frac{P(A \cap B_j)}{P(B_j)}, \quad P(B_j) \neq 0 \quad (\text{Ec. 33})$$

Nótese que se asume que B_j ha ocurrido. Esto significa que el espacio de muestreo S es ahora reemplazado por un nuevo espacio de muestreo, B_j , y $P(A|B_j)$ no es más que la probabilidad de A en ese nuevo espacio. De esta manera, reemplazando la Ecuación 2 en la Ecuación 1, llegamos a la solución de $P(A)$, que no es más que la definición del teorema de la probabilidad total:

² El tercer axioma de la probabilidad establece que, para una colección contable de eventos mutuamente excluyentes, la probabilidad de su unión es igual a la suma de las probabilidades individuales.

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(A | B_j) \cdot P(B_j) \quad (\text{Ec. 34})$$

Esta ecuación indica la probabilidad de ocurrencia de cualquier evento de pérdida sobre el espacio S .

Haciendo uso de la Ecuación 3 podemos calcular la probabilidad de cualquier evento A . La Tabla 17 muestra, a modo de ejemplo, tres eventos A arbitrarios y su medida de probabilidad calculada con la Ecuación 3.

Tabla 17. Eventos arbitrarios A y su medida de probabilidad.

Eventos arbitrarios A	Probabilidad
Pérdidas mayores a 10 millones	$P(p > 10) = \sum_{j=1}^n P(p > 10 B_j) \cdot P(B_j)$
Pérdidas menores a 100 millones	$P(p < 100) = \sum_{j=1}^n P(p < 100 B_j) \cdot P(B_j)$
Pérdidas entre 10 y 100 millones	$P(p > 10 \cap p < 100) = \sum_{j=1}^n P(p > 10 \cap p < 100 B_j) \cdot P(B_j)$

En resumen, dentro del contexto del análisis de riesgo, la definición de los eventos de interés A es totalmente arbitraria, por lo tanto su probabilidad $P(A)$ se calcula como función de la distribución de probabilidad de la pérdida para cada evento base B_j . Esto implica que los eventos base B no pueden ser definidos de manera arbitraria.

En análisis de riesgo, la colección de eventos base B se construye a partir de la definición de escenarios de amenaza. Se define entonces una colección de escenarios de amenaza, usualmente generados de manera estocástica, los cuales representan de manera integral todas las formas como la amenaza puede manifestarse en el territorio de análisis. Estos escenarios deben cumplir las siguientes características:

- Ser mutuamente excluyentes.
- Ser colectivamente exhaustivos.
- Admitir una medida de probabilidad temporal, generalmente conocida como su frecuencia anual de ocurrencia.
- Admitir una medida de probabilidad espacial mediante la definición de su medida de intensidad como una variable aleatoria.

La medida de intensidad a la que se hace referencia corresponde a la variable física que representa la severidad del fenómeno en el territorio de análisis. Para el caso de los

terremotos, las medidas de intensidad comúnmente usadas son las amplitudes máximas del movimiento fuerte en el terreno (PGA, PGV, PGD), así como las ordenadas del espectro de respuesta (S_a). En el caso de inundaciones, usualmente se define la intensidad como la profundidad de agua, su velocidad y su duración. Así mismo, todas las amenazas naturales deben tener asociada una o varias medidas de intensidad que describen la severidad de su ocurrencia en el territorio.

Dado que el número de escenarios que representan de manera integral la amenaza sísmica en un territorio cualquiera puede ser de decenas o centenas de miles, Torres et.al. (2013) proponen el uso de un formato computacional llamado .AME, el cual es un formato raster multicapa diseñado específicamente para amenazas naturales, y que permite un manejo adecuado, en términos computacionales, de la información asociada a los escenarios.