



Evaluación del riesgo y desarrollo  
de capacidades en Costa Rica

## **Estimación probabilista del riesgo en las edificaciones e infraestructura del cantón de Heredia**

Enero 2026

Preparado para:



Preparado por:



# Global Risk Modelling Alliance

InsuResilience Solutions Fund

ISF/GRMA / G.05, BMZ 2021.3683.6

## Evaluación del riesgo y desarrollo de capacidades en Costa Rica

Estimación probabilista del riesgo en las edificaciones e  
infraestructura del cantón de Heredia

Producto 6

(Entregables 5b, 5c, 5d)

Preparado para:



Enero de 2026

## Consultor

INGENIAR CAD/CAE Ltda.  
Carrera 19A # 84-14 OF 504  
Edificio Torrenova  
Bogotá, D.C., Colombia  
[www.ingeniar-risk.com](http://www.ingeniar-risk.com)



Centro Internacional de Métodos  
Numéricos en Ingeniería  
Edifici C1 Campus Nord UPC  
C/ Gran Capità, S/N 08034  
Barcelona, España  
[www.cimne.com](http://www.cimne.com)



**Número de producto: INGENIAR-CIMNE-GRMA-06-v1**

**Citar como:** Cardona, O.D., Bernal, González, D., G., Herrera, S., Villegas, C., Molina, J. F., Rincón, D., Grajales, S., Acosta, M., Marulanda, P., Marulanda, M., Carreño, M. L, Brenes, A. (2025). Estimación probabilista del riesgo en las edificaciones e infraestructura del cantón de Heredia. Global Risk Modelling Alliance – SUGESE.

## **TABLA DE CONTENIDO**

|                 |                                                                           |                  |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b><u>1</u></b> | <b><u>INTRODUCCIÓN</u></b>                                                | <b><u>6</u></b>  |
| 1.1             | ALCANCE DEL PROYECTO ESTRATÉGICO                                          | 7                |
| <b><u>2</u></b> | <b><u>METODOLOGÍA DE MODELACIÓN DEL RIESGO CATASTRÓFICO</u></b>           | <b><u>9</u></b>  |
| 2.1             | ENFOQUE CONCEPTUAL PARA LA MODELACIÓN DEL RIESGO                          | 9                |
| 2.2             | CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO                                                 | 11               |
| 2.3             | MÉTRICAS DE RIESGO                                                        | 13               |
| 2.3.1           | PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (PAE)                                              | 13               |
| 2.3.2           | PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE (PML)                                             | 14               |
| 2.4             | LIMITACIONES DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO EN HEREDIA                       | 15               |
| 2.5             | RECOMENDACIONES PARA FUTURAS EVALUACIONES                                 | 17               |
| <b><u>3</u></b> | <b><u>MODELO DE EFECTOS DE SITIO PARA HEREDIA</u></b>                     | <b><u>20</u></b> |
| 3.1             | MODELO GEOMÉTRICO-GEOTÉCNICO                                              | 21               |
| 3.2             | ESTRATIGRAFÍAS SINTÉTICAS                                                 | 24               |
| 3.3             | SEÑALES DE CÁLCULO                                                        | 24               |
| 3.4             | CÁLCULO DE LA RESPUESTA DINÁMICA                                          | 29               |
| 3.5             | CÁLCULO DE LA AMENAZA SÍSMICA                                             | 32               |
| <b><u>4</u></b> | <b><u>MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS PARA HEREDIA</u></b> | <b><u>35</u></b> |
| 4.1             | MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD GIRI-CDRI                                       | 36               |
| 4.2             | MODELO DE UMBRALES DETONANTES GIRI-CDRI                                   | 36               |
| 4.3             | REDUCCIÓN DE ESCALA PARA EL CASO DE HEREDIA                               | 37               |
| <b><u>5</u></b> | <b><u>RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO</u></b>                      | <b><u>40</u></b> |
| 5.1             | PORTAFOLIO DE EDIFICACIONES                                               | 40               |
| 5.1.1           | PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (PAE)                                              | 40               |
| 5.1.2           | PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE (PML)                                             | 47               |
| 5.1.3           | RESULTADOS POR UBICACIÓN                                                  | 50               |
| 5.1.4           | POBLACIÓN AFECTADA                                                        | 56               |
| 5.2             | PORTAFOLIO DE INFRAESTRUCTURA                                             | 57               |
| 5.2.1           | SECTOR CARRETERO                                                          | 58               |
| 5.2.2           | SECTOR FÉRREO E HIDROCARBUROS                                             | 66               |

|             |                                                                                   |                   |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 5.2.3       | SECTOR ELÉCTRICO .....                                                            | 77                |
| 5.2.4       | SECTOR COMUNICACIONES .....                                                       | 91                |
| 5.2.5       | SECTOR AGUA Y SANEAMIENTO .....                                                   | 96                |
| 5.2.6       | VARIABILIDAD EN LAS MÉTRICAS DE RIESGO ANTE ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS .....   | 110               |
| <b>5.3</b>  | <b>VERIFICACIÓN DEL RESULTADO .....</b>                                           | <b>112</b>        |
| 5.3.1       | BASE DE DATOS DE DESASTRES DE COSTA RICA.....                                     | 114               |
| 5.3.2       | EVALUACIÓN DE LA CURVA EMPÍRICA DE RIESGO.....                                    | 115               |
| 5.3.3       | COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE RIESGO .....                                         | 117               |
| <b>6</b>    | <b><u>PROGRAMA DE CAPACITACIÓN .....</u></b>                                      | <b><u>118</u></b> |
| <b>6.1</b>  | <b>DESARROLLO DE ACTIVIDADES .....</b>                                            | <b>118</b>        |
| 6.1.1       | INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE RIESGO Y APOYO A LA TOMA DE DECISIONES.....       | 118               |
| 6.1.2       | GESTIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS DE EXPOSICIÓN DE INFRAESTRUCTURA..... | 119               |
| 6.1.3       | ARTICULACIÓN INSTITUCIONAL Y ALINEACIÓN CON EL MANDATO DE LA CNE .....            | 120               |
| 6.1.4       | CONTINUIDAD Y ESCALABILIDAD DE LAS EVALUACIONES DE RIESGO .....                   | 120               |
| <b>6.2</b>  | <b>RESUMEN DE PARTICIPACIÓN .....</b>                                             | <b>120</b>        |
| <b>6.3</b>  | <b>RETROALIMENTACIÓN DE LOS PARTICIPANTES.....</b>                                | <b>121</b>        |
| <b>7</b>    | <b><u>BIBLIOGRAFÍA.....</u></b>                                                   | <b><u>125</u></b> |
| <b>A. 1</b> | <b><u>DATOS PARA GENERAR LAS CURVAS EMPÍRICAS DE RIESGO .....</u></b>             | <b><u>127</u></b> |
| <b>A. 2</b> | <b><u>CONJUNTO DE DATOS DE RIESGO PARA EL CANTÓN DE HEREDIA.....</u></b>          | <b><u>132</u></b> |

## 1 INTRODUCCIÓN

---

El programa Global Risk Modelling Alliance (GRMA), auspiciado por el InsuResilience Solutions Fund (ISF), tiene como objetivo principal fortalecer las capacidades de los países y ciudades en el análisis de riesgos climáticos y de desastres orientados a las finanzas. Esta iniciativa busca llenar vacíos críticos en modelos y datos, mejorando las evaluaciones del riesgo climático y de desastres a nivel nacional y subnacional. Para lograrlo, el GRMA identifica y co-define, junto con socios locales, las necesidades específicas de cada país, ofreciendo herramientas abiertas de gestión de riesgos, datos y acceso a experiencia operativa en financiamiento de riesgos.

En el contexto de Costa Rica, el GRMA ha establecido una colaboración con el gobierno – a través de sus instituciones, bajo el liderazgo de SUGESE - para fortalecer sus capacidades en la gestión de riesgos climáticos. Esta alianza proporciona modelos y herramientas relevantes para informar las estrategias nacionales de financiamiento y mitigación de riesgos. El programa se implementa en fases, comenzando con la identificación de necesidades específicas y culminando en la integración de herramientas avanzadas de modelización de riesgos en las políticas públicas del país. Este proyecto es financiado con fondos del KfW de Alemania, y administrado por Frankfurt School en nombre de GRMA.

El consorcio INGENIAR-CIMNE fue seleccionado para proveer los servicios de modelación del riesgo enmarcados en la colaboración entre GRMA y el Gobierno de Costa Rica, mediante una aplicación enfocada en 4 proyectos de evaluación del riesgo:

- Proyecto Estratégico: Demostración de métodos de evaluación del riesgo para infraestructura crítica en Heredia.
- Proyecto Operacional 1: Evaluación del riesgo de desastres y climático en infraestructura vial – Ruta Nacional 2 Autopista Panamericana (RN2)
- Proyecto Operacional 2: Riesgo de inundación y sequía para pequeños y medianos productores agropecuarios
- Proyecto Operacional 3: Evaluación de exposición y riesgo de pequeños y medianos hoteles y hostales del programa Fu-turismo.

La implementación se realiza mediante el uso de la plataforma de modelación CAPRA-ROBOT, desarrollada por INGENIAR, y que es empleada también como herramienta educativa en el Programa de Capacitación que se lleva a cabo de forma transversal a lo largo de toda la duración de la consultoría.

Este informe corresponde al Producto 6 *“Estimación probabilista del riesgo en las edificaciones e infraestructura del cantón de Heredia”*, específicamente atiende los entregables de la tarea 5: 5b *“Estimación probabilista del riesgo de inundación fluvial, pluvial y sismo en Heredia”*, 5c *“Informe técnico sobre el modelo/datos/metodología desarrollados o mejorados y su replicabilidad”* y 5d *“Documentación del desarrollo de capacidades, actividades realizadas, participación y retroalimentación”* de los Términos de Referencia de esta consultoría. Este es, por lo tanto, un producto relacionado exclusivamente con el Proyecto Estratégico. En este informe se presentan los resultados de la evaluación probabilista del riesgo para las edificaciones e infraestructura crítica del cantón de Heredia, considerando como amenazas: sismo, inundación fluvial, inundación pluvial y deslizamientos, las últimas 3 influenciadas por el cambio climático.

Esta evaluación se suma y complementa aspectos previamente presentados en entregables anteriores: (i) el Producto 2 “Revisión de datos de amenazas geológicas y recomendaciones para aplicar en la evaluación del riesgo” presenta los modelos de amenaza sísmica y susceptibilidad a los deslizamientos preexistentes usados en esta evaluación; (ii) el Producto 3 “Modelos de exposición y vulnerabilidad” de esta consultoría contiene los detalles sobre el modelo de exposición de edificaciones e infraestructura crítica en Heredia, compuestos por múltiples subsectores, así como las funciones de vulnerabilidad aplicadas a estos portafolios; y (iii) el Producto 4 “Modelos de amenazas climáticas” contiene los detalles de los modelos de amenazas climáticas desarrollados para las inundaciones fluvial y pluvial, incluyendo el modelo de inundación fluvial de alta resolución desarrollado para Heredia.

## 1.1 Alcance del Proyecto Estratégico

El objetivo de este proyecto estratégico es realizar una modelación en múltiples sectores de infraestructura en el cantón de Heredia<sup>1</sup>. Este proyecto involucra la evaluación del riesgo sísmico, por inundación y por deslizamientos (detonados por sismo y por lluvias intensas) en el portafolio de edificaciones e infraestructura de Heredia, de acuerdo con la información disponible por parte del cantón. El proyecto se desarrolla mediante las actividades presentadas en la Tabla 1. El cronograma correspondiente se presenta en la Figura 1. Todos los *valores agregados* presentados fueron acordados directamente con el GTT de este proyecto.

Tabla 1. Tareas del Proyecto Estratégico

| Actividad                      | Descripción                                                                                                                                                                                                                               | Tarea en los TdR | Entregable en los TdR |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|
| Modelo de clima                | Se refiere a la modelación de forzamiento meteorológico y la incorporación de proyecciones de cambio climático                                                                                                                            | T2.1,<br>T2.2    | D2.1a-f,<br>D2.2a-e   |
| Modelo inundación río Pirro    | Se desarrolla un modelo detallado de inundación en los ríos Pirro, Bermúdez, burío y Quebrada Seca, para ser usado como insumo de amenaza para el cantón de Heredia.                                                                      | T2.1             | D2.1a-f               |
| Modelo amenaza sísmica         | Se selecciona el mejor modelo de amenaza sísmica nacional disponible, que permita su directa aplicación en modelación catastrófica.                                                                                                       | T3.3             | D3.3a-b               |
| Efectos de sitio Heredia       | Se genera una capa de información de efectos de sitio, que permita considerar, de forma aproximada, la respuesta de los suelos al interior del cantón con el fin de obtener mejores resultados en la evaluación del riesgo sísmico.       | Valor agregado   |                       |
| Modelo amenaza deslizamientos  | Se obtiene un modelo de susceptibilidad y amenaza a los deslizamientos a escala del cantón de Heredia.                                                                                                                                    | Valor agregado   |                       |
| Exposición edificios Heredia   | Se construye una capa de exposición a nivel de edificaciones individuales al interior del cantón, caracterizando por altura, uso, nivel socioeconómico, sistema estructural, costo de reposición, entre otras características relevantes. | T5.1,<br>T5.2    | D5a                   |
| Exposición infraestructura     | Se construye una base de exposición de infraestructura en múltiples sectores (como, por ejemplo, vías, agua y saneamiento, energía)                                                                                                       | T5.1,<br>T5.2    | D5a                   |
| Vulnerabilidad edificios       | Se refiere a la definición de curvas de vulnerabilidad para las edificaciones de Heredia.                                                                                                                                                 | T4.1,<br>T5.3    | D4a-d                 |
| Vulnerabilidad infraestructura | Se refiere a la construcción de curvas de vulnerabilidad por medio de un modelo de arquetipos de elementos de infraestructura.                                                                                                            | T4.1,<br>T5.3    | D4a-d                 |

<sup>1</sup> Se refiere a infraestructura crítica existente en el cantón, de acuerdo con las definiciones dadas en el Decreto N° 42465 de MOPT-MINAE-MIVAH.

| Actividad              | Descripción                                                                                                                                                                                                 | Tarea en los TdR | Entregable en los TdR |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|
| Evaluación riesgo      | Aplicación de las metodologías acá presentadas para evaluar el riesgo por medio de métricas actuariales de modelación catastrófica.                                                                         | T5.4             | D5b-c                 |
| Calibración resultado  | Se compara la curva de excedencia de pérdidas analítica calculada con el modelo, con una construida a partir de información histórica de eventos previos para establecer su correspondencia.                | T5.4             | D5b-c                 |
| Curva de inversión     | Como valor agregado, se evaluarán una colección de acciones de gestión del riesgo con el fin de determinar la combinación óptima que permita reducir el riesgo para montos de inversión fijos y crecientes. | Valor agregado   |                       |
| Evaluación resiliencia | Se evaluará la resiliencia del cantón por medio de la incorporación de sus capacidades de absorber, responder y recuperarse, para lograr una métrica de resiliencia de su infraestructura.                  | Valor agregado   |                       |

| Tarea                                                                                                                  | 15 Ene 25 | Mes |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | 15 Abr 26 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|-----------|
|                                                                                                                        | 1         | 2   | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |           |
| <b>Proyecto estratégico: Demostración de métodos de evaluación del riesgo para infraestructura crítica en Heredia.</b> |           |     |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |
| Modelo de clima                                                                                                        |           |     |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |
| Modelo inundación río Pirro                                                                                            |           |     |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |
| Modelo amenaza sísmica                                                                                                 |           |     |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |
| Efectos de sitio Heredia                                                                                               |           |     |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |
| Modelo de amenaza deslizamientos                                                                                       |           |     |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |
| Exposición edificios Heredia                                                                                           |           |     |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |
| Exposición infraestructura                                                                                             |           |     |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |
| Vulnerabilidad edificios                                                                                               |           |     |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |
| Vulnerabilidad infraestructura                                                                                         |           |     |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |
| Evaluación riesgo                                                                                                      |           |     |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |
| Calibración resultado                                                                                                  |           |     |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |
| Curva de inversión                                                                                                     |           |     |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |
| Evaluación resiliencia                                                                                                 |           |     |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |

Figura 1. Cronograma de actividades el Proyecto Estratégico. (Las celdas azules indican ejecución. Las celdas verdes indican entrega de productos. Las celdas rojas corresponden a este entregable – Entregable 5)

## 2 METODOLOGÍA DE MODELACIÓN DEL RIESGO CATASTRÓFICO

La evaluación y modelación probabilista del riesgo catastrófico tiene por objetivo estimar la distribución de probabilidad de la pérdida que puede presentarse en un conjunto de elementos expuestos, tras la ocurrencia de un evento de amenaza (Cardona, 1986 a;b;c; 1989; 1990; Bernal et al., 2021). La modelación probabilista permite entonces realizar pronósticos sobre los niveles futuros de pérdida, considerando la amenaza propia del territorio y la incertidumbre en su estimación, así como la vulnerabilidad inherente de los elementos expuestos y su respectiva incertidumbre.

### 2.1 Enfoque conceptual para la modelación del riesgo

La modelación probabilista del riesgo consiste en determinar las posibles consecuencias que un conjunto de elementos expuestos puede sufrir, por cuenta de la ocurrencia de eventos de amenaza. Una buena modelación del riesgo es fundamental en la construcción de un proceso de desarrollo sostenible y resiliente, considerando los *trade-offs* (*compensaciones*) de los posibles perjuicios y beneficios. En otras palabras, dicho proceso solo puede ser debidamente orientado si se cuenta con una modelación del riesgo que sea suficientemente robusta, en términos de la verosimilitud de afectaciones y que facilite las decisiones que se puedan tomar con un apropiado soporte técnico sin arbitrariedad. El procedimiento de modelación probabilista del riesgo, considerando el cambio climático, se puede resumir, de forma general, como se ilustra en la Figura 2.

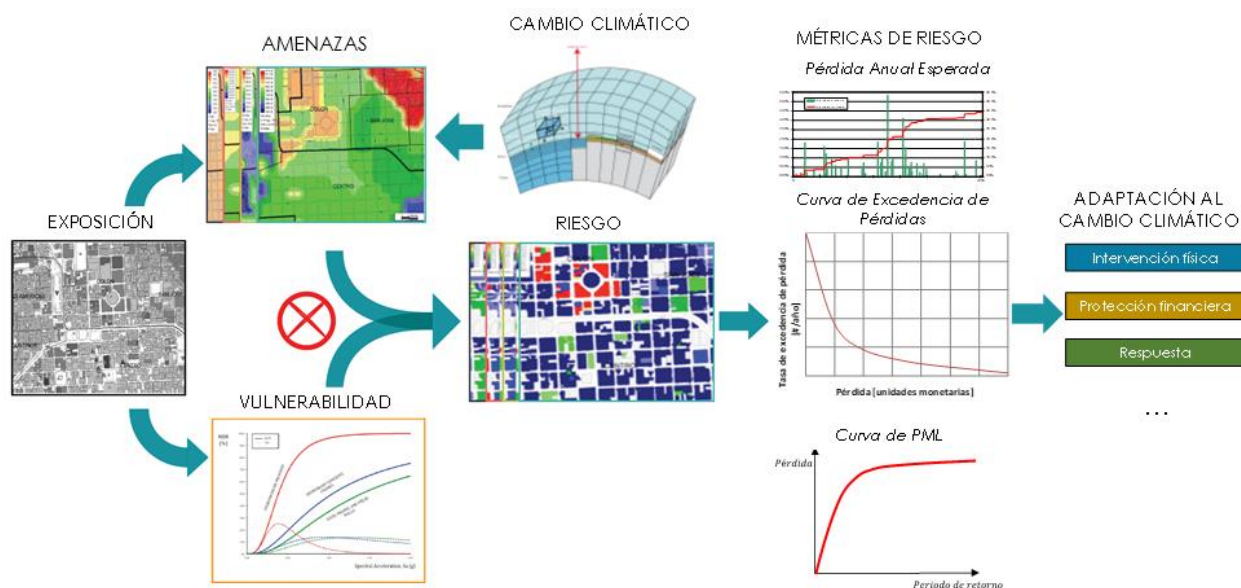


Figura 2. Componentes de la modelación del riesgo y su interrelación.

Como se ilustra en la Figura 2, una vez evaluado el riesgo por medio de métricas actuariales como la *pérdida anual esperada*, la *curva de excedencia de pérdidas* y la *pérdida máxima probable*, es posible establecer una relación objetiva con las medidas de gestión del riesgo y su efectividad, de modo que puede usarse el modelo para diseñar estrategias de intervención, compuestas por múltiples medidas, cuya capacidad para reducir el riesgo puede ser cuantificada.

Siguiendo el enfoque presentado, en este estudio el riesgo se evalúa con base en tres factores fundamentales:

- La *amenaza* se define como una colección de eventos, simulados estocásticamente, que son colectivamente exhaustivos y mutuamente excluyentes; es decir, que cubren todas las posibilidades como la amenaza se puede manifestar asumiendo eventos independientes que tienen una frecuencia de ocurrencia que sigue una ley potencial natural (i.e., equivalente a una curva de recurrencia).
- Los *elementos expuestos*, que corresponden a los bienes inmuebles, infraestructura o producción agropecuaria expuestos a las amenazas y que son susceptibles de sufrir daño o alteración ante la influencia de estas.
- La *vulnerabilidad* de los elementos expuestos, la cual se entiende como la propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La valoración de la vulnerabilidad implica un modelo específico para cada tipo de elemento expuesto y cada tipo de amenaza, es decir, no existe una manera unificada de representarla. Sin embargo, la modelación sí deriva en la misma métrica de cuantificación de afectación (pérdida económica), lo cual hace a los diferentes modelos aditivos y conmensurables en términos del riesgo.

El primer enfoque totalmente probabilista dado al problema del riesgo, desde el punto de vista actuarial, fue propuesto por Filip Lundberg en 1903 (Lundberg, 1903). En 1930, Harald Cramér formalizó la teoría de Lundberg en lo que hoy se conoce como *Teoría de Ruina* (Cramér, 1930). Lundberg definió un modelo de *ingresos-resultados* en el que una compañía de seguros inicia sus operaciones con una cierta cantidad de capital, que aumenta con el tiempo en la medida en que se recolectan las primas. Adicionalmente, las pérdidas (que la compañía debe cubrir) ocurren aleatoriamente en el tiempo. Si, debido al pago de las reclamaciones, el capital cae por debajo de cero, entonces la compañía quiebra. Lundberg estaba interesado en determinar la probabilidad de quiebra de una compañía de seguros.

La *Teoría de Ruina* considera que la ocurrencia de siniestros no es determinista. Lundberg demostró que la ocurrencia de pérdidas en el tiempo puede modelarse como un proceso de Poisson. Posteriormente, se demostró que cualquier proceso de renovación es válido dentro de la Teoría de Ruina (Andersen, 1957). Un proceso de renovación es un tipo de proceso estocástico, de tiempo continuo y estado discreto, ampliamente utilizado en múltiples aplicaciones en ciencias e ingeniería, que establece la ocurrencia de eventos de forma totalmente aleatoria. Los eventos, en este contexto, se refieren a la ocurrencia de pérdidas, independientemente de su origen. Esta es la razón por la que la teoría de ruina o de insolvencia es adecuada para modelar cualquier impacto asociado a un fenómeno, natural o no, y es apropiada para orientar la gestión del riesgo en otros ámbitos o contextos sociales, económicos, ambientales y en general del desarrollo, más allá del propio mercado de los seguros.

Un proceso de renovación se define en términos de un parámetro único, su intensidad o tasa. En la evaluación del riesgo, este parámetro es la *tasa de excedencia de pérdidas*, que es a su vez el inverso del tiempo promedio entre la ocurrencia de eventos que superan un monto de pérdida  $p$ . Por lo tanto, al calcular el riesgo de un portafolio de elementos expuestos (es decir, la probabilidad de que se supere una cierta pérdida  $p$  en una ventana de tiempo), su tasa de excedencia  $\nu(p)$  debe calcularse en función de la probabilidad de ocurrencia de cualquiera de los posibles eventos de peligro que causarían que  $p$  sea

excedida. Esto configura un proceso de renovación que permite estimar la probabilidad de excedencia de la pérdida  $p$  en cualquier periodo de tiempo.

## 2.2 Cuantificación del riesgo

La modelación del riesgo tiene como propósito, desde el punto de vista matemático, caracterizar un proceso aleatorio de ocurrencia de pérdidas en el tiempo (i.e., proceso de pérdidas). Un proceso de pérdidas tiene unas características importantes que condicionan el enfoque de modelación del riesgo adoptado en este estudio, y que se utiliza en el campo de la modelación catastrófica actuarial, de la seguridad y confiabilidad en ingeniería, de la industria aeronáutica y aeroespacial, entre otros.

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 estos. 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 renovación, lo que conlleva a ajustar un modelo de probabilidad al tiempo que transcurre entre dos eventos consecutivos.

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 evento de amenaza. La función de densidad de probabilidad de la pérdida en el elemento expuesto  $j$ , condicional a la ocurrencia del evento de amenaza  $i$  (i.e.,  $f(p_j|E_i)$ ), se calcula como:

$$f(p_j|E_i) = \int_0^{\infty} f(p_j|s)f(s|E_i)ds \quad \text{Ecuación 1}$$

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  $s$ ) y el segundo término tiene que ver con la amenaza ( $f(s|E_i)$ , la densidad de probabilidad de la intensidad, dada la ocurrencia de un evento de amenaza).

La pérdida total del evento  $i$  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 evento  $i$ . La suma se hace sobre los momentos de probabilidad de las variables  $p_j$ , como se indica a continuación:

$$E(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} E(p_j) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\sigma^2(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} \sigma^2(p_j) + 2 \sum_{\substack{k=1 \\ k < j}}^{NE-1} \sum_{j=2}^{NE} cov(p_k, p_j) \quad \text{Ecuación 3}$$

en donde  $E(p|E_i)$  es el valor esperado de la pérdida del evento  $i$ ,  $\sigma^2(p|E_i)$  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  $cov(p_k, p_j)$  es la covarianza de la pérdida de dos elementos expuestos diferentes. A partir de los momentos de probabilidad de la pérdida totalizada para el evento, se ajusta un modelo de probabilidad Beta.

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 pérdida. Esta frecuencia anual de excedencia, que no es más que la *tasa de excedencia*  $v(p)$ , se calcula de la siguiente manera:

$$v(p) = \sum_{i=1}^N Pr(P > p | E_i) \cdot F_A(E_i) \quad \text{Ecuación 4}$$

en donde  $v(p)$  es la tasa de excedencia de la pérdida  $p$ ,  $N$  es el número total de eventos de amenaza,  $F_A(E_i)$  es la frecuencia anual de ocurrencia del evento  $i$ , y  $Pr(P > p | E_i)$  es la probabilidad de que  $p$  sea excedida dado que ocurrió el evento  $i$ . La suma cubre todos los eventos de amenaza en los cuales se pueden generar pérdidas. El inverso de  $v(p)$  es el periodo de retorno de la pérdida  $p$  ( $Tr$ ), el cual no es más que el valor esperado del tiempo entre eventos que superan la pérdida  $p$ .

$$Tr = \frac{1}{v(p)} \quad \text{Ecuación 5}$$

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 eventos de amenaza. La Figura 3 muestra una curva de excedencia de pérdidas de ejemplo.

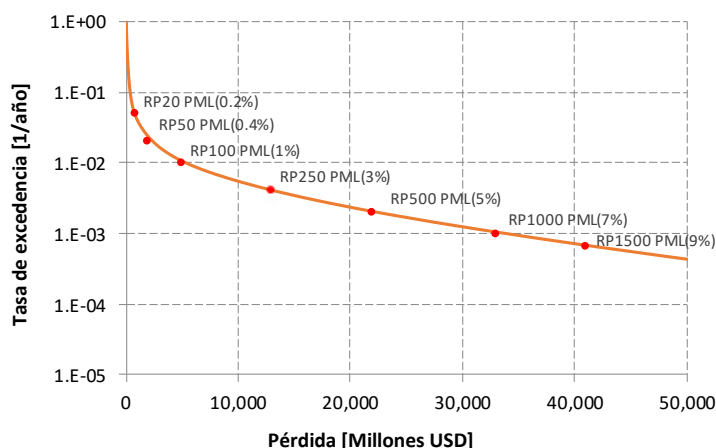


Figura 3. Ejemplo de curva de excedencia de pérdidas. El eje vertical muestra la tasa de excedencia. El eje horizontal muestra la pérdida asociada. [RP = Return Period (Periodo de retorno); PML = Probable Maximum Loss (Pérdida Máxima Probable)].

El cálculo realizado con la Ecuación 4 corresponde a la estimación de la tasa de excedencia de las cuantías de pérdida que ocurren en todos los elementos expuestos para todos los eventos incluidos en el modelo de amenaza, y para todas las amenazas. Como se muestra en la Figura 4, la evaluación probabilista del riesgo se puede resumir en los siguientes pasos: 1) para cada evento de amenaza se determina la pérdida en todos y cada uno de los elementos expuestos; 2) se calcula la pérdida causada por cada evento como

la suma de las pérdidas individuales causadas en cada elemento expuesto; 3) una vez se cuantifican las pérdidas de todos los eventos, se calculan las tasas de excedencia.

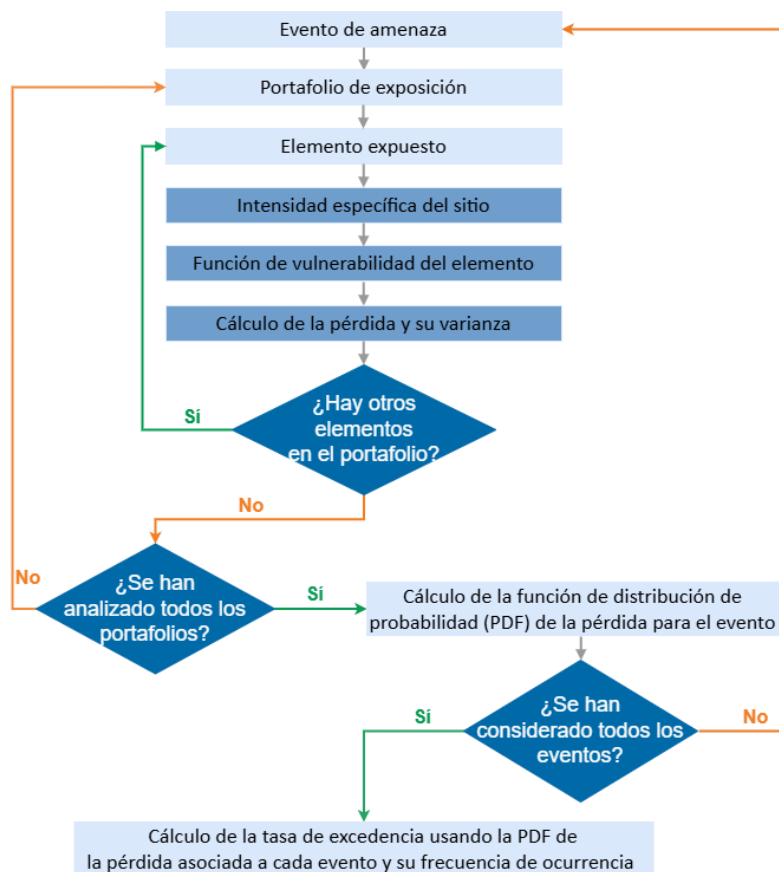


Figura 4. Diagrama de flujo de la evaluación probabilista del riesgo

## 2.3 Métricas de 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 los procesos de toma de decisiones y la gestión del riesgo. Estas métricas proporcionan una representación integral del riesgo, por lo general condensada en uno o pocos indicadores, en lugar de proporcionar todo el conjunto de las pérdidas por eventos o la curva de excedencia de pérdidas completa.

### 2.3.1 Pérdida anual esperada (PAE)

La PAE corresponde al valor esperado de la pérdida anual. Indica el valor anual promedio que, de sumarse en el largo plazo, equivaldría a todas las pérdidas futuras. La PAE sería la prima pura anual justa para cubrir anualmente todas las pérdidas que pueden presentarse. Se puede calcular como el área bajo la curva de excedencia de pérdidas:

$$PAE = \int_0^{\infty} v(p) dp$$
Ecuación 6

También, desde el conjunto de pérdidas por evento, puede determinarse la PAE como:

$$PAE = \sum_{i=1}^N E(P|E_i) F_A(E_i)$$
Ecuación 7

Donde:  $E(P|E_i)$  es un valor esperado de la pérdida del evento  $i$ ,  $F_A(E_i)$  y es la frecuencia anual de ocurrencia del evento  $i$ . El valor esperado de la pérdida, dada la ocurrencia de un evento particular, depende de la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

La pérdida anual esperada es un indicador importante dado que integra en un único valor el efecto, en términos de pérdidas, de la ocurrencia de los eventos de amenaza sobre los elementos expuestos vulnerables. Es el indicador más robusto del riesgo, no solo por su capacidad de resumir el proceso de ocurrencia de pérdidas en un solo número, sino por ser relativamente insensible a la incertidumbre, debido a que corresponde a la esperanza matemática de las pérdidas en forma anualizada.

### 2.3.2 Pérdida máxima probable (PML)

Si bien el principal resultado de la evaluación del riesgo es la curva de excedencia de pérdidas, la curva de PML<sup>2</sup> es usualmente preferida debido a que, en general, es más fácil de comprender la noción de un periodo de retorno que, como se mencionó previamente, es el valor esperado del tiempo entre eventos que superan una pérdida, y que matemáticamente corresponde al inverso de la tasa de excedencia. La curva de excedencia de pérdidas y la curva de PML son equivalentes en la información contenida.

De la curva de PML se pueden determinar los valores de pérdida para periodos de retorno arbitrarios. La selección del periodo de retorno para una PML como referente depende exclusivamente de la aversión al riesgo del tomador de decisiones. La Figura 5 muestra un ejemplo de una curva de PML, en donde, a partir de un período de retorno seleccionado en el eje horizontal, que en este ejemplo es de 400 años, se puede determinar el valor de la pérdida en el eje vertical, lo que indica que esta pérdida se superará en promedio cada 400 años.

---

<sup>2</sup> Probable Maximum Loss

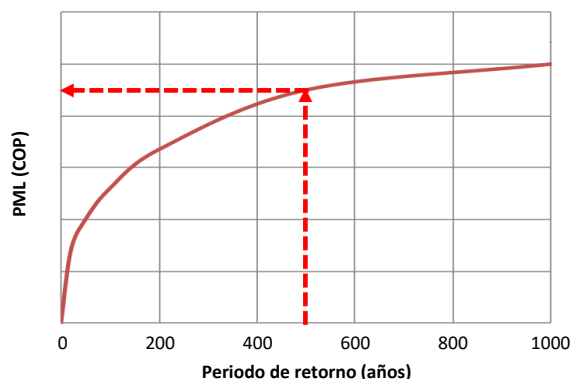


Figura 5. Ejemplo de curva de PML (COP = Pesos colombianos)

## 2.4 Limitaciones de la evaluación del riesgo en Heredia

En esta sección se presentan algunas limitaciones ampliamente conocidas de la evaluación probabilista del riesgo, las cuales están fuertemente relacionadas con la calidad de los datos disponibles. Cabe anotar que las limitaciones acá expuestas, son complementarias a lo previamente indicado en todos los productos de esta consultoría, en los cuales se ha dado tratamiento a la metodología de evaluación (Informe de Inicio), a la información sobre modelos preexistentes de amenazas geológicas (Producto 2 “Revisión de datos de amenazas geológicas y recomendaciones para aplicar en la evaluación del riesgo”), a los modelos de exposición y vulnerabilidad conformados por esta consultoría (Producto 3 “Modelos de exposición y vulnerabilidad”) y a los modelos de amenazas hidrometeorológicas con cambio climático desarrollados por el consultor (Producto 4 “Modelos de amenazas climáticas”). Por lo tanto, esta sección no pretende repetir lo ya enunciado en estos productos previamente entregados, sino aportar desde una visión general las limitaciones conocidas de la evaluación probabilista del riesgo.

La evaluación probabilista del riesgo de desastres depende críticamente de la disponibilidad y resolución de la información empleada para modelar las amenazas, la exposición y la vulnerabilidad. Una limitación común es la insuficiencia de registros históricos de eventos extremos, lo cual implica la necesidad de simular los eventos más grandes y catastróficos, a partir de información indirecta sobre el territorio y la manifestación de los fenómenos. Esto impide procesos de calibración y validación, debido a que no se cuenta con evidencia de la ocurrencia de la gran mayoría de los eventos simulados, pues no han ocurrido aún. Esto es especialmente cierto en condiciones de cambio climático. Así mismo, para la modelación de los fenómenos relacionados con el clima, en muchos contextos, los datos hidrometeorológicos presentan brechas temporales, baja densidad espacial de estaciones o inconsistencias por cambios en los sistemas de medición.

La

Tabla 2 resume las principales limitaciones de los diferentes componentes de la modelación: amenaza, exposición y vulnerabilidad. Se indican además algunas recomendaciones para su reducción.

Tabla 2. Resumen de limitaciones identificadas en las capas del modelo

| Capa                       | Condición evaluada                                       | Limitación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Recomendación                                                                                                        |
|----------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Clima                      | Clima base y 36 climas futuros                           | No es posible anticipar el clima real del futuro. Solamente considerar posibles futuros alternos y evaluarlos todos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Incertidumbre profunda. No se puede reducir.                                                                         |
| Amenaza por inundación     | Forzamiento meteorológico. Simulaciones a escala diaria. | Simulaciones obtenidas para 1,000 años, en ubicaciones dentro de una malla de puntos sobre Costa Rica. Esta malla es de baja resolución en la escala del cantón de Heredia. Esto implica que existen detalles de la variación espacial de los patrones de lluvia que no es posible capturar con el modelo.                                                                                                                                                                                                                                                             | Requiere de inversiones en investigación, en equipos de detección, y tiempo para la toma de datos en el largo plazo. |
| Amenaza por inundación     | Respuesta de cuencas                                     | El modelo de respuesta de cuencas permite capturar variaciones espaciales al interior que modifiquen localmente las condiciones de atenuación y acumulación por infiltración superficial. No obstante, las cuencas consideradas son altamente intervenidas y transformadas, con rutas de drenaje urbano no consideradas en el modelo y que alteran los patrones de respuesta. Un mínimo o nulo mantenimiento a las cuencas y cauces altera también la posibilidad de representar de forma apropiada la respuesta hidrológica.                                          | Requiere de inversiones en investigación y monitoreo de cauces.                                                      |
| Amenaza por inundación     | Modelo hidráulico                                        | Modelo hidráulico 2D, apropiado para inundaciones por desbordamiento de ríos, principalmente en las áreas desbordadas. La respuesta del modelo al interior del canal, especialmente en canales de cierta profundidad, es dudosa por el carácter bidimensional. No es un modelo apropiado para fenómenos de mayor intensidad como los flujos torrenciales, por no contar con consideraciones por aporte sólido del material superficial de las cuencas, o de sólidos generados por actividad humana (basuras y desechos) que alteran la reología del fluido transitado. | Requiere de inversiones en investigación                                                                             |
| Amenaza sísmica            | Ocurrencia de terremotos. Movimiento fuerte.             | La información sísmica es limitada por la relativa baja frecuencia de los terremotos. Los modelos de amenaza sísmica deben tratarse siempre de forma probabilista dada la incertidumbre en los momentos de ocurrencia, ubicación, magnitud y otras características de los eventos.                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Requiere de tiempo y de grandes inversiones en investigación.                                                        |
| Amenaza sísmica            | Efectos de sitio                                         | Los efectos de sitio son fundamentales en la correcta evaluación del movimiento superficial percibido por los elementos expuestos. El modelo propuesto para Heredia es altamente aproximado. Se requiere de más información geotécnica y geofísica altamente especializada, así como la conformación de modelos de microzonificación para capturar de forma apropiada los efectos de sitio                                                                                                                                                                             | Requiere de grandes inversiones en investigación del subsuelo                                                        |
| Amenaza por deslizamientos | Susceptibilidad                                          | El modelo de susceptibilidad se derivó de un modelo mundial (GIRI-CDRI) al cual se le aplicó un procedimiento de reducción de escala por asignación en función de la pendiente topográfica. Esta es una condición altamente aproximada y gruesa, pues no considera las propiedades de los materiales geotécnicos o condiciones de ocupación del terreno, entre otros factores de propensividad                                                                                                                                                                         | Requiere de grandes inversiones en investigación del subsuelo y en modelación de la susceptibilidad                  |

| Capa           | Condición evaluada                | Limitación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Recomendación                                                                                                                           |
|----------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Exposición     | Exposición edificios              | El cantón de Heredia cuenta con muy buena información de elementos expuestos. Se tiene acceso a información catastral principalmente para este portafolio de exposición. Así mismo, Costa Rica cuenta con documentos oficiales para la valoración económica de los bienes inmuebles. No obstante, es necesario manipular la información para transformarla en una base de exposición.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Requiere de inversión en generación y mantenimiento de información de exposición, no solamente catastral                                |
| Exposición     | Exposición de infraestructura     | El cantón de Heredia cuenta con muy buena información de elementos expuestos. Se tiene acceso a múltiples fuentes que proveen información principalmente sobre ubicaciones de los elementos expuesto, y en menor medida sobre otros atributos (tamaño, capacidad, valor). Si bien la información disponible es de buena calidad, es necesario manipularla para transformarla en una base de exposición propiamente.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Requiere de inversión en generación y mantenimiento de información de exposición, más allá de datos sobre la ubicación de los elementos |
| Vulnerabilidad | Vulnerabilidad de edificios       | Se cuenta con información de funciones de vulnerabilidad previamente aplicadas en proyectos anteriores en Costa Rica (GRAF, CAPRA). Si bien no se trata de curvas propias del país, se consideran aceptables. Fue necesario el desarrollo de nuevas funciones para ciertos sectores (por ejemplo, Salud), a partir de un modelo de arquetipos que permita considerar los contenidos de los bienes inmuebles. La validación de nuevas funciones de vulnerabilidad es un trabajo analítico y técnico de alta complejidad y muy demandante computacionalmente.                                                                                                                                                                                                                                                                     | Requiere de inversión en investigación de modelos de vulnerabilidad                                                                     |
| Vulnerabilidad | Vulnerabilidad de infraestructura | En algunos casos, fue necesaria la adopción de funciones de vulnerabilidad para elementos de infraestructura (como HAZUS por ejemplo) y en otros casos se requirió la creación de funciones nuevas para elementos de infraestructura por medio de un enfoque de arquetipos. Estas funciones se consideran suficientes para los propósitos de la evaluación. La validación de nuevas funciones de vulnerabilidad es un trabajo analítico y técnico de alta complejidad y muy demandante computacionalmente. Así mismo, el modelo considera únicamente pérdidas directas sobre los elementos de infraestructura, sin consideración de las variaciones en el servicio prestado en elementos que operan en red (por ejemplo, red vial, red eléctrica, red de suministro de agua), ni tampoco la interdependencia de estos sistemas. | Requiere de inversión en investigación de modelos de vulnerabilidad                                                                     |

Aunque Costa Rica destaca en la región por contar con sistemas de información sólidos y bien estructurados en términos de insumos para la modelación, persisten limitaciones inherentes al enfoque probabilista. El principal reto radica en que la modelación se basa en la proyección de eventos futuros que aún no han ocurrido, lo que implica dependencia de supuestos analíticos sobre el comportamiento extremo de los fenómenos naturales y la respuesta de los elementos expuestos ante ellos. Por ende, incluso en contextos con buena disponibilidad de datos, como Costa Rica, la incertidumbre no puede eliminarse por completo, sino gestionarse de forma explícita dentro del proceso de evaluación del riesgo.

## 2.5 Recomendaciones para futuras evaluaciones

En función de las limitaciones propias de la evaluación, se plantean algunas recomendaciones generales que fortalecerán el uso futuro de modelos de evaluación probabilista del riesgo:

### 1. Uso institucional de los resultados como línea base oficial de riesgo

Se recomienda que las instituciones locales adopten los resultados de PAE y PML de portafolio, así como las métricas de riesgo por elemento, como una línea base oficial para la caracterización del riesgo multiamenaza del cantón de Heredia. Estos resultados pueden integrarse de manera directa en procesos de planificación territorial, priorización de inversiones en infraestructura, análisis costo-beneficio de medidas de reducción del riesgo y esquemas de aseguramiento o retención financiera. Dada la cobertura completa del portafolio de edificios e infraestructura crítica, y la coherencia interna del modelo, los indicadores generados son adecuados para comparaciones relativas entre sectores, subsectores y zonas, así como para el seguimiento temporal del riesgo a nivel agregado.

## 2. Gestión, resguardo y trazabilidad de la información de exposición

Dado que la calidad y el nivel de desagregación de la información de exposición constituyen uno de los principales activos del estudio, se recomienda establecer procedimientos formales para su mantenimiento, actualización y control de versiones. Esto incluye la definición de responsables institucionales, protocolos de actualización periódica (por ejemplo, ante nuevas obras, cambios de uso o retiro de activos), y mecanismos de trazabilidad que permitan documentar las modificaciones realizadas sobre el inventario original. La consistencia y continuidad de la base de exposición son condiciones necesarias para que futuras actualizaciones del riesgo sean comparables con los resultados actuales y para establecer un nivel mínimo de calidad en evaluaciones futuras.

## 3. Definición de lineamientos institucionales para la interpretación y comunicación del riesgo

Se recomienda que las instituciones locales establezcan lineamientos claros y homogéneos para la interpretación, uso y comunicación de los resultados de riesgo probabilista derivados del estudio. Estos lineamientos deberían especificar los alcances y limitaciones de métricas como PAE y PML, los niveles de agregación adecuados para su uso institucional y los contextos en los cuales los resultados pueden ser empleados para la toma de decisiones técnicas, financieras o estratégicas. Una interpretación consistente del riesgo contribuye a evitar usos inadecuados o contradictorios de los resultados entre instituciones y facilita la comunicación con tomadores de decisión no técnicos.

## 4. Actualización periódica de los modelos de amenaza y su alineación con nueva información técnica

Se recomienda que los modelos de amenaza utilizados en este estudio sean revisados y actualizados de manera periódica, incorporando nueva información hidrometeorológica, geotécnica, sísmológica o topográfica conforme esta esté disponible. Dado que los modelos actuales fueron desarrollados con una resolución adecuada a la escala cantonal y bajo criterios técnicos consistentes, su actualización puede realizarse de manera modular, preservando la estructura general del modelo de riesgo. Este proceso permitirá mejorar progresivamente la representación espacial y probabilista de las amenazas, así como mantener la relevancia de los resultados frente a cambios en el conocimiento técnico o en las condiciones ambientales.

## 5. Fortalecimiento de capacidades institucionales y apropiación del modelo de riesgo

Para asegurar la sostenibilidad del uso de los resultados, se recomienda invertir en el fortalecimiento de capacidades técnicas dentro de las instituciones locales, orientadas a la comprensión, interpretación y uso operativo de métricas probabilistas. Esto incluye capacitación en conceptos de modelación de riesgo e

interpretación de resultados, así como en el uso de los insumos geoespaciales generados y disponibles en el dataset (conjunto de datos) del proyecto.

6. Uso del cantón de Heredia como catalizador para la réplica de evaluaciones de riesgo a escala cantonal

Se recomienda que el cantón de Heredia sea utilizado como experiencia piloto y catalizadora para la replicación de evaluaciones de riesgo multiamenaza en otros cantones del país, aun cuando estos presenten condiciones de información menos favorables en términos de calidad, cobertura o nivel de desagregación. La metodología aplicada, la estructura del modelo de riesgo y las lecciones aprendidas en el desarrollo del estudio constituyen insumos valiosos para definir enfoques escalables y adaptables a distintos contextos de disponibilidad de datos. La réplica progresiva de este tipo de ejercicios permitiría fortalecer una visión homogénea del riesgo a nivel territorial, así como orientar esfuerzos futuros de levantamiento de datos y fortalecimiento institucional en aquellos cantones con mayores limitaciones.

### 3 MODELO DE EFECTOS DE SITIO PARA HEREDIA

---

Como valor agregado de esta consultoría, y dada la escala del modelo de riesgo sísmico para el cantón de Heredia, se propuso la generación de un modelo aproximado de efectos de sitio, que permita considerar de forma simplificada el efecto modificador de la respuesta dinámica del suelo superficial en el movimiento fuerte causado por los terremotos. Los efectos de sitio son de altísima relevancia en ingeniería sísmica debido a que, en general, la respuesta de los suelos implica una amplificación de las aceleraciones efectivas a nivel de cimentación de la infraestructura, incrementándose así las solicitaciones a los elementos expuestos por cargas sísmicas, en comparación con las aceleraciones efectivas a nivel de roca firme.

La metodología aplicada para la conformación del modelo de efectos de sitio de Heredia se basa en la propuesta metodológica para estudios de microzonificación sísmica de Bernal (2014) y Bernal & Cardona (2015), y se puede resumir en los siguientes pasos:

1. *Definición de la geometría del depósito blando:* Con base en la información geológica y geofísica disponible en estudios anteriores en áreas cercanas, principalmente en los estudios de microzonificación sísmica de San José, se establece un modelo simplificado de espesores de depósito de suelo blando que define la topografía subyacente al depósito, es decir, el contacto con roca firme<sup>3</sup>, a partir de la cual es posible construir un modelo geométrico tridimensional que permite establecer la profundidad total en cada punto dentro de la ciudad.
2. *Información geotécnica:* Dado el carácter simplificado del modelo propuesto, y la imposibilidad de realizar una campaña de estudios de campo que incluya una serie de perforaciones en diferentes ubicaciones del territorio, en este caso se consulta la mejor información disponible en áreas cercanas para establecer una condición geotécnica general en el área del cantón. Si bien es poco probable que no se presenten variaciones en las características geotécnicas de los materiales al interior del cantón, esta suposición es suficiente con fines de aproximar el efecto del suelo en el movimiento fuerte.
3. *Selección de señales sísmicas:* Con el fin de establecer el comportamiento del suelo dentro del rango no lineal, se definen señales sísmicas con diferentes niveles de aceleración máxima. Estas señales no deben ser necesariamente compatibles con la amenaza a nivel de roca firme, sino que se seleccionan con el único objetivo de forzar el comportamiento no lineal en los suelos.
4. *Definición de los sitios de cálculo:* En cada sitio de cálculo se simularán estratigrafías sintéticas con base en la geometría de las formaciones geológicas y en la información geotécnica de toda la ciudad.
5. *Evaluación de la respuesta dinámica:* Para cada estratigrafía sintética en cada sitio de cálculo, se evalúa la respuesta dinámica unidimensional, empleando un modelo de comportamiento no lineal, para cada una de las señales seleccionadas. En cada nodo se obtienen entonces las funciones de transferencia del espectro de Fourier. Estas se obtienen para diferentes niveles de

---

<sup>3</sup> En este trabajo se define como roca firme un material con velocidad de onda de cortante superior a 800 m/s.

aceleración máxima en la base del depósito, de manera que se refleja en ellas el comportamiento no lineal de los suelos.

6. *Cálculo de la amenaza sísmica en cada sitio:* Se calcula la amenaza sísmica en cada ubicación por medio de la transformación espectral de la amenaza a nivel de roca firme, incorporando la función de transferencia de cada ubicación, para obtener una respuesta espectral superficial. En este punto participa también el modelo general de amenaza sísmica seleccionado en esta consultoría, correspondiente al modelo ASLAC (Salgado et al. 2018).

En las secciones siguientes se detalla la información, procedimientos y suposiciones tenidas en cuenta en cada uno de los pasos presentados anteriormente.

### 3.1 Modelo geométrico-geotécnico

El modelo geométrico y geotécnico es un componente esencial dentro de la modelación de los efectos de sitio en ciudades o áreas metropolitanas. Es ampliamente reconocida la altísima variabilidad espacial de las condiciones geotécnicas, en términos de espesor, rigidez y comportamiento no lineal del suelo superficial, lo cual implica grandes inversiones en recopilación de información por medio de campañas de investigación geotécnica y geofísica. Este tipo de trabajos de campo son usuales en estudios de microzonificación sísmica. No obstante, en este caso no se cuenta con dicha información, y su obtención escapa ampliamente al alcance de esta consultoría. Ante la necesidad de incorporar los efectos de sitio, y la realidad de no contar con información de campo para caracterizar geotécnica y geofísicamente el territorio, se hace necesario recurrir a supuesto y aproximación con base en la información disponible obtenida de forma oportuna.

En el año 2000, se llevó a cabo el Estudio de Microzonificación Sísmica del Área Metropolitana de la Ciudad de San José, proyecto de investigación orientado a obtener resultados sobre la amenaza sísmica y el comportamiento dinámico de los suelos en el Área Metropolitana de San José, en la cual se concentra la mayor parte de la población de Costa Rica y en donde se desarrollan las principales actividades socioeconómicas del país.

Así mismo, Arroyo-Solorzano (2023) y Benito et al. (2025), proponen una zonificación sísmica para el Gran Área Metropolitana de San José, con base en la clasificación de suelos dada por NERPH (2020). La Figura 6 muestra esta clasificación general de tipos de suelo, en donde puede observarse que los suelos al sureste del cantón son suelos tipo D o DE, con espesores típicos entre 10 y 20 metros, y velocidades de onda de cortante de entre 200 y 300 m/s (de acuerdo con NERPH, 2020).

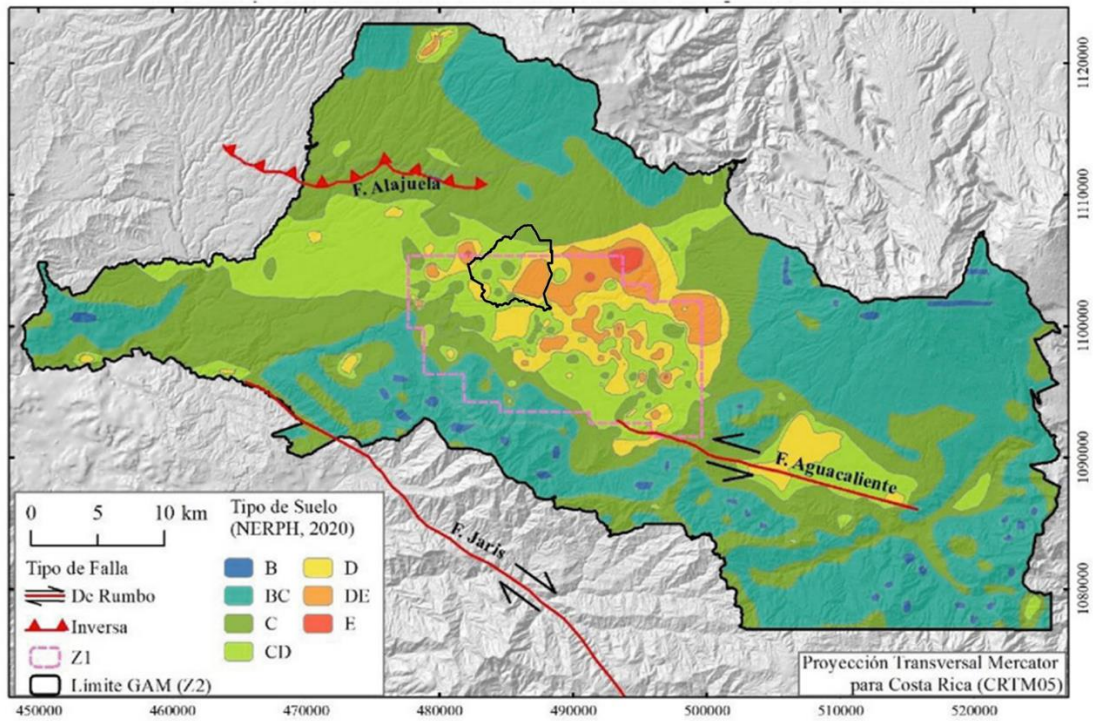


Figura 6. Microzonificación sísmica para la Gran Área Metropolitana de San José. Tomado de Arroyo-Solórzano (2023).  
Modificado para incluir el contorno del área urbana del cantón de Heredia.

Esta zonificación se modificó con el fin de tener en cuenta la topografía de los accidentes geográficos a escala local, la cual modifica los espesores de los depósitos en distancias cortas. Con este fin, se aproximó un espesor equivalente de suelo, como función de la pendiente topográfica, por medio de la fórmula empírica:

$$e = \frac{30}{s} \quad \text{Ecuación 8}$$

En donde,  $e$  es el espesor en metros y  $s$  la pendiente topográfica en grados<sup>4</sup>. Esta ecuación es una propuesta del consultor, obtenida de su propia experiencia en la modelación de efectos de sitio. De esta manera, se combina el espesor asociado a la pendiente topográfica, con el espesor característico de la zonificación geotécnica, obteniendo así una propuesta de espesores aproximados al interior del cantón, como se muestra en la Figura 7.

<sup>4</sup> Ecuación válida para  $1 \leq s \leq 70$  únicamente. Para todo  $s < 1$ ,  $e = 30$  y para todo  $s > 70$  se asume  $e = 0$ .

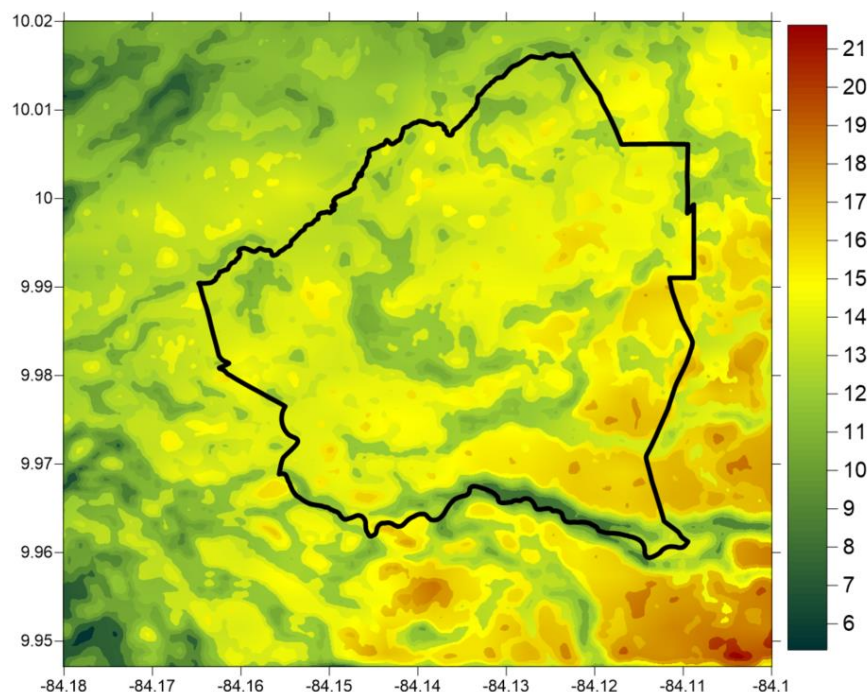


Figura 7. Propuesta de espesores aproximados de suelo blando en Heredia. Escala en metros.

Como se mencionó anteriormente, se requiere modelar geoméricamente el depósito blando en toda la extensión del cantón. El límite inferior corresponde a la cota donde se presume terminan los materiales considerados dentro del espesor de suelo blando, por lo que el modelo de espesores previamente presentado permite determinar dicha cota. Por su parte, la cota topográfica constituye el límite superior del dominio de cálculo. Esto permite establecer la profundidad del depósito en cualquier ubicación, de manera que se obtiene un modelo tridimensional del subsuelo.

A partir de la clasificación NEHRP dada en Arroyo-Solórzano (2023) y Benito et al. (2025), se definen perfiles lineales de variación en profundidad de la velocidad de onda de cortante, que coincidan con el  $V_{s30}$  correspondiente de la clase, es decir, que el promedio del perfil en los primeros 30 metros (o hasta alcanzar la roca) se encuentre dentro del rango de la clase correspondiente en cada ubicación. Si bien esta es una aproximación gruesa, pues la velocidad de onda de cortante no necesariamente varía de forma lineal en profundidad, es una suposición suficiente para los propósitos de esta evaluación. A partir de la clasificación por velocidad de onda ( $V_s$ ) y el modelo de espesores ( $H$ ), es posible determinar el periodo de vibración del suelo en bajas deformaciones cortantes,  $T$ , como:

$$T = \frac{4H}{V_s}$$

Ecuación 9

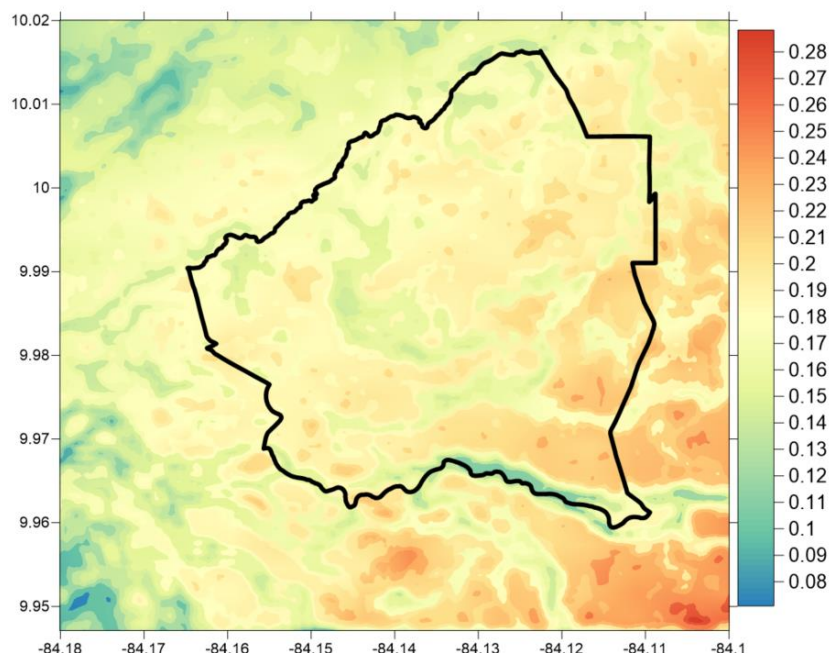


Figura 8. Periodo fundamental de vibración del suelo en Heredia. Escala en segundos.

### 3.2 Estratigrafías sintéticas

La metodología de evaluación de efectos de sitio aplicada se basa en la generación de estratigrafías sintéticas sobre ubicaciones arbitrarias; ubicaciones que no han sido exploradas anteriormente. Estas estratigrafías son la base para la evaluación de la respuesta dinámica de los suelos blandos. Las estratigrafías sintéticas se construyen en función del modelo geométrico-geotécnico. En cualquier ubicación del cantón, o punto de cálculo, es posible construir una estratigrafía sintética. Esta estratigrafía se compone de una secuencia de valores de propiedades geotécnicas, para la profundidad específica bajo consideración.

Las propiedades geotécnicas incluidas en este modelo son solamente dos: peso específico y velocidad de onda de cortante. Con estas propiedades queda totalmente determinado un estrato para su modelación de respuesta dinámica. Dado que la estratigrafía se compone de múltiples estratos, queda entonces definida por medio de perfiles de velocidad de onda y peso específico.

Finalmente, se asignan modelos de degradación de rigidez y amortiguamiento para aproximar el comportamiento no lineal del suelo ante grandes deformaciones cortantes. Se emplea el modelo de Flores (2025) el cual, si bien ha sido desarrollado específicamente para los suelos de Heredia, es un modelo aplicable a suelos de origen volcánico en zonas montañosas.

### 3.3 Señales de cálculo

Se emplean señales de acelerogramas reales con el fin de evaluar la respuesta dinámica de las estratigrafías simuladas en cada ubicación de cálculo. Estas señales no pretenden ser representativas de

la amenaza sísmica de Heredia, sino simplemente cubrir un rango amplio de amplitudes y contenidos frecuenciales, de tal forma que sea posible inducir la respuesta no lineal del depósito blando ante el forzamiento sísmico. En otras palabras, son señales que no tienen ni deben tener ninguna relación con la amenaza en roca firme.

Se seleccionaron sismos a nivel mundial, tanto de fuentes corticales como de fuentes de subducción, los cuales son escalados a aceleraciones máximas de 0.05g, 0.1g, 0.2g o 0.4g, según la aceleración máxima propia de la señal. Esto permite uniformizar el nivel de intensidad incidente en la base de las simulaciones, sin alterar drásticamente las señales escogidas.

En la Tabla 3 y la Tabla 4 se presentan las principales características de las señales sísmicas utilizadas, tales como: identificación, fecha del evento, magnitud, distancia hipocentral, duración del registro, aceleración máxima y aceleración máxima utilizada (a la cual el registro fue escalado). La Figura 9 a Figura 12 muestran las señales seleccionadas.

Tabla 3. Señales seleccionadas de fuentes corticales

| Nombre | ID del Registro  | País     | Fecha      | Magnitud | Distancia | Duración | Amax  | Amax Utilizada |
|--------|------------------|----------|------------|----------|-----------|----------|-------|----------------|
|        |                  |          |            |          | (km)      | (seg)    | (g)   | (g)            |
| A01    | Chalfant Valley  | U.S.A    | 21/07/1986 | 6.2      | 50        | 39.81    | 0.051 | 0.05           |
| A02    | Georgia          | U.S.S.R  | 15/06/1991 | 6.2      | 52        | 38.17    | 0.046 | 0.05           |
| A03    | Palm Springs     | U.S.A    | 08/07/1986 | 6        | 63        | 24       | 0.053 | 0.05           |
| A04    | Anza             | U.S.A    | 08/07/1986 | 6        | 26        | 24       | 0.113 | 0.1            |
| A05    | Armenia Bocatoma | Colombia | 19/01/1999 | 6.2      | 42        | 31.92    | 0.084 | 0.1            |
| A06    | Imperial Valley  | U.S.A.   | 15/10/1979 | 6.5      | 36        | 28.28    | 0.109 | 0.1            |
| A07    | Irpinia          | Italia   | 23/11/1980 | 6.5      | 33        | 36.34    | 0.199 | 0.2            |
| A08    | Whittier Narrows | U.S.A    | 10/01/1987 | 6        | 10        | 29.96    | 0.199 | 0.2            |
| A09    | San Fernando     | U.S.A    | 09/02/1971 | 6.6      | 27        | 29.66    | 0.212 | 0.2            |
| A10    | Coalinga         | U.S.A.   | 22/07/1983 | 5.7      | 12        | 21.3     | 0.375 | 0.4            |
| A11    | Northridge       | U.S.A.   | 17/01/1994 | 6.7      | 35        | 30.33    | 0.493 | 0.4            |
| A12    | Park Field       | U.S.A.   | 28/06/1966 | 6.1      | 10        | 30.33    | 0.356 | 0.4            |

Tabla 4. Señales seleccionadas de fuentes de subducción

| Nombre | ID del Registro | País   | Fecha      | Magnitud | Distancia | Duración | Amax  | Amax Utilizada |
|--------|-----------------|--------|------------|----------|-----------|----------|-------|----------------|
|        |                 |        |            |          | (km)      | (seg)    | (g)   | (g)            |
| S01    | Nuxco           | México | 15/07/1996 | 6.5      |           | 83       | 0.049 | 0.05           |
| S02    | Ocotito         | México | 14/09/1995 | 7.2      |           | 61       | 0.059 | 0.05           |
| S03    | Zihuatanejo     | México | 10/12/1994 | 6.6      |           | 34.05    | 0.053 | 0.05           |
| S04    | Paraíso         | México | 25/09/1984 | 6.5      |           | 36.67    | 0.102 | 0.1            |
| S05    | Red Smart       | Taiwán | 12/06/1985 | 6.5      | 45        | 27.15    | 0.142 | 0.1            |
| S06    | La Unión        | México | 10/12/1994 | 6.6      |           | 54.98    | 0.092 | 0.1            |
| S07    | Caleta          | México | 09/08/2000 | 6.7      |           | 42.21    | 0.194 | 0.2            |
| S08    | Ocotito         | México | 25/04/1989 | 6.5      |           | 53.16    | 0.195 | 0.2            |
| S09    | Copala          | México | 24/10/1993 | 6.2      |           | 58.94    | 0.292 | 0.4            |
| S10    | Las Vigas       | México | 25/04/1989 | 6.5      |           | 34.43    | 0.345 | 0.4            |

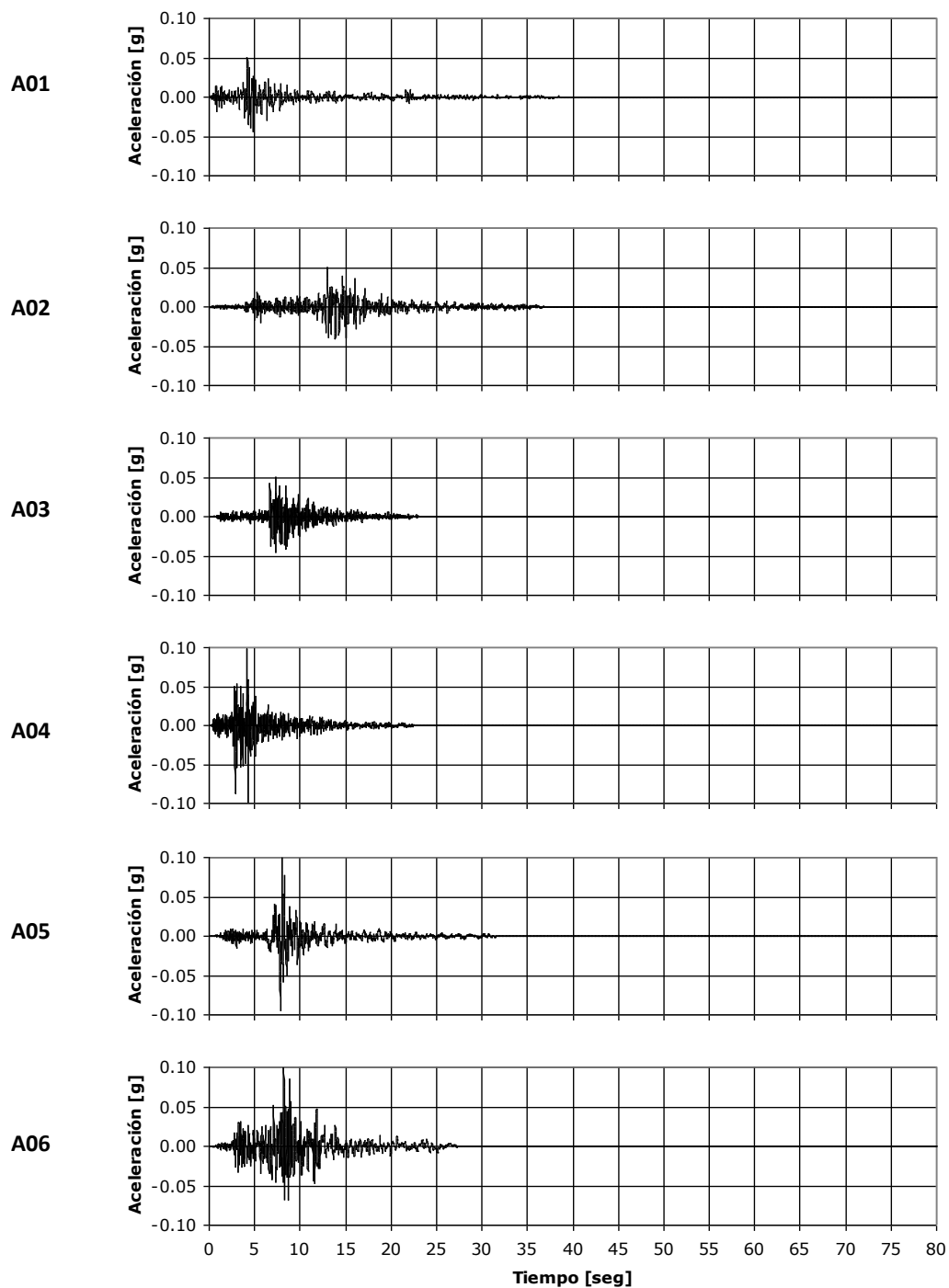


Figura 9. Señales de fuente cortical.

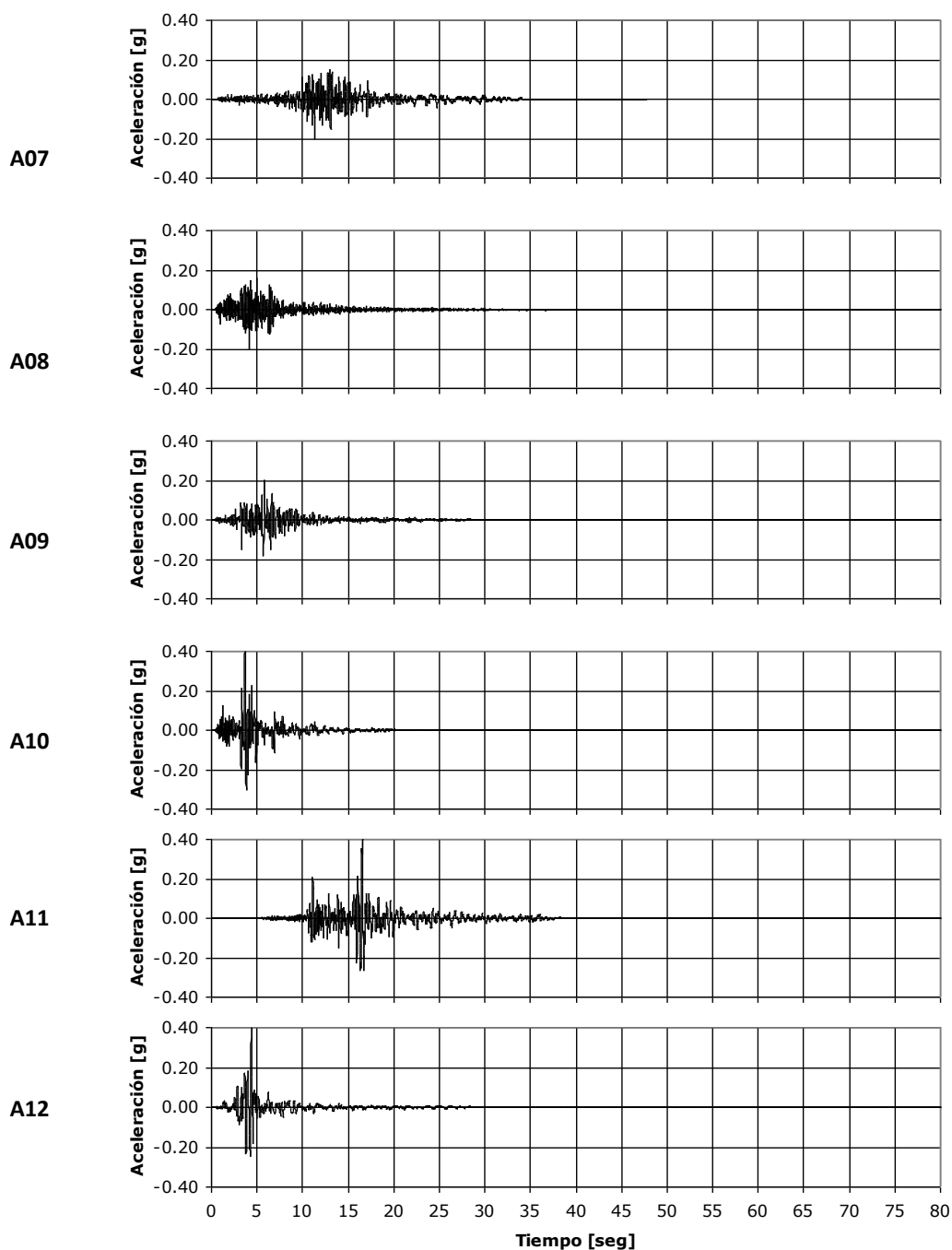


Figura 10. Señales de fuente cortical.

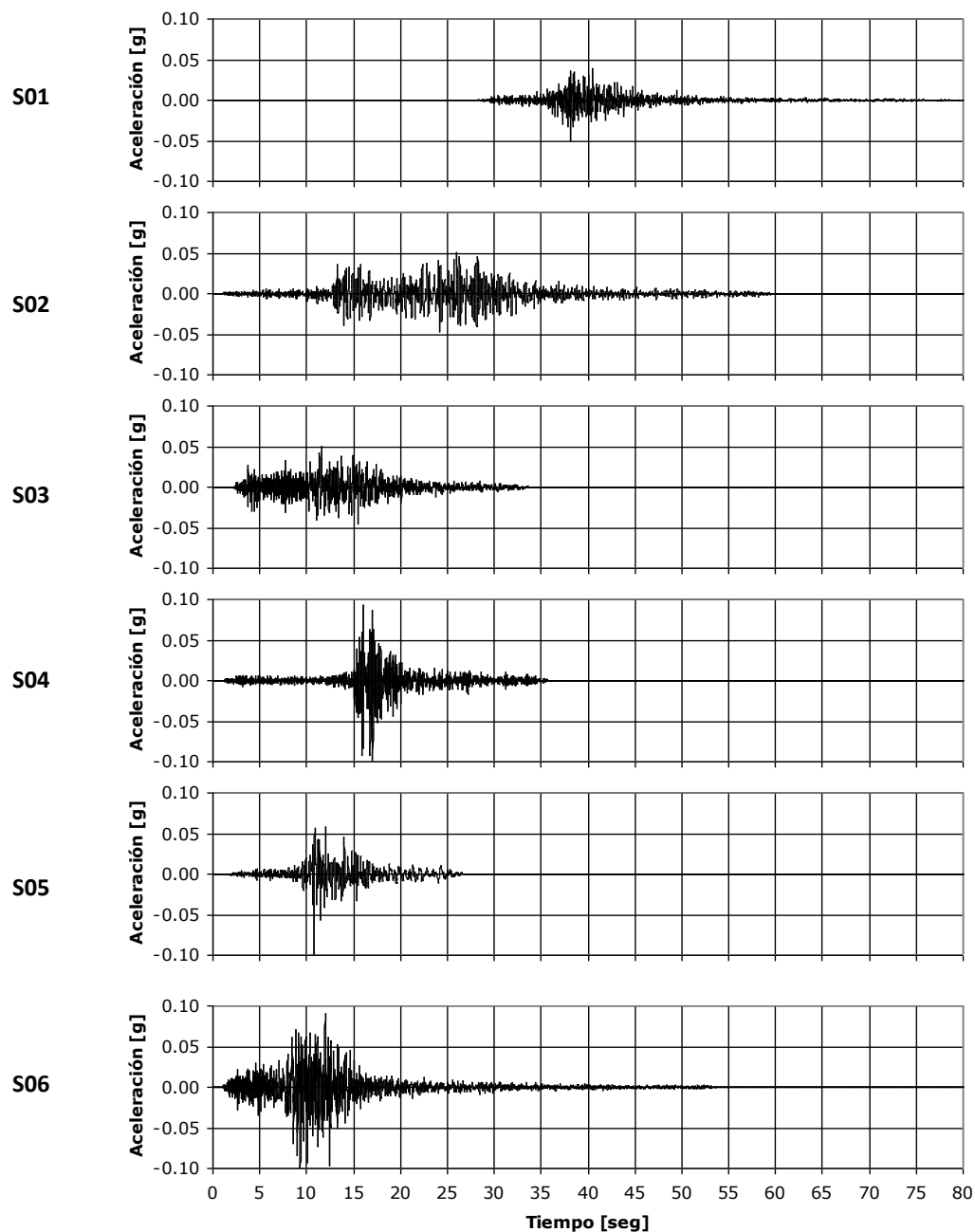


Figura 11. Señales de fuente de subducción.

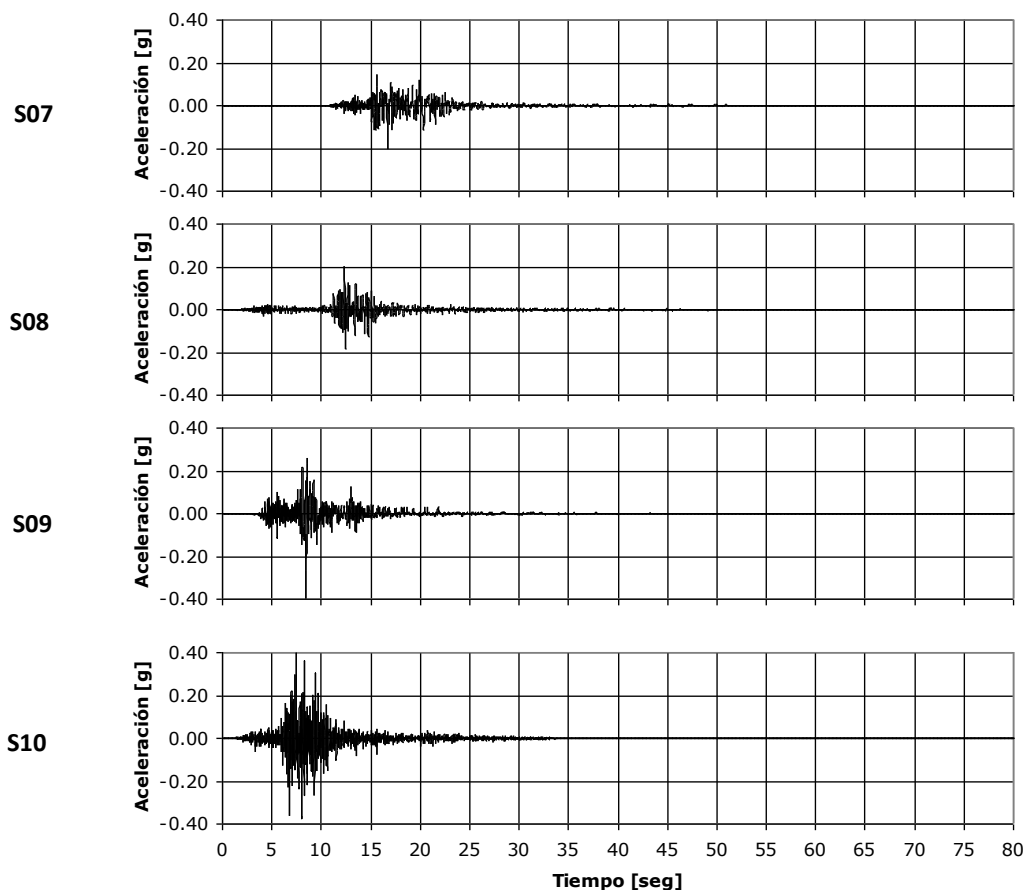


Figura 12. Señales de fuente de subducción.

### 3.4 Cálculo de la respuesta dinámica

Para cada estratigrafía, se calcula la respuesta dinámica unidimensional, empleando el método de análisis lineal equivalente. Este método, propuesto por Harry Seed e Izzat Idriss (Idriss & Seed 1968 y Seed & Idriss 1970) ha sido el más usado en la actualidad para el cálculo de la respuesta dinámica en el rango no lineal. En este método se calcula la respuesta lineal del estrato de suelo y, por medio de un proceso iterativo, se ajustan las propiedades (rigidez a cortante y amortiguamiento) en función de los modelos constitutivos de comportamiento no lineal del suelo (curvas de degradación de la rigidez y amortiguamiento), como se ilustra en la Figura 13. En este estudio la respuesta elástica se calcula haciendo uso del método de la matriz propagadora de Thompson-Haskell (Thompson 1950, Haskell 1953), mediante el cual se calculan las funciones de transferencia lineales del espectro de Fourier para un medio estratificado. Este método provee una solución eficiente computacionalmente en el dominio de la frecuencia.

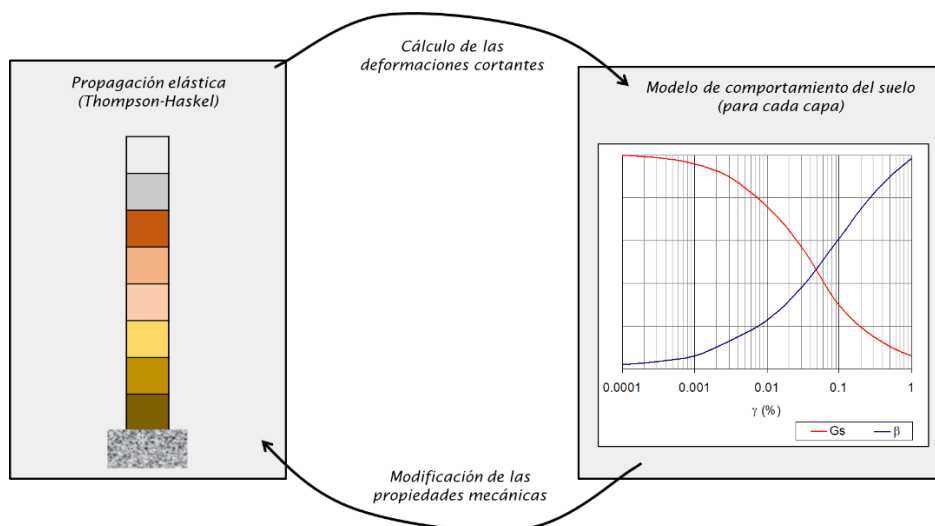


Figura 13. Ilustración del proceso iterativo para la evaluación de la respuesta dinámica unidimensional en el rango no lineal.

En cada ubicación de cálculo se evaluó la respuesta dinámica, obteniendo como resultado un paquete de información sitio a sitio, el cual consiste en:

- Propiedades compatibles con la deformación cortante (módulo de cortante y amortiguamiento) para cada uno de los acelerogramas considerados
- Espectros de respuesta de aceleración a nivel superficial
- Funciones de transferencia del espectro de Fourier
- Acelerogramas en superficie

La Figura 14 a Figura 17 presentan la información obtenida para un sitio de cálculo en Heredia, como se presenta en el software de modelación Seismic Microzonation Studio (Bernal, 2014), desarrollado por INGENIAR y que hace parte de la plataforma CAPRA ROBOT.

Resultados

Resultados por capa

Espectro de respuesta

Funciones de transferencia

Acelerogramas en superficie

Resultados por señal

Capas

| Nombre | Dt (seg) | Df (Hz) | NTF  |
|--------|----------|---------|------|
| A01    | 0.020    | 0.012   | 4096 |
| A02    | 0.020    | 0.012   | 4096 |
| A03    | 0.020    | 0.012   | 4096 |
| A04    | 0.020    | 0.012   | 4096 |
| A05    | 0.020    | 0.012   | 4096 |
| A06    | 0.020    | 0.012   | 4096 |

Propiedades del sitio

Roca

Gamma (ton/m3)2.2

Vs (m/s)1000

Sitio

Ubicación-84.139294896849, 9.95570752

Nivel freático(m)32.025173187713

Sitio

Tipo de valorPromedio

¿Sitio en roca?No

Tipo de valor

Tipo de valor usado en la asignación de propiedades geotécnicas

| Id de capa | Tipo de suelo | Profundidad (m) | Gamma (ton/m3) | Vs inicial (m/s) | Vs final (m/s) |
|------------|---------------|-----------------|----------------|------------------|----------------|
| 1          | Suelo 1       | 0.5             | 1.19           | 106.00           | 88.72          |
| 2          | Suelo 1       | 1.5             | 1.21           | 130.00           | 104.88         |
| 3          | Suelo 1       | 2.5             | 1.24           | 154.00           | 125.05         |
| 4          | Suelo 1       | 3.5             | 1.25           | 166.00           | 133.79         |
| 5          | Suelo 1       | 4.5             | 1.27           | 190.00           | 158.02         |
| 6          | Suelo 1       | 5.5             | 1.30           | 214.00           | 182.17         |
| 7          | Suelo 1       | 6.5             | 1.31           | 226.00           | 193.03         |
| 8          | Suelo 1       | 7.5             | 1.34           | 250.00           | 216.53         |
| 9          | Suelo 1       | 8.5             | 1.36           | 274.00           | 241.38         |
| 10         | Suelo 1       | 9.5             | 1.38           | 286.00           | 254.00         |
| 11         | Suelo 1       | 10.5            | 1.40           | 310.00           | 279.82         |
| 12         | Suelo 1       | 11.5            | 1.43           | 334.00           | 304.46         |
| 13         | Suelo 1       | 12.5            | 1.44           | 346.00           | 316.04         |
| 14         | Suelo 1       | 13.5            | 1.46           | 370.00           | 340.85         |
| 15         | Suelo 1       | 14.5            | 1.49           | 394.00           | 365.61         |
| 16         | Suelo 1       | 15.5            | 1.50           | 406.00           | 377.62         |

Figura 14. Propiedades geotécnicas compatibles con la deformación. Seismic Microzonation Studio

**Resultados**

Resultados por capa | **Espectro de respuesta** | Funciones de transferencia | Acelerogramas en superficie

Desplazamiento

Velocidad

**Aceleración**

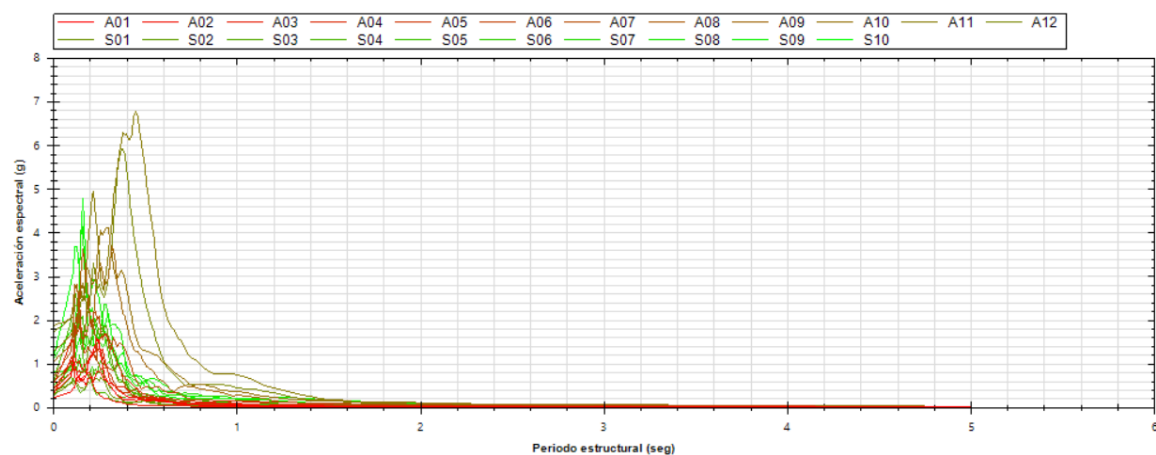


Figura 15. Espectros superficiales de aceleración. Seismic Microzonation Studio

**Resultados**

**Resultados**

Resultados por capa | **Espectro de respuesta** | **Funciones de transferencia** | Acelerogramas en superficie

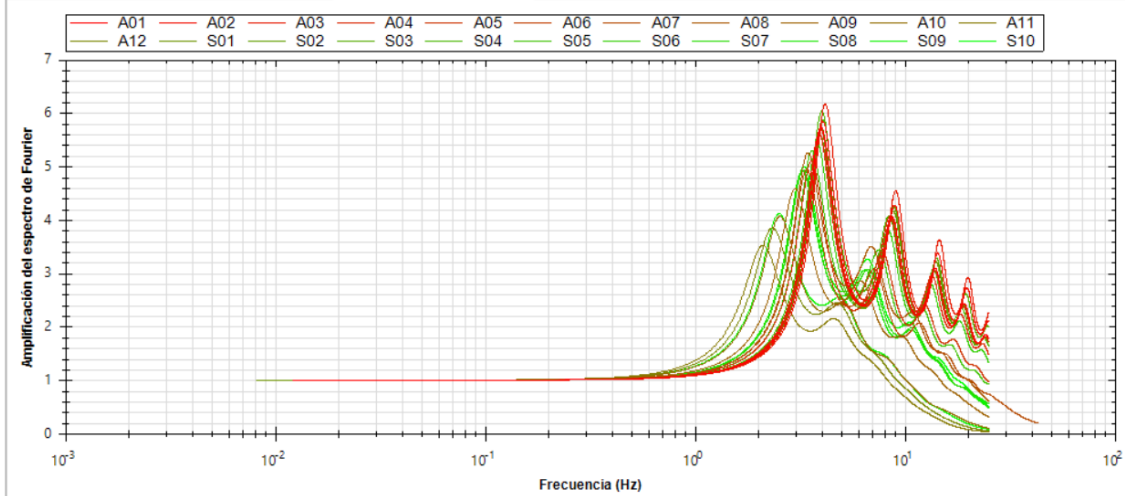


Figura 16. Funciones de transferencia del espectro de Fourier. Seismic Microzonation Studio

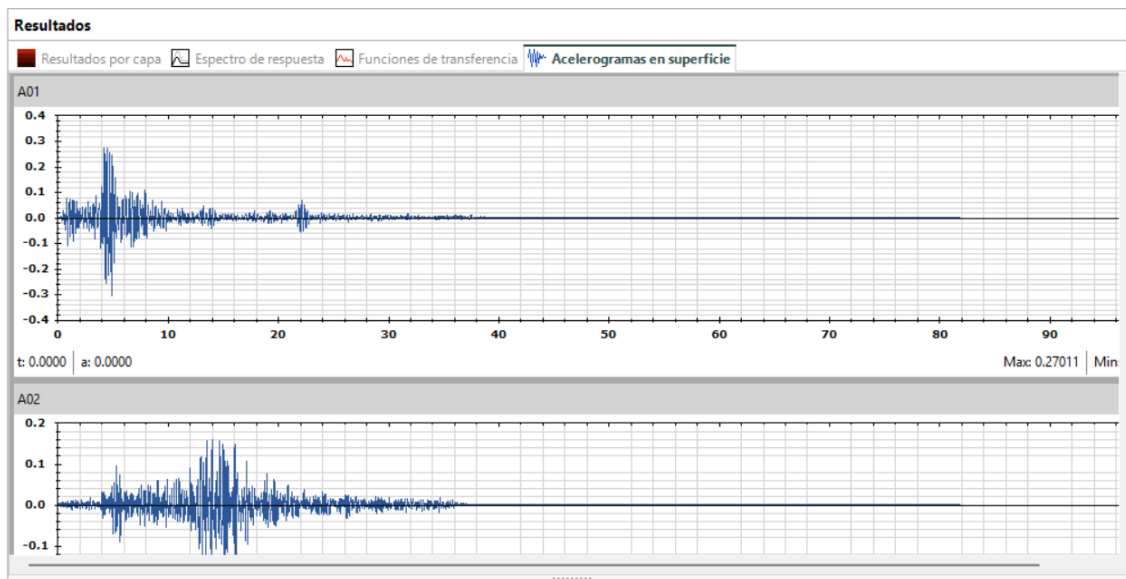


Figura 17. Acelerogramas en superficie. Seismic Microzonation Studio

### 3.5 Cálculo de la amenaza sísmica

Para la evaluación de la amenaza se utiliza el procedimiento de integración clásico, que considera las diferentes localizaciones de los terremotos considerados en el modelo, cuyo hipocentro se define en el centroide de la subfuentes generadas al interior de las fuentes principales. Aplicando estos conceptos, es posible determinar las tasas de excedencia de cualquier medida de intensidad, y obtener representaciones clásicas de la amenaza sísmica, como mapas o espectros de amenaza uniforme, por ejemplo. En este trabajo, la amenaza sísmica se evaluó en el programa R-CRISIS (Ordaz et al., 2017), el cual hace parte de la plataforma CAPRA ROBOT.

La Figura 18 a Figura 20 presentan mapas de amenaza uniforme a nivel superficial, en términos de la aceleración máxima del terreno (PGA<sup>5</sup>) para 100, 500 y 1000 años de periodo de retorno. Estos mapas ilustran la variación espacial de las intensidades sísmicas al interior del cantón de Heredia, la cual está dominada por la respuesta dinámica de los suelos.

<sup>5</sup> PGA: Peak Ground Acceleration

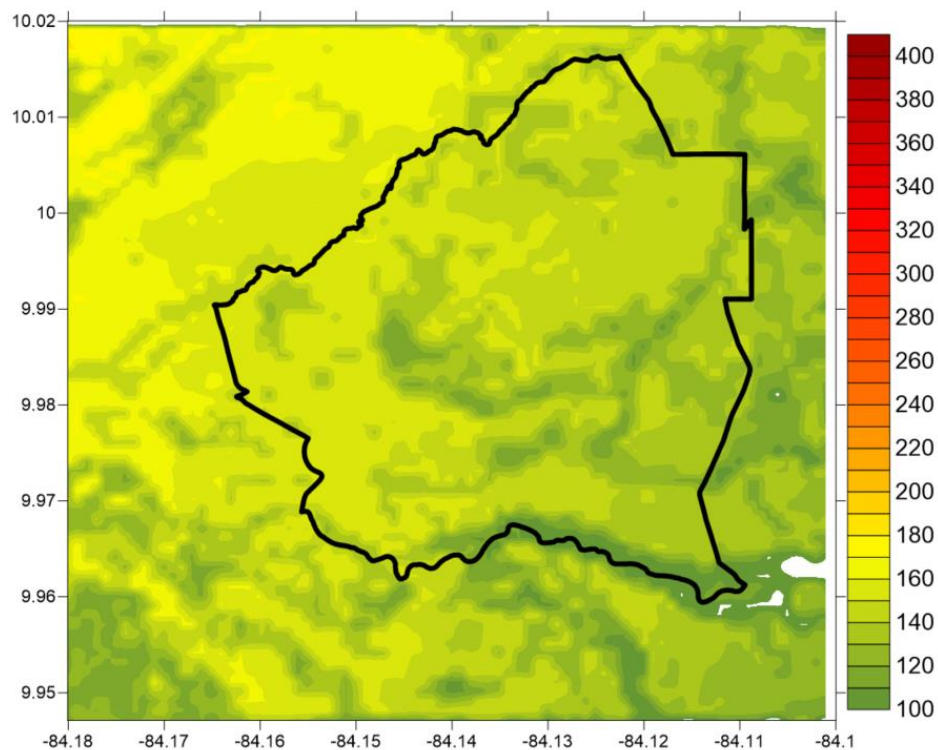


Figura 18. Mapa de amenaza uniforme de 100 años de periodo de retorno. PGA en  $\text{cm/s}^2$ .

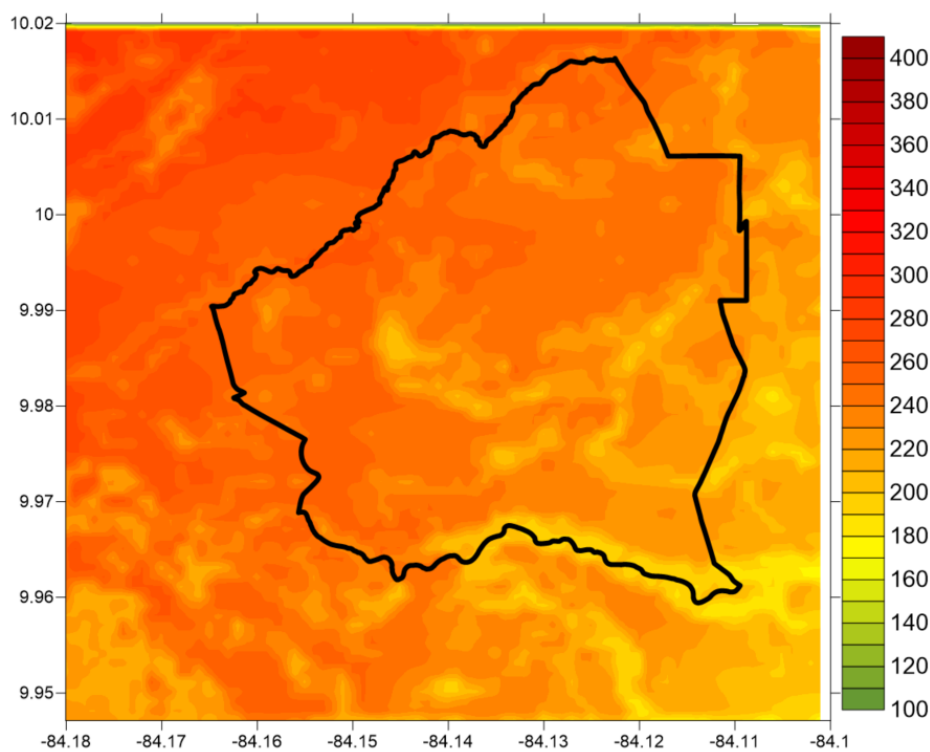


Figura 19. Mapa de amenaza uniforme de 500 años de periodo de retorno. PGA en  $\text{cm/s}^2$ .

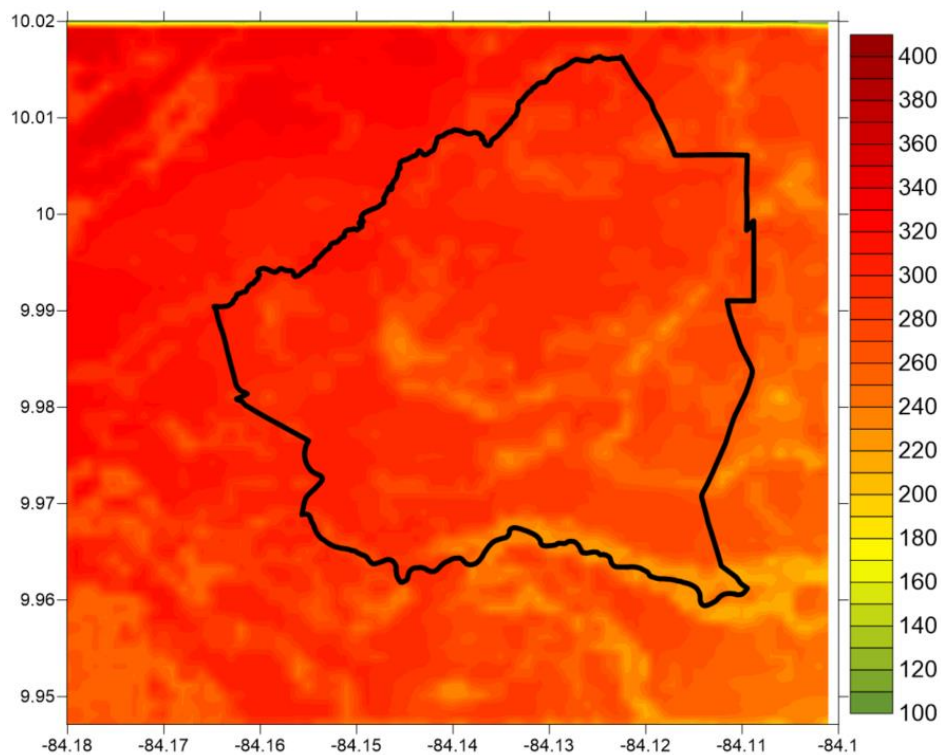


Figura 20. Mapa de amenaza uniforme de 1000 años de periodo de retorno. PGA en cm/s<sup>2</sup>.

## 4 MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS PARA HEREDIA

---

Como valor agregado de esta consultoría, se acordó la inclusión de la amenaza por deslizamientos en el modelo de riesgo del cantón de Heredia. Esto implica considerar deslizamientos detonados tanto por sismos como por lluvias intensas.

En términos generales, la evaluación de la estabilidad de laderas requiere el entendimiento de cuatro aspectos fundamentales que la gobiernan: i) las cargas actuantes sobre los bloques o porciones de material que pueden deslizarse, ii) el papel del agua en la modificación de las propiedades mecánicas de los materiales de ladera, iii) la estructura geológica del sitio y las modificaciones generada por el hombre, y iv) los eventos detonantes externos, en particular terremotos y exceso de lluvia.

Los primeros tres aspectos mencionados pueden condensarse en el concepto de susceptibilidad, el cual da cuenta de las condiciones intrínsecas que favorecen la inestabilidad. El detonante es un factor externo a la ladera, que se aborda por medio de modelos probabilistas de amenaza sísmica y de ocurrencia de lluvias. La amenaza por deslizamientos se determina entonces como una probabilidad de deslizamiento, que depende de la susceptibilidad y de la probabilidad de excedencia del detonante, es decir, la probabilidad que, si se manifiesta un evento detonante, se supere un determinado umbral de intensidad. Es decir, un modelo de amenaza por deslizamientos requiere de la definición de 3 componentes: susceptibilidad, modelo de detonantes y modelo de umbrales.

Los detonantes (sismo y lluvia) ya cuentan con modelos probabilistas dentro de esta consultoría. En el caso sísmico se trata del modelo ASLAC (Salgado et al. 2018) como se mencionó anteriormente, mientras que la lluvia se modela por medio de simulaciones a escala diaria basadas en información del clima histórico, y que se alteran por cambio climático según el clima a considerar (ver Producto 4 “Modelos de amenazas climáticas”). No obstante, el desarrollo de nuevos modelos para los componentes de susceptibilidad y umbrales no se encuentra dentro del alcance de esta consultoría y, por lo tanto, fue necesario seleccionar modelos preexistentes.

Como se presenta en el Producto 2 “Revisión de datos de amenazas geológicas y recomendaciones para aplicar en la evaluación del riesgo”, el modelo seleccionado fue el desarrollado por Nadim et al. (2023) e implementado por INGENIAR a nivel mundial en el marco del proyecto *Global Infrastructure Resilience Index* (GIRI) de la *Coalition for Disaster Resilience Infrastructure* (CDRI). Este modelo de amenaza por deslizamientos es metodológicamente consistente con lo requerido para la modelación del riesgo, es decir, da cuenta de la susceptibilidad a los deslizamientos y provee umbrales detonantes apropiados para la evaluación de la amenaza con un enfoque probabilista.

El modelo GIRI-CDRI cumple entonces con lo mínimo requerido para adelantar una modelación probabilista de la amenaza. No obstante, dada su relativa baja resolución, se requiere un proceso de reducción de escala que permita aplicarlo en el contexto de la evaluación del riesgo para el cantón de Heredia.

#### 4.1 Modelo de susceptibilidad GIRI-CDRI

El modelo de susceptibilidad GIRI-CDRI de deslizamientos cubre todo el territorio de Costa Rica, por medio de un mosaico de 4 mallas rectangulares de 5x5 grados, con resolución espacial de 90 metros, en las cuales se clasifica la susceptibilidad de las laderas del país en 5 categorías, haciendo uso del método de Mora-Vahrson (1994). En cada pixel se estima la susceptibilidad a los deslizamientos, como la probabilidad anual de ocurrencia de un evento de deslizamiento de tierra potencialmente destructivo, considerando como factores de susceptibilidad la pendiente topográfica, litología, cobertura vegetal y humedad del suelo.

La susceptibilidad puede ser interpretada como una *probabilidad intrínseca* de las laderas a deslizarse. Este resultado solo corresponde a la susceptibilidad y, por lo tanto, no indica la probabilidad real de ocurrencia de los deslizamientos, dado que aún no incorpora los eventos detonantes. El mapa de susceptibilidad obtenido de GIRI CDRI para Costa Rica se presenta en la Figura 21.

Las categorías de susceptibilidad empleadas son 5, desde 1 = susceptibilidad muy baja a deslizamientos de tierra hasta 5 = susceptibilidad muy alta. Estas clases corresponden a una clasificación sobre valores de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, cuya definición requiere incluir rangos de intensidad de los fenómenos detonantes, como se describe a continuación.

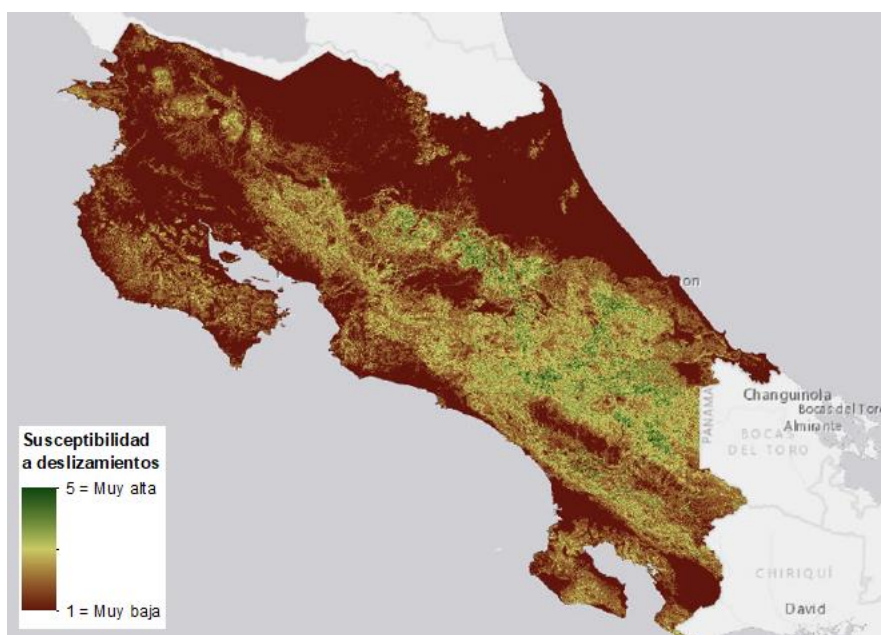


Figura 21. Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de Costa Rica del proyecto CDRI-GIRI liderado por INGENIAR

#### 4.2 Modelo de umbrales detonantes GIRI-CDRI

El modelo de umbrales considerado en GIRI-CDRI, como se describe en Palau et al., 2022, es un modelo simplificado que correlaciona las categorías de susceptibilidad con niveles de intensidad de los fenómenos detonantes, para establecer una probabilidad de deslizamiento correspondiente. En ese sentido, es una extensión del modelo de susceptibilidad, en el cual se asigna una probabilidad de ocurrencia del fenómeno ante diferentes valores de intensidad de la amenaza detonante.

La Tabla 5 muestra las probabilidades de deslizamiento según GIRI-CDRI, dadas como función de la precipitación estandarizada de 24 horas.

Tabla 5. Umbral lluvia-deslizamiento considerado

| Rango $P_n$          | Categoría susceptibilidad |         |         |         |         |
|----------------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                      | Susc. 1                   | Susc. 2 | Susc. 3 | Susc. 4 | Susc. 5 |
| $P_n < 0.3$          | 0%                        | 0%      | 0%      | 0%      | 0%      |
| $0.3 \leq P_n < 2.0$ | 0%                        | 1%      | 2%      | 3%      | 5%      |
| $2.0 \leq P_n < 3.7$ | 0%                        | 2%      | 3%      | 5%      | 10%     |
| $3.7 \leq P_n < 5.0$ | 0%                        | 3%      | 5%      | 10%     | 15%     |
| $P_n > 5.0$          | 0%                        | 5%      | 10%     | 15%     | 20%     |

En el caso del detonante sísmico, se emplea una clasificación similar, pero en función de la aceleración máxima del terreno, o PGA, la cual se relaciona con las categorías de susceptibilidad para indicar una probabilidad de ocurrencia de deslizamiento detonado por sismo. Este umbral se presenta en la Tabla 6. PGA se expresa como fracción de la aceleración de la gravedad.

Tabla 6. Umbral aceleración-deslizamiento considerado

| Rango $PGA$              | Categoría susceptibilidad |         |         |         |         |
|--------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                          | Susc. 1                   | Susc. 2 | Susc. 3 | Susc. 4 | Susc. 5 |
| $0.05g \leq PGA < 0.15g$ | 0%                        | 0%      | 0%      | 0.1%    | 0.5%    |
| $0.15g \leq PGA < 0.25g$ | 0%                        | 0%      | 0.1%    | 0.5%    | 1%      |
| $0.25g \leq PGA < 0.35g$ | 0%                        | 0.1%    | 0.5%    | 1%      | 5%      |
| $0.35g \leq PGA < 0.45g$ | 0%                        | 0.5%    | 1%      | 5%      | 10%     |
| $PGA \geq 0.45g$         | 0%                        | 1%      | 5%      | 10%     | 40%     |

### 4.3 Reducción de escala para el caso de Heredia

Un modelo de susceptibilidad con resolución espacial de 90 metros puede resultar demasiado grueso en el contexto de una evaluación detallada, como es el caso del modelo de riesgo para el cantón de Heredia. Lo más apropiado en este caso es generar un nuevo modelo de susceptibilidad a la escala apropiada, en donde sea posible incorporar particularidades del terreno y condiciones de ocupación que no necesariamente captura el modelo global y que inciden en la susceptibilidad de las laderas. Sin embargo, el desarrollo de un modelo de esa naturaleza no está contemplado dentro del alcance de esta consultoría. Por lo tanto, se procedió a la aplicación de un proceso simplificado de reducción de escala por remuestreo de la susceptibilidad en función de la pendiente topográfica.

La topografía utilizada fue obtenida de EOS DATA ANALYTICS. Se trata de un modelo digital de elevación (DEM) con resolución espacial de 4.7 metros y elevación máxima al interior del cantón de 1166 m.s.n.m. El modelo digital de elevación se consultó para la totalidad del cantón de Heredia, para efectos de visualización en la Figura 22 presenta el DEM para la zona urbana del Cantón de Heredia.

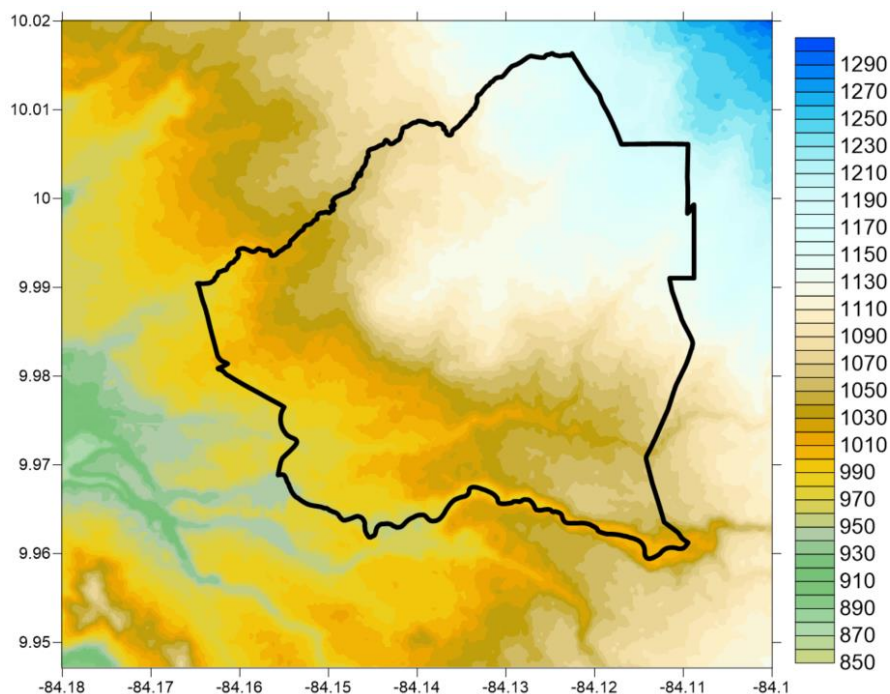


Figura 22. Modelo digital de elevación con resolución espacial de 4.7 metros para Heredia

A partir de este DEM se obtuvieron las pendientes topográficas, con las cuales se reasignó el valor de susceptibilidad dentro de las 5 categorías definidas en el modelo GIRI-CDRI. El procedimiento de reasignación fue definido por el equipo consultor, de forma arbitraria, con base en su criterio y experiencia, de la siguiente manera:

$$Susc = \begin{cases} 1 & \text{si } s \leq 7^\circ \\ 2 & \text{si } 7^\circ < s \leq 20^\circ \\ 3 & \text{si } 20^\circ < s \leq 30^\circ \end{cases} \quad \text{Ecuación 10}$$

Al aplicar esta reasignación, se onbtiene el modelo de susceptibilidad mostrado en la

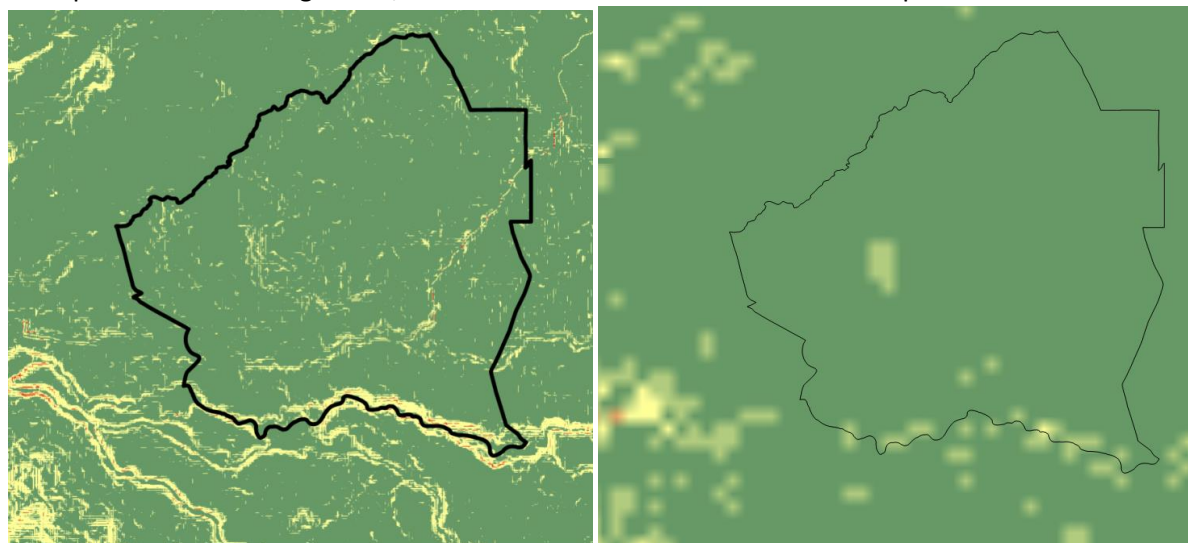


Figura 23. El modelo de umbrales se mantuvo igual al definido en GIRI-CDRI (Palau et al. 2022). Con fines

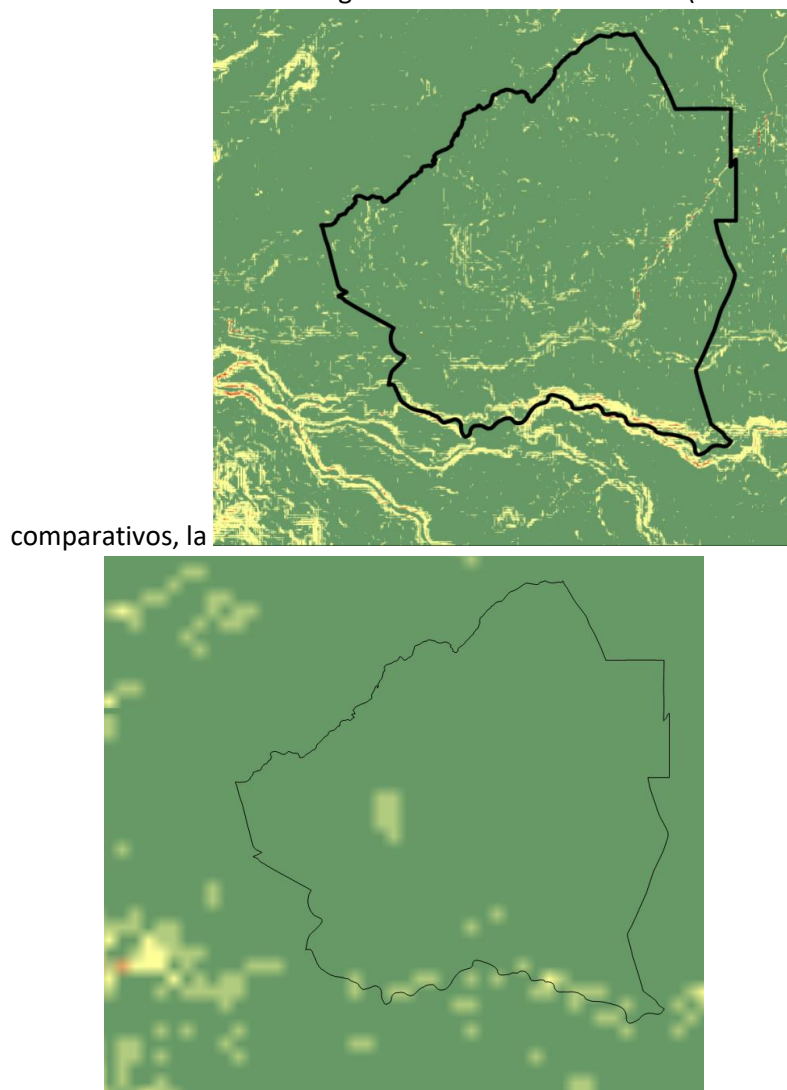


Figura 23 muestra también la susceptibilidad original en el modelo GIRI-CDRI a la resolución de ese conjunto de datos. Como puede observarse, la reclasificación coincide en los niveles de susceptibilidad (es decir, no se reportan niveles mayores a 3 en el modelo GIRI-CDRI), pero con una resolución acorde para la modelación del riesgo en menor escala.

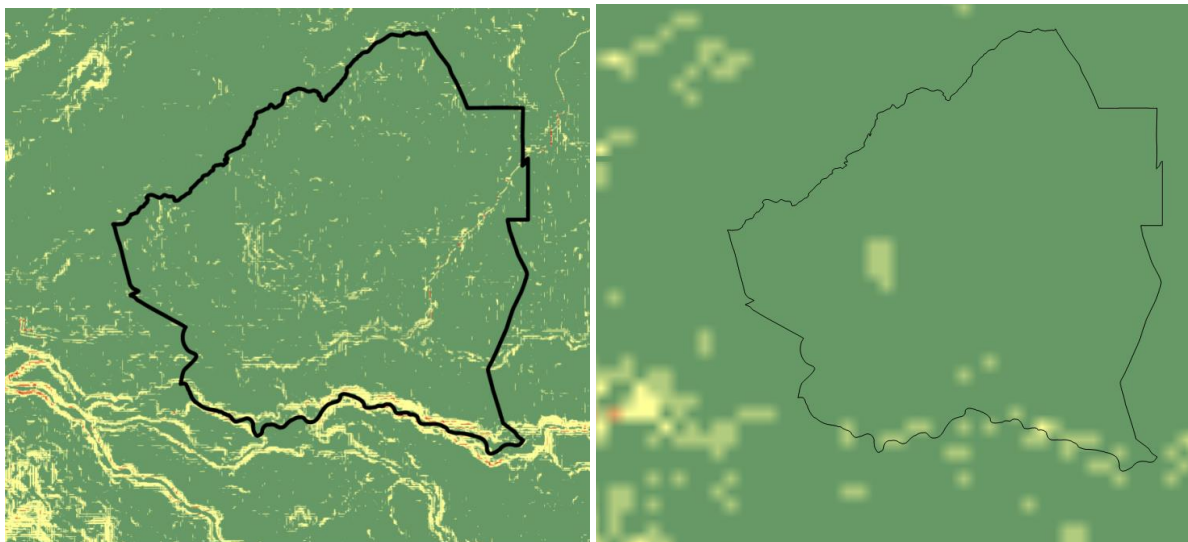


Figura 23. Izq.: Susceptibilidad a los deslizamientos en el Cantón de Heredia de escala reducida. Der.: Susceptibilidad según el modelo GIRI-CDRI. Verde = 1. Amarillo = 2. Rojo = 3

## 5 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación del riesgo en el portafolio de edificaciones e infraestructura crítica del cantón de Heredia, en términos de la Pérdida Anual Esperada (PAE) y la Pérdida Máxima Probable (PML), ante terremotos, inundaciones fluviales (por desbordamiento de ríos) y pluviales (por anegamiento del suelo), y deslizamientos detonados por terremotos y por lluvias intensas.

En el caso de la amenaza sísmica, así como de los deslizamientos detonados por sismo, los resultados se presentan como pérdidas no asociadas a ninguna condición climática. Sin embargo, en el caso de inundaciones (tanto fluviales como pluviales) y deslizamientos detonados por lluvias, es necesario incorporar el efecto del cambio climático, el cual modifica el forzamiento meteorológico causal y, por lo tanto, altera las métricas de riesgo. En el Producto 4 “Modelos de amenazas climáticas” de esta consultoría, pueden revisarse los detalles acerca de la modelación climática y la incorporación del cambio climático en estas amenazas. Se consideraron 3 modelos de circulación global, 4 trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero, y 3 años objetivo en el futuro, para un total de 36 posibles versiones del clima futuro. Los modelos, trayectorias de emisiones y años de proyección se resumen en la Tabla 7, incluyendo un nombre abreviado o resumido, mediante el cual se nombran los resultados asociados a estos climas en este documento.

Tabla 7. Climas futuros considerados para inundación fluvial, pluvial y deslizamientos detonados por lluvia y su abreviatura

| GCM       | Trayectoria | Año objetivo | Abreviatura  | GCM           | Trayectoria | Año objetivo | Abreviatura   |
|-----------|-------------|--------------|--------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
| EC-Earth3 | SSP1-2.6    | 2035         | EC-SSP1-35   | GFDL-ESM4     | SSP3-7.0    | 2050         | GFDL-SSP3-50  |
| EC-Earth3 | SSP2-4.5    | 2035         | EC-SSP2-35   | GFDL-ESM4     | SSP5-8.5    | 2050         | GFDL-SSP5-50  |
| EC-Earth3 | SSP3-7.0    | 2035         | EC-SSP3-35   | GFDL-ESM4     | SSP1-2.6    | 2100         | GFDL-SSP1-100 |
| EC-Earth3 | SSP5-8.5    | 2035         | EC-SSP5-35   | GFDL-ESM4     | SSP2-4.5    | 2100         | GFDL-SSP2-100 |
| EC-Earth3 | SSP1-2.6    | 2050         | EC-SSP1-50   | GFDL-ESM4     | SSP3-7.0    | 2100         | GFDL-SSP3-100 |
| EC-Earth3 | SSP2-4.5    | 2050         | EC-SSP2-50   | GFDL-ESM4     | SSP5-8.5    | 2100         | GFDL-SSP5-100 |
| EC-Earth3 | SSP3-7.0    | 2050         | EC-SSP3-50   | MPI-ESM1-2-LR | SSP1-2.6    | 2035         | MPI-SSP1-35   |
| EC-Earth3 | SSP5-8.5    | 2050         | EC-SSP5-50   | MPI-ESM1-2-LR | SSP2-4.5    | 2035         | MPI-SSP2-35   |
| EC-Earth3 | SSP1-2.6    | 2100         | EC-SSP1-100  | MPI-ESM1-2-LR | SSP3-7.0    | 2035         | MPI-SSP3-35   |
| EC-Earth3 | SSP2-4.5    | 2100         | EC-SSP2-100  | MPI-ESM1-2-LR | SSP5-8.5    | 2035         | MPI-SSP5-35   |
| EC-Earth3 | SSP3-7.0    | 2100         | EC-SSP3-100  | MPI-ESM1-2-LR | SSP1-2.6    | 2050         | MPI-SSP1-50   |
| EC-Earth3 | SSP5-8.5    | 2100         | EC-SSP5-100  | MPI-ESM1-2-LR | SSP2-4.5    | 2050         | MPI-SSP2-50   |
| GFDL-ESM4 | SSP1-2.6    | 2035         | GFDL-SSP1-35 | MPI-ESM1-2-LR | SSP3-7.0    | 2050         | MPI-SSP3-50   |
| GFDL-ESM4 | SSP2-4.5    | 2035         | GFDL-SSP2-35 | MPI-ESM1-2-LR | SSP5-8.5    | 2050         | MPI-SSP5-50   |
| GFDL-ESM4 | SSP3-7.0    | 2035         | GFDL-SSP3-35 | MPI-ESM1-2-LR | SSP1-2.6    | 2100         | MPI-SSP1-100  |
| GFDL-ESM4 | SSP5-8.5    | 2035         | GFDL-SSP5-35 | MPI-ESM1-2-LR | SSP2-4.5    | 2100         | MPI-SSP2-100  |
| GFDL-ESM4 | SSP1-2.6    | 2050         | GFDL-SSP1-50 | MPI-ESM1-2-LR | SSP3-7.0    | 2100         | MPI-SSP3-100  |
| GFDL-ESM4 | SSP2-4.5    | 2050         | GFDL-SSP2-50 | MPI-ESM1-2-LR | SSP5-8.5    | 2100         | MPI-SSP5-100  |

### 5.1 Portafolio de edificaciones

#### 5.1.1 Pérdida Anual Esperada (PAE)

La Tabla 8 presenta el listado completo de las PAE para todo el portafolio de edificaciones en el cantón de Heredia. Se presenta los valores de PAE por amenaza, tanto en valor monetario absoluto (en colones

costarricenses), como en términos relativos con respecto al valor expuesto total del portafolio, valores que se presentan al millar (%). Para referencia del lector, el valor total expuesto de este portafolio edificaciones es de ₡ 2,2 billones (aproximadamente USD 4,426 millones<sup>6</sup>).

Como se mencionó anteriormente, la PAE corresponde al valor medio de las pérdidas anuales. Es decir, se trata del valor anual de compensación que se requeriría para igualar las pérdidas acumuladas por eventos en el largo plazo. Por ejemplo, en el caso de la *inundación fluvial* para el *clima base*<sup>7</sup>, la PAE absoluta es de ₡ 1,613 millones. Esto significa que, si fuera posible pagar en base anual todas las pérdidas en las edificaciones del cantón de Heredia por inundaciones fluviales, bajo el clima actual, el valor anual de pago correspondería a ese monto. Esa pérdida anual, comparada con el valor expuesto total del portafolio, corresponde a 0.739 ‰, lo que significa que, de cada ₡ 1,000 de valor en el portafolio de edificaciones, se pierden en promedio 0.739 (aproximadamente 1) cada año. Este indicador relativo permite dimensionar el monto de la pérdida dentro del tamaño real del portafolio. Para referencia del lector, una PAE de 1‰ se encuentra en el límite de lo que típicamente el mercado asegurador considera como “asegurable”. Los resultados encontrados se encuentran dentro de lo razonable y esperado para este tipo de fenómenos y el portafolio de edificaciones.

Tabla 8. Pérdida anual esperada por amenaza y clima. Valores en millones de colones costarricenses (CRC)

| Amenaza            | Clima        | PAE (CRC) | PAE (‰) | Amenaza                | Clima         | PAE (CRC) | PAE (‰) |
|--------------------|--------------|-----------|---------|------------------------|---------------|-----------|---------|
| Sismo              |              | 4,459     | 2.043   | Inundación pluvial     | GFDL-SSP3-50  | 330       | 0.151   |
| Inundación fluvial | Clima base   | 1,613     | 0.739   | Inundación pluvial     | GFDL-SSP5-50  | 336       | 0.154   |
| Inundación fluvial | EC-SSP1-35   | 1,569     | 0.719   | Inundación pluvial     | MPI-SSP1-50   | 397       | 0.182   |
| Inundación fluvial | EC-SSP2-35   | 1,527     | 0.700   | Inundación pluvial     | MPI-SSP2-50   | 464       | 0.213   |
| Inundación fluvial | EC-SSP3-35   | 1,511     | 0.692   | Inundación pluvial     | MPI-SSP3-50   | 448       | 0.205   |
| Inundación fluvial | EC-SSP5-35   | 1,531     | 0.702   | Inundación pluvial     | MPI-SSP5-50   | 375       | 0.172   |
| Inundación fluvial | GFDL-SSP1-35 | 1,636     | 0.750   | Inundación pluvial     | EC-SSP1-100   | 345       | 0.158   |
| Inundación fluvial | GFDL-SSP2-35 | 1,580     | 0.724   | Inundación pluvial     | EC-SSP2-100   | 330       | 0.151   |
| Inundación fluvial | GFDL-SSP3-35 | 1,557     | 0.714   | Inundación pluvial     | EC-SSP3-100   | 322       | 0.148   |
| Inundación fluvial | GFDL-SSP5-35 | 1,567     | 0.718   | Inundación pluvial     | EC-SSP5-100   | 317       | 0.145   |
| Inundación fluvial | MPI-SSP1-35  | 1,771     | 0.812   | Inundación pluvial     | GFDL-SSP1-100 | 356       | 0.163   |
| Inundación fluvial | MPI-SSP2-35  | 1,893     | 0.868   | Inundación pluvial     | GFDL-SSP2-100 | 343       | 0.157   |
| Inundación fluvial | MPI-SSP3-35  | 1,822     | 0.835   | Inundación pluvial     | GFDL-SSP3-100 | 303       | 0.139   |
| Inundación fluvial | MPI-SSP5-35  | 1,751     | 0.803   | Inundación pluvial     | GFDL-SSP5-100 | 296       | 0.136   |
| Inundación fluvial | EC-SSP1-50   | 1,553     | 0.711   | Inundación pluvial     | MPI-SSP1-100  | 432       | 0.198   |
| Inundación fluvial | EC-SSP2-50   | 1,546     | 0.709   | Inundación pluvial     | MPI-SSP2-100  | 394       | 0.181   |
| Inundación fluvial | EC-SSP3-50   | 1,491     | 0.683   | Inundación pluvial     | MPI-SSP3-100  | 392       | 0.180   |
| Inundación fluvial | EC-SSP5-50   | 1,495     | 0.685   | Inundación pluvial     | MPI-SSP5-100  | 432       | 0.198   |
| Inundación fluvial | GFDL-SSP1-50 | 1,598     | 0.732   | Deslizamiento - Sismo  |               | 59        | 0.027   |
| Inundación fluvial | GFDL-SSP2-50 | 1,562     | 0.716   | Deslizamiento - Lluvia | Clima base    | 250       | 0.114   |
| Inundación fluvial | GFDL-SSP3-50 | 1,482     | 0.679   | Deslizamiento - Lluvia | EC-SSP1-35    | 247       | 0.113   |
| Inundación fluvial | GFDL-SSP5-50 | 1,512     | 0.693   | Deslizamiento - Lluvia | EC-SSP2-35    | 256       | 0.117   |
| Inundación fluvial | MPI-SSP1-50  | 1,786     | 0.818   | Deslizamiento - Lluvia | EC-SSP3-35    | 257       | 0.118   |
| Inundación fluvial | MPI-SSP2-50  | 2,087     | 0.956   | Deslizamiento - Lluvia | EC-SSP5-35    | 264       | 0.121   |
| Inundación fluvial | MPI-SSP3-50  | 2,014     | 0.923   | Deslizamiento - Lluvia | GFDL-SSP1-35  | 264       | 0.121   |
| Inundación fluvial | MPI-SSP5-50  | 1,686     | 0.773   | Deslizamiento - Lluvia | GFDL-SSP2-35  | 262       | 0.120   |
| Inundación fluvial | EC-SSP1-100  | 1,549     | 0.710   | Deslizamiento - Lluvia | GFDL-SSP3-35  | 261       | 0.120   |

<sup>6</sup> Valor calculado con una tasa de cambio promedio del mes de diciembre de 2025 correspondiente a 490 colones por dólar.

<sup>7</sup> El clima base corresponde al clima observado en el periodo histórico de control 1990-2020.

| Amenaza            | Clima         | PAE (CRC) | PAE (%) |
|--------------------|---------------|-----------|---------|
| Inundación fluvial | EC-SSP2-100   | 1,483     | 0.679   |
| Inundación fluvial | EC-SSP3-100   | 1,448     | 0.664   |
| Inundación fluvial | EC-SSP5-100   | 1,425     | 0.653   |
| Inundación fluvial | GFDL-SSP1-100 | 1,599     | 0.733   |
| Inundación fluvial | GFDL-SSP2-100 | 1,543     | 0.707   |
| Inundación fluvial | GFDL-SSP3-100 | 1,363     | 0.624   |
| Inundación fluvial | GFDL-SSP5-100 | 1,330     | 0.609   |
| Inundación fluvial | MPI-SSP1-100  | 1,940     | 0.889   |
| Inundación fluvial | MPI-SSP2-100  | 1,771     | 0.812   |
| Inundación fluvial | MPI-SSP3-100  | 1,761     | 0.807   |
| Inundación fluvial | MPI-SSP5-100  | 1,940     | 0.889   |
| Inundación pluvial | Clima base    | 359       | 0.164   |
| Inundación pluvial | EC-SSP1-35    | 349       | 0.160   |
| Inundación pluvial | EC-SSP2-35    | 340       | 0.156   |
| Inundación pluvial | EC-SSP3-35    | 336       | 0.154   |
| Inundación pluvial | EC-SSP5-35    | 341       | 0.156   |
| Inundación pluvial | GFDL-SSP1-35  | 364       | 0.167   |
| Inundación pluvial | GFDL-SSP2-35  | 351       | 0.161   |
| Inundación pluvial | GFDL-SSP3-35  | 347       | 0.159   |
| Inundación pluvial | GFDL-SSP5-35  | 349       | 0.160   |
| Inundación pluvial | MPI-SSP1-35   | 394       | 0.181   |
| Inundación pluvial | MPI-SSP2-35   | 421       | 0.193   |
| Inundación pluvial | MPI-SSP3-35   | 405       | 0.186   |
| Inundación pluvial | MPI-SSP5-35   | 390       | 0.179   |
| Inundación pluvial | EC-SSP1-50    | 346       | 0.158   |
| Inundación pluvial | EC-SSP2-50    | 344       | 0.158   |
| Inundación pluvial | EC-SSP3-50    | 332       | 0.152   |
| Inundación pluvial | EC-SSP5-50    | 333       | 0.152   |
| Inundación pluvial | GFDL-SSP1-50  | 356       | 0.163   |
| Inundación pluvial | GFDL-SSP2-50  | 348       | 0.159   |

| Amenaza                | Clima         | PAE (CRC) | PAE (%) |
|------------------------|---------------|-----------|---------|
| Deslizamiento - Lluvia | GFDL-SSP5-35  | 250       | 0.115   |
| Deslizamiento - Lluvia | MPI-SSP1-35   | 240       | 0.110   |
| Deslizamiento - Lluvia | MPI-SSP2-35   | 245       | 0.112   |
| Deslizamiento - Lluvia | MPI-SSP3-35   | 254       | 0.116   |
| Deslizamiento - Lluvia | MPI-SSP5-35   | 250       | 0.115   |
| Deslizamiento - Lluvia | EC-SSP1-50    | 258       | 0.118   |
| Deslizamiento - Lluvia | EC-SSP2-50    | 265       | 0.121   |
| Deslizamiento - Lluvia | EC-SSP3-50    | 262       | 0.120   |
| Deslizamiento - Lluvia | EC-SSP5-50    | 249       | 0.114   |
| Deslizamiento - Lluvia | GFDL-SSP1-50  | 262       | 0.120   |
| Deslizamiento - Lluvia | GFDL-SSP2-50  | 268       | 0.123   |
| Deslizamiento - Lluvia | GFDL-SSP3-50  | 256       | 0.117   |
| Deslizamiento - Lluvia | GFDL-SSP5-50  | 241       | 0.111   |
| Deslizamiento - Lluvia | MPI-SSP1-50   | 254       | 0.117   |
| Deslizamiento - Lluvia | MPI-SSP2-50   | 235       | 0.108   |
| Deslizamiento - Lluvia | MPI-SSP3-50   | 229       | 0.105   |
| Deslizamiento - Lluvia | MPI-SSP5-50   | 221       | 0.101   |
| Deslizamiento - Lluvia | EC-SSP1-100   | 231       | 0.106   |
| Deslizamiento - Lluvia | EC-SSP2-100   | 257       | 0.118   |
| Deslizamiento - Lluvia | EC-SSP3-100   | 270       | 0.124   |
| Deslizamiento - Lluvia | EC-SSP5-100   | 265       | 0.121   |
| Deslizamiento - Lluvia | GFDL-SSP1-100 | 206       | 0.094   |
| Deslizamiento - Lluvia | GFDL-SSP2-100 | 271       | 0.124   |
| Deslizamiento - Lluvia | GFDL-SSP3-100 | 251       | 0.115   |
| Deslizamiento - Lluvia | GFDL-SSP5-100 | 264       | 0.121   |
| Deslizamiento - Lluvia | MPI-SSP1-100  | 206       | 0.094   |
| Deslizamiento - Lluvia | MPI-SSP2-100  | 191       | 0.087   |
| Deslizamiento - Lluvia | MPI-SSP3-100  | 248       | 0.113   |
| Deslizamiento - Lluvia | MPI-SSP5-100  | 153       | 0.070   |

La Figura 24 presenta de manera gráfica las PAE relativas para todas las amenazas, pero mostrando únicamente los climas base y aquellos que causan mayores y menores pérdidas a nivel de todo el portafolio, para cada año de proyección, para las amenazas sensibles al clima. Se aprecia en la Figura 24, que la amenaza que produce las mayores PAE a nivel de todo el portafolio es el sismo, con una PAE de 2.04‰ con respecto al valor expuesto total. Le sigue la amenaza por inundación fluvial, con valores alrededor de un 55% menores al sismo. Finalmente, la inundación pluvial, así como los deslizamientos detonados por sismos y por lluvias, presentan valores de PAE relativamente bajos.

Estos resultados confirman la altísima relevancia del riesgo sísmico para el cantón de Heredia, condición que es esperada dada la ubicación del cantón en el país, así como las condiciones de exposición y vulnerabilidad de sus edificaciones. Por otra parte, la inundación fluvial juega también un papel significativo en el perfil de pérdidas, con variaciones en algunos casos notables por cuenta del cambio climático. La red de drenaje conformada por los ríos que atraviesan la ciudad genera condiciones significativas de riesgo, en conjunción con la vulnerabilidad a inundaciones de las edificaciones. Este resultado puede incluso ser aún más relevante al considerar que se trata de cuencas altamente intervenidas, con mínimo o nulo mantenimiento de cauces, en donde son comunes los problemas de obstrucción por basuras o desechos, que saturan la capacidad de los canales.

Finalmente, las inundaciones pluviales y los deslizamientos, tanto detonados por sismo como por lluvia, juegan un papel marginal en el riesgo de edificaciones de Heredia. Se trata de amenazas o con una muy baja probabilidad de ocurrencia (como es el caso de los deslizamientos por sismo) o con muy bajas intensidades (caso de la inundación pluvial), y pueden considerarse despreciables en comparación.

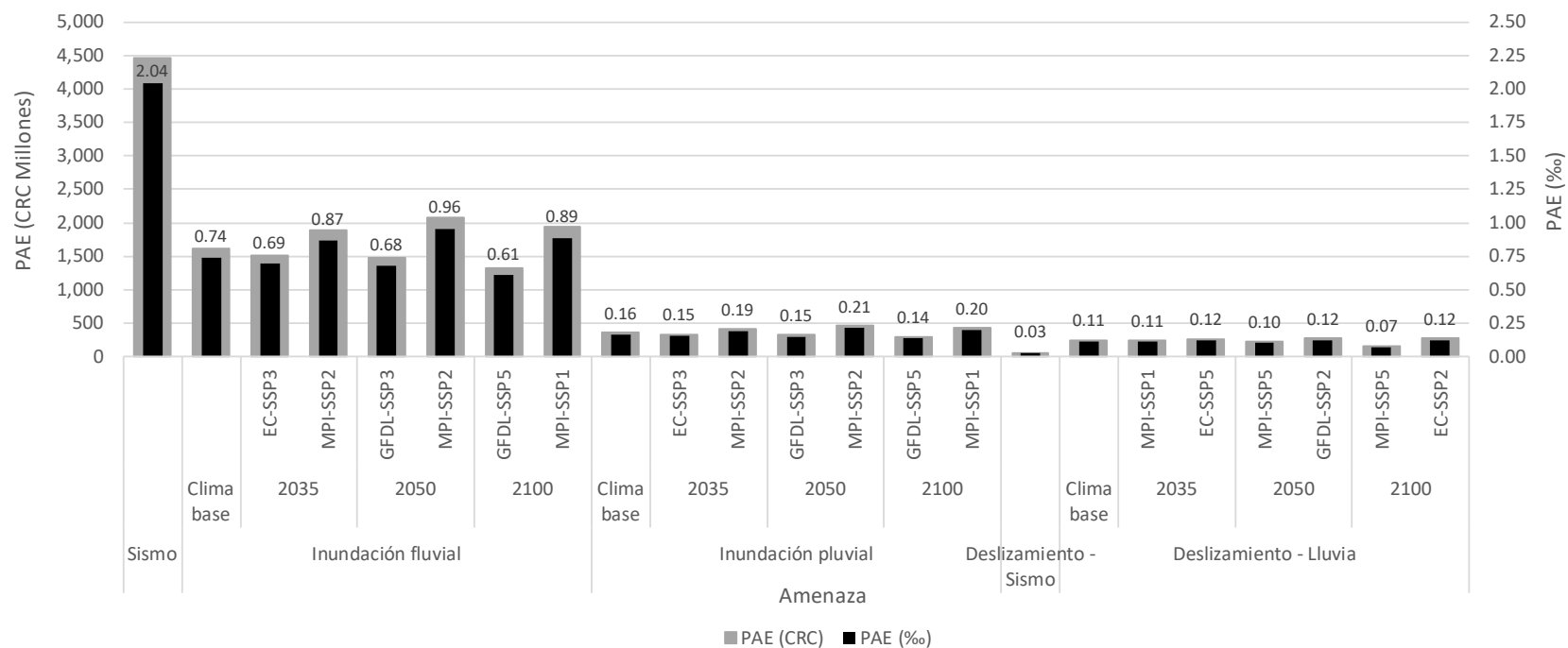


Figura 24. Pérdida anual esperada por amenaza

Como se explicó anteriormente, si bien la Figura 24 presenta la totalidad de resultados para las amenazas de sismo, inundación y deslizamiento, solamente se presentan los resultados para clima base y 3 climas futuros en el caso de las inundaciones fluvial, pluvial y deslizamientos detonados por lluvia. Esto con el objetivo de no saturar el gráfico. No obstante, conviene ver el consolidado de PAE totales para estas amenazas, incluyendo la totalidad de climas con los cuales fueron evaluadas. La Figura 25 muestra el valor de la PAE como función del tiempo. Cada línea en la Figura 25 corresponde a una proyección climática diferente, es decir, una combinación de modelo GCM y trayectoria de emisiones. De esta manera, es posible ver la evolución temporal del riesgo de inundación y deslizamiento detonado por lluvia, al considerar diferentes modelos climáticos. La Figura 26 presenta la misma información para la inundación pluvial y la Figura 27 para deslizamientos detonados por lluvia.

Como se observa, si bien las fluctuaciones en el valor de la PAE son variables entre los años considerados, esas variaciones no siguen un patrón creciente en el tiempo, ni con respecto a las trayectorias de emisiones. Es decir, el riesgo no crece con mayores emisiones, ni necesariamente aumenta hacia el futuro. Esto es un comportamiento absolutamente normal y esperado, pues la relación entre emisiones de gases de efecto invernadero y riesgo, es altamente no lineal. Más emisiones no necesariamente implican más riesgo. Depende de las condiciones específicas de las amenazas, la exposición y la vulnerabilidad, que median en la manifestación de las pérdidas por fenómenos hidrometeorológicos para cada condición climática estudiada.

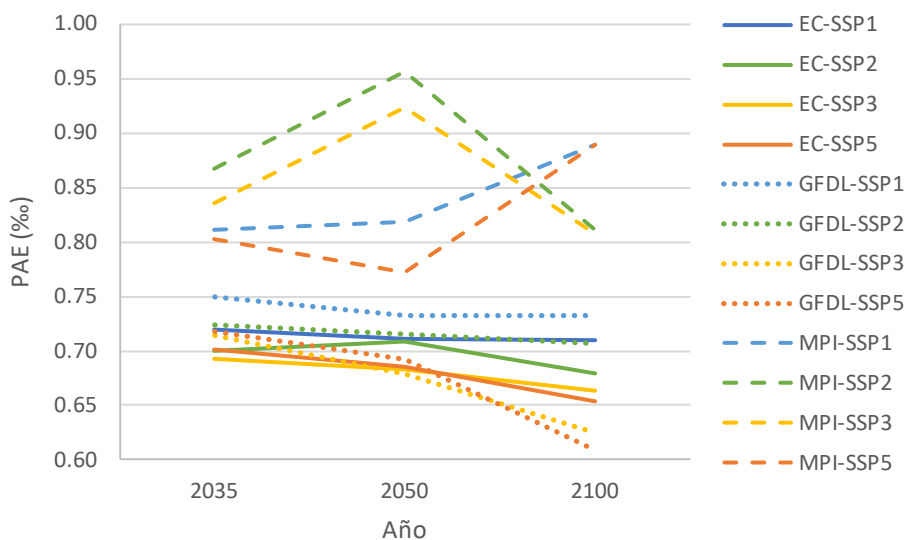


Figura 25. Pérdida anual esperada por inundación fluvial para los escenarios de cambio climático considerados

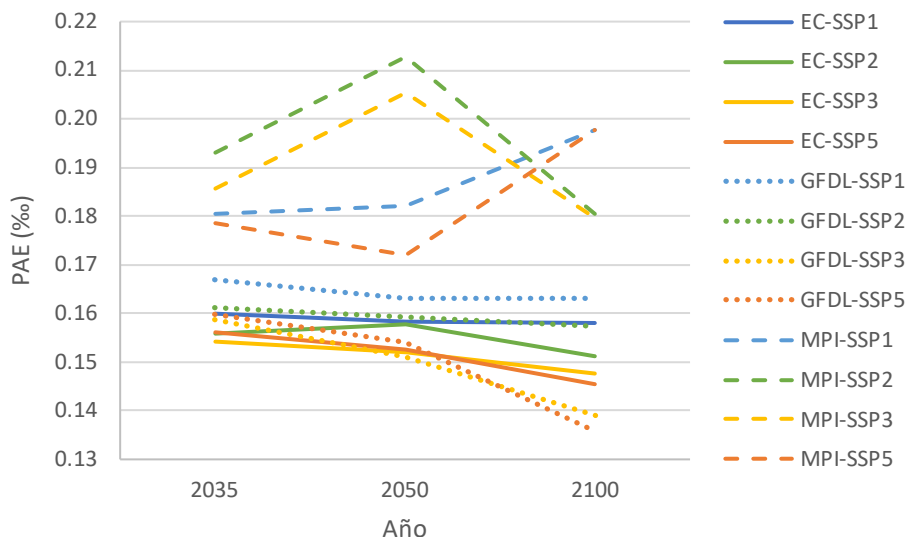


Figura 26. Pérdida anual esperada por inundación pluvial para los escenarios de cambio climático considerados

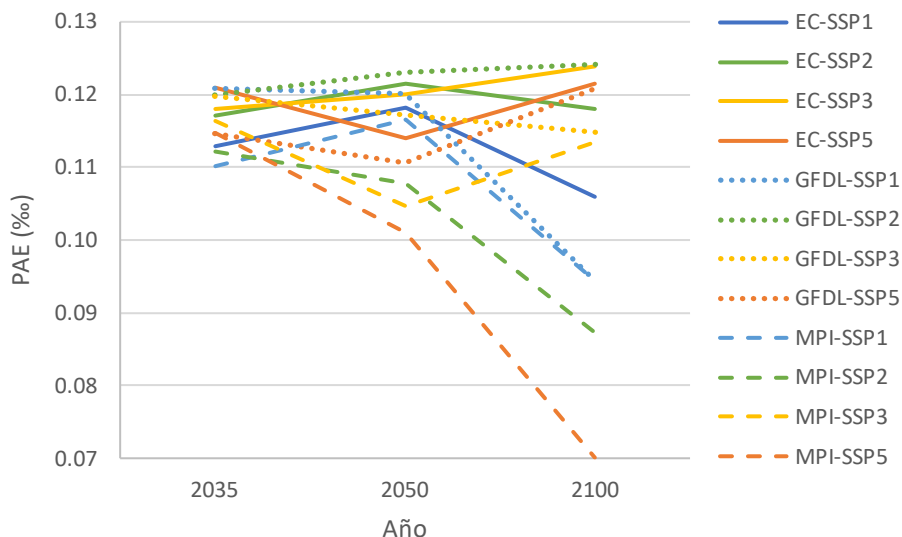


Figura 27. Pérdida anual esperada por deslizamiento detonado por lluvia para los escenarios de cambio climático considerados

La Figura 25, Figura 26 y Figura 27 ilustran la altísima incertidumbre propia de las modelaciones de riesgo que incorporan proyecciones de cambio climático. Cada una de las líneas mostradas, es una posible trayectoria de cambio en el riesgo. Sin embargo, es imposible saber cuál de ellas se manifestará en el futuro, o incluso si el riesgo real al 2035, 2050 y 2100, no está siquiera dentro del conjunto de proyecciones estudiado. A esto se le conoce como incertidumbre profunda, como se define en la sección 5.5 del Informe de Inicio. Al darle un tratamiento al riesgo bajo incertidumbre profunda, las métricas puntuales, como la PAE, se transforman en métricas de intervalo, es decir, son de naturaleza imprecisa.

En las métricas de riesgo imprecisas, no es posible establecer una distribución al interior del intervalo de variación de la métrica, sino únicamente los límites del intervalo. Como se observa en la Figura 25, Figura 26 y Figura 27, los límites máximo y mínimo de PAE, causados para cada año de proyección por combinaciones diferentes de modelo GCM y trayectoria de emisiones, representan los límites de la métrica para esos años. Estos límites caracterizan el intervalo de variación de la PAE, y como dicho intervalo cambia en el tiempo futuro, de acuerdo con la evolución de la concentración de gases de efecto invernadero, en las múltiples trayectorias consideradas.

En el caso de la inundación, tanto fluvial como pluvial, se observa que la variación temporal de la PAE del portafolio de edificios de Heredia ante inundación presenta comportamientos diferenciados tanto por modelo de circulación global como por trayectoria de emisiones. En el caso del modelo EC, las curvas muestran una tendencia general suavemente decreciente a lo largo del tiempo para todos los escenarios SSP, con reducciones graduales desde 2035 hasta 2100, más marcadas en los escenarios de mayores emisiones (SSP3 y SSP5), lo que sugiere una disminución progresiva de la pérdida anual esperada bajo las proyecciones hidrológicas asociadas a este modelo. Para el modelo GFDL, la PAE se mantiene relativamente estable en los escenarios SSP1 y SSP2, con variaciones menores en el tiempo, mientras que en SSP3 y SSP5 se aprecia una disminución más pronunciada hacia 2100, indicando una mayor sensibilidad del resultado a trayectorias de emisiones altas en horizontes temporales largos. En contraste, el modelo MPI presenta una evolución no monótona: en SSP2 y SSP3 se observa un incremento de la PAE desde 2035 hasta 2050, seguido de una reducción hacia 2100, mientras que en SSP1 y SSP5 la PAE tiende a incrementarse hacia finales de siglo, alcanzando valores comparables o superiores a los de mediados de siglo. En conjunto, la comparación entre modelos evidencia que la señal temporal de la PAE no es uniforme y que las diferencias entre modelos son, en varios casos, del mismo orden de magnitud que las diferencias entre escenarios de emisiones, reflejando la influencia combinada de la trayectoria climática asumida y de la respuesta hidrológica propia de cada modelo global.

En el caso de los deslizamientos detonados por lluvia, la variación temporal de la PAE presenta patrones distintos a los observados para inundación, con una mayor divergencia entre escenarios de emisiones a largo plazo. Para el modelo EC, las PAE tienden a incrementarse ligeramente desde 2035 hasta 2050 en la mayoría de los escenarios, seguidas por una estabilización o leve reducción hacia 2100, con diferencias relativamente acotadas entre SSP. El modelo GFDL muestra comportamientos contrastantes: mientras que la mayoría de los escenarios mantienen valores estables o levemente crecientes en el tiempo, el escenario SSP1, presenta reducciones pronunciadas hacia finales de siglo. El modelo MPI exhibe la mayor amplitud temporal, con disminuciones progresivas de la PAE en SSP2 y SSP5 hacia 2100, mientras que SSP3 muestra un incremento después de 2050. Estas diferencias entre modelos y entre escenarios de emisiones reflejan la alta sensibilidad del riesgo por deslizamientos a la representación de la precipitación extrema y de su evolución temporal en los modelos climáticos, así como a la forma en que dichas señales se traducen en la probabilidad de activación de inestabilidades de ladera.

### 5.1.2 Pérdida Máxima Probable (PML)

Como se menciona en la sección 2.3.2, las curvas de PML son una manera alternativa de presentar las curvas de excedencia de pérdidas. Es decir, se trata de representaciones completas del riesgo de portafolio, que incorporan tanto los eventos más recurrentes y de menores pérdidas relativas, hasta los

eventos catastróficos de muy baja frecuencia de ocurrencia. El formato de la curva de PML, en términos del periodo de retorno, permite una comunicación más sencilla del nivel de riesgo asociado a los eventos en todo el espectro de frecuencias de ocurrencia, es decir, desde eventos que ocurren muy frecuentemente, a eventos raros de baja probabilidad de ocurrencia.

La Figura 28 muestra las curvas de PML para todas las amenazas y climas considerados en esta evaluación. La PML se presenta en estos gráficos en forma relativa, como porcentaje del valor expuesto total. Esta curva ilustra el carácter creciente de la pérdida como función del periodo de retorno, es decir, como la pérdida crece para eventos de frecuencia cada vez menor. Es posible observar dos tipos de comportamiento generales en la PML: i) un tipo de curvas crecimiento lento en periodo de retorno, sin tendencia a la estabilización, típicas de amenazas como los sismos, y los deslizamientos, y ii) curvas de rápido crecimiento en periodos de retorno cortos, y con una clara estabilización, mostrando valores casi constantes para periodos de retorno largos, típicas de amenazas como las inundaciones fluviales y pluviales.

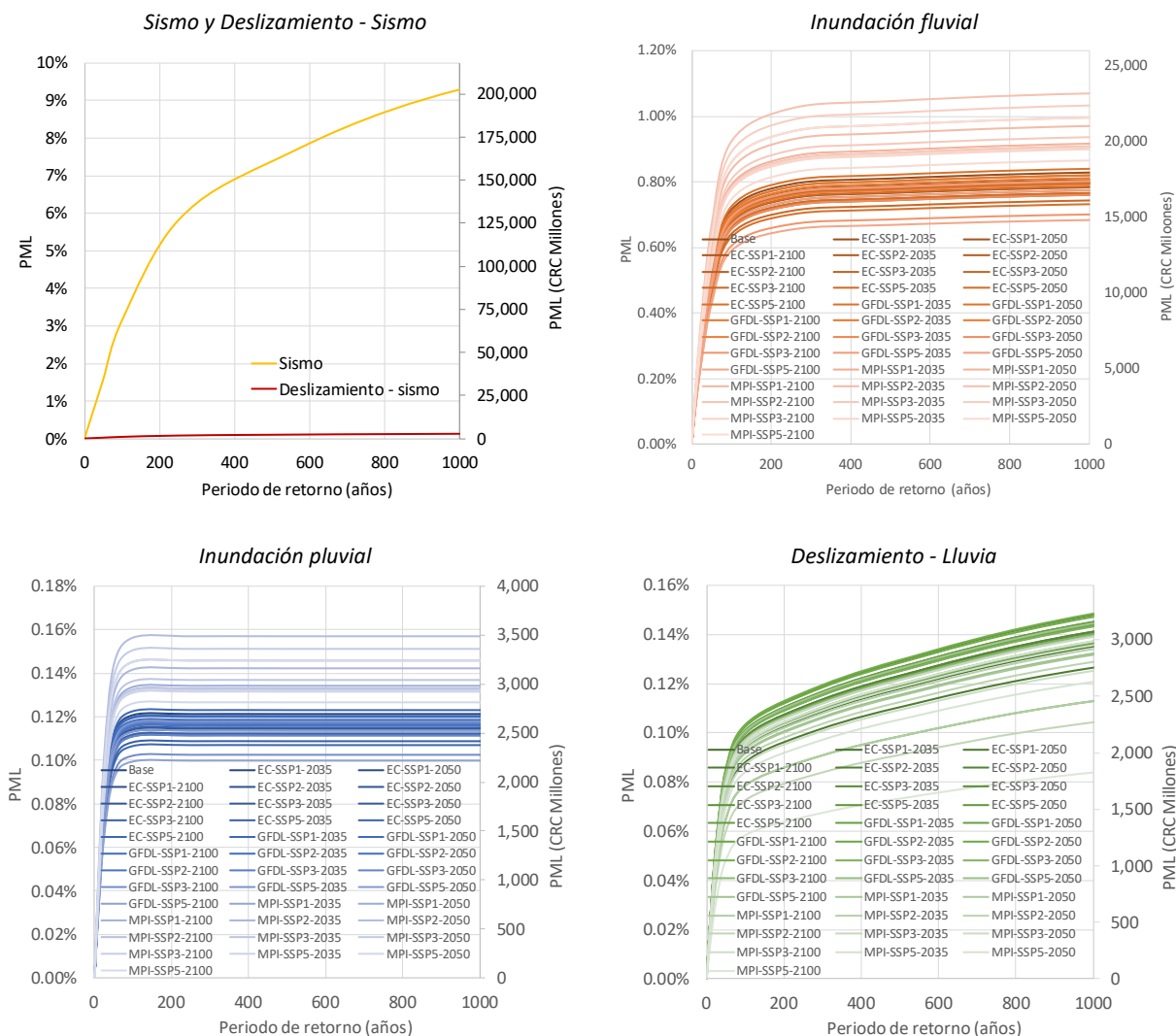


Figura 28. Curvas de PML para todas las amenazas consideradas y todos los climas

La Figura 29 muestra una comparación de las curvas de PML para todas las amenazas, pero mostrando únicamente los climas con mayores PAE en cada año futuro de proyección para las inundaciones fluvial y pluvial, y para los deslizamientos detonados por lluvias. Esto debido a que, al incluir en un único gráfico todos los resultados para los 36 climas futuros considerados para estas amenazas, no es posible una comparación apropiada.

La comparación de las PML ilustra el tipo de comportamiento de la curva, que, como se mencionó anteriormente, depende de la frecuencia de ocurrencia de los eventos. Es evidente que el sismo es la amenaza que produce los mayores PML para periodos de retorno largos, siendo muy superior a las demás amenazas. Esto lo que implica es que el terremoto tiene la capacidad de correlacionar pérdidas en múltiples ubicaciones, causando así grandes pérdidas acumuladas para eventos de baja frecuencia de ocurrencia (periodo de retorno largo). Así mismo, es posible observar como la inundación fluvial, en cualquiera de los climas, si bien no alcanza valores de pérdida tan altos para periodos de retorno largos como el sismo, es similar en periodos de retorno cortos. Es decir, que en lo que se refiere a eventos de relativa alta frecuencia, el riesgo por inundación fluvial es comparable al riesgo sísmico. Es importante hacer esta diferenciación pues las posibles medidas de reducción del riesgo con las cuales se busque limitar estos valores dentro del desarrollo de políticas públicas de gestión incidirán de forma diferenciada según el periodo de retorno de la pérdida.

Puede concluirse también, que, para periodos de retorno largos, la inundación pluvial genera pérdidas de monto similar a los deslizamientos, lo cual significa que eventos de estas amenazas, pueden ser de cuantías de pérdidas similares para las condiciones actuales de exposición y vulnerabilidad. No obstante, estas amenazas producen niveles de riesgo comparativamente menores y pueden considerarse como marginales desde una visión de portafolio.

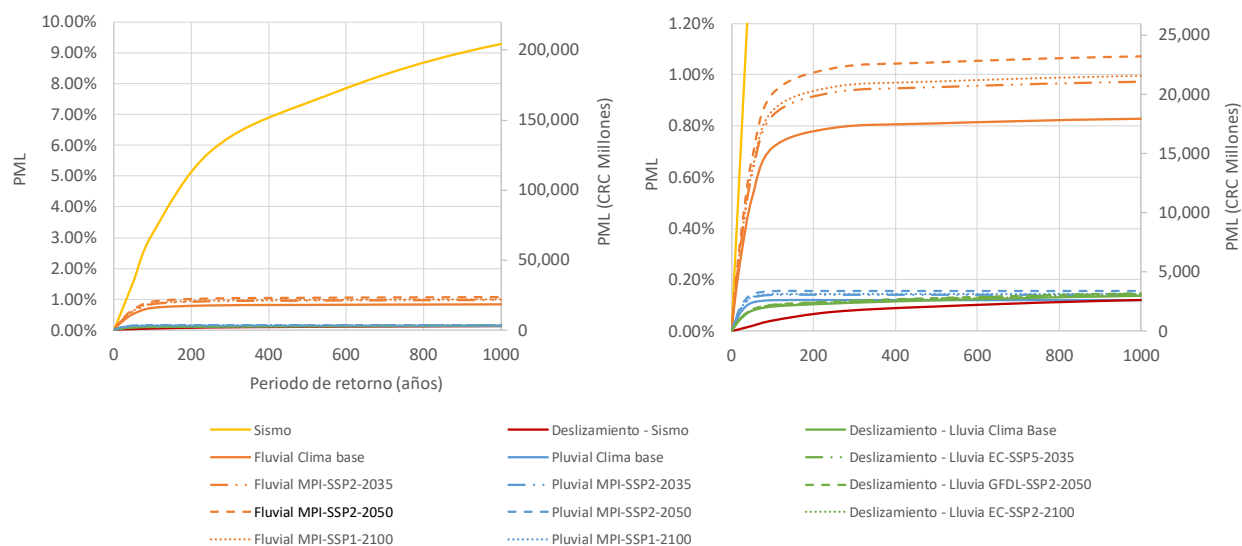


Figura 29. Imagen izquierda: comparación de curvas de PML para las amenazas consideradas y climas seleccionados, Imagen derecha: ampliación de la imagen izquierda

### 5.1.3 Resultados por ubicación

Los resultados presentados anteriormente son útiles para dimensionar el riesgo de las edificaciones en el cantón de Heredia, con una visión de portafolio, de cara a informar decisiones de gestión del riesgo a nivel sectorial, y son especialmente útiles para el diseño de instrumentos de protección financiera con los cuales se quiera proteger el portafolio completo. No obstante, los resultados a nivel de portafolio no ilustran lo que ocurre a nivel individual para cada edificación en términos del riesgo que enfrenta. Para cada una de las edificaciones incluidas en la base de exposición conformada (36,110 edificaciones), se evalúa el riesgo en términos de la PAE. Solo se presenta la PAE, debido a que es la única métrica de riesgo que es desagregable a nivel de ubicaciones individuales<sup>8</sup>.

Los mapas presentados en la Figura 30 a Figura 34, muestran la distribución espacial, a nivel del cantón, de la PAE (al millar, relativa al valor expuesto de cada edificación) para todas las edificaciones incluidas en la evaluación. Para una mejor visualización de la distribución de las pérdidas en el cantón, la selección de rangos de color difiere en cada figura según los niveles de pérdida máximos alcanzados para cada amenaza y buscando maximizar gráficamente las diferencias entre los rangos.

Con el fin de limitar la extensión de este documento, se presentan las PAE para todas las amenazas, pero solamente considerando clima base para las amenazas influenciadas por el clima. Sin embargo, la totalidad de resultados se incluyen en el *Dataset* del proyecto. Se muestra la ubicación de las edificaciones como el polígono que delimita el lote correspondiente.

---

<sup>8</sup> Si bien es posible desagregar matemáticamente la PML por ubicación, la incertidumbre en estas estimaciones es demasiado alta y, por lo tanto, no se realiza dicha desagregación. La PML de portafolio, por su parte, se beneficia de una reducción en la incertidumbre total como resultado de la ley de los grandes números, al agregar muchos elementos expuestos en un solo resultado. Por esta razón, la PML solo se reporta a nivel de portafolio.

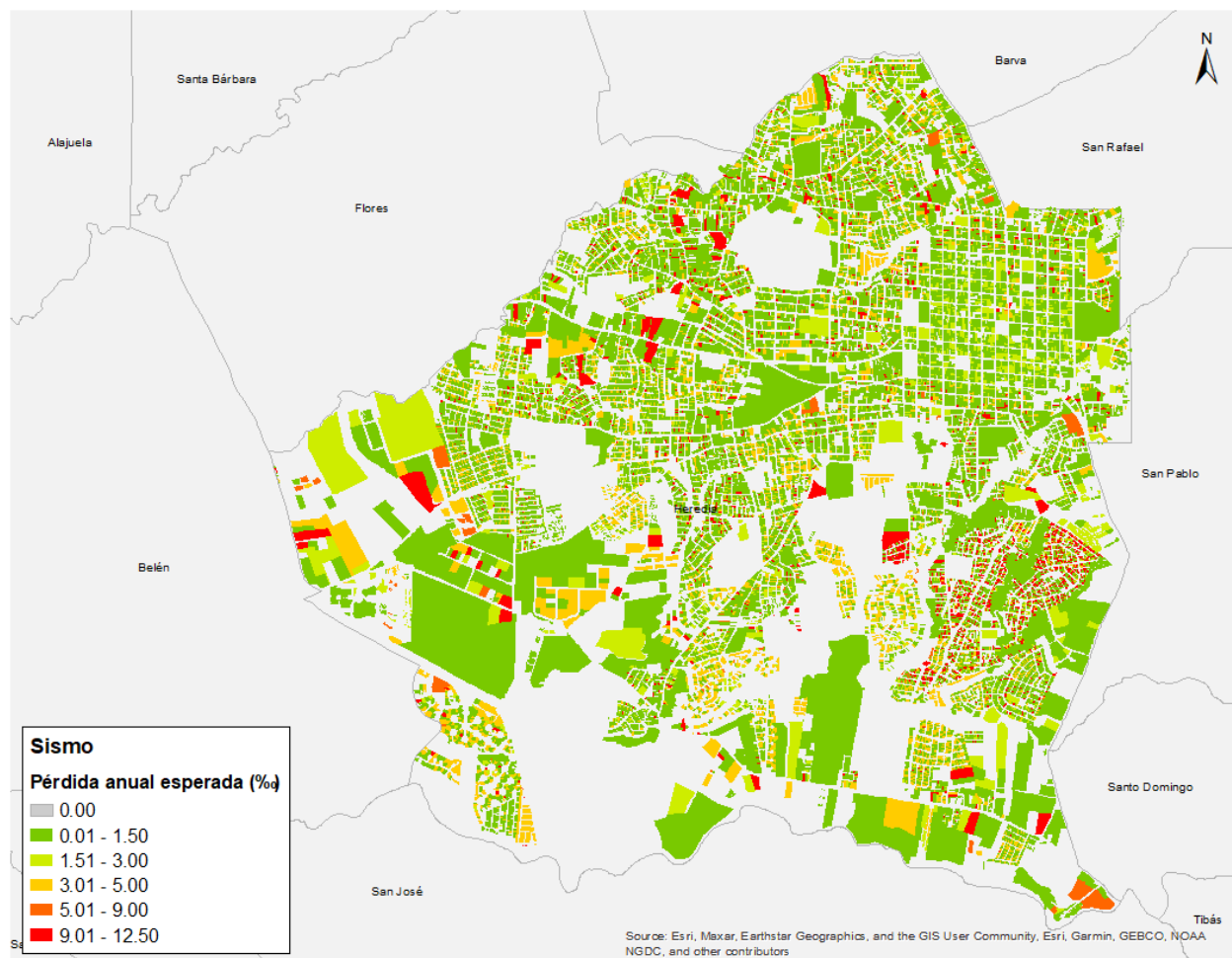


Figura 30. Pérdida anual esperada por sismo para edificaciones en el cantón de Heredia

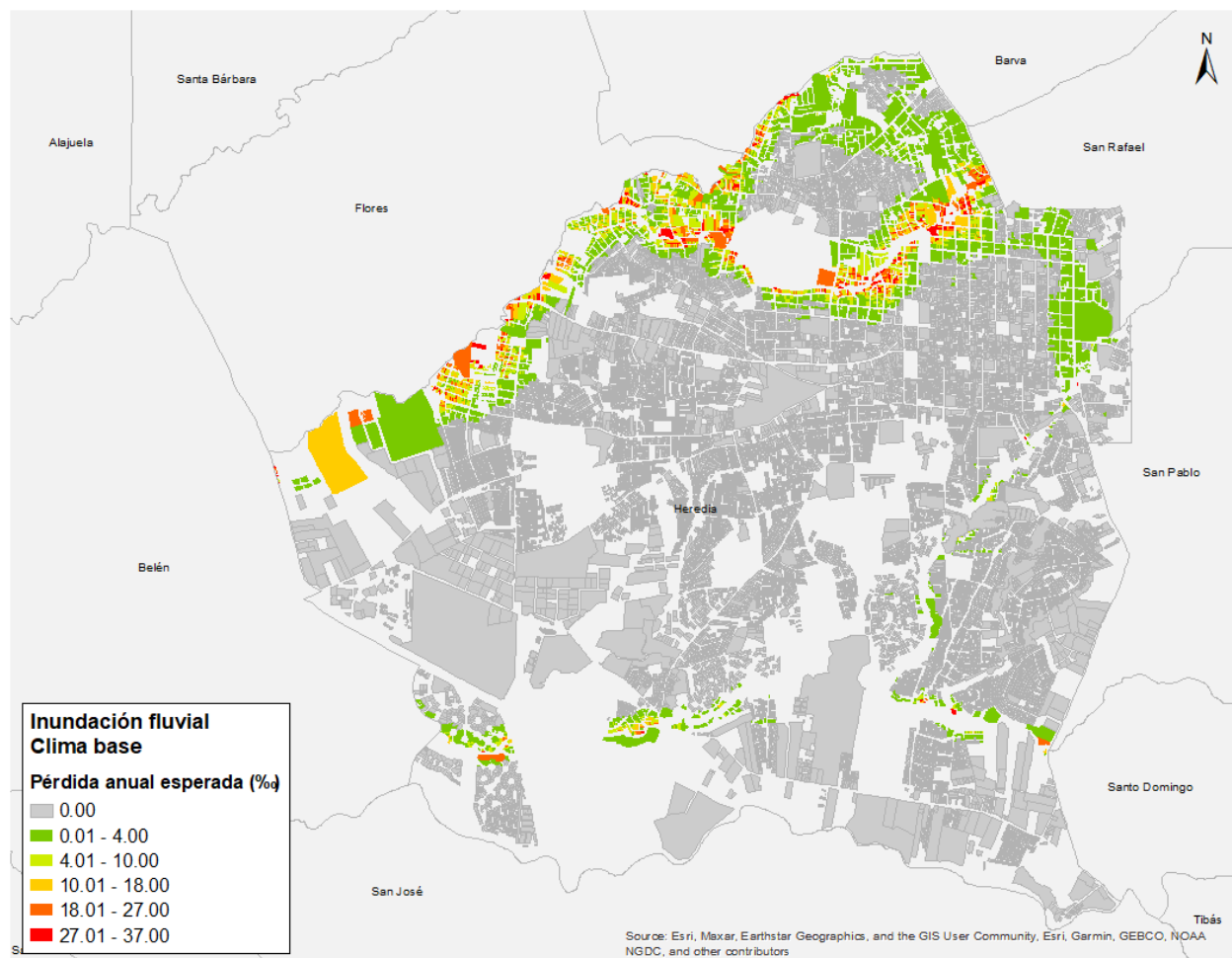


Figura 31. Pérdida anual esperada por inundación fluvial (clima base) para edificaciones en el cantón de Heredia

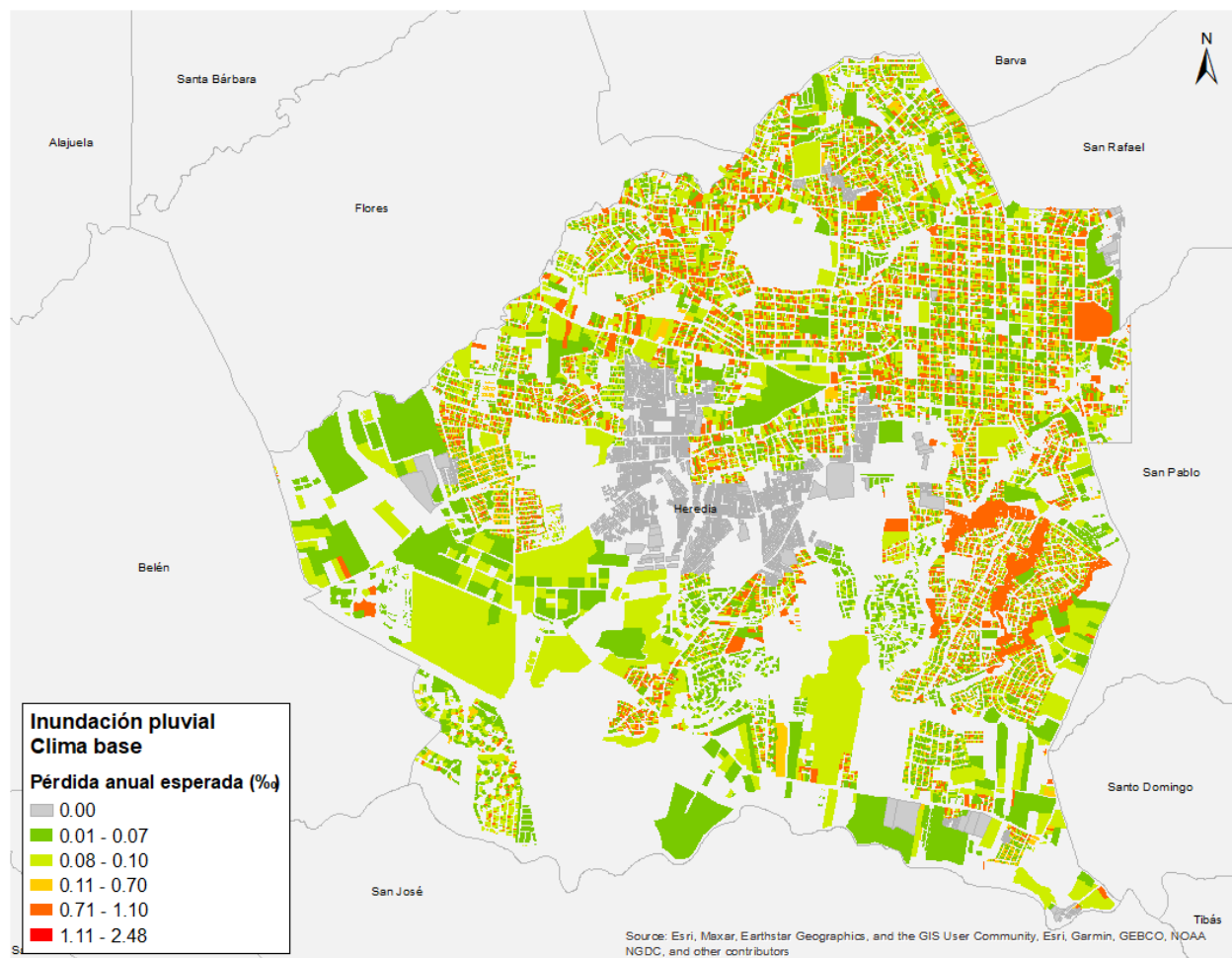


Figura 32. Pérdida anual esperada por inundación pluvial (clima base) para edificaciones en el cantón de Heredia

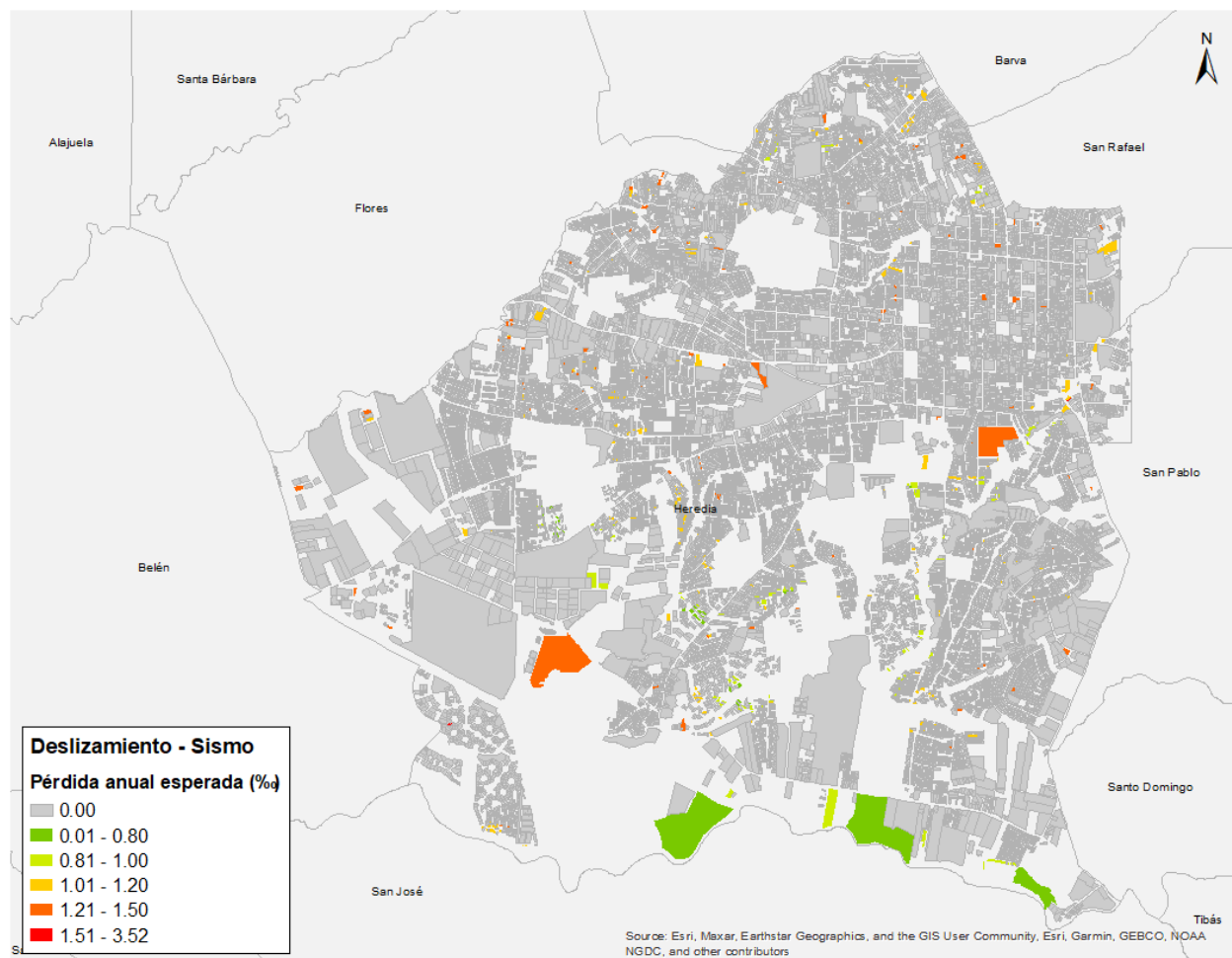


Figura 33. Pérdida anual esperada por deslizamiento detonado por sismo para edificaciones en el cantón de Heredia

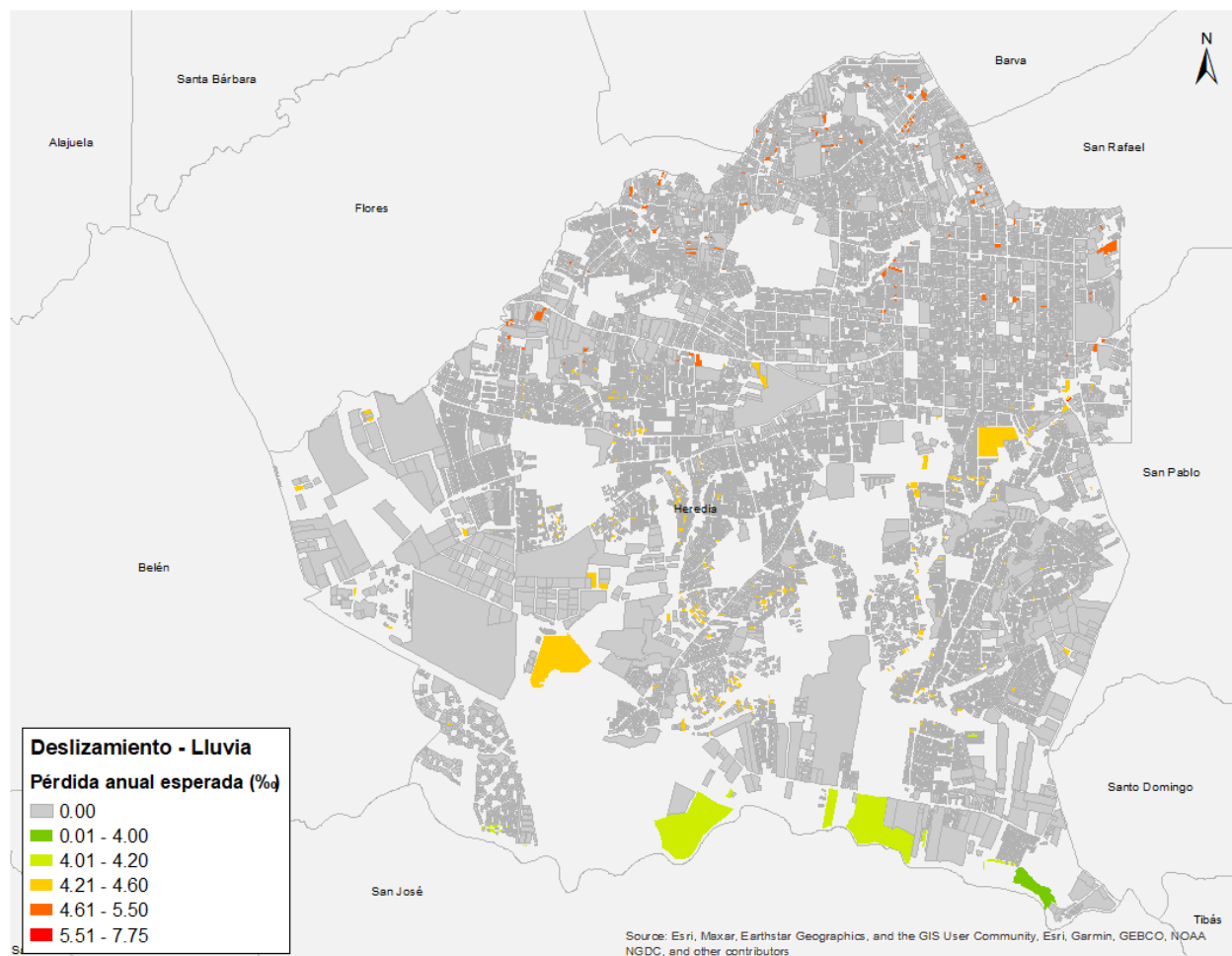


Figura 34. Pérdida anual esperada por deslizamiento detonado por lluvia (clima base) para edificaciones en el cantón de Heredia

Como se observa, las distribuciones de pérdida son muy diferentes entre las amenazas consideradas, lo cual es de esperarse. Se puede ver, por ejemplo, como el sismo (Figura 30) genera efectivamente mayores correlaciones de pérdida, siendo una amenaza que puede afectar el 100% del portafolio de edificaciones, debido a que en todo el territorio se está, en una u otra medida, expuesto a los terremotos. Esto explica los altísimos valores de PML obtenidos, en comparación con otras amenazas. Sin embargo, si se observan los valores puntuales para cada edificación, la máxima PAE es de 12.50 ‰, valor inferior a los máximos de pérdida puntual registrados en alguna ubicación para inundación fluvial que es la que mayor riesgo presenta a nivel individual de edificación (37%). Los valores máximos puntuales para las demás amenazas fueron de: 2.48 ‰ para inundación pluvial, 3.52 ‰ para deslizamiento detonado por sismo, y 7.75 ‰ para deslizamiento detonado por lluvia (para las amenazas en las que se considera el cambio climático, se presenta el valor para el clima base).

Lo anterior ilustra que, si bien el terremoto logra correlacionar pérdidas en múltiples ubicaciones en cada evento, causando así uno de los niveles de riesgo más relevantes para el portafolio, las pérdidas causadas individualmente para cada edificación son altamente diversas, existiendo ubicaciones en donde otras

amenazas pueden ser mucho más críticas, en términos de riesgo, que el terremoto. En los mapas presentados es posible observar ubicaciones fuertemente afectadas por inundaciones fluviales (Figura 31), así como otras ubicaciones, también con niveles de riesgo considerables por deslizamientos (Figura 33 y Figura 34). Estas amenazas, no correlacionan pérdidas en grandes números de elementos en cada evento, pero pueden ser de alta influencia para elementos individuales en ubicaciones específicas, en donde una potencial alta intensidad, combinada con alta vulnerabilidad, causan valores de PAE altos.

Los resultados presentados inevitablemente están dominados por la relación frecuencia-severidad propia de cada amenaza. Los terremotos son capaces de grandes impactos en cada evento individual, pero con una frecuencia de ocurrencia muy baja, lo cual contrasta con fenómenos como la inundación, por ejemplo, cuyos impactos son mucho más reducidos a nivel de eventos individuales, pero con una mayor frecuencia de ocurrencia. Esto explica las relaciones mostradas entre las pérdidas de estas amenazas, y de todas las consideradas en este trabajo.

La observación de las pérdidas, elemento a elemento, es importante en otros procesos de la gestión del riesgo; procesos orientados a la mitigación, a nivel local e individual, de la vulnerabilidad, a procesos de modificación de la exposición (como la reubicación de la infraestructura), así como para la pertinencia de posibles obras de mitigación de la amenaza (como defensas ante inundaciones fluviales). Estos datos complementan los resultados de riesgo, para proveer una visión más completa de cómo se concentran los valores en el territorio, o donde puntualmente se debería incidir si se pretende reducir la vulnerabilidad.

#### 5.1.4 Población afectada

La afectación a la población se aproxima a partir de las pérdidas evaluadas en este estudio. Se trata de una afectación general y aproximada, en donde no se diferencia entre el tipo de afectación y su severidad, pues no se cuenta con la información requerida ni es el propósito de este trabajo.

La población afectada se determina como una proporción de la *población potencialmente afectada* (PPA). Dicha proporción corresponde a la PAE relativa evaluada por edificación (y agregada para todas las amenazas). Esto deriva en una estimación gruesa del *Promedio Anual de Afectados* (PAA). Si bien esta es una aproximación gruesa, dado que no se cuenta con más elementos para su determinación, se considera aceptable y suficiente para orientar sobre los órdenes de magnitud de la afectación a la población. La evaluación puede resumirse por medio de la siguiente ecuación:

$$PAA = PPA \cdot PAE \quad \text{Ecuación 5}$$

En donde PAE es la pérdida anual esperada relativa, correspondiente al total agregado para todas las amenazas. La población potencialmente afectada (PPA) corresponde a la población total del cantón, pero distribuida por sectores de uso, tal y como fue definida en el modelo de exposición. La Tabla 9 muestra la población expuesta (PPA) por sector de uso, y la población afectada (PPA) por cada amenaza considerada en Heredia.

Tabla 9. Población afectada por sector de uso para las amenazas consideradas

| Sector        | Población Potencialmente Afectada (PPA) | Promedia Anual de Afectados (PAA) |                                 |                                 |                     |                                   |
|---------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------------|
|               |                                         | Sismo                             | Inundación fluvial (Clima base) | Inundación pluvial (Clima base) | Deslizamiento Sismo | Deslizamiento Lluvia (Clima base) |
| Residencial   | 135,149                                 | 282                               | 134                             | 30                              | 4                   | 16                                |
| Salud         | 134                                     | 0                                 | 0                               | 0                               | 0                   | 0                                 |
| Educación     | 1,577                                   | 2                                 | 1                               | 0                               | 0                   | 1                                 |
| Institucional | 1,871                                   | 3                                 | 0                               | 0                               | 0                   | 0                                 |
| Comercial     | 10,643                                  | 23                                | 5                               | 1                               | 0                   | 1                                 |
| <b>Total</b>  | <b>149,374</b>                          | <b>310</b>                        | <b>140</b>                      | <b>31</b>                       | <b>4</b>            | <b>18</b>                         |

## 5.2 Portafolio de infraestructura

Dentro del proyecto Estratégico para Heredia, se incluyeron múltiples sectores de infraestructura crítica, con el objetivo de cubrir aquellos definidos por el Decreto N.º 42465 de 2020 para Costa Rica. Entre ellos se incluyen los sectores: vial (carretero), férreo, energético (eléctrico), de telecomunicaciones, de hidrocarburos, así como los sistemas de acueducto y alcantarillado, aplicados al ámbito del cantón de Heredia. Cada sector se compone de varios portafolios según su naturaleza. La Tabla 10 presenta un resumen general con el valor total estimado de reposición y el número total de elementos individuales que componen cada sector considerado.

Tabla 10. Valoración económica y elementos de la exposición de infraestructura en el cantón de Heredia

| Sector             | Valoración económica (₡) | Elementos                                                     |
|--------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Carretero          | 119 590 241 400          | 340.5 km de vías                                              |
|                    |                          | 12 puentes del orden nacional y 37 del orden cantonal         |
| Férreo             | 986 648 800              | 4.9 km de vías férreas                                        |
| Eléctrico          | 45 521 947 100           | 2 plantas de generación de energía (hidroeléctricas)          |
|                    |                          | 6 subestaciones                                               |
|                    |                          | 108 torres de transmisión de alta tensión                     |
|                    |                          | 48.7 km de circuitos de alta tensión (transmisión)            |
|                    |                          | 2596 transformadores de media y baja tensión                  |
|                    |                          | 11814 postes de distribución                                  |
|                    |                          | 1027.3 km de circuitos de media y baja tensión (distribución) |
| Telecomunicaciones | 2 230 418 300            | 110 torres de telecomunicaciones                              |
| Hidrocarburos      | 3 743 233 900            | 12.2 km de poliducto                                          |
| Agua potable       | 43 000 332 900           | 28 fuentes de agua potable                                    |
|                    |                          | 53 tanques de almacenamiento                                  |
|                    |                          | 17 sistemas de bombeo                                         |
|                    |                          | 568.4 km de red de abastecimiento                             |
| Agua residual      | 13 542 726 700           | 924 hidrantes                                                 |
|                    |                          | 160.3 km de red de colectores                                 |
|                    |                          | 2317 pozos de registro                                        |
|                    |                          | 6 plantas de tratamiento de agua potable                      |

A continuación, se presentan los resultados en términos de las métricas de riesgo empleadas en este trabajo (PAE y PML) para los diferentes sectores considerados.

## 5.2.1 Sector carretero

### 5.2.1.1 Pérdida Anual Esperada (PAE)

La Tabla 11 presenta los valores de PAE por clima para el sector carretero, estos valores de PAE reflejan únicamente el componente físico de los activos evaluados y no tienen en cuenta posibles fluctuaciones o interrupciones en los servicios prestados. Con el fin de limitar la extensión del documento, se presentan únicamente el clima base y los climas que producen la máxima y mínima PAE para el caso de las amenazas hidrometeorológicas. La Figura 35 presenta esta misma información de manera gráfica.

Tabla 11. Pérdida anual esperada por amenaza y clima en el sector carretero. Valores en millones de colones costarricenses (CRC)

| Portafolio                         |                  | Vías              |         | Puentes           |         |
|------------------------------------|------------------|-------------------|---------|-------------------|---------|
| Valor expuesto                     |                  | \$ 98,625,227,300 |         | \$ 20,965,014,100 |         |
| Amenaza                            | Escenario        | PAE (CRC)         | PAE (‰) | PAE (CRC)         | PAE (‰) |
| <i>Sismo</i>                       |                  | \$ 18,227,206     | 0.18    | \$ 27,786,939     | 1.33    |
| <i>Inundación fluvial</i>          | <i>Base</i>      | \$ 38,438,053     | 0.39    | \$ 27,824,657     | 1.33    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$ 36,023,172     | 0.37    | \$ 26,082,061     | 1.24    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$ 45,128,691     | 0.46    | \$ 32,648,771     | 1.56    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$ 35,321,270     | 0.36    | \$ 25,575,424     | 1.22    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$ 49,753,319     | 0.50    | \$ 35,979,888     | 1.72    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$ 31,697,053     | 0.32    | \$ 22,958,448     | 1.10    |
|                                    | <i>Max. 2010</i> | \$ 46,237,806     | 0.47    | \$ 33,447,917     | 1.60    |
| <i>Inundación pluvial</i>          | <i>Base</i>      | \$ 112,354        | 0.00    | \$ -              | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$ 105,061        | 0.00    | \$ -              | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$ 132,720        | 0.00    | \$ -              | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$ 102,948        | 0.00    | \$ -              | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$ 146,946        | 0.00    | \$ -              | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$ 92,080         | 0.00    | \$ -              | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2010</i> | \$ 136,121        | 0.00    | \$ -              | 0.00    |
| <i>Desliz. detonado por sismo</i>  |                  | \$ 7,326,326      | 0.07    | \$ 4,389,620      | 0.21    |
| <i>Desliz. detonado por lluvia</i> | <i>Base</i>      | \$ 25,902,839     | 0.26    | \$ 14,060,378     | 0.67    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$ 25,805,109     | 0.26    | \$ 14,084,657     | 0.67    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$ 29,009,917     | 0.29    | \$ 15,150,853     | 0.72    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$ 25,340,984     | 0.26    | \$ 12,551,225     | 0.60    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$ 28,959,280     | 0.29    | \$ 15,995,595     | 0.76    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$ 25,041,197     | 0.25    | \$ 10,132,151     | 0.48    |
|                                    | <i>Max. 2010</i> | \$ 32,994,707     | 0.33    | \$ 13,467,569     | 0.64    |

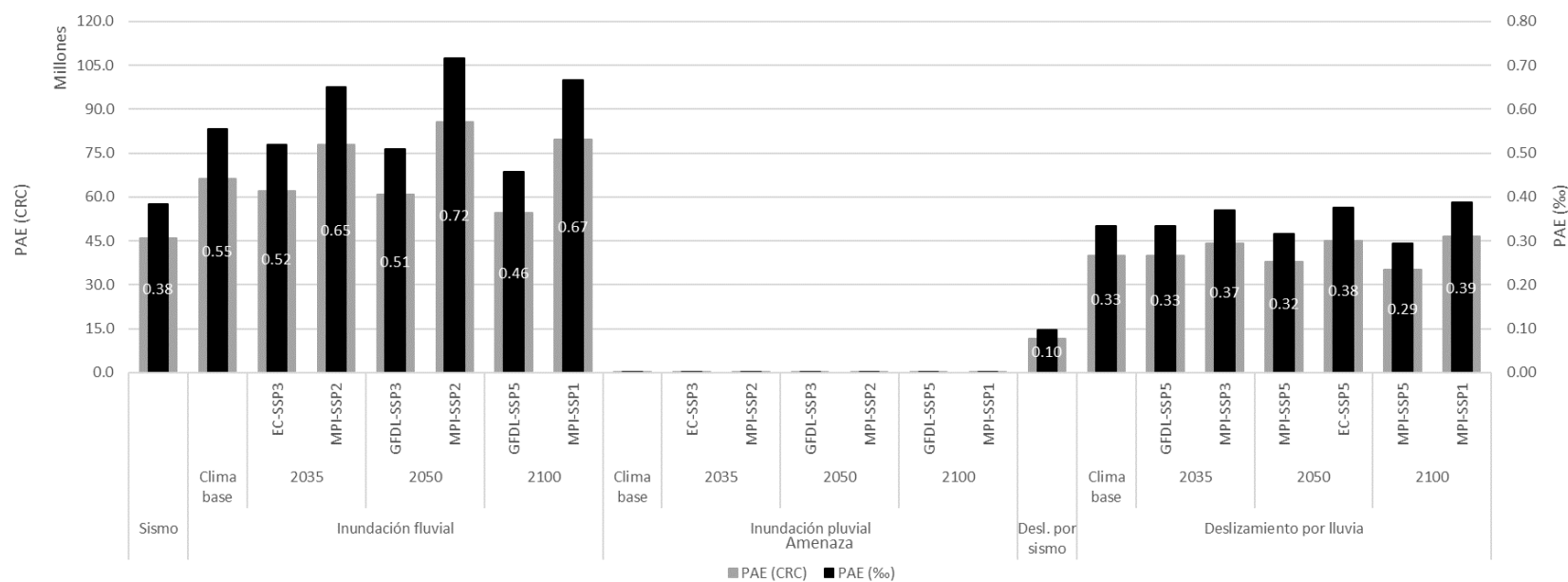


Figura 35. Pérdida anual esperada por amenaza para el sector carretero

Los resultados de PAE para el sector carretero en Heredia muestran una diferenciación clara entre los componentes del portafolio de vías y puentes, tanto en magnitud absoluta como en pérdida relativa. Para las vías, las amenazas hidrometeorológicas asociadas a inundación fluvial y deslizamientos detonados por lluvia concentran los valores más altos de PAE, con pérdidas del orden de 38–50 millones CRC para inundación fluvial y 26–33 millones CRC para deslizamientos por lluvia, dependiendo del clima considerado. En contraste, el riesgo sísmico presenta una PAE inferior, cercana a 18.2 millones CRC, mientras que los deslizamientos detonados por sismo aportan valores adicionales más moderados (~7.3 millones CRC). La inundación pluvial, por su parte, resulta prácticamente marginal en términos de pérdidas esperadas, con valores inferiores a 0.15 millones CRC, indicando una contribución muy baja dentro del balance global de pérdidas anuales.

En el caso de los puentes, las pérdidas relativas son consistentemente superiores, reflejando una mayor sensibilidad estructural y funcional del subsector. Tanto el sismo como la inundación fluvial presentan valores comparables de PAE en el escenario base, alrededor de 27–28 millones CRC, correspondientes a pérdidas relativas del orden de 1.3% del valor expuesto. Asimismo, los deslizamientos por lluvia generan pérdidas esperadas significativas (~14–16 millones CRC), mientras que los deslizamientos por sismo representan un aporte menor (~4.4 millones CRC). En general, el rango de variación climática considerado introduce dispersión apreciable en las amenazas fluviales y de deslizamiento por lluvia, con incrementos hacia escenarios máximos (2050 y 2100), lo cual se refleja en ampliaciones del intervalo de PAE anual bajo condiciones futuras

#### 5.2.1.2 Pérdida Máxima Probable (PML)

La Figura 36 muestra las curvas de PML para el sector carretero. No se incluye la inundación pluvial dado que no genera pérdidas en este portafolio.

Las curvas de PML presentadas para el sector carretero permiten caracterizar el comportamiento de las pérdidas en el dominio de baja frecuencia–alta severidad, diferenciando tanto la naturaleza de cada amenaza como la influencia de los múltiples climas considerados. En el caso del sismo y de los deslizamientos detonados por sismo, las curvas muestran un patrón típico de amenazas de cola pesada, con incrementos marcados de pérdidas hacia periodos de retorno mayores, evidenciando el rol de eventos extremos poco frecuentes en la definición del riesgo agregado. Este comportamiento es particularmente relevante para puentes, donde la pérdida relativa anual ya es alta, y donde los escenarios extremos dominan la parte alta de las curvas de excedencia.

Para inundación fluvial y deslizamientos detonados por lluvia, la presencia de múltiples curvas superpuestas en cada gráfico corresponde a la incorporación de los 36 climas alternativos modelados. La dispersión entre curvas es más evidente en inundación fluvial, donde los escenarios máximos futuros tienden a desplazar la distribución hacia pérdidas mayores en distintos niveles de excedencia. En deslizamientos por lluvia se observa igualmente una variabilidad climática significativa, aunque con diferentes pendientes y separaciones, sugiriendo sensibilidad tanto a cambios en intensidad hidrometeorológica como a la localización espacial de la exposición.

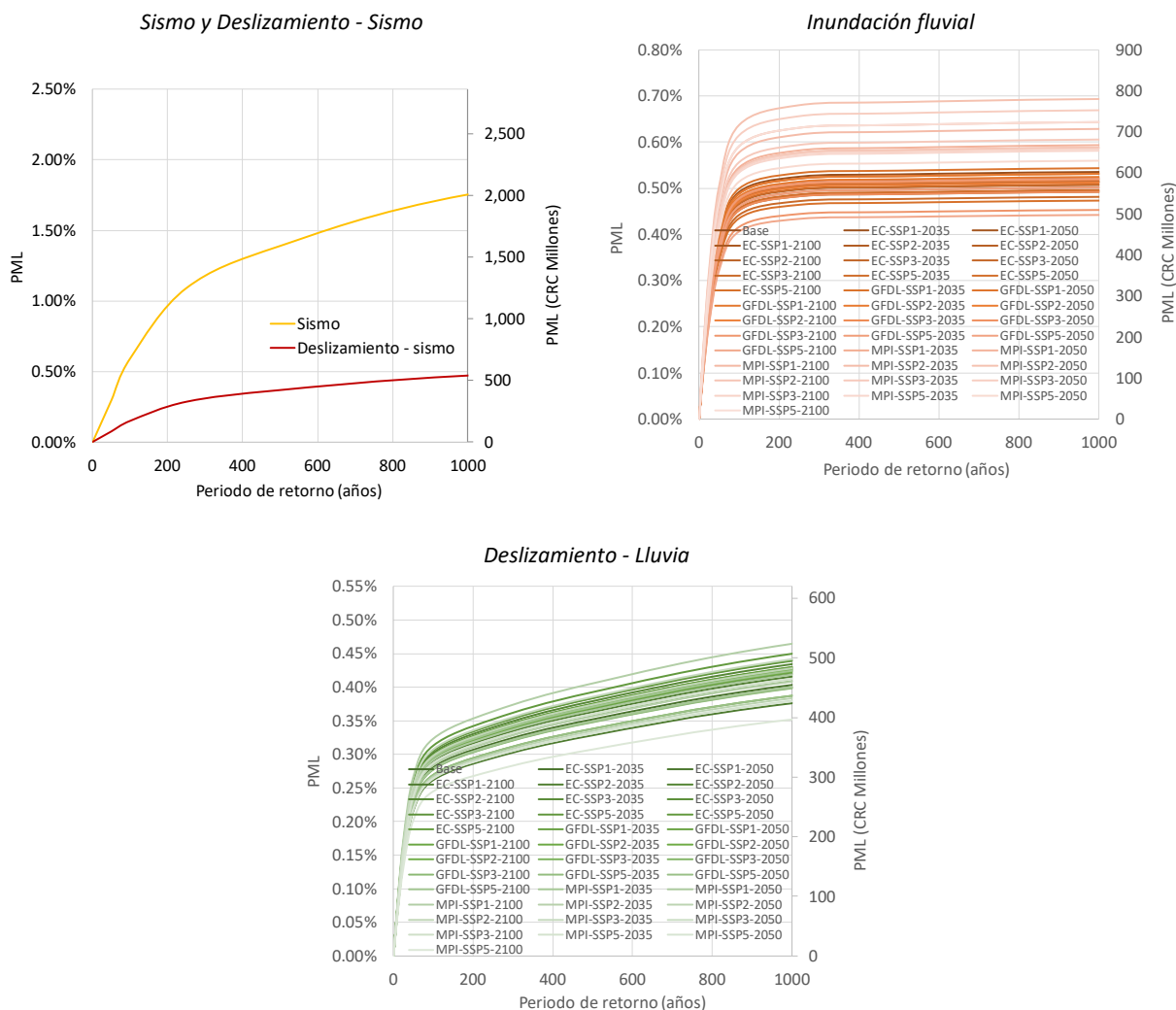


Figura 36. Curvas de PML para todas las amenazas consideradas y todos los climas. Sector carretero

### 5.2.1.3 Pérdidas por ubicación

De la Figura 37 a la Figura 40 se presentan los mapas de PAE por elementos individuales del sector, para las amenazas consideradas. No se incluye la inundación pluvial dado que no genera pérdidas en este portafolio.

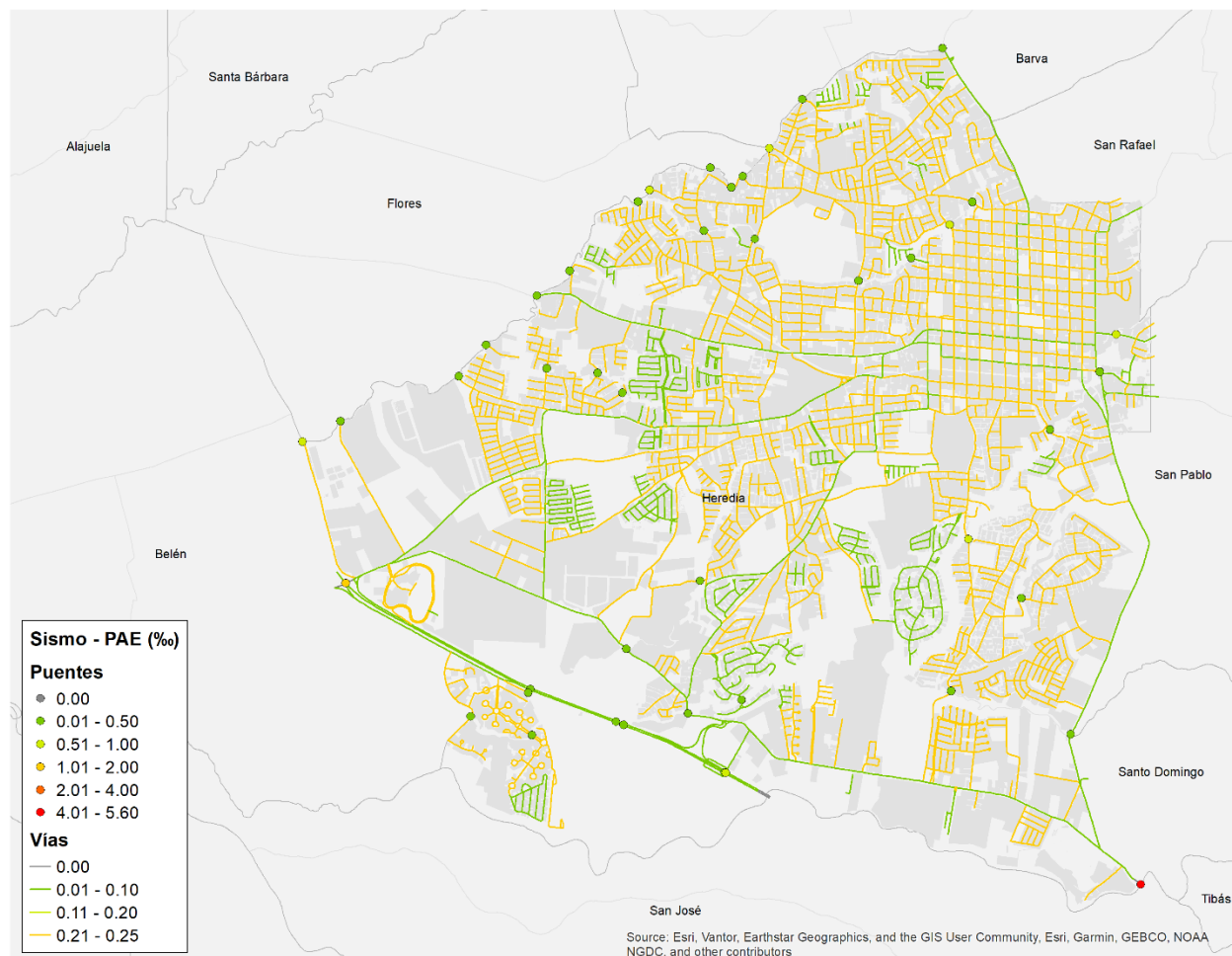


Figura 37. Pérdida anual esperada por sismo para el sector carretero en el cantón de Heredia

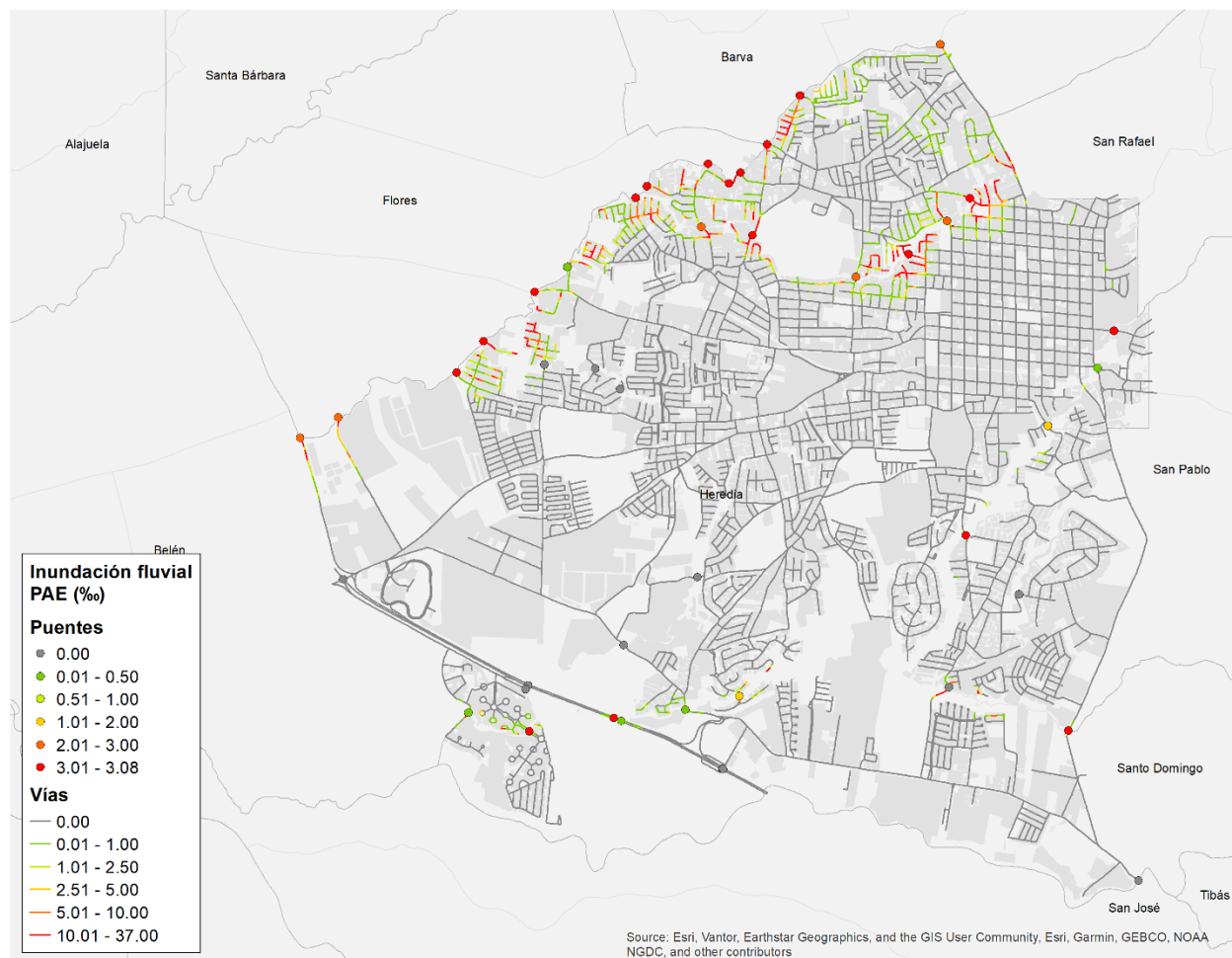


Figura 38. Pérdida anual esperada por inundación fluvial para el sector carretero en el cantón de Heredia



Figura 39. Pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por sismo para el sector carretero en el cantón de Heredia

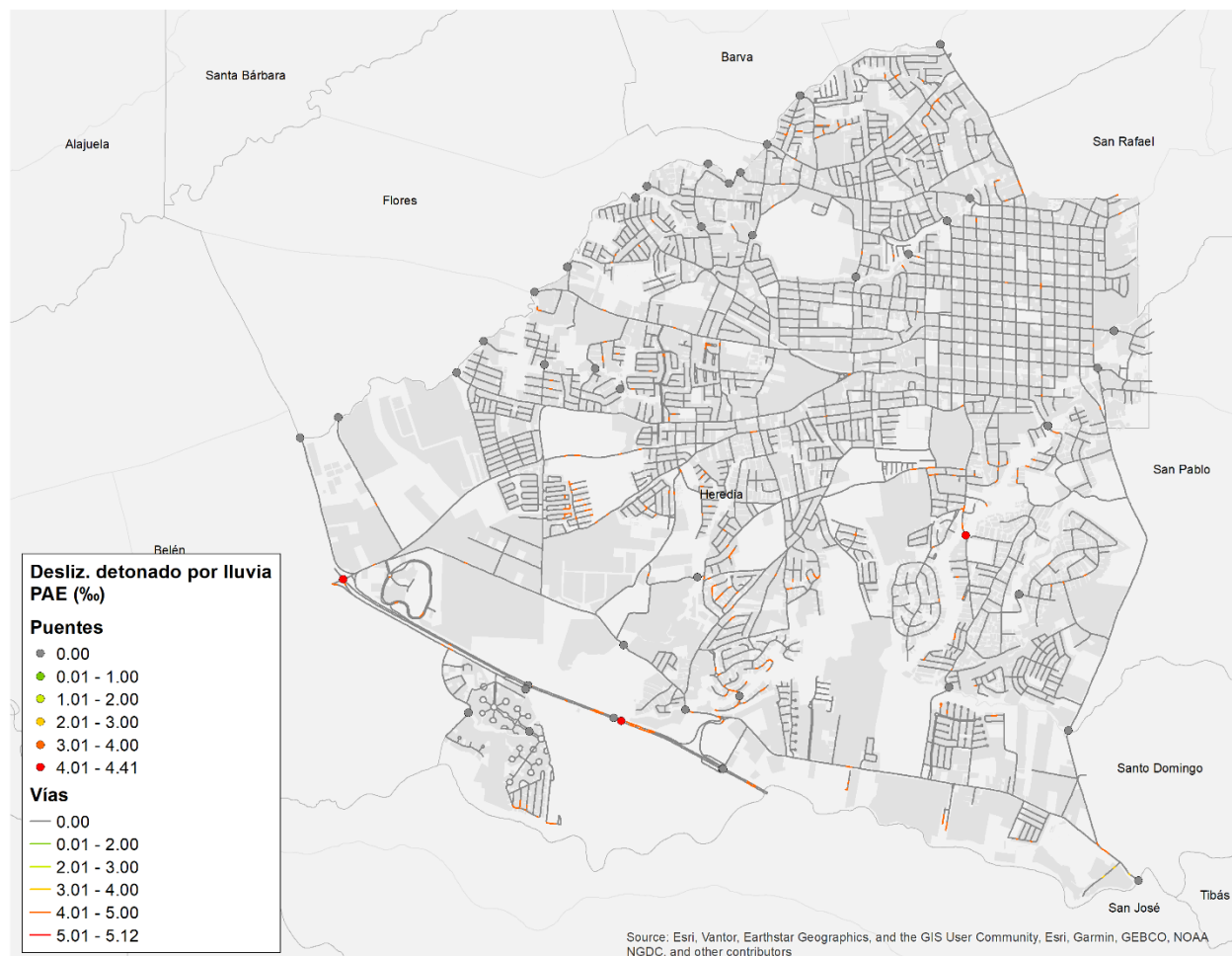


Figura 40. Pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por lluvia para el sector carretero en el cantón de Heredia

Los mapas de PAE por ubicación (Figuras 27) evidencian que el riesgo no se distribuye homogéneamente sobre la red vial del cantón, sino que se concentra en segmentos específicos donde confluyen condiciones de amenaza elevada y exposición crítica. En el caso del sismo, las pérdidas esperadas tienden a organizarse en función de la distribución espacial de la infraestructura más vulnerable, particularmente donde existen estructuras de conexión relevantes y donde los efectos de amplificación local o condiciones geotécnicas pueden incrementar la severidad del impacto. El patrón observado es consistente con una contribución relativamente moderada pero extendida, dado que el sismo actúa como amenaza regional con cobertura amplia sobre el territorio.

Para inundación fluvial, el mapa correspondiente muestra una concentración mucho más marcada en corredores específicos asociados a planicies de inundación, proximidad a cauces y zonas de acumulación hidrológica. En estos casos, la PAE se vuelve altamente localizada, con segmentos que actúan como puntos dominantes en la pérdida agregada anual. La variabilidad climática reportada en la tabla se interpreta espacialmente como un potencial incremento en severidad o frecuencia de inundaciones en esos mismos corredores críticos, amplificando la importancia de ciertos tramos dentro del portafolio vial.

En los mapas de deslizamientos detonados por sismo, las pérdidas se concentran principalmente en áreas de pendiente y en sectores donde la susceptibilidad geotécnica condiciona la ocurrencia de fallas inducidas por sacudida. A diferencia del riesgo sísmico directo, aquí el patrón espacial está más controlado por la geomorfología y por la interacción amenaza–terreno, generando zonas discretas de pérdida elevada que pueden coincidir con segmentos de conectividad estratégica dentro de la red. La magnitud anual esperada asociada a este mecanismo es menor que la de inundación fluvial o deslizamientos por lluvia, pero su localización es particularmente dependiente del relieve.

Finalmente, los deslizamientos detonados por lluvia presentan uno de los patrones espaciales más concentrados y sensibles del análisis. Las pérdidas esperadas se agrupan en tramos específicos donde coinciden pendientes pronunciadas, suelos susceptibles y condiciones hidrometeorológicas capaces de disparar inestabilidades recurrentes. Este comportamiento es consistente con los valores elevados de PAE observados bajo escenarios climáticos máximos, donde el incremento de extremos de precipitación tiende a reflejarse directamente en pérdidas acumuladas. En este caso, los mapas permiten identificar con claridad que el riesgo anual está dominado por un conjunto reducido de ubicaciones de alta recurrencia, que estructuran la mayor parte de la contribución del deslizamiento por lluvia al portafolio carretero.

## 5.2.2 Sector férreo e hidrocarburos

En esta sección se presentan conjuntamente los sectores férreo e hidrocarburos, únicamente debido a la facilidad de representarlos gráficamente de forma conjunta, dado que son portafolios con un número reducido de elementos en Heredia.

### 5.2.2.1 Pérdida Anual Esperada (PAE)

La Tabla 12 presenta los valores de PAE por clima para los sectores férreo e hidrocarburos, estos valores de PAE reflejan únicamente el componente físico de los activos evaluados y no tienen en cuenta posibles fluctuaciones o interrupciones en los servicios prestados. Con el fin de limitar la extensión del documento, se presentan únicamente el clima base y los climas que producen la máxima y mínima PAE para el caso de las amenazas hidrometeorológicas. La Figura 41 y Figura 42 presenta esta misma información de manera gráfica.

Tabla 12. Pérdida anual esperada por amenaza y clima en el sector férreo. Valores en millones de colones costarricenses (CRC)

| Portafolio         |           | Línea férrea   |         | Poliducto        |         |
|--------------------|-----------|----------------|---------|------------------|---------|
| Valor expuesto     |           | \$ 986,648,800 |         | \$ 3,743,233,900 |         |
| Amenaza            | Escenario | PAE (CRC)      | PAE (‰) | PAE (CRC)        | PAE (‰) |
| Sismo              |           | \$ 213,738     | 0.22    | \$ 44,231        | 0.01    |
| Inundación fluvial | Base      | \$ 219,831     | 0.22    | \$ -             | 0.00    |
|                    | Min. 2035 | \$ 206,025     | 0.21    | \$ -             | 0.00    |
|                    | Max. 2035 | \$ 258,076     | 0.26    | \$ -             | 0.00    |
|                    | Min. 2050 | \$ 202,012     | 0.20    | \$ -             | 0.00    |
|                    | Max. 2050 | \$ 284,509     | 0.29    | \$ -             | 0.00    |
|                    | Min. 2100 | \$ 181,291     | 0.18    | \$ -             | 0.00    |
|                    | Max. 2010 | \$ 264,416     | 0.27    | \$ -             | 0.00    |
| Inundación pluvial | Base      | \$ 986         | 0.00    | \$ -             | 0.00    |
|                    | Min. 2035 | \$ 922         | 0.00    | \$ -             | 0.00    |

| Portafolio                         |                  | Línea férrea   |         | Poliducto        |         |
|------------------------------------|------------------|----------------|---------|------------------|---------|
| <i>Valor expuesto</i>              |                  | \$ 986,648,800 |         | \$ 3,743,233,900 |         |
| Amenaza                            | Escenario        | PAE (CRC)      | PAE (‰) | PAE (CRC)        | PAE (‰) |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$ 1,165       | 0.00    | \$ -             | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$ 903         | 0.00    | \$ -             | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$ 1,290       | 0.00    | \$ -             | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$ 808         | 0.00    | \$ -             | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2010</i> | \$ 1,195       | 0.00    | \$ -             | 0.00    |
| <i>Desliz. detonado por sismo</i>  |                  | \$ 1,563       | 0.00    | \$ 270,543       | 0.07    |
| <i>Desliz. detonado por lluvia</i> | <i>Base</i>      | \$ 6,675       | 0.01    | \$ 1,067,669     | 0.29    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$ 6,463       | 0.01    | \$ 1,016,956     | 0.27    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$ 7,301       | 0.01    | \$ 1,155,026     | 0.31    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$ 4,041       | 0.00    | \$ 940,431       | 0.25    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$ 7,226       | 0.01    | \$ 1,203,021     | 0.32    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$ 3,979       | 0.00    | \$ 660,302       | 0.18    |
|                                    | <i>Max. 2010</i> | \$ 7,377       | 0.01    | \$ 1,210,332     | 0.32    |

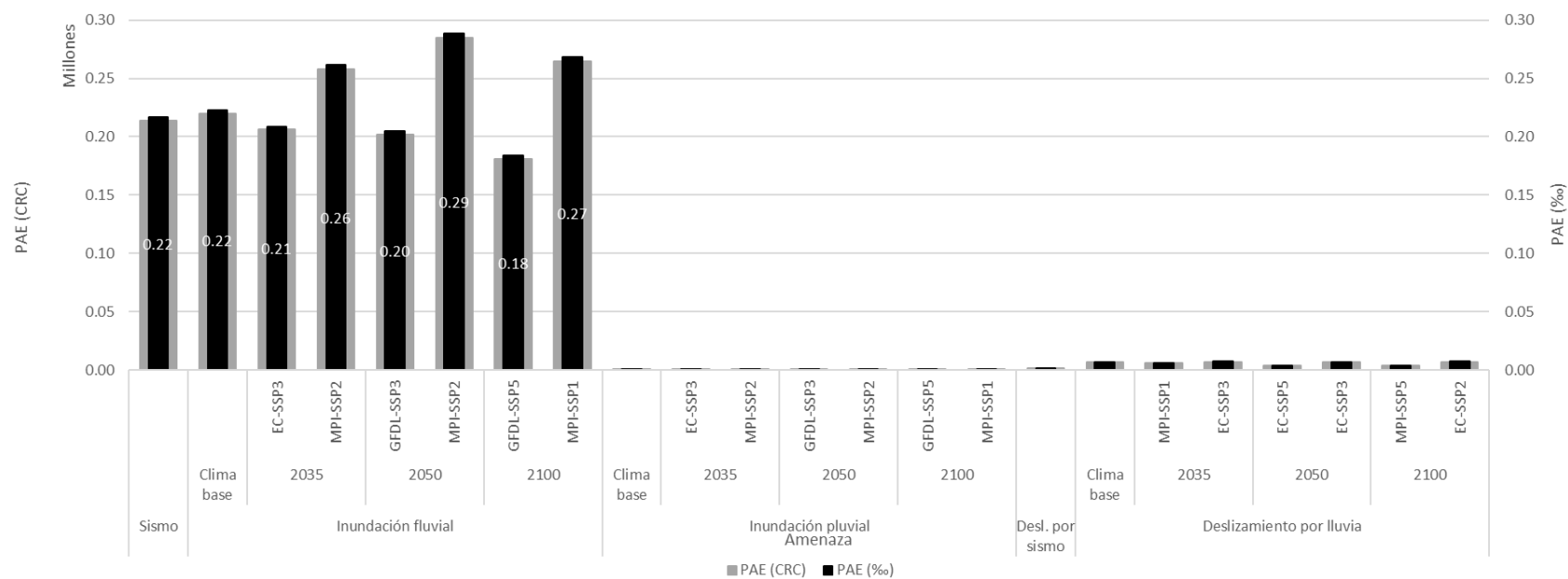


Figura 41. Pérdida anual esperada por amenaza para el sector férreo

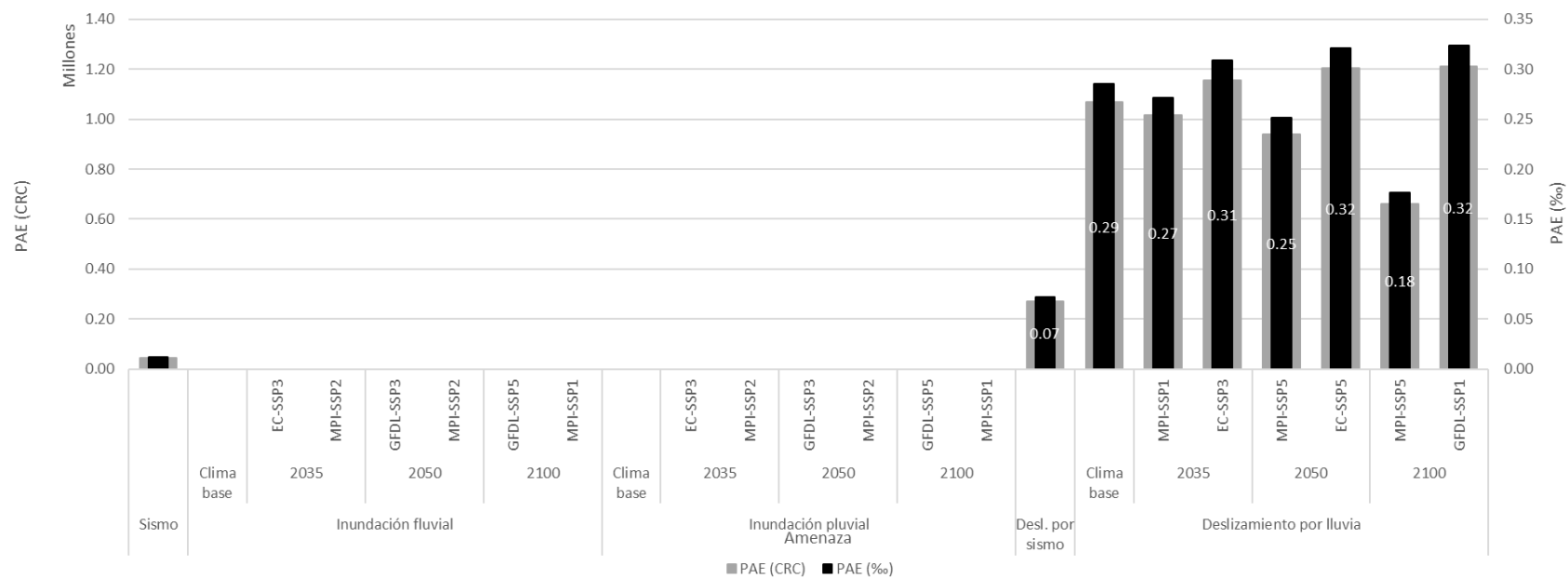


Figura 42. Pérdida anual esperada por amenaza para el sector hidrocarburos

Los resultados PAE para el sector férreo muestran un balance relativamente distribuido entre amenazas sísmicas e hidrometeorológicas, aunque con magnitudes anuales moderadas en términos absolutos. La línea férrea presenta valores de PAE del orden de 0.21–0.26 millones CRC para inundación fluvial bajo el escenario base y climas futuros, con variabilidad asociada a los límites mínimos y máximos de proyección. El riesgo sísmico directo resulta comparable en magnitud, con una PAE aproximada de 0.214 millones CRC, mientras que la inundación pluvial es totalmente marginal, con una contribución casi nula al total anual. En general, para el componente férreo, las amenazas fluviales y sísmicas dominan la pérdida esperada anual, con una sensibilidad climática moderada reflejada en el rango de escenarios considerados.

En contraste, el sector hidrocarburos, representado principalmente por el poliducto, exhibe un perfil de riesgo altamente condicionado por los deslizamientos detonados por lluvia. En este caso, la PAE asociada a este mecanismo alcanza valores del orden de 0.94–1.21 millones CRC, equivalentes a pérdidas relativas cercanas a 0.25–0.32% del valor expuesto, siendo claramente el principal contribuyente anual del portafolio. El sismo directo presenta pérdidas anuales mucho menores (0.044 millones CRC), mientras que los deslizamientos detonados por sismo aportan valores adicionales relevantes (0.271 millones CRC). Para inundación fluvial y pluvial, las pérdidas son nulas.

#### 5.2.2.2 Pérdida Máxima Probable (PML)

La Figura 43 muestra las curvas de PML para el sector férreo, mientras que la Figura 44 muestra las curvas para el sector hidrocarburos. Para este último no se incluye la inundación fluvial ni pluvial dado que no generan pérdidas en este portafolio.

Las curvas de PML para el sector férreo evidencian un comportamiento diferenciado entre amenazas regionales de cobertura amplia, como el sismo, y amenazas localizadas condicionadas por procesos hidrometeorológicos. En el caso sísmico, las curvas muestran el incremento progresivo de pérdidas hacia periodos de retorno largos, representando la influencia de eventos extremos de baja frecuencia sobre la cola de la distribución. Para deslizamientos detonados por sismo, el patrón refleja igualmente pérdidas concentradas en escenarios menos frecuentes, aunque con menores magnitudes relativas frente al componente sísmico directo.

Para el subsector de hidrocarburos, las curvas de Pérdida Máxima Probable (PML) reflejan un perfil de riesgo extremo dominado por mecanismos de inestabilidad de ladera, con contribuciones diferenciadas entre detonación sísmica y pluvial. El sismo directo presenta una curva con crecimiento gradual hacia periodos de retorno largos. Los deslizamientos detonados por sismo muestran un patrón más localizado, pero con incrementos relevantes en la cola de la distribución, evidenciando la capacidad de eventos sísmicos severos de inducir fallas concentradas en segmentos críticos. Sin embargo, el mecanismo más dominante en términos de dispersión y severidad extrema corresponde a los deslizamientos detonados por lluvia, donde el abanico de curvas asociado a los 36 climas introduce variabilidad sustancial en la magnitud de pérdidas excedentes, con escenarios máximos futuros desplazando la distribución hacia niveles significativamente mayores en periodos de retorno largos. En conjunto, el comportamiento de las curvas indica que el riesgo extremo del sector hidrocarburos está condicionado principalmente por procesos de remoción en masa bajo forzamiento hidrometeorológico, con aportes secundarios, pero no despreciables de los mecanismos sísmicos.

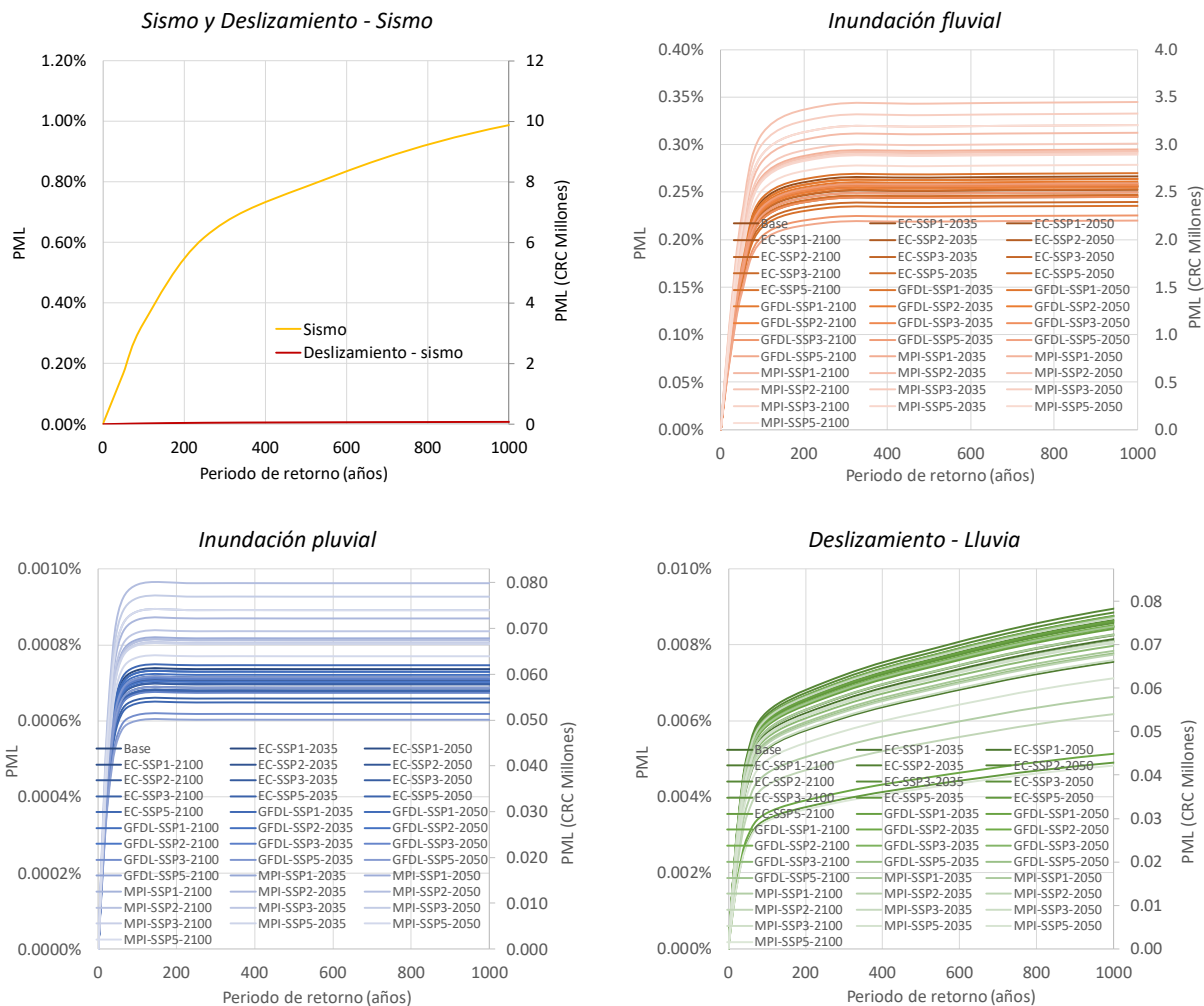


Figura 43. Curvas de PML para todas las amenazas consideradas y todos los climas. Sector férreo

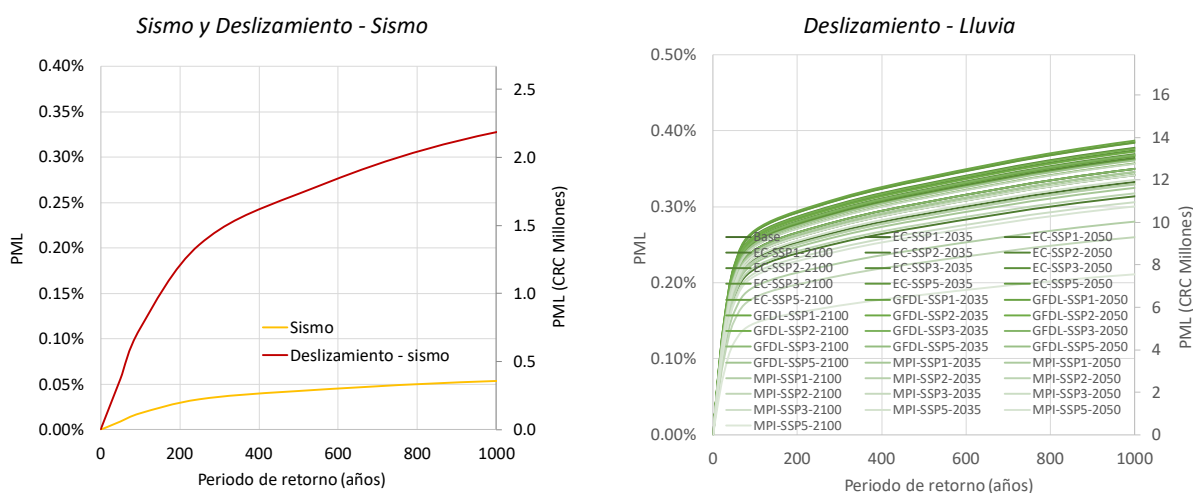


Figura 44. Curvas de PML para todas las amenazas consideradas y todos los climas. Sector hidrocarburos

### 5.2.2.3 Pérdidas por ubicación

De la Figura 45 a la Figura 49 se presentan las PAE por elemento en los portafolios férreo y de hidrocarburos en Heredia, ante las amenazas consideradas.



Figura 45. Pérdida anual esperada por sismo para el sector férreo e hidrocarburos en el cantón de Heredia



Figura 46. Pérdida anual esperada por inundación fluvial para el sector férreo e hidrocarburos en el cantón de Heredia



Figura 47. Pérdida anual esperada por inundación pluvial para el sector férreo e hidrocarburos en el cantón de Heredia

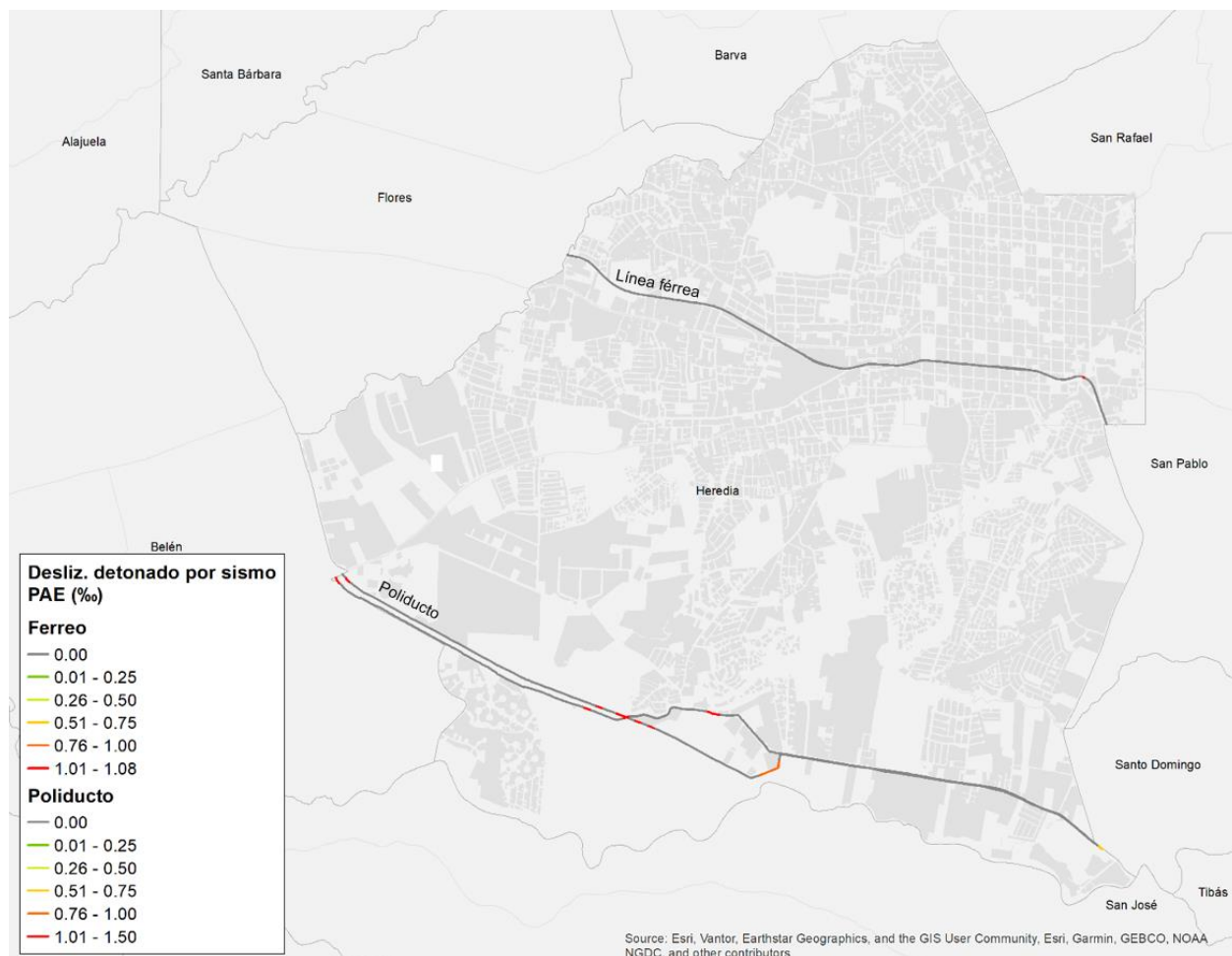


Figura 48. Pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por sismo para el sector férreo e hidrocarburos en el cantón de Heredia

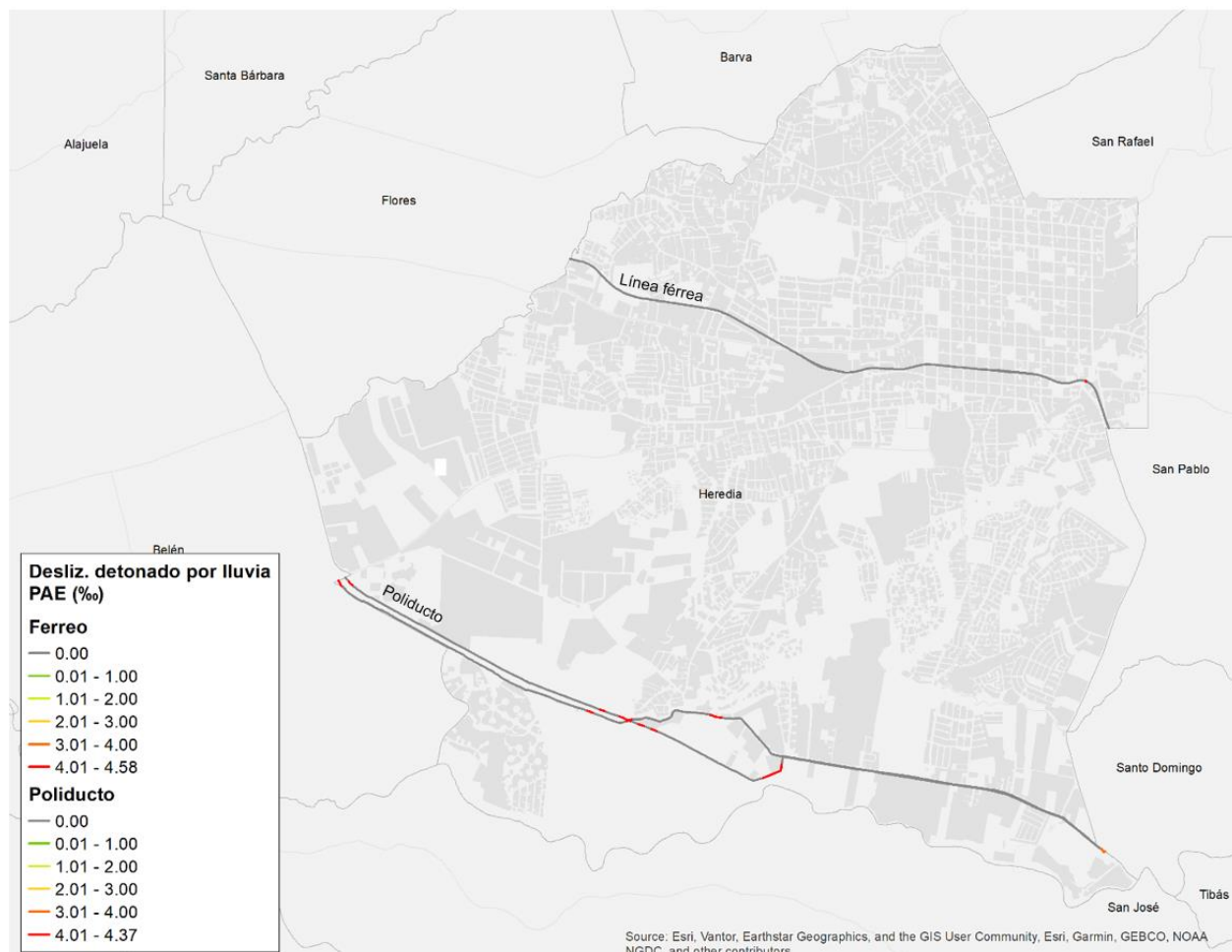


Figura 49. Pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por lluvia para el sector férreo e hidrocarburos en el cantón de Heredia

Los mapas de PAE por ubicación para el sector férreo e hidrocarburos muestran una distribución espacial altamente concentrada, donde las pérdidas se agrupan en segmentos puntuales del trazado lineal de ambos sistemas. En el caso del sismo, las pérdidas esperadas tienden a distribuirse de manera relativamente continua a lo largo de la infraestructura, reflejando el carácter regional de la amenaza sísmica, aunque con concentraciones en tramos donde la vulnerabilidad estructural o condiciones locales incrementan el daño esperado. Para deslizamientos detonados por sismo, la espacialización se vuelve más discreta y dependiente del relieve, evidenciando puntos críticos asociados a pendiente y susceptibilidad geotécnica.

En el caso de inundación fluvial y, especialmente, de deslizamientos detonados por lluvia, los mapas muestran patrones más localizados y dominados por corredores específicos. La inundación fluvial concentra pérdidas en zonas próximas a cauces principales y planicies de desborde, aunque con impacto nulo en el poliducto. Por su parte, los deslizamientos por lluvia generan los focos más relevantes de pérdida anual en la infraestructura de hidrocarburos, coherentes con los valores elevados de PAE reportados en la tabla y con la sensibilidad climática observada en las curvas de PML. Dado que ambos sectores se representan conjuntamente, la cartografía evidencia cómo el riesgo anual está estructurado

por un subconjunto reducido de ubicaciones donde convergen exposición lineal, pendientes críticas y forzamientos hidrometeorológicos capaces de inducir fallas recurrentes.

### 5.2.3 Sector eléctrico

Para el sector eléctrico, se presentan resultados para dos subsectores: generación y transmisión, y distribución. Esto facilita la visualización de los resultados del sector, dado que las escalas geográficas de estos subsectores son diferentes.

#### 5.2.3.1 Pérdida Anual Esperada (PAE)

La Tabla 13 presenta los valores de PAE por clima para generación y transmisión, mientras que la Tabla 14 presenta los valores de PAE para distribución eléctrica, estos valores de PAE reflejan únicamente el componente físico de los activos evaluados y no tienen en cuenta posibles fluctuaciones o interrupciones en los servicios prestados. Con el fin de limitar la extensión del documento, se presentan únicamente el clima base y los climas que producen la máxima y mínima PAE para el caso de las amenazas hidrometeorológicas. La Figura 50 presenta esta misma información de manera gráfica y agrupada para todo el sector eléctrico.

Tabla 13. Pérdida anual esperada por amenaza y clima en el sector eléctrico – Generación y transmisión. Valores en millones de colones costarricenses (CRC)

| Portafolio                  |           | Plantas de generación |         | Subestaciones    |         | Torres de transmisión |         | Circuitos de transmisión |         |
|-----------------------------|-----------|-----------------------|---------|------------------|---------|-----------------------|---------|--------------------------|---------|
| Valor expuesto              |           | \$28,867,904,000.00   |         | \$649,373,800.00 |         | \$2,141,500,000.00    |         | \$90,268,400.00          |         |
| Amenaza                     | Escenario | PAE (CRC)             | PAE (‰) | PAE (CRC)        | PAE (‰) | PAE (CRC)             | PAE (‰) | PAE (CRC)                | PAE (‰) |
| Sismo                       |           | \$51,687,082.30       | 1.79    | \$3,307,840.40   | 5.09    | \$857,672.70          | 0.40    | \$6,235.60               | 0.07    |
| Inundación fluvial          | Base      | \$11,429,406.60       | 0.40    | \$199,390.50     | 0.31    | \$0.00                | 0.00    | \$0.00                   | 0.00    |
|                             | Min. 2035 | \$10,707,485.03       | 0.37    | \$186,778.13     | 0.29    | \$0.00                | 0.00    | \$0.00                   | 0.00    |
|                             | Max. 2035 | \$13,432,347.39       | 0.47    | \$234,396.57     | 0.36    | \$0.00                | 0.00    | \$0.00                   | 0.00    |
|                             | Min. 2050 | \$10,497,753.47       | 0.36    | \$183,114.48     | 0.28    | \$0.00                | 0.00    | \$0.00                   | 0.00    |
|                             | Max. 2050 | \$14,819,226.78       | 0.51    | \$258,647.35     | 0.40    | \$0.00                | 0.00    | \$0.00                   | 0.00    |
|                             | Min. 2100 | \$9,415,532.37        | 0.33    | \$164,213.33     | 0.25    | \$0.00                | 0.00    | \$0.00                   | 0.00    |
|                             | Max. 2010 | \$13,764,777.94       | 0.48    | \$240,208.51     | 0.37    | \$0.00                | 0.00    | \$0.00                   | 0.00    |
| Inundación pluvial          | Base      | \$100,926.30          | 0.00    | \$15,260.30      | 0.02    | \$0.00                | 0.00    | \$0.00                   | 0.00    |
|                             | Min. 2035 | \$94,372.74           | 0.00    | \$14,269.37      | 0.02    | \$0.00                | 0.00    | \$0.00                   | 0.00    |
|                             | Max. 2035 | \$119,238.37          | 0.00    | \$18,029.11      | 0.03    | \$0.00                | 0.00    | \$0.00                   | 0.00    |
|                             | Min. 2050 | \$92,473.42           | 0.00    | \$13,982.19      | 0.02    | \$0.00                | 0.00    | \$0.00                   | 0.00    |
|                             | Max. 2050 | \$132,030.57          | 0.00    | \$19,963.32      | 0.03    | \$0.00                | 0.00    | \$0.00                   | 0.00    |
|                             | Min. 2100 | \$82,705.77           | 0.00    | \$12,505.30      | 0.02    | \$0.00                | 0.00    | \$0.00                   | 0.00    |
|                             | Max. 2010 | \$122,296.19          | 0.00    | \$18,491.46      | 0.03    | \$0.00                | 0.00    | \$0.00                   | 0.00    |
| Desliz. detonado por sismo  |           | \$0.00                | 0.00    | \$0.00           | 0.00    | \$852,767.60          | 0.40    | \$34,144.40              | 0.38    |
| Desliz. detonado por lluvia | Base      | \$0.00                | 0.00    | \$0.00           | 0.00    | \$3,267,481.80        | 1.53    | \$119,422.40             | 1.32    |
|                             | Min. 2035 | \$0.00                | 0.00    | \$0.00           | 0.00    | \$3,116,467.76        | 1.46    | \$113,899.76             | 1.26    |
|                             | Max. 2035 | \$0.00                | 0.00    | \$0.00           | 0.00    | \$3,518,296.46        | 1.64    | \$128,414.89             | 1.42    |
|                             | Min. 2050 | \$0.00                | 0.00    | \$0.00           | 0.00    | \$2,900,756.02        | 1.35    | \$106,214.76             | 1.18    |
|                             | Max. 2050 | \$0.00                | 0.00    | \$0.00           | 0.00    | \$3,670,592.72        | 1.71    | \$134,006.83             | 1.48    |
|                             | Min. 2100 | \$0.00                | 0.00    | \$0.00           | 0.00    | \$2,066,882.41        | 0.97    | \$75,995.50              | 0.84    |
|                             | Max. 2010 | \$0.00                | 0.00    | \$0.00           | 0.00    | \$3,732,046.41        | 1.74    | \$137,522.95             | 1.52    |

Tabla 14. Pérdida anual esperada por amenaza y clima en el sector eléctrico - Distribución. Valores en millones de colones costarricenses (CRC)

| Portafolio                         |                  | Postes           |         | Transformadores  |         | Circuitos de distribución |         |
|------------------------------------|------------------|------------------|---------|------------------|---------|---------------------------|---------|
| Valor expuesto                     |                  | \$ 7,001,686,300 |         | \$ 3,668,666,000 |         | \$ 3,102,548,600          |         |
| Amenaza                            | Escenario        | PAE (CRC)        | PAE (‰) | PAE (CRC)        | PAE (‰) | PAE (CRC)                 | PAE (‰) |
| <i>Sismo</i>                       |                  | \$ 4,743,298     | 0.68    | \$ 2,901,890     | 0.79    | \$ 625,390                | 0.20    |
| <i>Inundación fluvial</i>          | <i>Base</i>      | \$ -             | 0.00    | \$ 1,188,686     | 0.32    | \$ -                      | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$ -             | 0.00    | \$ 1,114,049     | 0.30    | \$ -                      | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$ -             | 0.00    | \$ 1,395,446     | 0.38    | \$ -                      | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$ -             | 0.00    | \$ 1,092,354     | 0.30    | \$ -                      | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$ -             | 0.00    | \$ 1,538,334     | 0.42    | \$ -                      | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$ -             | 0.00    | \$ 980,326       | 0.27    | \$ -                      | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2010</i> | \$ -             | 0.00    | \$ 1,429,716     | 0.39    | \$ -                      | 0.00    |
| <i>Inundación pluvial</i>          | <i>Base</i>      | \$ -             | 0.00    | \$ -             | 0.00    | \$ -                      | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$ -             | 0.00    | \$ -             | 0.00    | \$ -                      | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$ -             | 0.00    | \$ -             | 0.00    | \$ -                      | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$ -             | 0.00    | \$ -             | 0.00    | \$ -                      | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$ -             | 0.00    | \$ -             | 0.00    | \$ -                      | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$ -             | 0.00    | \$ -             | 0.00    | \$ -                      | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2010</i> | \$ -             | 0.00    | \$ -             | 0.00    | \$ -                      | 0.00    |
| <i>Desliz. detonado por sismo</i>  |                  | \$ 213,529       | 0.03    | \$ 92,629        | 0.03    | \$ 104,421                | 0.03    |
| <i>Desliz. detonado por lluvia</i> | <i>Base</i>      | \$ 1,186,274     | 0.17    | \$ 386,221       | 0.11    | \$ 430,901                | 0.14    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$ 1,173,880     | 0.17    | \$ 372,311       | 0.10    | \$ 415,713                | 0.13    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$ 1,279,928     | 0.18    | \$ 389,358       | 0.11    | \$ 448,325                | 0.14    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$ 1,126,839     | 0.16    | \$ 341,016       | 0.09    | \$ 387,095                | 0.12    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$ 1,287,935     | 0.18    | \$ 377,183       | 0.10    | \$ 435,914                | 0.14    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$ 945,807       | 0.14    | \$ 235,205       | 0.06    | \$ 267,246                | 0.09    |
|                                    | <i>Max. 2010</i> | \$ 1,274,858     | 0.18    | \$ 398,746       | 0.11    | \$ 457,290                | 0.15    |

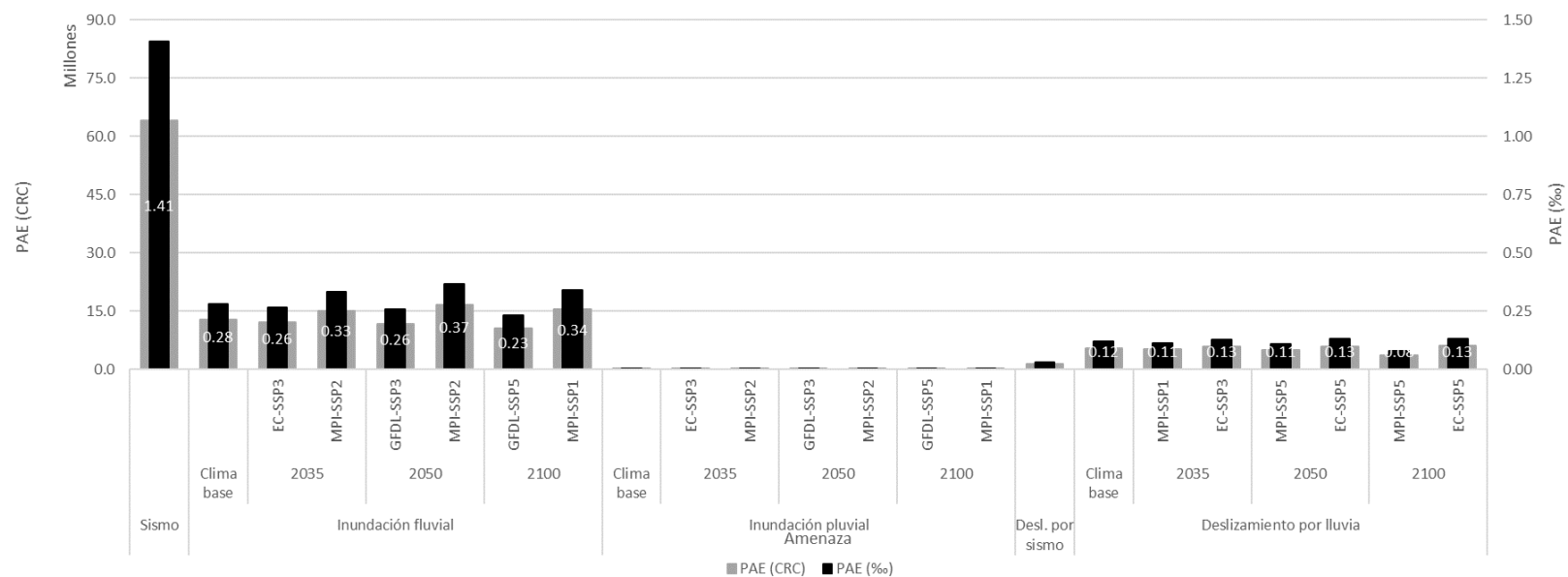


Figura 50. Pérdida anual esperada por amenaza para el sector eléctrico

Los resultados de Pérdida Anual Esperada (PAE) para generación y transmisión evidencian contrastes importantes entre los distintos tipos de activo dentro del sistema eléctrico. En las plantas de generación, el sismo constituye el principal contribuyente anual, con una PAE cercana a 51.7 millones CRC ( $\approx 1.79\%$ ), superando ampliamente las pérdidas esperadas por inundación fluvial, que se sitúan en rangos de 9.4 a 14.8 millones CRC según el clima considerado. Las subestaciones presentan un comportamiento similar pero con pérdidas absolutas menores y pérdidas relativas mayores, destacándose el sismo con 3.3 millones CRC ( $\approx 5.09\%$ ), mientras que la inundación fluvial aporta valores mucho más reducidos. En contraste, la infraestructura lineal de transmisión (torres y circuitos) muestra una contribución significativa de procesos de ladera, particularmente en deslizamientos detonados por lluvia, con pérdidas esperadas del orden de 3.1–3.7 millones CRC para torres ( $\approx 1.5\text{--}1.7\%$ ) y 0.076–0.138 millones CRC para circuitos ( $\approx 0.8\text{--}1.5\%$ ).

En el subsector de distribución, el perfil anual esperado está dominado por activos más dispersos territorialmente, con magnitudes menores, pero con aportes multiamenaza más equilibrados. Los postes presentan pérdidas anuales sísmicas cercanas a 4.74 millones CRC ( $\approx 0.68\%$ ), mientras que transformadores alcanzan 2.9 millones CRC ( $\approx 0.79\%$ ). Para inundación fluvial, el riesgo aparece concentrado principalmente en transformadores, con valores del orden de 1.0–1.5 millones CRC, mientras que postes y circuitos no muestran contribución relevante. Adicionalmente, los deslizamientos detonados por lluvia aportan pérdidas esperadas consistentes para los tres tipos de activo, con rangos típicos entre 0.24 y 1.29 millones CRC, reflejando la sensibilidad del sistema de distribución a condiciones geomorfológicas locales bajo escenarios climáticos alternativos.

#### 5.2.3.2 Pérdida Máxima Probable (PML)

La Figura 51 muestra las curvas de PML para el sector eléctrico completo, ante las amenazas consideradas.

Las curvas de PML para el sector eléctrico permiten caracterizar cómo distintas amenazas controlan la severidad de pérdidas en el dominio de eventos extremos, diferenciando además el efecto de la incertidumbre climática en los procesos hidrometeorológicos. En el caso del sismo, las curvas presentan un incremento progresivo hacia periodos de retorno elevados, consistente con una amenaza regional que impacta simultáneamente activos concentrados de alto valor, como plantas y subestaciones. Los deslizamientos detonados por sismo introducen un patrón adicional de excedencia asociado a fallas localizadas, particularmente relevante para infraestructura de transmisión en ladera, donde el daño extremo depende de la interacción entre sacudida y susceptibilidad del terreno.

Para inundación fluvial y deslizamientos detonados por lluvia, el abanico de pérdidas excedentes es especialmente visible en el componente de transmisión. En inundación fluvial, la variabilidad climática se manifiesta principalmente en activos puntuales (plantas y subestaciones), donde los escenarios máximos desplazan las pérdidas hacia valores más altos en distintos niveles de excedencia. En deslizamientos por lluvia, la dispersión entre curvas es más marcada en torres y circuitos de transmisión, indicando que los extremos climáticos futuros amplifican el rango plausible de pérdidas severas. En conjunto, las curvas muestran que las colas de pérdida del sector eléctrico están estructuradas por la combinación de activos concentrados sensibles a sismo y activos lineales expuestos a procesos de ladera condicionados por clima.

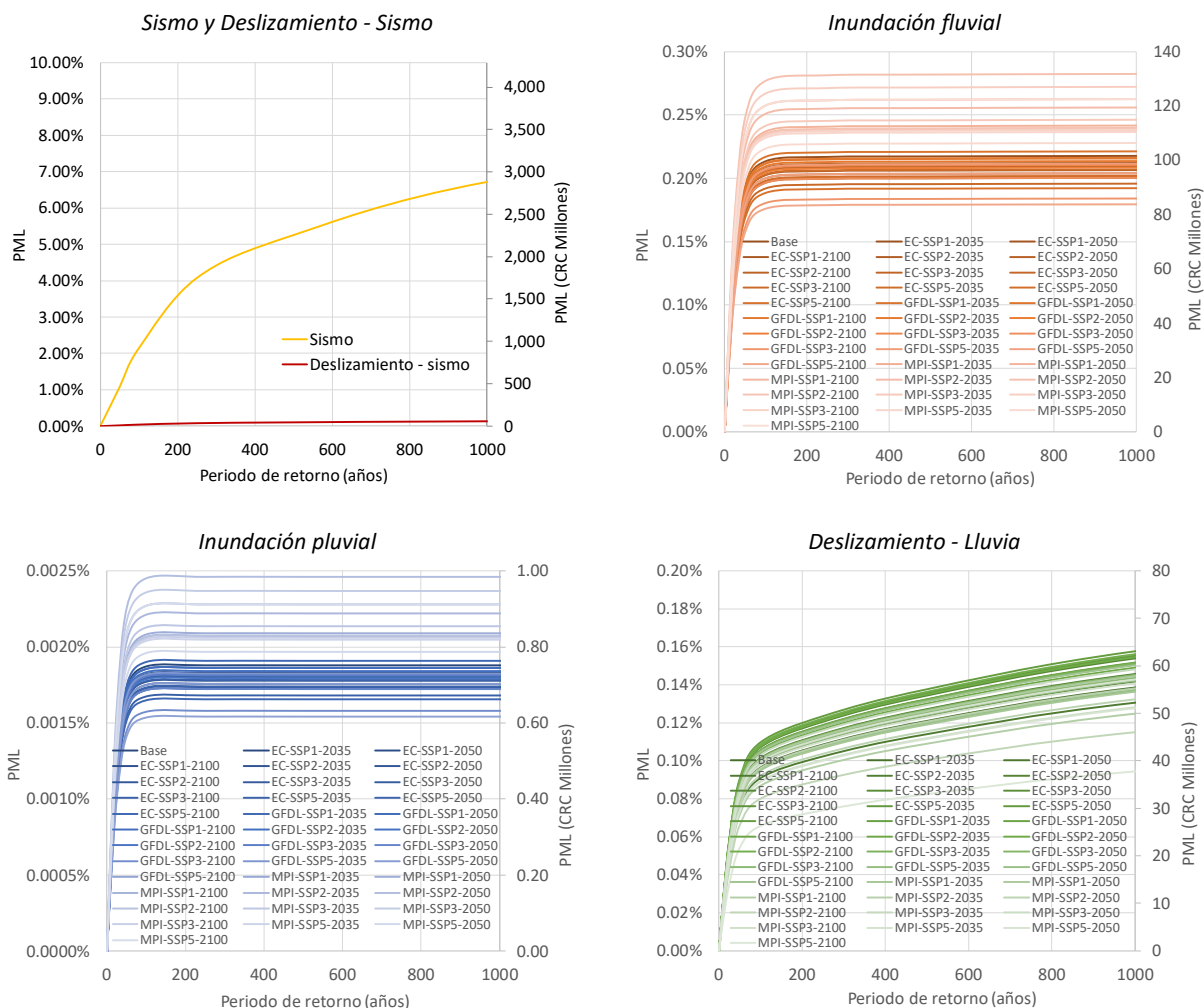


Figura 51. Curvas de PML para todas las amenazas consideradas y todos los climas. Sector eléctrico

### 5.2.3.3 Pérdidas por ubicación

De la Figura 52 a la Figura 56 se presentan las PAE por elemento en el portafolio de generación y transmisión, mientras que de la Figura 57 a la Figura 60 se presentan para distribución.

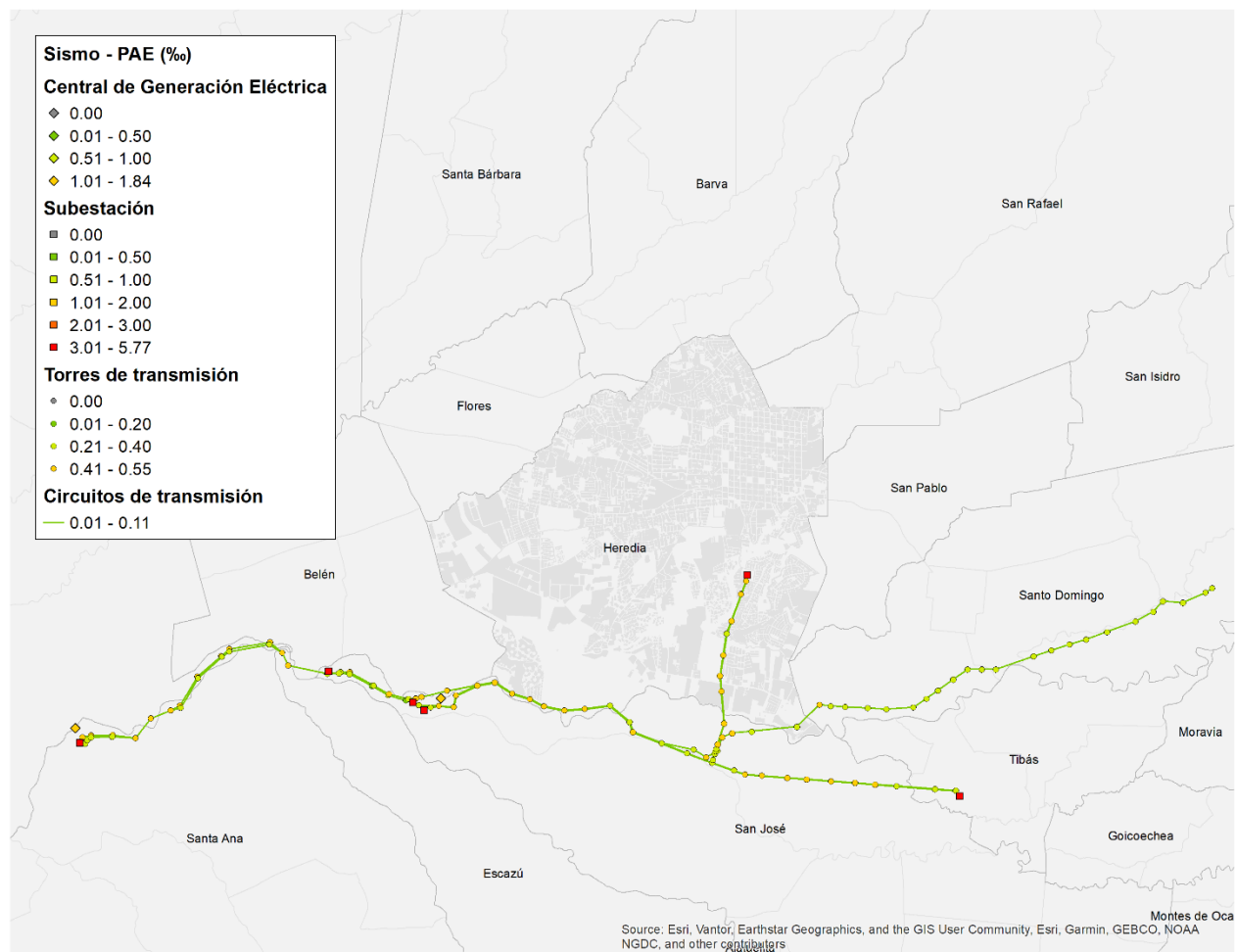


Figura 52. Pérdida anual esperada por sismo para el sector eléctrico – generación y transmisión - en el cantón de Heredia

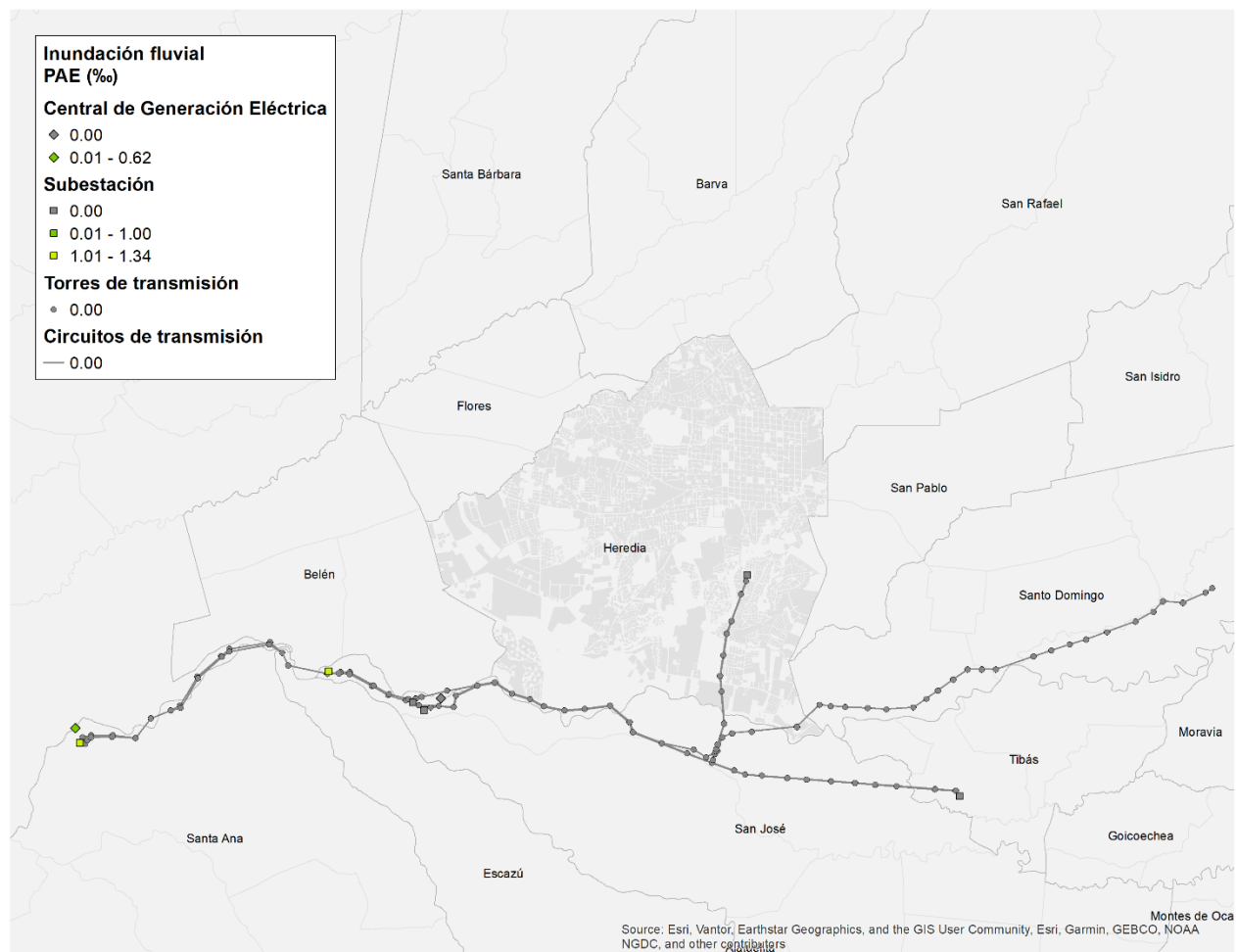


Figura 53. Pérdida anual esperada por inundación fluvial para el sector eléctrico – generación y transmisión - en el cantón de Heredia

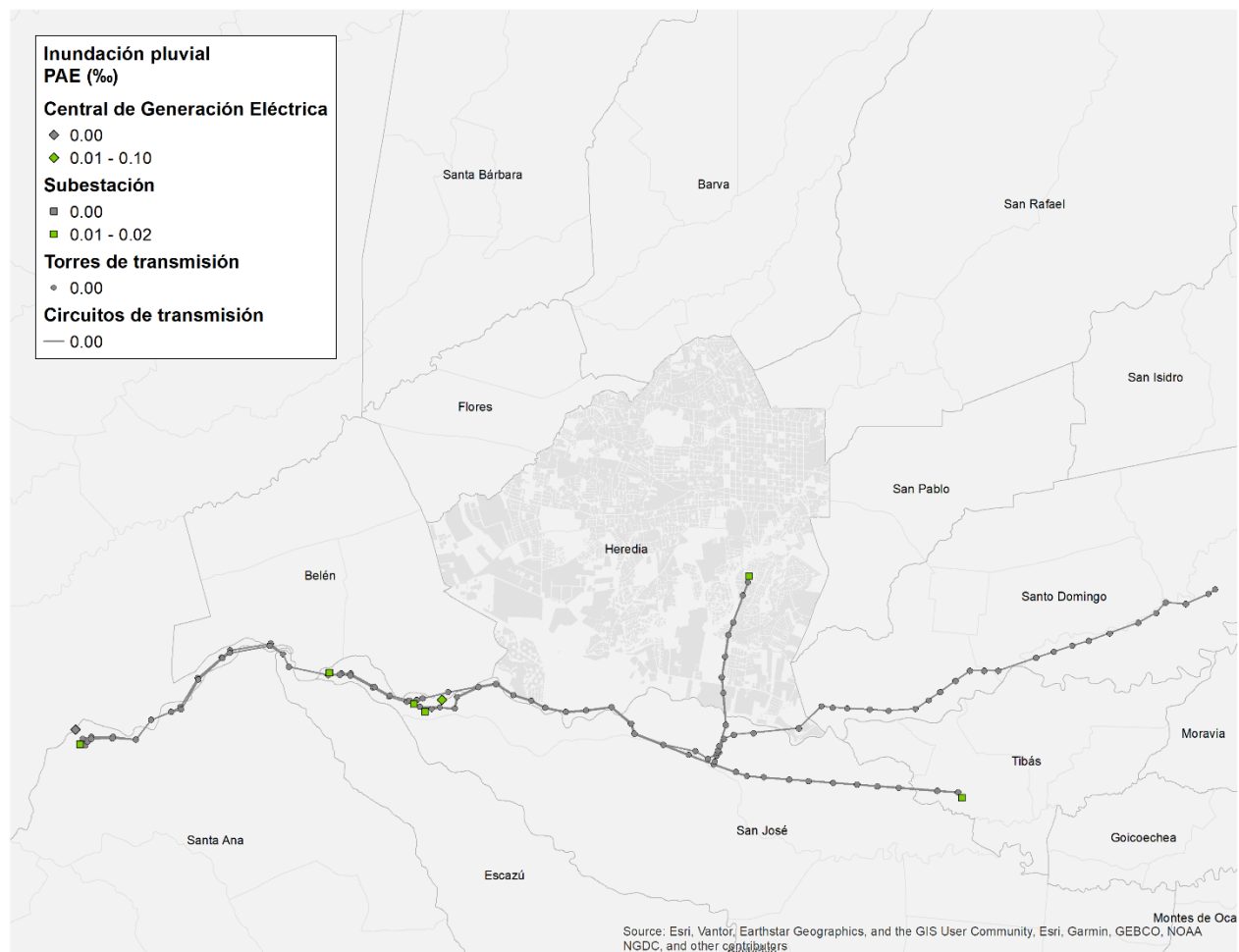


Figura 54. Pérdida anual esperada por inundación pluvial para el sector eléctrico – generación y transmisión - en el cantón de Heredia

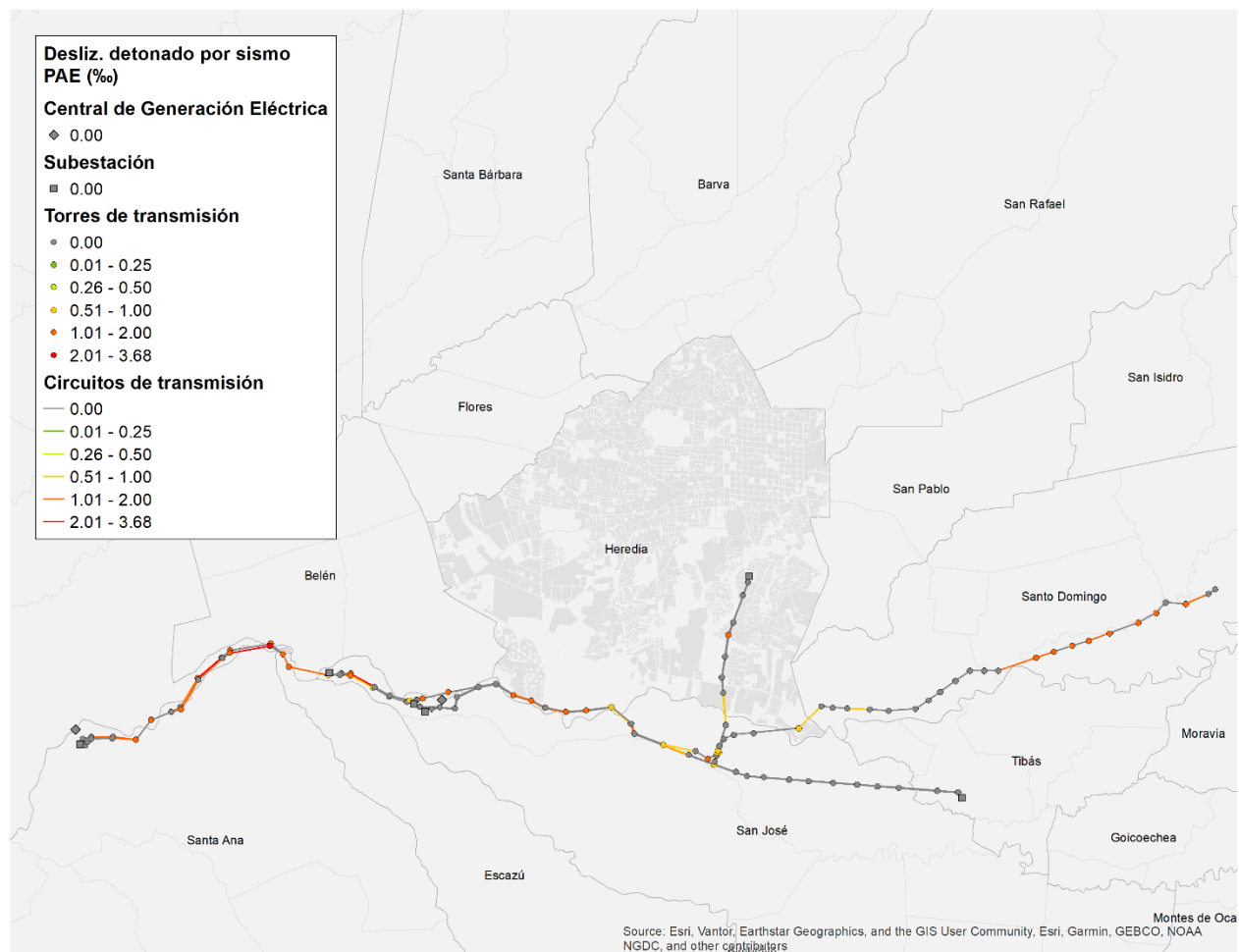


Figura 55. Pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por sismo para el sector eléctrico – generación y transmisión - en el cantón de Heredia

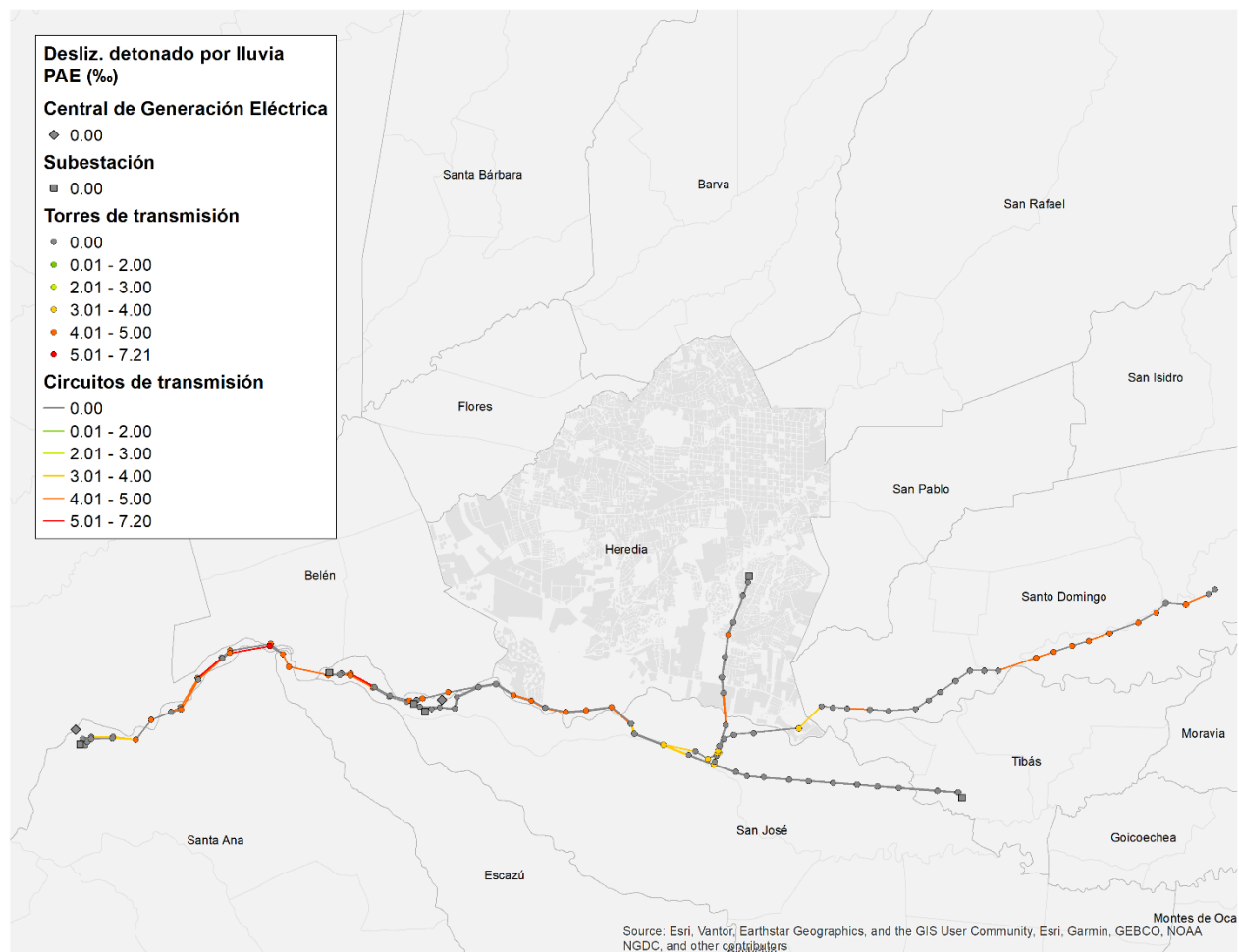


Figura 56. Pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por lluvia para el sector eléctrico – generación y transmisión - en el cantón de Heredia

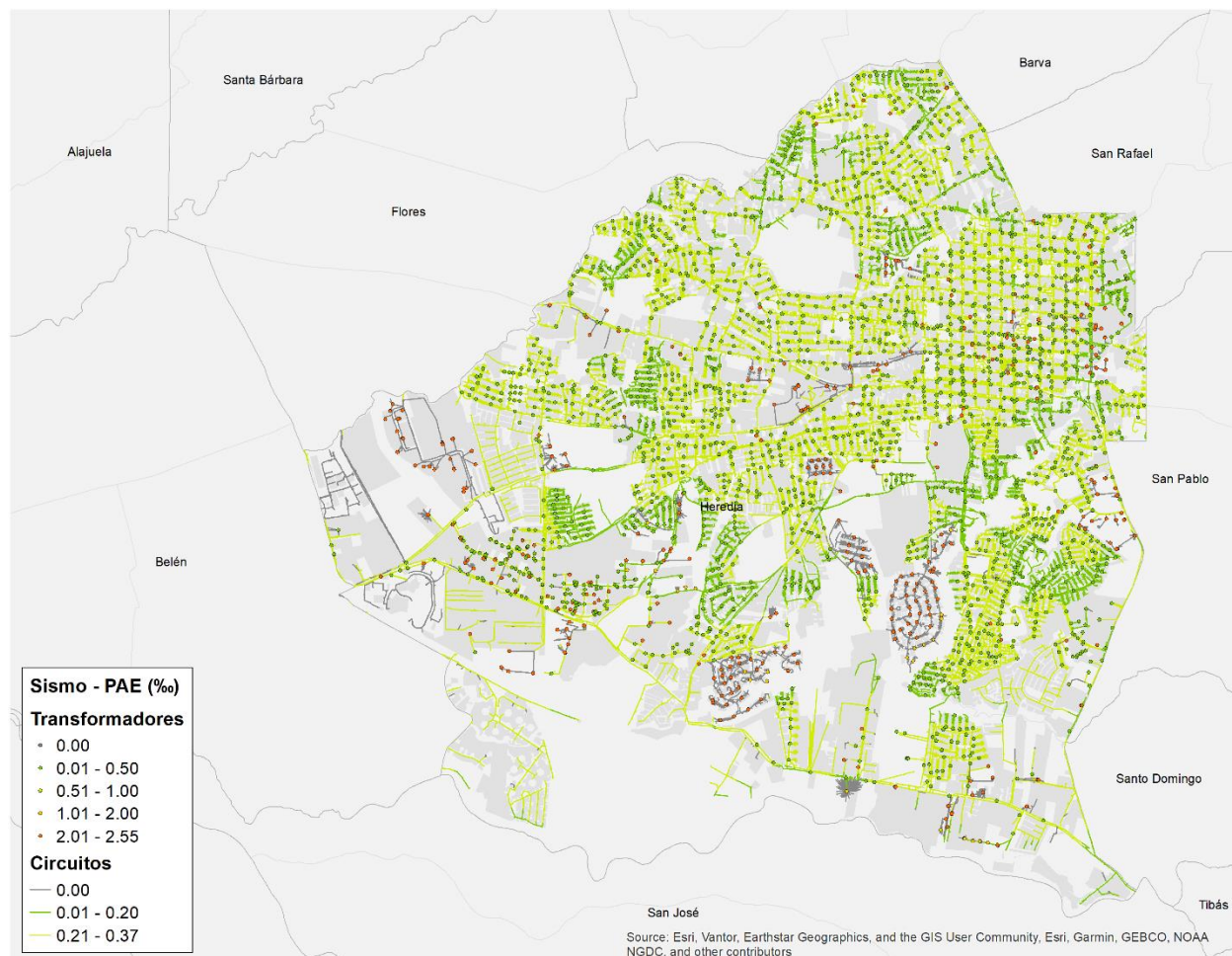


Figura 57. Pérdida anual esperada por sismo para el sector eléctrico – distribución - en el cantón de Heredia

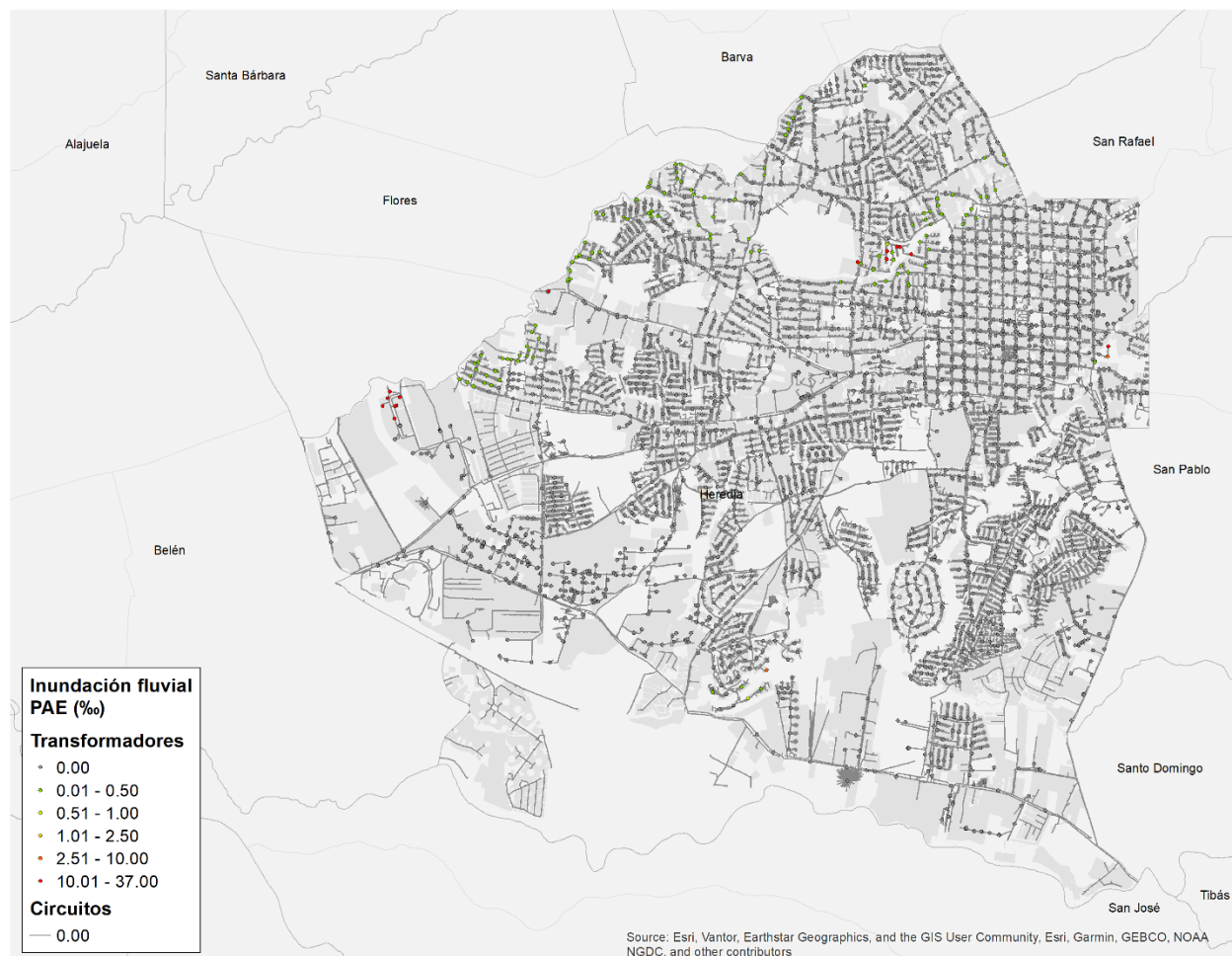


Figura 58. Pérdida anual esperada por inundación fluvial para el sector eléctrico – distribución - en el cantón de Heredia

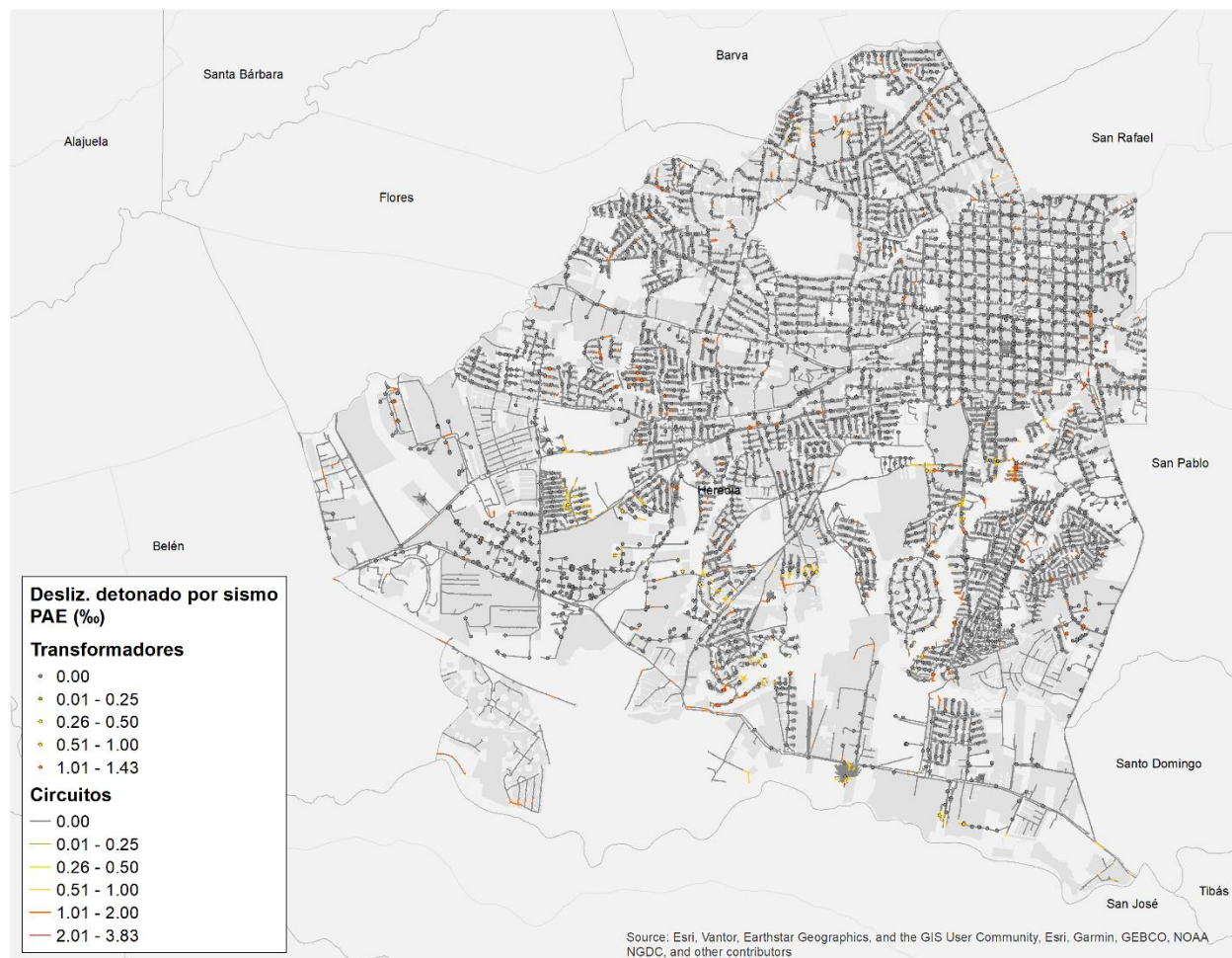


Figura 59. Pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por sismo para el sector eléctrico – distribución - en el cantón de Heredia

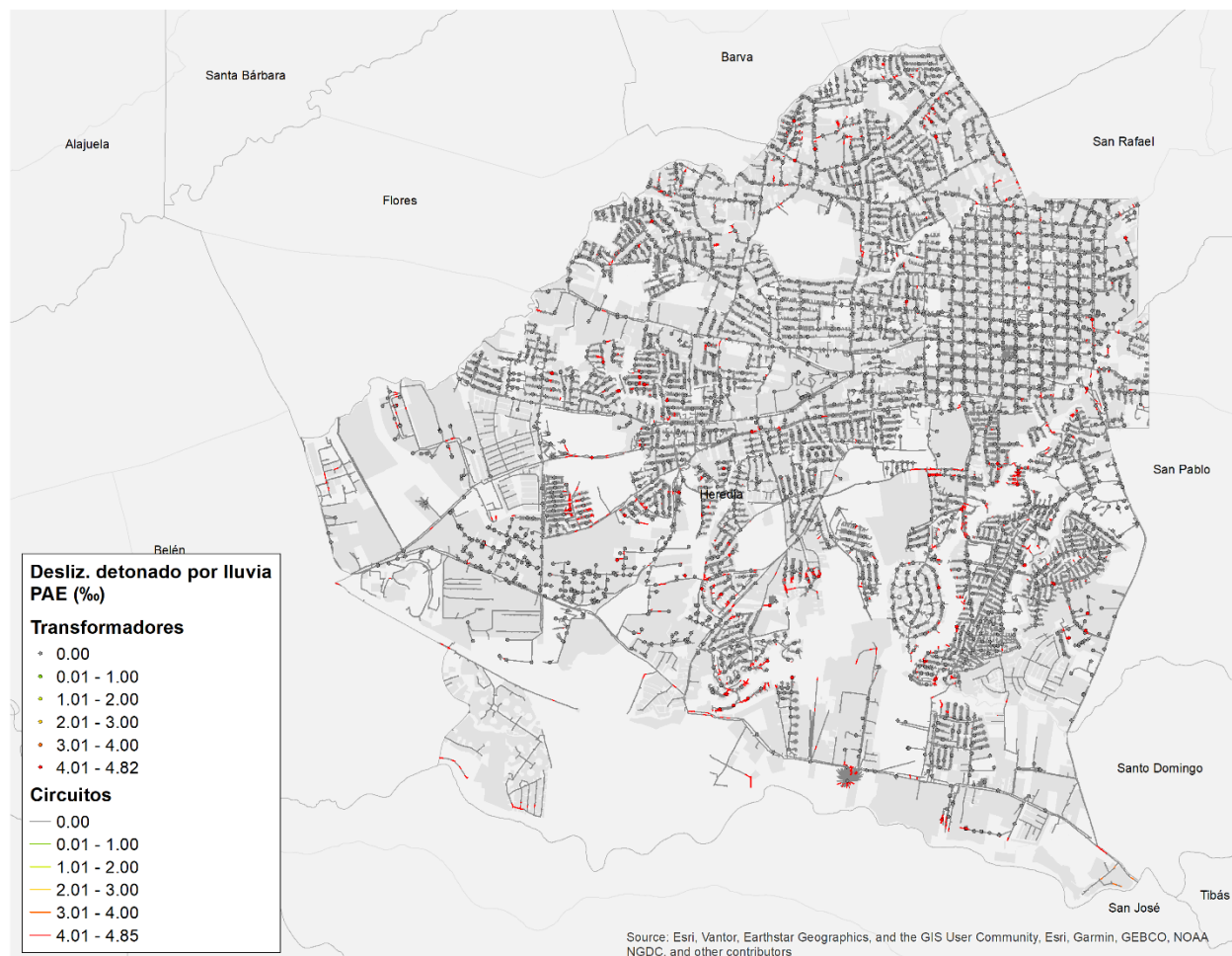


Figura 60. Pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por lluvia para el sector eléctrico – distribución - en el cantón de Heredia

Los mapas de PAE por ubicación para generación y transmisión muestran que el riesgo sísmico se organiza principalmente alrededor de nodos estratégicos del sistema, como plantas y subestaciones, donde se concentran valores esperados más elevados debido a la acumulación de valor expuesto. En inundación fluvial, la cartografía evidencia una focalización aún más marcada en sectores específicos del cantón asociados a cercanía a cauces y zonas bajas, afectando predominantemente infraestructura puntual. En contraste, los mapas de deslizamientos detonados por lluvia exhiben un patrón más lineal y segmentado, destacando tramos de transmisión donde la interacción pendiente–precipitación genera contribuciones anuales dominantes, coherentes con los valores elevados de PAE reportados para torres y circuitos.

En el caso de la distribución, los mapas reflejan una dispersión territorial mucho mayor, dado que postes, transformadores y circuitos se encuentran ampliamente distribuidos en el tejido urbano y periurbano. El riesgo sísmico aparece relativamente extendido, con pérdidas esperadas moderadas pero continuas. Para inundación fluvial, los focos se restringen a transformadores en zonas puntuales, mientras que los deslizamientos, tanto por sismo como por lluvia, generan concentraciones en sectores de ladera que afectan simultáneamente varios elementos de la red secundaria. En conjunto, la representación espacial

del sector eléctrico evidencia la coexistencia de pérdidas altamente nodales en generación/transmisión y pérdidas más difusas, pero territorialmente extensas en distribución, con patrones diferenciados por tipo de amenaza.

## 5.2.4 Sector comunicaciones

### 5.2.4.1 Pérdida Anual Esperada (PAE)

La Tabla 15 presenta los valores de PAE para el sector de comunicaciones, estos valores de PAE reflejan únicamente el componente físico de los activos evaluados y no tienen en cuenta posibles fluctuaciones o interrupciones en los servicios prestados. Con el fin de limitar la extensión del documento, se presentan únicamente el clima base y los climas que producen la máxima y mínima PAE para el caso de las amenazas hidrometeorológicas. La Figura 61 presenta esta misma información de manera gráfica.

Tabla 15. Pérdida anual esperada por amenaza y clima en el sector comunicaciones. Valores en millones de colones costarricenses (CRC)

| Portafolio                         |                  | Antenas          |         |
|------------------------------------|------------------|------------------|---------|
| Valor expuesto                     |                  | \$ 2,230,418,300 |         |
| Amenaza                            | Escenario        | PAE (CRC)        | PAE (‰) |
| <i>Sismo</i>                       |                  | \$ 1,454,168     | 0.65    |
| <i>Inundación fluvial</i>          | <i>Base</i>      | \$ 191,002       | 0.09    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$ 179,004       | 0.08    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$ 224,241       | 0.10    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$ 175,517       | 0.08    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$ 247,215       | 0.11    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$ 157,510       | 0.07    |
|                                    | <i>Max. 2010</i> | \$ 229,751       | 0.10    |
| <i>Inundación pluvial</i>          | <i>Base</i>      | \$ -             | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$ -             | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$ -             | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$ -             | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$ -             | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$ -             | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2010</i> | \$ -             | 0.00    |
| <i>Desliz. detonado por sismo</i>  |                  | \$ -             | 0.00    |
| <i>Desliz. detonado por lluvia</i> | <i>Base</i>      | \$ 558,029       | 0.25    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$ 552,377       | 0.25    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$ 670,273       | 0.30    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$ 534,201       | 0.24    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$ 670,626       | 0.30    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$ 534,630       | 0.24    |
|                                    | <i>Max. 2010</i> | \$ 885,049       | 0.40    |

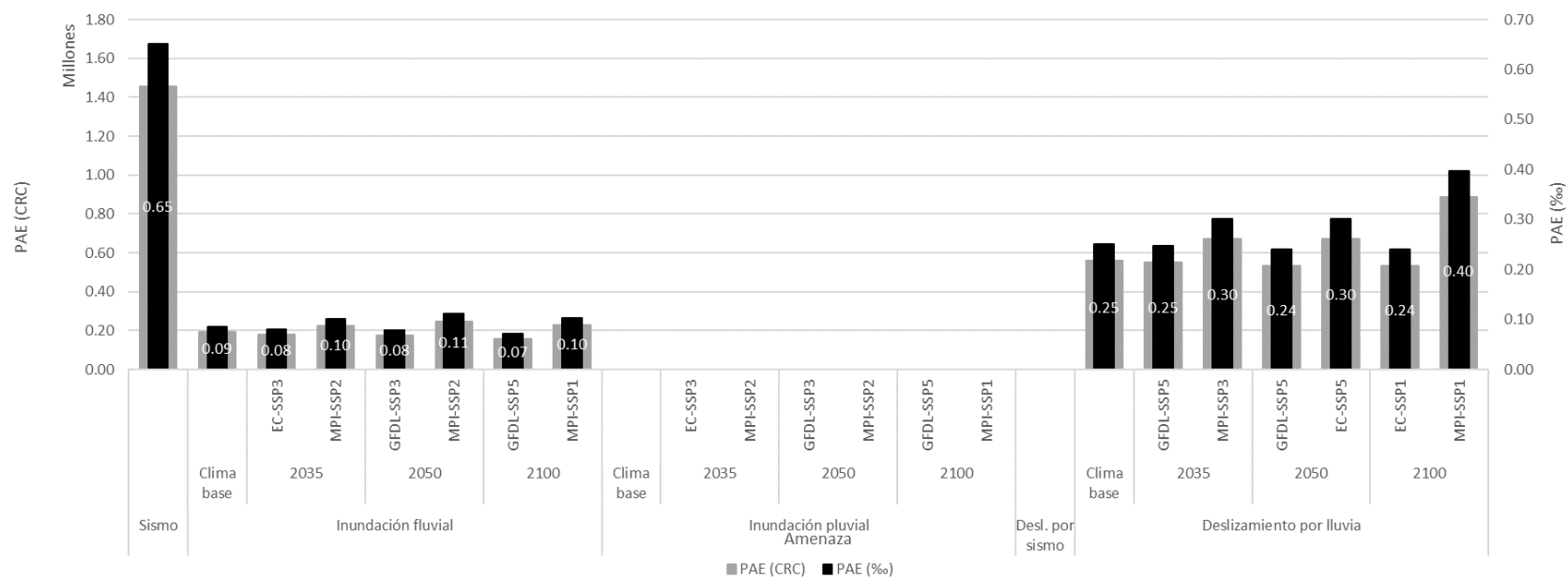


Figura 61. Pérdida anual esperada por amenaza para el sector comunicaciones

Los resultados del portafolio de antenas, muestran un perfil de pérdidas anuales relativamente bajo en magnitud absoluta, consistente con el tamaño del valor expuesto del subsector ( $\approx 2.23$  miles de millones CRC). El sismo constituye el principal contribuyente individual, con una PAE cercana a 1.45 millones CRC, equivalente a una pérdida relativa aproximada de 0.65%, lo cual lo posiciona como el mecanismo dominante dentro de las amenazas de carácter regional incluidas en el análisis. En comparación, la inundación fluvial presenta pérdidas esperadas mucho menores, del orden de 0.19 millones CRC en el escenario base, con variaciones moderadas entre climas mínimos y máximos.

Por otro lado, los deslizamientos detonados por lluvia representan un componente hidrometeorológico significativo en términos relativos, con una PAE base de 0.56 millones CRC ( $\approx 0.25\%$ ) y un rango que se amplía hacia valores máximos de hasta 0.89 millones CRC ( $\approx 0.40\%$ ) bajo el clima de mayor pérdida considerado. Este comportamiento evidencia que, aun cuando las pérdidas absolutas son moderadas, la sensibilidad climática en procesos de remoción en masa puede generar incrementos apreciables en el riesgo anual esperado del subsector. En contraste, tanto la inundación pluvial como los deslizamientos detonados por sismo resultan nulos en este portafolio, indicando ausencia de daño modelado o exposición relevante ante dichos mecanismos.

Si bien los valores de pérdida son bajos, no debe considerarse como despreciable el riesgo a este sector, dado que, como se mencionó en la sección 2.4, este análisis se limita al componente físico de los elementos (antenas) y no al servicio prestado, el cual posiblemente supere ampliamente los valores físicos directos de los elementos afectados.

#### 5.2.4.2 Pérdida Máxima Probable (PML)

La Figura 62 muestra las curvas de PML para el sector telecomunicaciones, ante las amenazas consideradas. No se incluye inundación pluvial pues el riesgo es nulo ante esta amenaza.

Las curvas de PML para el sector comunicaciones reflejan un conjunto reducido de amenazas dominantes, con exclusión explícita de la inundación pluvial debido a riesgo nulo. En el caso sísmico, la curva muestra el crecimiento progresivo de las pérdidas excedentes hacia periodos de retorno mayores, capturando el rol de eventos extremos regionales que afectan de manera simultánea elementos puntuales de alta importancia funcional. Para deslizamientos detonados por sismo, la curva asociada representa un aporte secundario, en coherencia con la ausencia de pérdidas anuales esperadas por este mecanismo, sugiriendo que no se identifican escenarios relevantes de afectación inducida por sacudida en las ubicaciones consideradas. En inundación fluvial, la dispersión entre curvas de PML por clima es moderada y se mantiene en un rango acotado, consistente con las bajas pérdidas anuales esperadas. Para deslizamientos por lluvia, la separación entre escenarios es más evidente, con curvas máximas desplazándose hacia pérdidas superiores en excedencias bajas y medias.

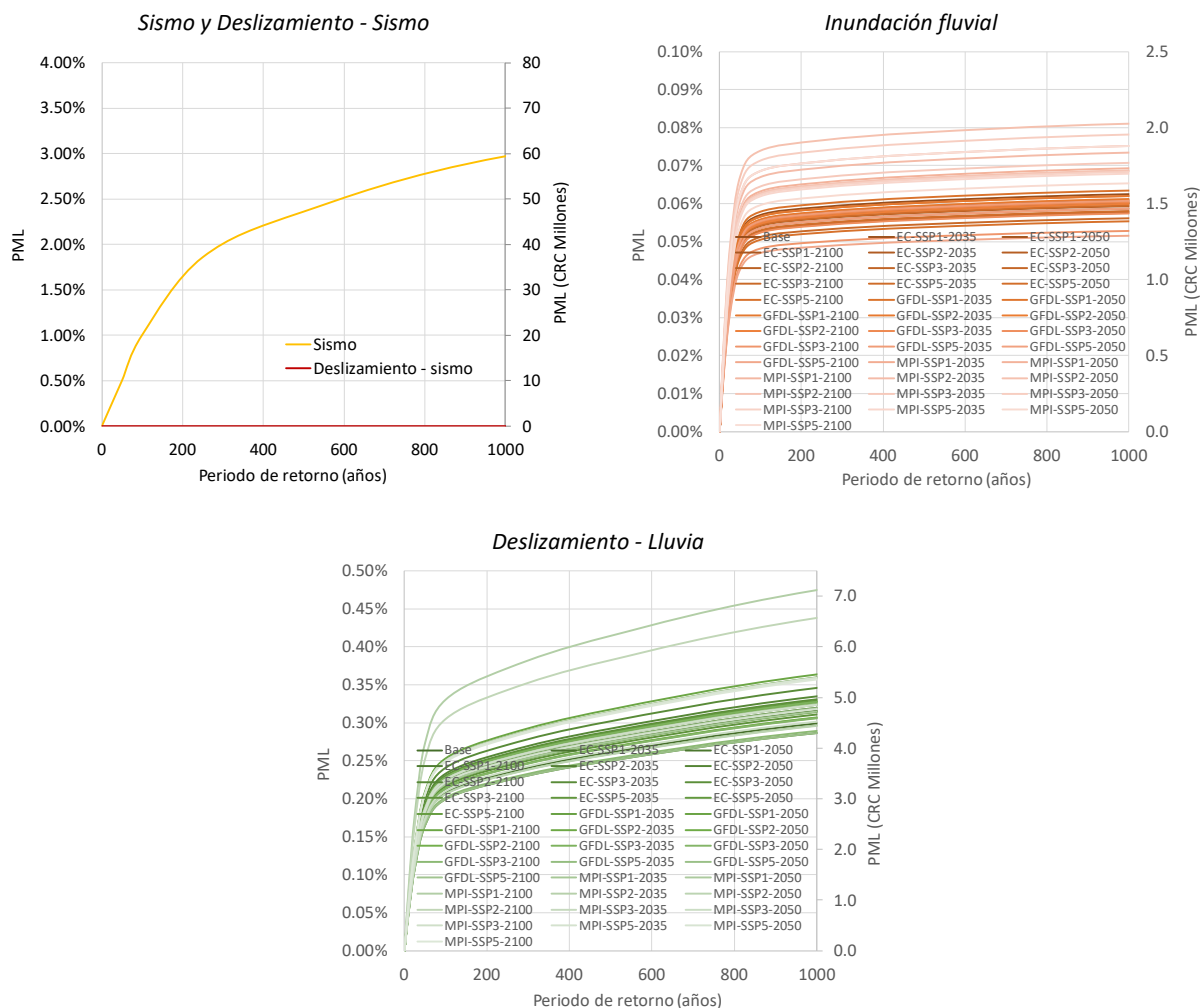


Figura 62. Curvas de PML para todas las amenazas consideradas y todos los climas. Sector comunicaciones

#### 5.2.4.3 Pérdidas por ubicación

La Figura 63 y Figura 64 se presentan los mapas de PAE por ubicación para el sector comunicaciones. No se incluyen los deslizamientos detonados por lluvia dado que las afectaciones se encuentran en el área rural, alejadas de la zona urbana del cantón.

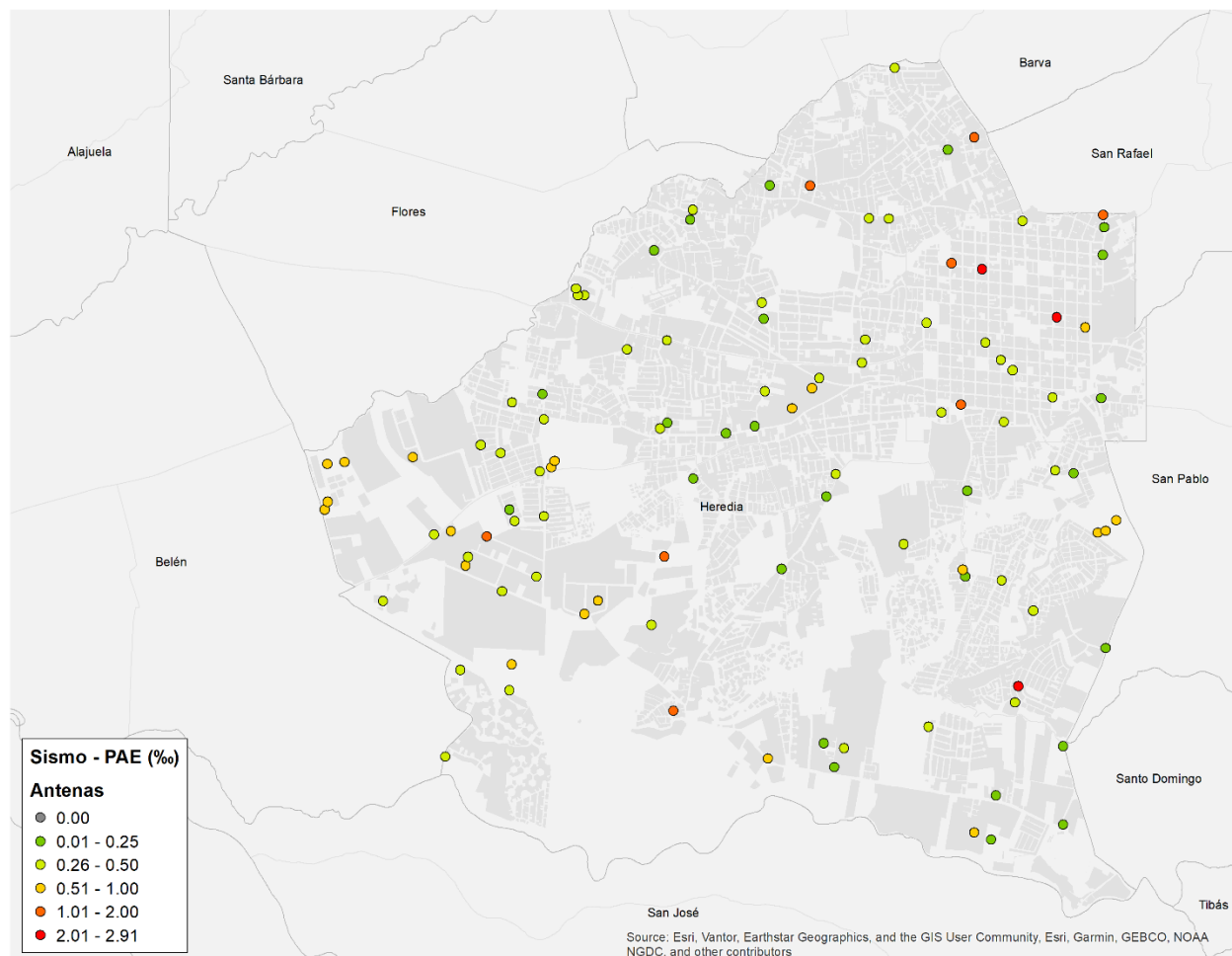


Figura 63. Pérdida anual esperada por sismo para el sector comunicaciones en el cantón de Heredia

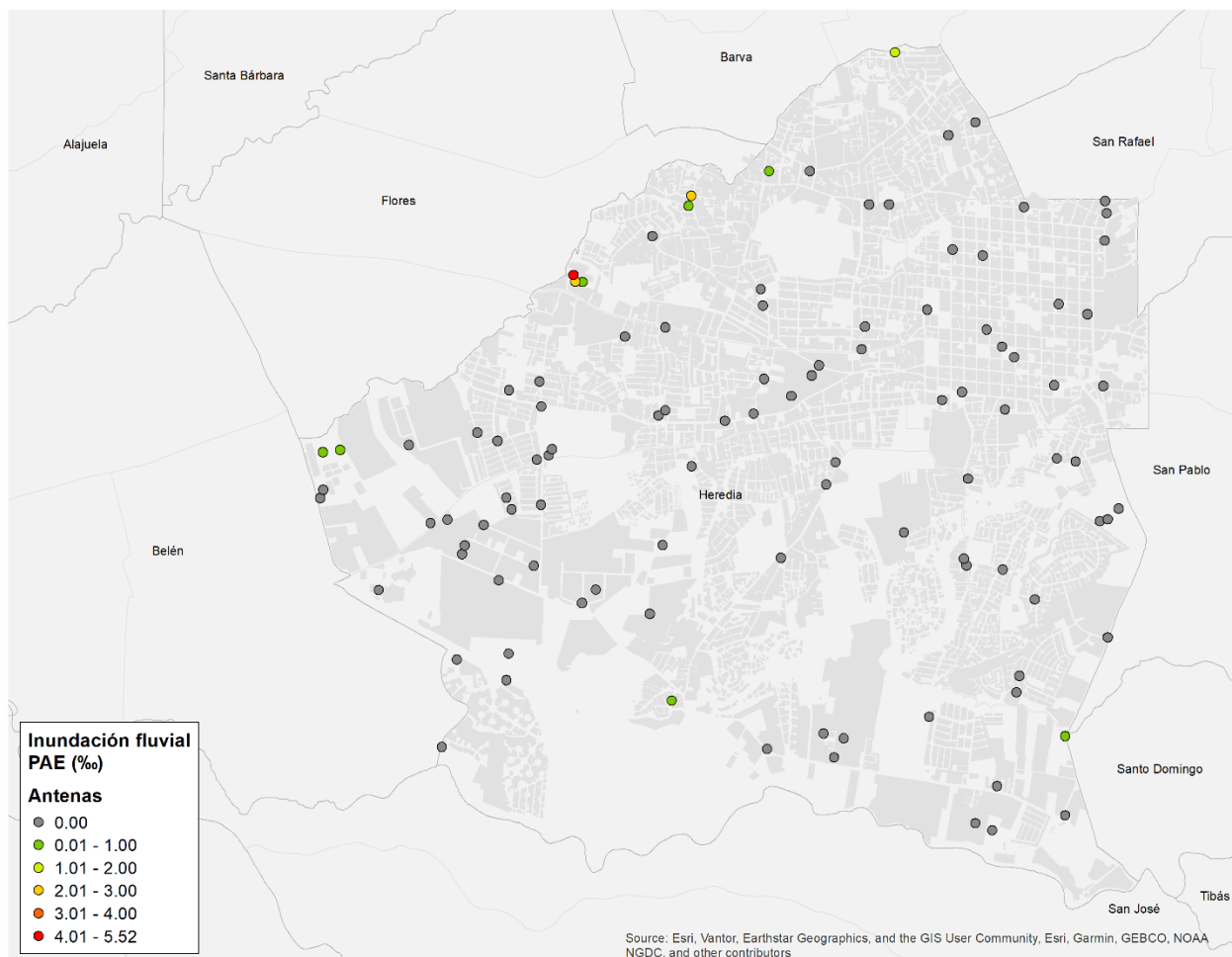


Figura 64. Pérdida anual esperada por inundación fluvial para el sector comunicaciones en el cantón de Heredia

Los mapas de PAE por ubicación para el sector comunicaciones muestran que las pérdidas sísmicas esperadas tienden a concentrarse en un número limitado de emplazamientos, reflejando la naturaleza puntual del portafolio de antenas dentro del cantón. Dado que estas infraestructuras suelen ubicarse estratégicamente en zonas elevadas o en nodos específicos de cobertura, el patrón espacial del riesgo sísmico no es difuso, sino estructurado alrededor de sitios discretos donde se concentra la mayor parte del valor expuesto y, por tanto, de la contribución anual esperada. En el caso de inundación fluvial, el mapa correspondiente evidencia una afectación aún más localizada, restringida a antenas situadas en proximidad a corredores fluviales o zonas bajas susceptibles de desborde.

### 5.2.5 Sector agua y saneamiento

Para el sector de agua y saneamiento, se presentan resultados de forma separa entre lo relacionado con agua potable y lo asociado al agua residual.

### 5.2.5.1 Pérdida Anual Esperada (PAE)

La Tabla 16 presenta los valores de PAE para el sector de agua potable, mientras que la Tabla 17 presenta estos valores para agua residual, estos valores de PAE reflejan únicamente el componente físico de los activos evaluados y no tienen en cuenta posibles fluctuaciones o interrupciones en los servicios prestados. Con el fin de limitar la extensión del documento, se presentan únicamente el clima base y los climas que producen la máxima y mínima PAE para el caso de las amenazas hidrometeorológicas. La Figura 65 y Figura 66 presentan esta misma información de manera gráfica.

Tabla 16. Pérdida anual esperada por amenaza y clima en el sector agua potable. Valores en millones de colones costarricenses (CRC)

| Portafolio                         |                  | Fuentes         |         | Tanques de almacenamiento |         | Sistemas de bombeo |         | Red de acueducto - Tuberías |         | Hidrantes     |         |
|------------------------------------|------------------|-----------------|---------|---------------------------|---------|--------------------|---------|-----------------------------|---------|---------------|---------|
| Valor expuesto                     |                  | \$4,459,000,000 |         | \$3,559,872,800           |         | \$1,069,286,400    |         | \$33,238,208,100.00         |         | \$673,965,600 |         |
| Ame.                               | Esc.             | PAE (CRC)       | PAE (‰) | PAE (CRC)                 | PAE (‰) | PAE (CRC)          | PAE (‰) | PAE (CRC)                   | PAE (‰) | PAE (CRC)     | PAE (‰) |
| <i>Sismo</i>                       |                  | \$2,233,336     | 0.50    | \$2,752,957               | 0.77    | \$1,406,269        | 1.32    | \$355,012                   | 0.01    | \$0           | 0.00    |
| <i>Inundación fluvial</i>          | <i>Base</i>      | \$0             | 0.00    | \$0                       | 0.00    | \$0                | 0.00    | \$0                         | 0.00    | \$0           | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$0             | 0.00    | \$0                       | 0.00    | \$0                | 0.00    | \$0                         | 0.00    | \$0           | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$0             | 0.00    | \$0                       | 0.00    | \$0                | 0.00    | \$0                         | 0.00    | \$0           | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$0             | 0.00    | \$0                       | 0.00    | \$0                | 0.00    | \$0                         | 0.00    | \$0           | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$0             | 0.00    | \$0                       | 0.00    | \$0                | 0.00    | \$0                         | 0.00    | \$0           | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$0             | 0.00    | \$0                       | 0.00    | \$0                | 0.00    | \$0                         | 0.00    | \$0           | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2100</i> | \$0             | 0.00    | \$0                       | 0.00    | \$0                | 0.00    | \$0                         | 0.00    | \$0           | 0.00    |
| <i>Inundación pluvial</i>          | <i>Base</i>      | \$0             | 0.00    | \$0                       | 0.00    | \$0                | 0.00    | \$0                         | 0.00    | \$0           | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$0             | 0.00    | \$0                       | 0.00    | \$0                | 0.00    | \$0                         | 0.00    | \$0           | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$0             | 0.00    | \$0                       | 0.00    | \$0                | 0.00    | \$0                         | 0.00    | \$0           | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$0             | 0.00    | \$0                       | 0.00    | \$0                | 0.00    | \$0                         | 0.00    | \$0           | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$0             | 0.00    | \$0                       | 0.00    | \$0                | 0.00    | \$0                         | 0.00    | \$0           | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$0             | 0.00    | \$0                       | 0.00    | \$0                | 0.00    | \$0                         | 0.00    | \$0           | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2100</i> | \$0             | 0.00    | \$0                       | 0.00    | \$0                | 0.00    | \$0                         | 0.00    | \$0           | 0.00    |
| <i>Desliz. detonado por</i>        |                  | \$3,114,705     | 0.70    | \$56,883                  | 0.02    | \$242,538          | 0.23    | \$2,504,159                 | 0.08    | \$18,830      | 0.03    |
| <i>Desliz. detonado por lluvia</i> | <i>Base</i>      | \$9,012,502     | 2.02    | \$169,296                 | 0.05    | \$705,435          | 0.66    | \$8,646,102                 | 0.26    | \$69,558      | 0.10    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$9,006,922     | 2.02    | \$169,544                 | 0.05    | \$711,012          | 0.66    | \$8,688,793                 | 0.26    | \$69,631      | 0.10    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$10,610,792    | 2.38    | \$197,067                 | 0.06    | \$816,574          | 0.76    | \$8,948,997                 | 0.27    | \$72,065      | 0.11    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$9,234,037     | 2.07    | \$175,342                 | 0.05    | \$744,687          | 0.70    | \$8,471,146                 | 0.25    | \$74,376      | 0.11    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$12,424,654    | 2.79    | \$263,399                 | 0.07    | \$1,211,223        | 1.13    | \$10,959,383                | 0.33    | \$61,318      | 0.09    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$8,732,847     | 1.96    | \$206,982                 | 0.06    | \$699,835          | 0.65    | \$8,846,279                 | 0.27    | \$69,514      | 0.10    |
|                                    | <i>Max. 2100</i> | \$14,126,302    | 3.17    | \$267,066                 | 0.08    | \$1,127,511        | 1.05    | \$10,915,634                | 0.33    | \$57,174      | 0.08    |

Tabla 17. Pérdida anual esperada por amenaza y clima en el sector agua residual. Valores en millones de colones costarricenses (CRC)

| Portafolio                         |                  | Red de alcantarillado - colectores |         | Pozos de inspección |         | Plantas de tratamiento |         |
|------------------------------------|------------------|------------------------------------|---------|---------------------|---------|------------------------|---------|
| Valor expuesto                     |                  | \$11,425,048,700                   |         | \$1,955,178,000     |         | \$162,500,000          |         |
| Amenaza                            | Esc.             | PAE (CRC)                          | PAE (‰) | PAE (CRC)           | PAE (‰) | PAE (CRC)              | PAE (‰) |
| <i>Sismo</i>                       |                  | \$143,416                          | 0.01    | \$433,504           | 0.22    | \$164,447              | 1.01    |
| <i>Inundación fluvial</i>          | <i>Base</i>      | \$0                                | 0.00    | \$0                 | 0.00    | \$147,308              | 0.91    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$0                                | 0.00    | \$0                 | 0.00    | \$138,022              | 0.85    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$0                                | 0.00    | \$0                 | 0.00    | \$173,057              | 1.06    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$0                                | 0.00    | \$0                 | 0.00    | \$135,323              | 0.83    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$0                                | 0.00    | \$0                 | 0.00    | \$190,875              | 1.17    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$0                                | 0.00    | \$0                 | 0.00    | \$121,397              | 0.75    |
|                                    | <i>Max. 2010</i> | \$0                                | 0.00    | \$0                 | 0.00    | \$177,329              | 1.09    |
| <i>Inundación pluvial</i>          | <i>Base</i>      | \$0                                | 0.00    | \$0                 | 0.00    | \$0                    | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$0                                | 0.00    | \$0                 | 0.00    | \$0                    | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$0                                | 0.00    | \$0                 | 0.00    | \$0                    | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$0                                | 0.00    | \$0                 | 0.00    | \$0                    | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$0                                | 0.00    | \$0                 | 0.00    | \$0                    | 0.00    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$0                                | 0.00    | \$0                 | 0.00    | \$0                    | 0.00    |
|                                    | <i>Max. 2010</i> | \$0                                | 0.00    | \$0                 | 0.00    | \$0                    | 0.00    |
| <i>Desliz. detonado por sismo</i>  |                  | \$267,155                          | 0.02    | \$50,947            | 0.03    | \$82,093               | 0.51    |
| <i>Desliz. detonado por lluvia</i> | <i>Base</i>      | \$1,112,716                        | 0.10    | \$226,538           | 0.12    | \$380,401              | 2.34    |
|                                    | <i>Min. 2035</i> | \$1,071,892                        | 0.09    | \$218,257           | 0.11    | \$365,199              | 2.25    |
|                                    | <i>Max. 2035</i> | \$1,169,338                        | 0.10    | \$238,975           | 0.12    | \$397,203              | 2.44    |
|                                    | <i>Min. 2050</i> | \$981,234                          | 0.09    | \$200,138           | 0.10    | \$334,419              | 2.06    |
|                                    | <i>Max. 2050</i> | \$1,186,978                        | 0.10    | \$242,991           | 0.12    | \$403,920              | 2.49    |
|                                    | <i>Min. 2100</i> | \$675,548                          | 0.06    | \$138,357           | 0.07    | \$230,291              | 1.42    |
|                                    | <i>Max. 2010</i> | \$1,196,279                        | 0.10    | \$245,081           | 0.13    | \$406,578              | 2.50    |

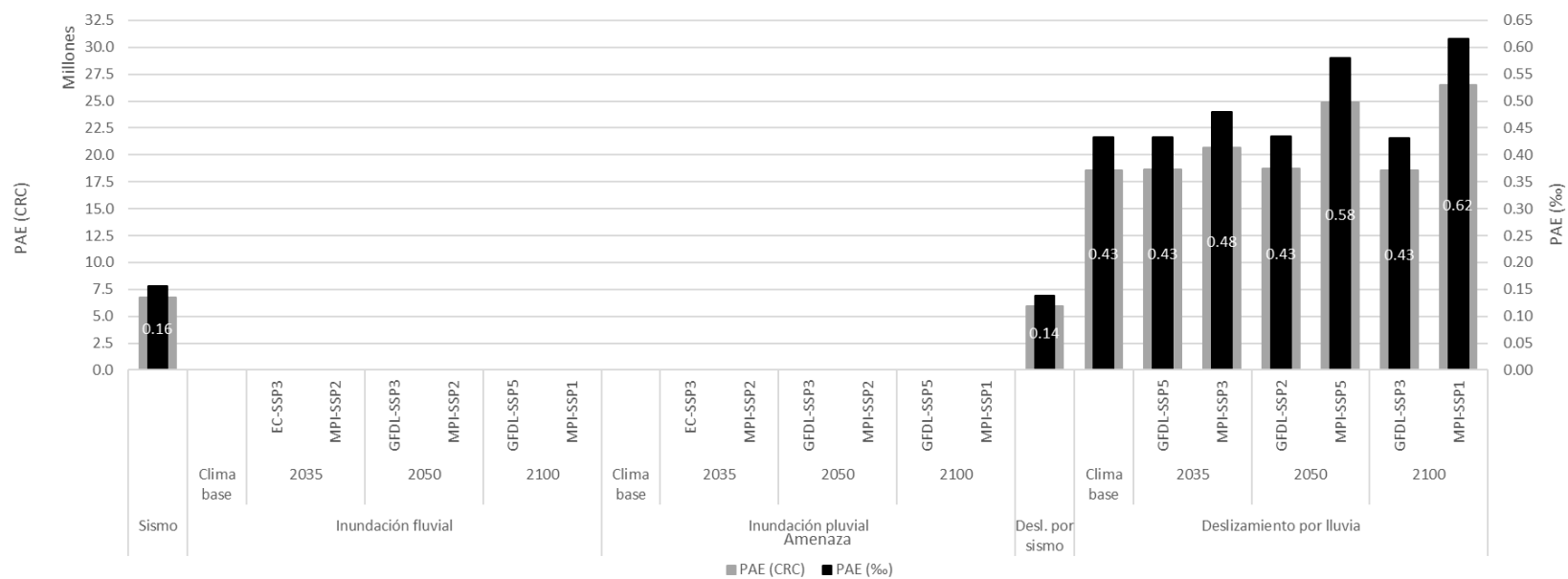


Figura 65. Pérdida anual esperada por amenaza para el sector agua potable

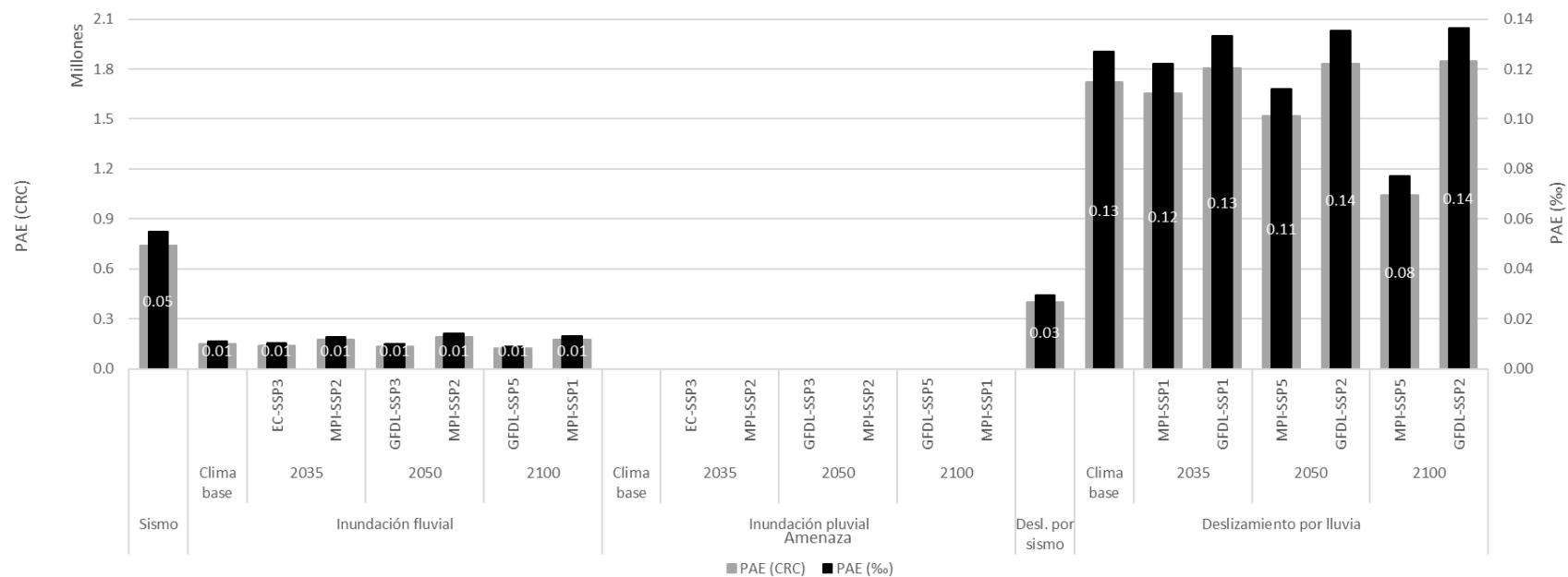


Figura 66. Pérdida anual esperada por amenaza para el sector agua residual

Los resultados de PAE para el subsector de agua potable muestran un perfil dominado por procesos de remoción en masa, con contribuciones secundarias del sismo directo. Para tanques de almacenamiento, las pérdidas anuales esperadas por deslizamientos detonados por lluvia alcanzan valores cercanos a 9.0 millones CRC, ampliándose hasta 14.1 millones CRC bajo el clima máximo considerado, lo que representa pérdidas relativas elevadas del orden de 2.0–3.2‰. Un comportamiento similar se observa en la red de acueducto (tuberías) y en sistemas de bombeo, aunque con magnitudes menores. En contraste, el sismo aporta pérdidas anuales más moderadas pero consistentes en todos los componentes, destacándose en sistemas de bombeo (2.75 millones CRC,  $\approx 0.77\%$ ) y tanques (2.23 millones CRC,  $\approx 0.50\%$ ). Las amenazas de inundación fluvial y pluvial resultan nulas en este subsector, indicando ausencia de pérdidas modeladas frente a estos mecanismos.

En el caso del subsector de agua residual, las pérdidas esperadas presentan magnitudes absolutas más bajas en la red de colectores y pozos, pero con contribuciones relevantes en plantas de tratamiento, tanto por inundación fluvial como por deslizamientos por lluvia. La PAE sísmica es reducida en colectores (0.14 millones CRC) y pozos (0.43 millones CRC), mientras que en plantas alcanza 0.16 millones CRC ( $\approx 1.01\%$ ), reflejando una mayor vulnerabilidad relativa del componente puntual. Para inundación fluvial, únicamente las plantas presentan pérdidas esperadas distintas de cero, con valores base de 0.15 millones CRC y un rango climático que llega hasta 0.19 millones CRC. Los deslizamientos detonados por lluvia constituyen el principal mecanismo anual en este subsector, especialmente en plantas ( $\approx 0.38$ – $0.41$  millones CRC, hasta 2.5‰ relativo), evidenciando sensibilidad significativa a los escenarios climáticos futuros.

Similar a como ocurre con el portafolio de comunicaciones, si bien los valores de pérdida son bajos, no debe considerarse como despreciables debido a que estos solo reflejan el componente físico de la evaluación y no fluctuaciones en el servicio prestado.

#### 5.2.5.2 Pérdida Máxima Probable (PML)

La Figura 67 muestra las curvas de PML para el sector de agua potable y la Figura 68 para el sector de agua residual, ante las amenazas consideradas.

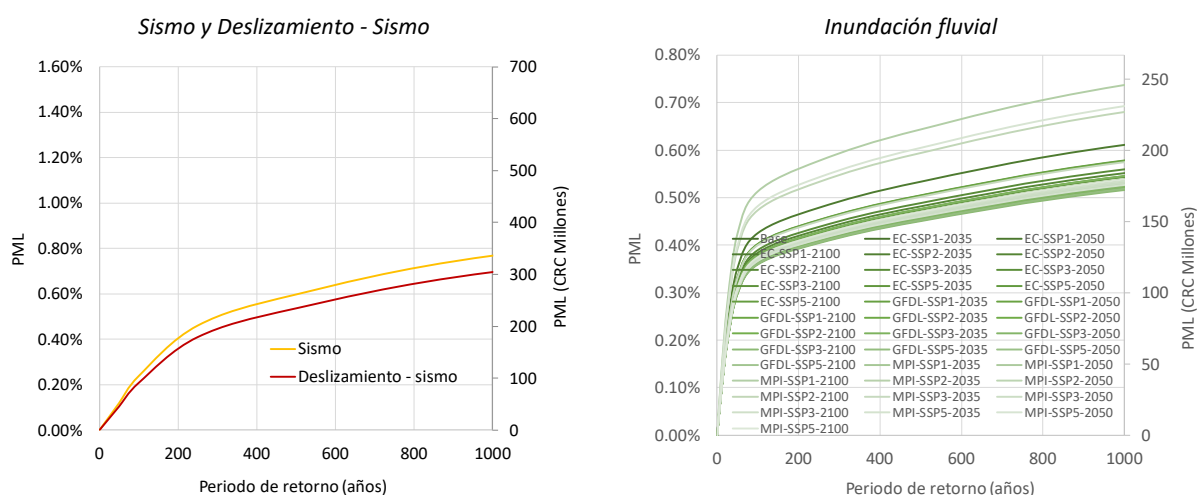


Figura 67. Curvas de PML para todas las amenazas consideradas y todos los climas. Sector agua potable

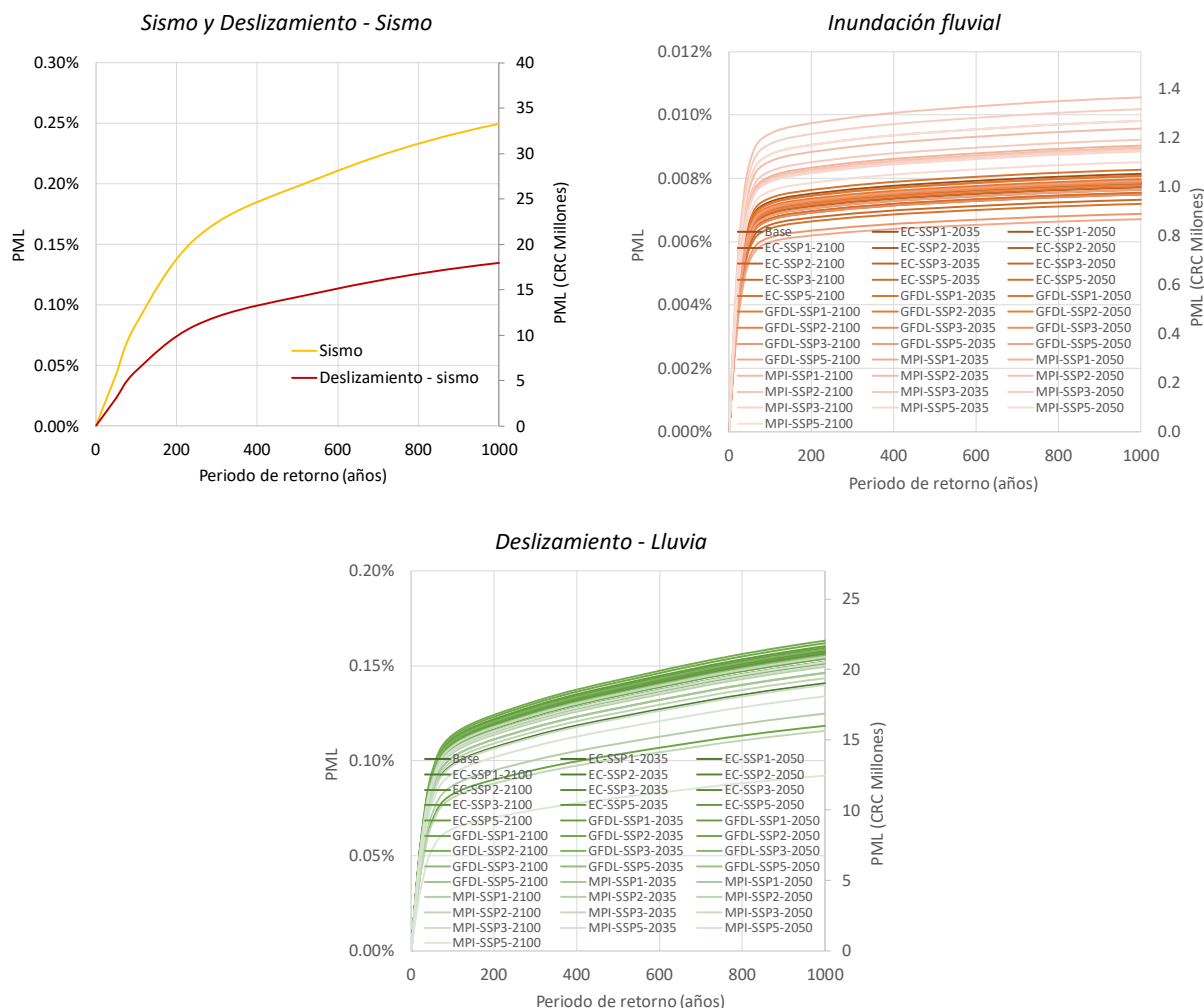


Figura 68. Curvas de PML para todas las amenazas consideradas y todos los climas. Sector agua residual

Las curvas de PML para agua potable reflejan un conjunto limitado de amenazas relevantes, donde el riesgo extremo está controlado principalmente por deslizamientos detonados por lluvia y, en menor medida, por eventos sísmicos. El sismo directo presenta una curva con crecimiento progresivo hacia periodos de retorno largos. Sin embargo, el deslizamiento inducido por sacudida introduce un componente adicional de excedencia, particularmente asociado a segmentos críticos del sistema lineal. Para deslizamientos por lluvia, la superposición de curvas correspondientes a los 36 climas alternativos genera un abanico amplio de pérdidas excedentes, con desplazamientos notorios en escenarios máximos hacia pérdidas mayores en periodos de retorno altos.

En el subsector de agua residual, las curvas de PML incorporan adicionalmente inundación fluvial como mecanismo relevante, aunque concentrado en plantas de tratamiento. En este caso, la dispersión climática en inundación fluvial es moderada, manteniéndose dentro de un rango acotado de pérdidas extremas. Por otro lado, los deslizamientos detonados por lluvia muestran nuevamente el mayor grado de separación entre escenarios climáticos, evidenciando una sensibilidad elevada de las colas de pérdida frente a condiciones hidrometeorológicas futuras. El sismo directo mantiene un rol secundario en términos de

magnitudes extremas absolutas, pero continúa aportando pérdidas excedentes consistentes debido a la exposición distribuida de colectores y pozos dentro del sistema urbano.

### 5.2.5.3 Pérdidas por ubicación

De la Figura 69 a la Figura 71 se presentan los mapas de PAE por ubicación para el sector de agua potable, y de la Figura 72 a la Figura 75 para el sector de agua residual.

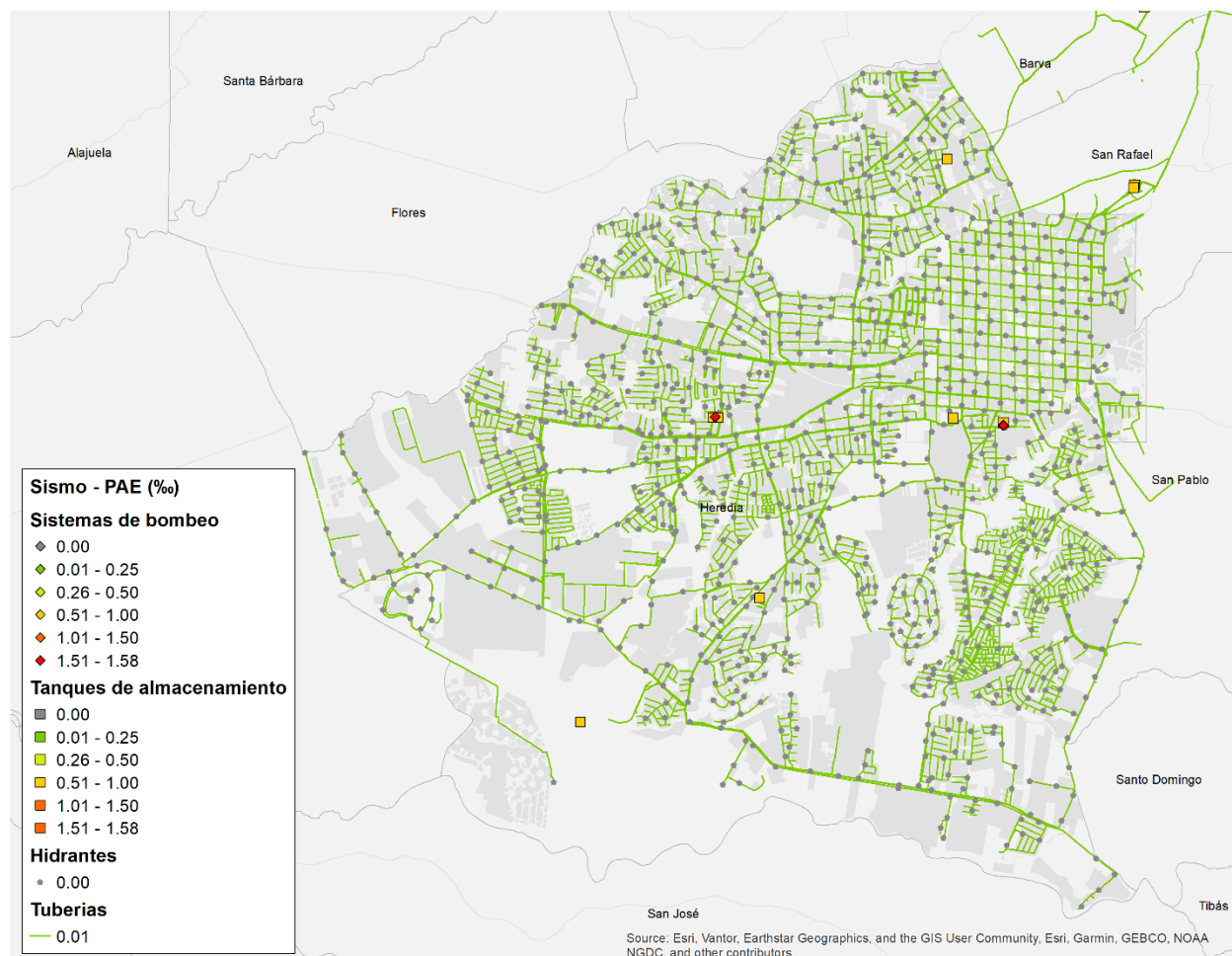


Figura 69. Pérdida anual esperada por sismo para el sector agua potable en el cantón de Heredia

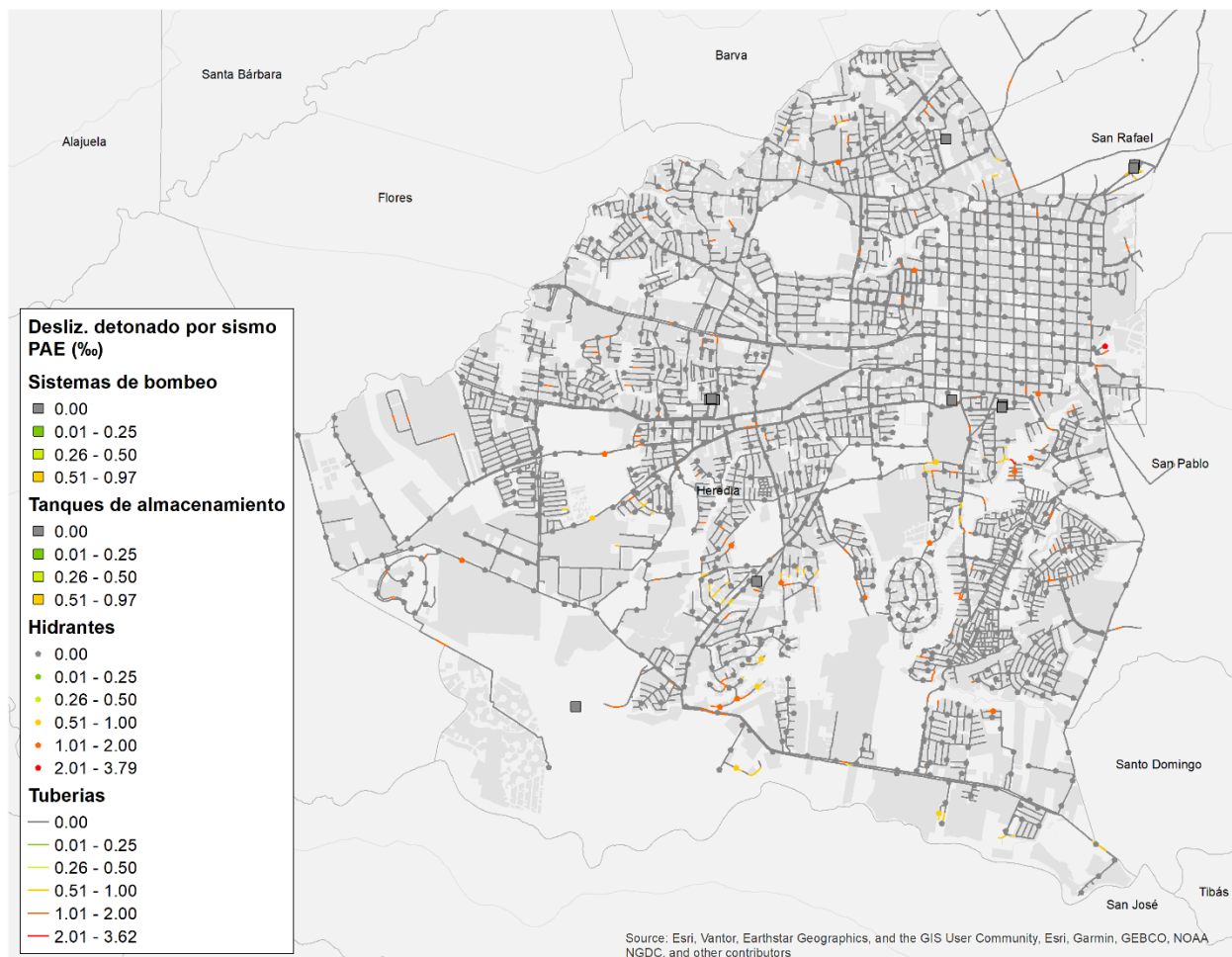


Figura 70. Pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por sismo para el sector agua potable en el cantón de Heredia

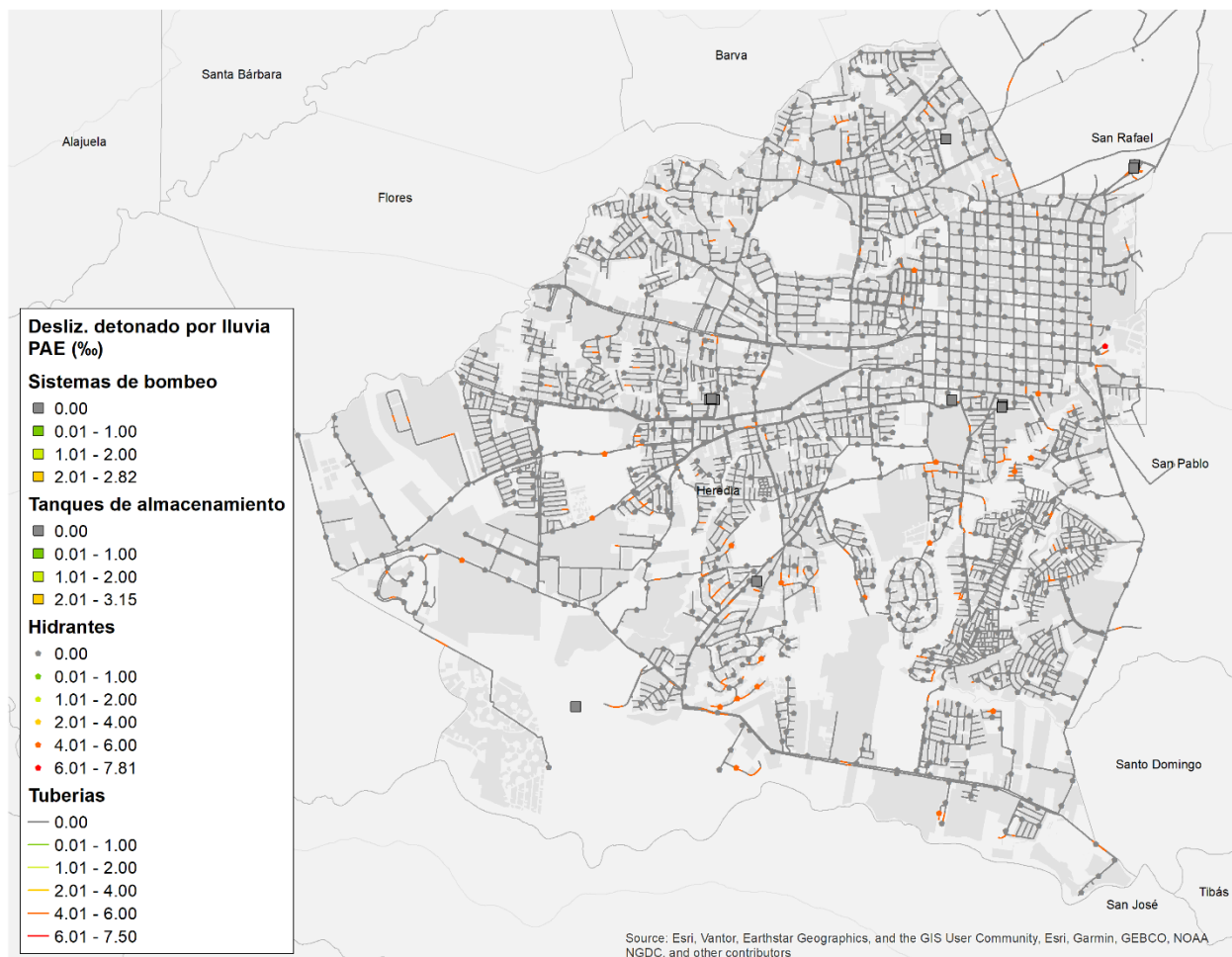


Figura 71. Pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por lluvia para el sector agua potable en el cantón de Heredia

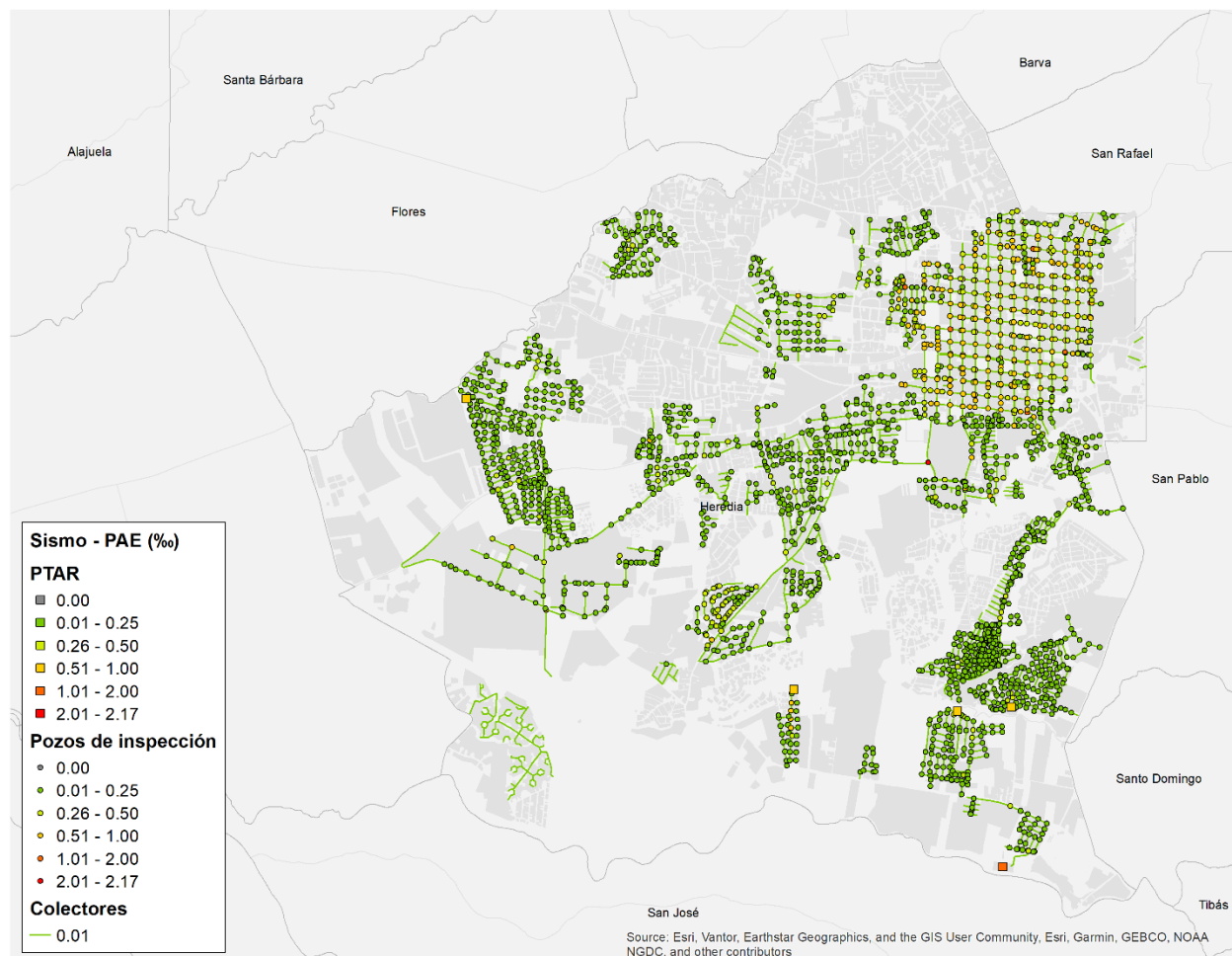


Figura 72. Pérdida anual esperada por sismo para el sector agua residual en el cantón de Heredia

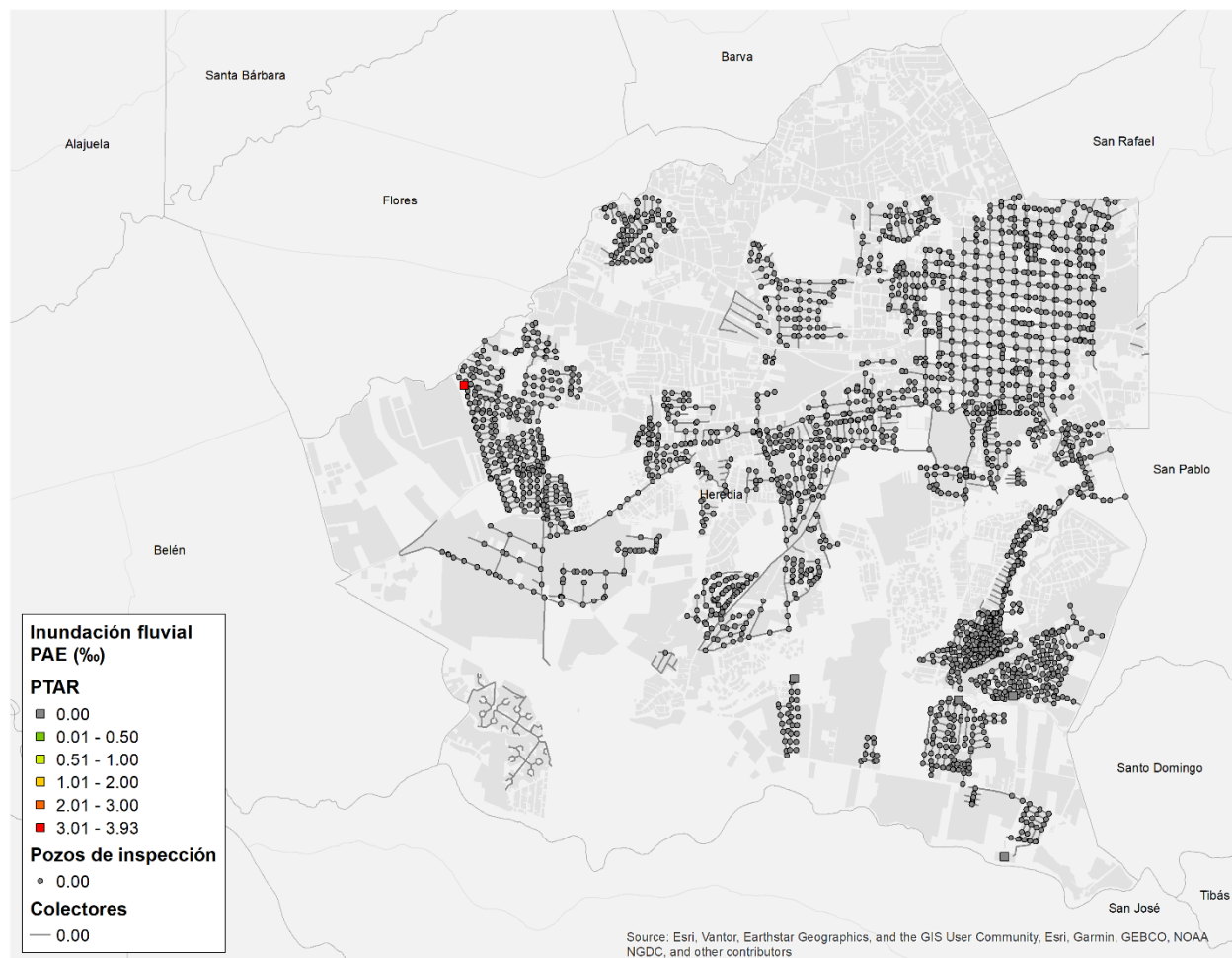


Figura 73. Pérdida anual esperada por inundación fluvial para el sector agua residual en el cantón de Heredia

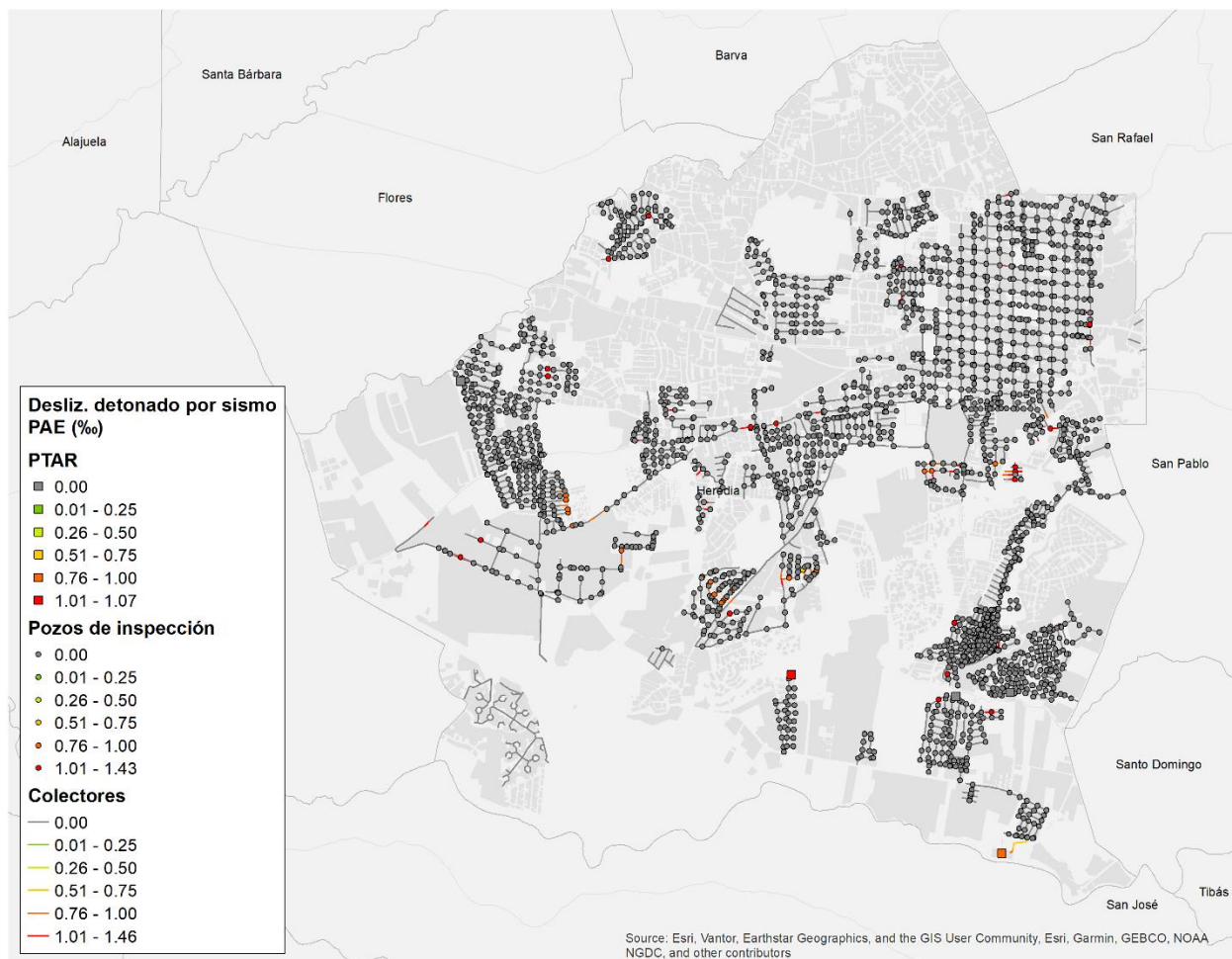


Figura 74. Pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por sismo para el sector agua residual en el cantón de Heredia

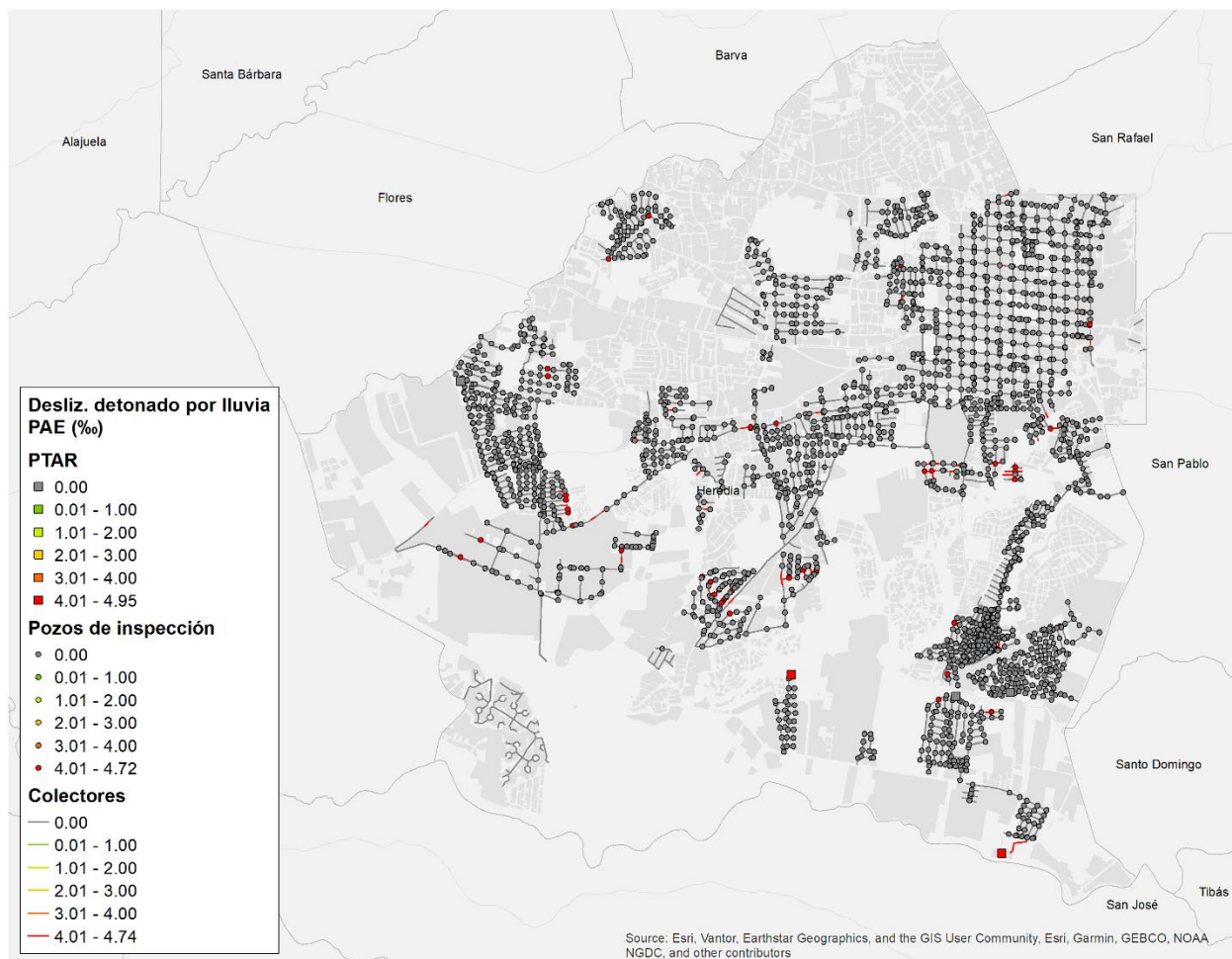


Figura 75. Pérdida anual esperada por deslizamientos detonados por lluvia para el sector agua residual en el cantón de Heredia

Los mapas de PAE por ubicación para agua potable muestran una espacialización altamente segmentada, donde las pérdidas sísmicas y por deslizamientos inducidos se concentran en emplazamientos específicos asociados a tanques, estaciones de bombeo y tramos vulnerables de la red. En particular, los mapas de deslizamientos detonados por lluvia evidencian focos dominantes en zonas de ladera dentro del cantón.

Para agua residual, la cartografía revela una diferenciación más marcada entre componentes lineales y puntuales. Los colectores muestran pérdidas sísmicas distribuidas de manera relativamente continua, mientras que las plantas de tratamiento concentran simultáneamente focos relevantes de inundación fluvial, deslizamientos por sismo y deslizamientos por lluvia. En este subsector, los mapas permiten identificar cómo el riesgo anual está estructurado por un número reducido de instalaciones puntuales con alta pérdida relativa, combinadas con una red extensa de exposición lineal de menor contribución unitaria. La coexistencia de patrones hidrológicos (inundación fluvial) y geomorfológicos (deslizamientos) es particularmente evidente en la localización de las pérdidas anuales esperadas más elevadas.

### 5.2.6 Variabilidad en las métricas de riesgo ante escenarios climáticos futuros

Los resultados de PAE presentados anteriormente, se limitan a ilustrar el riesgo en términos del clima base principalmente, o del conjunto de climas que produce las mayores y menores pérdidas. Esto con el objetivo de no saturar el documento. No obstante, conviene ver el consolidado de PAE totales para todas las amenazas hidrometeorológicas, y todos los sectores de infraestructura, incluyendo la totalidad de climas. De la Figura 76 a la Figura 79 se muestra el valor de la PAE total (todos los sectores) como función del tiempo para inundación fluvial, pluvial y deslizamientos detonados por lluvia. Cada línea en los gráficos corresponde a una proyección climática diferente, es decir, una combinación de modelo GCM y trayectoria de emisiones. De esta manera, es posible ver la evolución temporal del riesgo de inundación y deslizamiento detonado por lluvia, al considerar diferentes modelos climáticos.

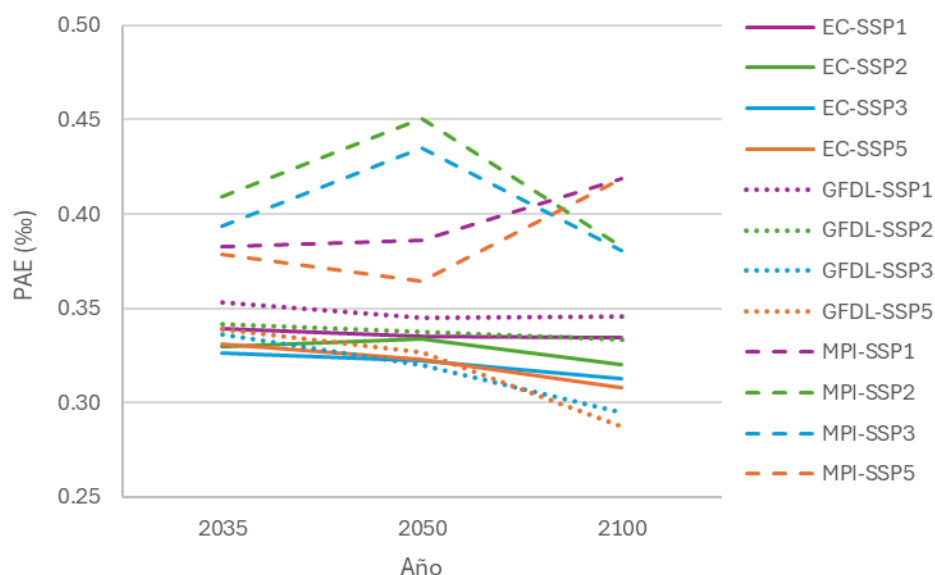


Figura 76. Pérdida anual esperada total de infraestructura por inundación fluvial para los escenarios de cambio climático considerados

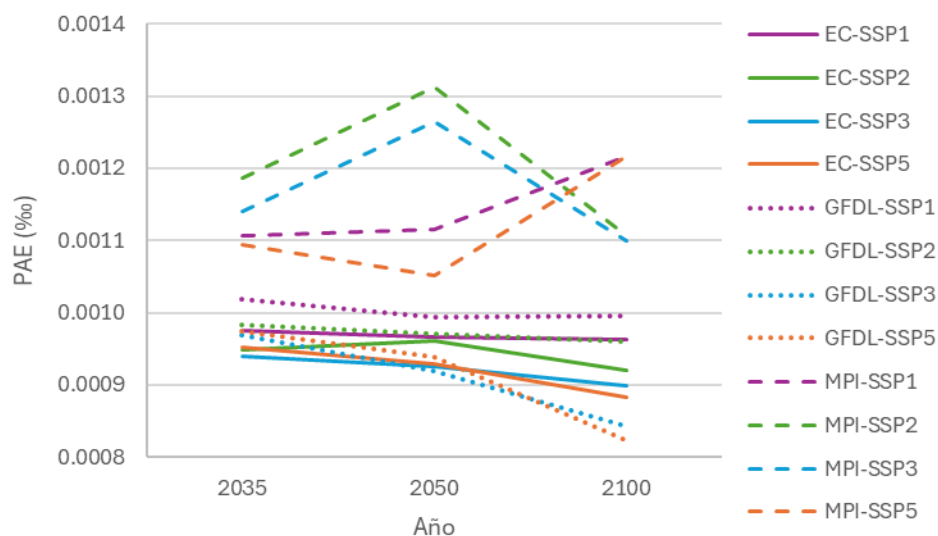


Figura 77. Pérdida anual esperada total de infraestructura por inundación pluvial para los escenarios de cambio climático considerados

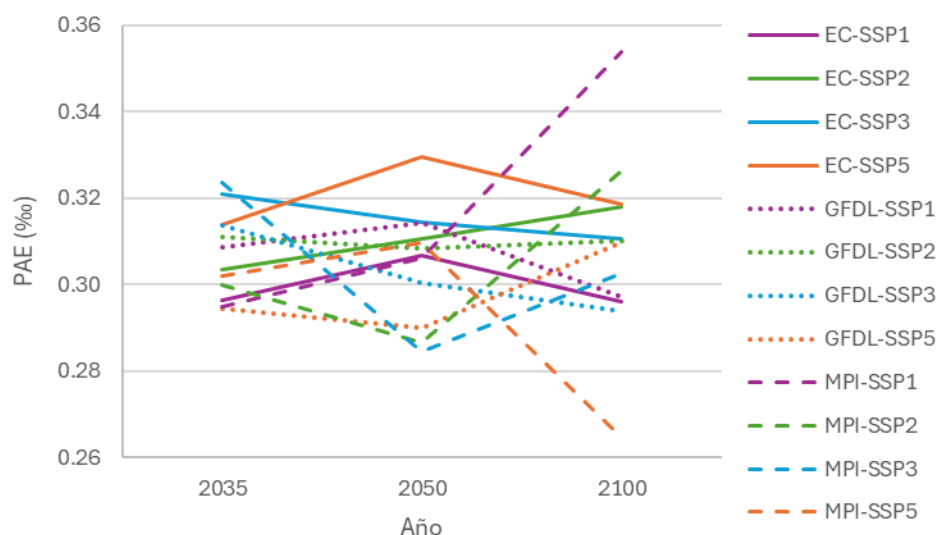


Figura 78. Pérdida anual esperada total de infraestructura por deslizamiento detonado por lluvia para los escenarios de cambio climático considerados

En el caso de la inundación fluvial, la PAE total presenta valores del orden de  $\sim 0.32\text{--}0.45\%$ , con una diferenciación clara entre modelos climáticos. El conjunto de simulaciones EC y GFDL muestra tendencias relativamente estables o levemente decrecientes hacia 2100, con reducciones moderadas en varios escenarios SSP, particularmente en los de mayor forzamiento (SSP5). En contraste, las realizaciones MPI exhiben una sensibilidad temporal mucho mayor, con incrementos marcados hacia 2050 en SSP2 y SSP3

(alcanzando máximos cercanos a 0.45‰) y posteriormente una reducción hacia 2100. Este comportamiento indica que, a escala agregada del portafolio, la respuesta del riesgo fluvial proyectado está dominada por la dispersión entre modelos más que por una evolución monótona, mostrando que ciertos GCM concentran aumentos transitorios relevantes en horizontes intermedios. Para la inundación pluvial, la PAE total es considerablemente menor en magnitud absoluta ( $\approx 0.00085\text{--}0.00130\%$ ), confirmando que, incluso al agregar todos los sectores, este mecanismo permanece como un contribuyente secundario frente a la inundación fluvial.

En cuanto a los deslizamientos detonados por lluvia, la PAE total se sitúa en un rango intermedio ( $\sim 0.29\text{--}0.35\%$ ), mostrando el patrón temporal más irregular de los tres mecanismos. A diferencia de las inundaciones, aquí no se observa una direccionalidad consistente hacia incrementos o disminuciones con el tiempo: algunos escenarios presentan aumentos hacia 2050 y luego reducciones, mientras otros muestran incrementos pronunciados sólo hacia 2100, como el caso de MPI-SSP1, que alcanza los valores máximos del conjunto. Asimismo, se identifican escenarios con disminuciones abruptas hacia finales de siglo, como MPI-SSP5. Este comportamiento evidencia que, para el portafolio agregado, el riesgo por remoción en masa inducida por lluvia está controlado por una combinación más compleja de factores climáticos y espaciales, con respuestas no lineales y divergentes entre modelos y trayectorias de emisiones.

### 5.3 Verificación del resultado

La modelación probabilista del riesgo catastrófico se fundamenta en la integración de información disponible sobre amenaza, exposición y vulnerabilidad, combinada con supuestos técnicos que permiten representar fenómenos complejos en ausencia de observaciones completas. Este enfoque tiene como objetivo caracterizar, de manera estocástica, las consecuencias potenciales de eventos futuros cuya ocurrencia es científicamente plausible pero que no necesariamente han ocurrido aún en el territorio evaluado. En este sentido, los resultados obtenidos no constituyen una extrapolación directa de la experiencia histórica, sino una construcción analítica orientada a estimar impactos de baja frecuencia y alta severidad que exceden el rango normalmente documentado en los registros de desastres.

Bajo estas condiciones, la validación estricta de los resultados de riesgo, entendida como la capacidad de contrastar de forma estadística las pérdidas simuladas contra un conjunto suficiente de observaciones empíricas para evaluar el ajuste del modelo, no es factible. Una validación robusta requeriría bases de datos extensas y detalladas de pérdidas para un amplio espectro de intensidades de amenaza, con información sistemática a nivel de activo individual, tipologías constructivas específicas y niveles exactos de sollicitación experimentados en cada evento. Este tipo de evidencia no existe ni es esperable que exista en el futuro, dado que implicaría la ocurrencia repetida de eventos severos en condiciones comparables y un nivel de instrumentación y registro históricamente inexistente incluso en los contextos más avanzados de gestión del riesgo.

Ante esta realidad, se plantea un procedimiento alternativo para la verificación del resultado de la evaluación, fundamentado en el concepto de la curva híbrida de riesgo (Velázquez, 2014). La curva híbrida es una curva de excedencia de pérdidas compuesta por dos segmentos, un segmento obtenido de forma empírica, basado en información documentada en bases de datos de desastres históricos (Ver Anexo A. 1), y que da una visión retrospectiva del riesgo para el portafolio evaluado. El segundo segmento,

corresponde a la curva de excedencia de pérdidas analítica, evaluada por medio de modelación catastrófica como la implementada en este trabajo, y que da una visión prospectiva del riesgo de desastres. La envolvente de ambas curvas es la curva híbrida de riesgo. La Figura 79 muestra una ilustración de estas curvas<sup>9</sup>.

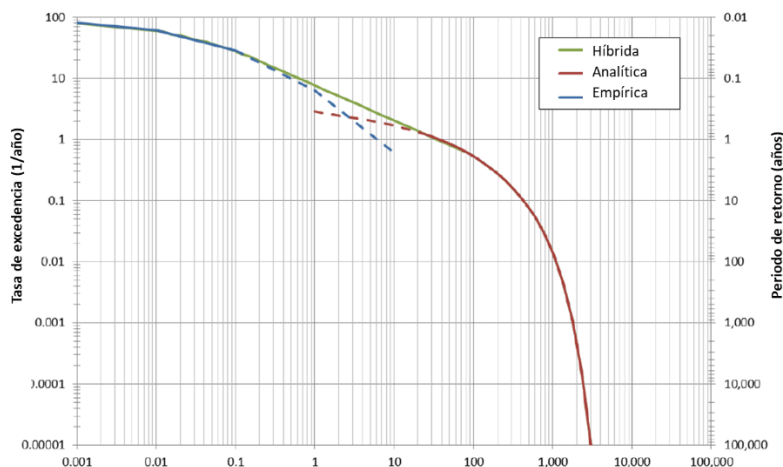


Figura 79. Ilustración de curvas de excedencia de pérdidas analítica, empírica e híbrida. Tomado de Velázquez (2014)

La curva de riesgo híbrida se ha usado en el pasado como una complementación de la modelación del riesgo por medio de evaluación analítica, con el propósito de capturar pérdidas de eventos muy frecuentes que posiblemente escapen al alcance y resolución de los modelos catastróficos. Así mismo, este enfoque provee una visión sobre la capacidad del modelo analítico de describir las pérdidas registradas en la historia. Como se observa en la Figura 79, la capacidad del modelo empírico de representar de forma correcta las tasas de excedencia de pérdidas grandes es limitada, así como también lo es la capacidad del modelo analítico de representar apropiadamente las tasas de excedencia de eventos menores. Por lo cual es usual que ambas curvas se traslapen (aunque esta no es una condición necesaria). La zona de traslapo provee información acerca de que tanto el modelo analítico está en capacidad de describir por lo menos una porción de las pérdidas históricas. Esta característica puede ser usada como proceso de validación dadas las limitaciones anteriormente mencionadas.

La Figura 80 muestra dos casos de curvas de excedencia híbridas hipotéticas. En el primer caso, la curva analítica empata suficientemente bien con la curva empírica, es decir, existe cierta capacidad del modelo catastrófico de representar las pérdidas registradas históricamente. Por otra parte, la segunda curva híbrida presentada muestra como el modelo catastrófico no logra expresar de forma apropiada las tasas de excedencia de las pérdidas en el registro histórico. Es decir, el modelo no captura apropiadamente el riesgo en la zona de traslapo (y en este ejemplo concreto, lo subestima). Lo anterior no implica necesariamente un deficiencia del modelo analítico, pues estos modelos son creados para capturar información sobre eventos no ocurridos aún, sino que únicamente ilustra la capacidad o no del modelo de

<sup>9</sup> A lo largo de esta sección del documento se presentan las curvas de excedencia de pérdidas en formato de gráfico en escala logarítmica, con el fin de facilitar la visualización.

representar la historia. Conviene tener en cuenta que, en modelación catastrófica, el representar la historia no es nunca el objetivo principal de los modelos.

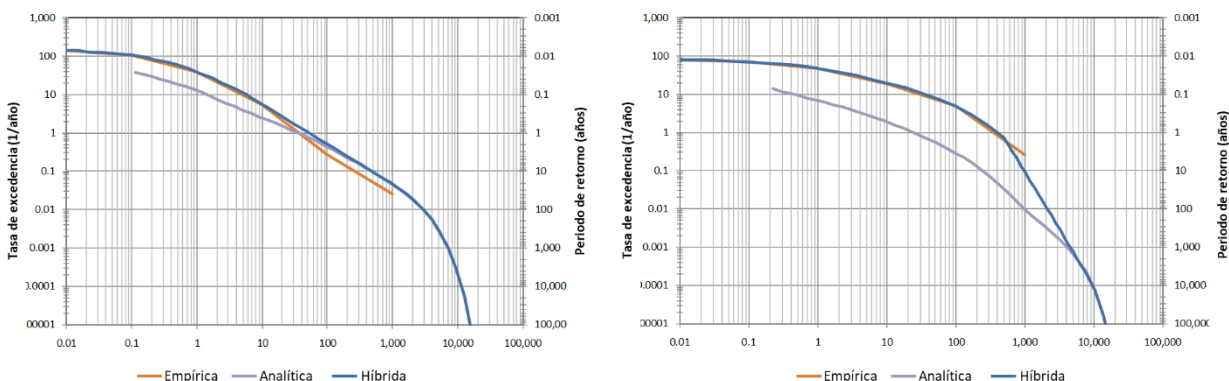


Figura 80. Ejemplos de curvas híbridas de riesgo. La curva de la izquierda corresponde a un modelo analítico válido y la de la derecha a uno no válido, en términos de su capacidad de reflejar pérdidas históricas.

Como es evidente, este procedimiento de validación alternativo es factible de ser aplicado, únicamente si existe un registro de pérdidas confiable y completo, que entregue información en el periodo histórico del cual pueda obtenerse la curva empírica de riesgo. Si este registro no existe, o sus datos no son suficientes o no son confiables, no sería posible realizar esta verificación.

### 5.3.1 Base de datos de desastres de Costa Rica

Se consultaron tres fuentes potenciales de información retrospectiva sobre pérdidas históricas ocasionadas por eventos naturales: la base internacional EM-DAT, el sistema regional DesInventar, y el módulo nacional de pérdidas administrado por el Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN). A partir de esta revisión, se identificó que, para el caso específico de Costa Rica, la fuente institucional de MIDEPLAN presenta el registro más completo y sistemático en términos de cobertura territorial, nivel de desagregación sectorial y consistencia en la documentación de pérdidas asociadas a emergencias oficialmente declaradas, constituyéndose como el repositorio más robusto disponible para caracterizar impactos económicos históricos por desastres en el país.

La información sobre pérdidas asociadas a eventos naturales se encuentra estructurada en el Módulo de Pérdidas Ocasionadas por Fenómenos Naturales de MIDEPLAN. Este sistema consolida registros históricos de daños y pérdidas económicas directas asociadas a eventos que han requerido declaratorias oficiales de emergencia, incorporando información desde finales de la década de 1980. La base permite consultas y análisis desagregados por unidad territorial y por sectores económicos, constituyendo un repositorio institucional para la sistematización del impacto de amenazas naturales como inundaciones, deslizamientos, sequías, sismos y otros fenómenos relevantes en el contexto nacional.

### 5.3.2 Evaluación de la curva empírica de riesgo

La curva empírica de excedencia de pérdidas se obtiene directamente de la información registrada en la base de datos de MIDEPLAN, a partir de un conteo de excedencia de niveles arbitrarios de pérdida. El registro histórico puede entenderse como una observación de un proceso de pérdidas, como el ilustrado en la Figura 81. Al establecer una pérdida económica arbitraria  $p$ , se puede identificar en la gráfica todos los eventos cuyas pérdidas exceden  $p$ .

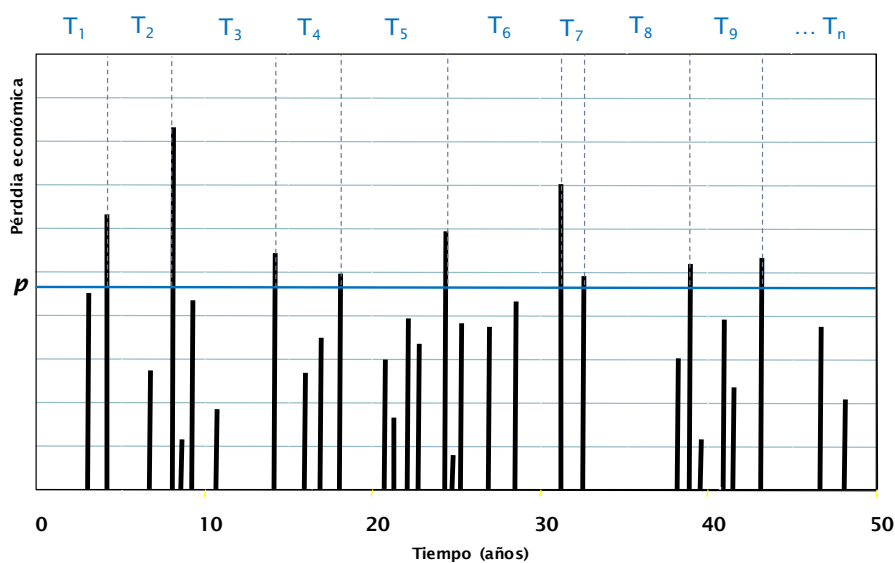


Figura 81. Proceso hipotético de pérdidas

Para la pérdida  $p$  indicada, la tasa de excedencia ( $v(p)$ ) puede estimarse de la siguiente manera (Bernal et al., 2021):

$$v(p) = \frac{n - 1}{T} \quad \text{Ecuación 11}$$

en donde  $n$  es el número de eventos que superan la pérdida  $p$  y  $T$  es el tiempo total de años en el registro. Este estimado de la tasa de excedencia depende, como se observa, del número de veces que se supera la pérdida  $p$  evaluada. Esto implica que existe una relación decreciente entre la incertidumbre en la estimación y el número de excedencias del valor. Una pérdida muy pequeña se excederá muchas veces y, por lo tanto, su tasa de excedencia estimada tendrá menor incertidumbre que una pérdida mayor. Bernal et al. (2021) determinaron la forma como varía el coeficiente de variación<sup>10</sup> (CV) de la tasa de excedencia con el número de excedencias en el registro, el cual sigue la función presentada en la Figura 82.

<sup>10</sup> El coeficiente de variación de una variable aleatoria se define como la división de su desviación estándar entre su media.

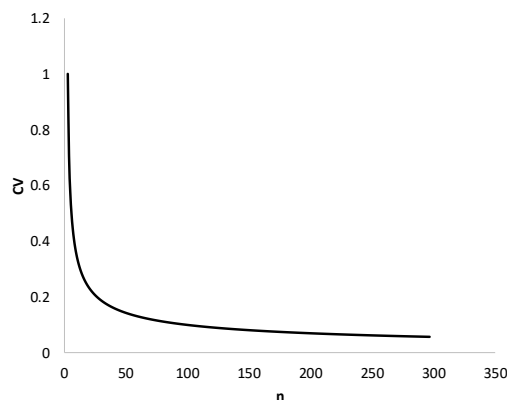


Figura 82. Variación del coeficiente de variación de la tasa de excedencia con el tamaño de la muestra.

El comportamiento presentado revela que, para eventos con pérdidas grandes (eventos catastróficos), la estimación de la tasa de excedencia a partir del registro histórico es altamente incierta (es decir, pocos eventos que exceden esa pérdida), independientemente de la calidad de la información o incluso del número de años para los cuales se cuenta con registro. Esta es la razón por la cual se requiere de modelos analíticos de pérdidas, que relacionen la amenaza, exposición y vulnerabilidad, con el fin de estimar la tasa de excedencia de forma apropiada para grandes montos de pérdida, pues la información histórica es en general insuficiente.

A partir de esta aproximación a la tasa de excedencia, la evaluación de la curva de excedencia de pérdidas es directa. El proceso consiste en establecer distintos valores para el monto de pérdida de referencia  $p$  y calcular la correspondiente tasa. La Figura 83 muestra un diagrama que resume este proceso

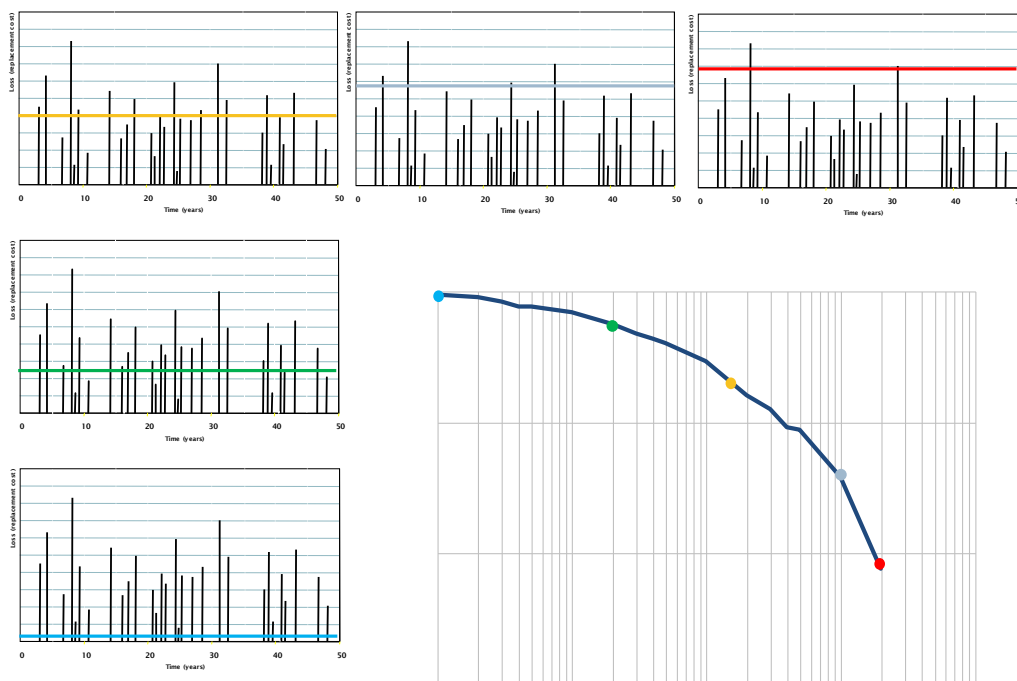


Figura 83. Ilustración del proceso de evaluación de la curva empírica de excedencia de pérdidas.

### 5.3.3 Comparación de las curvas de riesgo

El procedimiento descrito anteriormente se aplicó a los resultados de riesgo multiamenaza para el cantón de Heredia, presentados en las secciones anteriores. Se obtuvo una curva de PML total, la cual se convierte a curva de excedencia de pérdidas analítica directamente de acuerdo con lo indicado en la sección 2.3.2. La curva empírica se obtuvo aplicando el procedimiento presentado a los registros de pérdidas de la base de datos de MIDEPLAN causados en el cantón de Heredia. La Figura 84 muestra la comparación de las curvas de riesgo empírica y analítica.

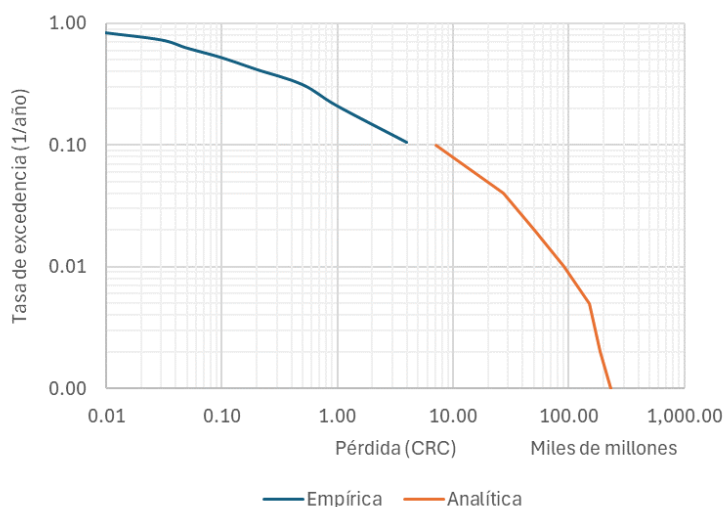


Figura 84. Curvas empírica y analítica de excedencia de pérdidas para Heredia.

Se puede observar que, si bien las curvas no se traslapan, el ajuste entre ellas es muy cercano. Se insiste en que esto no debe interpretarse como un proceso de validación del resultado en rigor, el cual es imposible de realizar en modelación catastrófica por las razones previamente expuestas, sino una contrastación que permite determinar que el modelo analítico aquí desarrollado permite una buena extensión de las métricas de riesgo, al compararlo con las pérdidas en el periodo histórico.

## 6 PROGRAMA DE CAPACITACIÓN

---

Como parte del proyecto *Evaluación del riesgo y desarrollo de capacidades en Costa Rica*, implementado en el marco del Global Risk Modelling Alliance (GRMA), Ingeniar Risk-Intelligence y CIMNE vienen desarrollando un proceso integral de fortalecimiento de capacidades técnicas orientado a mejorar la comprensión, aplicación y uso de análisis cuantitativos de riesgo en el país. Este proceso se articula principalmente a través del Curso de Modelación Probabilista del Riesgo de Desastres, complementado con espacios de acompañamiento técnico y coordinación institucional.

El enfoque de desarrollo de capacidades adoptado responde a los lineamientos establecidos en los Términos de Referencia del proyecto, priorizando la transferencia de capacidades técnicas para la actualización y escalabilidad de las evaluaciones de riesgo, así como el fortalecimiento de la capacidad de los actores institucionales para interpretar y utilizar la información de riesgo en la toma de decisiones, particularmente en el contexto de la infraestructura crítica del cantón de Heredia.

### 6.1 Desarrollo de actividades

#### 6.1.1 Interpretación de resultados de riesgo y apoyo a la toma de decisiones

Uno de los objetivos centrales del Proyecto Estratégico es fortalecer la capacidad de los actores involucrados para interpretar los resultados de los análisis probabilistas de riesgo por inundación fluvial, pluvial y sismo sobre la infraestructura crítica del cantón de Heredia, y utilizar dicha información en procesos de planificación y gestión del riesgo.

En este contexto, el curso proporciona a los participantes una base sólida en los fundamentos conceptuales y matemáticos de la evaluación probabilista del riesgo, abordados principalmente en el Módulo 1, donde se introducen métricas clave como la Curva de Excedencia de Pérdidas (LEC), la Pérdida Anual Esperada (PAE) y la Pérdida Máxima Probable (PML), entre otras, presentadas en las Unidades 2 y 3. Estas métricas constituyen insumos fundamentales para la evaluación del riesgo financiero y la priorización de medidas de reducción del riesgo y protección financiera.

Asimismo, el Módulo 3 del curso profundiza en la aplicación de estos resultados en contextos reales de toma de decisiones, incorporando enfoques avanzados como la evaluación holística del riesgo, la modelación de la resiliencia de sistemas de infraestructura, la toma robusta de decisiones bajo incertidumbre profunda y la ingeniería de control del riesgo. Estos contenidos permiten a los participantes comprender cómo los resultados técnicos del análisis de riesgo pueden integrarse en procesos de planificación territorial, inversión pública, gestión de emergencias y diseño de estrategias de adaptación y protección financiera, en línea con las necesidades del cantón de Heredia y el mandato institucional de la CNE.

### 6.1.2 Gestión y actualización de la base de datos de exposición de infraestructura

El Proyecto Estratégico requiere no solo la generación de resultados de riesgo, sino también el fortalecimiento de capacidades locales para gestionar, actualizar y ampliar la base de datos de exposición de infraestructura, más allá de la duración del proyecto GRMA.

Este componente es abordado de manera transversal en el curso, iniciando en el Módulo 1, donde en la Unidad 5 se presenta la metodología para la construcción de inventarios de elementos expuestos, incluyendo su caracterización física, de uso y su valoración económica. Los participantes adquieren criterios técnicos para la representación de la exposición y su integración en modelos probabilistas de riesgo.

Posteriormente, en los distintos componentes del Módulo 2, los participantes aprenden a vincular la base de datos de exposición con los modelos de amenaza y vulnerabilidad correspondientes a las amenazas priorizadas en el Proyecto Estratégico, específicamente inundación fluvial, inundación pluvial y sismo, aplicadas al portafolio de edificaciones e infraestructura del cantón de Heredia utilizando las herramientas especializadas disponibles en la plataforma CAPRA-ROBOT y su software complementario. Este enfoque fortalece la capacidad de los actores técnicos para actualizar la información de exposición y ejecutar análisis espaciales de riesgo de manera independiente, asegurando la sostenibilidad de las evaluaciones más allá del proyecto GRMA.

Adicionalmente, como parte del proceso de acompañamiento técnico, se han realizado reuniones con el grupo técnico de trabajo del cantón de Heredia, orientadas a explicar el proceso metodológico seguido para la construcción de la base de datos de edificaciones e infraestructura crítica, así como los criterios utilizados para su caracterización y valoración dentro de la evaluación probabilista del riesgo. Este acompañamiento busca facilitar que los equipos locales puedan replicar y actualizar el proceso de manera autónoma en el futuro, más allá del alcance del proyecto.

En este contexto, se llevó a cabo una reunión técnica entre la Municipalidad de Heredia, Ingeniar Risk-Intelligence y CIMNE, en la cual se revisó en detalle la base de datos de edificaciones del cantón y se aclararon dudas surgidas durante el Taller 2, particularmente en relación con la información de altura de las edificaciones. Durante la sesión se expuso que la base de datos desarrollada por la Municipalidad de Heredia está concebida principalmente con fines catastrales y de recaudo tributario, describiendo los predios a partir de la desagregación por propietario, lo cual no coincide necesariamente con la unidad de análisis requerida para la evaluación probabilista del riesgo, centrada en la edificación como elemento expuesto.

En este sentido, se explicó el proceso técnico necesario para agrupar registros correspondientes a múltiples predios que conforman una misma edificación, así como, en casos específicos, desagregar registros cuando un único predio catastral corresponde a varias edificaciones independientes. La reunión permitió además clarificar la diferencia conceptual y metodológica entre la base de datos catastral utilizada como insumo y la base de datos de elementos expuestos requerida para los análisis de riesgo, integrando variables físicas relevantes como el tipo estructural, los materiales de las paredes y el estado de la construcción. Cabe destacar que gran parte de esta información ya se encuentra disponible gracias al sólido trabajo realizado por la Municipalidad de Heredia en el levantamiento y sistematización de la

información catastral, lo cual constituye una base fundamental para la sostenibilidad de las evaluaciones de riesgo.

### **6.1.3 Articulación institucional y alineación con el mandato de la CNE**

El fortalecimiento de capacidades no se limita al ámbito técnico, sino que también contempla la articulación institucional y la alineación de los productos de la evaluación de riesgo con las necesidades de las entidades responsables de la gestión del riesgo de desastres en Costa Rica, en particular la Comisión Nacional de Emergencias (CNE).

El curso está dirigido a profesionales vinculados al Grupo Técnico de Trabajo del programa GRMA – Costa Rica, así como a funcionarios de otras entidades nacionales y locales, promoviendo un lenguaje común y una comprensión compartida de los conceptos, métodos y resultados de la evaluación probabilista del riesgo. A través de los contenidos del curso y de los espacios de interacción con el grupo de trabajo, se busca asegurar que los resultados del análisis de riesgo sean comprensibles, útiles y aplicables para apoyar funciones clave de la CNE, como el ordenamiento territorial, la planificación de emergencias y la gestión de la continuidad de servicios esenciales.

### **6.1.4 Continuidad y escalabilidad de las evaluaciones de riesgo**

En línea con los Términos de Referencia, el proceso de desarrollo de capacidades está orientado a asegurar que instituciones como la CNE, la Municipalidad de Heredia y otros actores técnicos nacionales puedan actualizar y ampliar las evaluaciones de riesgo en el futuro, incluyendo su posible escalamiento a nivel nacional y a otros sectores.

El uso de metodologías estandarizadas y herramientas ampliamente utilizadas a nivel internacional, como CAPRA-ROBOT y los distintos módulos de modelación de amenaza y vulnerabilidad, contribuye a la sostenibilidad técnica de las evaluaciones. Asimismo, el énfasis del curso en la comprensión integral del proceso de modelación del riesgo —desde la construcción de datos hasta la interpretación y uso de resultados— fortalece la autonomía técnica de los participantes y reduce la dependencia de asistencia externa en el mediano y largo plazo.

En este sentido, el Curso de Modelación Probabilista del Riesgo de Desastres constituye un pilar fundamental del Proyecto Estratégico del cantón de Heredia, al sentar las bases para la apropiación institucional de los resultados, su actualización futura y su utilización efectiva en la toma de decisiones orientadas a la reducción del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático.

## **6.2 Resumen de participación**

A continuación, se presenta el listado de participantes que han completado a la fecha el Módulo 1 del Curso de Modelación Probabilista del Riesgo de Desastres, quienes reportaron estar vinculados al Proyecto Estratégico, así como la institución a la que pertenecen. Es importante recordar que las personas que pertenecen a los grupos técnicos de trabajo no necesariamente están inscritas en el Curso.

Tabla 18. Participantes asociados al Proyecto Estratégico de Heredia.

| Nombre                    | Institución                                                                           | Correo electrónico              |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Alonso Alvarado           | Municipalidad Heredia                                                                 | aalvarado@heredia.go.cr         |
| Alonso Ulate Castillo     | Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica | alonso.ulate@ucr.ac.cr          |
| Bryan Rodríguez Gómez     | Municipalidad Heredia                                                                 | brodriguez@heredia.go.cr        |
| Ana Cecilia Castro Chacón | Superintendencia General de Seguros                                                   | CASTROCA@Sugese.fi.cr           |
| Sergio Alvarez González   | Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica | sergiogabriel.alvarez@ucr.ac.cr |
| Karol Fallas Corrales     | Municipalidad Heredia                                                                 | kfallas@heredia.go.cr           |
| Mauricio Mora             | Escuela de Geología, Universidad de Costa Rica                                        | mauricio.mora@ucr.ac.cr         |
| Rodolfo Rothe Cordero     | Municipalidad de Heredia                                                              | rrothe@heredia.go.cr            |

De estos participantes, han completado el Módulo 2 en alguna de las amenazas ofrecidas en el curso Alonso Ulate Castillo, Alonso Alvarado y Ana Cecilia Castro Chacón.

### 6.3 Retroalimentación de los participantes

Con el fin de evaluar los conocimientos adquiridos y el desarrollo de capacidades de los participantes, una vez culminado el Módulo 3 del curso de *Evaluación Probabilista del Riesgo*, se aplicará un cuestionario final de retroalimentación y reflexión. Este instrumento permitirá recoger información cualitativa y cuantitativa sobre los aprendizajes logrados, el nivel de apropiación de los conceptos técnicos abordados y la percepción sobre la utilidad de las herramientas presentadas, en particular CAPRA Robot.

El cuestionario incluye preguntas abiertas y preguntas de selección, orientadas a evaluar tanto la comprensión conceptual como la capacidad de aplicación práctica de los contenidos del curso. Las preguntas contempladas son las siguientes:

1. **¿Qué aprendizajes considera que le dejó esta capacitación sobre evaluación probabilista del riesgo y el uso de CAPRA Robot?**

Tipo de pregunta: Abierta.

*Objetivo:* Identificar los logros percibidos y los aprendizajes significativos por parte del participante.

2. **Después del curso, ¿cuál de las siguientes opciones describe mejor su nivel actual de familiaridad con conceptos como la Curva de Excedencia de Pérdidas (LEC), la Pérdida Promedio Anual (AAL) y la Pérdida Máxima Probable (PML)?**

*Tipo de pregunta:* Selección de una única opción.

- Aún no los comprendo.
- Los comprendo parcialmente.
- Tengo una comprensión general y sé cuándo se aplican.

- Me siento cómodo utilizándolos con orientación.
- Puedo explicarlos y aplicarlos con confianza.

*Objetivo:* Medir el nivel de comprensión y apropiación técnica de los principales indicadores de riesgo.

**3. ¿Cómo describiría ahora la función principal de CAPRA Robot dentro de la plataforma CAPRA?**

*Tipo de pregunta:* Selección múltiple con única respuesta.

- Generar reportes visuales sobre vulnerabilidad social.
- Estimar el riesgo a partir del cálculo de pérdidas por amenazas, usando un enfoque probabilístico.
- Registrar información geográfica de activos expuestos.
- Enviar notificaciones automáticas ante eventos extremos.

*Respuesta correcta:* b.

*Objetivo:* Verificar la comprensión del propósito técnico de CAPRA Robot.

**4. ¿Considera que sus habilidades para utilizar herramientas de modelación del riesgo han mejorado gracias al curso? Justifique su respuesta.**

*Tipo de pregunta:* Abierta.

*Objetivo:* Explorar el desarrollo de capacidades técnicas a partir de la experiencia formativa.

**5. ¿Ha identificado cómo podrá aplicar lo aprendido en sus actividades profesionales? Describa un posible escenario de aplicación.**

*Tipo de pregunta:* Abierta.

*Objetivo:* Evaluar la proyección del aprendizaje hacia el contexto laboral del participante.

**6. ¿Cuál de las siguientes opciones describe mejor su percepción actual sobre la importancia de herramientas como CAPRA Robot en la gestión del riesgo?**

*Tipo de pregunta:* Selección de una única opción.

- Nada importante.
- Poco importante.
- Moderadamente importante.
- Importante.
- Muy importante.

*Objetivo:* Evaluar la percepción del participante sobre la relevancia de estas herramientas al finalizar la capacitación.

**7. ¿Cuál de las siguientes opciones describe mejor el enfoque probabilístico utilizado por CAPRA Robot para el cálculo del riesgo?**

*Tipo de pregunta:* Selección múltiple con única respuesta.

- a) Utiliza datos históricos para predecir eventos futuros sin considerar la incertidumbre.
- b) Calcula pérdidas esperadas en función de la frecuencia y severidad de eventos posibles, permitiendo estimar la probabilidad de exceder ciertos niveles de pérdida.
- c) Aplica reglas deterministas con base en daños observados en eventos anteriores.
- d) Requiere únicamente la ubicación de activos expuestos para calcular el riesgo.

*Respuesta correcta:* b.

*Evalúa:* Comprensión del modelo probabilístico y su ventaja frente a enfoques deterministas.

**8. ¿Cuál es el orden general del proceso que realiza CAPRA Robot para generar la Curva de Excedencia de Pérdidas (Loss Exceedance Curve)?**

*Tipo de pregunta:* Selección múltiple con única respuesta.

- a) Estimar población, aplicar estadísticas de daños y calcular tasa de exposición.
- b) Obtener datos de valor asegurado, simular eventos históricos y calcular distribución de daño.
- c) Integrar datos de amenaza, vulnerabilidad y exposición para calcular pérdidas bajo múltiples escenarios y derivar la curva de excedencia.
- d) Evaluar la calidad del censo, aplicar mapas de amenaza y graficar curvas de daño.

*Respuesta correcta:* c.

*Evalúa:* Comprensión del flujo de trabajo técnico y de las variables clave del modelo.

**9. ¿Cómo maneja CAPRA Robot la agregación de pérdidas en un escenario multiamenaza y por qué resulta útil para la gestión del riesgo?**

*Tipo de pregunta:* Selección múltiple con única respuesta.

- a) Calcula las pérdidas individualmente por amenaza y reporta solo la más alta para evitar duplicidades.
- b) Suma las pérdidas estimadas para todas las amenazas sin considerar correlación, lo que permite escenarios más conservadores.
- c) Agrega las pérdidas considerando la posible interacción entre amenazas y permite estimar un riesgo consolidado, lo que apoya una planificación más integral.
- d) Evalúa cada amenaza por separado y no realiza agregación para evitar pérdida de precisión.

*Respuesta correcta:* c.

*Evalúa:* Comprensión aplicada del enfoque multiamenaza y su utilidad para la toma de decisiones.

Los resultados del cuestionario final serán analizados y reportados en el informe final del proyecto, permitiendo evaluar de manera estructurada el impacto del proceso de desarrollo de capacidades y su contribución al fortalecimiento de la gestión del riesgo de desastres en Costa Rica.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

---

- Andersen, E. Sparre. (1957). On the collective theory of risk in case of contagion between claims. Trans. XVth Int. Congress Actuaries. Vol. 2. No. 6. 1957.
- Arroyo-Solorzano (2023). Riesgo sísmico ante terremotos potencialmente perjudiciales en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAMRevista Geológica de América Central, 69, 1-33.
- Benito et al. (2025). Seismic hazard scenarios for the city of San José, Costa Rica: Evaluation of critical ruptures on nearby faults. Earthquake Spectra. 1-36. EERI.
- Bernal G. & Cardona, O.D. (2015). Calibración de funciones de atenuación basadas en el espectro de fuente radiado y su aplicación en Colombia. Serie: Monografías de Ingeniería Sísmica. Editor: Alex H. Barbat. Editorial: CIMNE. UPC, Barcelona.
- Bernal, G. (2014). Metodología para la modelación, cálculo y calibración de parámetros de la amenaza sísmica para la evaluación probabilista del riesgo. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Bernal, G. (2014). Seismic Microzonation Studio. Program for seismic site evaluation of complex geological emplacements
- Bernal, G., Cardona, O.D., Marulanda, M., Carreño, M. L. (2021). Dealing with Uncertainty using Fully Probabilistic Risk Assessment for Decision Making. Chapter 14 in: Eslamian, S., & Eslamian, F. (Eds): Handbook of Disaster Risk Reduction for Resilience. Springer.
- Cardona, O.D. (1986a). Análisis de vulnerabilidad y evaluación del riesgo sísmico. Seminario Nacional sobre Prevención y Manejo de Catástrofes Naturales, Asociación de Ingenieros Estructurales, octubre 1986, Medellín.
- Cardona, O.D. (1986b). Estudios de vulnerabilidad y evaluación del riesgo sísmico: Planificación física y urbana en áreas propensas. Simposio International sobre Neotectónica y Riesgos Volcánicos, Revista CIAF No. 11, diciembre 1986, Bogotá.
- Cardona, O.D. (1986c). Estudios de vulnerabilidad y evaluación del riesgo sísmico: Planificación física y urbana en áreas propensas. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Reporte AIS-33. diciembre 1986, Bogotá.
- Cardona, O.D. (1989). Enfoque metodológico para la evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. No. 37, diciembre 1989, México, DOI: 10.18867/ris.37.304
- Cardona, O.D. (1990). Términos de uso común en manejo de riesgos. Reporte AGID No. 13. 1er Simposio Andino de Geología Ambiental, 1ª Conferencia Colombiana de Geología Ambiental. Pag 587-593. Medellín.
- Cardona, O. D. (2001). Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Barcelona: Universidad Politècnica de Catalunya. CD: Premios de Investigación Social sobre protección civil, para tesis doctorales, 2002. Dirección General de Protección Civil, Ministerio del Interior, España.

- Cramér, H. (1930) On the Mathematical Theory of Risk, Skandia Jubilee Volume, Stockholm. Cruz, M. G., Alexander, M. E., & Wakimoto, R. H. (2003). Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of western North America. *International Journal of Wildland Fire*, 12(1), 39-50.
- Haskell, N. A. (1953). The Dispersion of Surface Waves in Multilayered Media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 43, pp. 17-34
- Idriss, M. I. & Seed, H. B. (1968). Seismic Response of Horizontal Soil Layers. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol 94, N° SM4, Julio 1968.
- Lundberg, F. (1903) Approximerad Framställning av Sannolikehets-funktionen. Återförsäkring av Kollektivrisker (Producción aproximada de la función de probabilidad. Reaseguro de Riesgos Colectivos), Almqvist & Wiksell, Uppsala.
- Ordaz, M., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C., & D'Amico, V. (2017). R-CRISIS. Program and platform for computing seismic hazard.
- Seed, H. B. & Idriss, M. I. (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis. Report N° UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Diciembre de 1970.
- Thompson, W. T. (1950). Transmission of Elastic Waves through a Stratified Solid. *Journal of Applied Physics*, 21, pp. 89-93
- Velázquez, C. (2014) Curva híbrida de excedencia de pérdidas para Colombia: un enfoque retrospectivo y prospectivo. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.

## A.1 DATOS PARA GENERAR LAS CURVAS EMPÍRICAS DE RIESGO

Pérdidas históricas en los sectores de infraestructura y edificaciones del cantón de Heredia.

Fuente: Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica

| Año Inicio | Tipo de Evento     | Categoría        | Subcategoría        | Evento                                                                                                                                                 | Valor Constante en Colones |
|------------|--------------------|------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 1998       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Movimiento de Masas | PLAN REGULADOR HURACAN MITCH                                                                                                                           | 87,392,555.71              |
| 1999       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Movimiento de Masas | FENOMENOS HIDROMETEOROLOGICOS PRESENTADOS ENTRE EL 12 DE AGOSTO AL 5 DE OCTUBRE DE 1999                                                                | 14,101,960.98              |
| 1999       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Movimiento de Masas | FENOMENOS HIDROMETEOROLOGICOS PRESENTADOS ENTRE EL 12 DE AGOSTO AL 5 DE OCTUBRE DE 1999                                                                | 69,081,027.98              |
| 1999       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Movimiento de Masas | FENOMENOS HIDROMETEOROLOGICOS PRESENTADOS ENTRE EL 12 DE AGOSTO AL 5 DE OCTUBRE DE 1999                                                                | 119,036,681.85             |
| 2001       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación          | LLUVIAS SEMIPERMANENTES Y DE VARIABLE INTENSIDAD EN LA VERTIENTE CARIBE Y NORTE                                                                        | 559,320,453.90             |
| 2005       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |                     | INUNDACIONES EN LA VERTIENTE DEL PACÍFICO Y ZONA NORTE (ONDA TROPICAL E INFLUENCIA INDIRECTA HURACÁN RITA Y VILMA)                                     | 32,863,210.73              |
| 2007       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Movimiento de Masas | LLUVIAS INTENSAS ASOCIADAS AL PASO DE UNA ONDA DECRETO 33834-MP                                                                                        | 930,261,329.68             |
| 2007       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Movimiento de Masas | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA POR TEMPORAL Y PASO DE UNA ONDA TROPICAL EN EL PACIFICO CENTRAL, NORTE, SUR Y CORDILLERA DE GUANACASTE, DECRETO 34045-MP | 48,926,560.82              |
| 2007       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Movimiento de Masas | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA POR TEMPORAL Y PASO DE UNA ONDA TROPICAL EN EL PACIFICO CENTRAL, NORTE, SUR Y CORDILLERA DE GUANACASTE, DECRETO 34045-MP | 1,232,030,321.21           |
| 2007       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Aumento de Caudal   | LLUVIAS INTENSAS ASOCIADAS AL PASO DE UNA ONDA DECRETO 33834-MP                                                                                        | 634,449,329.70             |
| 2007       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación          | LLUVIAS INTENSAS ASOCIADAS AL PASO DE UNA ONDA DECRETO 33834-MP                                                                                        | 158,612,332.43             |
| 2007       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Movimiento de Masas | LLUVIAS INTENSAS ASOCIADAS AL PASO DE UNA ONDA DECRETO 33834-MP                                                                                        | 20,619,603.22              |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            |                     | SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                                                                | 95,468,865.71              |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            |                     | SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                                                                | 129,199,861.74             |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            |                     | SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                                                                | 163,228,887.97             |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            |                     | SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                                                                | 3,930,683,703.12           |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            |                     | SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                                                                | 23,629,148.56              |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            |                     | SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                                                                | 47,258,297.12              |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            |                     | SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                                                                | 2,029,490,609.60           |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            | Movimiento de Masas | SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                                                                | 233,875,680.34             |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            | Movimiento de Masas | SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                                                                | 1,719,788,109.94           |
| 2010       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |                     | TORMENTA TROPICAL NICOLE                                                                                                                               | 30,423,322.28              |
| 2010       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Aumento de Caudal   | TORMENTA TROPICAL NICOLE                                                                                                                               | 30,423,322.28              |
| 2010       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Movimiento de Masas | TORMENTA TROPICAL NICOLE                                                                                                                               | 121,693,289.10             |
| 2017       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación          | TORMENTA TROPICAL NATE                                                                                                                                 | 27,504,641.41              |

Pérdidas históricas en el sector servicios y edificaciones a nivel nacional.

Fuente: Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica

| Año Inicio | Tipo de Evento     | Categoría        | Subcategoría        | Evento                                                                                                                                                 | Cantón            | Valor Constante en Colones |
|------------|--------------------|------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------|
| 1991       | Geotectónico       | SISMO            |                     | TERREMOTO DE ALAJUELA                                                                                                                                  | 603 Buenos Aires  | 1,318,832,934.30           |
| 1991       | Geotectónico       | SISMO            |                     | TERREMOTO DE LIMON                                                                                                                                     | 201 Alajuela      | 92,544,392.39              |
| 1991       | Geotectónico       | SISMO            |                     | TERREMOTO DE LIMON                                                                                                                                     | 201 Alajuela      | 69,408,294.29              |
| 1991       | Geotectónico       | SISMO            |                     | TERREMOTO DE LIMON                                                                                                                                     | 701 Limón         | 36,157,348.60              |
| 1991       | Geotectónico       | SISMO            |                     | TERREMOTO DE LIMON                                                                                                                                     | 701 Limón         | 249,384,001.39             |
| 1996       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación          | HURACAN CESAR                                                                                                                                          | 119 Perez Zeledón | 141,275,487.20             |
| 1996       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación          | HURACAN CESAR                                                                                                                                          | 607 Golfito       | 30,392,598.92              |
| 1996       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación          | PLAN REGULADOR TORMENTA TROPICAL LILI                                                                                                                  | 103 Desamparados  | 7,281,588.75               |
| 1996       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación          | HURACAN CESAR                                                                                                                                          | 119 Perez Zeledón | 30,392,598.87              |
| 1996       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación          | HURACAN CESAR                                                                                                                                          | 119 Perez Zeledón | 75,146,535.74              |
| 1996       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación          | HURACAN CESAR                                                                                                                                          | 605 Osa           | 30,392,598.92              |
| 2006       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |                     |                                                                                                                                                        | 207 Palmares      | 76,364,895.23              |
| 2006       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación          | LLUVIAS INTENSAS ASOCIADAS A UN SISTEMA DE BAJA PRESION                                                                                                | 207 Palmares      | 10,181,986.03              |
| 2007       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación          | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA POR TEMPORAL Y PASO DE UNA ONDA TROPICAL EN EL PACIFICO CENTRAL, NORTE, SUR Y CORDILLERA DE GUANACASTE, DECRETO 34045-MP | 601 Puntarenas    | 26,213,411.09              |
| 2008       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |                     | INUNDACIONES Y DESLIZAMIENTOS ASOCIADOS AL PASO DE LA TORMENTA TROPICAL ALMA                                                                           | 609 Parrita       | 114,045,241.75             |
| 2008       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |                     | INUNDACIONES Y DESLIZAMIENTOS ASOCIADOS AL PASO DE LA TORMENTA TROPICAL ALMA                                                                           | 609 Parrita       | 35,639,138.05              |
| 2008       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |                     | INUNDACIONES Y DESLIZAMIENTOS ASOCIADOS AL PASO DE LA TORMENTA TROPICAL ALMA                                                                           | 609 Parrita       | 712,782,760.92             |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            |                     | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA POR SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                              | 402 Barva         | 10,154,266.23              |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            |                     | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA POR SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                              | 402 Barva         | 3,275,569.75               |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            |                     | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA POR SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                              | 404 Santa Bárbara | 3,930,683.70               |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            |                     | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA POR SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                              | 404 Santa Bárbara | 2,620,455.80               |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            |                     | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA POR SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                              | 404 Santa Bárbara | 20,963,646.42              |
| 2009       | Geotectónico       | SISMO            | Movimiento de Masas | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA POR SISMO 6,2 RICHTER TERREMOTO DE CINCHONA                                                                              | 402 Barva         | 51,098,888.14              |
| 2010       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |                     | TEMPORAL POR LOS EFECTOS INDIRECTOS DEL PASO DEL HURACAN TOMAS                                                                                         | 605 Osa           | 96,263,762.71              |
| 2010       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |                     | TEMPORAL POR LOS EFECTOS INDIRECTOS DEL PASO DEL HURACAN TOMAS                                                                                         | 605 Osa           | 84,230,792.37              |
| 2010       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |                     | TEMPORAL POR LOS EFECTOS INDIRECTOS DEL PASO DEL HURACAN TOMAS                                                                                         | 605 Osa           | 84,230,792.37              |
| 2010       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |                     | TEMPORAL POR LOS EFECTOS INDIRECTOS DEL PASO DEL HURACAN TOMAS                                                                                         | 605 Osa           | 72,197,822.03              |

| Año Inicio | Tipo de Evento     | Categoría        | Subcategoría | Evento                                                         | Cantón          | Valor Constante en Colones |
|------------|--------------------|------------------|--------------|----------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------|
| 2010       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |              | TEMPORAL POR LOS EFECTOS INDIRECTOS DEL PASO DEL HURACAN TOMAS | 605 Osa         | 78,214,307.20              |
| 2010       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |              | TEMPORAL POR LOS EFECTOS INDIRECTOS DEL PASO DEL HURACAN TOMAS | 605 Osa         | 72,197,822.03              |
| 2010       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |              | TEMPORAL POR LOS EFECTOS INDIRECTOS DEL PASO DEL HURACAN TOMAS | 605 Osa         | 72,197,822.03              |
| 2010       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |              | TEMPORAL POR LOS EFECTOS INDIRECTOS DEL PASO DEL HURACAN TOMAS | 609 Parrita     | 454,846,278.80             |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 203 Grecia      | 57,594,690.66              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 206 Naranjo     | 142,048,443.78             |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 206 Naranjo     | 26,965,479.74              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 206 Naranjo     | 7,845,559.84               |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 206 Naranjo     | 18,275,238.38              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 206 Naranjo     | 2,132,221.90               |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 206 Naranjo     | 64,134,235.50              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 211 Alfaro Ruiz | 49,287,764.12              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 211 Alfaro Ruiz | 2,768,975.51               |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 211 Alfaro Ruiz | 22,151,804.10              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 212 Sarchí      | 143,986,726.64             |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 212 Sarchí      | 83,069,265.37              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 502 Nicoya      | 575,946.91                 |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 502 Nicoya      | 22,151,804.10              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 502 Nicoya      | 11,075,902.05              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 502 Nicoya      | 333,384,651.68             |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 502 Nicoya      | 11,075,902.05              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 502 Nicoya      | 16,613,853.07              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 502 Nicoya      | 1,606,005,797.13           |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 503 Santa Cruz  | 886,072,163.93             |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 503 Santa Cruz  | 332,277,061.47             |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 503 Santa Cruz  | 93,591,372.32              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 507 Abangares   | 6,645,541.23               |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 507 Abangares   | 8,860,721.64               |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                            | 509 Nandayure   | 166,138,530.74             |

| Año Inicio | Tipo de Evento     | Categoría        | Subcategoría | Evento                                                                                                                                             | Cantón         | Valor Constante en Colones |
|------------|--------------------|------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------|
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                                                                                                                | 511 Hojancha   | 49,841,559.22              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                                                                                                                | 601 Puntarenas | 18,829,033.48              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                                                                                                                | 601 Puntarenas | 193,828,285.86             |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                                                                                                                | 601 Puntarenas | 49,841,559.22              |
| 2010       | Geotectónico       | SISMO            |              | TERREMOTO DE SAMARA                                                                                                                                | 601 Puntarenas | 635,756,777.62             |
| 2015       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS |              | INUNDACIONES Y DESLIZAMIENTOS PROVOCADOS POR TEMPORAL Y PASO DE UN SISTEMA DE BAJA PRESION. PROVINCIA DE LIMON Y CANTONES DE SARAPIQUI Y TURRIALBA | 704 Talamanca  | 614,500,000.00             |
| 2015       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | INUNDACIONES Y DESLIZAMIENTOS PROVOCADOS POR TEMPORAL Y PASO DE UN SISTEMA DE BAJA PRESION. PROVINCIA DE LIMON Y CANTONES DE SARAPIQUI Y TURRIALBA | 702 Pococí     | 12,000,000.00              |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE                                | 213 Upala      | 10,554,174.58              |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE                                | 213 Upala      | 3,518,058.19               |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE                                | 213 Upala      | 100,515,948.36             |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE                                | 213 Upala      | 154,333,316.65             |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE                                | 213 Upala      | 74,806,180.12              |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE                                | 213 Upala      | 1,778,923,212.85           |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE                                | 213 Upala      | 20,103,189.67              |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE                                | 213 Upala      | 153,789,401.00             |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE                                | 214 Los Chiles | 21,525,490.34              |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE                                | 215 Guatuso    | 80,412,758.69              |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE                                | 216 Río Cuarto | 250,586,259.27             |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE                                | 410 Sarapiquí  | 726,296,356.20             |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE                                | 410 Sarapiquí  | 981,569,395.71             |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE                                | 410 Sarapiquí  | 185,954,504.47             |

| Año Inicio | Tipo de Evento     | Categoría        | Subcategoría | Evento                                                                                                              | Cantón            | Valor Constante en Colones |
|------------|--------------------|------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------|
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE | 504 Bagaces       | 251,289,870.91             |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE | 510 La Cruz       | 63,325,047.47              |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE | 607 Golfito       | 80,412,758.69              |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE | 702 Pococí        | 1,551,972,489.79           |
| 2016       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACIÓN PROVOCADA POR EL PASO DEL HURACAN OTTO POR TERRITORIO COSTARRICENSE | 702 Pococí        | 60,309,569.02              |
| 2017       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACION PROVOCADA POR LA TORMENTA TROPICAL NATE                             | 112 Acosta        | 108,053,948.39             |
| 2017       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACION PROVOCADA POR LA TORMENTA TROPICAL NATE                             | 119 Perez Zeledón | 23,084,252.61              |
| 2017       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACION PROVOCADA POR LA TORMENTA TROPICAL NATE                             | 103 Desamparados  | 98,230,862.17              |
| 2017       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA ANTE LA SITUACION PROVOCADA POR LA TORMENTA TROPICAL NATE                             | 605 Osa           | 117,877,034.61             |
| 2021       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA TEMPORAL EN LA VERTIENTE DEL CARIBE                                                   | 305 Turrialba     | 69,666,927.07              |
| 2021       | Hidrometeorológico | LLUVIAS INTENSAS | Inundación   | PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA TEMPORAL EN LA VERTIENTE DEL CARIBE                                                   | 701 Limón         | 928,892.36                 |

## A. 2 CONJUNTO DE DATOS DE RIESGO PARA EL CANTÓN DE HEREDIA

Como parte de los productos incluidos en este entregable, se estableció un repositorio web (Drive) para alojar los resultados de riesgo para edificaciones e infraestructura del proyecto de Heredia. Este repositorio compila los entregables 5b, 5c y 5d.

A continuación, se presenta la lista de los archivos que componen este conjunto de datos.

El enlace para acceder al dataset es:

<https://onedrive.live.com/?redeem=aHR0cHM6Ly8xZHJ2Lm1zL2YyY85ZjZmNTQ4ZGFkMDc1MzQzL0VyTWNDRIkV3psTmdaZ0k2YTk5eWdNQIBINERfYThVTFV4QnN3Y2RFZi1ta3c%5FZT1qQ2RIZzU&id=9F6F548DAD075343%21sd9311ddf7d5e4290acdf8566692f9d81&cid=9F6F548DAD075343&sb=name&sd=1>

### Deslizamiento detonado por lluvia

#### *Edificaciones*

Este directorio contiene los archivos de resultados de riesgo para edificaciones del cantón de Heredia asociados a la amenaza de deslizamientos detonados por lluvia.

| File                            | Format |
|---------------------------------|--------|
| Heredia_desliz_lluvia_CR-SIRGAS | .shp   |
| Heredia_desliz_lluvia_WGS84     | .shp   |

Los archivos \*.shp utilizados en este proyecto se encuentran en formato vectorial y requieren un Sistema de Información Geográfica (SIG) para su visualización.

#### *Infraestructura*

Este directorio contiene los archivos de resultados de riesgo para infraestructura del cantón de Heredia asociados a la amenaza de deslizamientos detonados por lluvia.

| File                                              | Format |
|---------------------------------------------------|--------|
| Acueducto_Fuentes_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS         | .shp   |
| Acueducto_Fuentes_Desliz-Lluvia_WGS84             | .shp   |
| Acueducto_Hidrantes_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS       | .shp   |
| Acueducto_Hidrantes_Desliz-Lluvia_WGS84           | .shp   |
| Acueducto_Sist-Bombeo_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS     | .shp   |
| Acueducto_Sist-Bombeo_Desliz-Lluvia_WGS84         | .shp   |
| Acueducto_Tanques_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS         | .shp   |
| Acueducto_Tanques_Desliz-Lluvia_WGS84             | .shp   |
| Acueducto_Tuberias_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS        | .shp   |
| Acueducto_Tuberias_Desliz-Lluvia_WGS84            | .shp   |
| Alcantarillado_Colectores_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS | .shp   |
| Alcantarillado_Colectores_Desliz-Lluvia_WGS84     | .shp   |
| Alcantarillado_Pozos_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS      | .shp   |

| File                                                           | Format |
|----------------------------------------------------------------|--------|
| Alcantarillado_Pozos_Desliz-Lluvia_WGS84                       | .shp   |
| Alcantarillado_PTAR_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS                    | .shp   |
| Alcantarillado_PTAR_Desliz-Lluvia_WGS84                        | .shp   |
| Antenas_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS                                | .shp   |
| Antenas_Desliz-Lluvia_WGS84                                    | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Circuitos_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS       | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Circuitos_Desliz-Lluvia_WGS84           | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Postes_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS          | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Postes_Desliz-Lluvia_WGS84              | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Transformadores_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Transformadores_Desliz-Lluvia_WGS84     | .shp   |
| Electrico_Generacion_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS                   | .shp   |
| Electrico_Generacion_Desliz-Lluvia_WGS84                       | .shp   |
| Electrico_Transmision_Circuitos_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS        | .shp   |
| Electrico_Transmision_Circuitos_Desliz-Lluvia_WGS84            | .shp   |
| Electrico_Transmision_Subestaciones_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS    | .shp   |
| Electrico_Transmision_Subestaciones_Desliz-Lluvia_WGS84        | .shp   |
| Electrico_Transmision_Torres_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS           | .shp   |
| Electrico_Transmision_Torres_Desliz-Lluvia_WGS84               | .shp   |
| Ferreo_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS                                 | .shp   |
| Ferreo_Desliz-Lluvia_WGS84                                     | .shp   |
| Poliducto_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS                              | .shp   |
| Poliducto_Desliz-Lluvia_WGS84                                  | .shp   |
| Puentes_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS                                | .shp   |
| Puentes_Desliz-Lluvia_WGS84                                    | .shp   |
| Vias_Desliz-Lluvia_CR-SIRGAS                                   | .shp   |
| Vias_Desliz-Lluvia_WGS84                                       | .shp   |

## Deslizamiento detonado por sismo

### Edificaciones

Este directorio contiene los archivos de resultados de riesgo para edificaciones del cantón de Heredia asociados a la amenaza de deslizamientos detonados por sismo.

| File                            | Format |
|---------------------------------|--------|
| Heredia_desliza_sismo_CR-SIRGAS | .shp   |
| Heredia_desliza_sismo_WGS84     | .shp   |

### Infraestructura

Este directorio contiene los archivos de resultados de riesgo para infraestructura del cantón de Heredia asociados a la amenaza de deslizamientos detonados por sismo.

| File                                                          | Format |
|---------------------------------------------------------------|--------|
| Acueducto_Fuentes_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS                      | .shp   |
| Acueducto_Fuentes_Desliz-Sismo_WGS84                          | .shp   |
| Acueducto_Hidrantes_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS                    | .shp   |
| Acueducto_Hidrantes_Desliz-Sismo_WGS84                        | .shp   |
| Acueducto_Sist-Bombeo_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS                  | .shp   |
| Acueducto_Sist-Bombeo_Desliz-Sismo_WGS84                      | .shp   |
| Acueducto_Tanques_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS                      | .shp   |
| Acueducto_Tanques_Desliz-Sismo_WGS84                          | .shp   |
| Acueducto_Tuberias_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS                     | .shp   |
| Acueducto_Tuberias_Desliz-Sismo_WGS84                         | .shp   |
| Alcantarillado_Coletores_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS               | .shp   |
| Alcantarillado_Coletores_Desliz-Sismo_WGS84                   | .shp   |
| Alcantarillado_Pozos_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS                   | .shp   |
| Alcantarillado_Pozos_Desliz-Sismo_WGS84                       | .shp   |
| Alcantarillado_PTAR_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS                    | .shp   |
| Alcantarillado_PTAR_Desliz-Sismo_WGS84                        | .shp   |
| Antenas_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS                                | .shp   |
| Antenas_Desliz-Sismo_WGS84                                    | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Circuitos_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS       | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Circuitos_Desliz-Sismo_WGS84           | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Postes_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS          | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Postes_Desliz-Sismo_WGS84              | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Transformadores_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Transformadores_Desliz-Sismo_WGS84     | .shp   |
| Electrico_Generacion_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS                   | .shp   |
| Electrico_Generacion_Desliz-Sismo_WGS84                       | .shp   |
| Electrico_Transmision_Circuitos_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS        | .shp   |
| Electrico_Transmision_Circuitos_Desliz-Sismo_WGS84            | .shp   |
| Electrico_Transmision_Subestaciones_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS    | .shp   |
| Electrico_Transmision_Subestaciones_Desliz-Sismo_WGS84        | .shp   |
| Electrico_Transmision_Torres_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS           | .shp   |
| Electrico_Transmision_Torres_Desliz-Sismo_WGS84               | .shp   |
| Ferreo_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS                                 | .shp   |
| Ferreo_Desliz-Sismo_WGS84                                     | .shp   |
| Poliducto_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS                              | .shp   |
| Poliducto_Desliz-Sismo_WGS84                                  | .shp   |
| Puentes_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS                                | .shp   |
| Puentes_Desliz-Sismo_WGS84                                    | .shp   |
| Vias_Desliz-Sismo_CR-SIRGAS                                   | .shp   |
| Vias_Desliz-Sismo_WGS84                                       | .shp   |

## Inundación Fluvial

### Edificaciones

Este directorio contiene los archivos de resultados de riesgo para edificaciones del cantón de Heredia asociados a la amenaza de inundación fluvial.

| File                             | Format |
|----------------------------------|--------|
| Heredia_inunda_fluvial_CR-SIRGAS | .shp   |
| Heredia_inunda_fluvial_WGS84     | .shp   |

### *Infraestructura*

Este directorio contiene los archivos de resultados de riesgo para infraestructura del cantón de Heredia asociados a la amenaza de inundación fluvial.

| File                                                     | Format |
|----------------------------------------------------------|--------|
| Acueducto_Fuentes_Fluvial_CR-SIRGAS                      | .shp   |
| Acueducto_Fuentes_Fluvial_WGS84                          | .shp   |
| Acueducto_Sist-Bombeo_Fluvial_CR-SIRGAS                  | .shp   |
| Acueducto_Sist-Bombeo_Fluvial_WGS84                      | .shp   |
| Alcantarillado_PTAR_Fluvial_CR-SIRGAS                    | .shp   |
| Alcantarillado_PTAR_Fluvial_WGS84                        | .shp   |
| Antenas_Fluvial_CR-SIRGAS                                | .shp   |
| Antenas_Fluvial_WGS84                                    | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Transformadores_Fluvial_CR-SIRGAS | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Transformadores_Fluvial_WGS84     | .shp   |
| Electrico_Generacion_Fluvial_CR-SIRGAS                   | .shp   |
| Electrico_Generacion_Fluvial_WGS84                       | .shp   |
| Electrico_Transmision_Subestaciones_Fluvial_CR-SIRGAS    | .shp   |
| Electrico_Transmision_Subestaciones_Fluvial_WGS84        | .shp   |
| Ferreo_Fluvial_CR-SIRGAS                                 | .shp   |
| Ferreo_Fluvial_WGS84                                     | .shp   |
| Puentes_Fluvial_CR-SIRGAS                                | .shp   |
| Puentes_Fluvial_WGS84                                    | .shp   |
| Vias_Fluvial_CR-SIRGAS                                   | .shp   |
| Vias_Fluvial_WGS84                                       | .shp   |

## **Inundación Pluvial**

### *Edificaciones*

Este directorio contiene los archivos de resultados de riesgo para edificaciones del cantón de Heredia asociados a la amenaza de inundación pluvial.

| File                             | Format |
|----------------------------------|--------|
| Heredia_inunda_pluvial_CR-SIRGAS | .shp   |
| Heredia_inunda_pluvial_WGS84     | .shp   |

### *Infraestructura*

Este directorio contiene los archivos de resultados de riesgo para infraestructura del cantón de Heredia asociados a la amenaza de inundación pluvial.

| File                                                     | Format |
|----------------------------------------------------------|--------|
| Acueducto_Fuentes_Pluvial_CR-SIRGAS                      | .shp   |
| Acueducto_Fuentes_Pluvial_WGS84                          | .shp   |
| Acueducto_Sist-Bombeo_Pluvial_CR-SIRGAS                  | .shp   |
| Acueducto_Sist-Bombeo_Pluvial_WGS84                      | .shp   |
| Alcantarillado_PTAR_Pluvial_CR-SIRGAS                    | .shp   |
| Alcantarillado_PTAR_Pluvial_WGS84                        | .shp   |
| Antenas_Pluvial_CR-SIRGAS                                | .shp   |
| Antenas_Pluvial_WGS84                                    | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Transformadores_Pluvial_CR-SIRGAS | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Transformadores_Pluvial_WGS84     | .shp   |
| Electrico_Generacion_Pluvial_CR-SIRGAS                   | .shp   |
| Electrico_Generacion_Pluvial_WGS84                       | .shp   |
| Electrico_Transmision_Subestaciones_Pluvial_CR-SIRGAS    | .shp   |
| Electrico_Transmision_Subestaciones_Pluvial_WGS84        | .shp   |
| Ferreo_Pluvial_CR-SIRGAS                                 | .shp   |
| Ferreo_Pluvial_WGS84                                     | .shp   |
| Puentes_Pluvial_CR-SIRGAS                                | .shp   |
| Puentes_Pluvial_WGS84                                    | .shp   |
| Vias_Pluvial_CR-SIRGAS                                   | .shp   |
| Vias_Pluvial_WGS84                                       | .shp   |

## Sismo

### Edificaciones

Este directorio contiene los archivos de resultados de riesgo para edificaciones del cantón de Heredia asociados a la amenaza sísmica.

| File                    | Format |
|-------------------------|--------|
| Heredia_sismo_CR-SIRGAS | .shp   |
| Heredia_sismo_WGS84     | .shp   |

### Infraestructura

Este directorio contiene los archivos de resultados de riesgo para infraestructura del cantón de Heredia asociados a la amenaza sísmica.

| File                                | Format |
|-------------------------------------|--------|
| Acueducto_Fuentes_Sismo_CR-SIRGAS   | .shp   |
| Acueducto_Fuentes_Sismo_WGS84       | .shp   |
| Acueducto_Hidrantas_Sismo_CR-SIRGAS | .shp   |
| Acueducto_Hidrantas_Sismo_WGS84     | .shp   |

| File                                                   | Format |
|--------------------------------------------------------|--------|
| Acueducto_Sist-Bombeo_Sismo_CR-SIRGAS                  | .shp   |
| Acueducto_Sist-Bombeo_Sismo_WGS84                      | .shp   |
| Acueducto_Tanques_Sismo_CR-SIRGAS                      | .shp   |
| Acueducto_Tanques_Sismo_WGS84                          | .shp   |
| Acueducto_Tuberias_Sismo_CR-SIRGAS                     | .shp   |
| Acueducto_Tuberias_Sismo_WGS84                         | .shp   |
| Alcantarillado_Coletores_Sismo_CR-SIRGAS               | .shp   |
| Alcantarillado_Coletores_Sismo_WGS84                   | .shp   |
| Alcantarillado_Pozos_Sismo_CR-SIRGAS                   | .shp   |
| Alcantarillado_Pozos_Sismo_WGS84                       | .shp   |
| Alcantarillado_PTAR_Sismo_CR-SIRGAS                    | .shp   |
| Alcantarillado_PTAR_Sismo_WGS84                        | .shp   |
| Antenas_Sismo_CR-SIRGAS                                | .shp   |
| Antenas_Sismo_WGS84                                    | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Circuitos_Sismo_CR-SIRGAS       | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Circuitos_Sismo_WGS84           | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Postes_Sismo_CR-SIRGAS          | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Postes_Sismo_WGS84              | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Transformadores_Sismo_CR-SIRGAS | .shp   |
| Electrico_Distribucion_Transformadores_Sismo_WGS84     | .shp   |
| Electrico_Generacion_Sismo_CR-SIRGAS                   | .shp   |
| Electrico_Generacion_Sismo_WGS84                       | .shp   |
| Electrico_Transmision_Circuitos_Sismo_CR-SIRGAS        | .shp   |
| Electrico_Transmision_Circuitos_Sismo_WGS84            | .shp   |
| Electrico_Transmision_Subestaciones_Sismo_CR-SIRGAS    | .shp   |
| Electrico_Transmision_Subestaciones_Sismo_WGS84        | .shp   |
| Electrico_Transmision_Torres_Sismo_CR-SIRGAS           | .shp   |
| Electrico_Transmision_Torres_Sismo_WGS84               | .shp   |
| Ferreo_Sismo_CR-SIRGAS                                 | .shp   |
| Ferreo_Sismo_WGS84                                     | .shp   |
| Poliducto_Sismo_CR-SIRGAS                              | .shp   |
| Poliducto_Sismo_WGS84                                  | .shp   |
| Puentes_Sismo_CR-SIRGAS                                | .shp   |
| Puentes_Sismo_WGS84                                    | .shp   |
| Vias_Sismo_CR-SIRGAS                                   | .shp   |
| Vias_Sismo_WGS84                                       | .shp   |

## Metadatos RDLS

Este directorio contiene los metadatos siguiendo el estándar Risk Data Library, proporcionando información estructurada para describir, organizar y asegurar la consistencia de los conjuntos de datos utilizados en el proyecto.

| File                   | Format |
|------------------------|--------|
| Loss_Heredia_Buildings | .json  |

El archivo \*.json puede contener información relacionada con amenaza, exposición, vulnerabilidad o pérdidas, dependiendo del tipo de datos representados dentro del proyecto.