

Estudio de Riesgo Climático para la Implementación de la E2050 de Colombia - Fase 2

CO-T3812-002

Análisis de Riesgo de Línea Base

(Entregable 2)

Anexo 3: Evaluación del Riesgo por Deslizamientos

Preparado para:



COLOMBIA
INTEGRO DE LA
VIDA



Ambiente



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

Enero de 2024

Consultor

INGENIAR CAD/CAE Ltda.
Carrera 19A # 84-14 OF 504
Edificio Torrenova
Tel. 57-1-691-6113
Fax 57-1-691-6102
Bogotá, D.C., Colombia
www.ingeniar-risk.com



Cardona, Omar-Darío; Bernal, Gabriel A.; Villegas, Claudia P.; González, Diana M.; Rincón, David F.; Molina, John F.; Grajales, Sthefania; Herrera, Sergio A.; Acosta, Mariana; Suárez, Dora C.; Pérez, Maria del Pilar; Marulanda, Paula M.; Marulanda, Mabel C. (2024). Estudio de Riesgo Climático para la Implementación de la E2050 de Colombia - Fase 2, Análisis de Riesgo de Línea Base – A.3 Evaluación del Riesgo por Deslizamientos. Banco Interamericano de Desarrollo, Minambiente de Colombia.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	5
1.1	MODELO DE CÁLCULO	5
2	MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS.....	7
2.1	SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS	7
2.2	LLUVIA DETONANTE	10
2.3	UMBRALES LLUVIA -DESLIZAMIENTO	14
3	MODELACIÓN DE LA EXPOSICIÓN	15
3.1	INFORMACIÓN DISPONIBLE PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE EXPOSICIÓN DE LA RED VIAL	15
3.1.1	RED VIAL DE OPEN STREET MAP	15
3.1.2	MAPA DE PENDIENTES (IGAC)	17
3.2	CONFORMACIÓN DEL MODELO DE EXPOSICIÓN DE EDIFICACIONES	17
3.2.1	TIPO DE ELEMENTO	18
3.2.2	TIPO DE VÍA.....	18
3.2.3	SUPERFICIE DE RODADURA.....	19
3.2.4	PENDIENTE	20
3.2.5	VALORACIÓN ECONÓMICA	20
3.3	CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN DE LA RED VIAL	22
3.3.1	TIPO DE ELEMENTO	22
3.3.2	TIPO DE VÍA.....	24
3.3.3	SUPERFICIE DE RODADURA.....	26
3.3.4	PENDIENTE	28
3.3.5	VALORACIÓN ECONÓMICA	29
3.4	CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN DE EDIFICACIONES	30
3.4.1	NÚMERO DE PISOS	31
3.4.2	SECTOR DE USO	32
3.4.3	CATEGORÍA SOCIOECONÓMICA.....	33
3.4.4	SISTEMA ESTRUCTURAL	34
3.4.5	POBLACIÓN.....	34
4	EVALUACIÓN DEL RIESGO	36
4.1	MÉTRICAS DEL RIESGO.....	37
4.1.1	LA PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (PAE)	37

4.1.2	LA PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE (PML)	37
4.2	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN SOBRE LA RED VIAL	38
4.3	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN SOBRE EDIFICACIONES	55
5	<u>REFERENCIAS.....</u>	<u>65</u>

1 INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos son un fenómeno propio de la geodinámica terrestre, de muy alta recurrencia, especialmente en territorios como el colombiano, en donde la particular topografía y condiciones geológicas implican una alta susceptibilidad a su ocurrencia. Si bien existen diferentes tipos de movimientos en masa que pueden clasificarse como deslizamientos, en el modelo empleado no es posible capturar las notables diferencias entre uno y otro, sino únicamente la probabilidad que una ubicación específica en el terreno presente un deslizamiento de tierra por cuenta de la susceptibilidad de la ladera y la ocurrencia de la lluvia detonante.

La evaluación se centra en la red vial y edificaciones del municipio de Manizales, en Caldas, y de la ciudad de Bogotá, como casos a escala de ciudad, pero adicionalmente se trabajan los departamentos de Caldas y Cauca completos, con el fin de considerar vías carreteras intermunicipales que son de muy alta importancia.

1.1 Modelo de cálculo

La amenaza por deslizamientos depende de dos componentes fundamentales, la susceptibilidad, que mide las condiciones intrínsecas de las laderas, es decir, aquellos factores que las hacen propensas a la ocurrencia de deslizamientos, y los fenómenos detonantes, que son factores externos que inducen la ocurrencia de los deslizamientos. Los detonantes son por lo general terremotos y eventos de lluvia intensa, que tengan la capacidad de incrementar las cargas o reducir la resistencia del material de las laderas. Dado el alcance de este trabajo, el modelo de riesgo se refiere únicamente a deslizamientos detonados por lluvia intensa.

La probabilidad de deslizamiento, ante cada evento simulado de lluvia, se combina con la capa de exposición de forma tal que se busca asociar un tramo vial a un cierto número de celdas circundantes dentro del modelo de amenaza. En este caso, la vulnerabilidad se considera binaria, es decir, se asume que, dado que localmente los deslizamientos son eventos de muy alta energía, si el sitio donde está la infraestructura se desliza, esta se pierde por completo. Esto implica que la probabilidad de deslizamiento puede entenderse una proporción de pérdida sobre el valor de reposición del tramo vial. En el caso de edificaciones, se asume la pérdida total del bien inmueble.

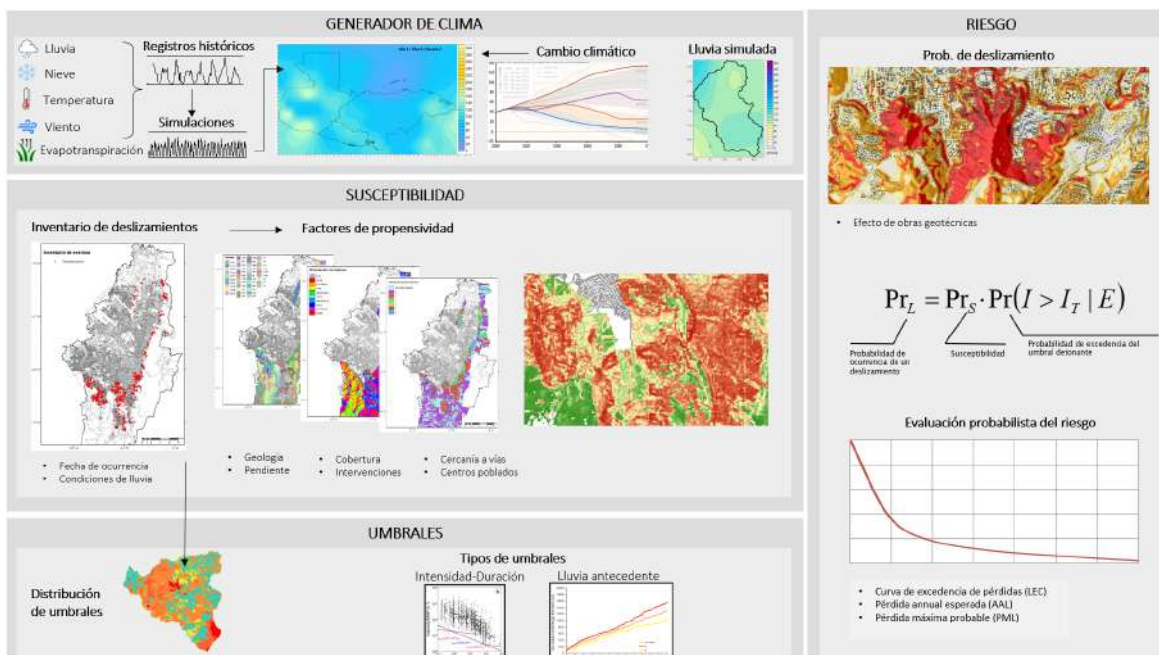


Figura 1. Esquema de componentes del modelo de riesgo por inundaciones implementado.

2 MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS

Los procesos de remoción en masa se pueden definir como el movimiento cuesta abajo de un cierto volumen de roca o suelo cerca de la superficie, debido principalmente a la fuerza de la gravedad. Los movimientos en masa son una parte importante del proceso de erosión, ya que el material en altas elevaciones es transportado a elevaciones bajas en donde a su vez puede ser transportado por ríos o quebradas. Los procesos de movimiento en masa ocurren continuamente en todas las laderas; algunos muy lentamente y otros muy repentinamente, causando en ocasiones daños y pérdidas. A cualquier movimiento perceptible cuesta abajo de roca o suelo, o una mezcla de ambos, se le conoce en términos generales como un deslizamiento. La evaluación de la estabilidad de laderas requiere el entendimiento de 4 aspectos fundamentales que la gobiernan:

- Las cargas actuantes sobre los bloques o porciones de material que pueden deslizarse.
- El papel del agua en la modificación de las propiedades mecánicas del material.
- La estructura geológica del sitio y las modificaciones generada por el hombre.
- Los eventos o fenómenos detonantes.

Las condiciones de carga, contenidos de agua y su papel modificador en la resistencia de los materiales de la ladera, así como la estructura geológica y las modificaciones causadas por el hombre, son aspectos que dan cuenta de la *susceptibilidad* de las laderas, la cual establece las condiciones intrínsecas que favorecen la inestabilidad. Los *detonantes* son factores externos a la ladera, que deben ser tratados por separado e incorporados al momento de calcular la amenaza por deslizamientos.

2.1 Susceptibilidad a los deslizamientos

Si se contara con todos los parámetros de resistencia del suelo en una región extensa, como una ciudad por ejemplo, así como con el conocimiento de las condiciones topográficas y de carga de todas las laderas, sería posible aplicar métodos basados en la mecánica de suelos, como el equilibrio límite, para calcular la susceptibilidad en términos de factores de seguridad. Sin embargo, no es usual contar con este tipo de información, o se requiere de campañas de levantamiento geotécnico muy detalladas y costosas para cubrir suficientemente bien una ciudad, o incluso una región dentro de una ciudad. Si bien el equilibrio límite es el enfoque preferido en aplicaciones de ingeniería geotécnica, es impráctico aplicarlo en territorios extensos.

Lo primero es pensar en como representar espacialmente las características que, sabemos, inciden en la susceptibilidad, como las cargas, la estructura geológica, y las modificaciones humanas, por ejemplo. Si pensamos en la carga, la podemos asociar por ejemplo al número de viviendas alrededor de cada ubicación en la ciudad, al tipo de cobertura del terreno, a la pendiente topográfica, por mencionar algunos aspectos. Así mismo, la estructura geológica está asociada a las formaciones superficiales, a la cercanía a fallas geológicas o a la cercanía de cada sitio a ríos y quebradas. Así mismo, las modificaciones hechas por el hombre y que tienen incidencia en el problema las podemos asociar a, por ejemplo, la cercanía a vías, el estrato socioeconómico o la distancia al sistema de alcantarillado en la ciudad. Si bien en ningún caso estamos haciendo una afirmación acerca de las cargas actuantes, la mecánica de los materiales, la geometría de las laderas, etcétera, si sabemos que estos aspectos reflejan en parte el problema.

Entonces es posible encontrar una función que relacione factores de propensividad, es decir condiciones del terreno que lo hacen, en mayor o menor grado, propenso a los deslizamientos, con una medida de la susceptibilidad, que ya no será un factor de seguridad, sino una probabilidad de deslizamiento, o mejor, una probabilidad que cada sitio sea inestable o no.

La susceptibilidad a los deslizamientos en Bogotá y Manizales fue obtenida de proyectos anteriores en estas ciudades, que implementan la metodología mencionada, es decir, se consideran apropiados para la evaluación del riesgo. Es más, el mismo grupo consultor fue el encargado, en aquellas oportunidades, de generar la evaluación de susceptibilidad, por lo cual se cuenta con la información. La susceptibilidad de Manizales fue obtenida de INGENIAR (2015), y la susceptibilidad de Bogotá fue obtenida de Cardona et al. (2016). La Figura 2 muestra el mapa correspondiente para Manizales mientras que la Figura 3 muestra el de Bogotá.

Para el caso de los departamentos de Caldas y Cauca, se trabajó con la misma susceptibilidad a los deslizamientos que se definió para la Fase 1 de E2050 (Cardona et al., 2020), la cual se determinó del estudio del IDEAM y el Servicio Geológico Colombiano “Zonificación de la Susceptibilidad General del Terreno a los Deslizamientos de Tierra”¹, y que se presenta en la Figura 4.

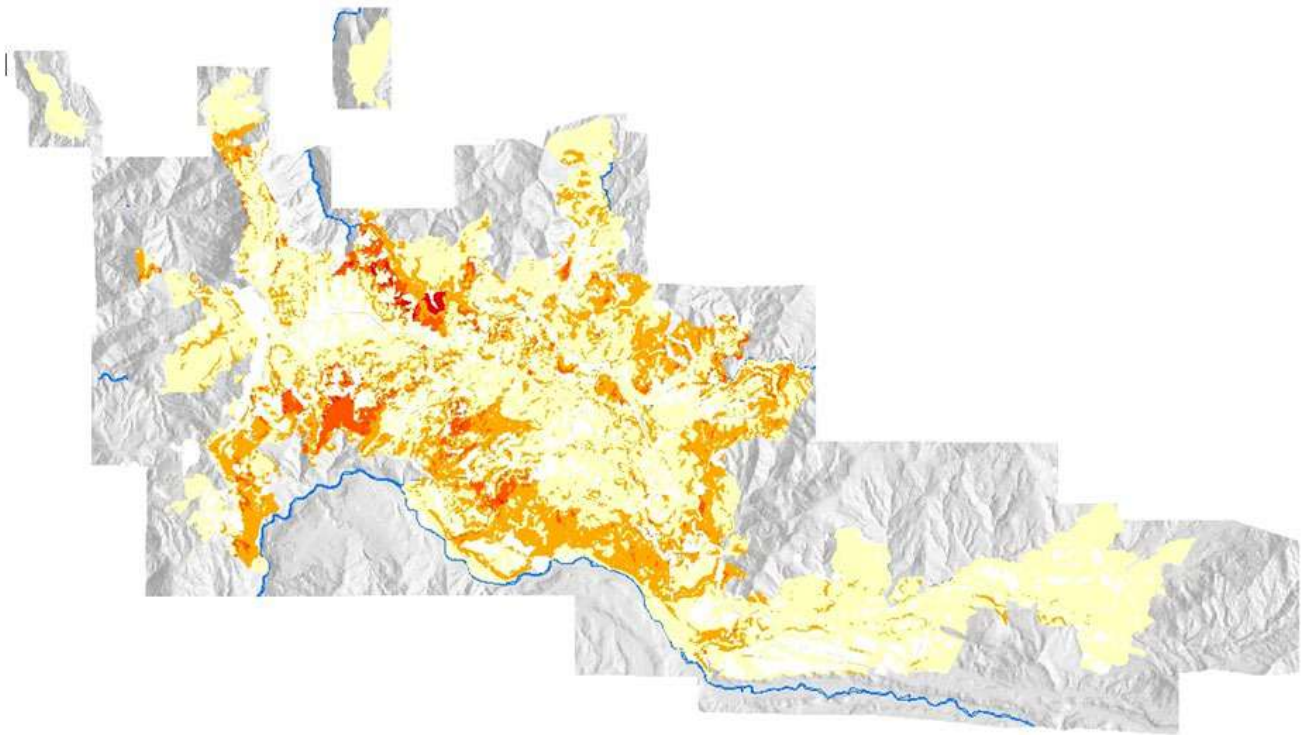


Figura 2. Susceptibilidad a los deslizamientos de Manizales (Tomado de INGENIAR, 2015)

¹ Obtenido del Geoportal del IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/capas-geo>

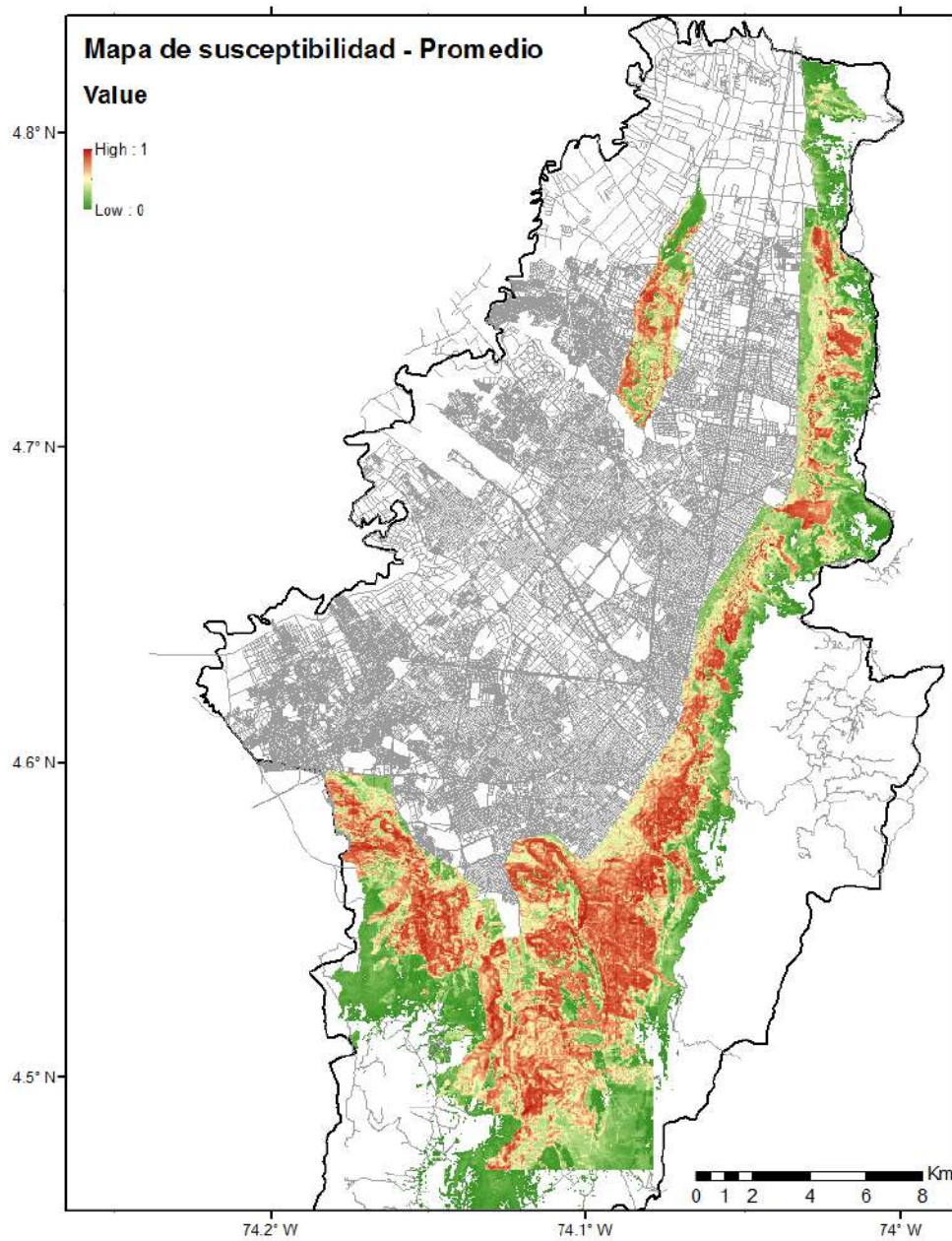


Figura 3. Susceptibilidad a los deslizamientos de Bogotá (Tomado de Cardona et al., 2016)

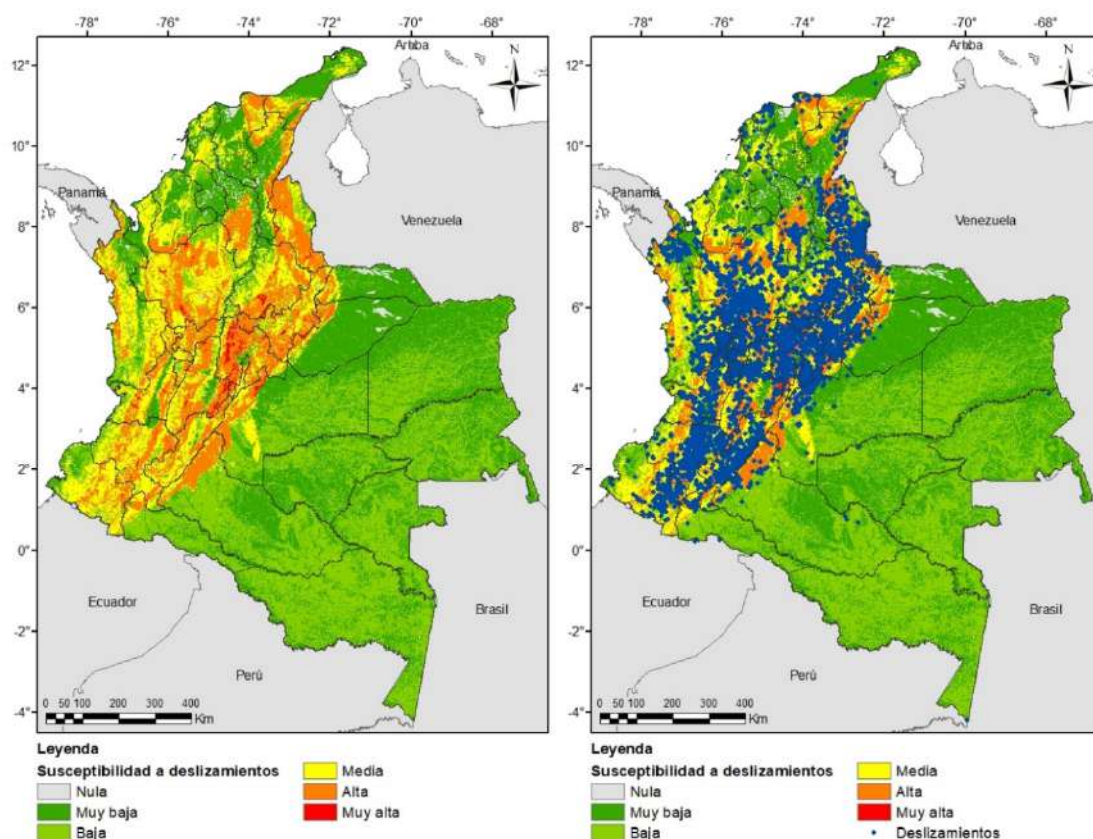


Figura 4. Mapa de susceptibilidad general del terreno a los deslizamientos (izq.) y comparación con la ubicación de los deslizamientos históricos reportados por el SGC. (Fuente de la información: IDEAM, SGC, Elaboración propia)

2.2 Lluvia detonante

De las series de precipitación obtenidas en diferentes estaciones dentro del territorio cubierto es posible obtener eventos de lluvias fuertes generados sintéticamente, con valores totales y patrones espaciales que respetan las características de la lluvia histórica. La generación de estos eventos de lluvia se realiza por medio de la aplicación de criterios sencillos de selección a las series simuladas de precipitación. Por ejemplo, pueden emplearse los siguientes criterios:

- Un número mínimo de estaciones que registren un determinado aguacero (e.g., que el 70% de las estaciones del área de una cuenca se haya registrado un valor de precipitación para ese evento).
- Un valor umbral mínimo para la selección de un evento considerado como significativo, es decir que, además que el evento esté registrado en el número mínimo de estaciones definido, la precipitación registrada en cada una de estas estaciones supere dicho valor umbral (e.g. que la precipitación sea mayor a 10 mm en 24 horas).
- Un valor umbral medio que considera un valor mínimo para el promedio de precipitación en el número de estaciones que superan el umbral mínimo (e.g. que el valor promedio en las estaciones con registro sea de, por lo menos, 50 mm en 24 horas).

A partir de la aplicación de estos criterios, u otros similares, es posible encontrar eventos de lluvias fuertes sobre la serie de valores diarios simulados. Los valores recuperados de las series, son interpolados espacialmente aplicando el método de Kriging.

Los aguaceros simulados cuentan implícitamente con patrones realistas de precipitación, obtenidos directamente de los datos de las series individuales, lo cual le confiere una ventaja especial al método al no requerirse el uso de patrones espaciales sintéticos. Así mismo, la distribución de la lluvia fuerte en la cuenca cambia considerablemente en magnitud y distribución espacial. En el conjunto de eventos no hay entonces dos eventos idénticos. La Figura 5 muestra, a modo de ilustración, eventos de precipitación estocásticos generados sobre una cuenca arbitraria. Estos eventos indican la precipitación total diaria en un escenario de lluvia fuerte. Sin embargo, la precipitación no cae uniformemente a lo largo de 24 horas, por lo cual se requiere simular, adicionalmente, su distribución en el tiempo (lluvia intradiaria). Esto se realiza mediante el uso de curvas Huff (Huff, 1967).

Las curvas Huff corresponden a una metodología de “tormentas de diseño” propuesta por Huff en 1967 con el fin de describir la distribución temporal de la precipitación de una zona en términos probabilistas (Rao & Kao, 2006). Huff (1967) identificó que la mayor cantidad de precipitación ocurre en una porción pequeña del total de la duración de cada evento, confirmando el concepto de las curvas IDF en las que se establece que las mayores intensidades de precipitación se registran en lapsos cortos. Así, los eventos de precipitación para un área determinada se clasifican en cuatro grupos: primer, segundo, tercer y cuarto cuartil, definidos como el 25% del segmento temporal en el que ocurre la mayor cantidad de precipitación (ver Figura 6).

Las curvas Huff se obtienen de información intradiaria, en caso de estar disponible, y se construyen en base a la cuantificación estadística de los cuartiles mencionados. Una vez conocidas las curvas, pueden ser usadas para distribuir temporalmente la precipitación total del día en valores horarios. La derivada con respecto al tiempo de las curvas Huff es el hietograma, es decir, la función de intensidad versus tiempo, como se ilustra en la Figura 7. Esto hace de las curvas Huff una poderosa herramienta al permitir sintetizar hietogramas desde la información diaria previamente simulada. De esta manera, los aguaceros identificados previamente (ver Figura 7) pueden ser distribuidos en valores horarios haciendo uso de las curvas Huff, como se ilustra en la Figura 8.

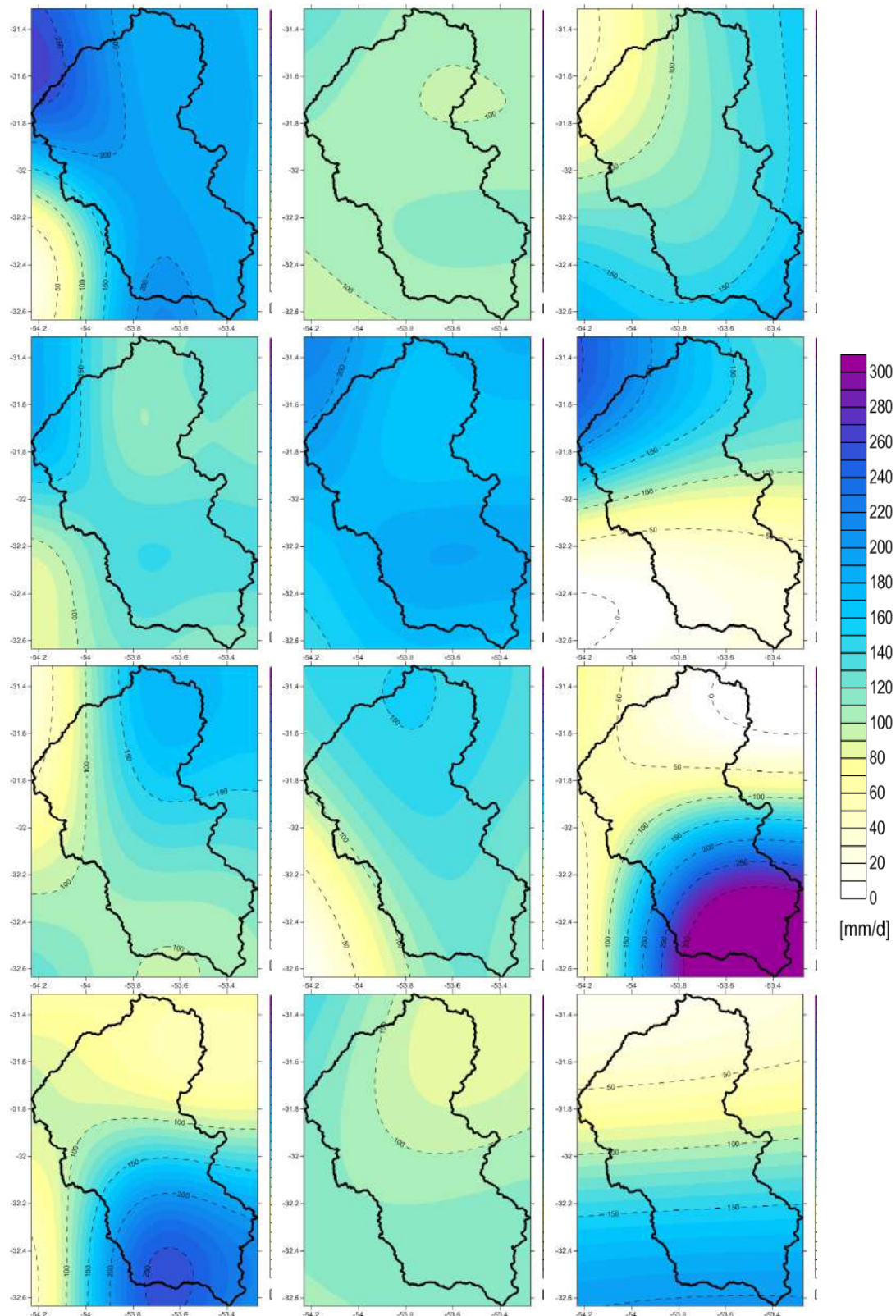


Figura 5. Ilustración de eventos estocásticos de precipitación generados en una cuenca arbitraria

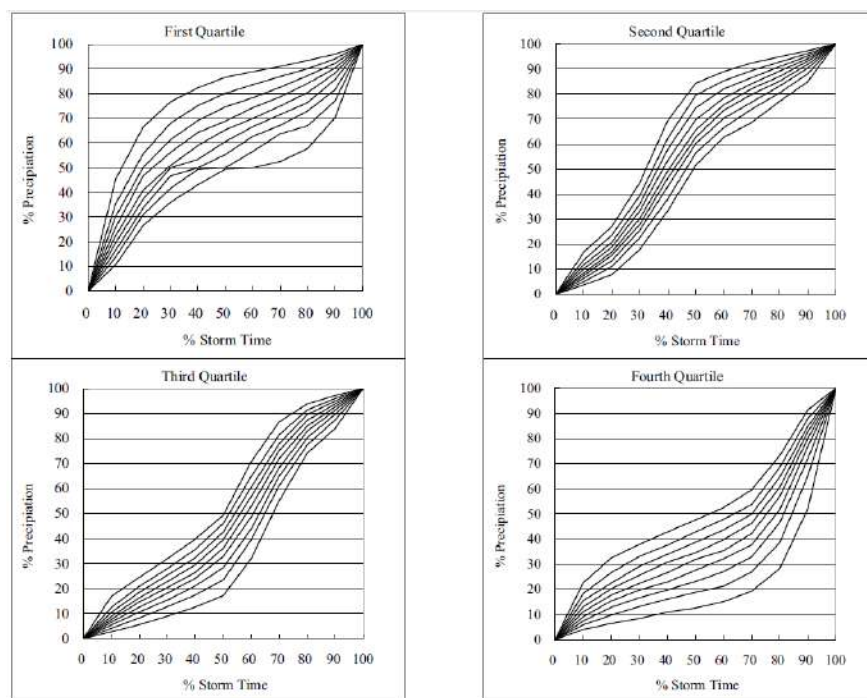


Figura 6. Ejemplo de curvas Huff. Tomado de Rao & Kao, 2006.

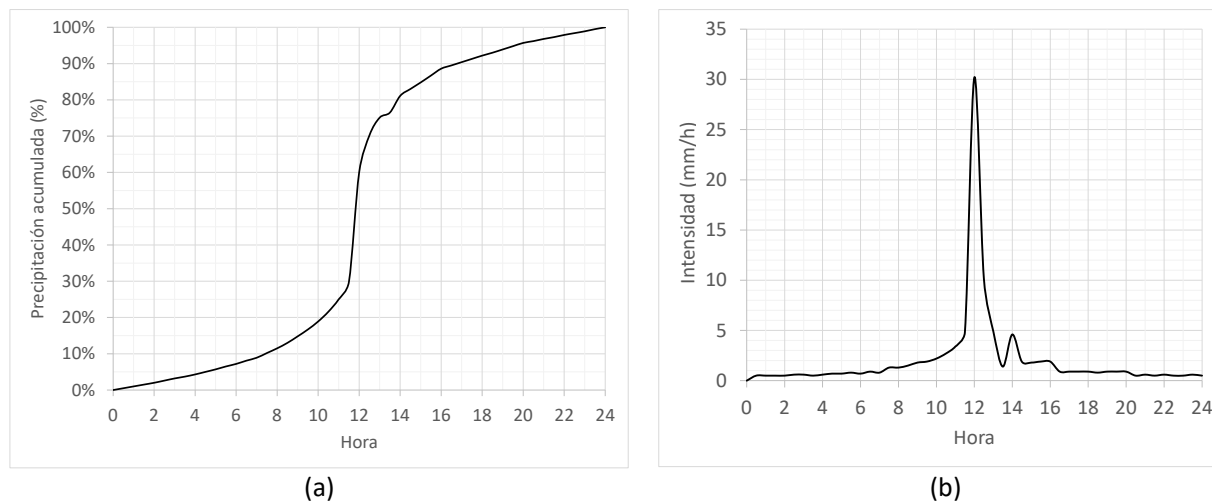


Figura 7. (a) Curva Huff. (b) Derivada temporal de la curva Huff presentada.

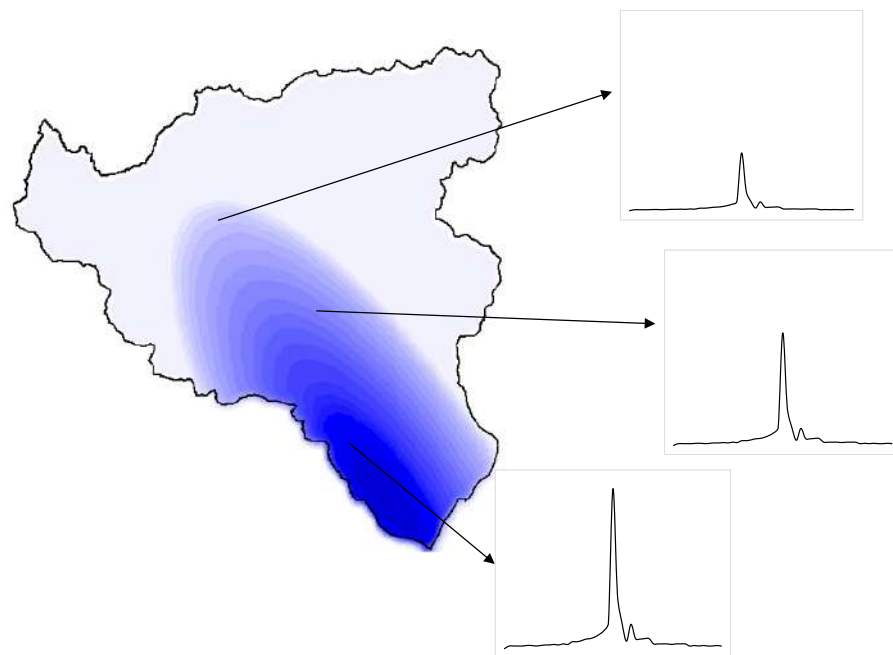


Figura 8. Ilustración de la distribución temporal de la lluvia diaria para un aguacero simulado.

2.3 Umbrales lluvia-deslizamiento

Como se mencionó anteriormente, el peligro por deslizamientos se calcula a nivel puntual como una probabilidad, compuesta por la susceptibilidad y la probabilidad que el evento detonante supere puntualmente un determinado umbral. Este umbral es una pieza clave en el modelo, pues determina la intensidad de lluvia a partir de la cual es probable que se presenten deslizamientos en un territorio.

En el caso colombiano, múltiples autores proponen diversos tipos de umbrales lluvia-deslizamiento, los cuales han sido en general desarrollados para ciudades o zonas metropolitanas colombianas en la región andina. No se cuenta en la actualidad con un tipo de umbral lluvia-deslizamiento desarrollado para la totalidad del país, o pensando en la diferenciación por regiones climáticas. No obstante, se realizó una revisión de estos trabajos con el fin de seleccionar uno que permita aproximar el problema suficientemente bien a nivel nacional, bajo las restricciones de información y escala, y considerando que la mayoría de los tramos de vía susceptibles de ser afectados por deslizamiento se encuentran en la región Andina del país. Cabe resaltar los trabajos de Terlien (1996), Chivatá-Cárdenas (2008), Aristizabal et al. (2011), Cardona et al. (2016), Correa et al. (2019). Dadas las características de cada uno de los estudios citados, se seleccionaron umbrales diferentes de la siguiente manera:

- Para Manizales, se emplea el umbral propuesto por Correa et al. (2019), desarrollado específicamente para esa ciudad.
- Para Bogotá, se emplea el umbral propuesto por Cardona et al. (2016), previamente usado en esta ciudad para evaluación del riesgo por deslizamientos.
- Para los departamentos, se emplea el mismo umbral usado en el estudio de la Fase 1 de E2050, es decir, Aristizabal et al. (2011).

3 MODELACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

A continuación, se presentará la metodología para la conformación del modelo de exposición de la red vial para los departamentos de Cauca y Caldas, así como de las ciudades de Manizales y de Bogotá. Se consultaron como principales fuentes la información vectorial del proyecto libre Open Street Map – OSM, productos elaborados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, e información de valoración económica de entidades como la Agencia Nacional de Infraestructura – ANI, el Instituto Nacional de Vías – INVIAS y el Instituto de Desarrollo Urbano – IDU.

Las unidades político-administrativas contempladas en el presente modelo de exposición se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Municipios y departamentos de estudio

Escala de deslizamientos	Municipio / Departamento
Urbanos	Manizales
	Bogotá
Departamental	Caldas
	Cauca

3.1 Información disponible para la construcción del modelo de exposición de la red vial

3.1.1 Red vial de Open Street Map

La información vectorial del proyecto libre Open Street Map -OSM- es la fuente de información que se considera más adecuada y completa para la constitución de la base geométrica del portafolio de exposición de la red vial, a partir de la comparación con otras bases de datos de fuentes oficiales como la información del Instituto Nacional de Vías -INVIAS- o el Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC-, que no incluyen múltiples vías intermunicipales y rurales de los departamentos, así como las vías locales de las cabeceras municipales y del Distrito Capital. La Figura 9 presenta la información de OSM para las diferentes áreas de estudio.

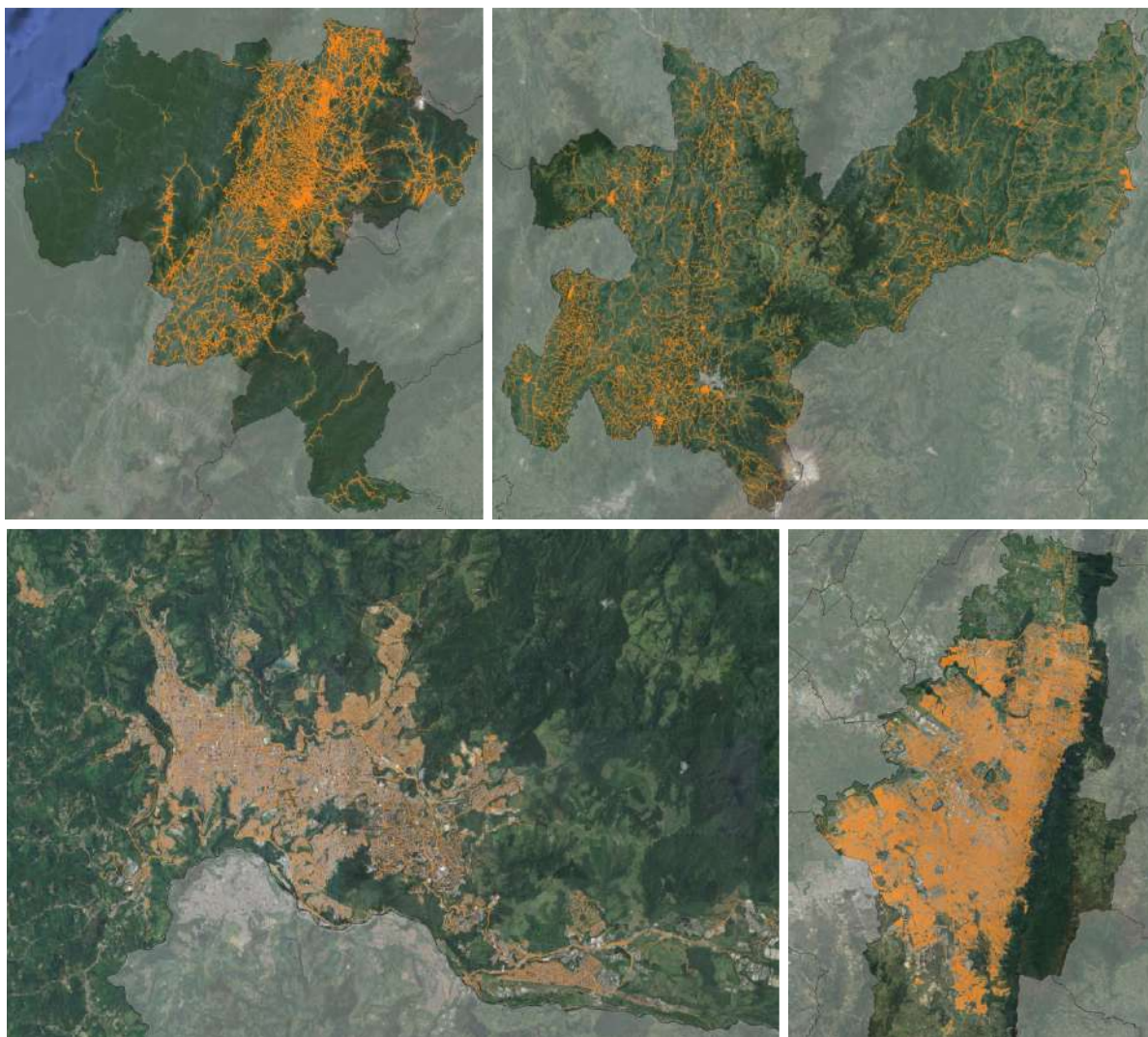


Figura 9. Información de OSM para Cauca (sup. izq.), Caldas (sup. der.), Manizales (inf. izq.) y Bogotá (inf. der.).

La longitud de la red vial de cada una de las áreas de estudio se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Longitud de la red vial de OSM.

Área de estudio	Longitud red vial [km]
Cauca	17856.5
Caldas*	8324.5
Manizales – Área urbana	603.4
Bogotá – Área urbana	6776.9

*No incluye el área urbana de Manizales

3.1.2 Mapa de pendientes (IGAC)

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC- elaboró en el año de 2019 un raster con resolución de 30 m que presenta el porcentaje de pendiente en el territorio nacional. El raster presenta tres categorías: plana (0 - 7%), inclinada (7%-14%) y empinada (>14%). La Figura 10 presenta la información categorizada para las diferentes áreas de estudio.

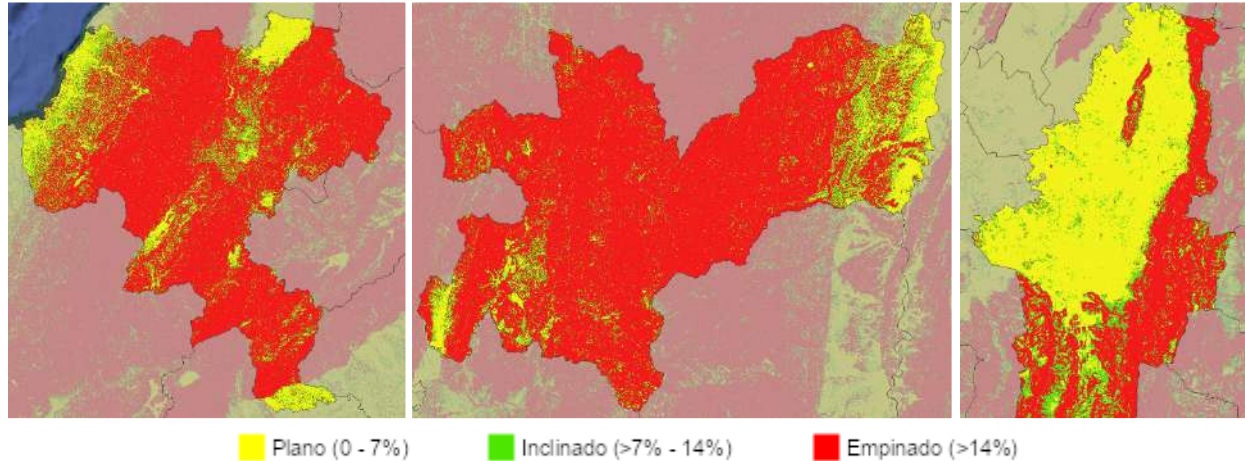


Figura 10. Mapa de pendientes para Cauca (izq.), Caldas (cen.), y Bogotá (der.).

3.2 Conformación del modelo de exposición de edificaciones

Para construir el modelo de la red vial se partió de la información de OSM, la cual se reclasificó y complementó con los datos del mapa de pendientes catastro.

La Tabla 3 presenta los atributos de la base de datos de OSM, que se utilizaron en el proceso de reclasificación de los elementos para su caracterización y valoración económica.

Tabla 3. Atributos de elementos de OSM.

Atributo (nombre original)	Descripción	Valores
Geometría (geometry)	Elementos tipo polilínea	-
Vía (highway)	Clasificación del tipo de vía según OSM	trunk, primary, secondary, tertiary, residential, pedestrian, track, path, bridleway, unclassified
Superficie (surface)	Tipo de superficie de la vía	asphalt, gravel, dirt, ground, paved, unpaved, no info, others.
Puente (bridge)	¿El elemento es un puente?	yes, viaduct o (vacío)
Túnel (tunnel)	¿El elemento es un túnel?	yes o (vacío)

Los elementos de la base de datos de OSM tienen diferentes tipos de longitud, por lo que se segmentaron los elementos a longitudes máximas de 100 metros, con el propósito de generar un modelo de exposición adecuado en su nivel de detalle para la evaluación del riesgo.

A continuación, se presenta el proceso de reclasificación de los atributos de la información recopilada previamente mencionada.

3.2.1 Tipo de elemento

Utilizando los campos 'Bridge' y 'Tunnel', se realiza la clasificación presentada en la Figura 11.

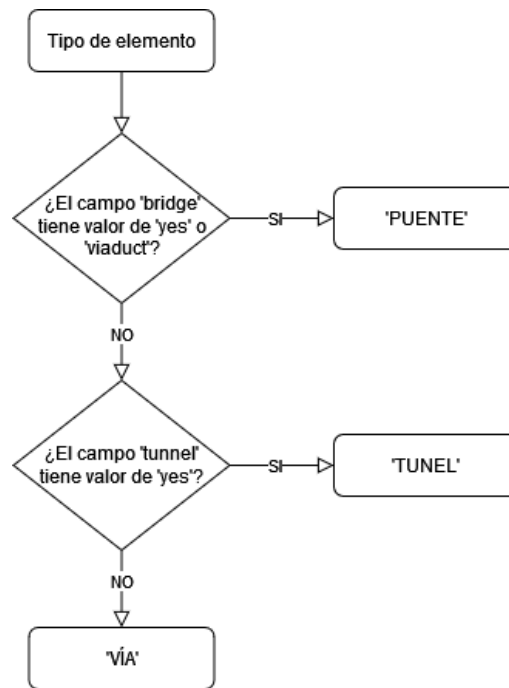


Figura 11. Algoritmo de asignación del tipo de elemento.

3.2.2 Tipo de vía

Para el presente atributo, la Tabla 4 presenta la reclasificación elaborada que permite agrupar diferentes categorías de OSM que tienen características físicas similares (ej. número de carriles, ancho de calzada, elementos complementarios de la vía).

Tabla 4. Reclasificación del atributo 'highway' de elementos de OSM.

Atributo original	Atributo reclasificado
trunk, primary	Primaria
secondary	Secundaria
tertiary	Terciaria
residential	Local
bridleway, pedestrian	Camino Tipo 1
path, track	Camino Tipo 2
unclassified	Sin Clasificación

La Figura 12 presenta el resultado al aplicar el procedimiento de reclasificación de las vías.

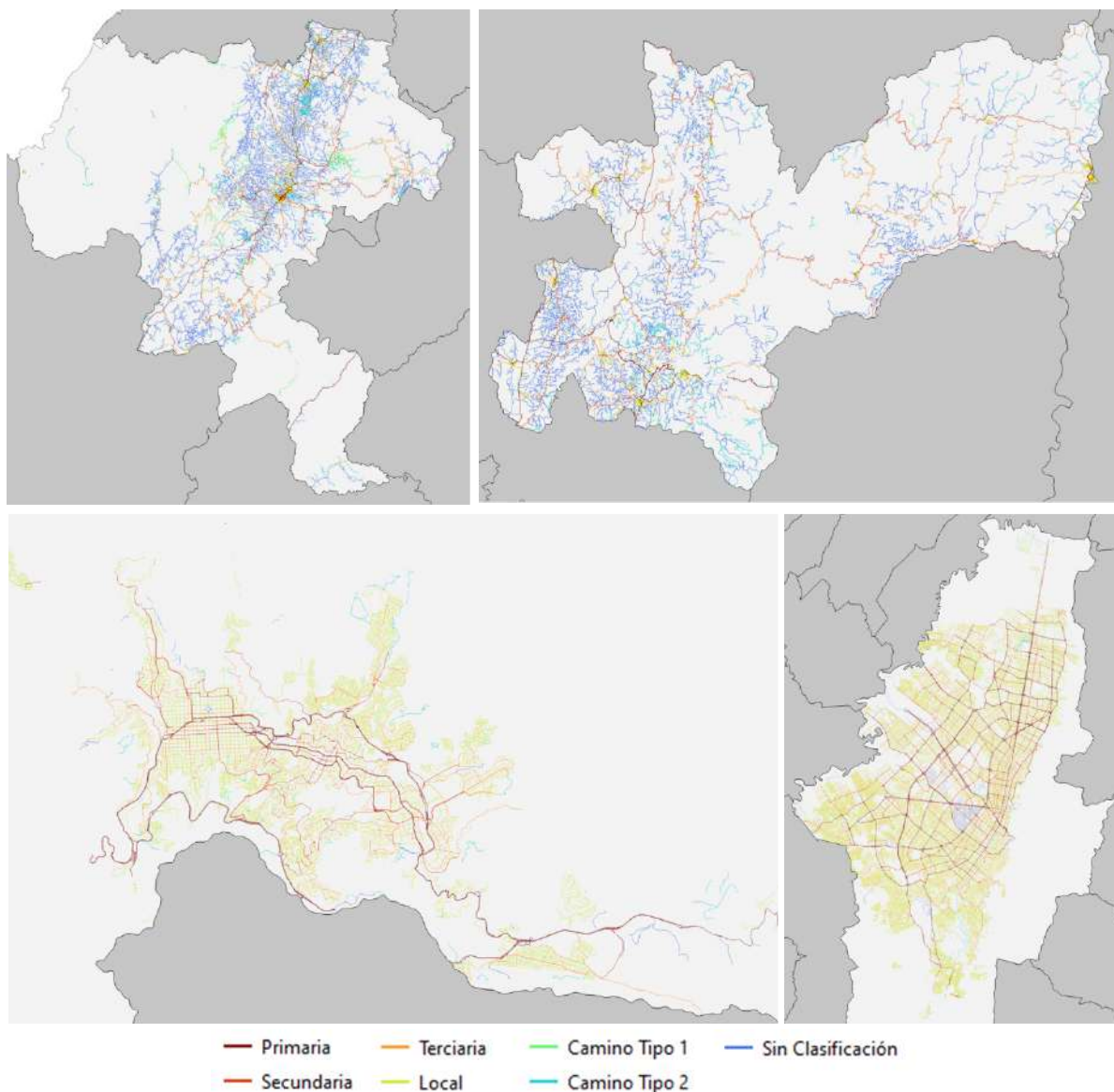


Figura 12. Red vial reclasificada para Cauca (sup. izq.), Caldas (sup. der.), Manizales (inf. izq.) y Bogotá (inf. der.).

3.2.3 Superficie de rodadura

Para el atributo de superficie, la Tabla 5 presenta la agrupación de múltiples categorías de la base de datos original de OSM en tres categorías.

Tabla 5. Reclasificación del atributo 'surface' de elementos de OSM.

Atributo original	Reclasificación
asphalt, cobblestone, concrete, concrete:lanes, concrete:plates, paved, paving_stones	Pavimentado
compacted, fine_gravel, gravel	Afirmado
dirt, earth, grass, ground, sand, tierra	No afirmado

Atributo original	Reclasificación
unpaved, (en blanco)	

En el caso de los elementos que no contaban con información, se asignó el valor reclasificado de ‘No afirmado’ dado que i) estas vías en su mayoría corresponden a vías locales rurales de los municipios, ii) a partir de la revisión y comparación de estos elementos con imágenes satelitales, se determina que estas vías tienen predominantemente su superficie en tierra.

3.2.4 Pendiente

A los elementos del modelo de exposición se les adiciono el atributo de pendiente, dado por la categorización de pendientes realizada por el IGAC: plana (0 - 7%), inclinada (7%-14%) y empinada (>14%).

3.2.5 Valoración económica

La valoración económica de la red vial es diferente según el departamento en el que se localice el elemento expuesto. En el caso de los departamentos de Caldas y Cauca, se calculó un valor promedio ponderado a partir de proyectos de la Agencia Nacional de Infraestructura – ANI, consolidados en la plataforma ANIscoPIO². Los proyectos utilizados en la estimación del valor medio corresponden a vías con la clasificación de vía primaria, pavimentada en terreno empinado (>14%).

El valor de reposición definido para los elementos del departamento de Caldas es de 8 949 millones de pesos y, para el departamento de Cauca es de 29 748 millones de pesos. A partir de los valores definidos, se aplican coeficientes de ajuste para la valoración de acuerdo con las características físicas y geográficas del elemento.

$$Valor_{km} = Valor_{medio-km} * C1 * C2 * C3$$

La Tabla 6 presenta los valores para el coeficiente C1 asociado a la clasificación de la vía, que se relaciona con características geométricas como el ancho de la sección transversal, así como del equipamiento vial que tiene cada tipo de vía.

Tabla 6. Valores de coeficiente C1.

Valor del atributo	Coeficiente [C1]
Primaria	1.00
Secundaria	0.83
Terciaria	0.67
Local	0.67
Camino Tipo 1	0.50
Camino Tipo 2	0.33
Sin Clasificación	0.67

² ANIscoPIO es una plataforma tecnológica a través de la cual se realiza el seguimiento a los proyectos de infraestructura de transporte a cargo de la ANI.

La Tabla 7 presenta los valores para el coeficiente C2 asociado a la superficie de rodadura de la vía. Los coeficientes se estimaron a partir de la valoración por precios unitarios de los materiales y mano de obra requeridos para cada categoría.

Tabla 7. Valores de coeficiente C2.

Valor del atributo	Coeficiente [C2]
Pavimentado	1.00
Afirmado	0.34
No afirmado	0.18

La Tabla 8 presenta los valores para el coeficiente C3 asociado a la pendiente de la vía, que esta relacionado con los costos de nivelación y estabilización del terreno. Los coeficientes se estimaron a partir de la relación del valor económico en un mismo corredor vial, de tramos que se localizaran en cada categoría de pendiente.

Tabla 8. Valores de coeficiente C3.

Valor del atributo	Coeficiente [C2]
Empinado	1.00
Inclinado	0.79
Plano	0.55

En el caso de los puentes y túneles, se definieron valores medios para Caldas a partir de la información pública de costos de proyectos viales en el departamento. Para la estimación de las valoraciones de estos elementos en el departamento de Cauca, se utilizó un factor de 3.324 correspondiente a la relación entre los costos por kilómetro de vía definidos previamente. La presenta los valores de reposición definidos para la exposición de ambos departamentos.

Tabla 9. Valoración económica de puentes y túneles en los departamentos de Caldas y Cauca.

Departamento	Valoración económica Puente	Valoración económica Túnel
Caldas	46.248.000.000 COP	93.060.000.000 COP
Cauca	153.740.000.000 COP	309.352.000.000 COP

En el caso de Bogotá, la valoración económica se asignó según el tipo de vía por carril, a partir de los costos estimados de referencia de perfiles viales publicado por el Instituto de Desarrollo Urbano – IDU. La Tabla 10 presenta los valores definidos para Bogotá por km-carril, por lo que en la estimación del valor económico de cada elemento se debe considerar el atributo de número de carriles (n_carriles). En caso de que el elemento no cuente con el atributo de número de carriles, se asume un valor de un carril para vías con clasificación de caminos y dos carriles para cualquier otro caso.

Tabla 10. Valoración económica para vías de Bogotá por km-carril

Clasificación	Valoración económica
Primaria	1.419.500.000 COP

Clasificación	Valoración económica
Secundaria	1.358.680.000 COP
Terciaria	1.135.080.000 COP
Local	949.470.000 COP
Camino Tipo 1	985.750.000 COP
Camino Tipo 2	345.010.000 COP
Sin Clasificación	949.470.000 COP

3.3 Caracterización de la exposición de la red vial

En las siguientes figuras se muestra la distribución de valor expuesto y longitud de vías para las variables descritas en los numerales anteriores.

3.3.1 Tipo de elemento

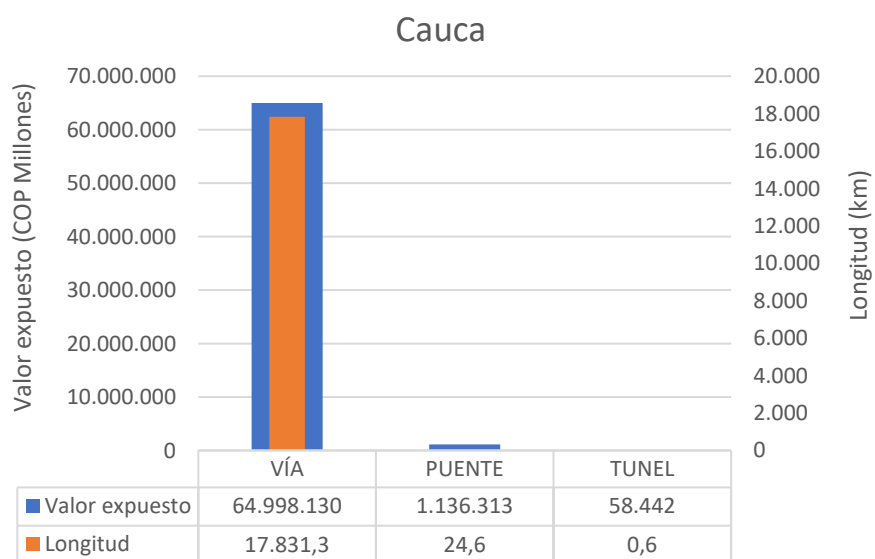


Figura 13. Tipo de elemento - Cauca

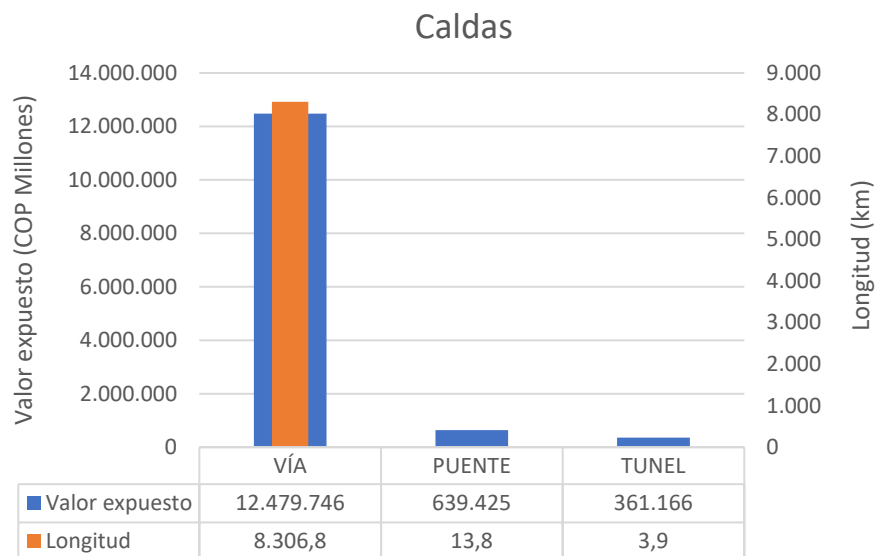


Figura 14. Tipo de elemento - Caldas

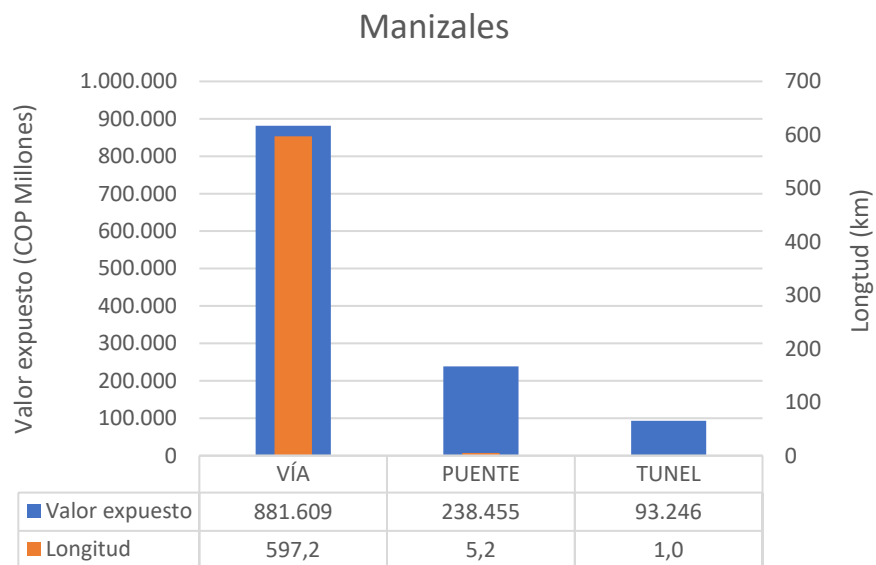


Figura 15. Tipo de elemento - Manizales

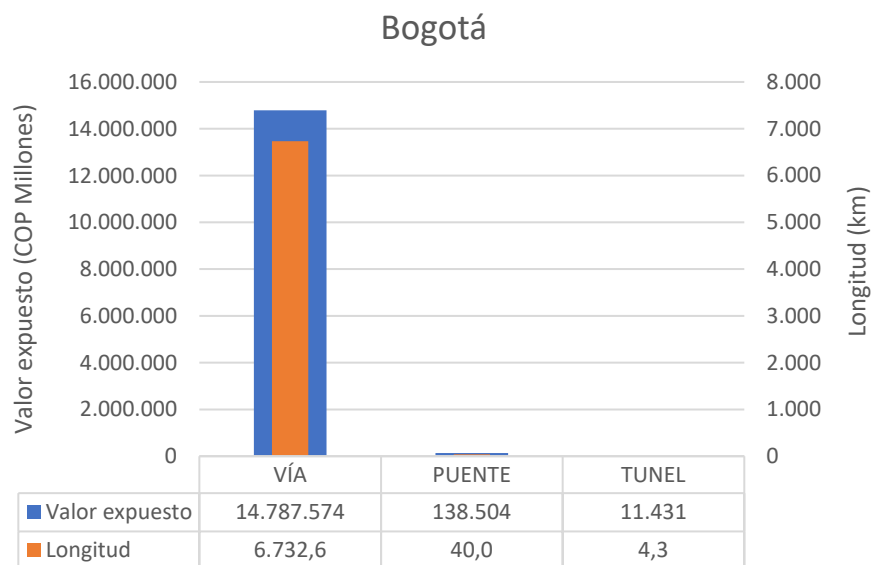


Figura 16. Tipo de elemento - Bogotá

3.3.2 Tipo de vía

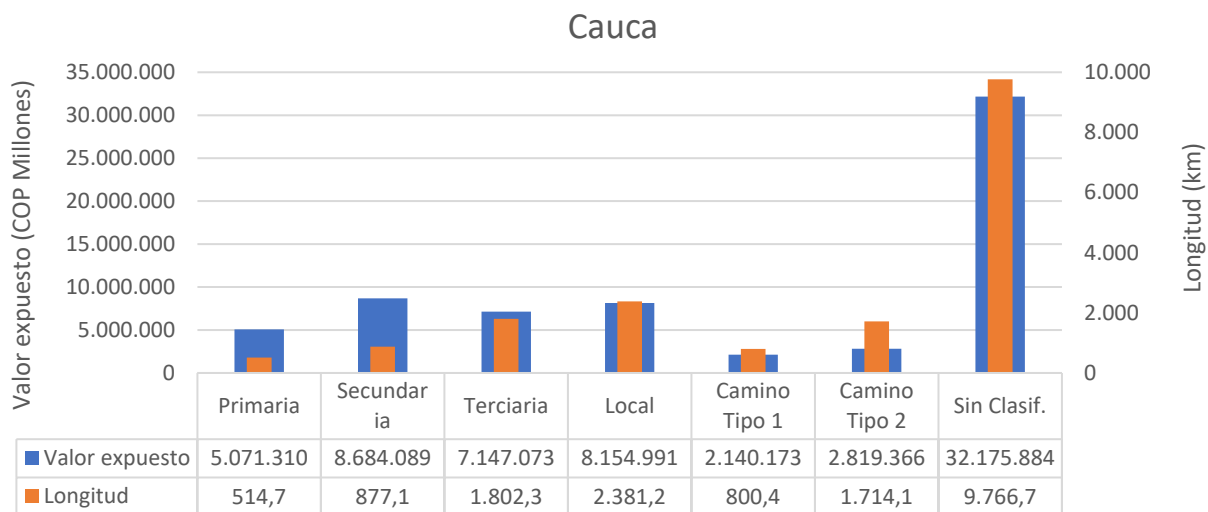


Figura 17. Tipo de vía - Cauca

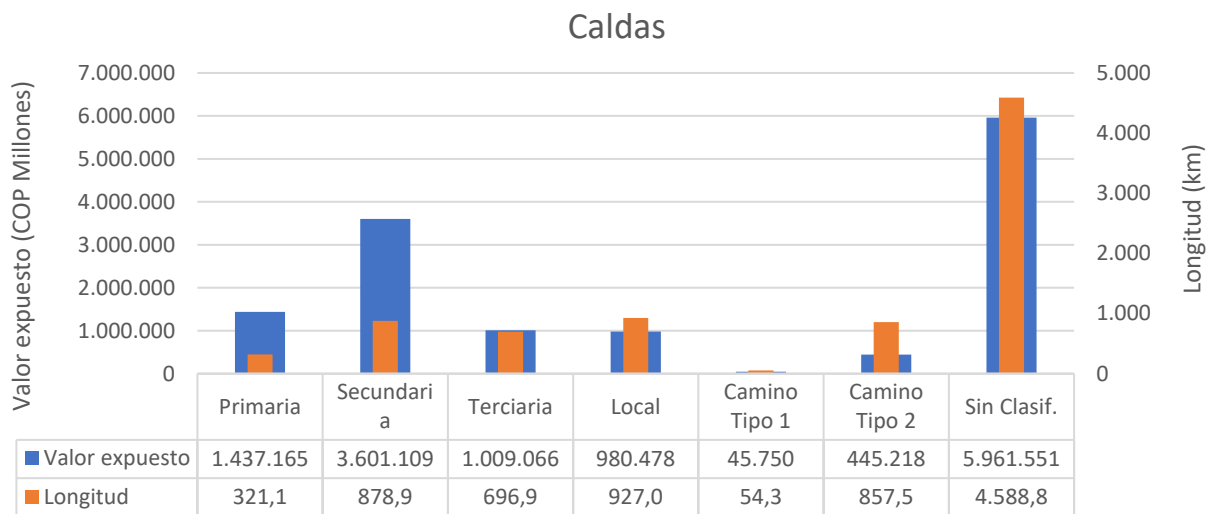


Figura 18. Tipo de vía - Caldas

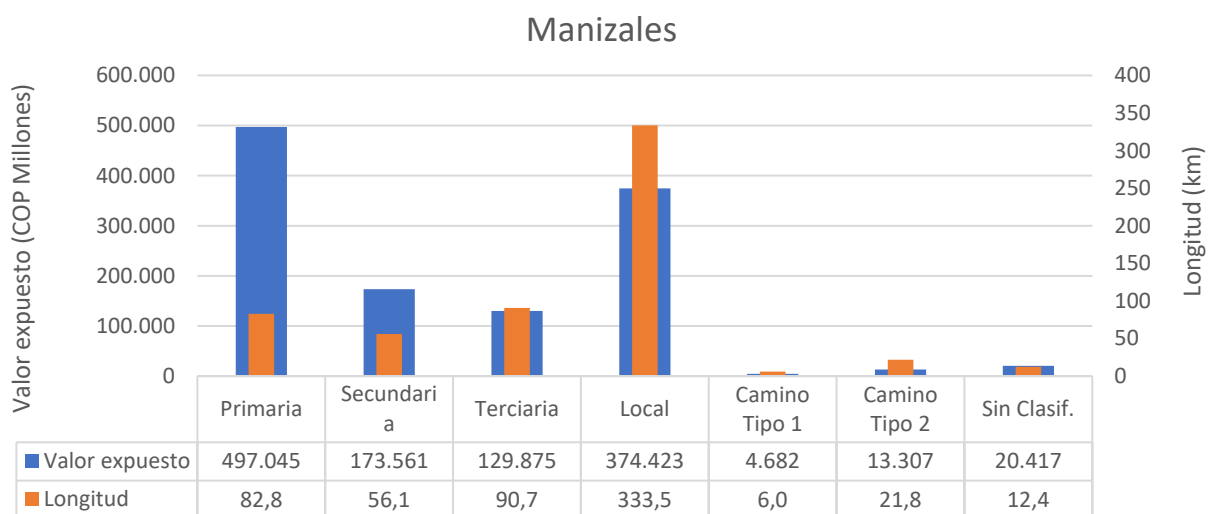


Figura 19. Tipo de vía - Manizales

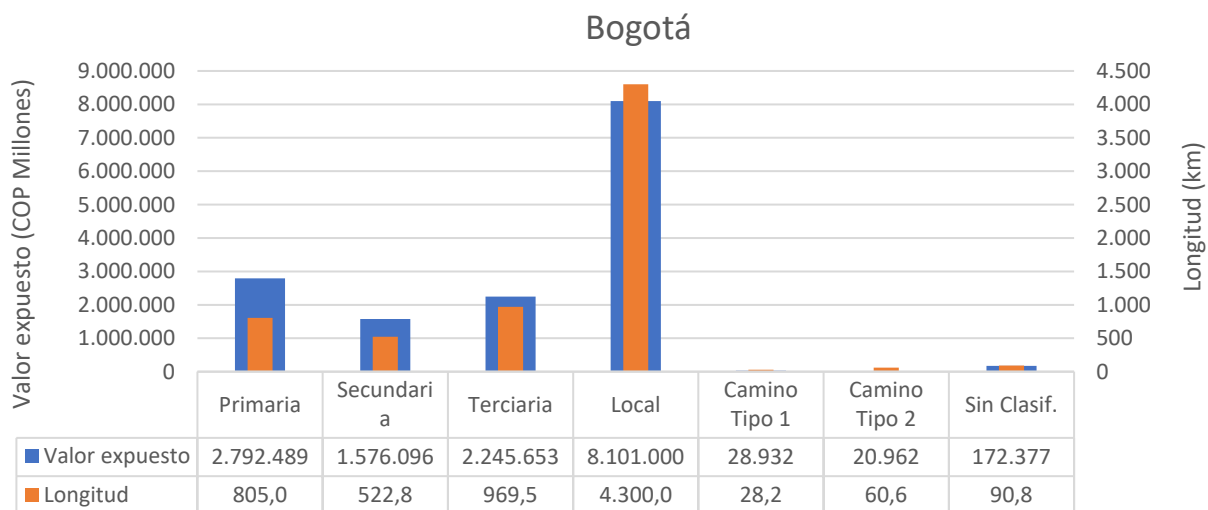


Figura 20. Tipo de vía - Bogotá

3.3.3 Superficie de rodadura

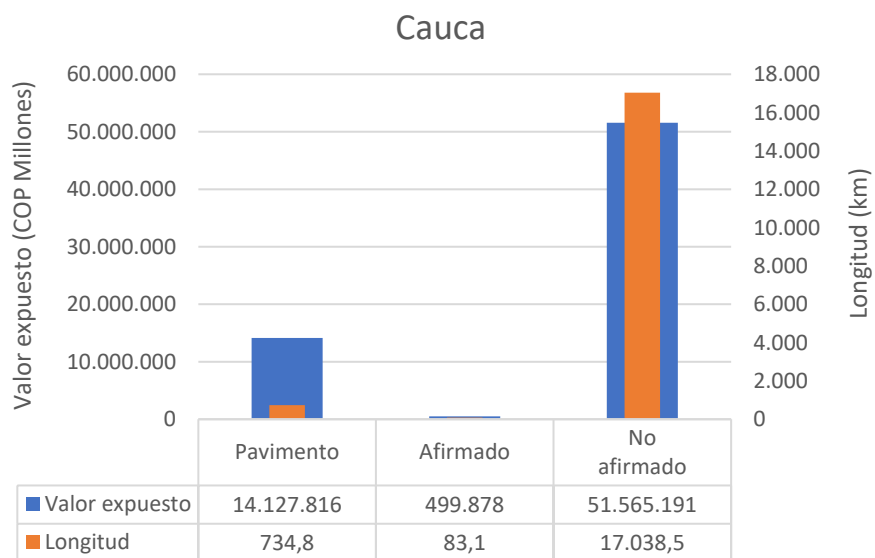


Figura 21. Superficie de rodadura - Cauca

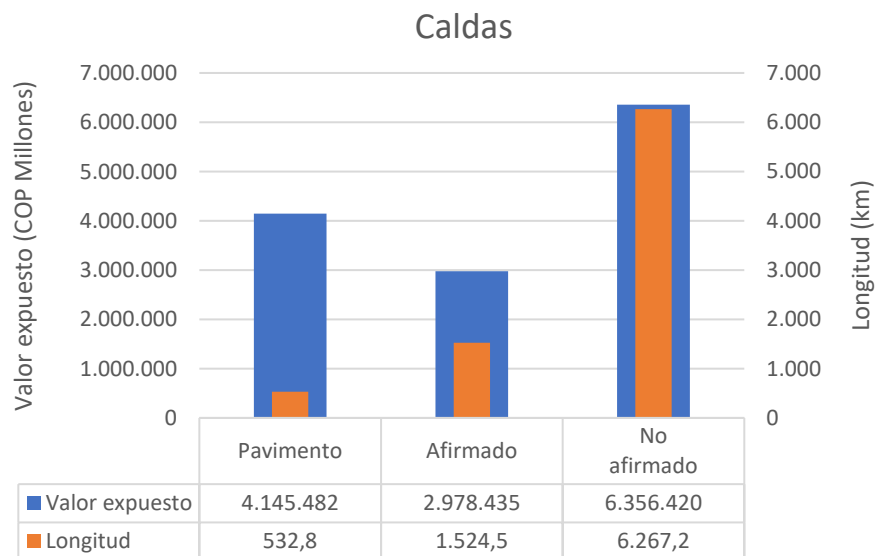


Figura 22. Superficie de rodadura - Caldas

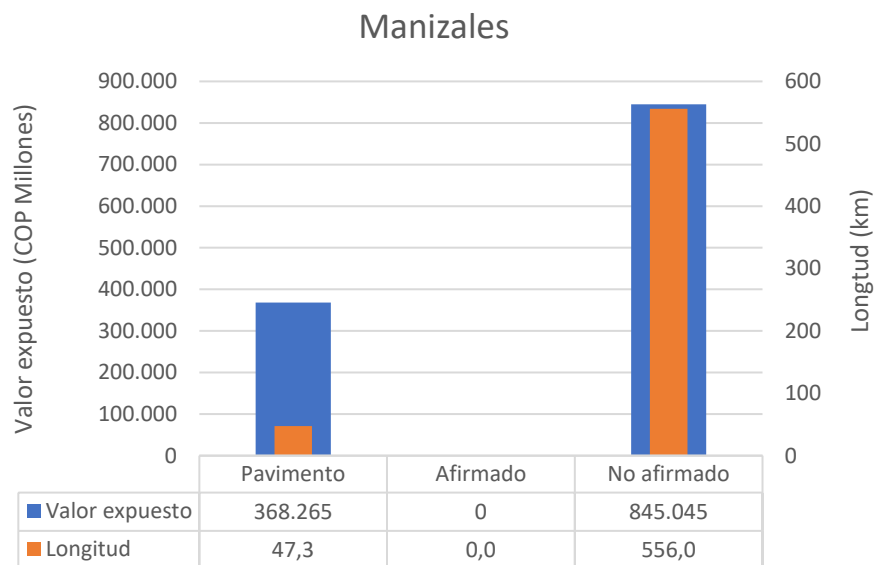


Figura 23. Superficie de rodadura – Manizales

3.3.4 Pendiente

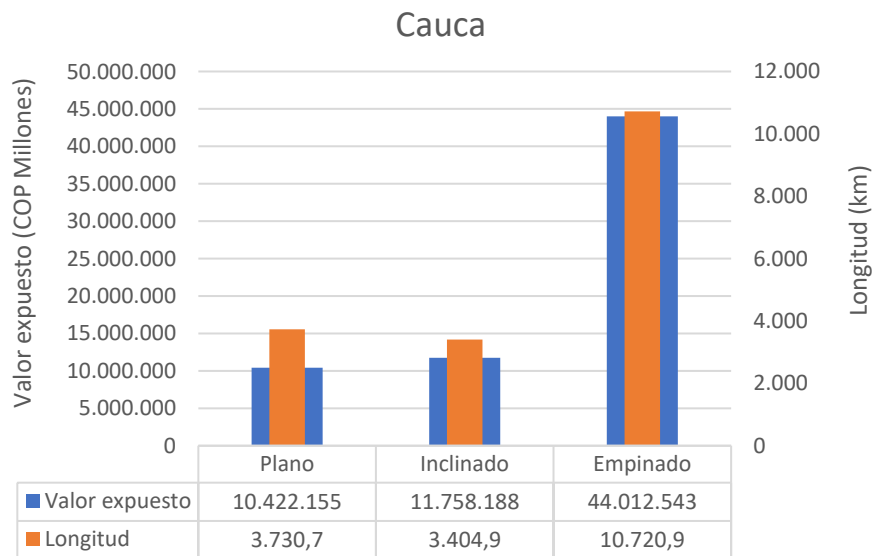


Figura 24. Pendiente - Cauca

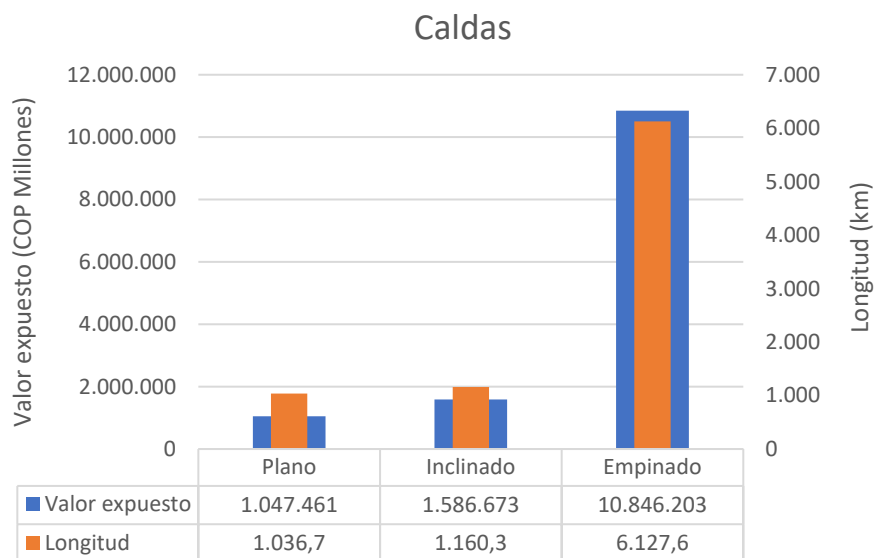


Figura 25. Pendiente - Caldas

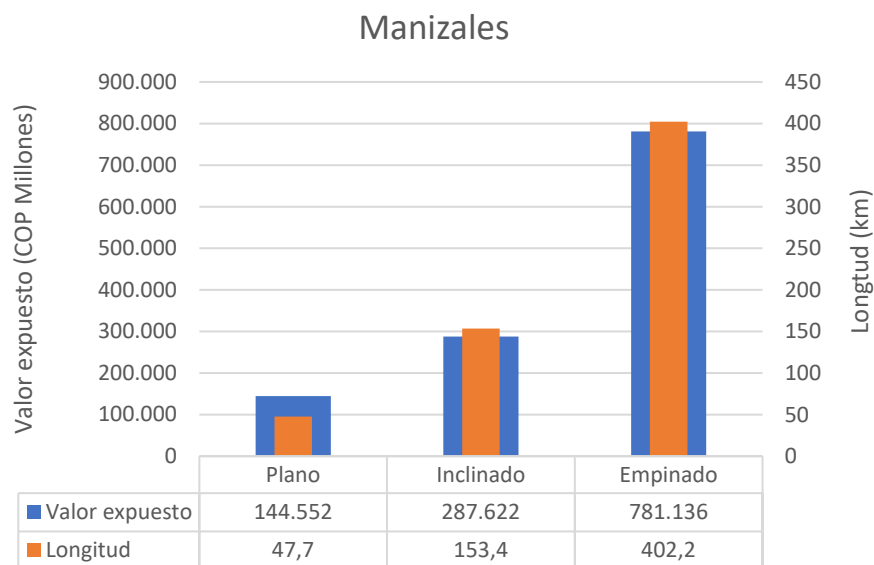


Figura 26. Pendiente – Manizales

3.3.5 Valoración económica

La Figura 27 y Figura 28 presentan la distribución del valor expuesto a nivel municipal de los departamentos de Caldas³ y Cauca respectivamente.

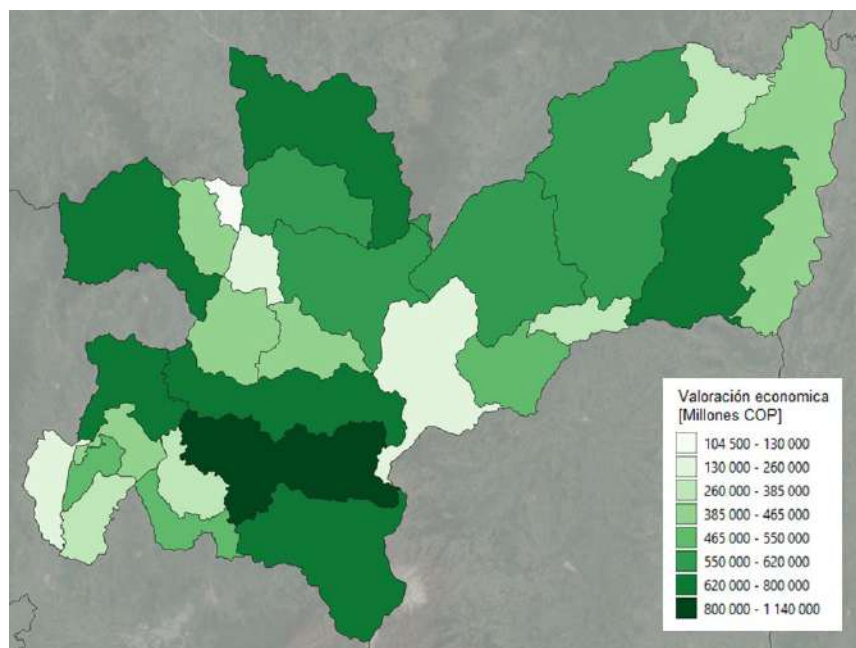


Figura 27. Valoración económica de la red vial por municipio en el departamento de Caldas

³ El valor expuesto de Manizales en el departamento de Caldas corresponde a los elementos fuera del perímetro urbano del municipio.

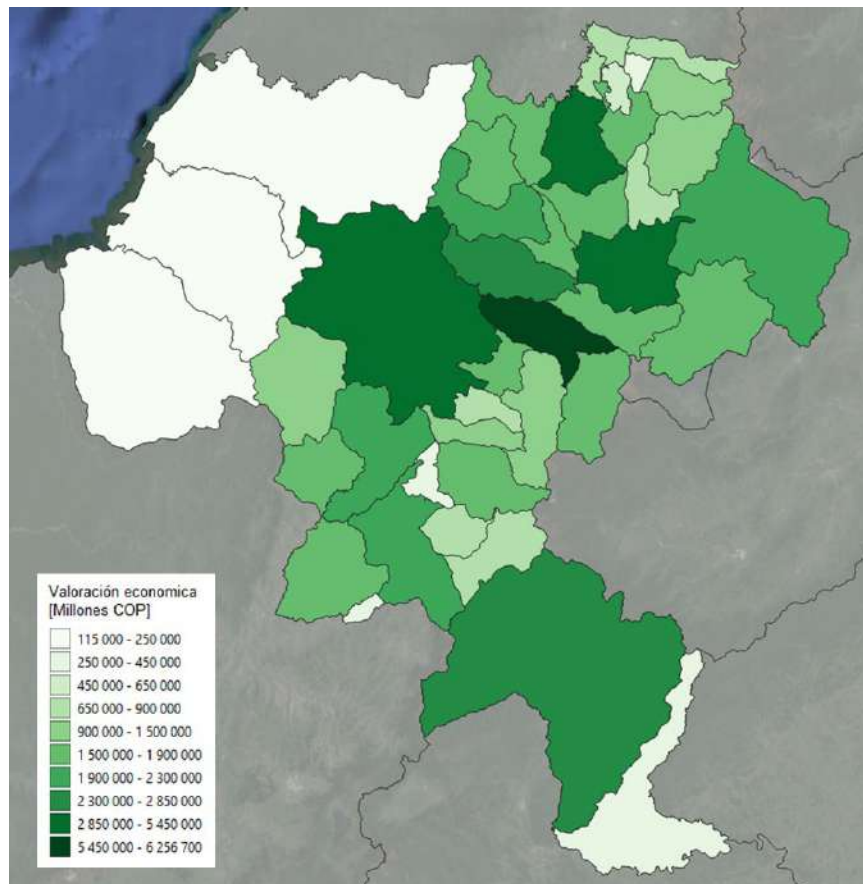


Figura 28. Valoración económica de la red vial por municipio en el departamento de Cauca

3.4 Caracterización de la exposición de edificaciones

El modelo de exposición de la ciudad de Bogotá comprende la base de datos de elementos expuestos construida para el Sistema de modelación de amenazas y riesgo de Bogotá, desarrollado para el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático – IDIGER (Cardona, 2016), el cual se basa principalmente en la información catastral de la ciudad.

Por otra parte, el modelo de exposición de la ciudad de Manizales comprende la base de datos de elementos expuestos construida en el marco del proyecto Armonización de la microzonificación sísmica con las normas NSR-10, desarrollado para Instituto de estudios ambientales de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales (González, 2014), la cual se basa principalmente en la información catastral de la ciudad.

En las siguientes figuras se muestra la caracterización de las bases de elementos expuestos para las ciudades de Bogotá y Manizales de acuerdo con los estudios mencionados anteriormente, para las variables número de pisos, sector de uso, categoría socioeconómica, sistema estructural, valor expuesto y población.

3.4.1 Número de pisos

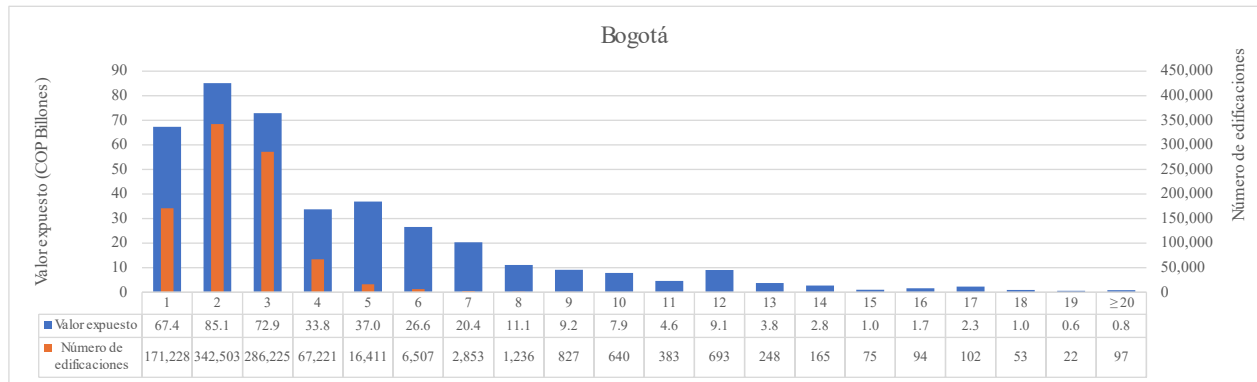


Figura 29. Número de pisos – Bogotá

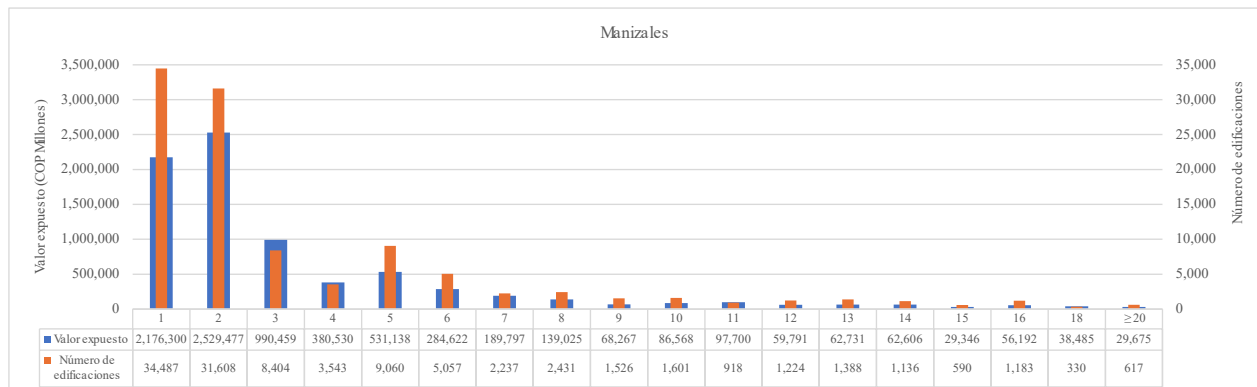


Figura 30. Número de pisos – Manizales

3.4.2 Sector de uso

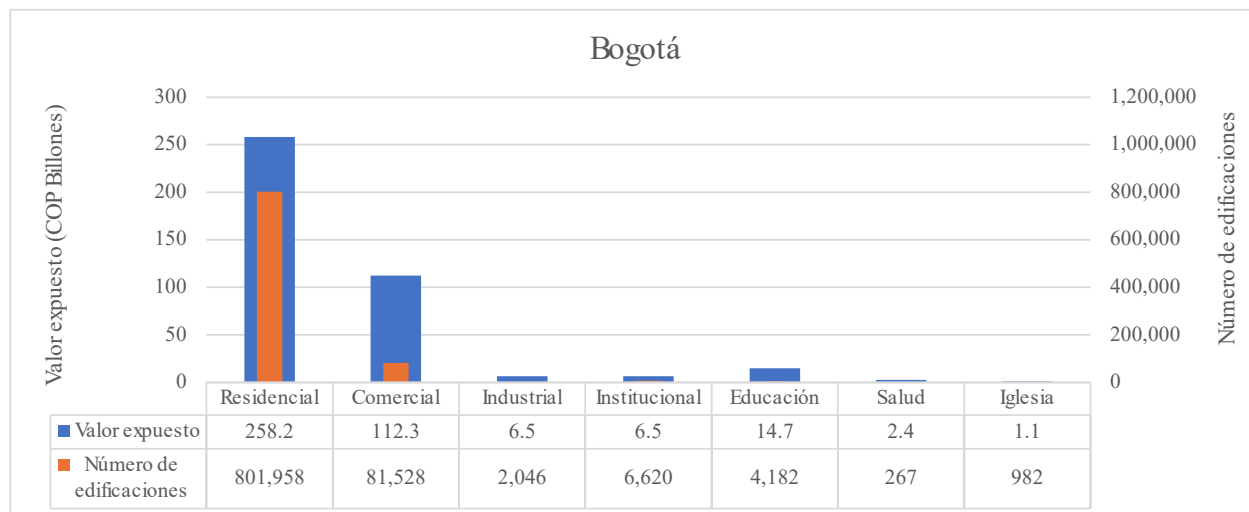


Figura 31. Sector de uso – Bogotá

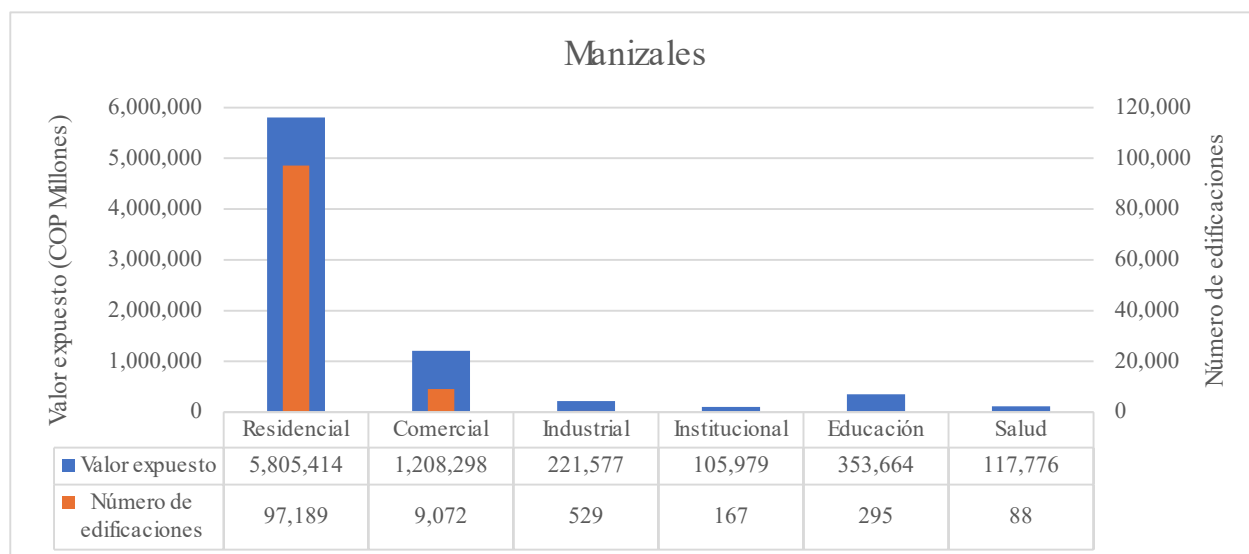


Figura 32. Sector de uso – Manizales

3.4.3 Categoría socioeconómica

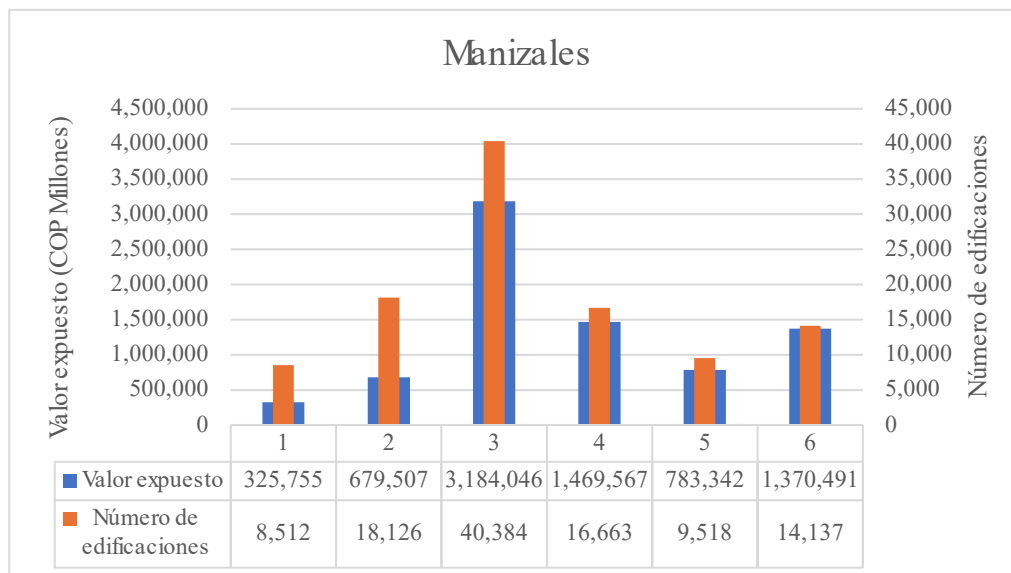


Figura 33. Categoría socioeconómica – Manizales

3.4.4 Sistema estructural

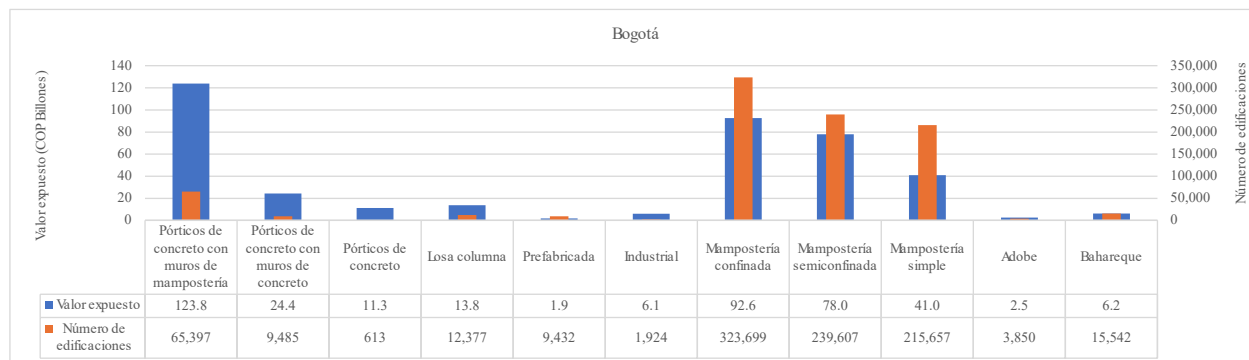


Figura 34. Sistema estructural – Bogotá

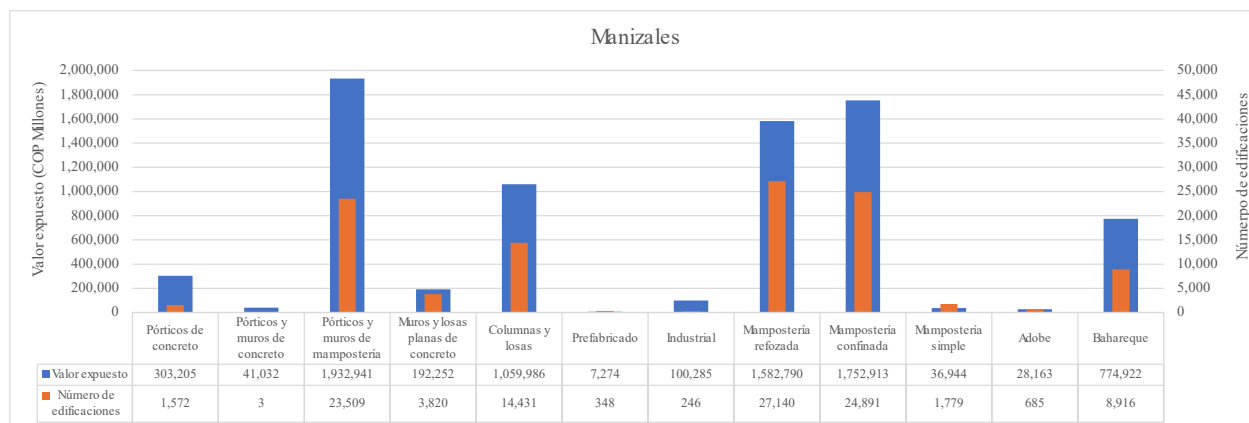


Figura 35. Sistema estructural – Manizales

3.4.5 Población

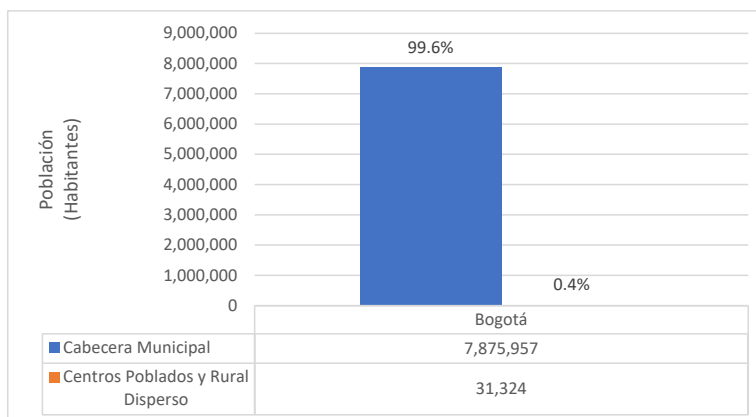


Figura 36. Población – Bogotá

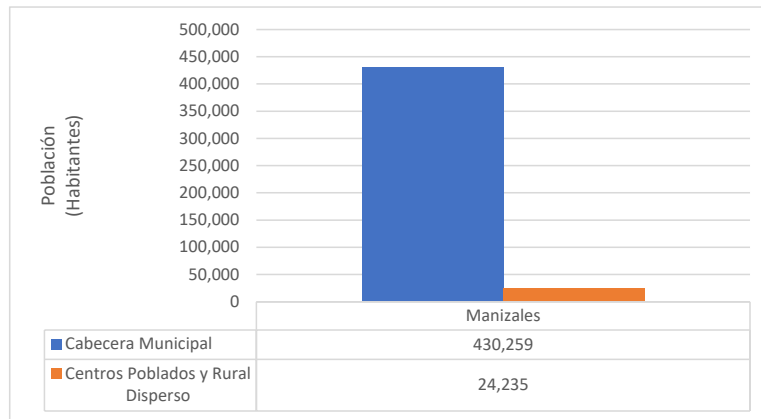


Figura 37. Población – Manizales

4 EVALUACIÓN DEL RIESGO

Para el caso de los deslizamientos, la metodología de evaluación del riesgo es diferente que para todas las demás amenazas, debido principalmente a la premisa de una vulnerabilidad binaria, en la cual se asume que, si el elemento expuesto se encuentra sobre un terreno deslizado, se pierde todo el valor expuesto en esa ubicación, independientemente del tipo, magnitud, volumen o velocidad del deslizamiento, y también independientemente del tipo de infraestructura expuesta. Esto implica algunas modificaciones en la metodología de cálculo. No obstante, las métricas de riesgo seguirán siendo las mismas que para las demás amenazas.

A partir del supuesto mencionado anteriormente, que no está lejos de la realidad, el riesgo por deslizamientos puede expresarse en términos probabilistas, para cada escenario del detonante. Los momentos estadísticos de la pérdida total para cada escenario de lluvia se pueden calcular aplicando su definición clásica:

$$E(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} Val \cdot P_L \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\sigma^2(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} (Val - E(p|E_i))^2 \cdot P_L \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde Val es el valor expuesto de cada activo, P_L es la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en la ubicación del activo expuesto para el escenario detonante i , y NE es el número de activos expuestos. La pérdida se modela como distribuida *Beta*, por lo cual puede entonces parametrizarse a partir de los dos momentos de probabilidad calculados. De esta manera queda completamente determinada, en términos de probabilidad, la pérdida asociada a la ocurrencia de un escenario del detonante.

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

$$v(p) = \sum_{i=1}^N Pr(P > p|E_i) \cdot F_A(E_i) \quad \text{Ecuación 3}$$

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

Es importante hacer notar que la curva de excedencia de pérdidas no tiene incertidumbre. Es común asociar los resultados de un modelo probabilista de riesgo a un nivel de confianza o de variabilidad de los mismos. Pues bien, las tasas de excedencia calculadas en un modelo probabilista de riesgo consideran

directamente la incertidumbre en las pérdidas, por lo cual dichas tasas de excedencia no pueden tener una incertidumbre o variabilidad propia. Esto debido a que, en términos matemáticos, son una medida de probabilidad calculada para una cantidad de pérdida específica. En el contexto de la modelación del riesgo, la pérdida es la variable aleatoria, no las tasas anuales de excedencia.

4.1 Métricas del riesgo

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

4.1.1 La pérdida anual esperada (PAE)

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

$$PAE = \int_0^{\infty} v(p) dp \quad \text{Ecuación 4}$$

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

$$PAE = \sum_{i=1}^N E(P|E_i) F_A(E_i) \quad \text{Ecuación 5}$$

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

4.1.2 La pérdida máxima probable (PML)

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

$$Tr(p) = \frac{1}{v(p)} \quad \text{Ecuación 6}$$

En realidad, la PML es una curva que relaciona las pérdidas a su correspondiente periodo de retorno. No obstante, es práctica común definir la PML como un único valor. La selección del periodo de retorno de la PML depende exclusivamente de la aversión al riesgo del tomador de decisiones. Por ejemplo, en la industria aseguradora el periodo de retorno de la PML se toma usualmente entre 200 y 1500 años. Mayores detalles sobre el significado y aplicación de la PML pueden encontrarse en Bernal et al. (2021).

4.2 Resultados de la evaluación sobre la red vial

La Tabla 11 muestra los valores de la pérdida anual esperada (PAE) para los 2 municipios y 2 departamentos, tanto para el clima actual como para los climas futuros considerados. La Figura 38 presenta la PAE relativa de forma gráfica, en donde es posible comparar la diferencia en el riesgo causada por el cambio climático. La Figura 39 muestra las curvas de PML de cada municipio.

Tabla 11. Pérdidas Anuales Esperadas por deslizamiento

Municipio / Depto.	Valor expuesto	Clima base		RCP2.6		RCP4.5	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
Bogotá	\$ 14,937,508	\$ 1,404	0.094	\$ 1,434	0.096	\$ 1,419	0.095
Manizales	\$ 1,213,309	\$ 995	0.82	\$ 1,189	0.98	\$ 1,031	0.85
Caldas	\$ 13,439,652	\$ 21,503	1.60	\$ 25,132	1.87	\$ 22,444	1.67
Cauca	\$ 66,192,885	\$ 134,372	2.03	\$ 132,386	2.00	\$ 135,033	2.04

Municipio / Depto.	Valor expuesto	RCP6.0		RCP8.5		IDEAM	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
Bogotá	\$ 14,937,508	\$ 1,419	0.095	\$ 1,434	0.096	\$ 1,583	0.106
Manizales	\$ 1,213,309	\$ 1,141	0.94	\$ 1,153	0.95	\$ 1,541	1.27
Caldas	\$ 13,439,652	\$ 24,191	1.80	\$ 24,460	1.82	\$ 30,642	2.28
Cauca	\$ 66,192,885	\$ 132,386	2.00	\$ 133,048	2.01	\$ 142,315	2.15

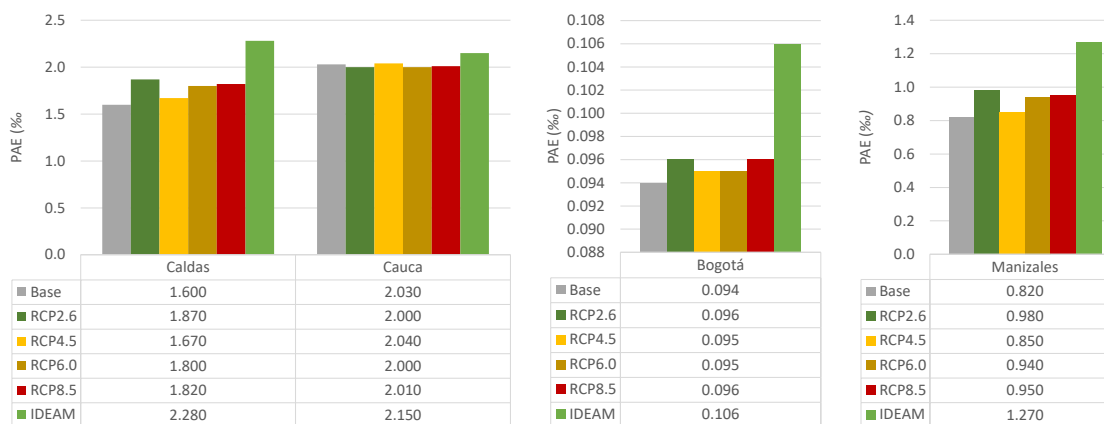


Figura 38. Pérdida anual esperada relativa por deslizamientos (al millar) para los 2 municipios y 2 departamentos, ante clima base y clima futuro.

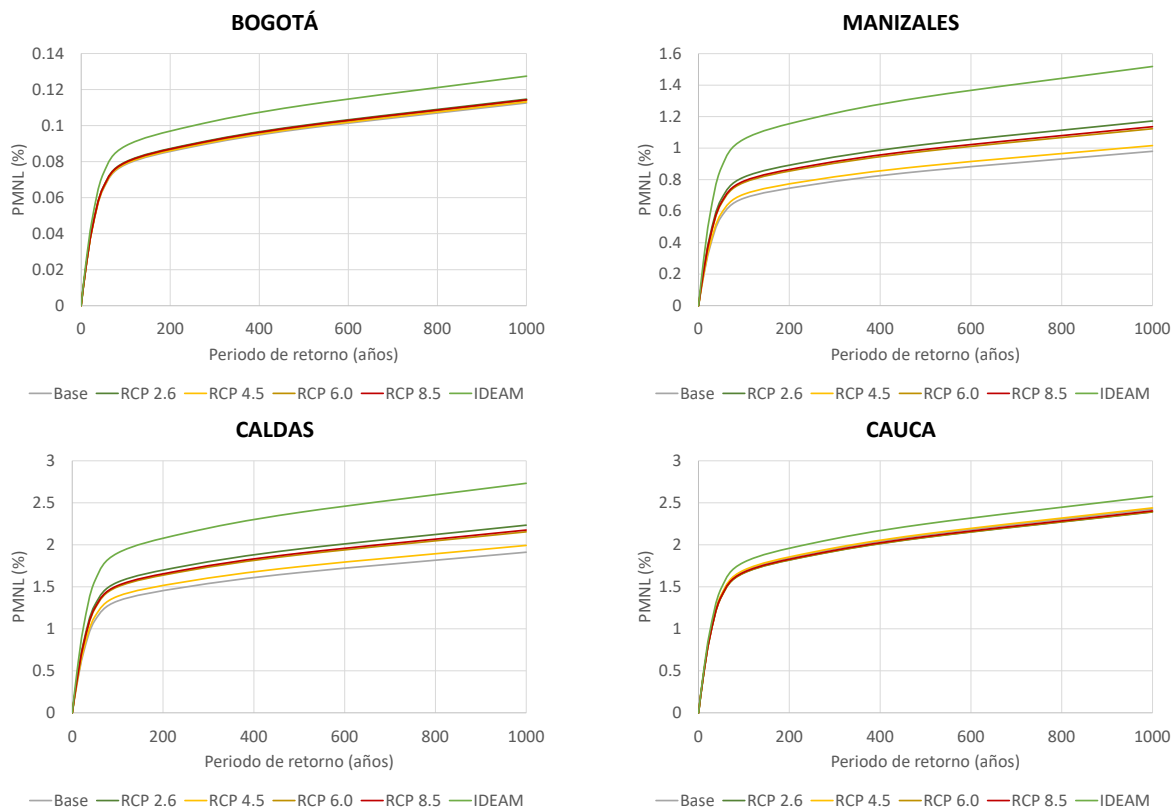
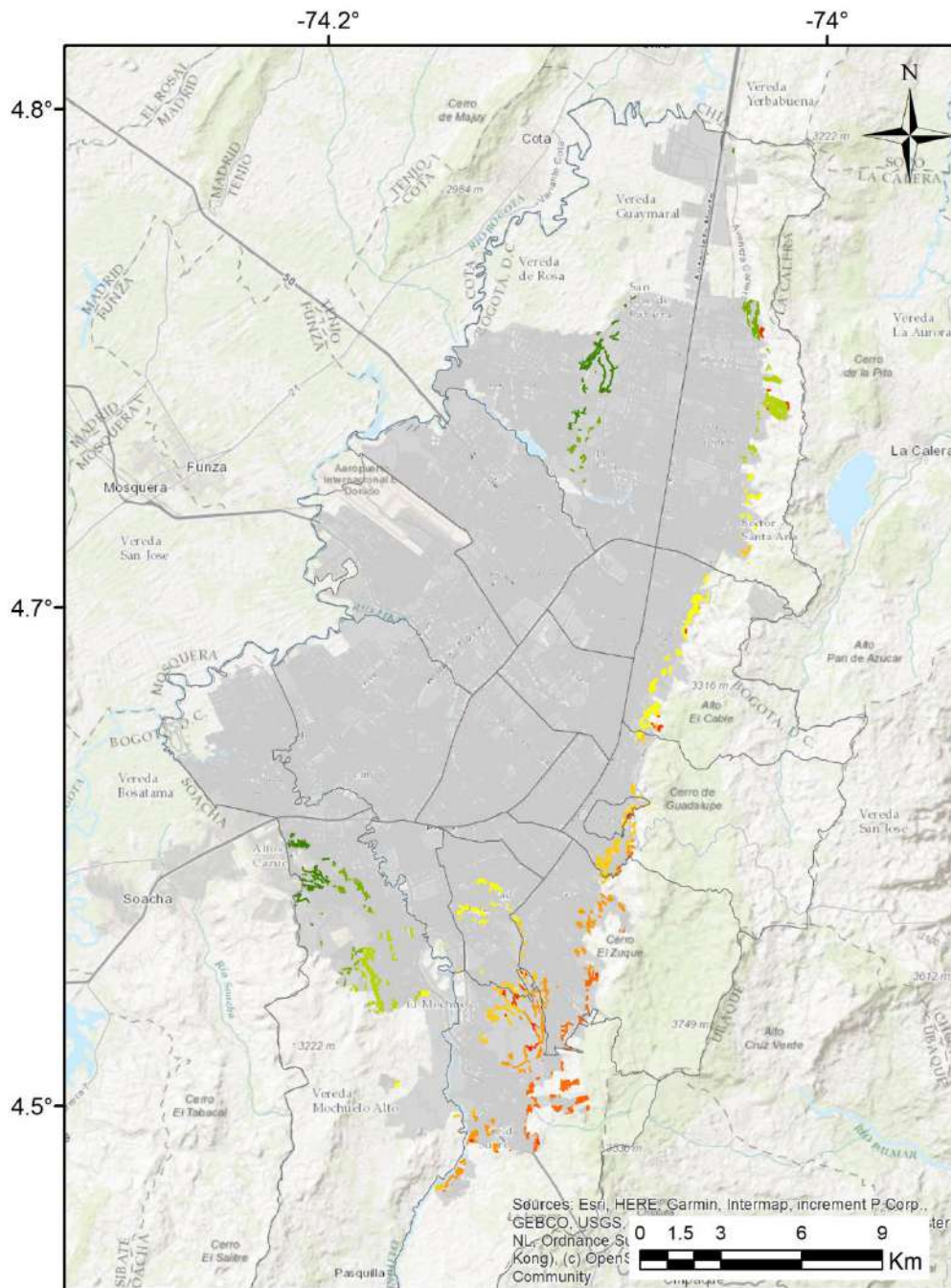


Figura 39. Curvas de PML relativa por deslizamientos (en porcentaje) para los 2 municipios y 2 departamentos, ante clima base y clima futuro.

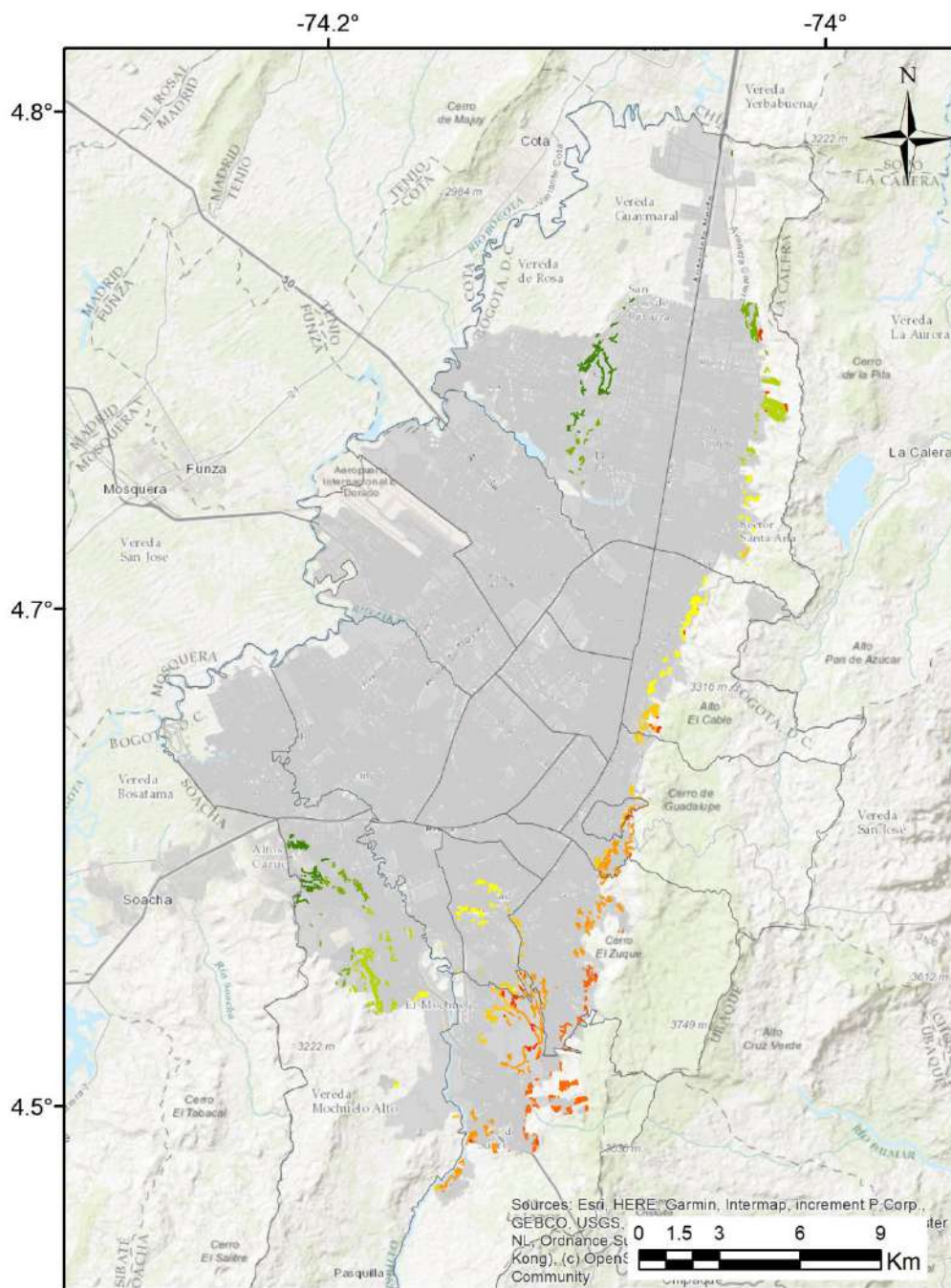
De la Figura 40 a la Figura 60 se presentan mapas de PAE por tramos viales. Estos son tramos seleccionados de forma arbitraria, con longitudes no superiores a los 250 metros. Los archivos georreferenciados se incluyen en el Anexo Digital.



Pérdida Anual Esperada Clima base [%]

0.00	2.74 - 2.82	2.94 - 2.98
0.01 - 2.66	2.83 - 2.89	2.99 - 3.05
2.67 - 2.73	2.90 - 2.93	3.06 - 5.16

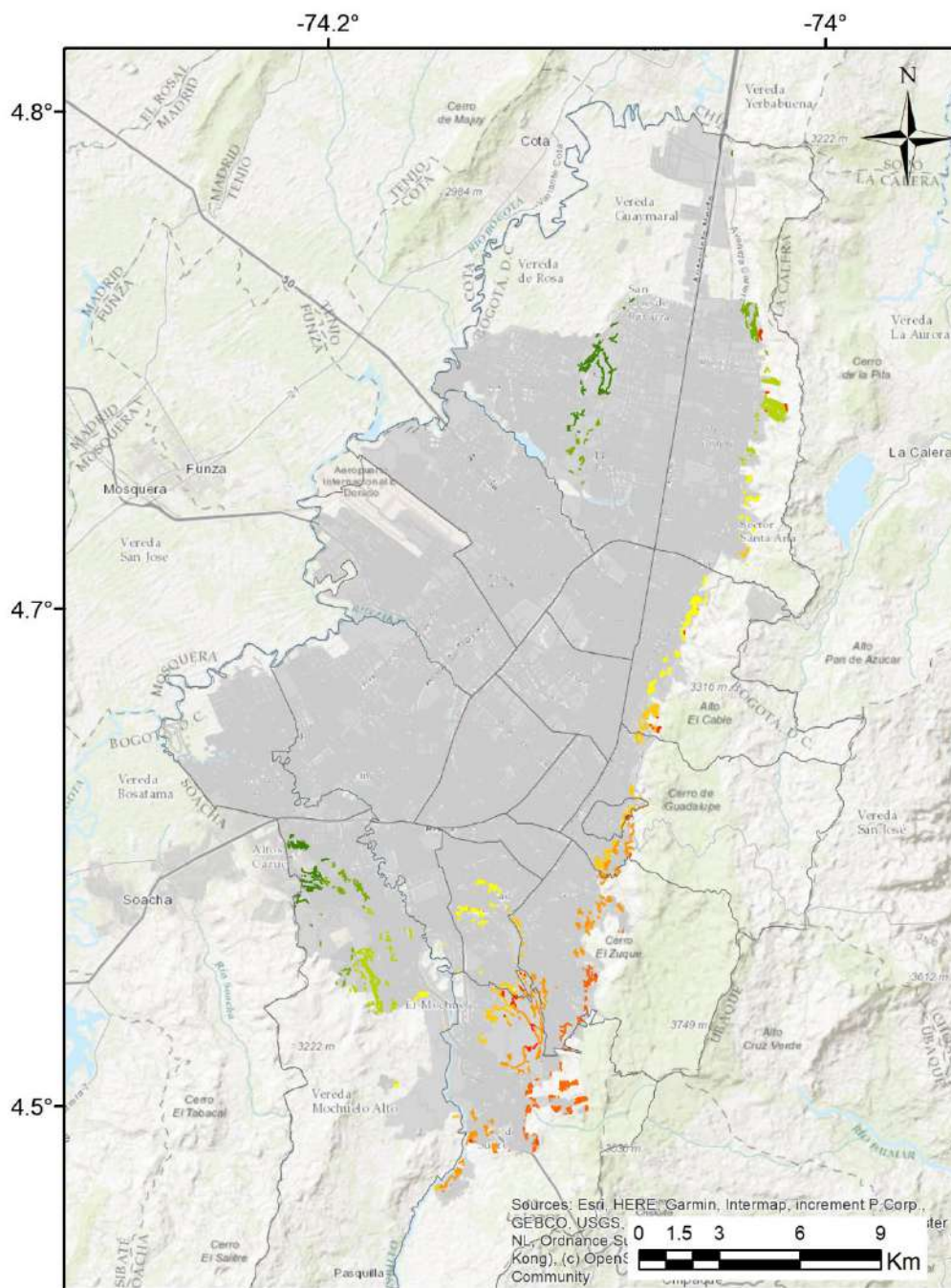
Figura 40. Mapa de PAE en la red vial de Bogotá. Clima base.



Pérdida Anual Esperada RCP 2.6 [‰]

0.00	2.78 - 2.86	2.99 - 3.03
0.01 - 2.70	2.87 - 2.93	3.04 - 3.12
2.71 - 2.77	2.94 - 2.98	3.13 - 5.27

Figura 41. Mapa de PAE en la red vial de Bogotá. RCP 2.6.



Pérdida Anual Esperada RCP 6 [%]

0.00	2.77 - 2.84	2.98 - 3.02
0.01 - 2.69	2.85 - 2.92	3.03 - 3.10
2.70 - 2.76	2.93 - 2.97	3.11 - 5.24

Figura 42. Mapa de PAE en la red vial de Bogotá. RCP 6.0.

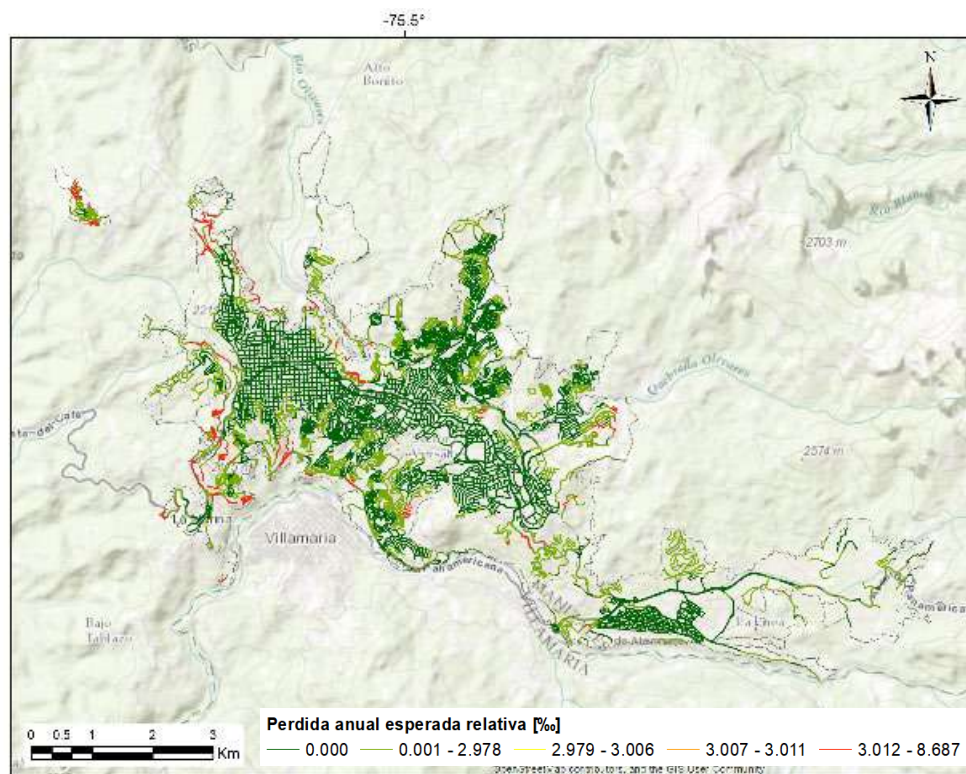


Figura 43. Mapa de PAE en la red vial de Manizales. Clima base.

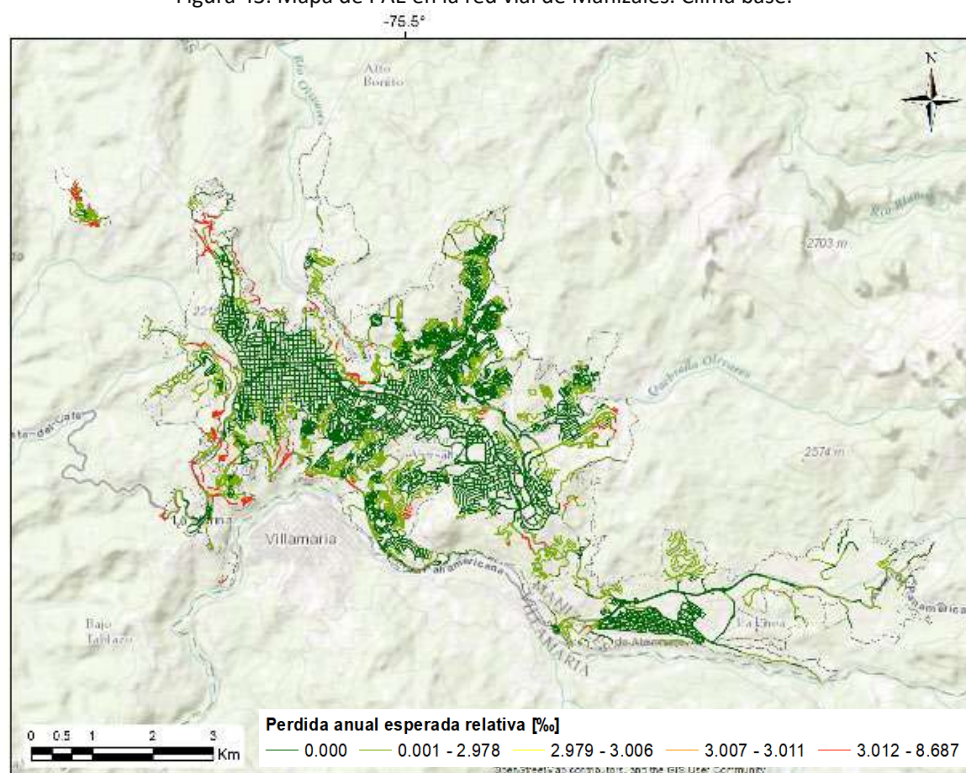


Figura 44. Mapa de PAE en la red vial de Manizales. RCP 2.6.

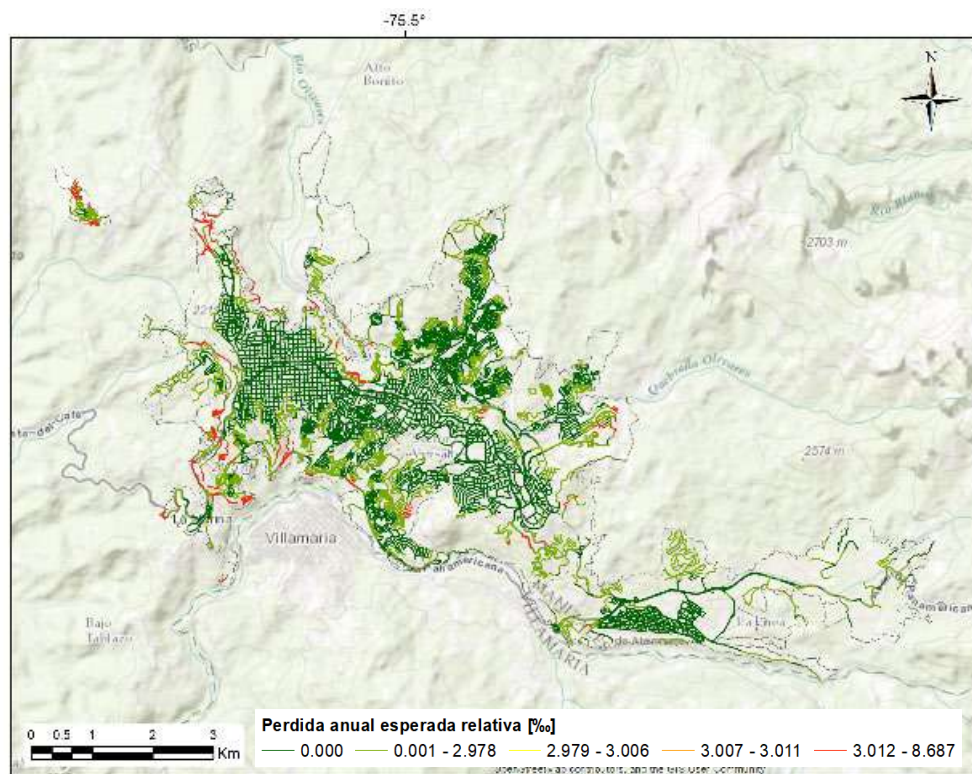


Figura 45. Mapa de PAE en la red vial de Manizales. RCP 4.5.

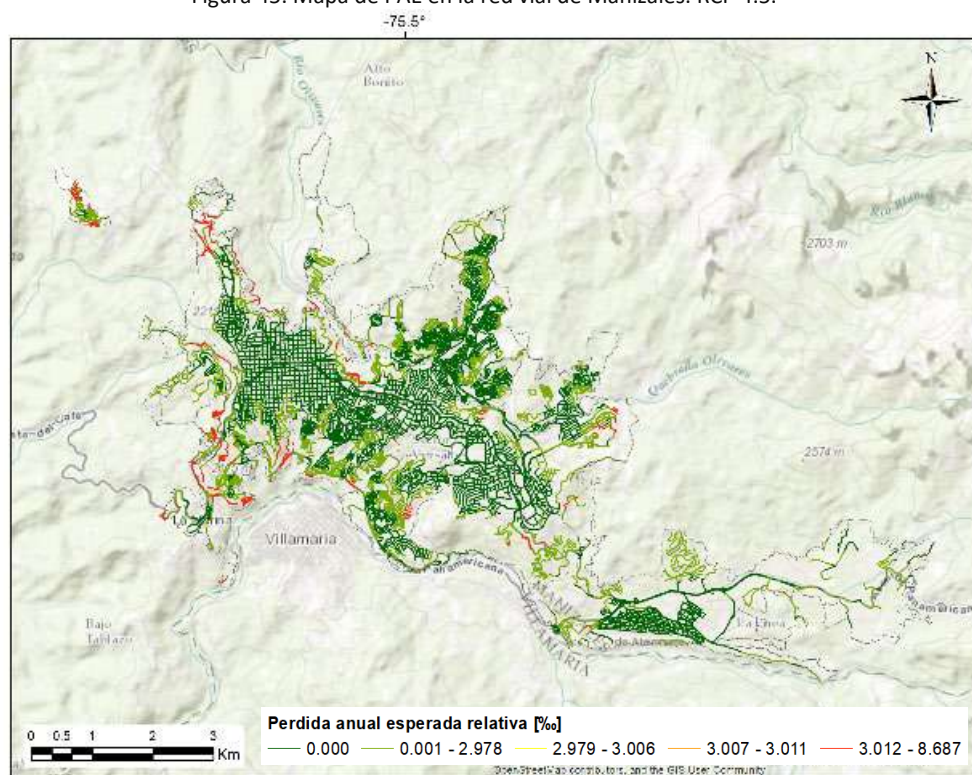


Figura 46. Mapa de PAE en la red vial de Manizales. RCP 6.0.

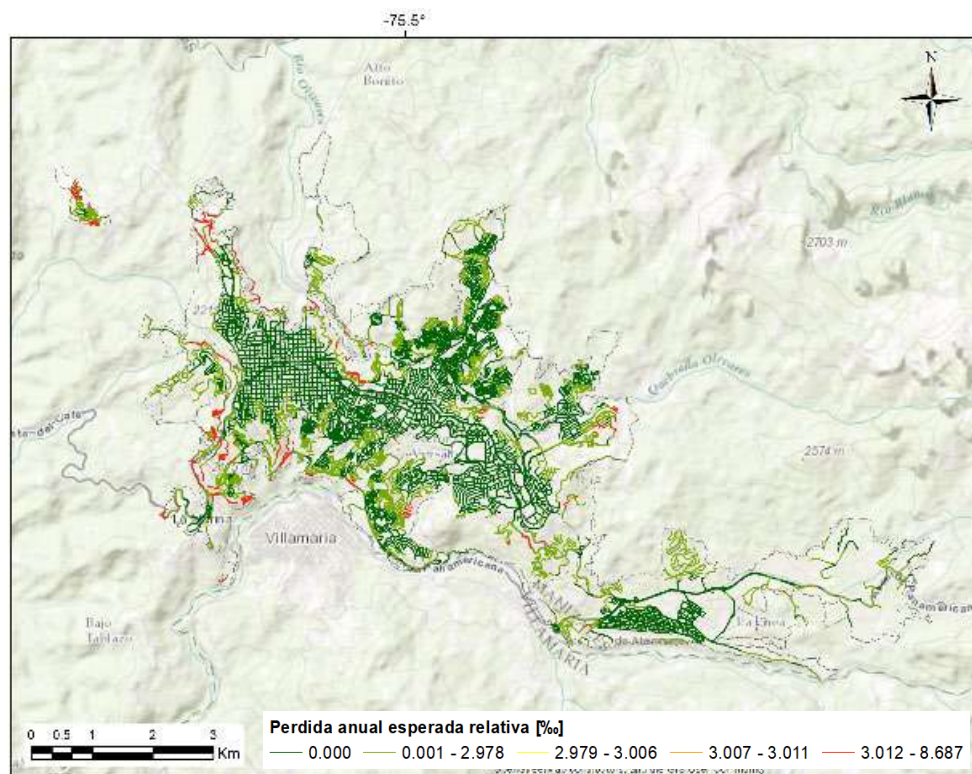


Figura 47. Mapa de PAE en la red vial de Manizales. RCP 8.5.

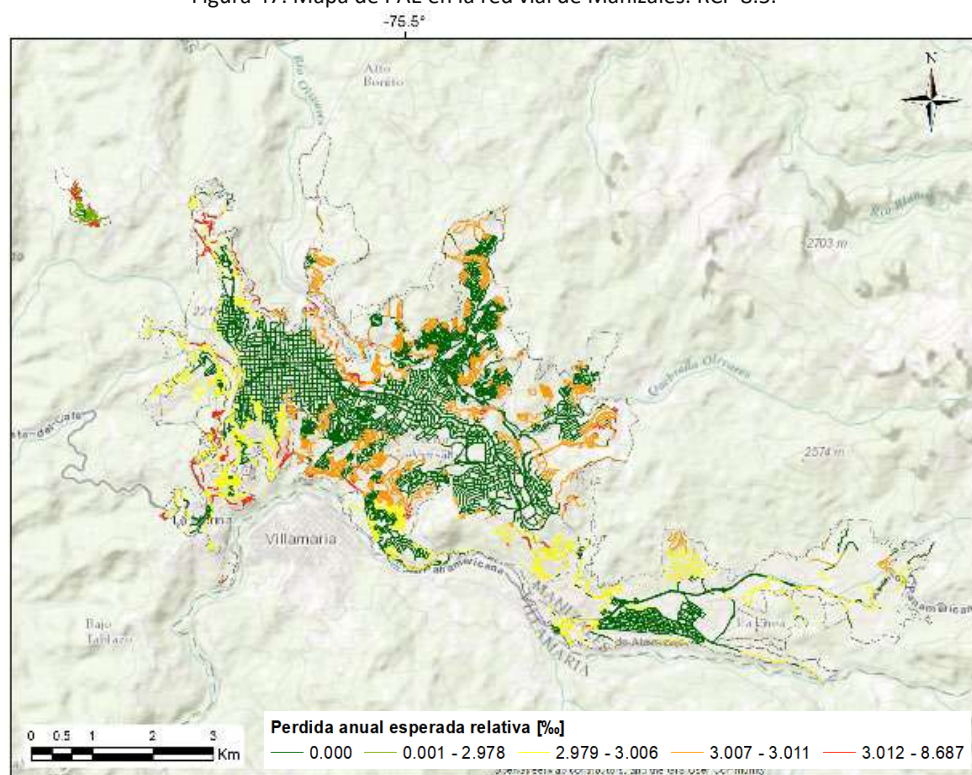


Figura 48. Mapa de PAE en la red vial de Manizales. Clima IDEAM.

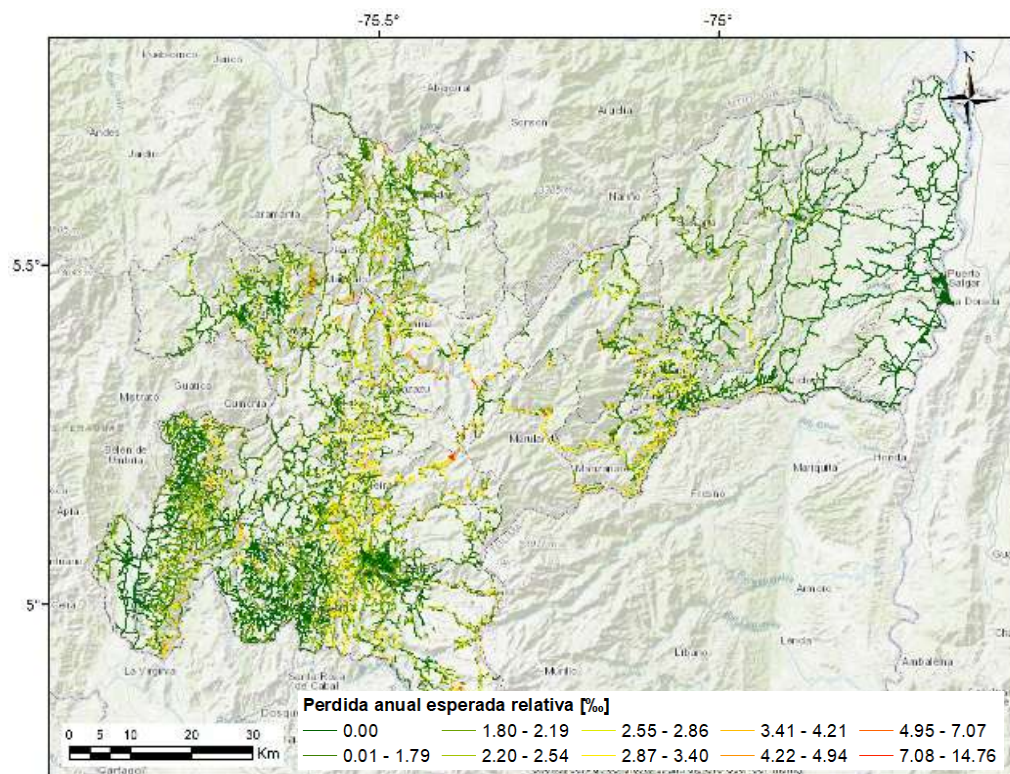


Figura 49. Mapa de PAE en la red vial de Caldas. Clima base.

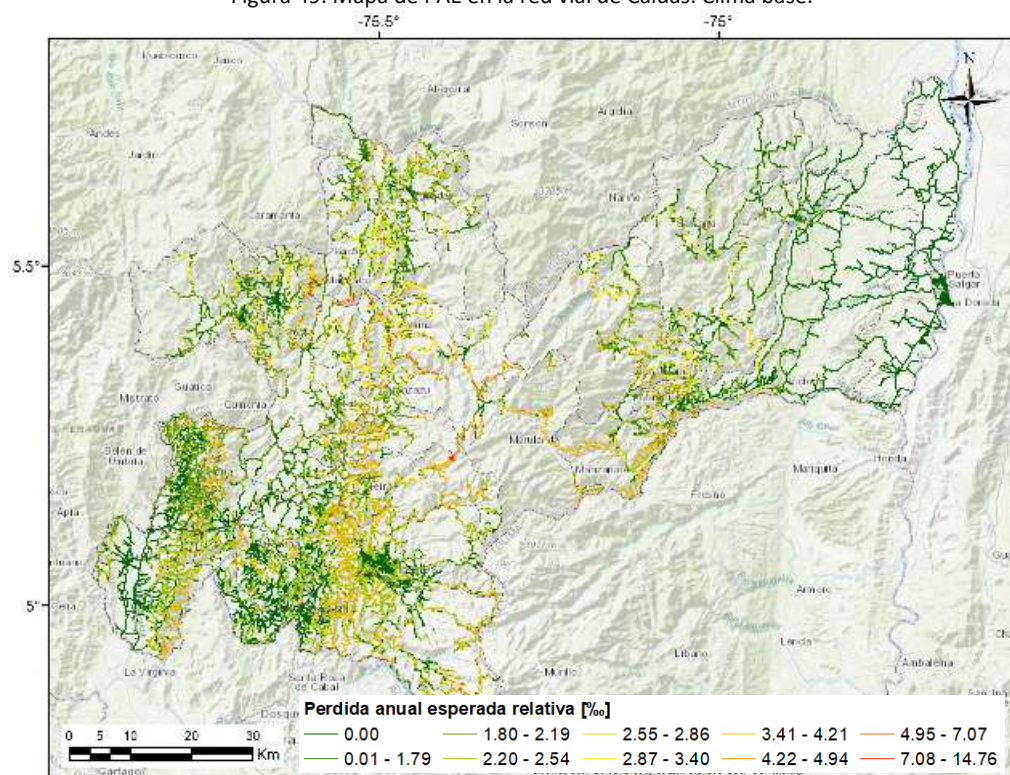


Figura 50. Mapa de PAE en la red vial de Caldas. RCP 2.6.

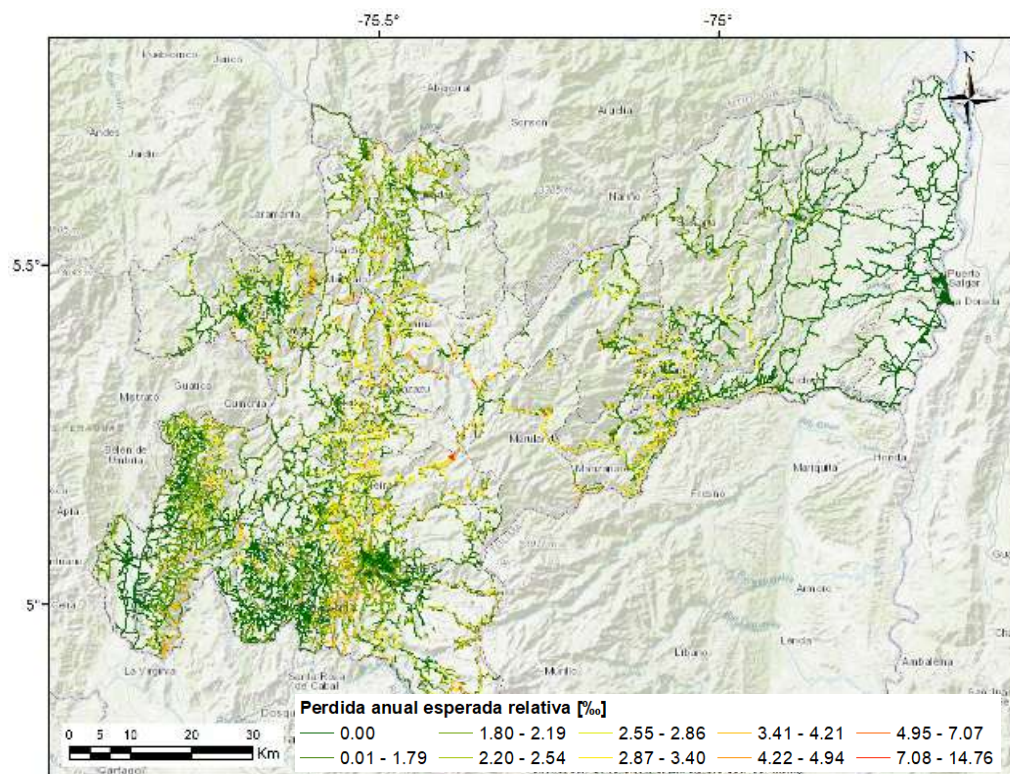


Figura 51. Mapa de PAE en la red vial de Caldas. RCP 4.5.

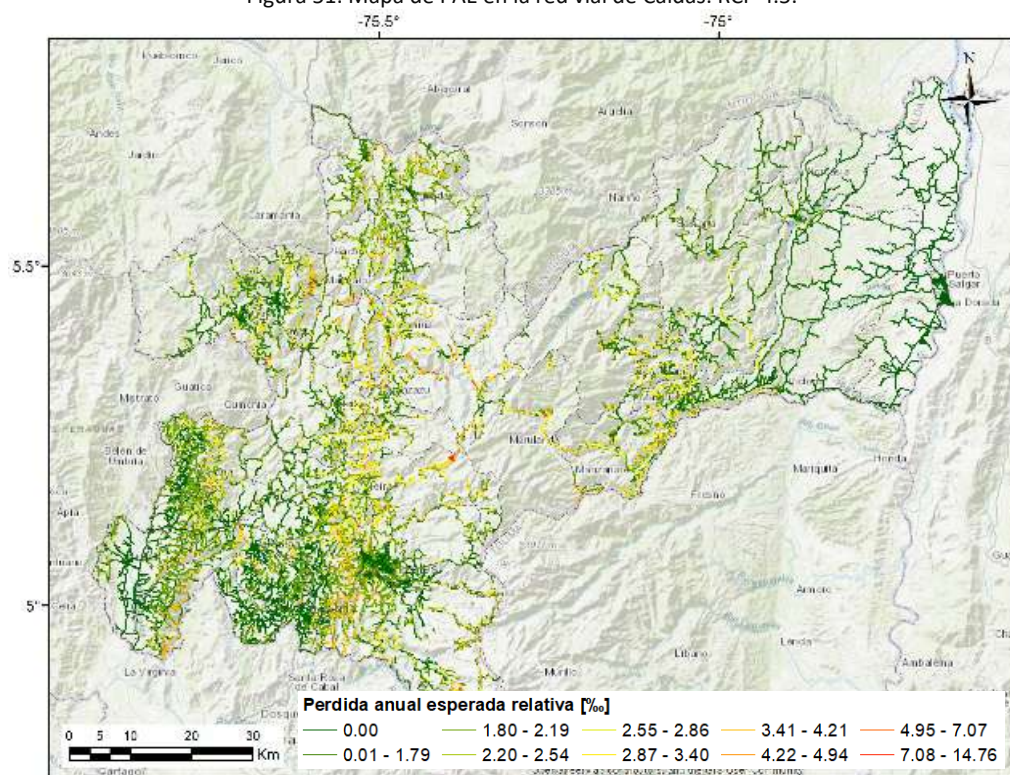


Figura 52. Mapa de PAE en la red vial de Caldas. RCP 6.0.

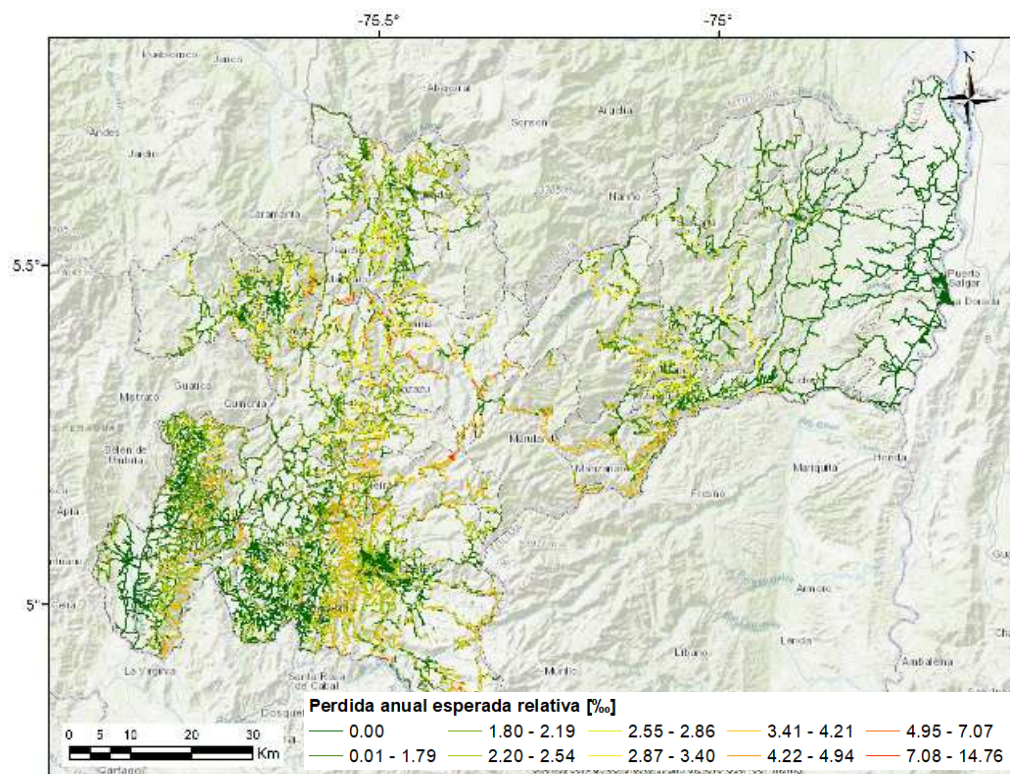


Figura 53. Mapa de PAE en la red vial de Caldas. RCP 8.5.

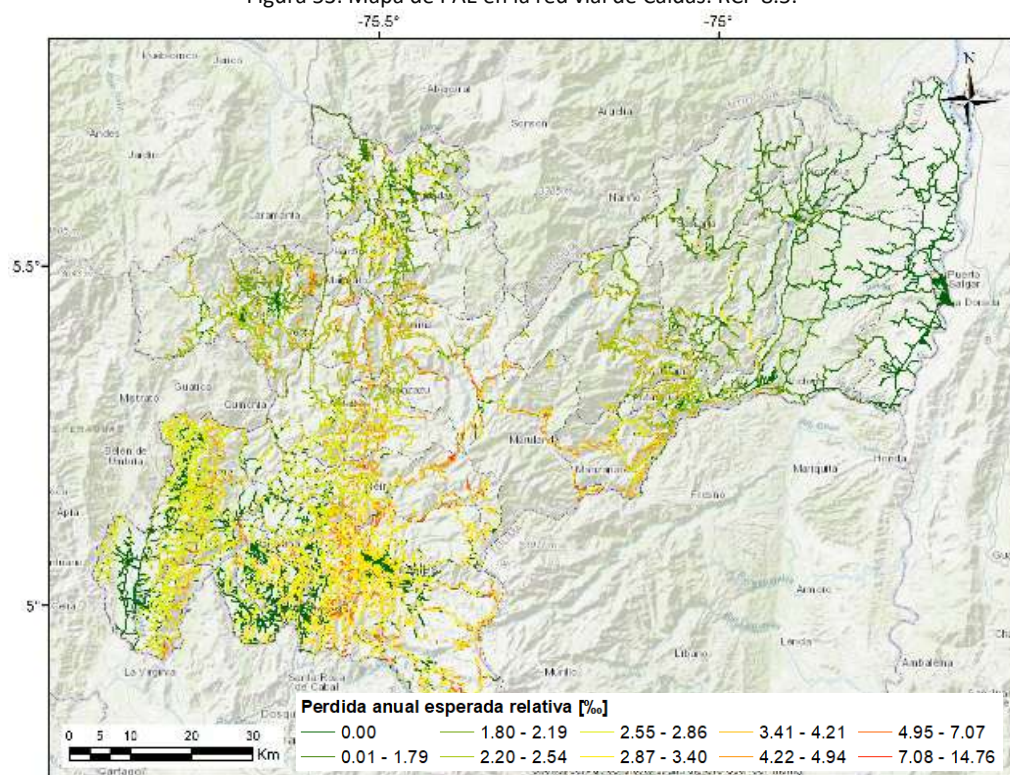
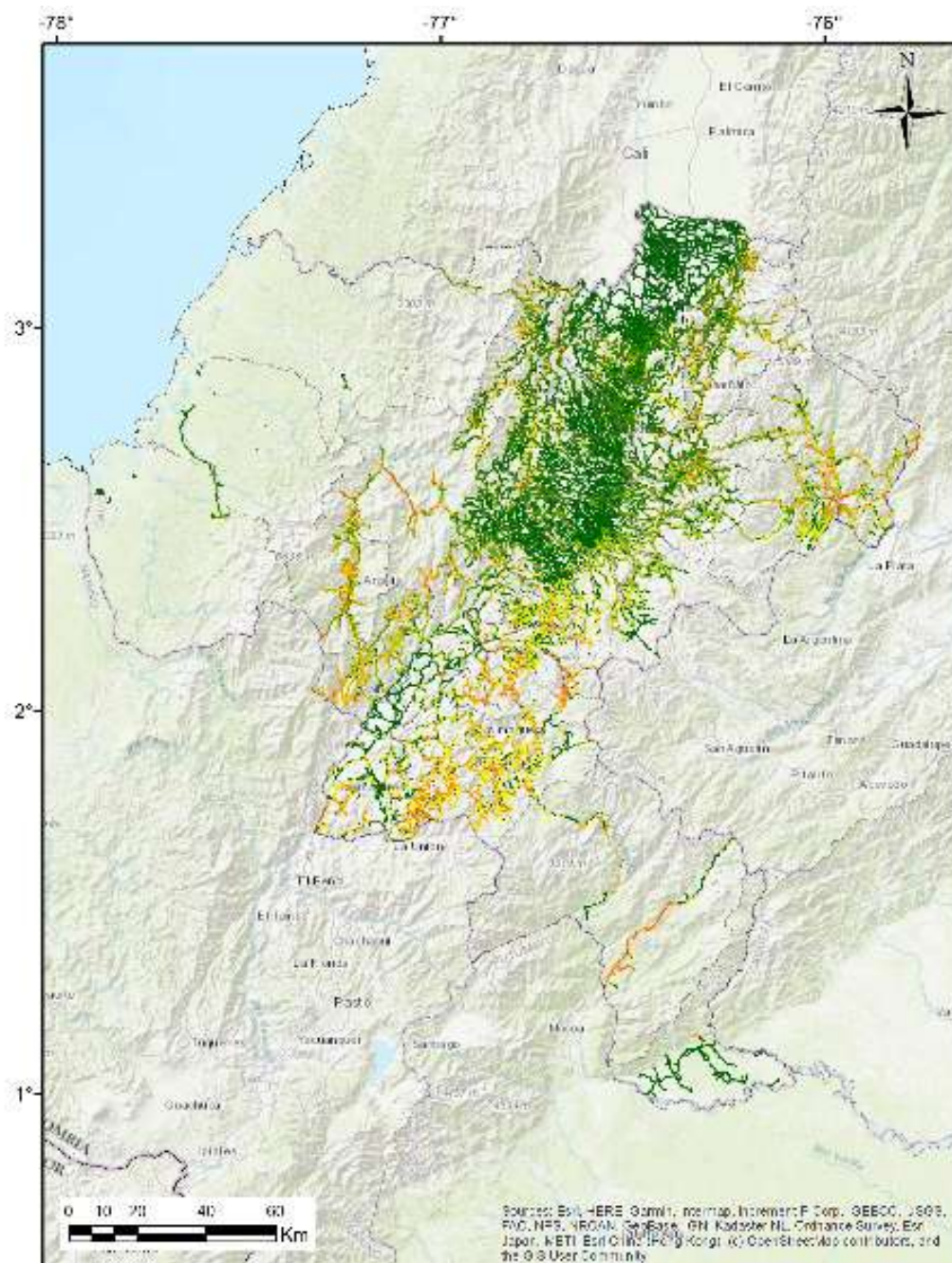


Figura 54. Mapa de PAE en la red vial de Caldas. Clima IDEAM.



Pérdida anual esperada relativa [%]

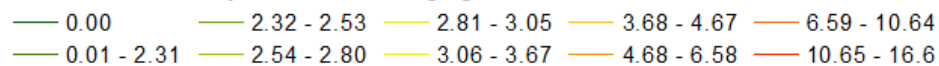
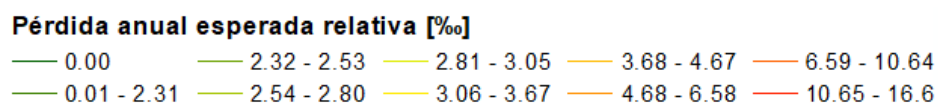
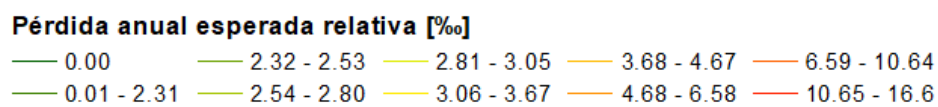


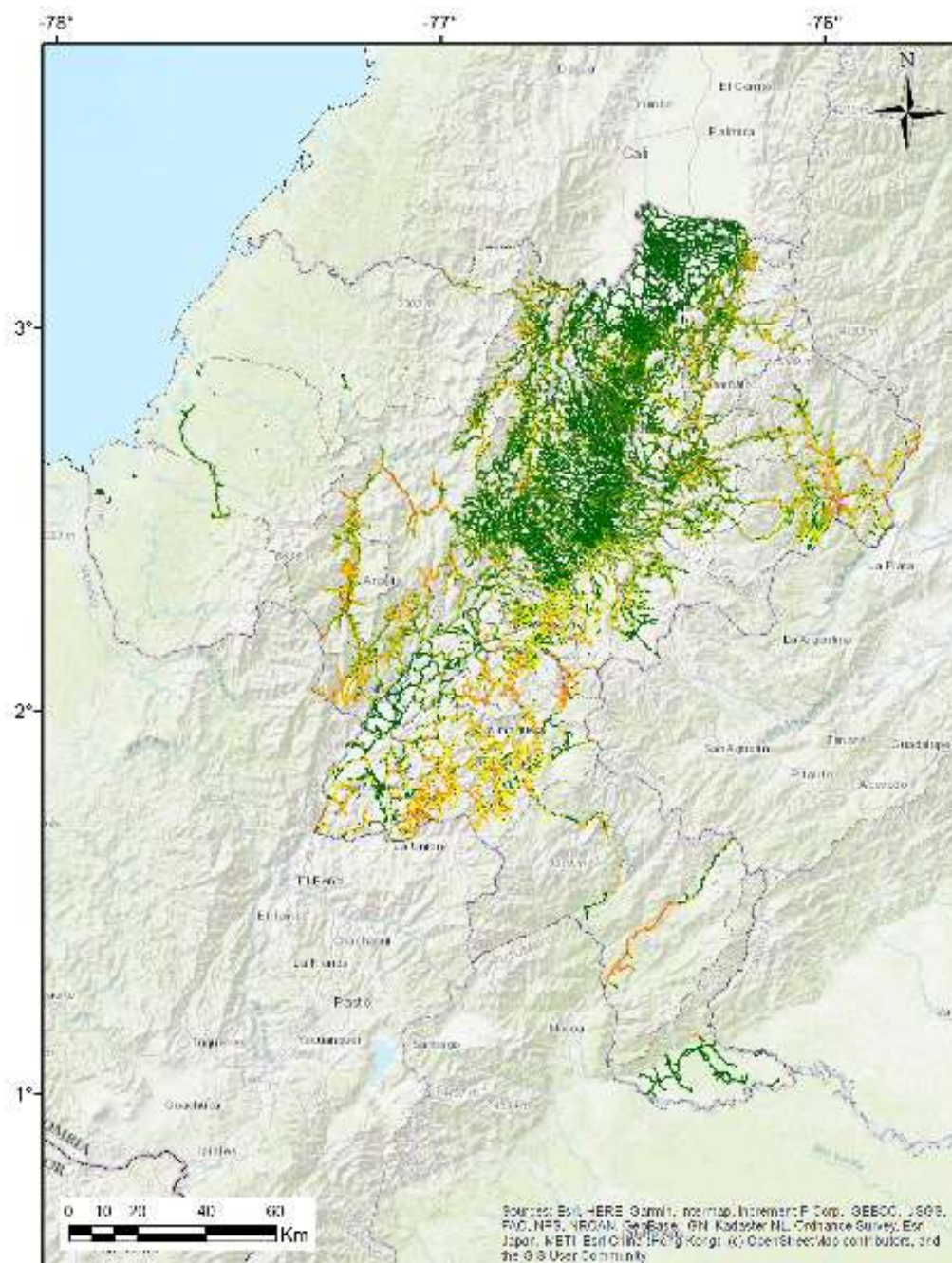
Figura 55. Mapa de PAE en la red vial de Cauca. Clima base.



Análisis de Riesgo de Línea Base • 50



Análisis de Riesgo de Línea Base • 51



Pérdida anual esperada relativa [%]

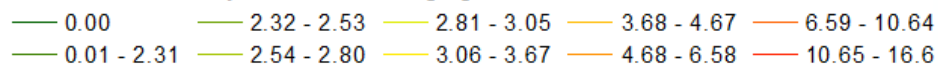
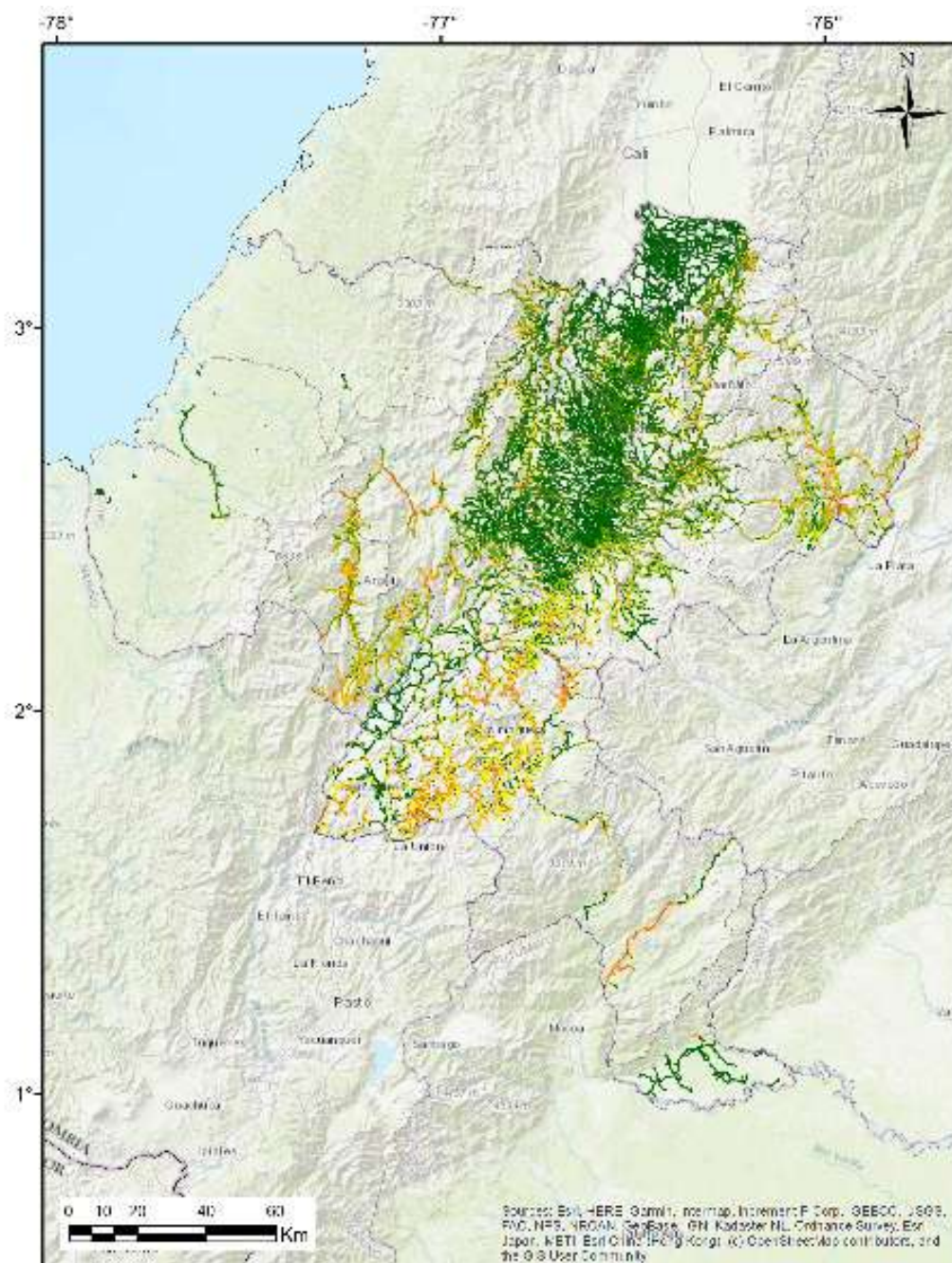


Figura 58. Mapa de PAE en la red vial de Cauca. RCP 6.0.



Pérdida anual esperada relativa [%]

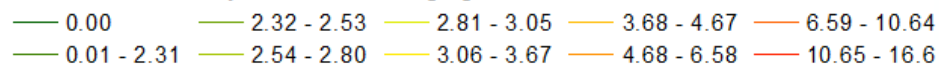


Figura 59. Mapa de PAE en la red vial de Cauca. RCP 8.5.

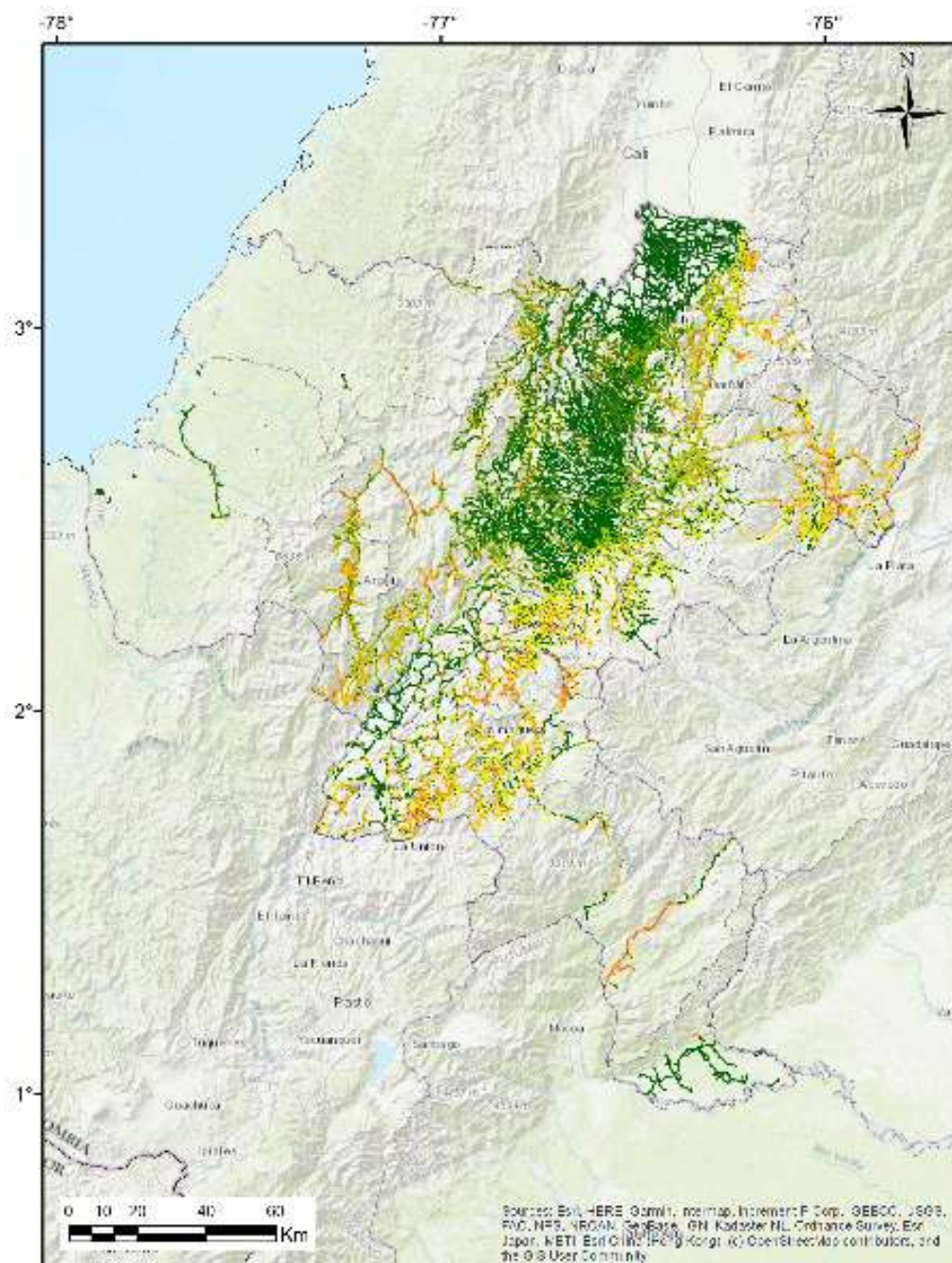


Figura 60. Mapa de PAE en la red vial de Cauca. Clima IDEAM.

4.3 Resultados de la evaluación sobre edificaciones

La Tabla 11 muestra los valores de la pérdida anual esperada (PAE) para edificaciones en Bogotá y Manizales, tanto para el clima actual como para los climas futuros considerados. La Figura 38 presenta la PAE relativa de forma gráfica, en donde es posible comparar la diferencia en el riesgo causada por el cambio climático. La Figura 39 muestra las curvas de PML de cada ciudad.

Tabla 12. Pérdidas Anuales Esperadas por deslizamiento

Municipio / Depto.	Valor expuesto	Clima base		RCP2.6		RCP4.5	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
Bogotá	\$ 401,631,588	\$ 31,597	0.079	\$ 32,129	0.08	\$ 31,763	0.079
Manizales	\$ 8,188,144	\$ 4,043	0.01	\$ 4,834	0.012	\$ 4,193	0.01

Municipio / Depto.	Valor expuesto	RCP6.0		RCP8.5		IDEAM	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
Bogotá	\$ 401,631,588	\$ 31,976	0.08	\$ 32,082	0.08	\$ 35,633	0.089
Manizales	\$ 8,188,144	\$ 4,630	0.012	\$ 4,683	0.012	\$ 6,257	0.016

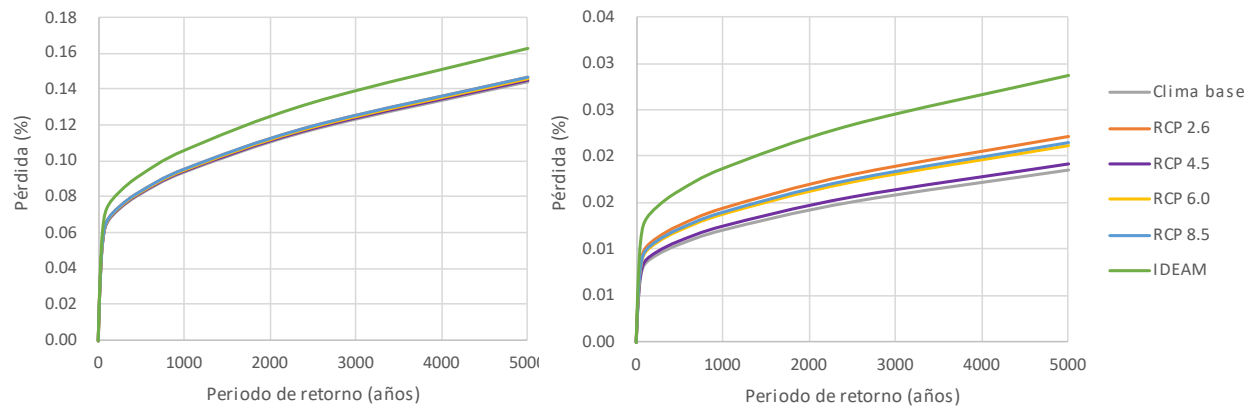
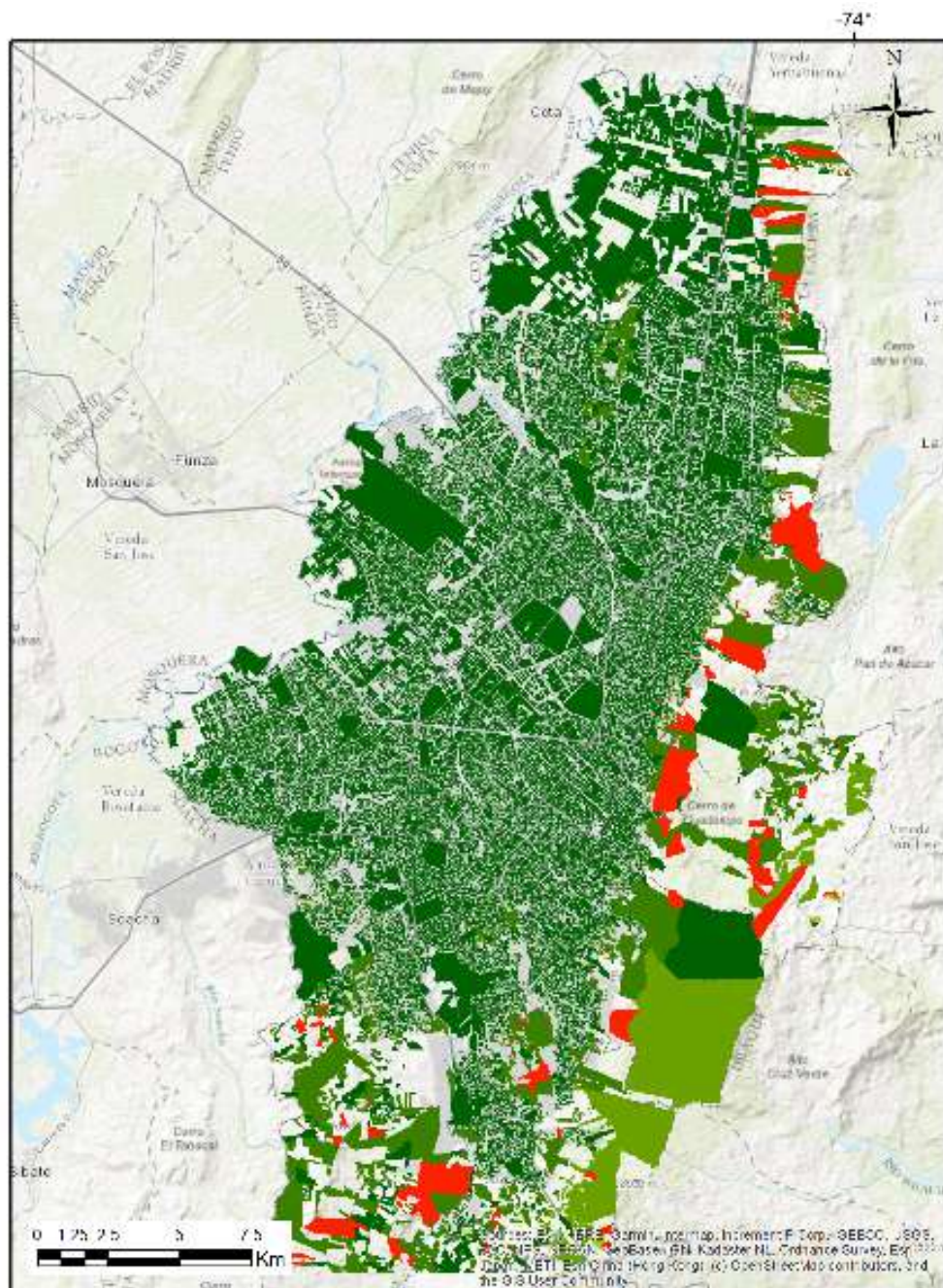


Figura 61. Curvas de PML relativa por deslizamientos (en porcentaje) para Bogotá (izq) y Manizales (der).

De la Figura 62 a la Figura 73 se presentan mapas de PAE por predio. Los archivos georreferenciados se incluyen en el Anexo Digital.



Pérdida anual esperada relativa [%]

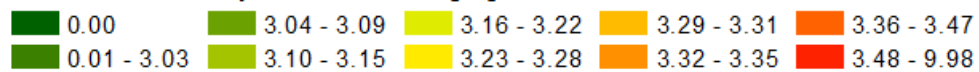
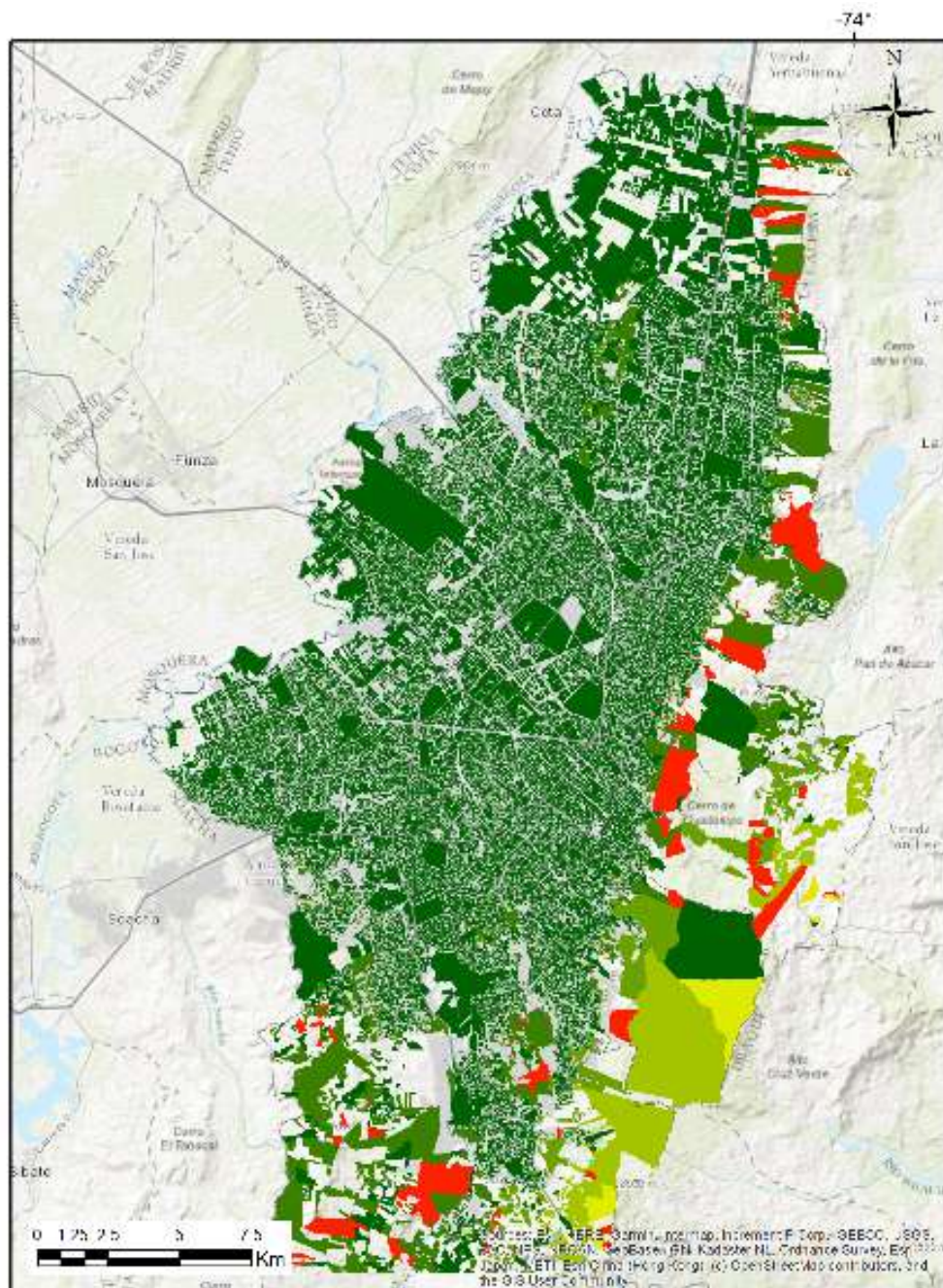


Figura 62. Mapa de PAE a nivel predial de Bogotá. Clima base.



Pérdida anual esperada relativa [%]

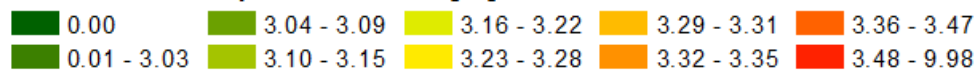
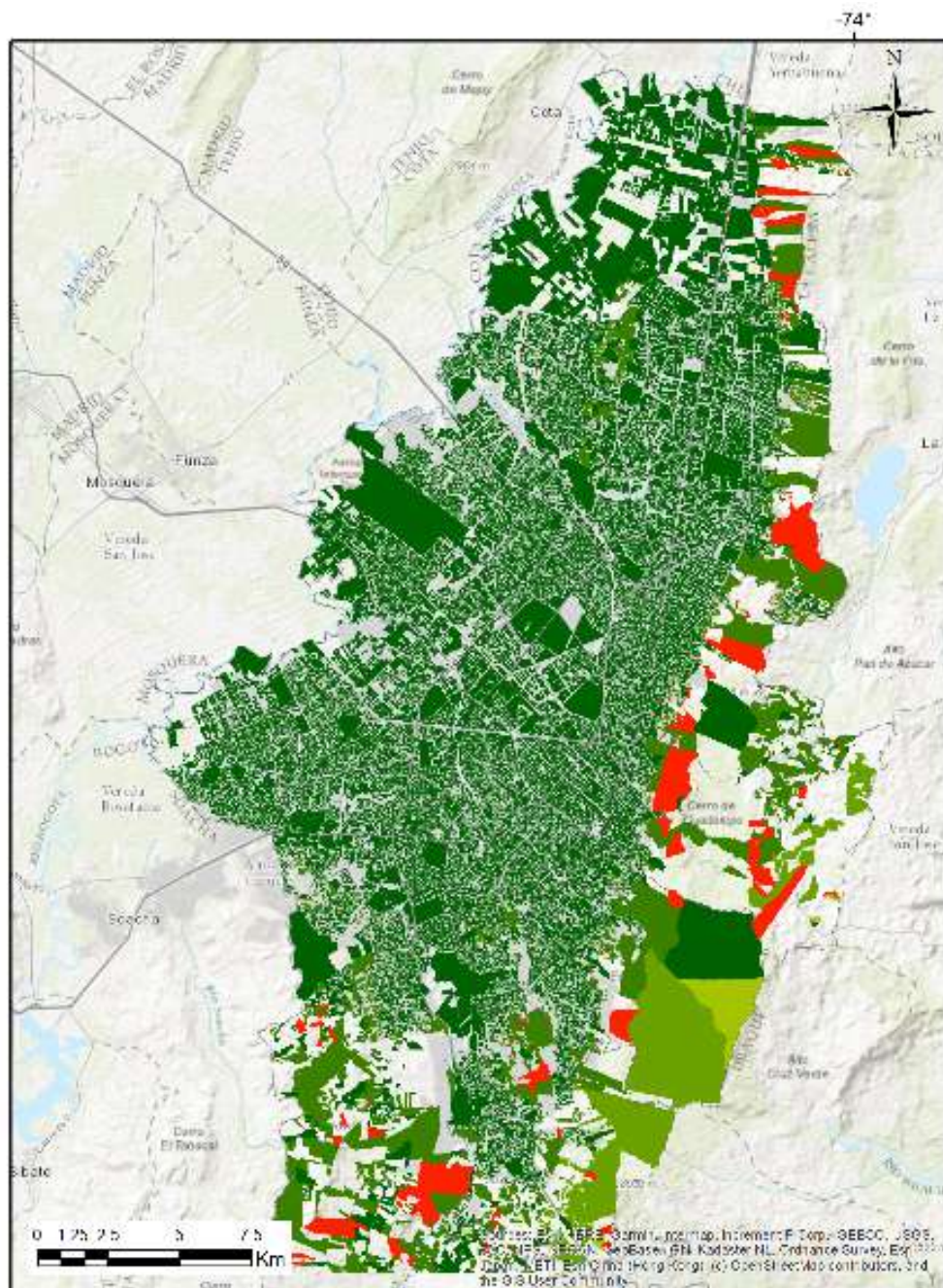


Figura 63. Mapa de PAE a nivel predial de Bogotá. RCP 2.6.



Pérdida anual esperada relativa [%]

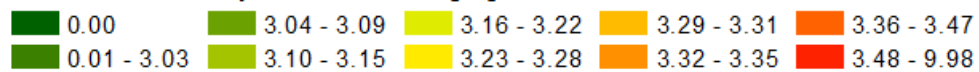
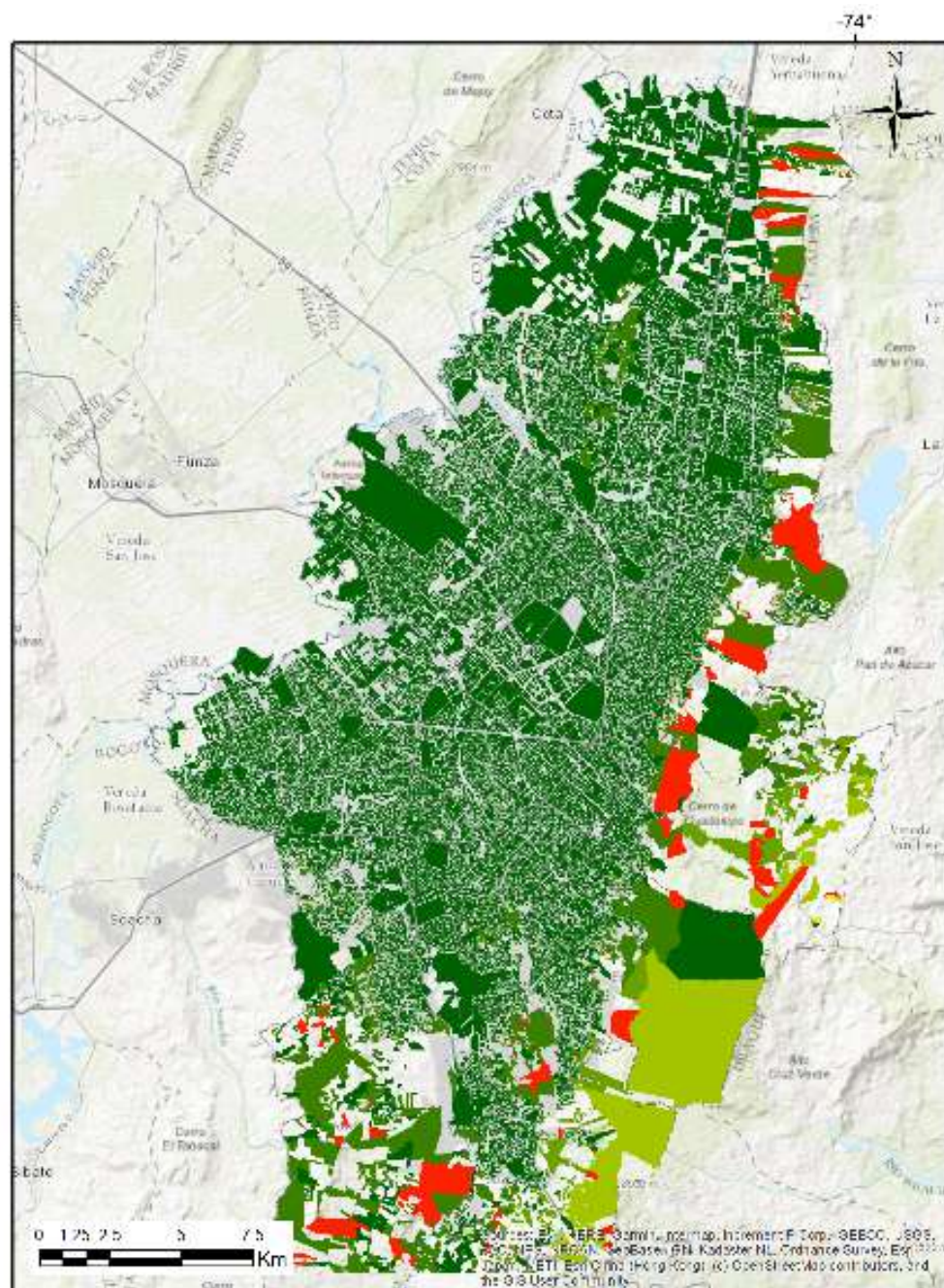


Figura 64. Mapa de PAE a nivel predial de Bogotá. RCP 4.5.



Pérdida anual esperada relativa [%]

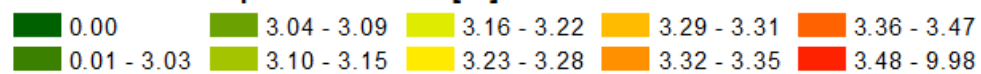
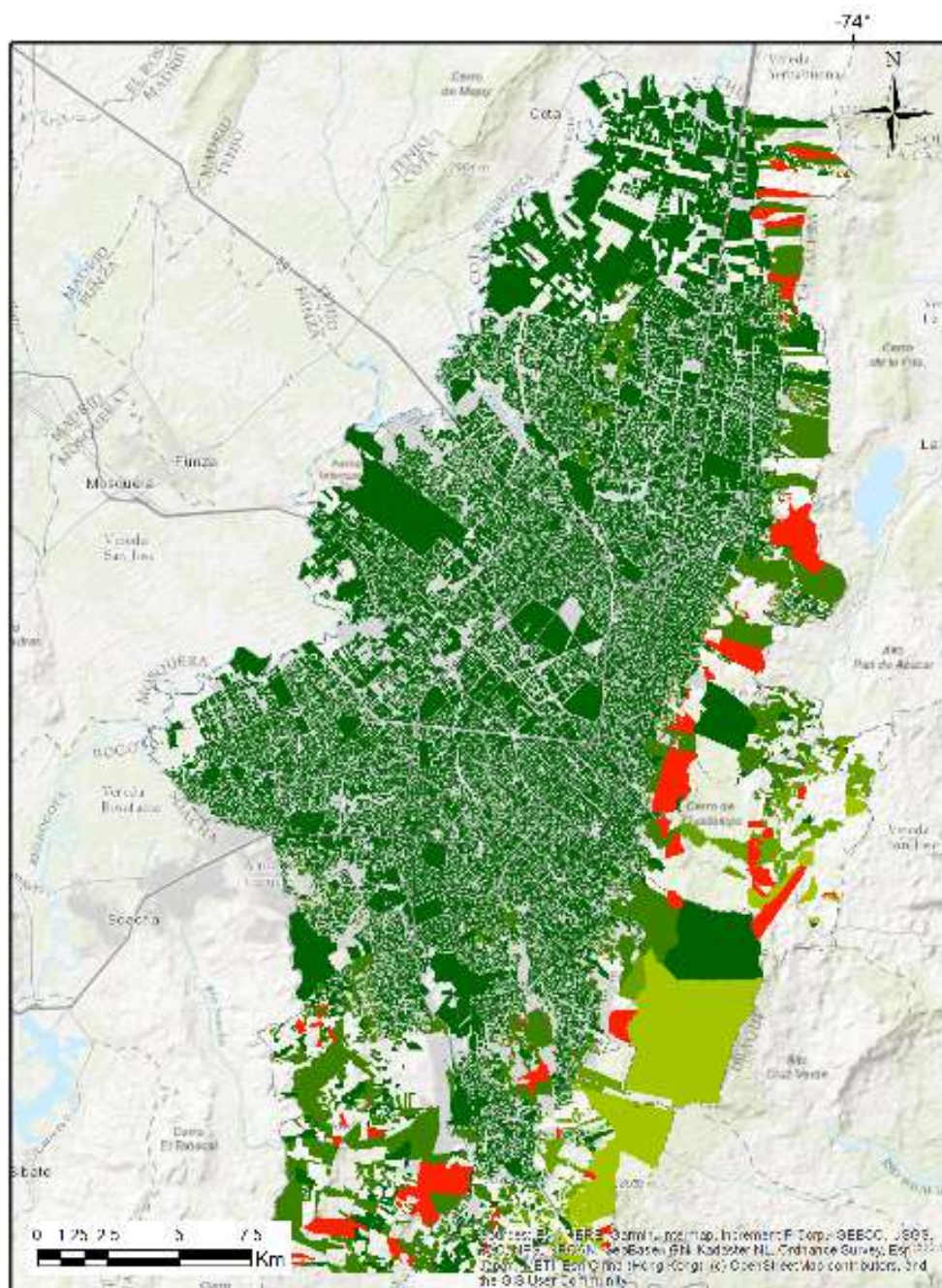


Figura 65. Mapa de PAE a nivel predial de Bogotá. RCP 6.0.



Pérdida anual esperada relativa [%]

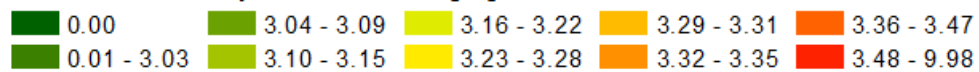
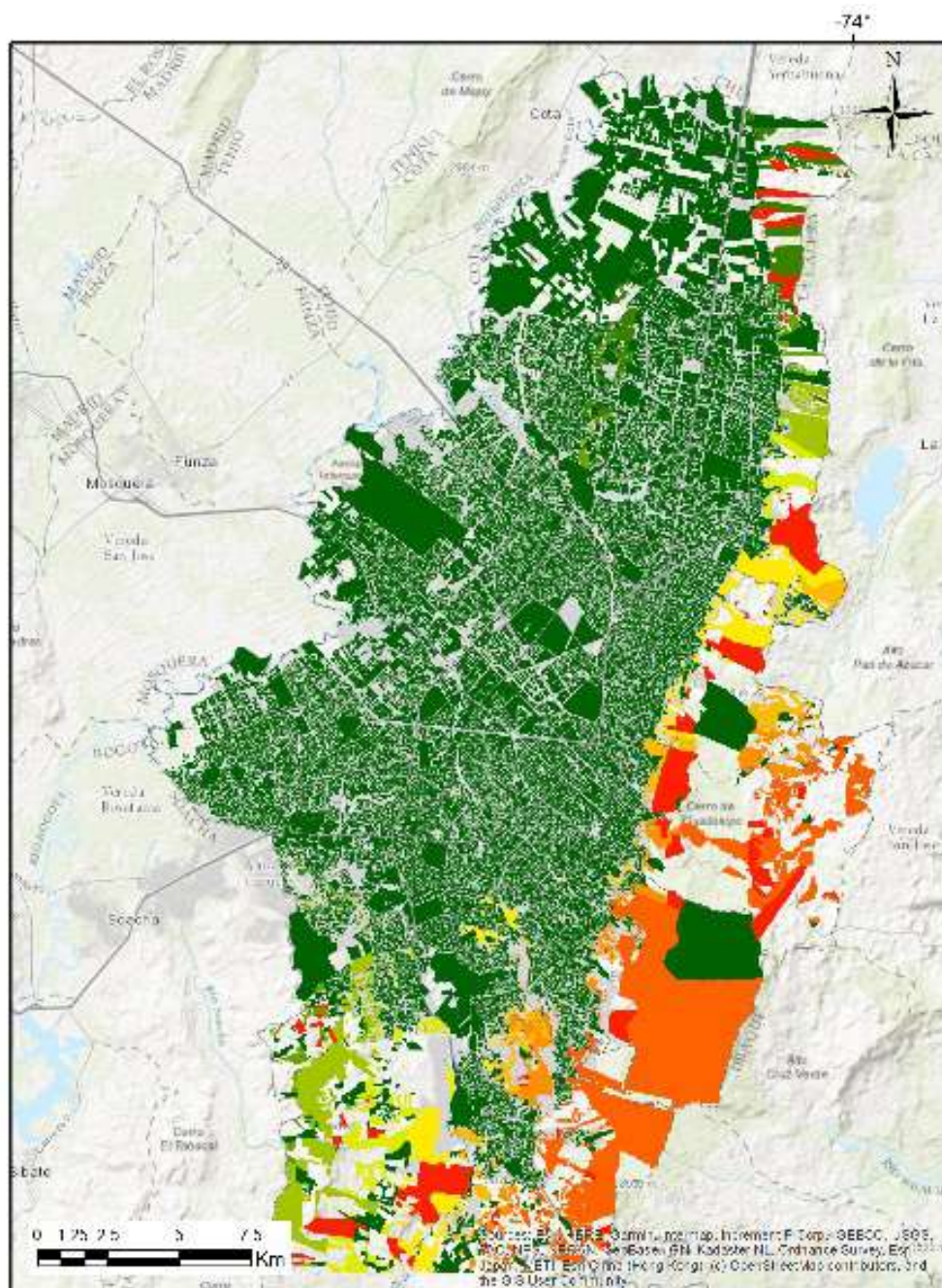


Figura 66. Mapa de PAE a nivel predial de Bogotá. RCP 8.5.



Pérdida anual esperada relativa [%]

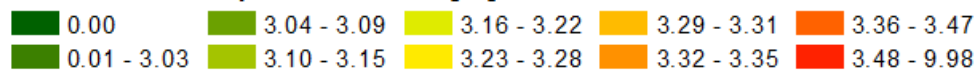


Figura 67. Mapa de PAE a nivel predial de Bogotá. Clima IDEAM.

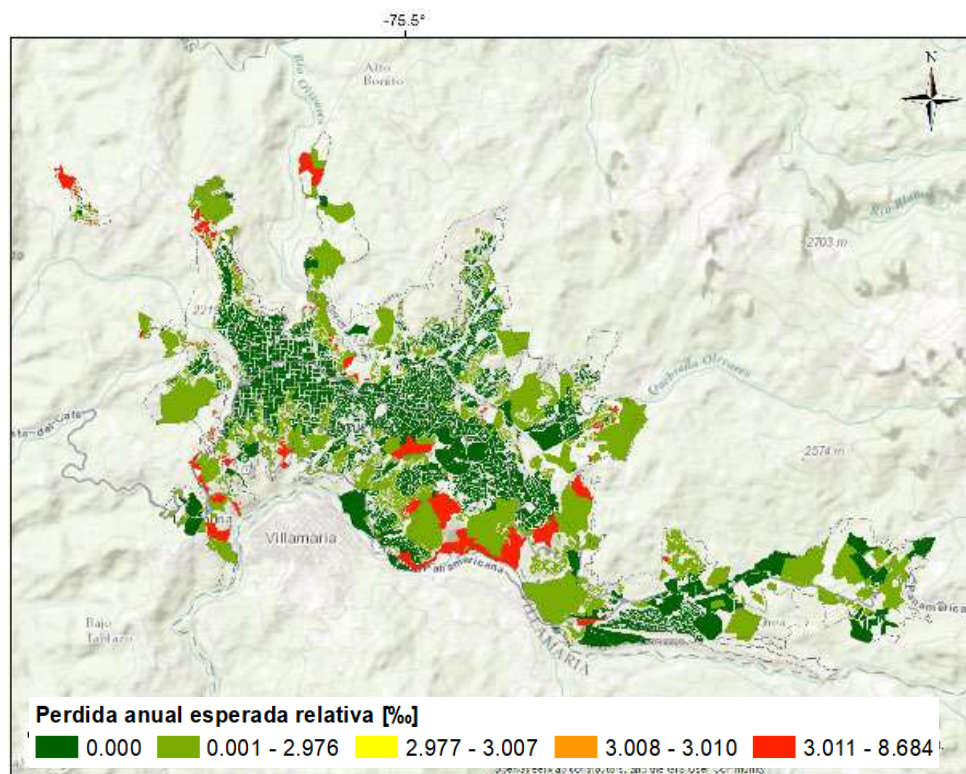


Figura 68. Mapa de PAE a nivel predial de Manizales. Clima Base.

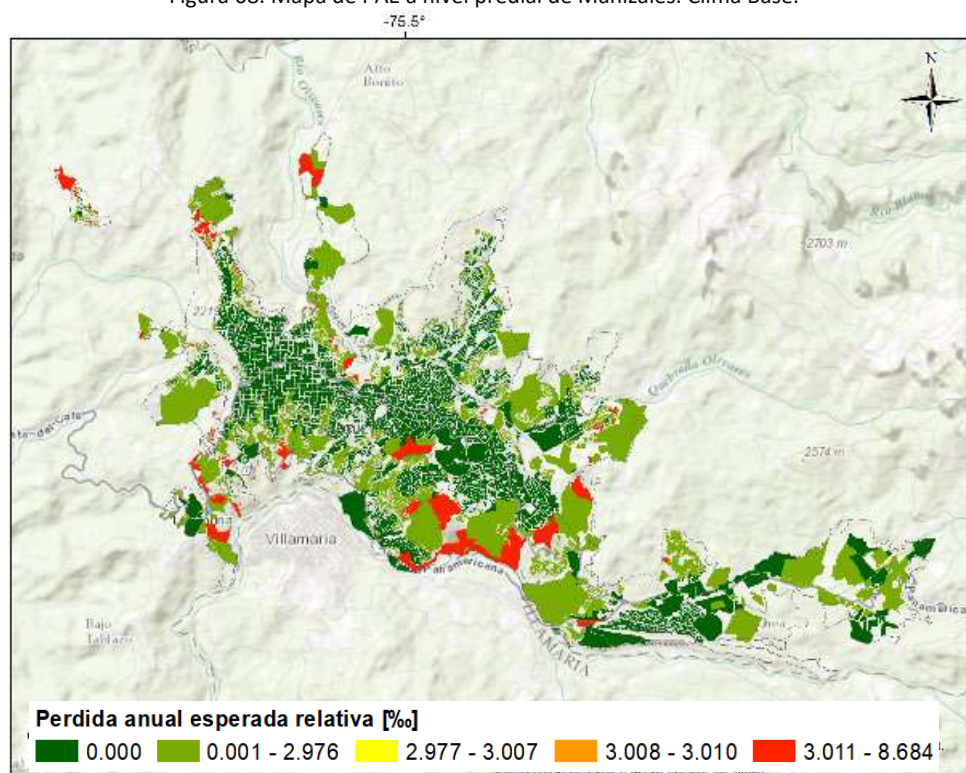


Figura 69. Mapa de PAE a nivel predial de Manizales. RCP 2.6.

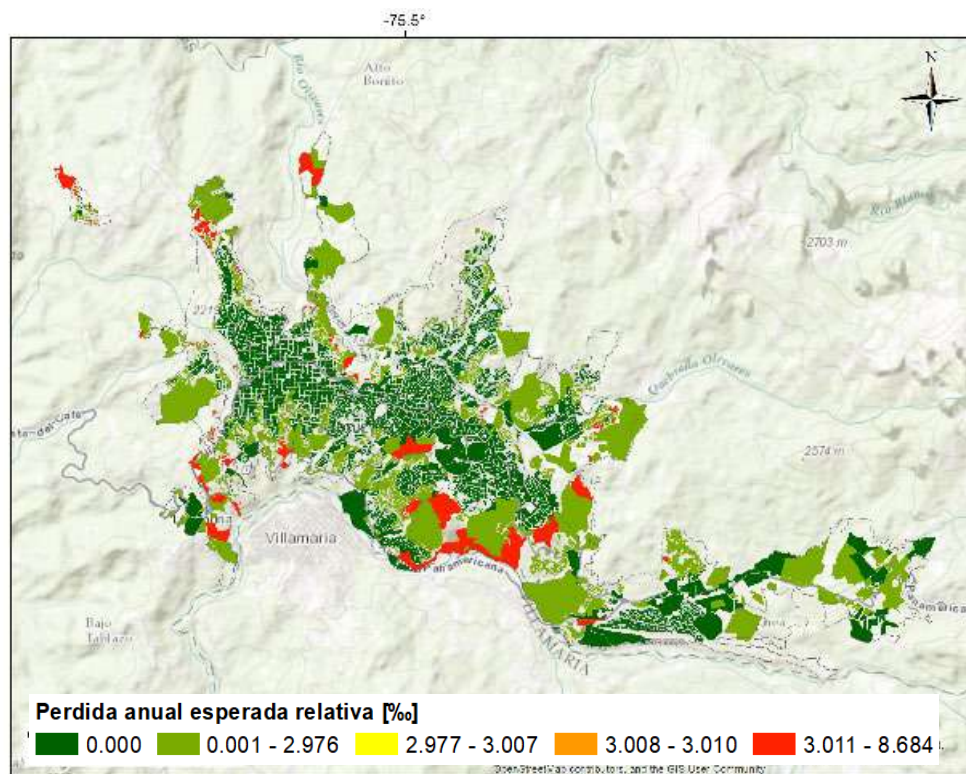


Figura 70. Mapa de PAE a nivel predial de Manizales. RCP 4.5.

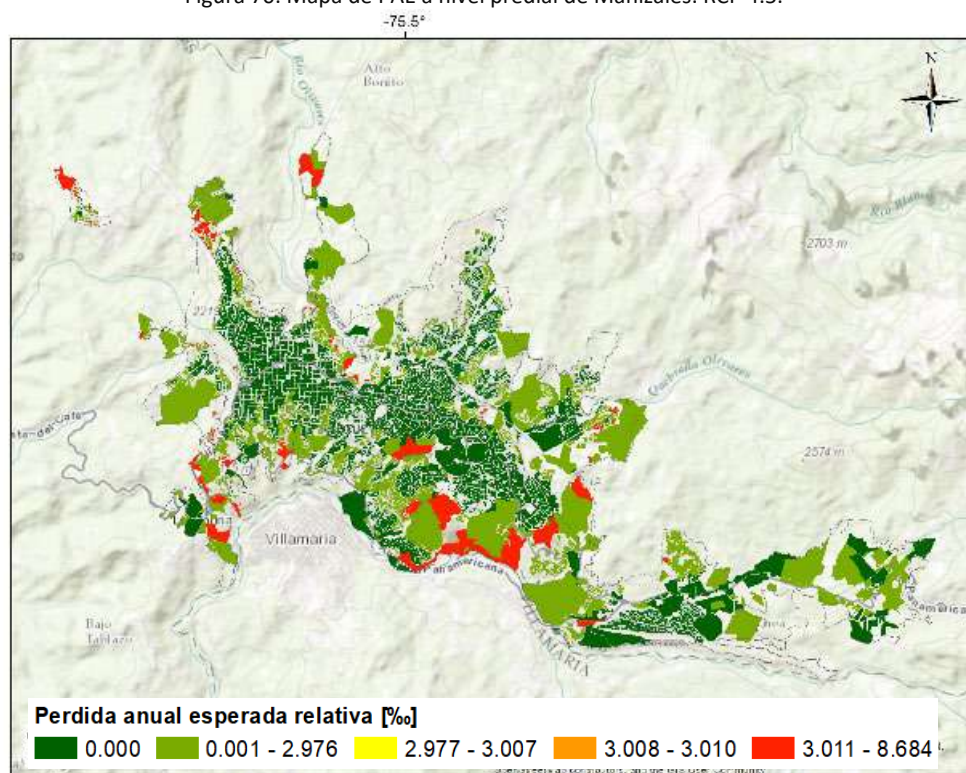


Figura 71. Mapa de PAE a nivel predial de Manizales. RCP 6.0.

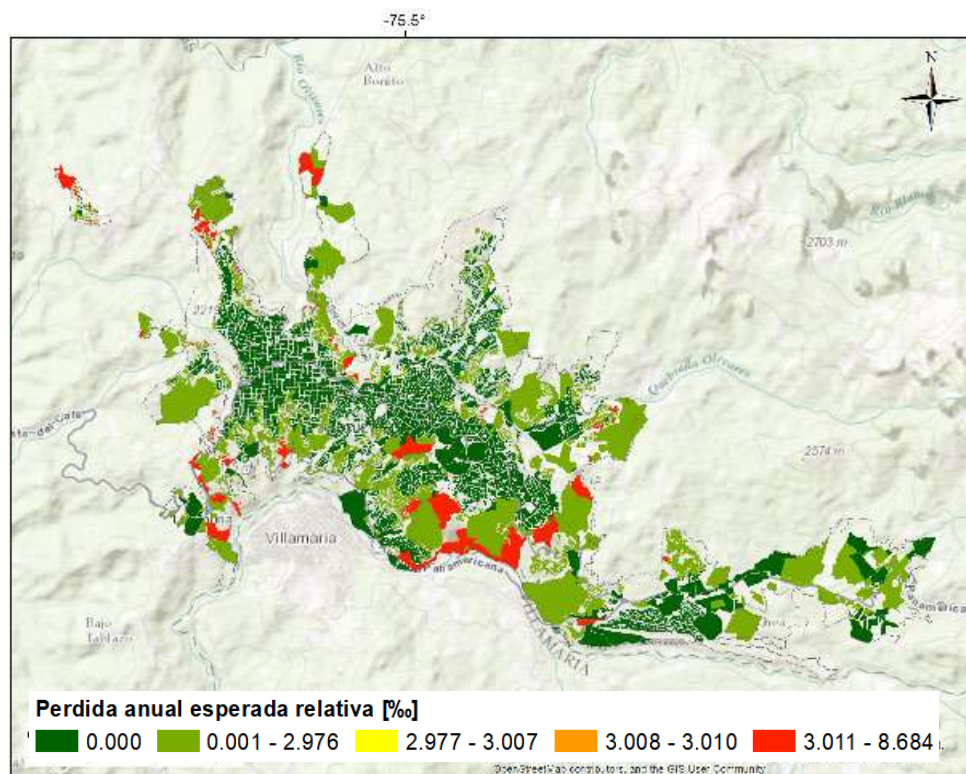


Figura 72. Mapa de PAE a nivel predial de Manizales. RCP 8.5.

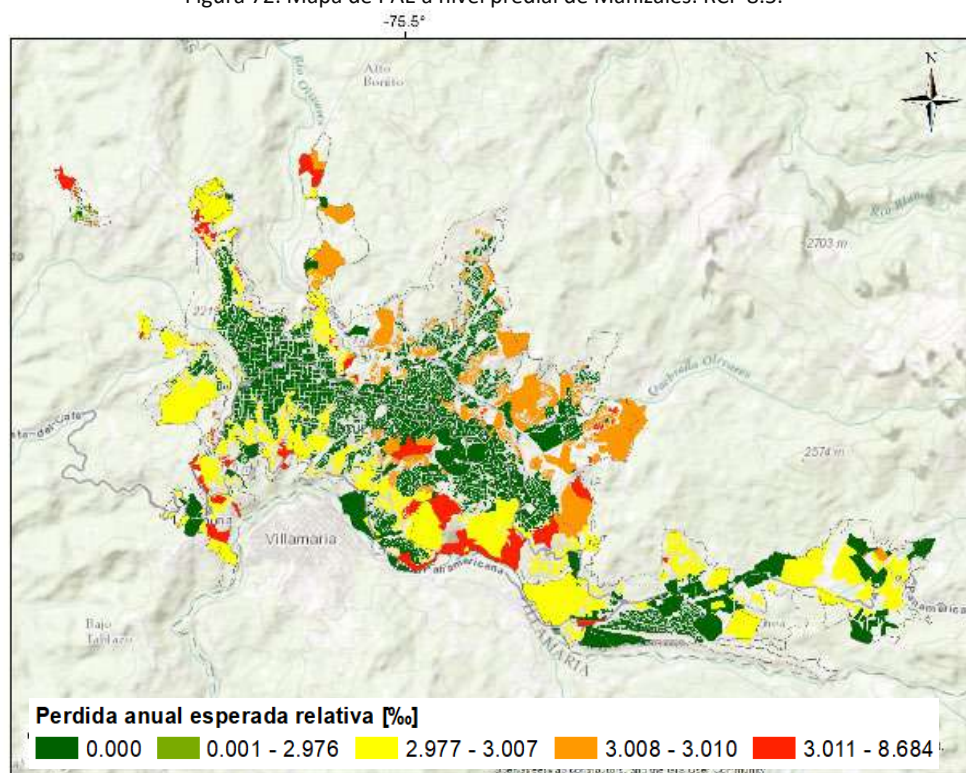


Figura 73. Mapa de PAE a nivel predial de Manizales. Clima IDEAM.

5 REFERENCIAS

Aristizábal, E., González, T., Montoya, J. D., Vélez, J. I., Martínez, H. and Guerra, A. (2011). Analysis of empirical rainfall thresholds for the prognosis of landslides in the Aburrá Valley, Colombia. *Revista EIA*, (15):95-111.

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, Bernal, G., Zuloaga, D., Escovar, M. A., Villegas, C., Gonzáles, D., Molina, J. F. (2016). Sistema de Modelación de Amenazas y Riesgos de Bogotá. DOI: 10.13140/RG.2.2.31828.60800.

Cardona, O.D., Bernal, G., Pabón, J.D., M. A., Marulanda, M. C., Carreño, M. L., González, D., Villegas, C., Marulanda, P., Grajales, S., Rincón, D., Molina, J.F. (2020). Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación para la Estrategia a Largo Plazo E2050 de Colombia – Fase 1. Expertise France. INGENIAR Risk Intelligence Ltda. Bogotá.

Chivatá Cárdenas, I. (2008). Using multinomial and imprecise probability for non-parametric modelling of rainfall in Manizales (Colombia). *Ingeniería e Investigación*, 28(2):22-29.

Correa, O., García, F., Bernal, G., Cardona O.D., Rodríguez, C. (2019). Early warning system for rainfall-triggered landslides based on real-time probabilistic hazard assessment. *Natural Hazards*. Vol 68.
<https://doi.org/10.1007/s11069-019-03815-w>

