

Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación para la Estrategia a Largo Plazo E2050 de Colombia – Fase 1

20MR1217

Informe con los resultados de la propuesta de
medidas de adaptación y su efecto en
reducción del riesgo

(Entregable 3)

Preparado para:



EXPERTISE
FRANCE

Mayo de 2021

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



Equipo de trabajo

Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico

Omar Darío Cardona A.

Jefe de equipo

Jose Daniel Pabón C.

Modelador de cambio climático

Martha Liliana Carreño T.

Modelador de exposición y vulnerabilidad

Gabriel Andrés Bernal G.

Especialista en riesgo de desastres

Mabel Cristina Marulanda F.

Modelador de amenazas naturales

Especialistas y Asesores – Grupos de Trabajo

Diana Marcela González

Especialista INGENIAR

Paula Marulanda

Especialista INGENIAR

David Rincón

Especialista INGENIAR

Claudia Villegas

Especialista INGENIAR

Sthefanía Grajales

Especialista INGENIAR

John Fredy Molina

Especialista INGENIAR

Citación:

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). Entregable 3: Informe con los resultados de la propuesta de medidas de adaptación y su efecto en reducción del riesgo – Fase 1. Preparado para Expertise France. INGENIAR Risk Intelligence Ltda. Bogotá.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	1
1 INTRODUCCIÓN	6
2 ANÁLISIS MACROECONÓMICO DEL RIESGO DERIVADO DEL CLIMA	8
2.1 EL GASTO PÚBLICO Y LAS PÉRDIDAS POR DESASTRES	8
2.2 LA REACTIVACIÓN ECONÓMICA POST-COVID Y LAS PÉRDIDAS POR DESASTRES	11
3 TOMA DE DECISIONES BAJO INCERTIDUMBRE PROFUNDA.....	13
3.1 INGENIERÍA DE CONTROL DEL RIESGO (RCE)	13
4 MEDIDAS DE ADAPTACIÓN EVALUADAS	18
4.1 RIESGO POR INUNDACIÓN	19
4.1.1 VIVIENDA PALAFÍTICA	20
4.1.2 REUBICACIÓN DE VIVIENDA.....	21
4.1.3 CONSTRUCCIÓN DE DEFENSAS	22
4.2 RIESGO POR HURACÁN	23
4.2.1 REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL (FUERZAS DE VIENTO)	24
4.2.2 EDIFICACIONES PALAFÍTICAS.....	26
4.3 RIESGO POR DESLIZAMIENTOS	27
4.4 RIESGO POR SEQUÍA.....	28
4.4.1 SEGURO AGRÍCOLA CATASTRÓFICO	30
4.4.2 INSTALACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO	30
4.4.3 MULCHING (MAÍZ)	30
4.4.4 TRANSICIÓN DEL SISTEMA TRADICIONAL AL TECNIFICADO (MAÍZ).....	30
4.4.5 TRANSICIÓN DEL SISTEMA MANUAL AL MECANIZADO (ARROZ)	30
4.5 RIESGO POR INCENDIOS FORESTALES.....	31
5 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN.....	35
5.1 INUNDACIÓN.....	35
5.1.1 ADAPTACIÓN A NIVEL DEPARTAMENTAL	37
5.2 HURACÁN.....	40
5.2.1 SAN ANDRÉS.....	40
5.2.2 PROVIDENCIA.....	42

5.3	DESLIZAMIENTOS	43
5.3.1	ADAPTACIÓN A NIVEL DEPARTAMENTAL	44
5.4	SEQUÍA	46
5.4.1	ADAPTACIÓN A NIVEL DEPARTAMENTAL	47
5.4.2	SEGURO AGRÍCOLA.....	52
5.5	INCENDIOS FORESTALES	57
6	<u>PROPUESTA DE METAS DE ADAPTACIÓN PARA COLOMBIA.....</u>	60
6.1	METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN	60
6.2	ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN SELECCIONADAS	60
6.3	METAS DE ADAPTACIÓN AL 2050	67
7	<u>CONCLUSIONES.....</u>	68
7.1	SOBRE LOS CAMBIOS QUE EL CLIMA FUTURO INDUCIRÁ AL PAISAJE DEL RIESGO	68
7.2	SOBRE LA ADAPTACIÓN, SU COSTO Y SU EFECTIVIDAD	70
8	<u>REFERENCIAS</u>	72

RESUMEN EJECUTIVO

Este producto se centra en la evaluación probabilista del riesgo considerando medidas de adaptación factibles para intervenir las causas del riesgo de desastres derivado de la variabilidad y el cambio climático en el país. La selección de la óptima combinación de las medidas de adaptación consideradas se realizó siguiendo un enfoque de toma robusta de decisiones utilizando la técnica de ingeniería de control del riesgo del grupo consultor. Se evaluaron múltiples posibles combinaciones de las medidas de reducción del riesgo, definiendo diferentes montos de inversión objetivo. De esta manera, el país cuenta con una colección de posibles estrategias, con niveles incrementales de adaptación, apelando al principio de gradualidad, que permiten definir diferentes niveles de reducción del riesgo y por lo tanto las metas de adaptación del país.

Para las combinaciones evaluadas, de amenazas y sectores, se plantearon medidas de adaptación específicas que buscan reducir las pérdidas por eventos de origen hidrometeorológico, incluidos los efectos negativos del cambio climático. Las medidas definidas se presentan a continuación:

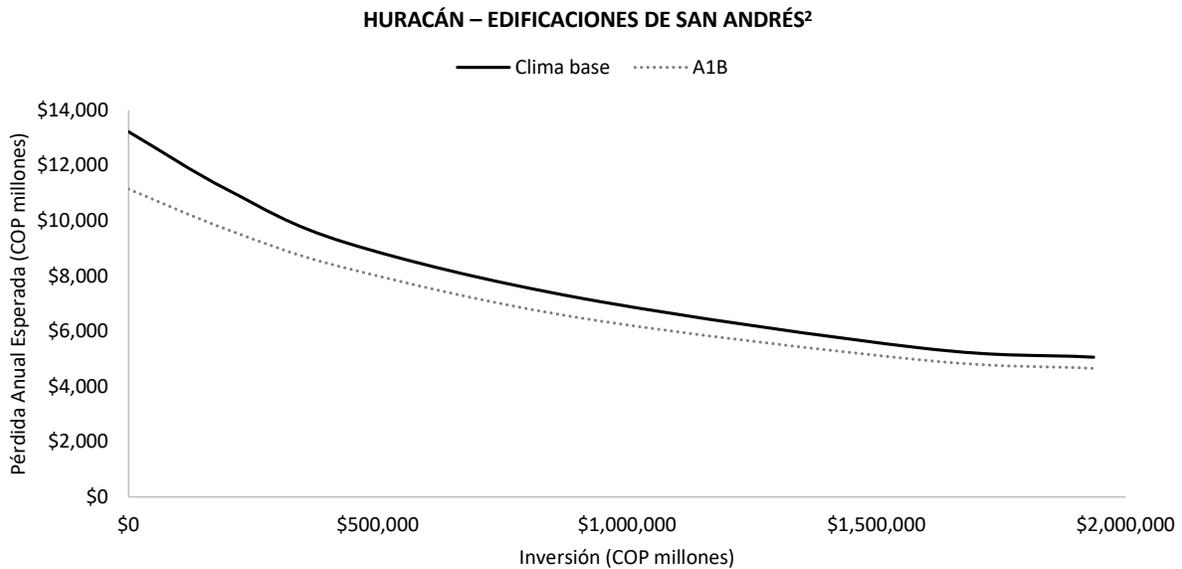
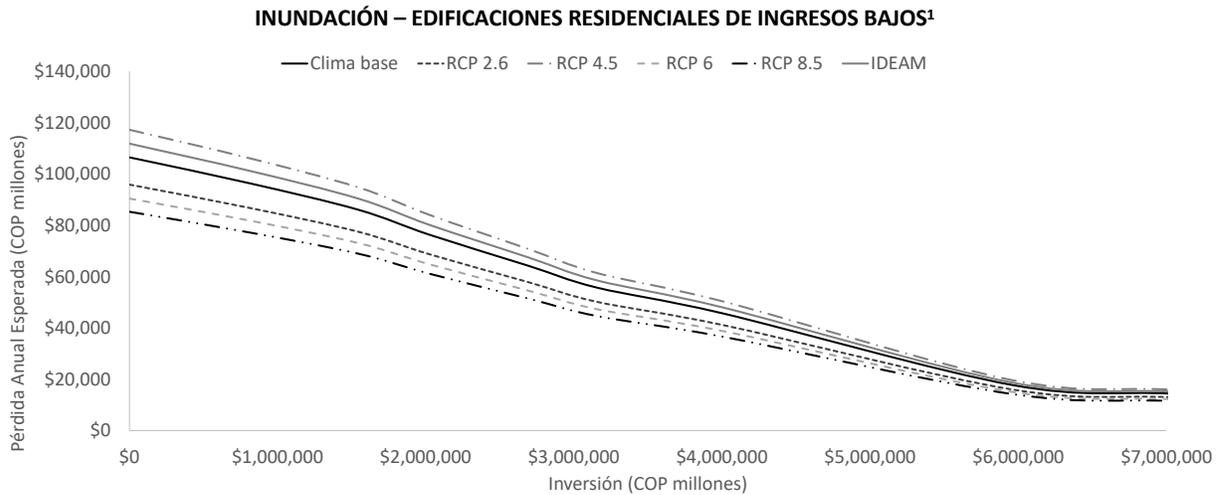
Amenaza	Portafolio	Sub portafolio seleccionado	Medidas evaluadas	Tipo de medida
Inundación	Construcciones e infraestructura	Edificaciones residenciales de ingresos bajos	Vivienda palafítica (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 m)	R
			Reubicación de vivienda	R
			Construcción de defensas frente a inundaciones (diques)	R
Huracán	Construcciones e infraestructura	Edificaciones en San Andrés y Providencia	Reforzamiento estructural ante fuerzas de viento	R
			Edificaciones palafíticas (plataforma) (1.0 m)	R
			Reconstrucción con transformación	M
Deslizamientos	Red vial principal		Reducción de la susceptibilidad por tramo	R
Sequía	Cultivos de Maíz y Arroz	Ambos	Seguro agrícola	P
		Maíz	Instalación de sistemas de riego	R
			Mulching	R
			Transición de sistema tradicional a tecnificado (donde aplique)	R
		Arroz	Instalación de sistemas de riego	R
Transición de sistema manual a mecanizado (donde aplique)	R			
Incendios forestales	Bosques (frontera agrícola)		Mejoramiento de la capacidad para combatir el fuego	M

(R = Reducción del riesgo; P = Protección financiera; M = Manejo de desastres)

Las medidas evaluadas, aplicadas en sub portafolios específicos de los sectores considerados, son valoradas siguiendo criterios generales de ingeniería y con base en la mejor información disponible. Estas medidas son luego aplicadas al modelo de riesgo, con el fin de cuantificar sus efectos en la reducción de pérdidas. La evaluación es aproximada, pero es la mejor posible, teniendo en cuenta las limitaciones asociadas con la resolución del modelo (mayores detalles se encuentran en el cuerpo del documento).

Dado que las medidas pueden aplicarse de forma combinada, se definen estrategias de adaptación que maximizan la reducción en pérdidas a un costo fijo. Los costos se incrementan para visualizar el efecto de una mayor inversión en la reducción del riesgo. Este proceso permite conocer cómo se reduce el riesgo con estrategias de adaptación de mayor o menor alcance. Se visualizan con claridad los límites de la adaptación, los cuales tienen dos características fundamentales: i) a partir de cierto punto las posibles variaciones en el clima futuro no representan un cambio sensible en el riesgo y ii) mayores inversiones no implican una mayor reducción en las pérdidas, pues en términos prácticos se ha alcanzado el límite de efectividad de las medidas consideradas.

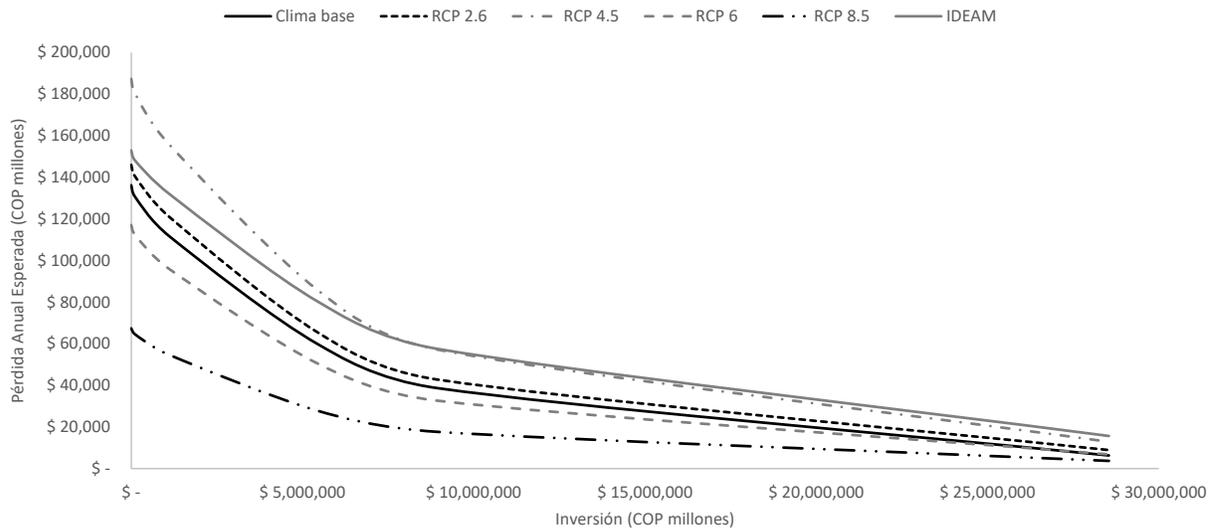
A continuación, se presentan las funciones de Pérdida Anual Esperada (PAE) versus Monto de Inversión, para los sub portafolios nacionales seleccionados. Estas funciones ilustran el alcance y efectividad de la adaptación, indicando cómo se reduce la PAE para diferentes montos de inversión. Esto permite contar con un instrumento orientador para la toma de decisiones.



¹ Las pérdidas mostradas corresponden únicamente a las edificaciones inundables del portafolio de viviendas de ingresos bajos, como se explica en el cuerpo del documento.

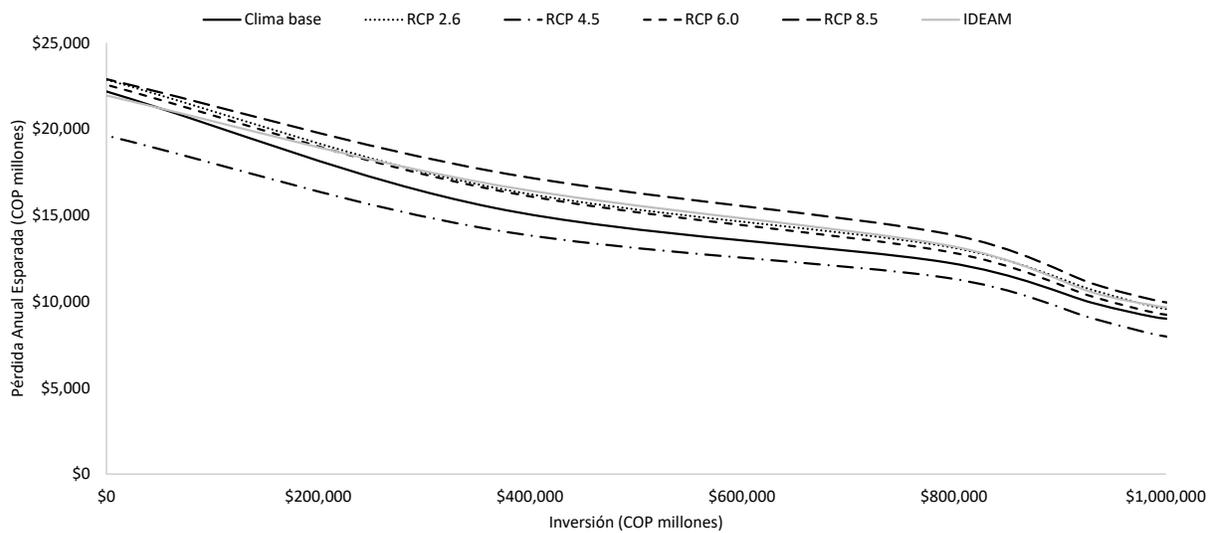
² Las pérdidas mostradas corresponden únicamente al portafolio de edificaciones de San Andrés y no al portafolio total evaluado en el producto 2 de esta consultoría, como se explica en el cuerpo del documento.

DESLIZAMIENTOS – RED VIAL PRINCIPAL



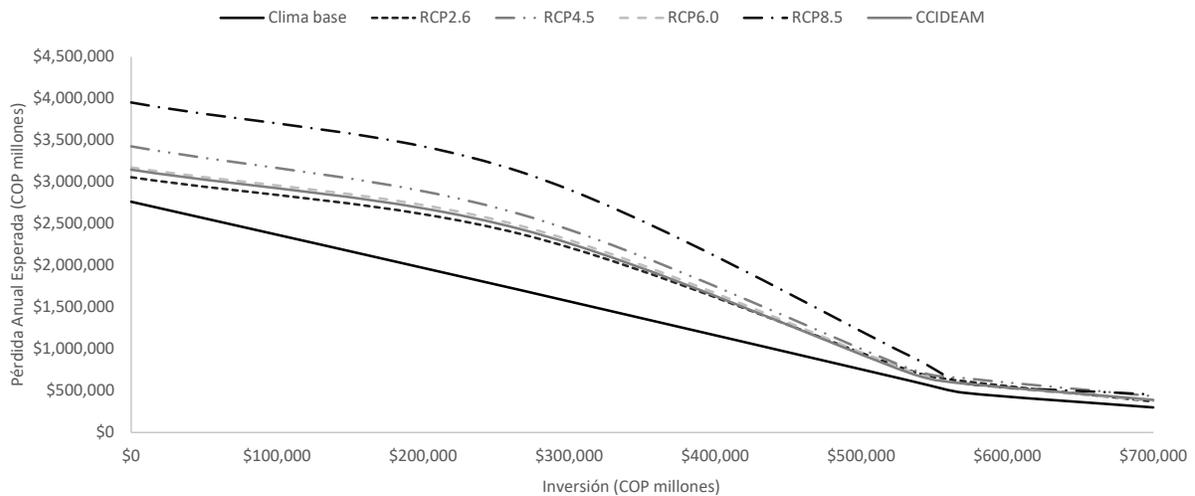
Límite de adaptación ≈ 28 billones COP

SEQUÍA – CULTIVOS DE MAÍZ Y ARROZ DE SECANO



Límite de adaptación ≈ 1 billón COP

INCENDIOS FORESTALES – FRONTERA AGRÍCOLA



Límite de adaptación ≈ 0.55 billones COP

A diferencia de la mitigación del cambio climático, que significa reducir las emisiones de gases de efecto invernadero como aporte del país a una problemática global, la adaptación se ocupa de lo que a nivel nacional y local se requiere para disminuir los efectos negativos del cambio climático. La adaptación tiene como objeto intervenir los factores de riesgo a nivel local (amenaza, exposición y vulnerabilidad). En la mayoría de los casos no es posible intervenir la amenaza (excepto en algunos casos: e.g. los deslizamientos), por lo cual es lógico pensar que la adaptación se debe dirigir a intervenir la exposición y la vulnerabilidad que contribuyen a que se configure el riesgo derivado del clima.

Existen diferentes maneras de intervenir los factores del riesgo de desastres, con diferentes grados de efectividad y factibilidad. En general, no es posible afirmar que una medida sea más apropiada que otra sin tener en cuenta el contexto, la factibilidad técnica y política, la capacidad de ejecución institucional, entre otros factores. Por esta razón, es necesario optimizar la combinación de medidas de adaptación que es factible poder implementar.

Ahora bien, no se pretende dar una solución exacta a un problema fuertemente incierto. Por el contrario, en este trabajo se apela al principio de gradualidad como principio orientador de la gestión del riesgo de desastres, de tal manera que no se considera factible que los procesos de adaptación que se deriven de la selección de una estrategia óptima puedan ser plasmados directamente en un plan de acción debido a la capacidad de ejecución financiera y técnica de las instituciones colombianas. Se han establecido entonces diferentes niveles de adaptación, con el fin de proveer al Gobierno de Colombia de una cuantificación de las implicaciones de una mayor o menor adaptación frente al riesgo climático, pero dejando abierta la posibilidad a intervenciones graduales que, en el largo plazo, conduzcan a un nivel de riesgo aceptable en el país.

Con el objetivo de aportar una propuesta de metas de adaptación, metodológicamente se plantea seleccionar, en cada caso, como estrategia de adaptación, **la que corresponde al 50% del beneficio máximo posible, teniendo en cuenta la efectividad propia de diferentes** medidas consideradas. Siguiendo dicho enfoque, a continuación, se presentan las metas de adaptación propuestas para las diferentes amenazas y sectores. Estas metas en valor presente tienen un costo aproximado e indicativo de **\$7,800,000 millones**

de pesos. Este valor, dependiendo del tiempo en el cual se espere llevar a cabo el plan de adaptación o reducción del riesgo, es necesario proyectarlo desde el punto de vista financiero. Adicionalmente, este valor supone la neutralización del riesgo en el caso de edificaciones e infraestructura; es decir, que no habría aumento de elementos expuestos vulnerables en las áreas de influencia de las amenazas relevantes.

INUNDACIÓN	<i>Vivienda adaptada a inundaciones</i>	Viviendas de ingreso bajo \$2,800,000 millones COP	15,000 viviendas protegidas
			3,500 viviendas reubicadas
			190,000 viviendas palafíticas
HURACÁN	<i>Construcción resistente a huracanes</i>	Edificaciones de San Andrés \$700,000 millones COP	1,300 construcciones palafíticas
			300 construcciones reforzadas
	<i>Reconstrucción con transformación</i>	Edificaciones de Providencia	900 construcciones resistentes a huracanes
			500 construcciones palafíticas
DESLIZAMIENTOS	<i>Infraestructura resiliente al clima</i>	Red vial principal \$3,000,000 millones COP	7 Km en riesgo Muy Alto
			8 Km en riesgo Alto
			125 Km en riesgo Medio Alto
			260 Km en riesgo Medio Bajo
SEQUÍA	<i>Agricultura adaptada</i>	Maíz (blanco y amarillo; tradicional y tecnificado) \$740,000 millones COP	24,000 ha con mulching
			36,000 ha con riego
			74,000 ha con sistema tecnificado
			116,000 ha sist. tec. + mulching
		Arroz de secano (manual y mecanizado) \$60,000 millones COP	32,000 ha con sistema mecanizado
			7,000 ha con riego
			1,000 ha sist. mec. + riesgo
			Seguro agrícola
INCENDIOS FORESTALES	<i>Protección de bosques y ecosistemas</i>	Bosques y frontera agrícola \$500,000 millones COP	4 helicópteros dedicados
			1,000 horas de vuelo / año

Estos resultados sirven de insumo técnico para impulsar procesos de toma de decisiones, que deben además considerar otros aspectos no necesariamente asociados con el riesgo de desastres, relacionados con el tipo de acuerdos y consensos entre los diferentes actores, la capacidad institucional de ejecución y la factibilidad de contar con los recursos necesarios para llevar a cabo el plan de acción respectivo que, en el mediano o largo plazo, logre los objetivos de reducción del riesgo sugeridos. Dicho plan de adaptación, además, tendría que ser parte del Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres del país.

1 INTRODUCCIÓN

La Gestión de Cambio Climático es una prioridad en Colombia, liderada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) a través de la Dirección de Cambio Climático y Gestión del Riesgo. Dentro del marco normativo que rige la Gestión de Cambio Climático, el Gobierno colombiano cuenta con el Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA), la Política Nacional de 2016, la Ley 1931 de 2018, la Ley 1844 de 2017 de Aprobación del Acuerdo de París y el Plan Nacional de Adaptación, entre otros, que buscan guiar las políticas e iniciativas del país. A corto plazo, el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 define la agenda para articular esfuerzos intersectoriales. A mediano plazo, la Contribución Nacional NDC Enfoque 2030, en proceso de actualización, establece el compromiso del país en cuanto a reducir emisiones nacionales y adaptarse a las nuevas condiciones. A largo plazo, la Estrategia 2050 tiene como objetivo lograr una economía carbono-neutra y resiliente al clima. Los principios que rigen la política nacional incluyen la integralidad en los componentes de mitigación, adaptación y riesgo climático, articulando las metas para 2022, 2030 y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas. Complementando la Gestión de Cambio Climático, el Sistema Nacional para la Gestión de Riesgos de la Ley 1523 de 2012 creó instrumentos nacionales y territoriales para fortalecer la gestión del riesgo de desastres.

La Estrategia 2050 de Colombia está comprometida con fomentar el sector agropecuario, generar sistemas de ciudades sostenibles e integradas a sus regiones, contar con infraestructura y sistemas de movilidad eficientes, gestionar la biodiversidad y el recurso hídrico de forma integral, teniendo en general una menor incidencia o severidad de los impactos por cambio climático. En resumen, la Estrategia busca la gestión del riesgo por cambio climático al que los territorios y los sectores están expuestos. Ahora bien, el primer paso es conocer el riesgo, para cuantificar los potenciales impactos del cambio climático específicos por sector y particulares según las características del territorio. Y, el segundo paso, siguiendo el marco conceptual más reciente del IPCC (Cardona, 2012), es evaluar la efectividad de las medidas de adaptación o de gestión del riesgo que permitan reducir el riesgo.

En este documento se presenta el resultado de la evaluación probabilista del riesgo derivado del clima incorporando las medidas de adaptación seleccionadas. Primero se aborda el problema desde la perspectiva macroeconómica, con el fin de ilustrar la dimensión real del problema de riesgo dentro del balance económico de la nación. Bajo la idea que el riesgo es soberano y como tal puede ser interpretado como un pasivo contingente, este análisis permite visualizar el tamaño del pasivo por desastres dentro del gasto público consignado en el presupuesto general del país, así como compararlo con las inversiones proyectadas por el Gobierno Nacional para la reactivación económica post-COVID.

En seguida se presenta el marco conceptual metodológico aplicado en este trabajo para la selección de las medidas óptimas de adaptación, dentro de un enfoque de toma robusta de decisiones. El problema de riesgo de desastres con cambio climático y la manera como las posibles intervenciones son más o menos efectivas para reducirlo, es abordado mediante ingeniería de control del riesgo, en donde es posible operar con la profunda incertidumbre inherente al problema, y buscar estrategias de adaptación que sean óptimas ante el total desconocimiento de las condiciones reales del riesgo y clima futuros.

Se definen medidas de adaptación a ser evaluadas, seleccionadas a partir de la experiencia del consultor, con el objetivo de reducir la exposición y vulnerabilidad física de los portafolios evaluados. La manera

como dichas medidas se combinan en estrategias de adaptación es también evaluada, derivando en una colección de posibles estrategias que, apelando al principio de gradualidad, permitan al Gobierno de Colombia decidir sobre qué nivel de adaptación es aceptable, o cuanta adaptación es suficiente, en función de la urgencia de las necesidades, los recursos disponibles y la factibilidad política dentro de la agenda de desarrollo del país.

El trabajo desarrollado en esta consultoría tiene como alcance la preselección de un primer conjunto de posibles medidas de adaptación, evaluadas de forma aproximada usando el modelo de riesgo y cambio climático desarrollado a nivel nacional (Fase I). Estas estrategias preseleccionadas deben ser refinadas y reevaluadas con modelos de mayor resolución, siguiendo el mismo enfoque metodológico desarrollado en esta consultoría, que permitan una depuración de lo acá presentado en términos de la efectividad y costos de cada medida considerada (Fase II).

Este informe corresponde al Entregable 3 de esta consultoría.

.

2 ANÁLISIS MACROECONÓMICO DEL RIESGO DERIVADO DEL CLIMA

El riesgo de desastres puede entenderse, desde el punto de vista macroeconómico, como un pasivo contingente que se vuelve un pasivo cierto en el momento en que el desastre se presenta. Esto significa que, tarde o temprano, el costo de los desastres debe entrar en el presupuesto de la nación de forma cierta, es decir, que necesariamente se convierte en una deuda que debe ser cubierta por el Estado y con los recursos disponibles. Por esta razón se afirma que el “riesgo es soberano”, pues inevitablemente dicho pasivo se transfiere por diferentes medios (usualmente impuestos) a todos los ciudadanos; es decir, que entre todos los ciudadanos se pagan los desastres.

La lógica de la gestión del riesgo de desastres, desde una óptica macroeconómica, significa tener en cuenta el costo de los desastres en la sostenibilidad fiscal. Para esto es necesario cuantificar los montos de pérdida mediante modelos probabilistas de evaluación del riesgo. Estos valores, que inevitablemente habrá que cubrir tarde o temprano, deben enfrentarse con las inversiones necesarias para la reducción del riesgo, lo cual se traduce necesariamente en menores pérdidas en el futuro. Esto permite que se realicen evaluaciones de beneficio-costó económico pero también identificar otros beneficios intangibles asociados a elevar la seguridad, la resiliencia y en general la calidad de vida de los ciudadanos. Esto se le conoce como el enfoque *ex ante*; es decir, las actividades y medidas para gestionar el riesgo en forma anticipada.

2.1 El gasto público y las pérdidas por desastres

Una buena manera de dimensionar las pérdidas por desastres y sus implicaciones macroeconómicas, es compararlas con los diversos rubros del gasto público de la nación. El presupuesto nacional aprobado para 2021 se estima que corresponde a \$314 billones de pesos, en los cuales se encuentran los gastos de funcionamiento e inversión del Gobierno Nacional en los diferentes sectores de desarrollo. La Figura 2-1 muestra una ilustración de cómo está distribuido el presupuesto nacional sectorialmente.

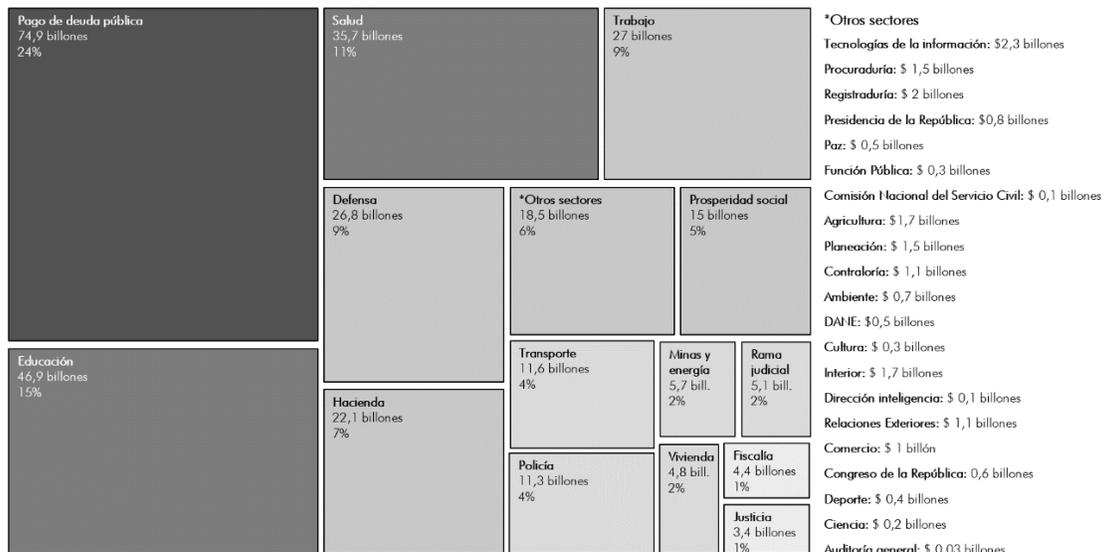


Figura 2-1. Desagregación del presupuesto nacional de Colombia 2021 (Reproducido de: Observatorio Fiscal Universidad Javeriana - <https://www.ofiscal.org/gasto>)

El presupuesto general de la nación determina la manera como el Gobierno Nacional emplea los recursos públicos, asignándoles un destino específico. Las inversiones que se prevean eventualmente en reducción del riesgo deben establecerse sectorialmente y por esta razón no existe un rubro independiente de gestión del riesgo o adaptación al cambio climático en el presupuesto nacional. Esta transversalidad permite a cada sector determinar desde su propio punto de vista el problema y establecer las acciones en el corto y largo plazo que deben ser ejecutadas con el fin de reducir el riesgo climático en el futuro. No obstante, la inversión en reducción del riesgo de los diversos sectores ha sido históricamente muy marginal y casi despreciable en comparación con el gasto en otros aspectos. Si a esto se le suma que los montos de pérdida obtenidos mediante la evaluación del riesgo (ver Producto 2 de esta consultoría) son de una magnitud importante si se les compara con el gasto en los sectores evaluados, se puede entender de manera más clara la dimensión real del problema para el país. La comparación del gasto público con las pérdidas potenciales que se presentan a continuación, se basa en los siguientes criterios:

- El riesgo de desastres se calcula de manera sectorial, por lo cual tiene sentido comparar con el gasto público por sectores.
- Dada la naturaleza anual del gasto público entendido como un flujo económico, se compara esta cantidad con la Pérdida Anual Esperada (PAE), la cual es la métrica más robusta del riesgo de desastres, relativamente insensible a la incertidumbre y expresada también en forma anual.

La PAE representa el promedio multianual de las pérdidas por desastres, calculado por medio de la simulación de miles de posibles eventos de amenazas hidrometeorológicas determinados con base en las condiciones climáticas resultantes de considerar múltiples trayectorias mundiales de emisiones de gases de efecto invernadero al 2050. La PAE puede interpretarse como el valor anual que debería pagarse si fuera posible sufragar anualmente los costos directos o de primer orden de los desastres futuros.

Como parte de la cuantificación del riesgo de desastres incorporando el cambio climático en Colombia (ver Producto 2 de esta consultoría), se calculó la PAE para las siguientes amenazas y portafolios de exposición: i) inundación y huracán en construcciones (vivienda, comercio, industria, gobierno, educación y salud) e infraestructura (transporte, agua, energía, hidrocarburos y comunicaciones); ii) deslizamientos en la red vial principal; iii) sequía en los portafolios nacionales de maíz (blanco y amarillo, tradicional y tecnificado) y arroz de secano (manual y mecanizado); y iv) servicios ecosistémicos de los bosques naturales del país. Estas amenazas y portafolios de exposición, si bien no son exhaustivos, permiten ilustrar los niveles de riesgo que enfrenta el país como consecuencia de procesos de desarrollo que han conducido históricamente a la construcción de la vulnerabilidad existente y que pueden ser exacerbados por el cambio climático, al modificarse los patrones de ocurrencia de los eventos que caracterizan las amenazas hidrometeorológicas.

Como parte del Producto 2 de esta consultoría, en el cual se presentan los resultados de la evaluación del riesgo de desastres para las amenazas y portafolios indicados anteriormente, se obtuvieron las PAE presentadas en la Tabla 2-1. El riesgo se calculó considerando un clima actual no modificado (indicado como *Clima base*), sobre el cual se incorporó el cambio climático considerando cinco climas futuros posibles, con base en las proyecciones climáticas definidas en el estudio. Se seleccionó el modelo de circulación global HadGEM2-AO (Collins et al., 2008), con el cual se proyectó el clima futuro al 2050 en el territorio nacional, usando las cuatro trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero indicadas en el Assessment Report 5 del IPCC (IPCC, 2014). Las trayectorias de emisiones se conocen como

Representative Concentration Pathways (RCP), y en su nomenclatura indican el valor proyectado de radiatividad atmosférica esperada al 2100, medida en W/m². De esta manera, se incorporaron cuatro futuros climáticos directamente asociados a las emisiones de gases de efecto invernadero en el futuro: *RCP2.6*, *RCP4.5*, *RCP6.0* y *RCP8.5*. Finalmente, se incorporaron las proyecciones dadas por el IDEAM en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (Ruíz-Murcia et al., 2015), obtenidas mediante un ensamble de modelos de circulación global, y que entrega valores de cambio en variables meteorológicas para diferentes periodos en el futuro, a nivel departamental. Este último se indica en la Tabla 2-1 como *CCIDEAM*.

Tabla 2-1. PAE calculadas por amenaza y sector³ (cifras en millones de pesos)

<i>Amenaza</i>	<i>Inundación</i>	<i>Huracán⁴</i>	<i>Deslizamientos</i>	<i>Sequía</i>	<i>Incendios</i>	<i>PAE total⁵</i>
<i>Sector</i>	<i>Construcciones + Infraestructura</i>	<i>Construcciones + Infraestructura</i>	<i>Infraestructura (vías principales)</i>	<i>Producción Maíz - Arroz</i>	<i>Bosque - frontera agrícola</i>	
Valor del portafolio	\$2,365,319,220	\$2,365,319,220	\$138,923,291	\$3,564,798	\$3,065,960,374	
Clima base	\$356,740	\$5,375	\$136,274	\$22,177	\$2,764,957	\$3,285,523
	0.15‰	0.002‰	0.98‰	6.22‰	0.90‰	
RCP2.6	\$321,098		\$146,018	\$22,864	\$3,057,112	\$3,552,821
	0.14‰		1.05‰	6.41‰	0.99‰	
RCP4.5	\$392,809	\$5,729	\$187,365	\$19,619	\$3,428,349	\$4,033,871
	0.17‰	0.002‰	1.35‰	5.50‰	1.12‰	
RCP6.0	\$302,902		\$117,135	\$22,572	\$3,174,211	\$3,622,549
	0.13‰		0.84‰	6.33‰	1.04‰	
RCP8.5	\$285,777		\$67,469	\$22,889	\$3,953,161	\$4,335,025
	0.12‰		0.49‰	6.42‰	1.29‰	
CC IDEAM	\$374,614		\$153,088	\$21,949	\$3,147,874	\$3,703,254
	0.16‰		1.10‰	6.16‰	1.03‰	

En general, la PAE total del país con cambio climático y para la totalidad de portafolios, oscila entre 3.55 y 4.33 billones de pesos, dependiendo de los diferentes escenarios de trayectorias de emisiones considerados. Si se aísla el efecto del cambio climático en los valores de PAE obtenidos, se observa que, con el clima actual (es decir, no alterado por cambio climático), la PAE es de 3.28 billones de pesos, lo que significa que el país hoy en día presenta un nivel de riesgo ya configurado no asociado al cambio climático, que no es despreciable y cuya reducción representa un reto de grandes proporciones. Ahora bien, es

³ Los valores relativos presentados en esta tabla están calculados como el valor monetario absoluto de la PAE dividido por el valor de portafolio. Se expresan al millar con el símbolo ‰.

⁴ La amenaza por huracán se calculó únicamente incorporando el escenario de emisiones A1B definido en el Assessment Report 4 del IPCC (IPCC, 2007). Este escenario de emisiones es equivalente al RCP 4.5.

⁵ La totalización de las PAE se presenta en este informe con el fin de obtener un indicador total de riesgo. No obstante, se advierte al lector que la naturaleza de las pérdidas modeladas puede implicar que no sean sumables en el sentido estricto.

evidente el incremento en el riesgo que se puede atribuir al cambio climático, incrementando la PAE entre un 8% y un 39%, dependiendo del escenario de emisiones que se considere.

Si se considera el escenario de emisiones RCP 4.5, el cual representa un nivel intermedio de aumento en la temperatura promedio del aire a nivel mundial, la PAE para Colombia se estima en 4.03 billones de pesos. Desde el punto de vista macroeconómico, teniendo en cuenta el presupuesto general de la Nación para 2021 en vivienda, agricultura, ambiente y transporte, estimado en 18.8 billones de pesos, este nivel de pérdida corresponde al 21.46%. Si se incluyen adicionalmente los gastos proyectados en salud y educación, dicho nivel de pérdida o PAE corresponde a 3.98% del gasto total en estos seis rubros de 101.4 billones.

Adicionalmente, es posible afirmar que:

- El valor de PAE por inundación y huracán equivale al 7.54% frente al gasto de vivienda proyectado en el presupuesto general para 2021 (4.8 billones de pesos).
- El valor de PAE para la red vial principal por deslizamientos equivale al 1.18% frente al gasto proyectado en transporte (11.6 billones). Es importante resaltar que no tiene en cuenta las pérdidas por deslizamientos a nivel urbano u otras infraestructuras.
- La PAE por sequía en los cultivos considerados (maíz y arroz) equivale al 1.30% del gasto en agricultura y desarrollo rural (1.7 billones). Nótese que, si bien los cultivos considerados son componentes fundamentales del portafolio agrícola del país, la evaluación de riesgo desarrollada en esta consultoría no es exhaustiva, por lo cual es de esperarse que la PAE del portafolio agrícola total sea superior al valor aquí indicado.
- La PAE por incendios forestales es de 3.4 billones de pesos, que si se compara con el gasto en medio ambiente (0.7 billones) resulta ser un valor muy superior (486%). En este caso se optó por comparar adicionalmente con respecto a la formación bruta de capital (236.4 billones) del último periodo reportado, la cual es una variable macroeconómica que expresa las inversiones públicas y privadas en activos. El valor de PAE por incendios forestales equivale al 1.17% frente a la formación bruta de capital. Esta comparación muestra lo que cuestan las pérdidas en el medio ambiente contra lo que se acumula de activos construidos, ilustrando la tensión existente entre el avance de la infraestructura, construcciones y actividad agropecuaria, con las pérdidas en medio ambiente resultantes de ese proceso.

Si fuese posible sufragar las pérdidas por desastres en forma anticipada; es decir, pagar año a año la PAE con el objetivo de compensar, en el largo plazo, todas las pérdidas que se generarán por eventos de la naturaleza ante un clima futuro modificado, sería necesario incluir el monto de la PAE en el gasto público año a año, en los sectores respectivos. Esto ilustra la dimensión del problema, el cual, en un país como Colombia, con fuertes limitaciones presupuestales, y un alto servicio de la deuda, es un problema particularmente notable y crítico.

2.2 La reactivación económica post-COVID y las pérdidas por desastres

Como parte de la programación presupuestal y política fiscal del actual Gobierno de Colombia, se prevé una secuencia de inversiones necesarias para dinamizar la economía y lograr una reactivación que será fundamental para el país dado el impacto causado por la pandemia de la COVID 19. El plan de inversiones

proyectado se encuentra detallado en el Plan de Reactivación de la Economía, en el cual se definen los montos de inversión anuales hasta el año 2052, y que se presentan en la Figura 2-2.

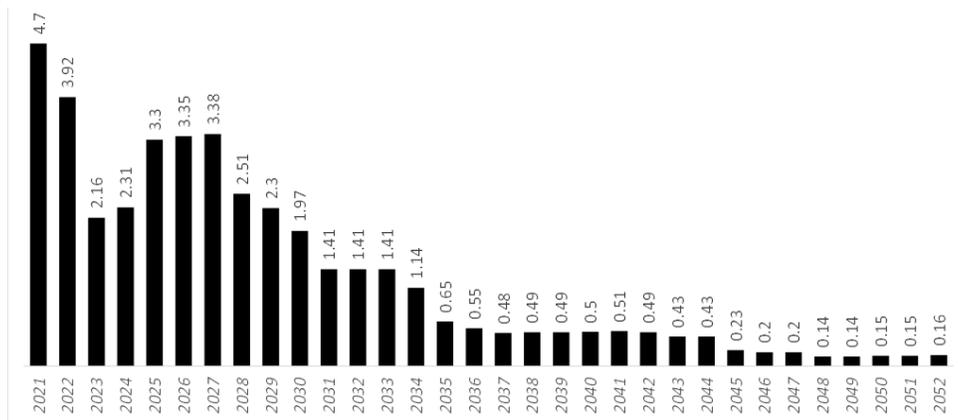


Figura 2-2. Inversiones anuales según el Plan de Reactivación de la Economía (cifras en billones de pesos) (Reproducido de: Ministerio de Hacienda y Crédito Público, 2021)

Se puede observar que los mayores montos anuales proyectados para 2021 y 2022 son 4.7 y 3.92 billones de pesos, respectivamente. Es decir, valores del mismo orden de magnitud que la pérdida anual promedio; i.e. la PAE. Esto implica que, si se decidiera implementar un plan de inversiones para la reducción del riesgo de desastres, equivalente a la pérdida anual, los montos anuales corresponderían aproximadamente a lo dimensionado hoy en día para los años 2021 y 2022; los dos valores anuales más altos requeridos para reactivar la economía tras el impacto de la pandemia.

Esto también ilustra la severidad del riesgo de desastres (sin incluir las pérdidas por otras importantes geoamenazas) y el impacto del cambio climático en el país, así como la altísima relevancia de lograr un modelo de desarrollo que permita reducir gradualmente la PAE mediante una efectiva gestión del riesgo y adaptación al cambio climático.

3 TOMA DE DECISIONES BAJO INCERTIDUMBRE PROFUNDA

Tanto el riesgo catastrófico asociado al cambio climático como la manera como las medidas de adaptación modifican sus impactos, son estados hipotéticos cuya cuantificación exacta es imposible. Esto implica que la modelación del riesgo derivado del clima requiere de una cuantificación rigurosa de la incertidumbre, de lo contrario, no se está hablando de riesgo de desastres. Del mismo modo, la incorporación de medidas de adaptación que intervienen las condiciones que conducen a la existencia de riesgo, debe seguir un enfoque que permita conocer todas las posibles variaciones de la forma en que puede darse la intervención. No solo se trata de un problema fuertemente no lineal, sino profundamente incierto. A esto se le conoce como *incertidumbre profunda*.

Hacer frente a la incertidumbre profunda requiere de enfoques novedosos que faciliten el proceso de toma de decisiones, llevándolo más allá de la visión clásica determinista (incompleta e insuficiente) en la que el problema y su solución pueden ser perfectamente determinados, a una visión centrada en la incertidumbre, basada en los planteamientos de la conocida como ciencia postnormal, en donde se reconoce el vasto dominio de posibilidades como puede desarrollarse el problema, y se busca una solución que sea efectiva en la mayoría de futuros inciertos.

Recientemente varios autores han propuesto enfoques para abordar problemas con incertidumbre profunda y orientar la toma de decisiones (ver, por ejemplo, la recopilación dada en Marcahu et al. 2019). Resalta el enfoque conocido como Toma Robusta de Decisiones (RDM) (Lempert, 2019), el cual sigue una metodología denominada XLRM, en donde X se refiere a la incertidumbre, L a las posibles acciones a formular, R al modelo del sistema y M son las métricas de éxito de las posibles acciones. De acuerdo con Lempert (2019), los pasos para lograr una toma robusta de decisiones son: 1) enmarcar el análisis por medio de la definición de un modelo (R) que describa suficientemente bien el problema; 2) simulación, considerando la incertidumbre (X) del efecto de las posibles acciones (L) en el sistema; 3) exploración de resultados y cuantificación de métricas de éxito (M); 4) comparación y análisis del éxito de las acciones en lograr el objetivo planteado y; 5) iteración y reevaluación. En resumen, se reconoce que no es posible lograr una toma de decisiones robusta sin considerar las múltiples ramificaciones que definen el dominio de las posibilidades futuras.

3.1 Ingeniería de Control del Riesgo (RCE)

Siguiendo los metaconceptos de la teoría de control, Bernal et al. (2021) plantean los lineamientos de la Ingeniería de Control de Riesgo (Risk Control Engineering – RCE), como metodología para la cuantificación de las posibles maneras como puede controlarse el riesgo de desastres a partir de diferentes tipos de intervención. La RCE es un marco metodológico diseñado específicamente para ayudar a los gobiernos, las instituciones y las partes interesadas del sector privado a orientar la toma de decisiones bajo incertidumbre profunda en el contexto de la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático. El proceso de la RCE se resume en la Figura 3-1. La RCE sigue lineamientos y procedimientos similares a los planteados por Lempert (2019) en la RDM, conduciendo a una toma de decisiones basada en el mejor resultado posible ante una vasta cantidad de futuros inciertos.

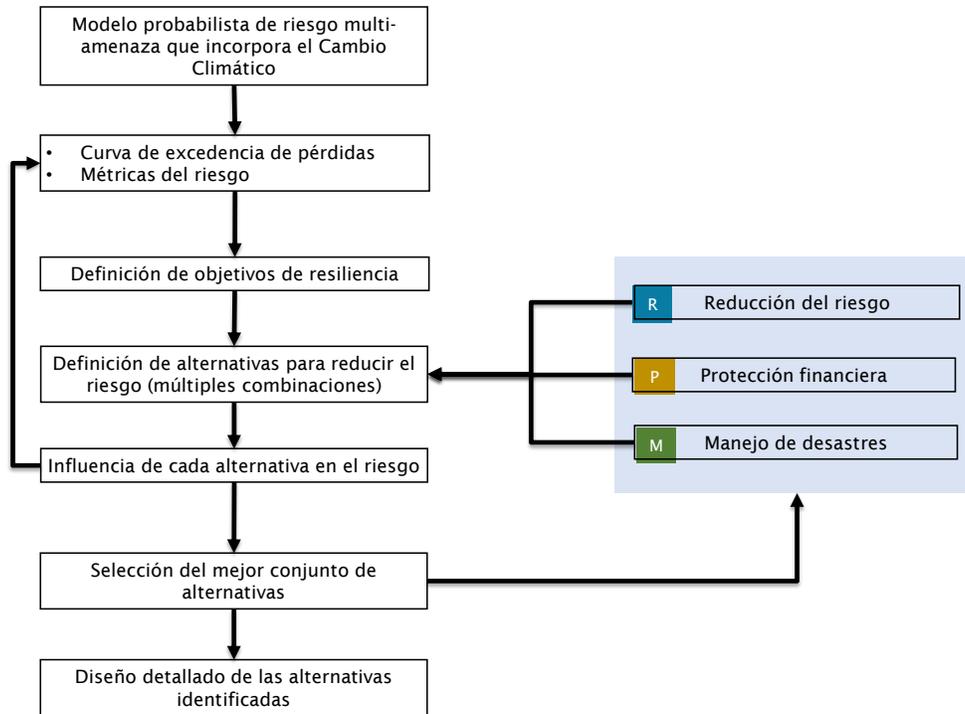


Figura 3-1. Proceso de Ingeniería de Control del Riesgo (RCE)

La RCE se basa en medir el efecto de las medidas de adaptación en el riesgo de desastres, y así encontrar estrategias de adaptación óptimas a un costo favorable. La métrica por excelencia del riesgo es la Curva de Excedencia de Pérdidas (CEP). Esta métrica no se encuentra explícitamente indicada en el producto 2 de esta consultoría, dado que su interpretación es más compleja que otras métricas (como la PAE o la PML). No obstante, todas las métricas del riesgo se basan en el cálculo de la CEP, tal y como se indica en el Anexo Técnico del Producto 1 de esta consultoría. La capacidad de una medida de adaptación de reducir el riesgo se mide, en rigor, en términos de su capacidad de reducir la CEP.

La CEP, entre muchas otras propiedades interesantes, se puede estratificar, permitiendo la definición de un conjunto de medidas o acciones de intervención encaminadas a reducir el riesgo (ver Figura 3-2). El concepto de estratificación del riesgo está asociado con la efectividad de las medidas de adaptación para reducir el riesgo en diferentes niveles. Por ejemplo, una defensa a inundaciones, como un dique, tiene un periodo de retorno de diseño; es decir, se diseña para contener inundaciones de hasta cierto límite, por lo cual existe siempre una posibilidad que dicho límite sea rebasado. Esto significa que cada medida de adaptación cubre o es efectiva en un “estrato” o región de la CEP, y no en todo el dominio de la pérdida.

Cada medida de adaptación afectará la CEP de forma diferente, por lo cual se requiere una colección o conjunto de medidas para llevar el riesgo a niveles aceptables. Dicho conjunto de medidas constituye una estrategia de adaptación al cambio climático. El paisaje del riesgo se modifica cuando se aplica una estrategia de adaptación. La mejor manera de definir si una estrategia es lo suficientemente buena para reducir el riesgo, es repetir la evaluación del riesgo incluyendo el efecto de todas las medidas que la componen. Si se define una gran cantidad de posibles variaciones en la estrategia de adaptación, en términos de las medidas que la componen y su efectividad para reducir la CEP, es posible identificar cuál de las estrategias estudiadas es más efectiva para reducir el riesgo.

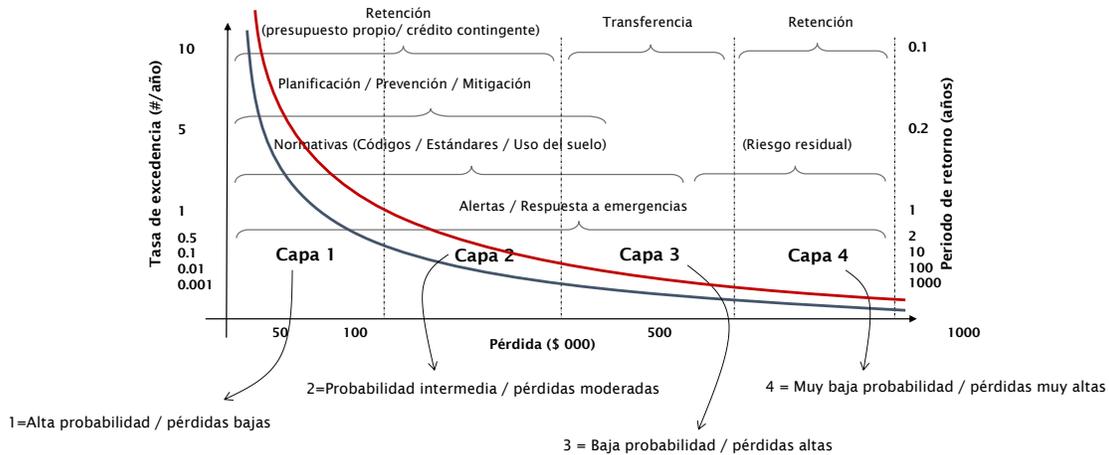


Figura 3-2. Ilustración de la estratificación de una CEP en un estado sin intervenir (curva roja) y el efecto en reducción del riesgo aplicando las acciones indicadas por estrato (curva azul).

La metodología RCE considera tres tipos de acciones o medidas de adaptación que pueden ser incorporadas en la modelación con el fin de medir su efectividad. Primero, acciones de *reducción del riesgo*, las cuales buscan disminuir la exposición y la vulnerabilidad, y en algunos casos especiales la amenaza. Estas son acciones de mitigación, prevención y planificación que concretamente corrigen la exposición o la vulnerabilidad creadas, o evitan la configuración de nueva exposición y vulnerabilidad, y en consecuencia reducen directamente la curva de excedencia de pérdidas.

Se consideran también medidas de *protección financiera*, las cuales buscan brindar los mecanismos necesarios para garantizar la liquidez y disponibilidad de recursos con los cuales puedan sufragarse los costos de los desastres. En estos mecanismos es usual transferir parte del riesgo a un tercero, que tiene la responsabilidad, a cambio de una compensación económica, de cubrir parte de las pérdidas con sus propios recursos. Si bien estas medidas no inciden directamente en la pérdida directa, si reducen la pérdida neta del responsable del riesgo.

Finalmente, las acciones de *manejo de desastres* permiten limitar los impactos totales una vez ha ocurrido el desastre. Los procesos de atención inmediata, así como la reconstrucción, recuperación y restitución de servicios esenciales, deben ser definidos en base al modelo de riesgo y tienen una incidencia importante en la reinstalación o no de las condiciones de exposición y vulnerabilidad preexistentes, de cara a eventos futuros.

Como se mencionó anteriormente, una estrategia de adaptación consiste en la combinación de múltiples medidas de adaptación. Puede definirse en términos de: i) las medidas que la componen; ii) la capacidad de reducción del riesgo de cada medida; y iii) el costo de implementación de cada medida. La incorporación de las medidas de adaptación en el modelo de riesgo se realiza modificando los aspectos que se espera sean modificados por la medida, por ejemplo:

- El reforzamiento estructural modifica la vulnerabilidad de las construcciones e infraestructura expuestas, reduciendo la potencial pérdida una vez ocurren los eventos de amenaza.

- Un proceso de reubicación cambia directamente la exposición, reduciendo el valor expuesto al evento. Los elementos son trasladados a otra ubicación, con exposición y vulnerabilidad diferentes a los originales.
- Un mecanismo de protección financiera reduce la pérdida para el responsable del riesgo, limitando las pérdidas netas como máximo a las porciones en retención.

La reducción del riesgo a un nivel aceptable puede lograrse por medio de una enorme cantidad de combinaciones de medidas de adaptación. La mejor combinación de medidas es usualmente muy difícil de establecer sin arbitrariedad. Por esta razón, en la RCE se establecen de forma estocástica múltiples posibles estrategias de adaptación con el fin de probar la efectividad de todas dentro del modelo de riesgo. Dado que la búsqueda aleatoria de la combinación óptima puede ser demasiado extensa, se emplea computación evolutiva con el fin de aproximarse a la estrategia o combinación de medidas que permitan reducir el riesgo a menor costo. A continuación, se resume el algoritmo genético de optimización implementado dentro de la RCE:

1. Se crean al azar un gran número de combinaciones de medidas de adaptación para poblar una primera generación de estrategias. Cada estrategia se considera un individuo. El genotipo de un individuo es el conjunto de medidas de adaptación que lo componen (ver Figura 3-3). Cada individuo tiene una capacidad diferente de reducir el riesgo. Aquel que reduzca el riesgo a un menor costo se considera el *Campeón* de la primera generación.

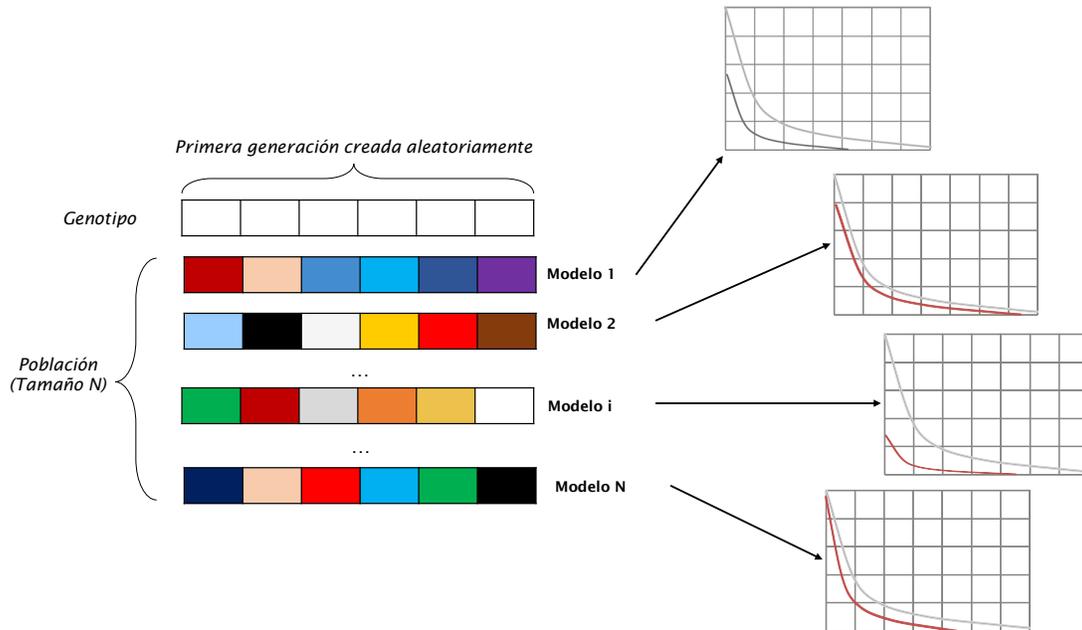


Figura 3-3. Ilustración de la creación de una primera generación de estrategias de adaptación. Los colores en los cuadros son para ilustrar las diferentes características dentro de cada medida.

2. El proceso evolutivo comienza de manera que se crean aleatoriamente nuevas combinaciones de alternativas como resultado del cruce y mutación de los individuos de la generación anterior. El proceso se repite por un cierto número de generaciones. El Campeón de la última generación tiene

la combinación óptima de medidas de adaptación. Esta combinación es un fuerte candidato para convertirse en la estrategia de adaptación a llevar a cabo.

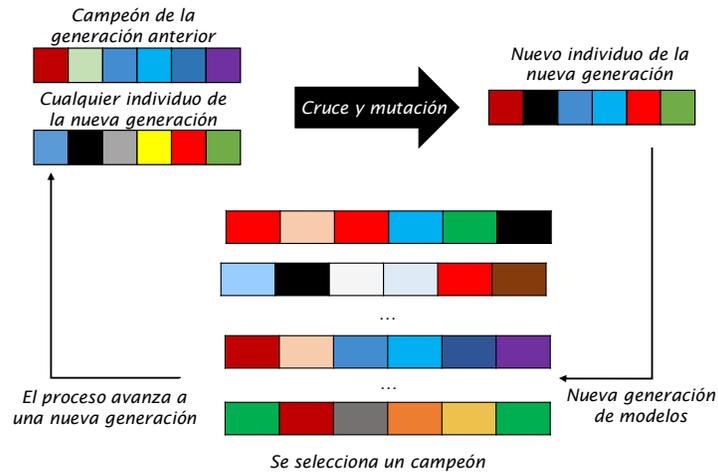


Figura 3-4. Ilustración del proceso evolutivo para la optimización de combinación de medidas de adaptación

Dado que se trata de un enfoque basado en optimización de búsqueda aleatoria, las estrategias de adaptación obtenidas del proceso pueden variar si se ejecuta varias veces. Es posible entonces definir un grupo de posibles estrategias de adaptación, que cumplen con los criterios de optimización u otros criterios restrictivos (como por ejemplo un determinado presupuesto máximo de inversión), con el fin de presentar un conjunto de posibles estrategias al tomador de decisiones. Es decir que, en un proceso de toma de decisiones robustas, la optimización es simplemente una herramienta de ayuda a la preselección de estrategias de adaptación dentro del vasto dominio de posibilidades.

4 MEDIDAS DE ADAPTACIÓN EVALUADAS

La adaptación puede definirse como el conjunto de acciones encaminadas a reducir los efectos adversos del cambio climático en las comunidades, sus medios de vida, el medio ambiente y el ambiente construido. Como resulta evidente de la evaluación de riesgo realizada para Colombia en este estudio (ver Producto 2 de esta consultoría), el riesgo de desastres, incluso bajo condiciones climáticas futuras desfavorables, depende en gran medida de las condiciones socioeconómicas del entorno en el cual ocurren los desastres, que se han ido configurando progresivamente mediante un proceso acumulativo que deriva inevitablemente en las actuales condiciones de exposición y vulnerabilidad. Es decir, el riesgo existente se ha conformado de manera totalmente independiente al calentamiento global y el cambio climático. Este último constituye un agravante que llegará a materializarse en el futuro una vez sean ciertas las modificaciones que las emisiones de gases de efecto invernadero causen al clima global.

Por lo tanto, y desde un punto de vista netamente práctico, es posible romper la tensión existente a nivel ontológico entre adaptación al cambio climático y gestión del riesgo de desastres, toda vez que las acciones resultantes de ambos buscan intervenir las causas que llevan a la existencia del riesgo y su efectividad puede ser medida en términos de la reducción del riesgo (Cardona, 2012). De esta manera es posible interpretar las métricas probabilistas del riesgo como indicadores intermedios en una cuantificación de mayor alcance, en la cual participan diferentes medidas de adaptación que impondrán condiciones para reducir en mayor o menor medida el riesgo en los portafolios evaluados. El nivel de reducción alcanzado se cuantifica en términos de una reducción en las métricas de riesgo.

Existen diferentes maneras de intervenir los factores que conducen a la existencia del riesgo de desastres, con diferentes grados de factibilidad y efectividad. En general no es posible afirmar que una medida sea más apropiada que otra sin incorporar el contexto, la factibilidad técnica y política, la capacidad de ejecución institucional, entre otros factores. En este trabajo, se propone una colección de medidas de adaptación para ser evaluadas, las cuales fueron incorporadas considerando la factibilidad de su implementación real en el futuro, así como la posibilidad de implementar de manera apropiada su efecto en la modelación del riesgo.

Para cada amenaza y sector, se selecciona un sub portafolio de exposición el cual se considera apropiado para ser intervenido mediante las medidas de adaptación propuestas. Dado el alcance de este proyecto, no fue posible incorporar la totalidad de los portafolios evaluados. Se simula la intervención siguiendo cada medida en el sub portafolio seleccionado, siguiendo el enfoque de la RCE, con el fin de encontrar la combinación óptima de medidas. La Tabla 4-1 muestra las medidas de adaptación a ser evaluadas para las diferentes amenazas y sub portafolios seleccionados. Se indica si la medida corresponde a reducción del riesgo, protección financiera o manejo de desastres.

Los costos de implementación de las diferentes medidas de adaptación, presentados en las secciones siguientes, son estimativos medios de los valores reales que se usan para establecer un orden de magnitud de la inversión requerida en adaptación. Por lo tanto, no deben ser tomados como valores reales en un proyecto específico de adaptación, sino como costos indicativos a nivel de prefactibilidad.

Tabla 4-1. Medidas de adaptación a ser evaluadas.
(R = Reducción del riesgo; P = Protección financiera; M = Manejo de desastres)

Amenaza	Portafolio	Sub portafolio seleccionado	Medidas evaluadas	Tipo de medida
Inundación	Construcciones e infraestructura	Edificaciones residenciales de ingresos bajos	Vivienda palafítica	R
			Reubicación de vivienda	R
			Construcción de defensas frente a inundaciones (diques)	R
Huracán	Construcciones e infraestructura	Edificaciones en San Andrés y Providencia	Reforzamiento estructural ante fuerzas de viento	R
			Edificaciones palafíticas (plataforma)	R
			Reconstrucción con transformación	M
Deslizamientos	Red vial principal		Reducción de la susceptibilidad por tramo	R
Sequía	Cultivos de Maíz y Arroz	Ambos	Seguro agrícola	P
		Maíz	Instalación de sistemas de riego	R
			Mulching	R
			Transición de sistema tradicional a tecnificado (donde aplique)	R
		Arroz	Instalación de sistemas de riego	R
			Transición de sistema manual a mecanizado (donde aplique)	R
Incendios forestales	Bosques (frontera agrícola)		Mejoramiento de la capacidad para combatir el fuego	M

Apelando al principio de gradualidad, como principio orientador de la gestión del riesgo de desastres, no se considera factible que los procesos de adaptación que se deriven de la selección de una estrategia óptima puedan ser plasmados directamente en un plan de acción debido a la capacidad de ejecución financiera y técnica de las instituciones colombianas. En este sentido, se han establecido diferentes niveles de adaptación, con el fin de proveer al Gobierno de Colombia de una cuantificación de las implicaciones de una mayor o menor adaptación sobre el riesgo derivado del clima, pero dejando abierta la posibilidad a intervenciones graduales que, en el largo plazo, lleven al país a un nivel de riesgo aceptable. Por esta razón, en el proceso de encontrar un óptimo en la combinación de medidas de adaptación, se incluye siempre la posibilidad de no implementar ninguna medida.

4.1 Riesgo por inundación

Las inundaciones afectan de manera más importante al portafolio residencial, especialmente al de nivel socioeconómico bajo, como se evidenció en los resultados obtenidos en el Producto 2 de esta consultoría. Por esta razón se seleccionó como sub portafolio de trabajo el residencial de ingresos bajos, sobre el cual se evalúan tres medidas de adaptación: vivienda palafítica, reubicación de vivienda y construcción de estructuras de defensa (diques). En este caso, todas las medidas consideradas son de reducción del riesgo. La Tabla 4-2 describe cada medida de adaptación, los parámetros que la caracterizan y el costo asumido de implementación. Cada medida de adaptación considerada afectará de diferente forma el resultado de riesgo. Esto depende de la manera como se incorpora el efecto de la medida en el modelo. En las siguientes secciones se detallan los supuestos de modelación para incorporar estas medidas en el modelo probabilista de riesgo.

Tabla 4-2. Medidas de adaptación a ser evaluadas para inundación.

Medida de adaptación	Descripción	Parámetros	Costo
Vivienda palafítica	Viviendas construidas sobre una estructura de palafitos, de tal manera que el nivel de piso de la vivienda se encuentra a una cierta altura sobre el nivel del terreno natural.	Alturas de palafito de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 metros. La altura adecuada se establece en función de la ubicación de cada vivienda en el país.	\$ 43 COP millones / vivienda El costo se estableció en 47 SMMLV (Cardona, 2016), que corresponde aproximadamente al costo de una vivienda palafítica nueva de interés prioritario.
Reubicación de vivienda	Viviendas en zona de alto riesgo por inundación, que son reubicadas en un lote cercano, con una baja o nula amenaza de inundación.	Se asume que las viviendas son trasladadas a una ubicación con baja o nula amenaza por inundación	\$ 90 COP millones / vivienda El costo se estableció en aproximadamente el doble de una vivienda palafítica nueva de interés prioritario, con el fin de considerar otros costos asociados a la reubicación como lote, servicios, urbanismo, etc. (DNP, MinAgricultura, Banco Agrario, 2017)
Construcción de defensas frente a inundaciones	Diques que se construyen en zonas donde se concentran gran cantidad de elementos expuestos en alto riesgo de inundación.	Se asume un periodo de retorno de diseño de 500 años	\$ 30,000 COP millones / dique El costo se estableció a partir de diferentes estimados de costos de diques en cabeceras municipales de zonas inundables (Cardona, 2016)

4.1.1 Vivienda palafítica

El uso de vivienda palafítica es una de las medidas de adaptación más usadas a nivel mundial en regiones propensas a inundaciones. Se habilita el terreno para la construcción permitiendo la ocurrencia de inundaciones sin afectación a sus habitantes y sus propiedades. Desde el punto de la modelación, una vivienda a nivel del terreno pasa a ser palafítica mediante la asignación de una función de vulnerabilidad diferente. Es posible que ambas viviendas sufran daños similares una vez el nivel de agua alcance el nivel de piso, pero en la vivienda palafítica ese nivel de piso es mucho más difícil de alcanzar. La Figura 4-1 ilustra esta diferencia entre una vivienda a nivel del terreno y una palafítica.

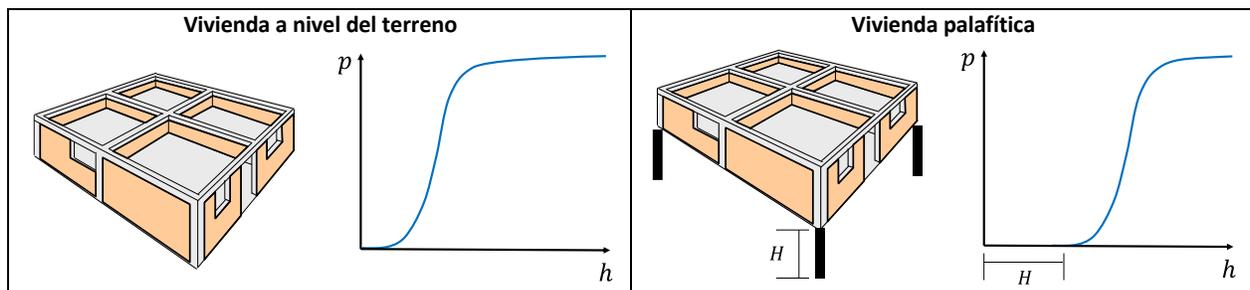


Figura 4-1. Ilustración de la diferencia en la modelación de la vulnerabilidad entre una vivienda a nivel del terreno y una palafítica con altura de palafitos H .

Como se ilustra en la Figura 4-1, una vivienda de determinado sistema constructivo, que sea palafítica, tendrá esencialmente la misma función de vulnerabilidad de una vivienda del mismo sistema a nivel del terreno, pero desplazada una distancia H hacia la derecha, en donde H corresponde a la altura de los palafitos. Esta medida protege a la edificación de las inundaciones hasta máximo una altura H , de tal manera que si la inundación supera este valor (i.e. $h \geq H$) empezarán a ocurrir daños y pérdidas en la vivienda. La Figura 4-2 muestra la colección de funciones de vulnerabilidad para vivienda palafítica que se

emplearon en la modelación. Se consideraron diferentes alturas de palafitos: 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 metros sobre el nivel del terreno.

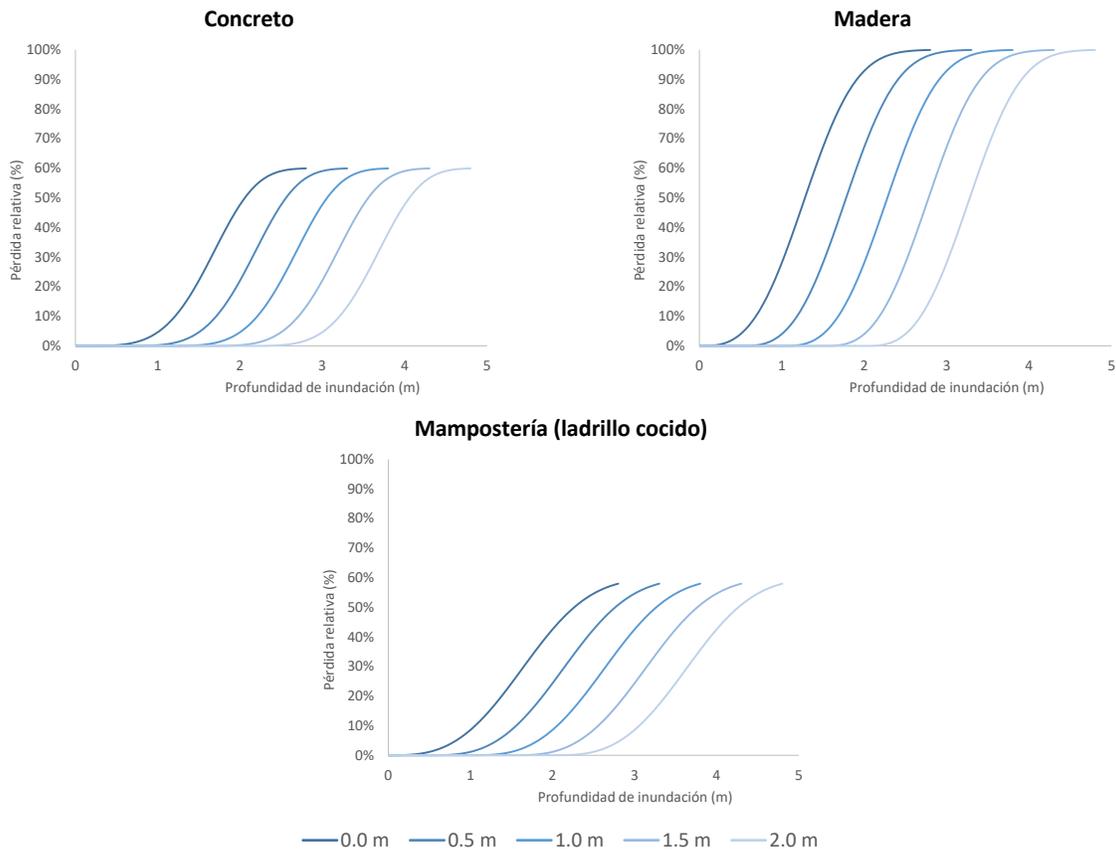


Figura 4-2. Funciones de vulnerabilidad para vivienda palafítica con diferentes alturas de palafitos, según el material de la superestructura.

Siguiendo los lineamientos dados por la guía “Lineamientos para la Construcción de Vivienda Palafítica” (DNP, 2016), la vivienda palafítica se considera con subestructura (palafitos) en madera o concreto sobre cimentación superficial de zapatas. A nivel de superestructura (vivienda) se consideran edificaciones en concreto, muros de mampostería (ladrillo cocido) y madera. Se asume que los sistemas estructurales basados en mampostería de tierra o material de desecho que sean intervenidos como vivienda palafítica pasan a ser de mampostería de ladrillo cocido o de madera, respectivamente. No se realizaron consideraciones especiales para edificaciones con valor patrimonial.

Las alturas de los palafitos que se asignan a cada elemento expuesto durante la modelación se establecen a partir del valor de altura de inundación para 500 años de periodo de retorno en el sitio del elemento. Esto determina un nivel de diseño operativo para los palafitos, por lo que solo los eventos que superen la altura de inundación de 500 años causarán pérdidas en las viviendas.

4.1.2 Reubicación de vivienda

Los procesos de reubicación son difíciles de implementar y tienen usualmente una tasa de éxito muy baja, debido al impacto que causa en la población el cambio en sus condiciones de vida. No obstante, es una

medida efectiva en reducir la pérdida para edificaciones en zonas de alto riesgo. El efecto de una reubicación se simula mediante el traslado de las viviendas reubicables a zonas de amenaza baja o nula dentro del mismo municipio. La factibilidad o no de usar el terreno al cual son hipotéticamente reubicadas no se verifica en esta modelación. Una vez reubicadas, las viviendas pasan a tener una condición de amenaza diferente a la original, reduciendo así las pérdidas.

La incorporación de la reubicación de viviendas en el modelo de riesgo se implementa mediante las siguientes reglas:

- Las viviendas reubicables se definen como viviendas en zonas de amenaza donde la altura de inundación de 500 años de periodo de retorno supere 2 metros.
- Se deben acumular un número mínimo de 50 viviendas reubicables en un municipio para proceder a su reubicación. En caso contrario, las viviendas se tratan como palafíticas a máximo 2 metros.
- La reubicación se restringe a los límites geográficos del municipio en el cual se encuentran las viviendas reubicables.
- El lote de reubicación se establece dentro de las áreas de amenaza nula o baja (menor a 0.5 metros para 500 años) del municipio. El lote debe tener un área de mínimo 2 veces el área total estimada de las viviendas a reubicar.
- En caso de no encontrar un lote con las características indicadas, progresivamente se evalúan terrenos con mayores niveles de amenaza, sin sobrepasar los 2 metros para 500 años.
- No se hace ninguna consideración con respecto a las características del lote, facilidad de acceso, factibilidad técnica, actuales propietarios, etc.

Siguiendo estos criterios generales, las viviendas se reubican y se define su altura final de palafitos de la misma forma como se indica en la sección 4.1.1.

4.1.3 Construcción de defensas

En esta modelación, se incorpora la posibilidad de construir diques con el fin de reducir las pérdidas en zonas de amenaza alta por inundación. El criterio para determinar si procede o no un dique como medida de adaptación se basa en medir el número de viviendas agrupadas espacialmente que cumplen la característica de estar todas en una amenaza alta de inundación (condición que varía dinámicamente en la RCE). Si este número es mayor a 350 viviendas, procede un dique en lugar de una reubicación. Este criterio está totalmente basado en la compensación de costos de reubicación y construcción de diques supuestos en este trabajo (la reubicación de 350 viviendas se estima en \$31,500 COP millones, comparada con el costo de un dique estimado en \$30,000 COP millones). Otros criterios de factibilidad técnica, impacto ambiental por modificación de la dinámica del río, costos OMR⁶, etc., no están considerados en esta modelación.

Dentro del modelo de riesgo, las defensas se asumen como diseñadas para el nivel de inundación de 500 años de periodo de retorno. Su efecto se incorpora como una protección al grupo de viviendas definido para ese nivel de inundación. No se considera el efecto modificador del dique sobre la amenaza ni la manera como altera los caudales y las hidrógrafas aguas abajo. Si el evento de inundación supera la altura

⁶ Operación, Mantenimiento, Reparación

de diseño, se empiezan a generar daños en las edificaciones protegidas. Esto significa que el único mecanismo de falla considerado es el de sobrepaso. Se asume que el dique no presenta otros mecanismos de falla como micro inestabilidad, *piping*, etc.

4.2 Riesgo por huracán

Para el caso de riesgo por huracán, dado el impacto sufrido recientemente en el departamento de San Andrés y Providencia por el paso del huracán Iota (noviembre de 2020), se seleccionó el sub portafolio de construcciones de dicho departamento sobre el cual se evalúan tres medidas de adaptación: reforzamiento estructural ante fuerzas de viento, edificaciones palafíticas (sobre plataformas) y la reconstrucción de Providencia con transformación (evitando reconstruir la vulnerabilidad preexistente). En este caso, las dos primeras medidas son de reducción del riesgo, mientras que la tercera es de manejo de desastres, asociada al desastre por Iota específicamente. La Tabla 4-3 describe cada medida de adaptación, los parámetros que la caracterizan y el costo asumido de implementación.

Tabla 4-3. Medidas de adaptación a ser evaluadas para huracán.

Medida de adaptación	Descripción	Parámetros	Costo
Reforzamiento estructural	Reforzamiento de edificaciones en alto riesgo para cumplir con criterios de diseño estructural resistente a huracanes.	Transición de lo especificado en la NSR 10 a lo indicado en el ASCE 7-16, usando las velocidades de diseño propuestas en esta consultoría.	50% del valor de reposición de cada edificación⁷ Los valores de reposición fueron estimados en la modelación del riesgo presentada en el Producto 2 de esta consultoría. Se estima que el reforzamiento puede costar del orden del 50% del valor original del inmueble.
Edificaciones palafíticas (plataformas)	Edificaciones sobre plataformas para disminuir las pérdidas por marea de tormenta	Se establecen plataformas de 1 metro de altura sobre el terreno natural para las edificaciones expuestas a la marea de tormenta	100% del valor de reposición de cada edificación Los valores de reposición fueron estimados en la modelación del riesgo presentada en el Producto 2 de esta consultoría. Se asume que se requiere la reconstrucción de las edificaciones intervenidas con esta medida.
Reconstrucción con transformación	Reconstrucción de Providencia bajo la premisa de no reconstruir la vulnerabilidad existente antes del desastre.	Transición de lo especificado en la NSR 10 a lo indicado en el ASCE 7-16, usando las velocidades de diseño propuestas en esta consultoría.	100% del valor de reposición de cada edificación Los valores de reposición fueron estimados en la modelación del riesgo presentada en el Producto 2 de esta consultoría. Se estima que el costo de diseñar y construir vivienda resistente a huracanes no supera el costo que implicó su construcción original.

La medida “Reconstrucción con transformación” –i.e. con seguridad– corresponde a una aplicación de las dos anteriores (Reforzamiento estructural y Edificaciones palafíticas) como parte del proceso de reconstrucción de Providencia, por lo cual a continuación se detalla únicamente la manera como las dos primeras medidas de adaptación modifican parámetros específicos del modelo de riesgo por huracán.

⁷ Es usual en ingeniería estructural asociar niveles de daño de entre el 40% y 60% con una pérdida total o una alta probabilidad al colapso, por lo cual se asume un 50% como límite máximo de costo para el cual se justifica un reforzamiento.

4.2.1 Reforzamiento estructural (fuerzas de viento)

Las fuerzas de viento imponen una condición de presiones especial a las edificaciones, causando tanto presiones positivas como negativas (succión), siendo usualmente las presiones negativas las más dañinas para el inmueble. Desde el punto de vista estructural, las presiones asociadas al campo de viento deben ser cuantificadas de forma apropiada para establecer las condiciones necesarias de resistencia del sistema estructural principal. Las fuerzas de diseño se determinan en Colombia según lo establecido en la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR 10 (AIS, 2010) la cual establece los requisitos mínimos de diseño y construcción con el fin de lograr un mismo nivel de seguridad a todas las edificaciones del país. Si bien la NSR 10 se centra en los efectos de los terremotos en las edificaciones, el capítulo B.6 provee una metodología de cuantificación de fuerzas de viento. Lamentablemente, la NSR 10 subestima de manera importante la velocidad de viento de diseño en el archipiélago de San Andrés y Providencia. La Figura 4-3 muestra las velocidades de viento de diseño exigidas (para ráfagas de 3 segundos) por la NSR 10 en el territorio nacional. San Andrés y Providencia se clasifica en zona 5 de amenaza eólica, con una velocidad básica de diseño de 130 Km/h.

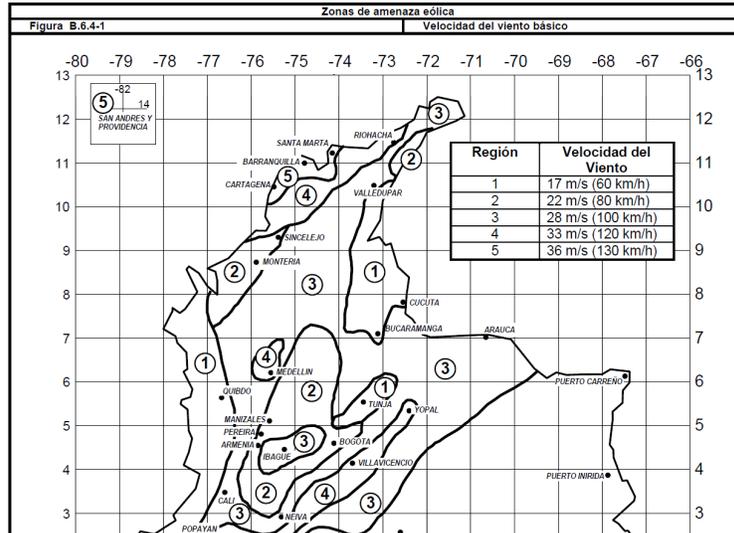


Figura 4-3. Mapa de amenaza eólica de la NSR 10.

Una velocidad de diseño en ráfaga de 3 segundos de 130 Km/h es muy inferior a lo que pueden causar los huracanes en el archipiélago, y que se evidenció durante el paso del huracán Iota. Es por esta razón que, como parte del producto 2 de esta consultoría, se definieron velocidades de viento para diseño estructural resistente a huracanes para San Andrés, Providencia y Santa Catalina, siguiendo lo exigido por el estándar ASCE 7/16, el cual reglamenta el diseño y construcción de edificaciones en zonas propensas a huracanes en los Estados Unidos, y es la base de múltiples códigos de construcción usados por países en la región Caribe (CUBiC, OECS, IBC, etc.). La Figura 4-4 muestra el mapa de velocidades del viento de diseño calculado en el producto 2 de esta consultoría, para la categoría de riesgo II del ASCE 7/16 (que corresponde a edificaciones residenciales), el cual indica los valores de viento para 700 años de periodo de retorno. Cabe anotar que las velocidades indicadas incorporan el efecto del cambio climático (ver Producto 2).

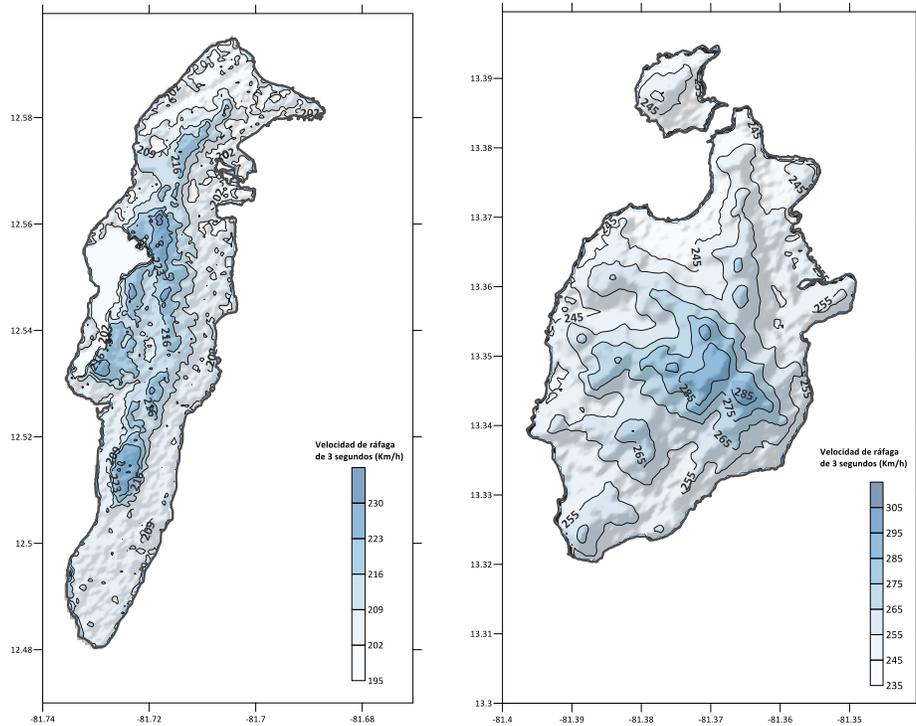


Figura 4-4. Velocidades de viento de diseño para San Andrés, Providencia y Santa Catalina

Un reforzamiento estructural, como medida de adaptación, implica considerar mayores solicitaciones a las originales de diseño de un inmueble y la aplicación de los cambios requeridos en la estructura para incrementar su seguridad ante estas nuevas cargas superiores a las originales. Esto significa que una edificación de un sistema estructural definido tendrá una mayor resistencia al viento si es “diseñada” usando las velocidades dadas en la Figura 4-4 que si se diseña con la velocidad dada por la NSR 10.

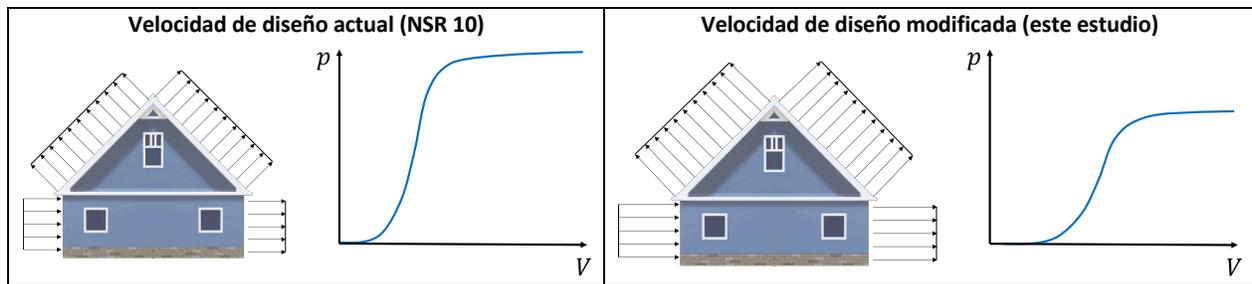


Figura 4-5. Ilustración de la diferencia en la vulnerabilidad de una vivienda diseñada con dos velocidades de viento diferentes

La Figura 4-5 muestra las funciones de vulnerabilidad empleadas para considerar el reforzamiento estructural en el portafolio de edificaciones de San Andrés y Providencia. La curva indicada como “Cubierta pesada – Fachada rígida” se aplica principalmente en edificaciones de altura intermedia o gran altura, como hoteles, y considera una cubierta en placa de concreto reforzado y materiales rígidos de fachada. Este sistema en particular tiene un comportamiento muy similar al ser diseñado para velocidad de viento menores, pues en su diseño priman las deformaciones laterales por la relativa alta flexibilidad del sistema estructural, lo que implica la incorporación de medidas estructurales de rigidización, independientemente

de la demanda por fuerzas de viento. El efecto dinámico para estructuras flexibles es también considerado. Los sistemas de “Cubierta ligera – Fachada flexible” y “Cubierta ligera – Fachada rígida” agrupan el comportamiento de las edificaciones más tradicionales, de poca altura, que se encuentran típicamente fuera de la zona netamente turística en la isla de San Andrés. En estos casos, el efecto de una mayor velocidad de diseño les brinda un mejor comportamiento estructural.

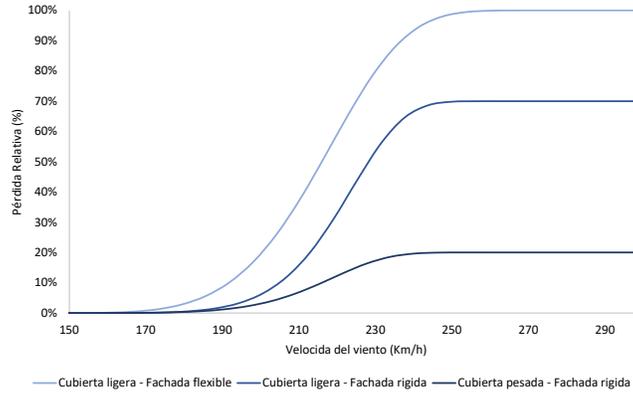


Figura 4-6. Funciones de vulnerabilidad para edificaciones reforzadas ante fuerzas de viento

4.2.2 Edificaciones palafíticas

La manera de considerar edificaciones palafíticas es equivalente a la ya presentada en la sección 4.1.1. En este caso, se consideran edificaciones en plataformas, con el fin de no causar condiciones inusuales de viento debido a los palafitos. Se usan alturas de 0.5 y 1.0 metros sobre el terreno natural. Para el archipiélago, se considera subestructura en madera (plataforma palafítica) y superestructura en madera o mampostería confinada. Las edificaciones de concreto de más de 3 pisos de altura no se incluyen dentro de los inmuebles que pueden ser intervenidos con palafitos. No se realizaron consideraciones especiales para edificaciones con valor patrimonial. La Figura 4-7 muestra las funciones de vulnerabilidad usadas para edificaciones palafíticas ante marea de tormenta en este estudio.

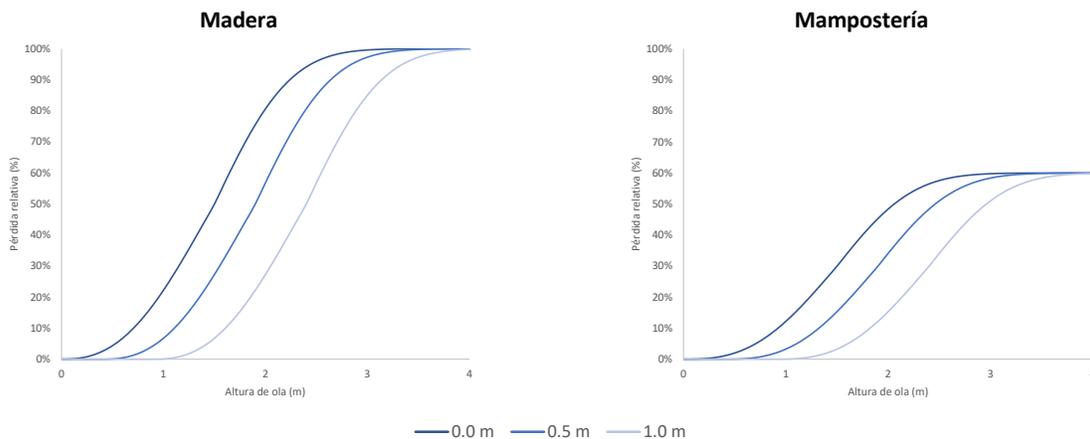


Figura 4-7. Funciones de vulnerabilidad para edificaciones palafíticas ante marea de tormenta, para diferentes alturas de palafitos, según el material de la superestructura

4.3 Riesgo por deslizamientos

El problema de inestabilidad de laderas o genéricamente de los deslizamientos es uno de los más complejos de abordar desde una perspectiva nacional, dada la escala natural de este fenómeno y sus particularidades que no es posible capturar sino en un modelo de muy alta resolución. No obstante, se propone la implementación de una medida de adaptación orientada a reducir la susceptibilidad de las laderas aledañas a los diferentes tramos de la red vial principal de Colombia. No es posible establecer a nivel de detalle lo que implica la reducción de la susceptibilidad en un tramo u otro, por lo cual se establece un valor estándar único para la intervención, independiente de las características del tramo. Esta suposición viabiliza la estimación del monto de las intervenciones requeridas para diferentes niveles de adaptación. La Tabla 4-4 describe la medida de adaptación.

Tabla 4-4. Medida de adaptación a ser evaluada para deslizamientos.

Medida de adaptación	Descripción	Parámetros	Costo
Reducción de la susceptibilidad por tramo	Mejoramiento de las condiciones del tramo y el terreno aledaño con el fin de reducir la susceptibilidad a los deslizamientos.	Se evalúan los tramos de manera gradual, de mayor a menor riesgo.	<p>\$ 7,800 COP millones / Km</p> <p>El valor indicado corresponde al costo estimado promedio de reposición de 1 Km de vía en la región Andina. (Gestor de Proyectos de Infraestructura, Ministerio de Transporte)</p>

Desde el punto de vista de la modelación, la reducción en la susceptibilidad a los deslizamientos de los tramos viales se incorpora modificando los factores de propensividad que conducen a la existencia de una susceptibilidad de las laderas. Estos factores son muy diversos y cubren desde aspectos naturales del terreno (como pendiente topográfica, cobertura vegetal, formación geológica superficial, tipo de suelo, aspecto y orientación de las laderas, nivel de insolación, etc.), pasando por condiciones de uso (como la existencia de asentamientos en la corona del talud, cercanía a vías, cercanía a redes de servicios, etc.), hasta condiciones de degradación (como nivel de erosión, nivel de intervención de la ladera). No obstante, en este trabajo se usó la “Zonificación de la Susceptibilidad General del Terreno a los Deslizamientos de Tierra” (IDEAM, 2012), la cual no puede ser directamente modificada por este consultor al no contarse con la información base para realizar el recalcu necesario. A pesar de esto, y dada la experiencia del consultor en evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa, se propone un esquema simplificado de alteración de los valores de susceptibilidad, basado en diferentes niveles de intervención a los tramos de la red vial principal, según su nivel de riesgo actual.

La red vial principal se clasificó según el nivel de riesgo considerando el clima más desfavorable (RCP 4.5), en 5 niveles de riesgo (Muy Alto, Alto, Medio, Bajo y Muy Bajo), como se ilustra en el mapa de la Figura 4-8. Estos niveles son usados como medidas de priorización para plantear diferentes estrategias de adaptación siguiendo el principio de gradualidad. Las intervenciones realizadas sobre los tramos de la red vial se consideran lo suficientemente efectivas como para bajar el riesgo a nivel Medio o inferior. Intervenciones de mayor alcance también son posibles dentro del algoritmo de la RCE. El resultado de esta optimización puede entenderse como diferentes planes de intervención vial, con costos aproximados, que siguen una priorización basada en riesgo y que gradualmente incrementan su alcance.

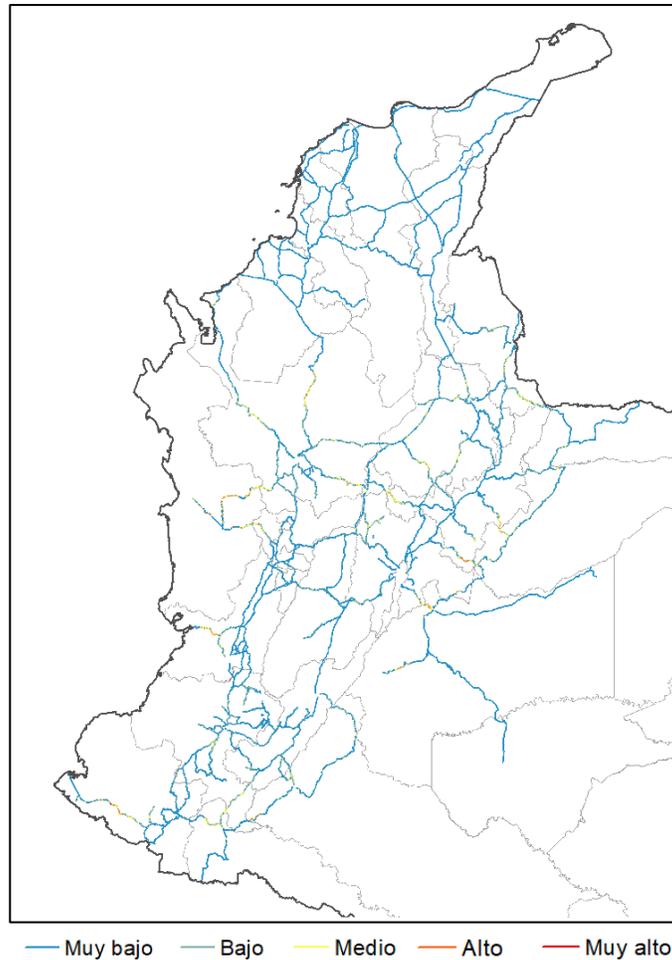


Figura 4-8. Clasificación del nivel de riesgo por deslizamientos en la red vial principal

4.4 Riesgo por sequía

El riesgo climático puede reducirse de muchas maneras en el sector agrícola. Las medidas de adaptación usualmente empleadas están encaminadas a mantener o mejorar los rendimientos de los cultivos bajo condiciones de un clima perturbado por cambio climático, es decir, asumiendo mayores periodos posibles de estrés hídrico o térmico para la vegetación. En este caso, se asumieron diferentes medidas posibles según el producto considerado. Para el maíz se tuvo en cuenta la posibilidad de implementar sistemas de riego, sistemas de cobertura del suelo (mulching) o la transición de los productores bajo sistema tradicional al sistema tecnificado. Para el arroz, se evaluó la instalación de sistemas de riego y la transición de sistema manual a mecanizado para aquellos productores donde sea pertinente. Adicionalmente, y solo para este sector, se dimensionó de forma preliminar un seguro para la producción acumulada de ambos portafolios. La Tabla 4-5 describe cada medida de adaptación, los parámetros que la caracterizan y el costo asumido de implementación. En este caso, y dada la naturaleza de la pérdida modelada, los valores presentados son costos en base anual.

Tabla 4-5. Medidas de adaptación a ser evaluadas para sequía.

Cultivo	Medida de adaptación	Descripción	Parámetros	Costo
Ambos	Seguro	Mecanismo de transferencia del riesgo mediante el cual el sector recibe una compensación por las posibles pérdidas asociadas a eventos hidrometeorológicos.	Desarrollado siguiendo los lineamientos del Seguro Agrícola Catastrófico, actualmente en estudio a nivel de factibilidad por FINAGRO (INGENIAR, 2020)	50% del valor de la prima pura de riesgo El costo de implementación corresponde a los costos de administración y utilidad de una compañía de seguros. Se asume 50 % de sobrecosto sobre la prima pura. El sobrecosto real es altamente variable entre compañías de seguros. (Banco Mundial, 2017) ⁸
Maíz	Instalación de sistemas de riego	Infraestructura de riego con el fin de proveer al cultivo la cantidad necesaria de agua evitando así el estrés hídrico.	Se asume un programa de riesgo correspondiente a proveer la humedad necesaria para mantener al cultivo en condiciones cercanas a las óptimas.	\$ 0.8 COP millones / ha El valor corresponde al promedio de diversos sistemas de riesgo (caudal reducido, aspersión o goteo), según lo reportado en la literatura. (Monje, 2017; Álvarez et al., 2018; López, 2019)
Maíz	Mulching	Cobertura del suelo del cultivo con el fin de evitar la erosión, controlar malezas y limitar la pérdida de humedad por evaporación.	Se asume una cobertura de la totalidad del suelo por hectárea de cultivo, usando plástico o biomasa remanente del ciclo anterior.	\$ 1.5 COP millones / ha Se supone un precio por hectárea de acuerdo con lo reportado en la literatura para cubrir el suelo del cultivo con restos vegetales (cáscaras, trozos de madera, residuos de maíz, etc.) o material sintético (plástico). (Luarte et al., 2013; Barajas-Guzmán et al., 2013; Frutos, 2015; Rolando, 2018)
Maíz	Transición de sistema tradicional a tecnificado	Transición al sistema tecnificado de los productores actualmente en sistema tradicional.	La transición al sistema tecnificado consiste en el uso de semillas certificadas, aplicación de agroquímicos y fertilizantes	\$ 3.0 COP millones / ha Valor calculado a partir del costo de usar semillas certificadas, agroquímicos y fertilizantes. (DANE, 2005; Perfetti et al., 2012; Paz et al., 2015).
Arroz	Instalación de sistemas de riego	Infraestructura de riego con el fin de proveer al cultivo la cantidad necesaria de agua evitando así el estrés hídrico.	Se asume un programa de riesgo correspondiente a proveer la humedad necesaria para mantener al cultivo en condiciones cercanas a las óptimas.	\$ 0.8 COP millones / ha El valor corresponde al promedio de diversos sistemas de riesgo (caudal reducido, aspersión o goteo), según lo reportado en la literatura. (Monje, 2017; Álvarez et al., 2018; López, 2019)
Arroz	Transición de sistema manual al mecanizado	Transición al sistema mecanizado de los productores actualmente en sistema manual.	La transición al sistema mecanizado consiste en usar maquinaria de siembra para limitar el desperdicio de semillas.	\$ 1.5 COP millones / ha Valor calculado a partir del alquiler de la maquinaria necesaria para la siembra en el sistema mecanizado. (DANE, 2017; Martínez, 2013; DANE, 2021).

El modelo de respuesta al agua de cultivos implementado en esta modelación permite simular condiciones de manejo y cambios en los sistemas productivos, de tal manera que es posible incorporar estas medidas de adaptación de forma muy cercana a la realidad. Por supuesto, cada medida de adaptación puede tener diferentes variaciones alrededor del mismo objetivo, resultado de las decisiones que tome cada agricultor, por lo cual es necesario generalizar y hacer supuestos sobre los parámetros que definen las condiciones de adaptación. La incorporación de estas medidas en el modelo se describe a continuación.

⁸ En Banco Mundial (2017) se estima la prima de tarifa incrementando en 30% la prima pura de riesgo para considerar gastos de operación. En este trabajo se asumió de forma conservadora un incremento del 50% para considerar adicionalmente la utilidad de la compañía de seguros.

4.4.1 Seguro Agrícola Catastrófico

El seguro agrícola no modifica directamente las condiciones de producción de los cultivos considerados, sino que define un mecanismo financiero para poder compensar las pérdidas sufridas por el sector en caso de presentarse eventos hidrometeorológicos extremos. Para el desarrollo de esta medida de adaptación se cuantifica la siniestralidad desde el punto de vista actuarial y se definen diferentes opciones de protección financiera para el portafolio combinado de maíz y arroz.

4.4.2 Instalación de sistemas de riego

Los sistemas de riego permiten proveer al cultivo con la cantidad necesaria de agua para su desarrollo. En el modelo de riesgo, se calculan previamente los requerimientos de agua para lograr un desarrollo óptimo del cultivo (máximo rendimiento). Luego, para cada evento climático simulado, se determina la necesidad adicional de agua según las condiciones simuladas de precipitación y temperatura, y se establece un plan de riego que compensa las deficiencias encontradas. De esta manera, se define, a nivel del modelo, un sistema de riego que opera de manera óptima en cada unidad cultivada.

4.4.3 Mulching (Maíz)

El mulching consiste en cubrir el suelo con materiales de desecho del ciclo anterior (como hojas, tallos, etc.) o con material plástico, con el fin de protegerlo de la erosión, maleza y reducir o limitar la evaporación. En el modelo, se define el mulching por medio de la reducción del flujo de evaporación en el suelo, a máximo el 10% de la evaporación para el mismo suelo sin cobertura. Esto permite mantener por más tiempo unas condiciones de humedad, que, si bien no son necesariamente las óptimas, le dan la oportunidad al cultivo de continuar su desarrollo mientras se aporta nueva humedad al suelo por precipitación.

4.4.4 Transición del sistema tradicional al tecnificado (Maíz)

La transición del sistema tradicional al tecnificado consiste en el uso de semillas certificadas, aplicación de agroquímicos y fertilizantes. En el caso de la modelación, estos parámetros modifican el modelo de cultivo empleado. En particular se modifican las funciones de desarrollo de la cobertura verde (canopy), y la función del índice de cosecha. De esta manera, se simula un sistema que presenta mayores rendimientos.

4.4.5 Transición del sistema manual al mecanizado (Arroz)

La transición del sistema manual al mecanizado consiste en el uso de maquinaria de siembra para limitar el desperdicio de semillas. En el caso de la modelación, se modifica principalmente el número de plantas sembradas por hectárea, para simular un proceso eficiente de siembra. La modificación de este parámetro induce cambios en el rendimiento final al distribuirse los recursos (humedad y nutrientes) del suelo dentro de un número diferente de plantas.

4.5 Riesgo por incendios forestales

El problema de los incendios forestales en Colombia es uno de los temas más relevantes de la actualidad en riesgo de desastres. El rápido avance de la frontera agrícola muestra que el país requiere de medidas contundentes que permitan un equilibrio entre la actividad agropecuaria y la conservación de los bosques. Dicho equilibrio es difícil de lograr pues las regiones donde es más intenso el avance de la frontera agrícola son regiones con fuertes problemas de orden público, en donde es común ganar terreno al bosque para sembrar cultivos ilícitos. Los bosques principalmente afectados se componen de tipos de vegetación que, dadas las condiciones normales de humedad, difícilmente pueden verse sometidas a igniciones espontáneas. Esto significa que en su absoluta mayoría los incendios forestales en Colombia inician por cuenta de la mano del hombre. Mientras no sea posible evitar la ocurrencia de incendios, estos seguirán siendo recurrentes en el país.

Ahora bien, como se mostró en el producto 2 de esta consultoría, el cambio climático modificaría en el futuro la temperatura del aire y los patrones de precipitación y, en consecuencia, las condiciones de humedad de la vegetación, lo cual facilitaría el avance de los incendios forestales una vez iniciado el fuego. Es esta característica la que es posible intervenir desde el punto de vista de la adaptación al cambio climático, por lo cual se plantea la medida indicada en la Tabla 4-6, que corresponde a mejorar las capacidades de combatir el fuego en el país. No obstante, se hace especial énfasis en que el cambio climático no es directamente causante de los incendios forestales y que, con el fin de limitar su ocurrencia, se deben implementar acciones de otro tipo, que no se relacionan directamente con procesos de adaptación al cambio climático.

Para la medida de adaptación planteada, se considera fundamental el papel de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) en la provisión de personal y maquinaria de respuesta contra el fuego (helicópteros), que son necesarios dadas las condiciones del territorio nacional y el difícil acceso a los sitios usualmente afectados por el fuego. En forma similar, en el pasado, la vigilancia de los volcanes ha implicado contar con helicópteros especiales para la vigilancia a mayor altura, operados por la FAC. La Tabla 4-6 describe la medida de adaptación. En este caso, el costo se subdivide según diferentes costos considerados en la aplicación gradual de esta medida.

Las acciones de respuesta contra el fuego, que pueden ser muy diversas, pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- Aumentar la humedad de la vegetación hasta llevarla a la humedad de extinción.
- Limitar la propagación cortando el suministro de combustible al incendio.

De estas dos maneras de combatir el fuego, se asume como factible, dentro de la generalización necesaria dada la resolución del modelo, la primera, es decir, aumentar la humedad de la vegetación hasta llevarla a la humedad extinción. Esta suposición se basa en que, como se mencionó anteriormente, los sitios usualmente afectados por incendios forestales son de difícil acceso, lo que limita seriamente la posibilidad del ingreso de personal y maquinaria por tierra para la construcción de cortafuegos u otras medidas de reducción de carga combustible disponible para el fuego. Por otra parte, el país cuenta con alguna capacidad ya instalada para inducir la extinción usando agua dispersada desde el aire por medio de helicópteros.

Tabla 4-6. Medida de adaptación a ser evaluada para incendios forestales.

Medida de adaptación	Descripción	Parámetros	Costo
Mejoramiento de la capacidad de combatir el fuego	Mejoramiento de las capacidades existentes (particularmente en equipos y estaciones) para combatir el fuego	Capacidad de respuesta desde diversas estaciones de la FAC con la capacidad (helicópteros, equipo y personal) con que actualmente cuenta el país	15.4 COP millones / hora de vuelo El valor indicado corresponde al gasto estimado en gasolina de un helicóptero UH60 de la FAC, el costo del personal y el mantenimiento mensual. (Giraldo et al., 2014; Caracol Radio, 2015)
		Adquisición de nuevos helicópteros.	28,800 COP millones / helicóptero Costo de adquisición de un helicóptero UH60 más un Heliblade Bambi Bucket para el traslado de agua. Se estima un valor aproximado de 8 millones USD. Se asume una tasa de cambio de 3,600 COP/USD. (Watson, 2019; El Tiempo, 2021)

La FAC cuenta con la mayor flota de helicópteros UH60 Black Hawk de Sur América. De la totalidad de helicópteros con que cuenta el país, actualmente 6 se encuentran operativos (El Tiempo, 2021), y han sido usados anteriormente para combatir el fuego⁹. Se supone entonces con fines de modelación, que la extinción se induce por medio de la aspersión de agua desde el aire usando parte de la flota de UH60 de la FAC (se asume que solo 4 helicópteros estarán disponibles para combatir incendios). Dentro del algoritmo de la RCE, y siguiendo el principio de gradualidad, se admite la posibilidad de ampliación de la flota buscando mejores condiciones de respuesta.

Las estaciones de la FAC son usadas en el modelo como puntos de control e inicio de las labores de respuesta. Actualmente no hay flota de UH60 en todas las estaciones de la FAC, pero se asume que es posible mantener al menos un helicóptero en cualquier de ellas. La Figura 4-9 muestra el mapa de localización de las estaciones de la FAC. El proceso de respuesta sigue estos criterios:

- La respuesta a un incendio puede ocurrir desde una o varias estaciones de la FAC.
- El modelo se desarrolla en base horaria. Todos los cambios suceden en intervalos de 1 hora. La dinámica intrahoraria del fuego o de las labores de respuesta no es modelada.
- El tiempo desde el inicio del incendio (ignición) al inicio de las labores de respuesta, o tiempo de detección de un incendio, es una variable aleatoria distribuida exponencial, con un valor mínimo de 1 hora.
- La respuesta se inicia en la estación más cercana al punto de ignición. Otras estaciones se activan en función de cómo avanza el incendio. A medida que el perímetro en combustión se incrementa, más estaciones participan en la respuesta.
- La ubicación de los cuerpos de agua de donde se recarga el Bambi Bucket de cada helicóptero dependerá de la distancia de estos al fuego, de la cantidad de helicópteros combatiendo un mismo incendio, de la velocidad de propagación del fuego, entre otros aspectos. En general es difícil simular las decisiones que los pilotos y bomberos expertos tomen durante el desarrollo de sus labores. Por esta razón, se considera para la modelación que el helicóptero recarga agua en un

⁹ Por ejemplo, en 2015 la FAC empleó 51 horas de vuelo de UH60 para combatir 6 incendios forestales (Caracol Radio, 2015)

punto que está a la misma distancia del incendio que la estación desde donde despegó inicialmente.

- Un helicóptero puede requerir de varios viajes de recarga y aspersión para poder extinguir un incendio. Se asume un tiempo de recarga y aspersión total de 30 minutos, y una velocidad de viaje de máximo 150 Km/h. Este es un estimado conservador, dado que se reporta velocidad de crucero para un UH60 (sin Bambi Bucket) de 240 Km/h.
- Los patrones de aspersión de agua se asumen similares a los reportados por Solarz & Jordan (2001), presentados en la Figura 4-10, los cuales han sido determinados para agua lanzada en vuelo desde diferentes alturas a diferentes velocidades de avance. Los contornos indican los valores de intensidad de aspersión, teniendo en cuenta una capacidad de almacenamiento de un Bambi Bucket de 660 galones (2.5 m³).
- Los patrones de aspersión se simulan como elipses con una relación de ejes mayor a 5, modificadas por un campo aleatorio gaussiano para simular estocásticamente los contornos finales.
- El volumen de aspersión total de la hora, expresado finalmente en mm de precipitación, se suma a las condiciones simuladas de precipitación meteorológica, para determinar la humedad de la vegetación. En cuanto esta humedad sea igual o mayor a la de extinción, en todos los puntos que componen el perímetro de fuego, se asume finalizado el incendio.



Figura 4-9. Mapa de estaciones de la FAC

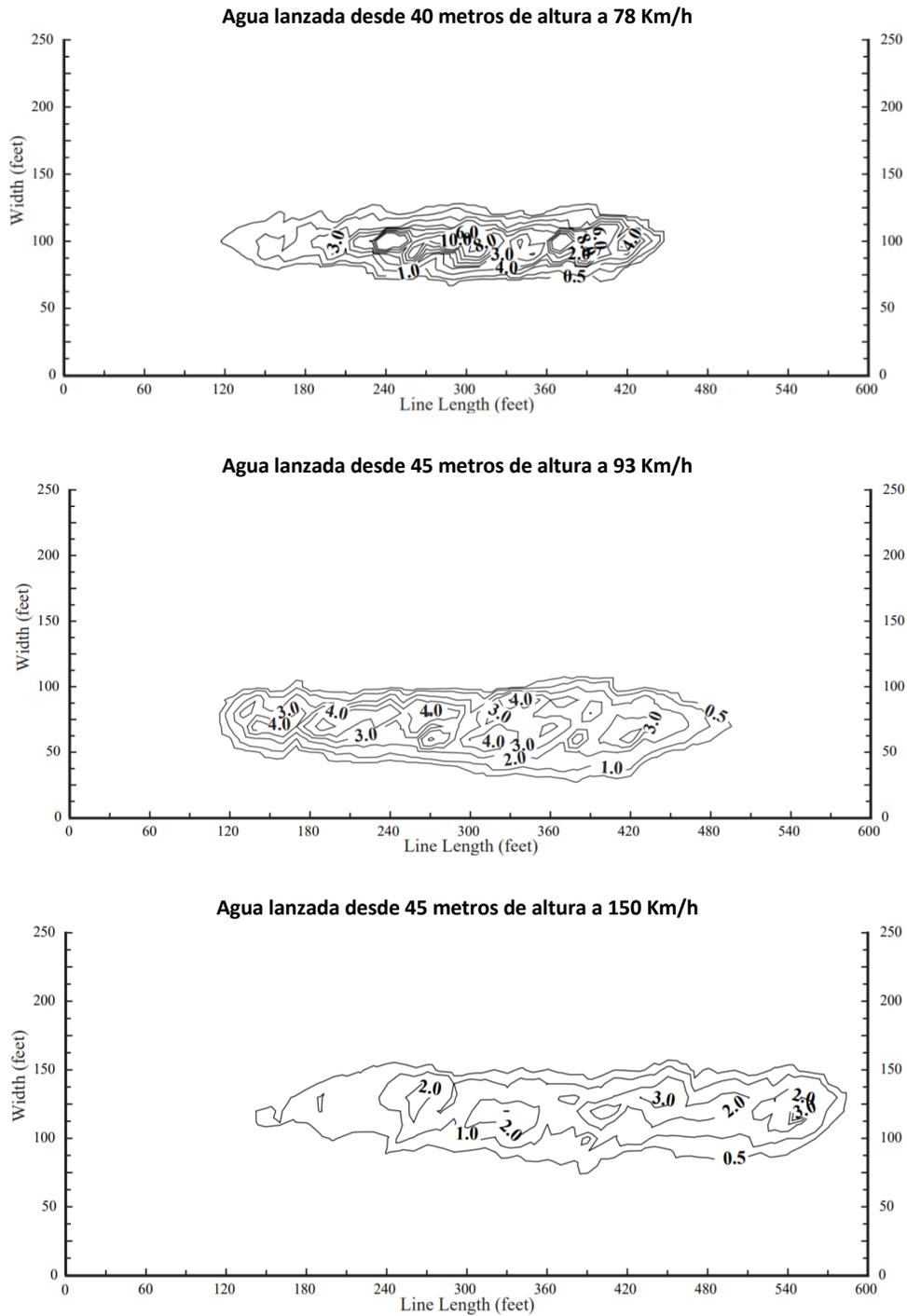


Figura 4-10. Patrones de aspersión de agua para diferentes alturas y velocidades. Los contornos están dados en galones por 100 pies cuadrados. La dirección de avance es de izquierda a derecha. Tomado de Solarz & Jordan (2001).

5 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

Con ayuda de la RCE se procedió a dimensionar el alcance de las medidas anteriormente definidas con el fin de establecer las necesidades de inversión requeridas para lograr una reducción determinada en el riesgo de desastres. La metodología de la RCE se aplica sobre las medidas de adaptación predefinidas (ver sección 4), con el fin de obtener diferentes combinaciones de estas que reduzcan el riesgo de manera más efectiva. Este proceso se repite considerando diferentes montos máximos de inversión, de tal manera que se aborde el problema de adaptación siguiendo el principio de gradualidad.

5.1 Inundación

El caso de inundación se restringe, como se mencionó anteriormente, al portafolio de edificaciones residenciales de ingresos bajos. Esto debido a que es este sub portafolio el que aporta las mayores pérdidas de toda la base de exposición considerada. Cabe anotar que la pérdida en este portafolio no proviene de todas las viviendas que lo componen, debido a que no todas las viviendas tienen riesgo de inundación. Las medidas de adaptación se aplicarán únicamente en la porción de viviendas que aportan pérdida por inundación al portafolio, que en este caso corresponden a alrededor del 13% del total. Es importante hacer esta aclaración pues la distribución de medidas de adaptación que se presenta más adelante corresponde a las cerca de 450,000 viviendas de ingresos bajos en Colombia susceptibles de ser intervenidas. La Tabla 5-1 muestra la PAE por cada clima considerado para el portafolio de edificaciones residenciales de ingresos bajos.

Tabla 5-1. PAE para el portafolio de residenciales de ingresos bajos, para los 6 climas considerados

Valor expuesto (COP millones)	PAE (COP millones)					
	<i>Clima Base</i>	<i>RCP 2.6</i>	<i>RCP 4.5</i>	<i>RCP 6.0</i>	<i>RCP 8.5</i>	<i>CC IDEAM</i>
\$113,275,999	\$106,519	\$95,877	\$117,289	\$90,444	\$85,330	\$111,856

Se establecen montos de inversión de manera creciente y se determinan las acciones a ser implementadas para cada monto que reducen de manera más efectiva la pérdida. Cada monto de inversión deriva entonces en una estrategia de adaptación diferente. A medida que el monto de inversión aumenta se intervienen más viviendas, lo que implica una disminución en la PAE del portafolio estudiado. Por supuesto, el efecto de cada estrategia de adaptación será diferente para cada posible clima futuro. La Figura 5-1 muestra la variación en la PAE del portafolio de edificaciones residenciales de ingresos bajos, con respecto a los montos de inversión requeridos para llevar el riesgo a los niveles indicados. A cada nivel de inversión le corresponde una cierta distribución de medidas de adaptación, obtenida de la optimización de sus efectos en reducción del riesgo y el costo requerido de implementación. En la Figura 5-1 se muestran cuatro ejemplos de dichas estrategias seleccionados arbitrariamente con el fin de ilustrar el cambio asociado a diferentes montos de inversión. Los diagramas presentados muestran el porcentaje de viviendas intervenidas por cada tipo de intervención, a nivel nacional, que se requieren dentro de cada estrategia de adaptación óptima cuyo monto de inversión es el indicado. Las medidas de adaptación son las indicadas en la Tabla 4-2. La Figura 5-1 resume, por lo tanto, el universo de posibles estrategias de adaptación según el nivel de riesgo (expresado como PAE) objetivo y el monto que sea posible invertir.

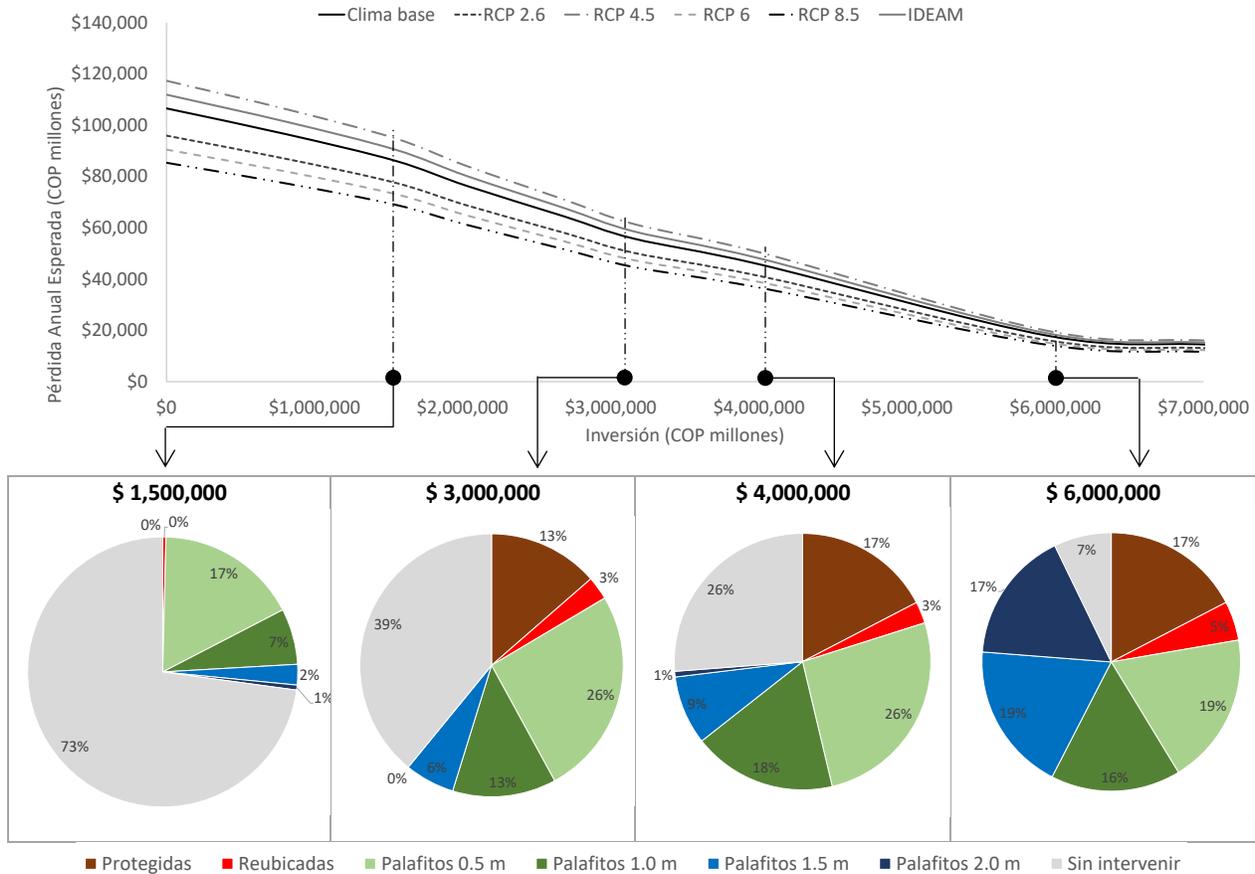


Figura 5-1. Variación de la PAE por cada clima considerado como función del monto de inversión en adaptación. Se presentan 4 estrategias de adaptación seleccionadas arbitrariamente con sus correspondientes montos de inversión y la distribución de viviendas intervenidas por cada medida de adaptación considerada.

En la Figura 5-1 se puede visualizar también como a medida que el monto de inversión aumenta, es decir, a medida que más y más viviendas son intervenidas por alguna de las medidas de adaptación definidas, el intervalo de variación de la PAE para los diferentes climas se hace cada vez más pequeño, y las curvas se estabilizan en un valor de PAE constante. En este punto se ha alcanzado el límite superior de la adaptación. Este límite tiene dos características fundamentales: i) a partir de este punto las posibles variaciones en el clima futuro no representan un cambio sensible en el riesgo y ii) mayores inversiones no implican mayores reducciones en la pérdida pues se ha alcanzado el límite de efectividad de las medidas consideradas. Por lo tanto, este límite indica un nivel máximo de adaptación posible. La pérdida remanente corresponde al riesgo residual que no es posible reducir con las medidas consideradas. El límite depende por supuesto de cuáles son las medidas que se evalúan, lo que significa que puede cambiar si se consideran otras diferentes a las acá presentadas. En este caso, y bajo los supuestos definidos, el límite de adaptación se alcanza para una inversión del orden de 6.5 billones de pesos.

5.1.1 Adaptación a nivel departamental

Las cifras y distribución de medidas mostradas en la Figura 5-1 son para el orden nacional. No obstante, la manera como cada medida se implementa a nivel departamental cambia considerablemente según el monto total de inversión. Es importante conocer cómo se implementan las diferentes medidas de adaptación a nivel departamental, lo cual depende de las condiciones particulares del territorio que conducen a la existencia de riesgo de inundaciones, y de la cantidad de viviendas a intervenir. La Figura 5-2 indica el porcentaje de viviendas de ingresos bajos que fue considerado dentro de la evaluación de medidas de adaptación para cada departamento, por ser clasificadas como viviendas en alto riesgo. El único departamento no incluido en la evaluación fue San Andrés y Providencia, dado que el modelo de inundación empleado no permite modelar de forma apropiada las cuencas hidrográficas existentes en el archipiélago.

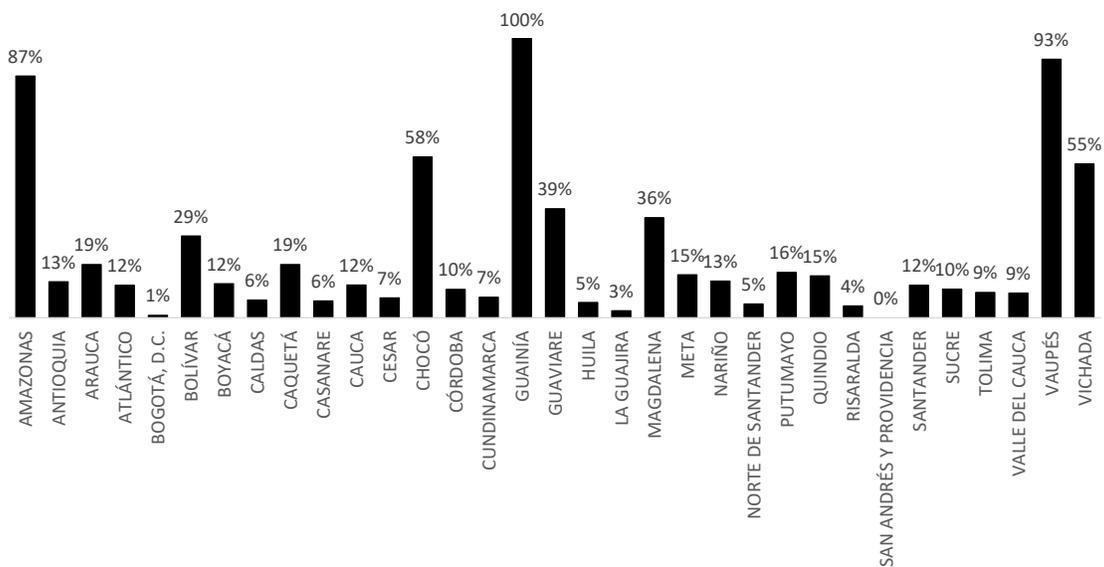


Figura 5-2. Porcentaje de viviendas de ingresos bajos consideradas en alto riesgo de inundación para cada departamento de Colombia.

La Figura 5-3 muestra la distribución de viviendas a ser intervenidas por cada medida de adaptación en cada departamento. Los 4 montos de inversión indicados son los mismos mostrados en la Figura 5-1. Es posible ver que la cantidad de viviendas intervenidas por las diferentes medidas cambia sustancialmente de un departamento a otro, reflejando las condiciones particulares del territorio y la mayor o menor efectividad de las medidas en cada caso.

Las diferentes estrategias de adaptación, ahora vistas a nivel departamental, implican una reducción en la PAE de los departamentos, como se muestra en la Figura 5-4, en la cual se indica la PAE resultante para los cuatro niveles de inversión previamente seleccionados. Se presentan mapas que permiten ver la distribución espacial de los cambios en la PAE para el clima más desfavorable (mayores pérdidas) que, para el caso de inundaciones, corresponde al RCP 4.5. Se presentan también gráficos de barras con las PAE para la totalidad de climas simulados. Es posible ver como la PAE gradualmente se va reduciendo de forma diferenciada entre los departamentos, en función de las medidas implementadas en cada uno de ellos.

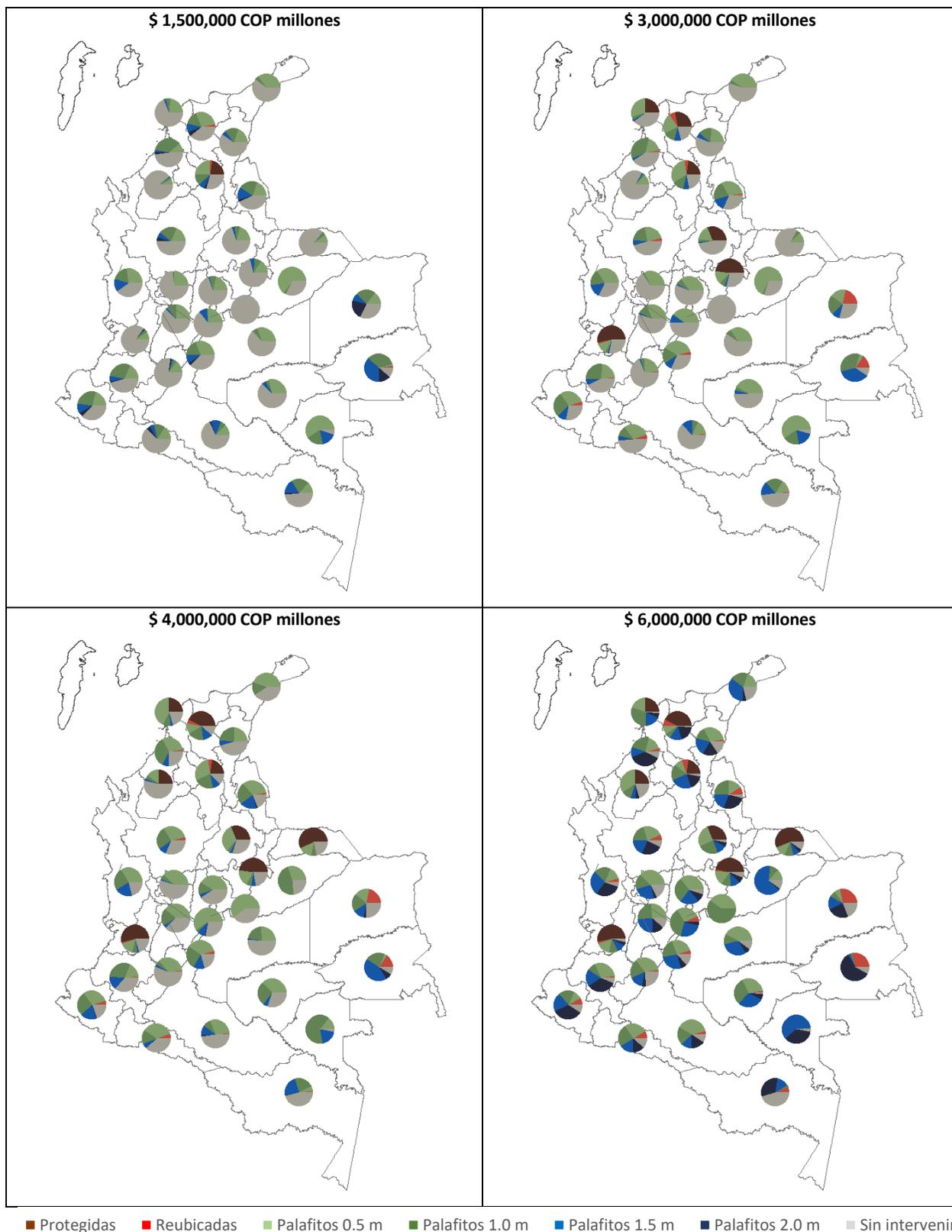


Figura 5-3. Distribución de medidas de adaptación a nivel departamental para 4 montos de inversión seleccionados.

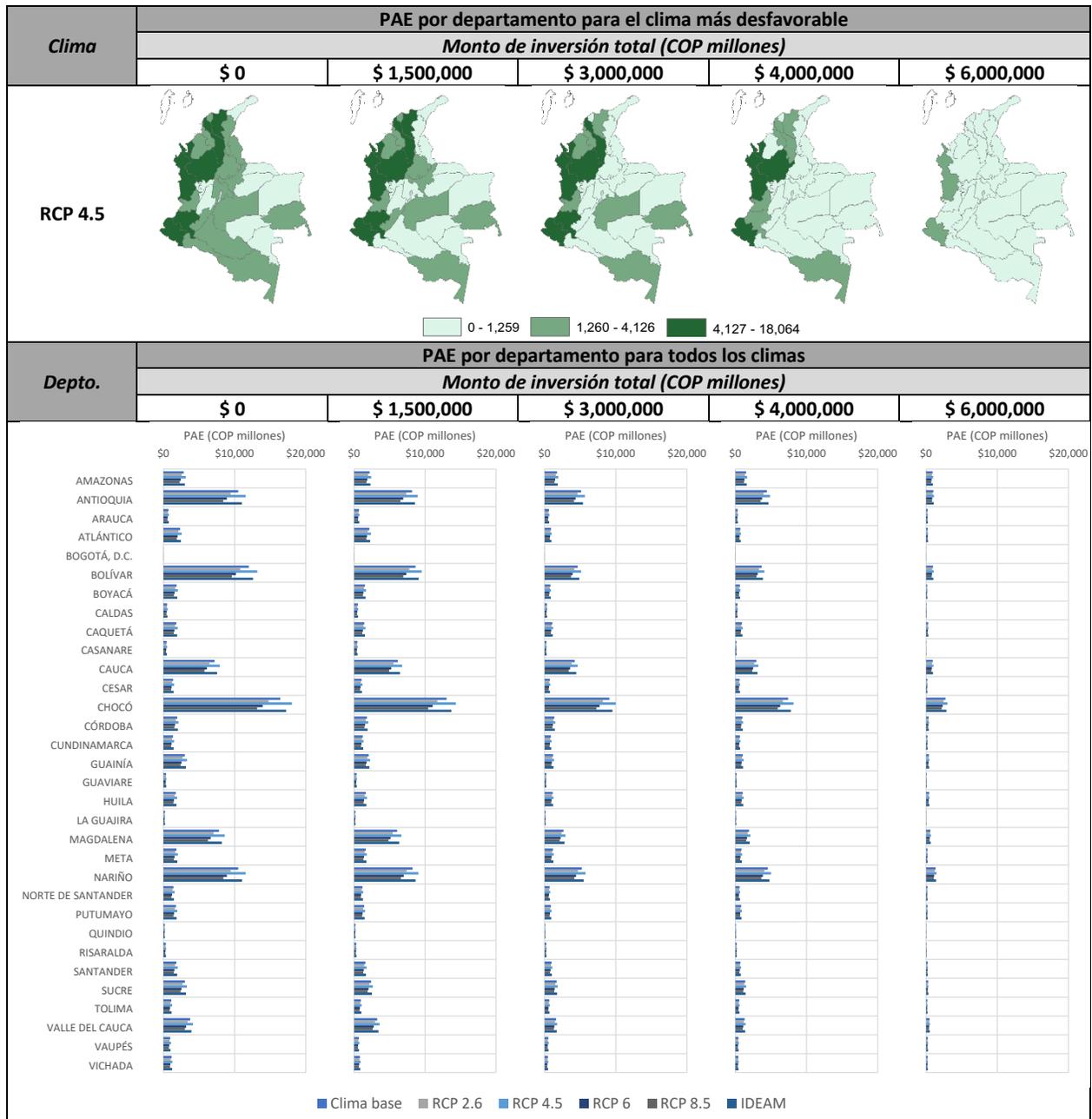


Figura 5-4. Cambio en la PAE departamental por inundación para el portafolio considerado bajo estrategias de adaptación con diferentes montos totales de inversión (se excluye San Andrés y Providencia por no estar incorporado en el modelo de inundación).

5.2 Huracán

El desastre resultado del paso del huracán Iota cerca del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina ha demostrado la importancia para Colombia de mirar de manera rigurosa el riesgo por ciclones tropicales, el cual ha sido históricamente despreciado por concentrarse fuertemente en este departamento y en consecuencia no considerarse relevante frente a fenómenos que afectan porciones más amplias del territorio nacional. La estimación del efecto de las medidas de adaptación se centra, en este caso, en el riesgo por huracán para el departamento de San Andrés y Providencia, evaluando las medidas de adaptación indicadas en la Tabla 4-3. Cabe anotar que, para este caso, el clima futuro considerado corresponde al escenario A1B definido por el IPCC en su Assessment Report 4 (IPCC, 2007), tal y como se explica en detalle en el producto 2 de esta consultoría.

La Tabla 5-2 muestra la PAE para el clima base y perturbado por cambio climático, considerando el portafolio de edificaciones del archipiélago. Las pérdidas indicadas en la Tabla 5-2 corresponderían al límite inferior de la adaptación, es decir, no intervenir en ningún grado el riesgo existente. Esta definición no aplica directamente al caso de Providencia, sino que se trataría del valor de la PAE si se reconstruyera la misma vulnerabilidad previa a Iota. Dado que la medida de adaptación para el caso de Providencia se refiere al proceso de reconstrucción y no a la intervención de lo ya construido, se hace a continuación la diferenciación de ambos casos.

Tabla 5-2. PAE para el portafolio de edificaciones en San Andrés y Providencia, para el clima base y el escenario A1B

Clima	Municipio	Valor expuesto	PAE	
		(COP MM)	(COP MM)	(%)
Clima base	San Andrés	\$2,251,248	\$13,222	5.89
	Providencia	\$246,471	\$2,369	9.61
	Total	\$2,497,719	\$15,591	6.24
A1B (AR4-IPCC)	San Andrés	\$2,251,248	\$11,140	4.94
	Providencia	\$246,471	\$3,016	12.23
	Total	\$2,497,719	\$14,156	5.66

5.2.1 San Andrés

Se evaluaron las dos primeras medidas de adaptación para el caso de huracán indicadas en la Tabla 4-3, sobre el portafolio de edificaciones de San Andrés, es decir, se considera la construcción de edificaciones palafíticas o sobre plataformas con el fin de reducir las pérdidas por marea, y el reforzamiento estructural a los sistemas principales de resistencia de fuerzas de viento de las edificaciones del portafolio. Con ayuda de la RCE se establecieron las mejores combinaciones de medidas para varios montos de inversión. La Figura 5-5 muestra la variación de la PAE de este portafolio con respecto al costo de la intervención requerida para reducir el riesgo. Se incluye como ejemplo la distribución de las medidas de intervención aplicadas sobre las edificaciones del portafolio resultantes de la optimización para 4 niveles seleccionados arbitrariamente.

Como se comentó anteriormente, la adaptación encuentra un límite natural en el punto en el cual las medidas consideradas ya no pueden aportar en la reducción de la vulnerabilidad, condición en la cual el riesgo remanente puede considerarse como residual y con muy baja volatilidad con respecto al efecto del cambio climático.

La Figura 5-6 muestra gráficamente la variación en la PAE a nivel de manzanas para el clima más desfavorable en San Andrés (clima base), para las medidas de adaptación requeridas según los 4 niveles arbitrariamente seleccionados.

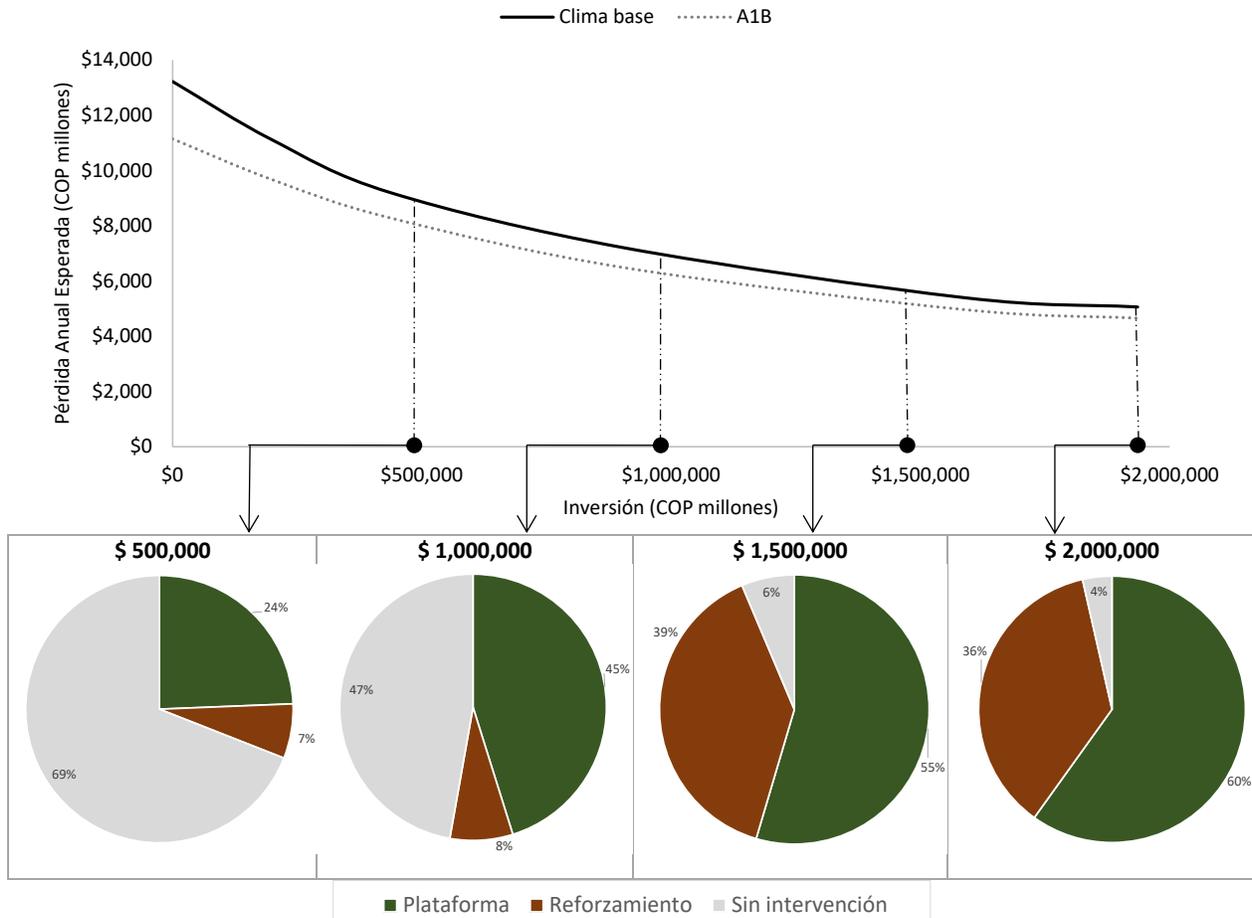


Figura 5-5. Variación de la PAE como función del monto de inversión en adaptación para el portafolio de edificaciones de San Andrés. Se presentan 4 estrategias de adaptación seleccionadas arbitrariamente con sus correspondientes montos de inversión y la distribución de edificaciones intervenidas por cada medida de adaptación considerada.

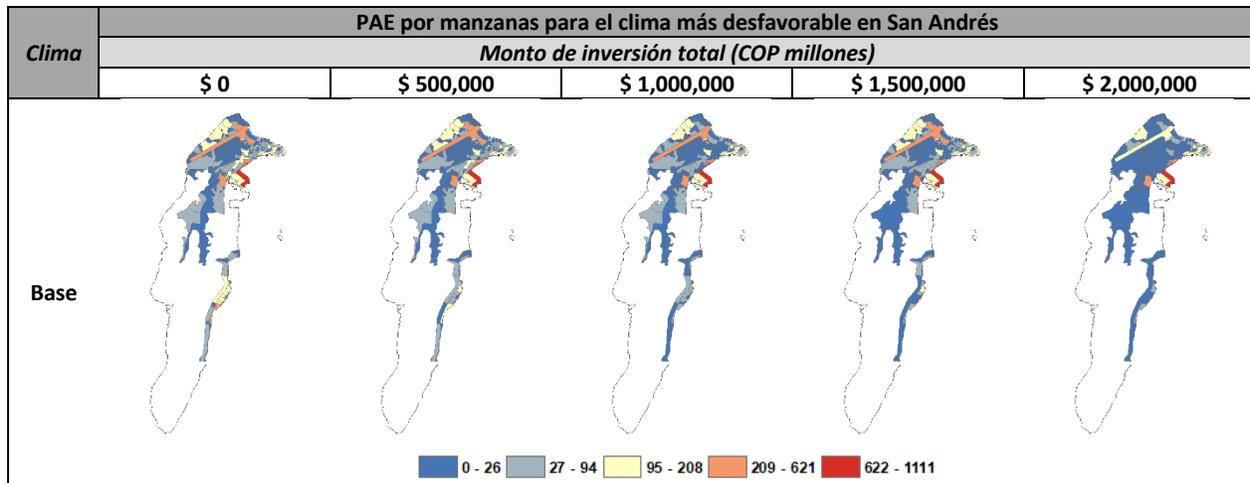
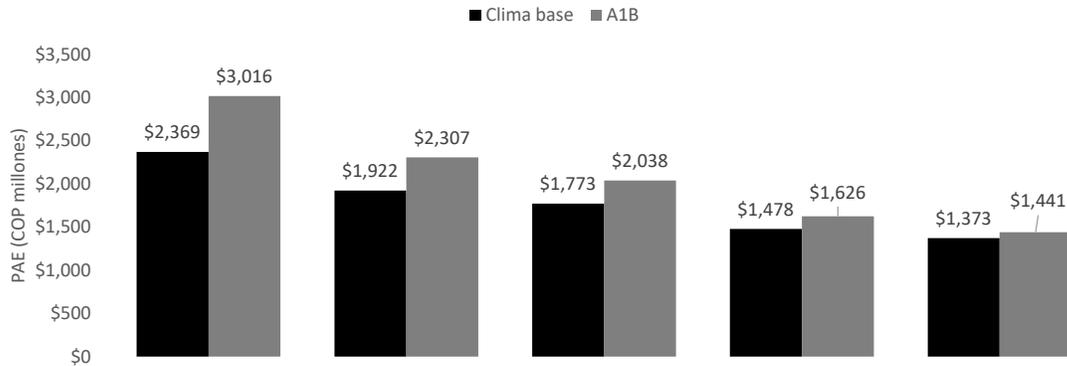


Figura 5-6. Cambio en la PAE por manzanas en la isla de San Andrés para el clima más desfavorable, para el portafolio considerado bajo estrategias de adaptación con diferentes montos totales de inversión.

5.2.2 Providencia

Tras el paso del huracán Iota, Providencia sufrió una destrucción sin precedentes en sus edificaciones, infraestructura y bosques. Se habla de cerca del 98% de destrucción en vivienda e infraestructura, 90% de pérdida en sus bosques tropicales secos y 70% en sus bosques de Manglar. Este desastre ha demostrado que los ciclones tropicales pueden afectar gravemente al departamento y ha elevado el interés en las instituciones por este tipo de riesgo. Dada la magnitud de la destrucción ya ocurrida, no es posible ilustrar el alcance y costos de diferentes niveles de adaptación, pues solo es posible en este caso la reconstrucción total. Es posible ilustrar, no obstante, las consecuencias de buscar o no una transformación en las condiciones preexistentes de vulnerabilidad durante el proceso de reconstrucción.

El 100% de las edificaciones en Providencia están expuestas al campo de viento de los huracanes, mientras que aproximadamente el 75% se encuentran ubicadas en zonas propensas a marea de tormenta. Si asumimos que la reconstrucción se llevará a cabo siguiendo una distribución de ubicaciones similar a lo previamente existente, estos porcentajes se mantendrán una vez termine dicho proceso. La Figura 5-7 muestra la variación en la PAE por huracán, con y sin cambio climático, para Providencia, considerando diferentes niveles de transformación de la vulnerabilidad preexistente. Las transformaciones se expresan en términos de edificaciones palafíticas (o con plataforma) para disminuir las pérdidas por marea de tormenta (se asumen plataformas de 1 metro de altura), y edificaciones resistentes al viento diseñadas usando valores actualizados de velocidad del viento de diseño, como los desarrollados en esta consultoría (ver Producto 2). Los porcentajes mostrados son sobre las edificaciones susceptibles a cada efecto del huracán (viento 100%, marea 75%) como se indicó anteriormente. Es posible ver que un proceso de reconstrucción que no se enfoque en reducir la vulnerabilidad necesariamente implica la reconstrucción del mismo riesgo existente antes de Iota. Por otra parte, una reconstrucción con transformación implica una reducción importante en la PAE (alrededor del 50%), a un costo que es más o menos fijo en todos los casos, dado que una reconstrucción diseñada de manera cuidadosa prácticamente no implica ningún sobrecosto. Se puede ver también como, al lograr una transformación de las condiciones de vulnerabilidad física, la volatilidad en la pérdida asociada a considerar el cambio climático se reduce significativamente.



Resist. al viento	0%	5%	30%	85%	100%
Edif. palafíticas	0%	50%	75%	80%	100%

Figura 5-7. Cambio en la PAE en la isla de Providencia para el portafolio de edificaciones bajo diferentes supuestos de reconstrucción con transformación. Los porcentajes mostrados son sobre las edificaciones susceptibles a cada efecto (viento 100% del total, marea 75% del total)

5.3 Deslizamientos

El impacto que históricamente han tenido los deslizamientos sobre la infraestructura vial del país es innegable. A pesar de que se ha avanzado mucho en la incorporación de los aspectos asociados a su ocurrencia dentro de los procesos de planificación, diseño y construcción de vías, se siguen presentando problemas de esta naturaleza dadas las características del territorio colombiano. En el producto 2 de esta consultoría se presenta el modelo implementado y los resultados completos de riesgo sobre la red vial principal de Colombia para los 6 climas considerados. La Tabla 5-3 resume los valores de PAE calculados para el portafolio completo.

Tabla 5-3. PAE por deslizamientos para la red vial principal de Colombia, para los 6 climas considerados

Valor expuesto (COP millones)	PAE (COP millones)					
	Clima Base	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	CC IDEAM
\$138,923,291	\$136,274	\$146,018	\$187,365	\$117,135	\$67,469	\$153,088

Las diferentes estrategias de adaptación encontradas con la metodología RCE, establecen de forma gradual niveles de intervención al riesgo por deslizamientos de la red vial principal. Mayores intervenciones implican por supuesto mayores costos. El balance entre pérdidas evitadas y costo de inversión se detalla en la Figura 5-8, la cual muestra la variación de la PAE, para los 6 climas, ante diferentes estrategias de adaptación. Se evidencia de nuevo el comportamiento ya antes discutido, en donde a partir de cierto punto las inversiones no reducen significativamente el riesgo, y se cierra progresivamente el intervalo de pérdidas asociado al desconocimiento del clima futuro. De nuevo se muestran en detalle 4 niveles de adaptación seleccionados arbitrariamente con el fin de ilustrar la distribución de la intervención en diferentes tramos de la red, en función del nivel de riesgo definido en cada uno.

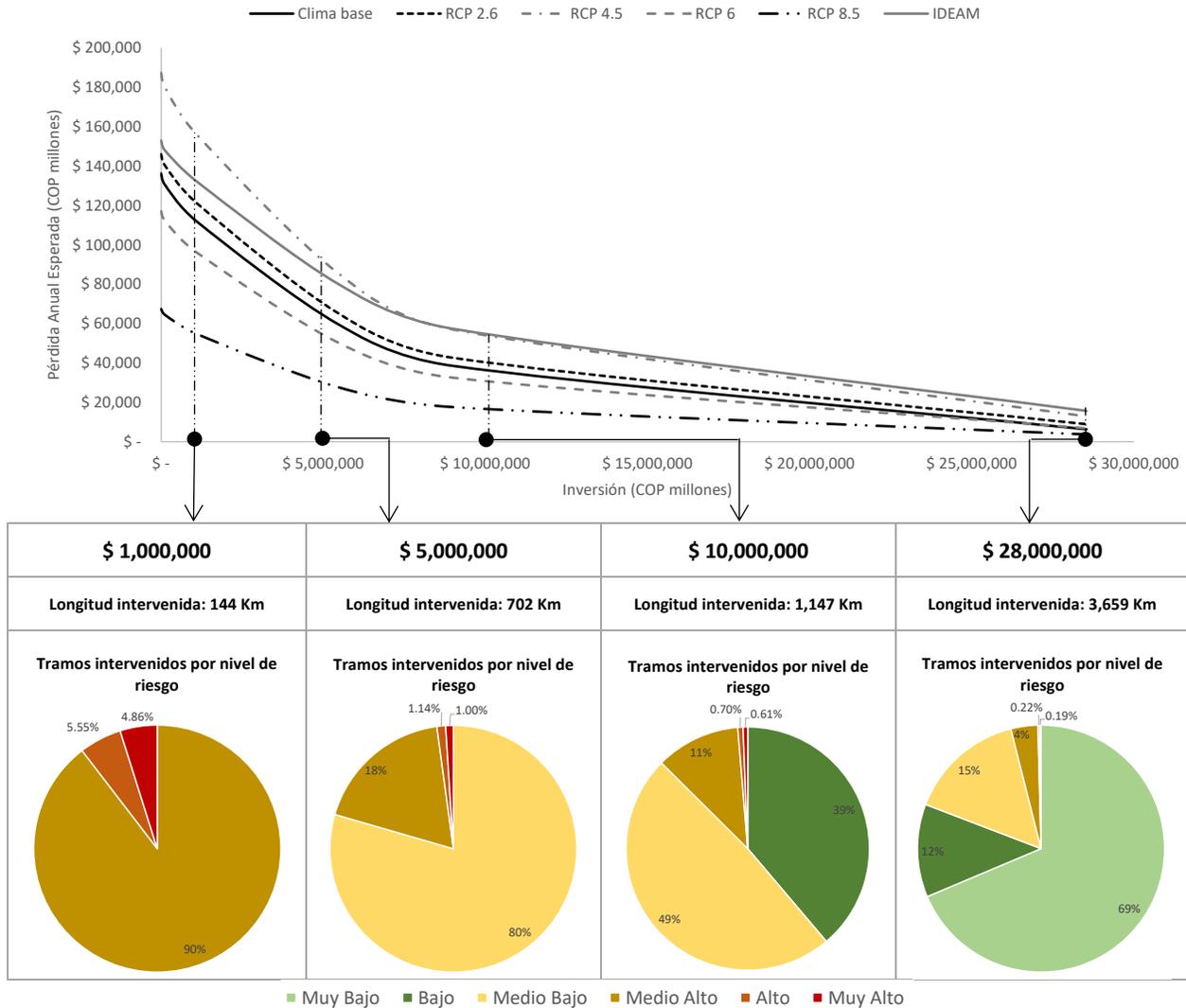


Figura 5-8. Variación de la PAE como función del monto de inversión en adaptación para la red vial principal. Se presentan 4 estrategias de adaptación seleccionadas arbitrariamente con sus correspondientes montos de inversión y la distribución de tramos intervenidos en función de su clasificación de riesgo.

5.3.1 Adaptación a nivel departamental

A medida que se invierte más dinero en adaptación, se cubren mayores longitudes de vía, de una manera que no es uniforme en todo el país, considerando adicionalmente que el modelo solamente incluye la red vial que existe dentro de la zona susceptible a deslizamientos. La Figura 5-9 muestra mapas de longitud intervenida por departamento para los mismos 4 niveles de adaptación seleccionados arbitrariamente en la Figura 5-8.

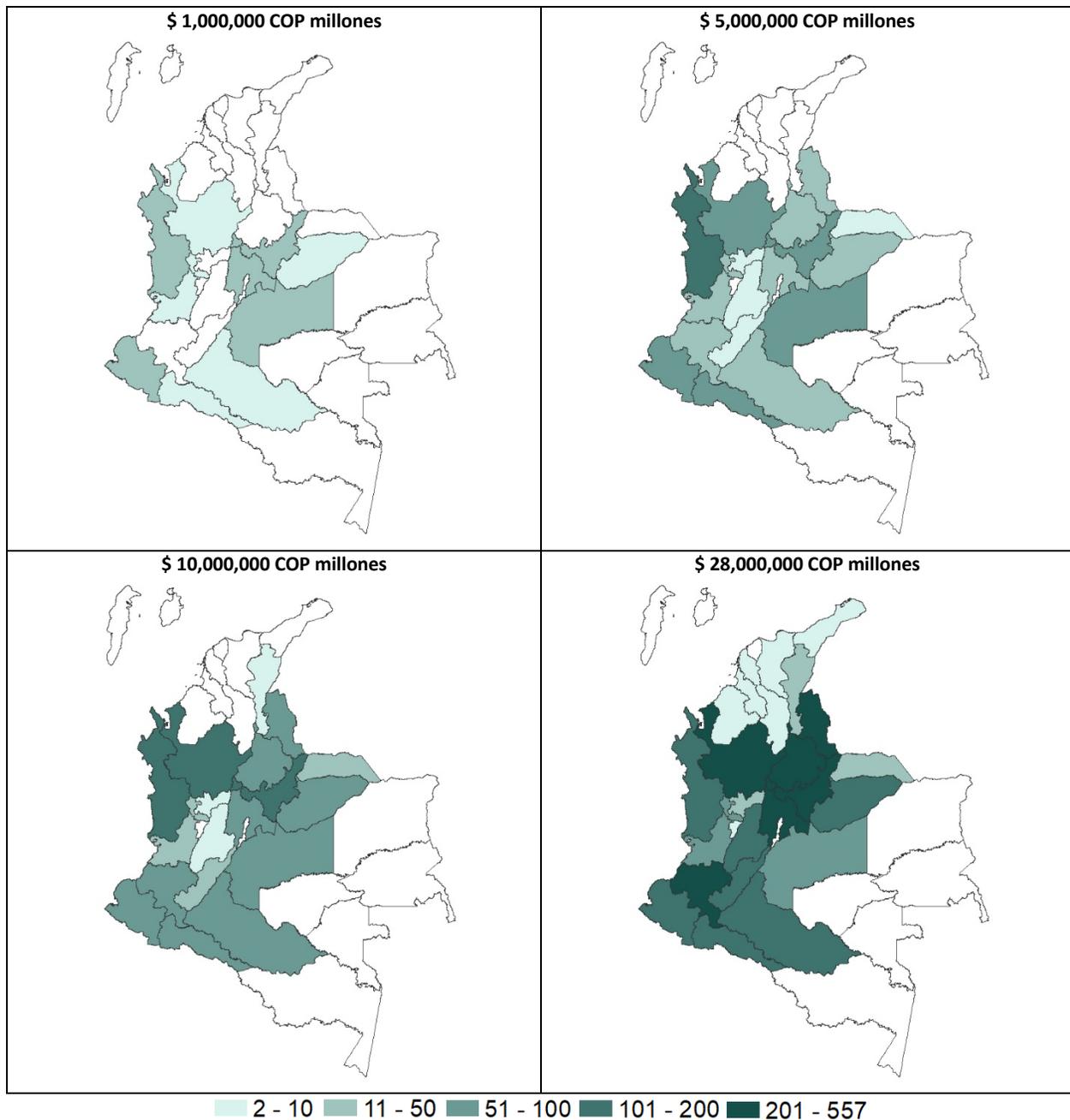


Figura 5-9. Distribución de longitudes de vía intervenida (Km) a nivel departamental para 4 montos de inversión seleccionados.

La Figura 5-10, muestra cómo cambian las PAE a nivel departamental al considerar diferentes niveles de adaptación, correspondientes a los mismos 4 niveles seleccionados. Se presentan mapas de variación de la PAE a nivel departamental para el clima más desfavorable para el caso de deslizamientos, y gráficos con los valores calculados para todos los climas. Se excluye San Andrés y Providencia de este análisis pues no se contó con información para la modelación del riesgo por deslizamientos en el archipiélago. Así mismo no se presenta información para Amazonas, Guainía, Vaupés, Vichada por presentar riesgo de deslizamientos nulo.

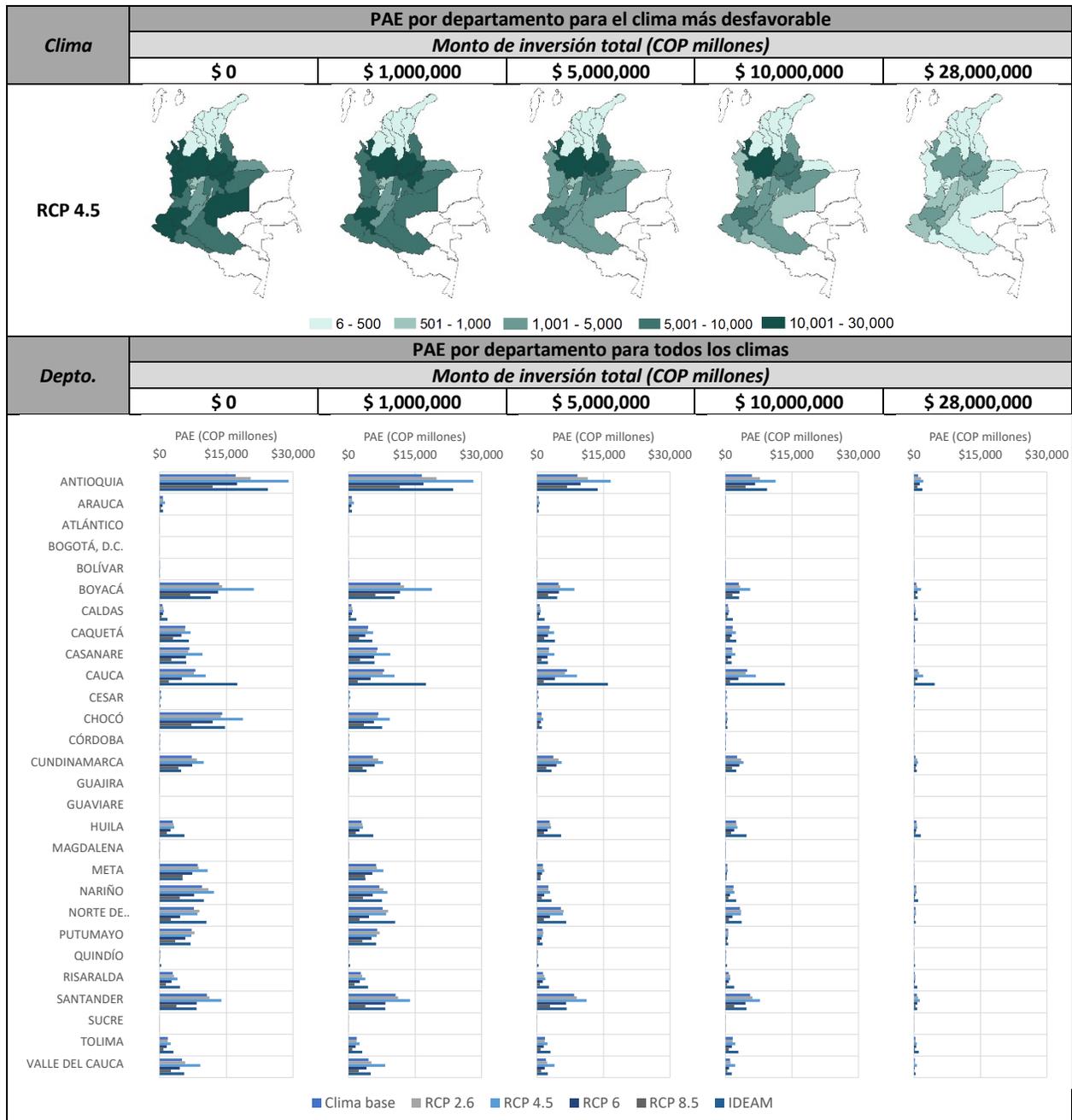


Figura 5-10. Cambio en la PAE departamental por deslizamientos para la red vial principal bajo estrategias de adaptación con diferentes montos totales de inversión (se excluye San Andrés y Providencia por no estar incorporado en el modelo de deslizamientos. Se excluyen Amazonas, Guainía, vichada y Vaupés por no tener riesgo de deslizamientos).

5.4 Sequía

La agricultura es particularmente vulnerable a los desastres asociados a amenazas naturales, por su alta dependencia a las condiciones climáticas. Los desastres impactan al sector agrícola más allá del corto plazo, en especial los desastres asociados a eventos de sequía cuya fecha de inicio, duración y fecha de resolución no son fácilmente determinables. La adaptación en este caso se centra en mejorar los

rendimientos y la producción de los cultivos analizados ante condiciones climáticas que pueden variar de manera importante según como se manifieste el clima futuro. La Tabla 5-4 muestra las PAE de ambos portafolios ante los seis climas considerados en las condiciones actuales.

Tabla 5-4. PAE en cultivos de Maíz y Arroz para los 6 climas considerados

Cultivo	Valor expuesto (COP millones) ¹⁰	PAE (COP millones)					
		Clima Base	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	CC IDEAM
Maíz	1,796,649	\$17,231	\$17,214	\$16,632	\$17,264	\$17,016	\$15,727
Arroz	1,743,656	\$4,945	\$5,702	\$3,191	\$5,401	\$6,096	\$6,012
Total	3,540,214	\$22,176	\$22,916	\$19,823	\$22,665	\$23,112	\$21,739

La Figura 5-11 muestra la reducción en pérdida anual con respecto a los montos de inversión, para todos los climas considerados. Se muestran las pérdidas para el portafolio total, es decir, sumando las pérdidas en el portafolio nacional de maíz y arroz de secano. Se presentan 4 montos de inversión arbitrarios y se desagrega la adaptación para cada uno de ellos en función del número de hectáreas intervenidas por cada producto. Dado que las medidas son diferentes para cada cultivo, se presentan de forma diferenciada. La única medida de adaptación no incluida en la Figura 5-11 es el seguro agrícola, el cual se desarrolla más adelante en esta sección. Como hemos discutido anteriormente, la función de Inversión versus PAE tiende a estabilizarse después de cierto monto de inversión, y tiene a reducirse la volatilidad de la PAE con el clima futuro. No obstante, en este caso dicho comportamiento no es tan marcado como en los demás portafolios evaluados. Esto se debe principalmente a la variabilidad normal en la producción agropecuaria, la cual fluctúa año a año no solo por condiciones climáticas, sino por situaciones de mercado, orden público, acceso a créditos, costos de insumos, decisiones del agricultor, entre muchos otros aspectos no considerados en la modelación.

5.4.1 Adaptación a nivel departamental

La Figura 5-12 y Figura 5-13 muestran la distribución de áreas productivas a ser intervenidas por cada medida de adaptación en cada departamento. Los 4 montos de inversión indicados son los mismos mostrados en la Figura 5-11. Es posible ver que la cantidad de hectáreas intervenidas por las diferentes medidas cambia sustancialmente de un departamento a otro, reflejando las condiciones particulares del territorio y la mayor o menor efectividad de las medidas en cada caso.

Las diferentes estrategias de adaptación implican una reducción en la PAE de los departamentos, como se muestra en la Figura 5-14 y en la Figura 5-15, en las cuales se indica la PAE resultante para los cuatro niveles de inversión previamente seleccionados sobre el dominio de posibles inversiones. Se presentan mapas que permiten ver la distribución espacial de los cambios en la PAE para el clima más desfavorable para el caso de sequías, que corresponde al RCP 8.5. Se presentan también gráficos de barras con las PAE para la totalidad de climas. Es posible ver como la PAE gradualmente se va reduciendo de forma diferenciada entre los departamentos, en función de las medidas implementadas en cada uno de ellos.

¹⁰ La producción expuesta presentada corresponde a la estimada para el Clima base.

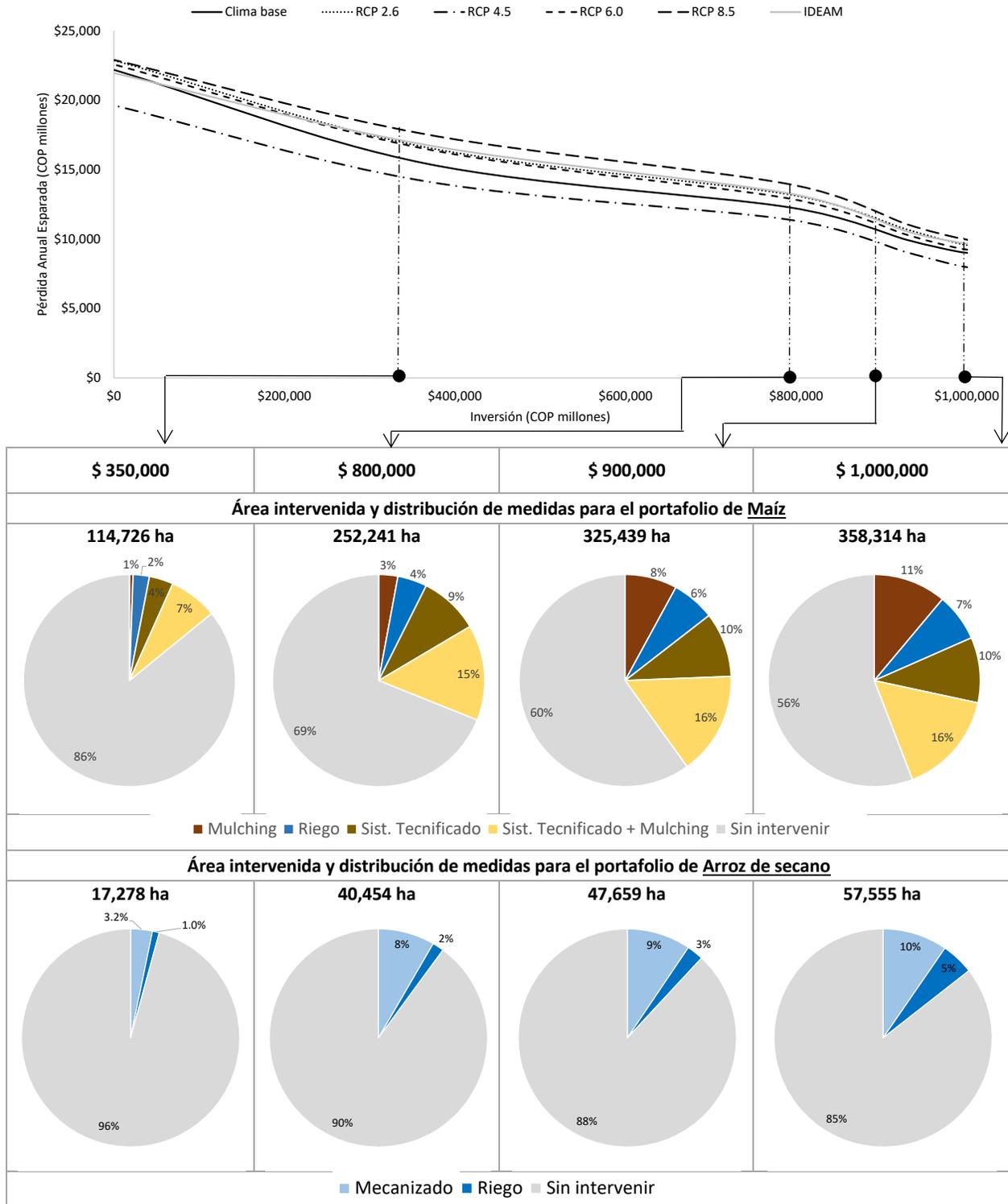


Figura 5-11. Variación de la PAE como función del monto de inversión en adaptación para el sector agrícola. Se presentan 4 estrategias de adaptación seleccionadas arbitrariamente con sus correspondientes montos de inversión y {áreas totales intervenidas, y la distribución de medidas aplicadas sobre la totalidad del portafolio.

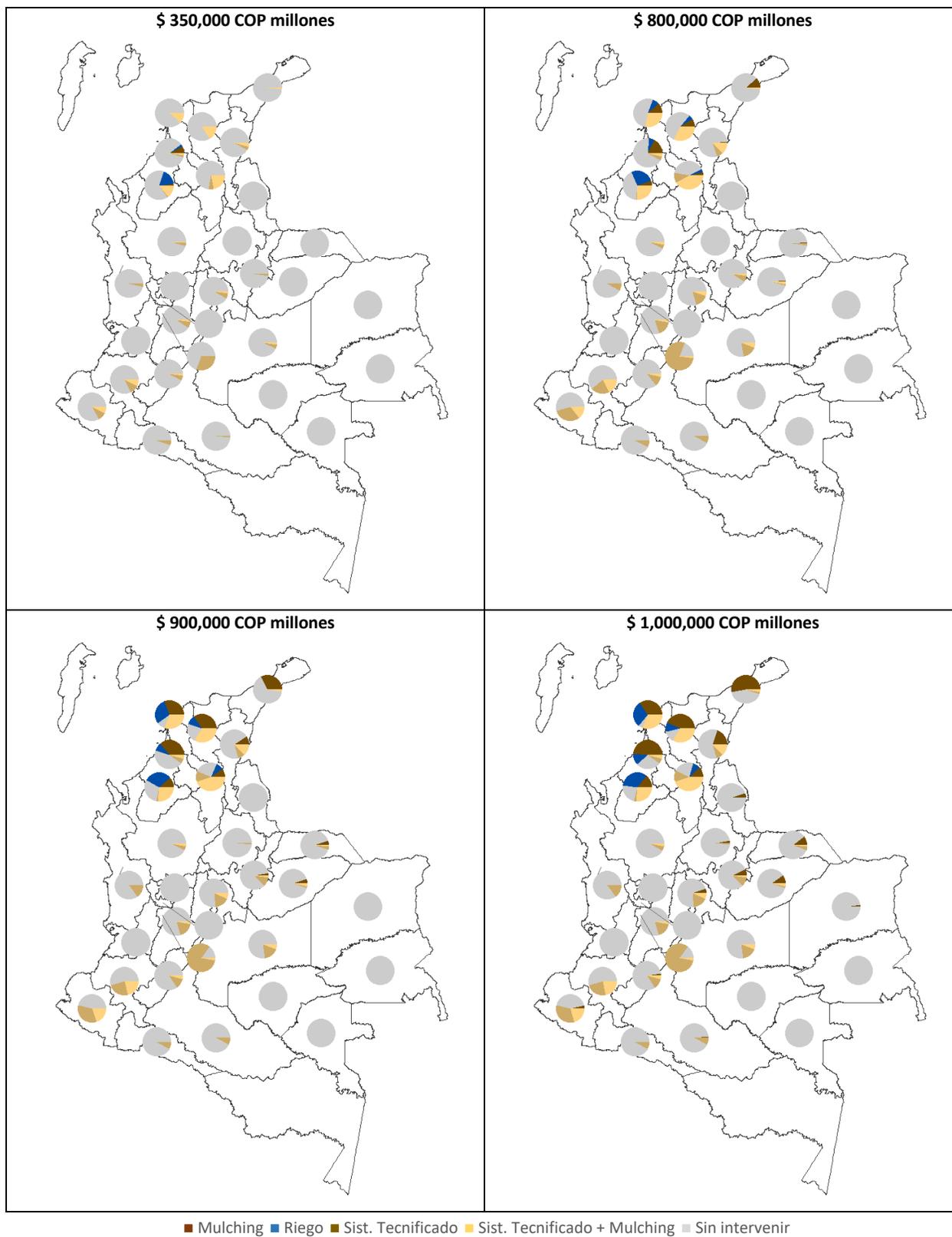


Figura 5-12. Distribución de medidas de adaptación en el portafolio de maíz a nivel departamental para 4 montos de inversión seleccionados.

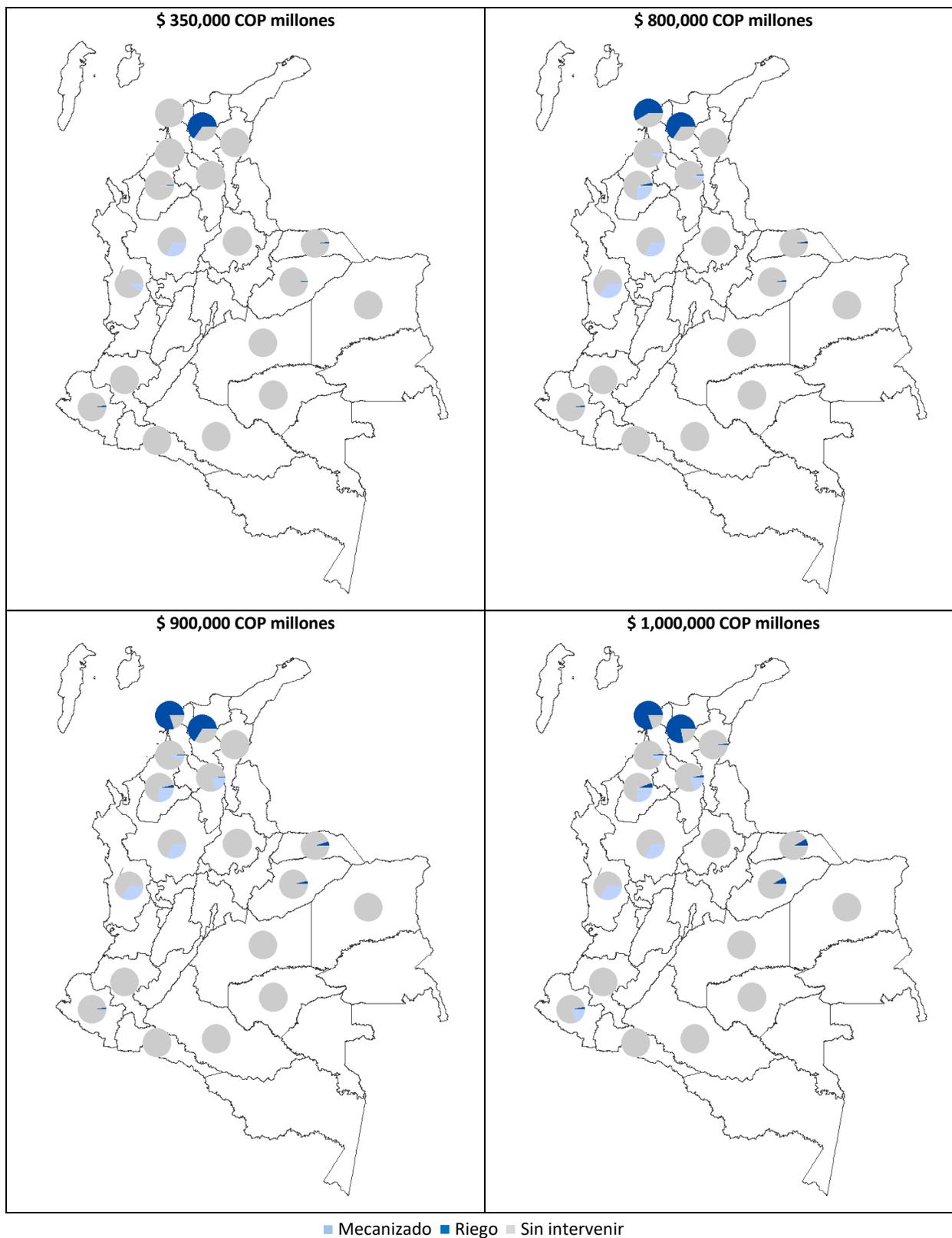


Figura 5-13. Distribución de medidas de adaptación en el portafolio de arroz de secano a nivel departamental para 4 montos de inversión seleccionados.

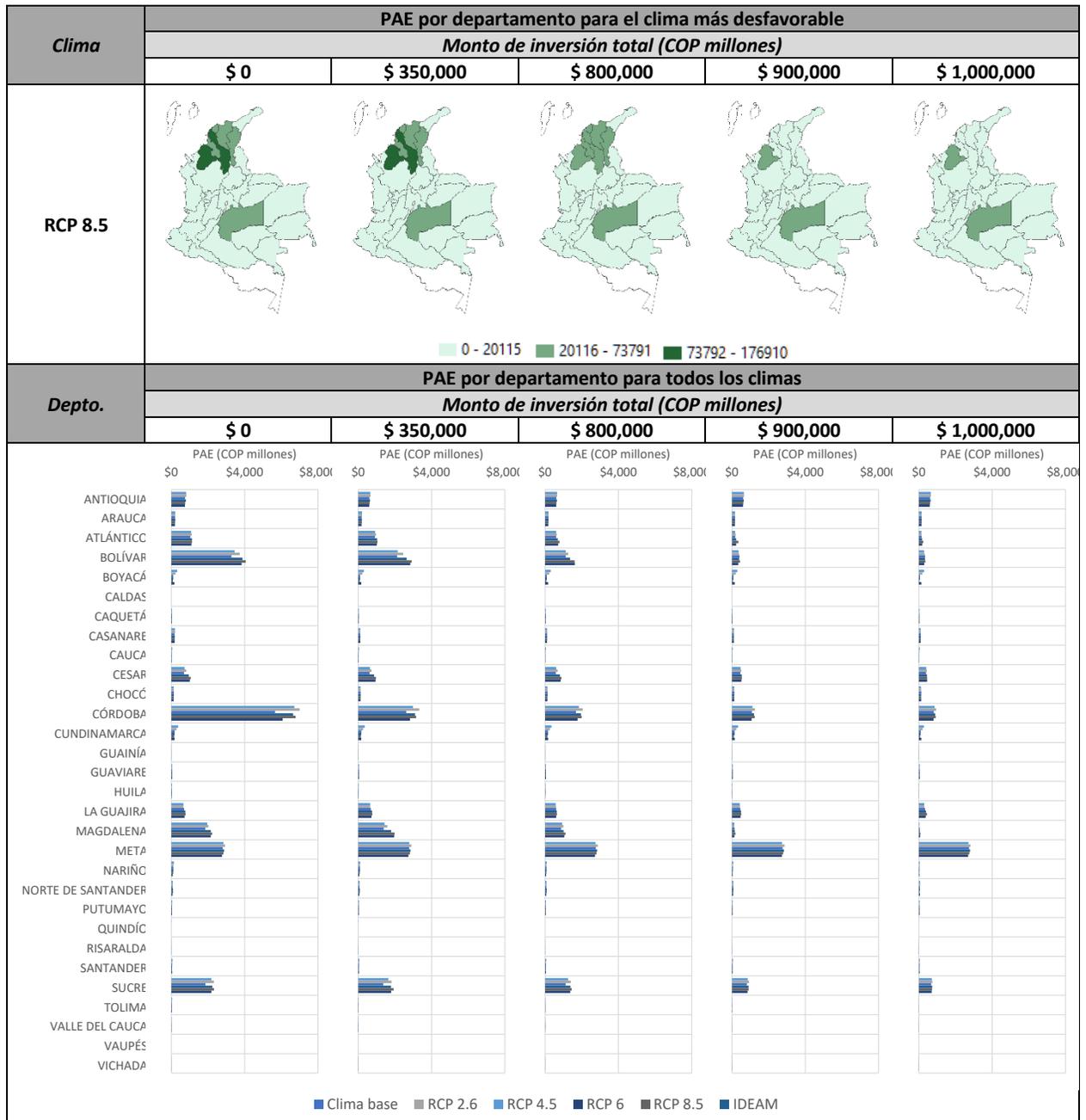


Figura 5-14. Cambio en la PAE departamental por sequía para el portafolio de maíz bajo estrategias de adaptación con diferentes montos totales de inversión (se excluyen los departamentos sin producción de Maíz).

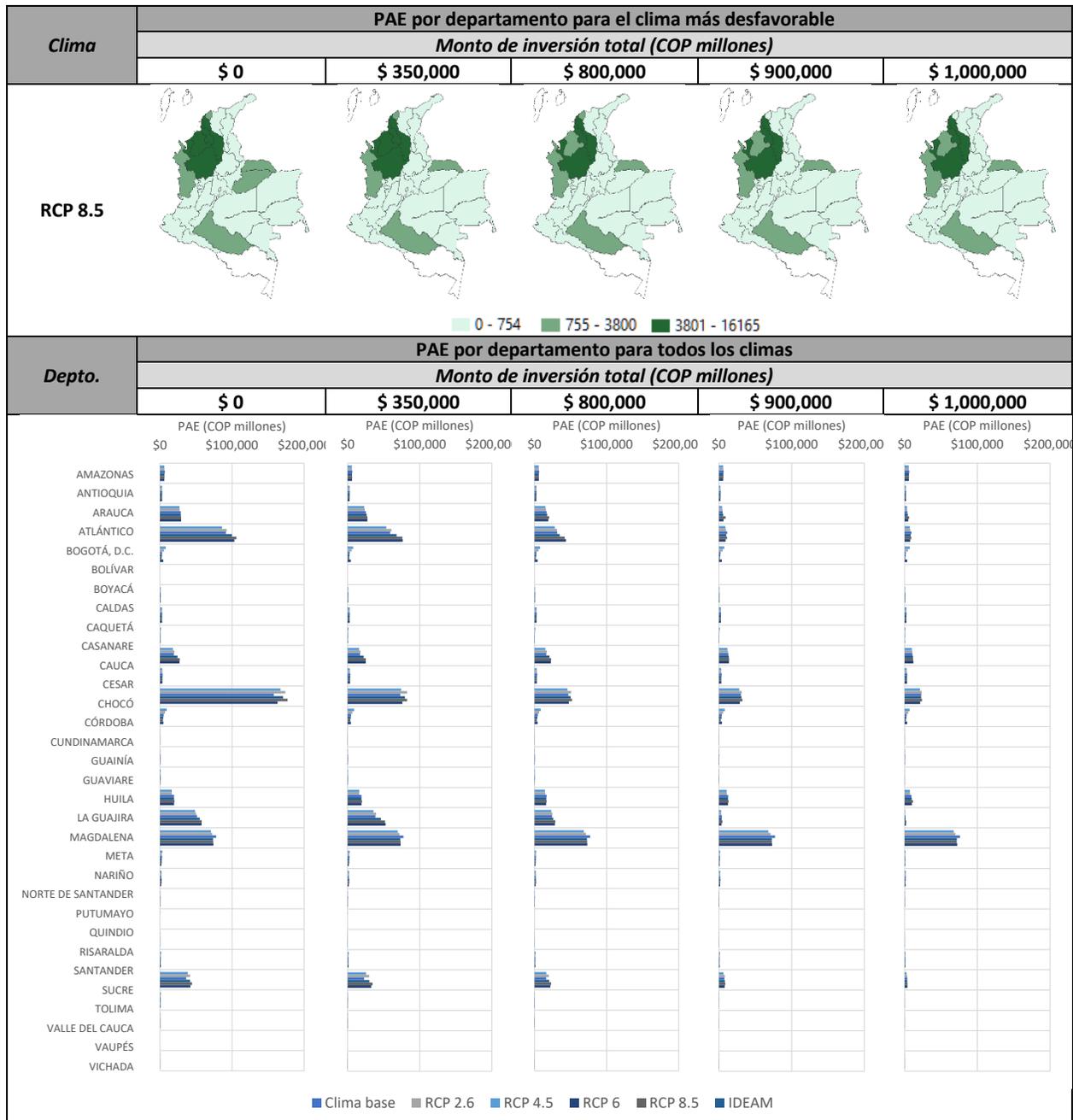


Figura 5-15. Cambio en la PAE departamental por sequía para el portafolio de arroz de seco bajo estrategias de adaptación con diferentes montos totales de inversión (se excluyen los departamentos sin producción de arroz de seco).

5.4.2 Seguro agrícola

El problema de las pérdidas para el sector agrícola por fenómenos extremos, y en este caso particular por sequías, se centra en los cambios que inducen estos fenómenos en la producción anual. Esta producción fluctúa normalmente en el tiempo por condiciones no asociadas al clima, como por ejemplo situaciones de mercado a nivel mundial, sobre las cuales poco control se tiene desde cualquier nivel territorial en el país. Esto le induce una mayor variabilidad e incertidumbre a la producción en el sector. Ahora bien, las

pérdidas que se causen por fenómenos hidrometeorológicos, exacerbados por cambio climático, afectan principalmente la producción, y no los medios con los cuales se genera dicha producción (tierra, maquinaria, infraestructura, etc.). Otro tipo de fenómenos naturales podrían eventualmente afectar estos medios de producción, como los terremotos o los huracanes. No obstante, dado el enfoque de este trabajo en el impacto de las sequías, es posible interpretar estos impactos como un problema netamente financiero, en el cual se presentan años con ganancias y años con pérdidas. Para los años con pérdidas, es posible dimensionar entonces un mecanismo de compensación (seguro) para el sector, de tal manera que mantenga su productividad y competitividad.

En esta sección se presenta el dimensionamiento de un seguro agrícola para Colombia, con el objetivo de ilustrar las ventajas de una medida de adaptación como esta. Este ejercicio está basado en el trabajo desarrollado en la “Actualización y ajuste de la información obtenida en el Estudio de Factibilidad del Seguro Agrícola Catastrófico para el cultivo de maíz blanco tradicional en los departamentos de Antioquia y Tolima”, desarrollado por INGENIAR (2020) para FINAGRO, expandiendo su alcance al portafolio completo de maíz y arroz de secano. No obstante, en un futuro, es necesario considerar el portafolio agropecuario completo del país si se quiere contar con un instrumento efectivo y atractivo para las compañías de seguros.

5.4.2.1 Rendimiento protegido

En INGENIAR (2020) se plantea un esquema de protección basado en Índices de Área-Rendimiento. Con este tipo de seguro, la indemnización se basa en el rendimiento promedio existente (cosechado) en el portafolio. El rendimiento asegurado se establece como un porcentaje del rendimiento promedio para el área, de tal manera que se paga una indemnización si el rendimiento promedio obtenido en el área es menor que el rendimiento asegurado, independientemente del rendimiento real a nivel de finca.

En esquemas de seguro agrícola basados en Índices de Área-Rendimiento, el rendimiento protegido oscila entre percentil 50 y 90 del rendimiento promedio histórico del área donde se establece el instrumento. El nivel final de rendimiento protegido dependerá esencialmente del apetito de riesgo del asegurador, así como de la recurrencia de la siniestralidad simulada. Para este ejercicio, se definieron 3 niveles de rendimiento protegido con el propósito de comparar los resultados: percentil 50, 60 y 70 del rendimiento simulado en las series climáticas de 1000 años. Un umbral de, por ejemplo, percentil 70, significa que, si el rendimiento calculado se encuentra por debajo del 70% de todos los rendimientos simulados, se causa una reclamación. Dado que los rendimientos cambian según el clima considerado, se dimensiona en este caso el seguro para el clima más desfavorable para el sector, que corresponde al RCP 8.5.

5.4.2.2 Reclamaciones

El pago de reclamaciones procede luego de la verificación del rendimiento en el área de cobertura, el cual, en caso de ser inferior al rendimiento protegido, implica el pago de la reclamación, independientemente del rendimiento real a nivel de finca. Esto implica que el seguro cubre el portafolio entero, de tal forma que las indemnizaciones se producen como compensación a pérdidas en el portafolio completo y no a nivel de finca. El tomador de la póliza debe ser una institución del Estado, responsable del desarrollo agropecuario del país (e.g. Ministerio de Agricultura). Dicha institución genera un aviso de siniestro, el cual es verificado para la totalidad del portafolio cubierto por medio de la modelación de la pérdida en producción esperada para el ciclo, sea que esté en curso o ya haya terminado. La pérdida modelada es

luego transformada según las condiciones de póliza existentes en pérdida neta, que será cubierta por la compañía aseguradora y pagada como compensación a la institución tomadora del seguro. INGENIAR (2020) presenta una propuesta para un mecanismo de reclamaciones basadas en pérdidas modeladas para el sector agrícola en Colombia.

5.4.2.3 Esquema de seguro

Con el fin de evaluar la protección catastrófica, se define una estructura de retención y transferencia convencional compuesta por 3 capas, como se ilustra en la Figura 5-16.

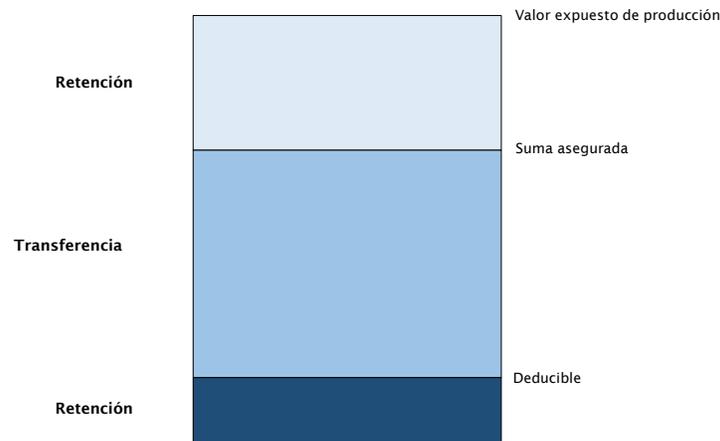


Figura 5-16. Esquema de seguro

En este esquema de seguro, los montos de pérdida entre el deducible y la suma asegurada serán cubiertos por la compañía de seguros, mientras que cualquier monto inferior al deducible, o superior a la suma asegurada se considera retención del tomador de la póliza.

Las condiciones finales de póliza deberán ser establecidas por la compañía de seguros que oferte el seguro agrícola catastrófico. Sin embargo, con el fin de hacer comparaciones de resultados, se definieron los siguientes criterios:

- Se asume que la cobertura del seguro es a la producción. Si bien lo usual en seguros catastróficos es que se cubran los insumos de la actividad agrícola, este enfoque no compensa las pérdidas y por lo tanto se pierde por completo el objetivo de contratar un seguro. Se asume entonces que la suma asegurada corresponde a la producción umbral, según el umbral de rendimiento seleccionado.
- Con el fin de estudiar su efecto, se realizaron los cálculos con diferentes deducibles: 0.5%, 0.75% y 1.5% de la suma asegurada.

5.4.2.4 Valoración del seguro

En este ejercicio de modelación se consideró el portafolio completo de Maíz y Arroz de secano, por lo que las cifras presentadas en esta sección son para un seguro que cubre la producción de estos dos cultivos a nivel nacional. La Figura 5-17 muestra las principales métricas de riesgo y de valoración del seguro, cuyo significado se detalla en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5. Descripción y ecuación de métricas de valoración del seguro

Métrica	Unidades	Descripción	Ecuación
Área cultivada	ha	Área cultivada total del portafolio	A
Rendimiento promedio	Ton/ha	Valor medio del rendimiento del portafolio	\bar{Y}
Mínima producción simulada	Ton	Valor mínimo simulado de producción, asociado al evento de mayor pérdida en producción	-
Precio producto	COP/ton	Precio al productor	V
Suma asegurada	COP millones	Valor total de costo de los insumos para el portafolio	$SA = A \cdot \bar{Y} \cdot V$
Umbrales de rendimiento	-	Percentiles 50, 60 y 70 de las series de rendimiento simulado	-
Rendimiento protegido	ton/ha	Rendimiento correspondiente al percentil indicado	Y
Producción umbral	ton	Producción correspondiente al rendimiento protegido	$P = A \cdot Y$
Producción expuesta	COP millones	Producción total del portafolio para el rendimiento protegido	$PE = P \cdot V$
PML 1000 años	COP millones	PML para 1000 años de periodo de retorno	PML
Pérdida Anual Esperada	COP millones	Valor promedio de la pérdida en producción en la totalidad de la serie simulada	PAE
Prima Pura de Riesgo (Producción)	-	Corresponde a la PAE normalizada por la Producción Expuesta	$PP = PAE/PE$
Deducible	-	0.5%, 0.75% y 1.5% de la Suma Asegurada	-
Siniestralidad esperada	COP millones	Valor promedio del monto de las reclamaciones en la totalidad de la serie simulada	SE
Prima Pura de Riesgo (Siniestralidad)	-	Corresponde a la Siniestralidad Esperada normalizada por la Suma Asegurada	$PP_S = SE/SA$
Prima comercial (aprox.)	-	Aproximación al sobrecosto por administración, operación y utilidad de la compañía de seguros. Se asume 150% de SE (ver Tabla 4-5)	$PC = 1.5SE$
Número de siniestros simulados	-	Número de eventos en los cuales se causa una reclamación en la totalidad de la serie simulada	NS
Tasa de siniestros	-	Tasa anual de ocurrencia de siniestros determinada de la serie de 1000 años	$TS = NS/1000$
Máxima reclamación	COP millones	Valor máximo de reclamación simulado	MR
ROL	-	Rate-On-Line. Métrica que establece el nivel de protección obtenido por el pago de las primas	$ROL = SE/MR$
Periodo de recuperación	Años	Inverso del ROL. Establece número promedio de años en el cual se compensan los siniestros con el pago de las primas.	$PR = 1/ROL$
PAE residual	COP millones	Pérdida anual esperada residual para el tomador del seguro, descontando las compensaciones recibidas por parte del asegurador	-
Máximo monto retenido	COP millones	Máximo valor simulado del monto en retención en los 1000 años de simulación	-
Histogramas de distribución de la siniestralidad	-	Calculados para cada combinación de umbral de rendimiento y deducible. Muestran el número de reclamaciones para diferentes montos.	-
Curvas de PML de siniestralidad	-	Calculadas para las combinaciones de umbral de rendimiento y deducible. Muestran el riesgo catastrófico para la compañía de seguros.	-

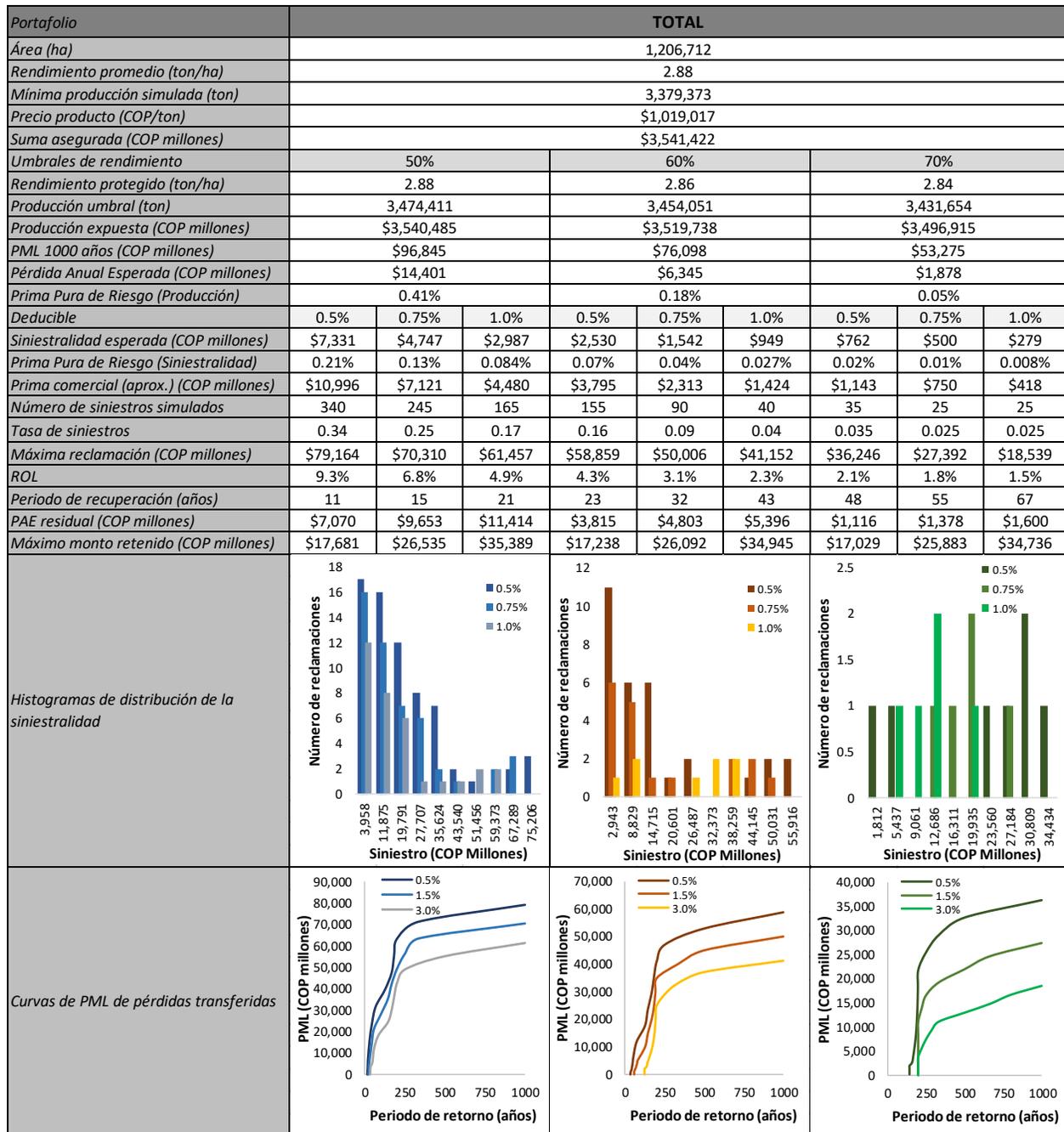


Figura 5-17. Métricas de valoración del seguro catastrófico calculadas para el portafolio total de Maíz y Arroz de seco.

La interpretación de los resultados presentados en la Figura 5-17 debe hacerse a la luz de las definiciones dadas en la Tabla 5-5. Estas cifras permitirían cuantificar preliminarmente un seguro agrícola catastrófico enfocado a la protección de la producción. Estas valoraciones pueden ser empleadas en un primer proceso de exploración de posibles protecciones catastróficas y deben ser analizadas en detalle por parte del Gobierno Nacional.

5.5 Incendios forestales

En el caso de los incendios forestales, solo se prevé como medida de adaptación el mejoramiento de las capacidades de respuesta de bomberos, reduciendo así los tiempos de respuesta y minimizando las áreas quemadas en cada incendio. Esta sería una medida de adaptación totalmente centrada en el manejo de desastres. La Tabla 5-6 muestra los valores de PAE obtenidos en el producto 2 de esta consultoría, en términos de flujo de servicios ecosistémicos para los 6 climas considerados. Estos valores indican la condición actual de riesgo con las capacidades existentes para combatir el fuego.

Tabla 5-6. PAE en servicios ecosistémicos por incendios forestales en Colombia para los 6 climas considerados

Valor expuesto (COP millones)	PAE (COP millones)					
	<i>Clima Base</i>	<i>RCP 2.6</i>	<i>RCP 4.5</i>	<i>RCP 6.0</i>	<i>RCP 8.5</i>	<i>CC IDEAM</i>
\$3,065,960,374	\$2,764,957	\$3,057,112	\$3,428,349	\$3,174,211	\$3,953,161	\$3,147,874

A partir de los criterios de simulación dados en la sección 4.5, se simula el efecto de mejorar gradualmente la capacidad de combatir el fuego del país, logrando paulatinamente una reducción en la PAE en servicios ecosistémicos por incendios forestales. La Figura 5-18 muestra la variación de la PAE como función del monto de inversión. Se seleccionaron 4 montos arbitrarios que son detallados en términos de la cantidad de helicópteros UH60 requeridos, las horas de vuelo totales simuladas, y las estaciones de la FAC dedicadas a combatir el fuego.

En este caso se marca muy bien el límite superior de la adaptación, alrededor de los \$550,000 millones de pesos, a partir del cual mayores inversiones no derivan en reducciones significativas en la pérdida, y en donde además se logra una estabilización del nivel de riesgo residual de forma independiente a como se manifieste el clima en el futuro. También es importante resaltar que, dado el elevado costo de los servicios ecosistémicos de acuerdo con la metodología empleada en este estudio para valorarlos (ver Producto 2 de esta consultoría), si bien los montos de pérdida son los más elevados comparando con todos los demás sectores evaluados, también son las pérdidas que menos cuesta reducir, es decir, una inversión relativamente menor le ahorra al país una pérdida multimillonaria en servicios ecosistémicos. Es importante esta apreciación pues este es el único caso, de los evaluados en este estudio, en donde la relación beneficio/costo de la adaptación es superior a 1.

Las medidas de adaptación para incendios forestales aquí evaluadas deben ser implementadas por el Gobierno Nacional, y no por los departamentos. No se puede hablar entonces de adaptación a nivel departamental. No obstante, se presentan en la Figura 5-19 los cambios en las pérdidas por servicios ecosistémicos a nivel departamental, para las mismas 4 estrategias seleccionadas en la Figura 5-18, como mapas para el clima más desfavorable en el caso de incendios (RCP 8.5), y como gráficos de barras para todos los climas.

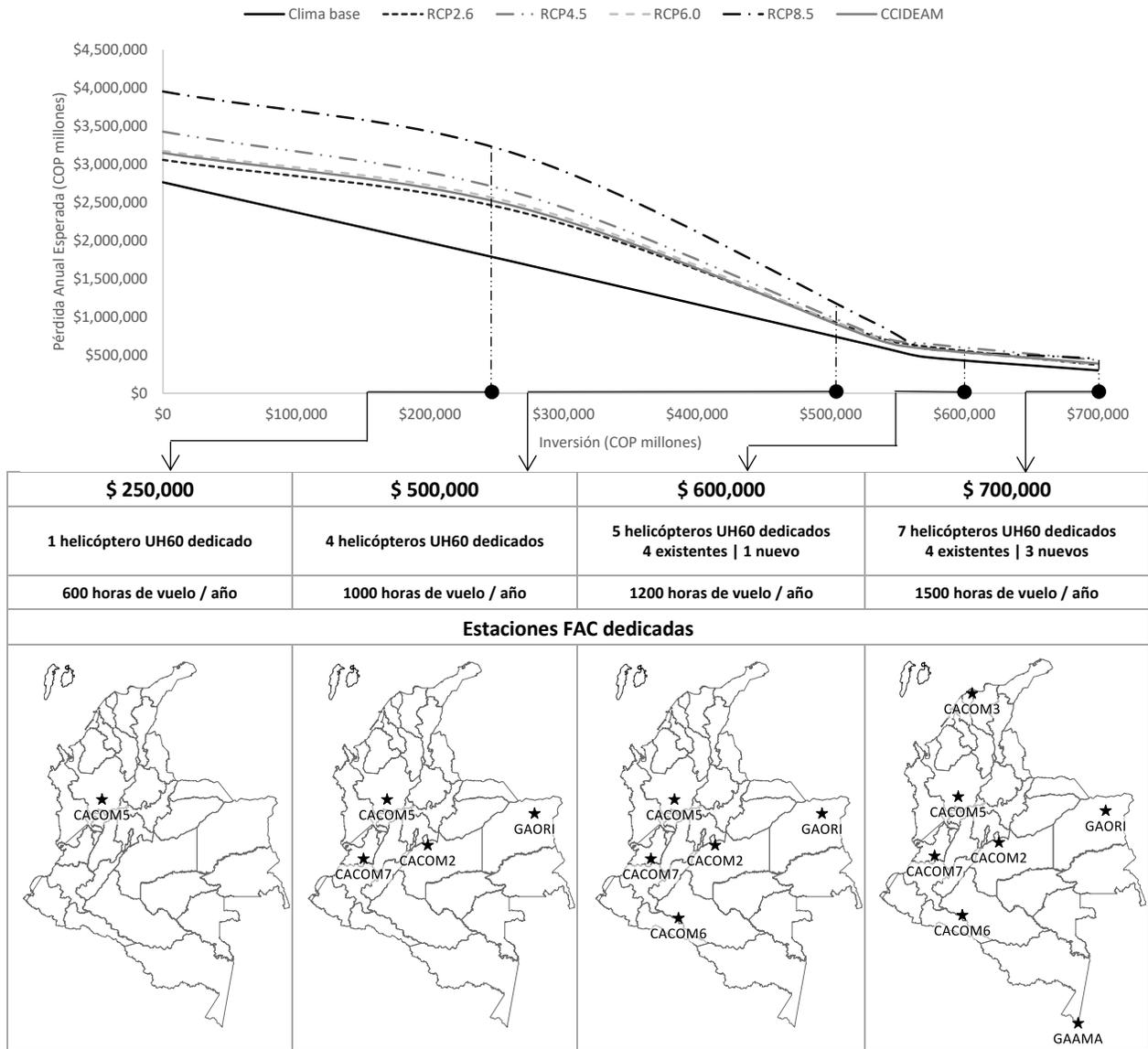


Figura 5-18. Variación de la PAE por cada clima considerado como función del monto de inversión en adaptación. Se presentan 4 estrategias de adaptación seleccionadas arbitrariamente con sus correspondientes montos de inversión y parámetros que las definen.

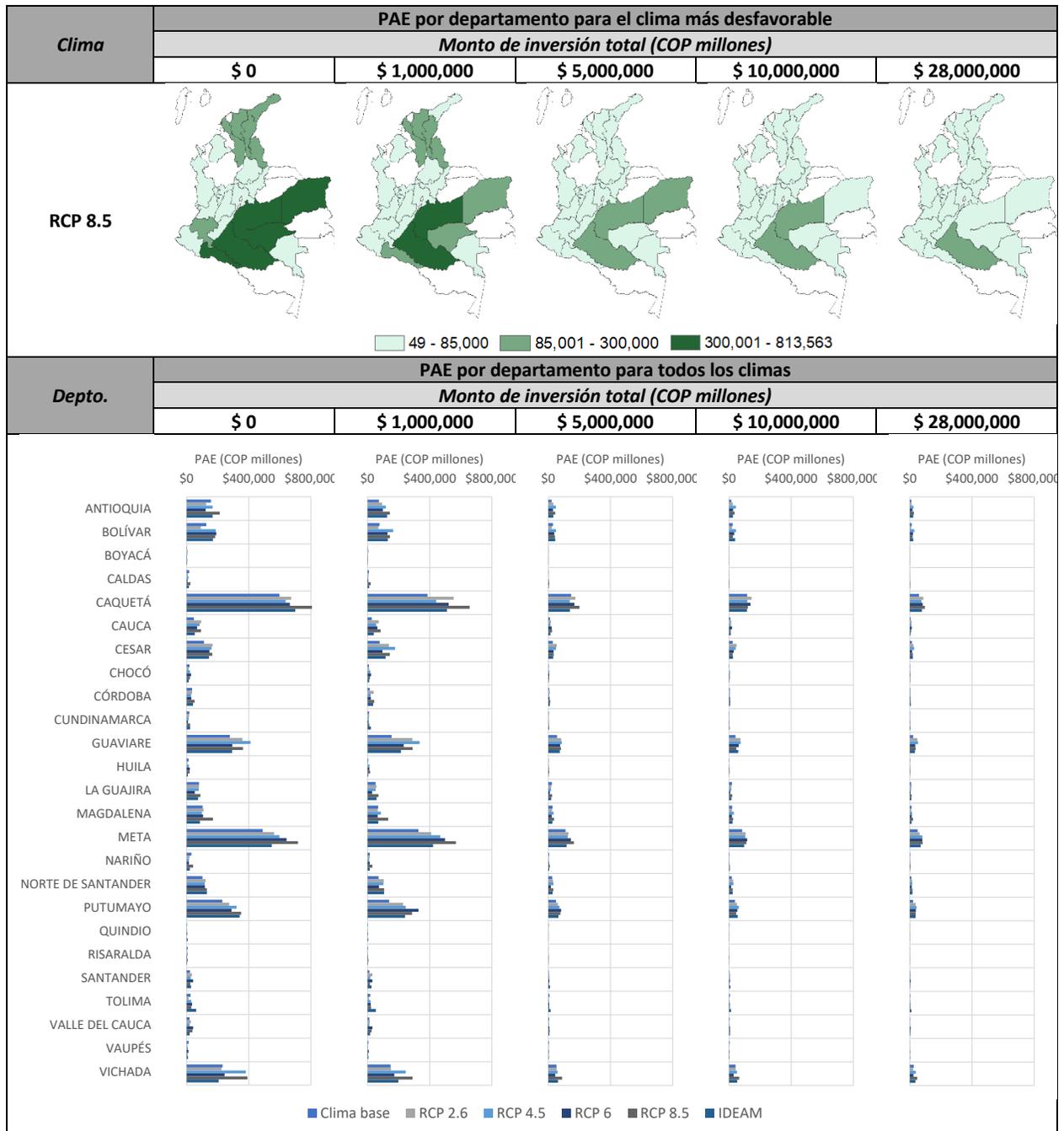


Figura 5-19. Cambio en la PAE departamental por incendios forestales bajo estrategias de adaptación con diferentes montos totales de inversión (se excluyen los departamentos donde no se esperan pérdidas por incendios sobre el bosque natural)

6 PROPUESTA DE METAS DE ADAPTACIÓN PARA COLOMBIA

Dentro del amplio espectro de posibles estrategias y medidas de adaptación evaluadas en este trabajo y que pueden llegar a ser implementadas, se buscó una aproximación metodológica para proponer una colección de metas concretas que puedan ser implementadas en los próximos años, teniendo en cuenta los efectos del cambio climático al 2050.

6.1 Metodología de selección de estrategias de adaptación

La selección de una estrategia de adaptación, dentro de las muchas posibilidades, requiere de una evaluación compensada entre el beneficio esperado y el costo, la factibilidad técnica y política, la capacidad de ejecución institucional, etc., requeridos para su implementación. El procedimiento aquí planteado es esencialmente arbitrario, dado que no contempla un proceso completo de toma de decisiones, ni se incorporan criterios asociados con la institucionalidad y su capacidad de ejecución de las medidas planteadas.

La metodología planteada consiste en encontrar un balance en el beneficio calculado para los diferentes costos totales de estrategias de adaptación. El beneficio alcanza su límite máximo en el límite de la adaptación, y corresponde a la diferencia de la pérdida en el límite con la pérdida para costo cero, es decir, la pérdida sin incorporar ninguna medida de adaptación. Esto se logra ponderando los beneficios en las funciones de pérdida versus costo calculadas.

Se define el beneficio (B) como la diferencia entre la pérdida para cualquier costo y la mínima pérdida (correspondiente al límite de la adaptación),

$$B = P_{min} - P(C)$$

en donde C es la variable costo. La derivada de B con respecto al costo es la función Beneficio-Costo (Y),

$$Y = \frac{dB}{dC}$$

Una vez definida la función Y , es posible encontrar el costo asociado a la estrategia de adaptación correspondiente al beneficio medio como:

$$C_{\bar{B}} = \frac{\int C \cdot Y dC}{\bar{Y}}$$

El costo $C_{\bar{B}}$ corresponde a una estrategia que garantiza un beneficio del 50% del máximo. Como es de esperarse, para cada clima considerado se obtiene un valor de $C_{\bar{B}}$ distinto. El valor final corresponde al promedio aritmético de los valores encontrados para todos los climas. La estrategia de adaptación propuesta para definir metas corresponde a la que tiene un costo $C_{\bar{B}}$.

6.2 Estrategias de adaptación seleccionadas

A continuación, se presentan las estrategias de adaptación seleccionadas como metas para el 2050, aplicando la metodología de selección presentada anteriormente. Para cada amenaza y portafolio considerado se presenta una ficha en la cual se incluye el valor de $C_{\bar{B}}$, su posición en la función Pérdida

versus Costo, la distribución porcentual de acciones a nivel nacional y departamental, y las cifras de elementos intervenidos para lograr la estrategia de adaptación.

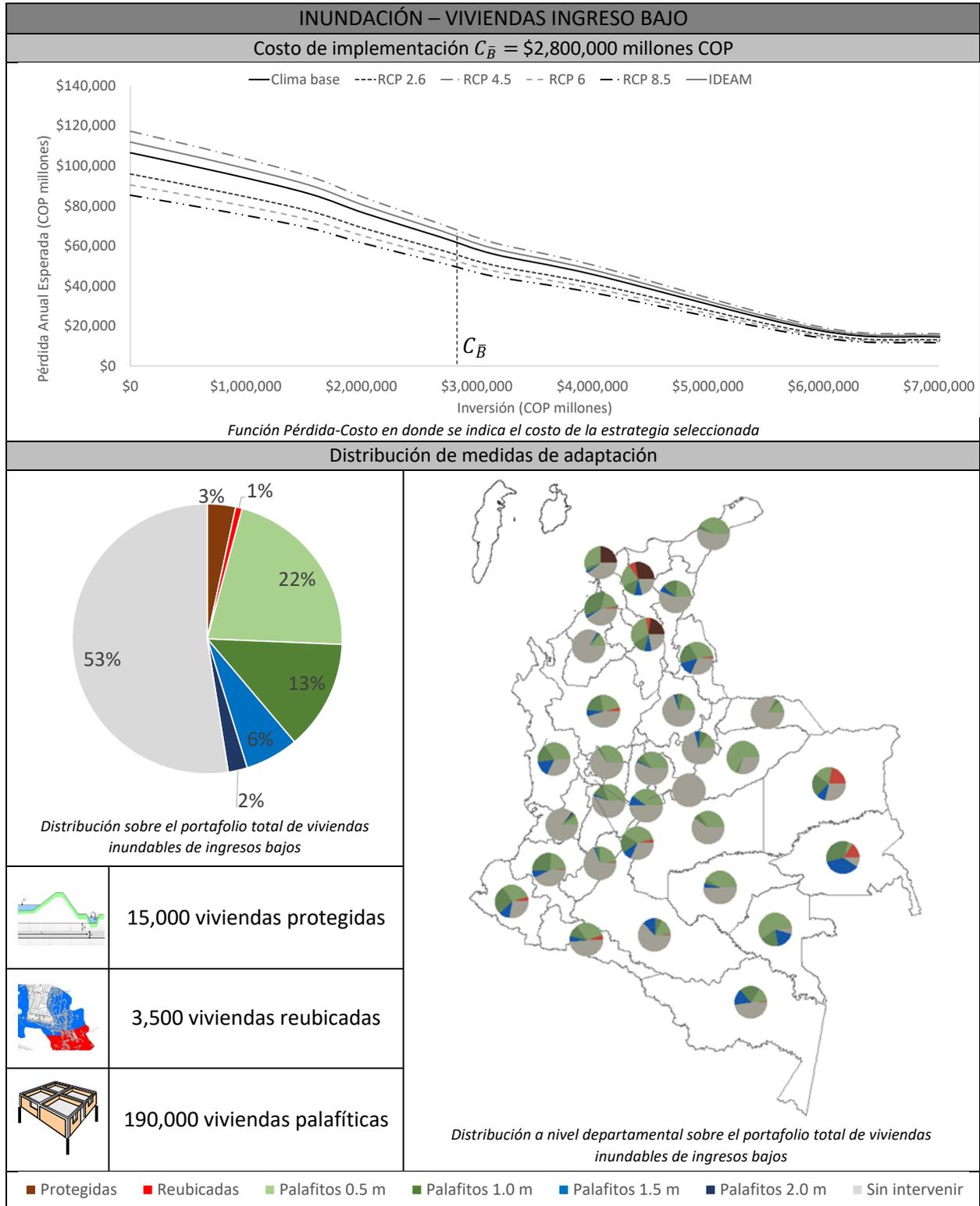


Figura 6-1. Detalle de la estrategia de adaptación seleccionada para inundaciones en viviendas de ingresos bajos

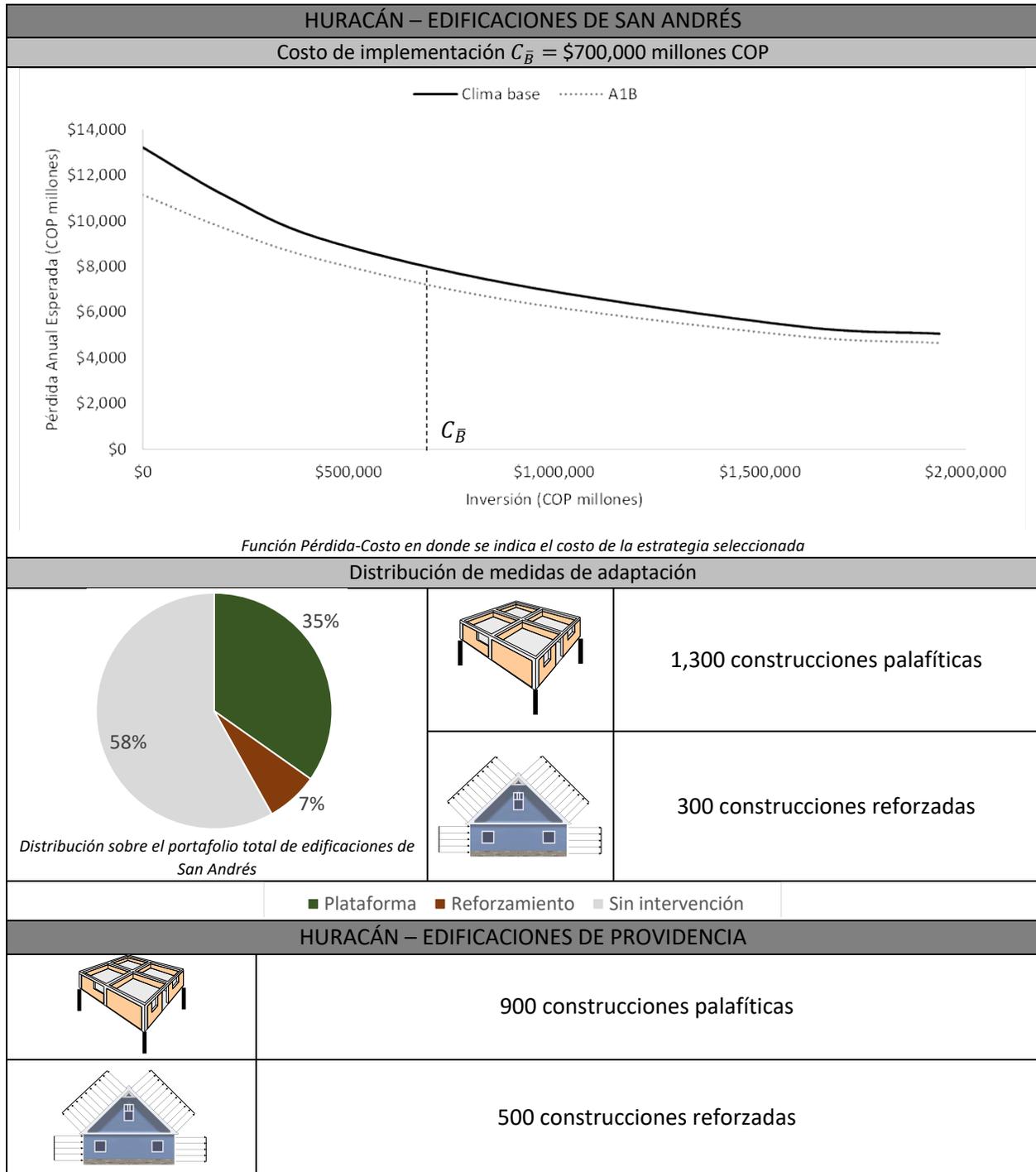


Figura 6-2. Detalle de la estrategia de adaptación seleccionada para huracanes en San Andrés y Providencia

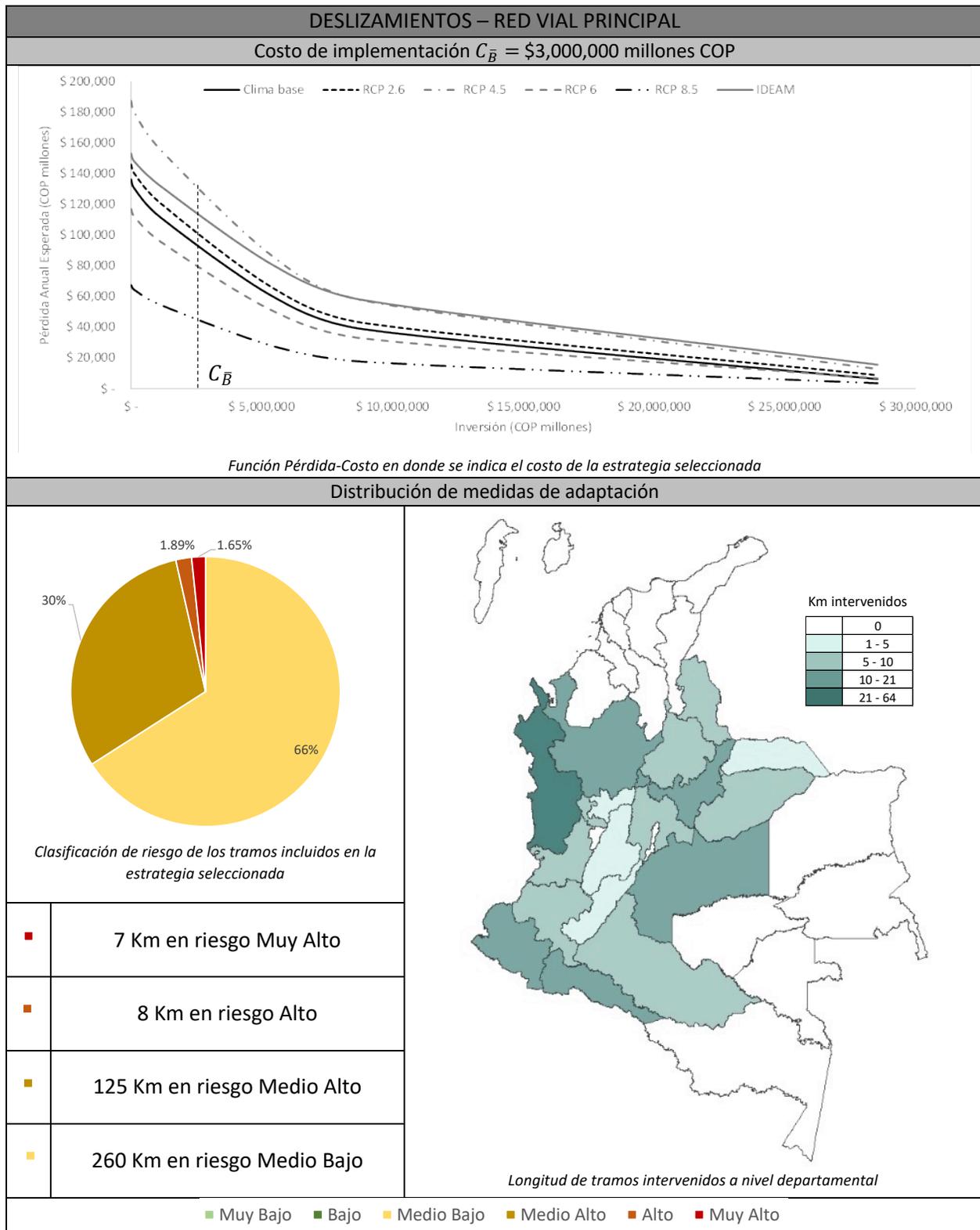


Figura 6-3. Detalle de la estrategia de adaptación seleccionada para deslizamientos en la red vial principal

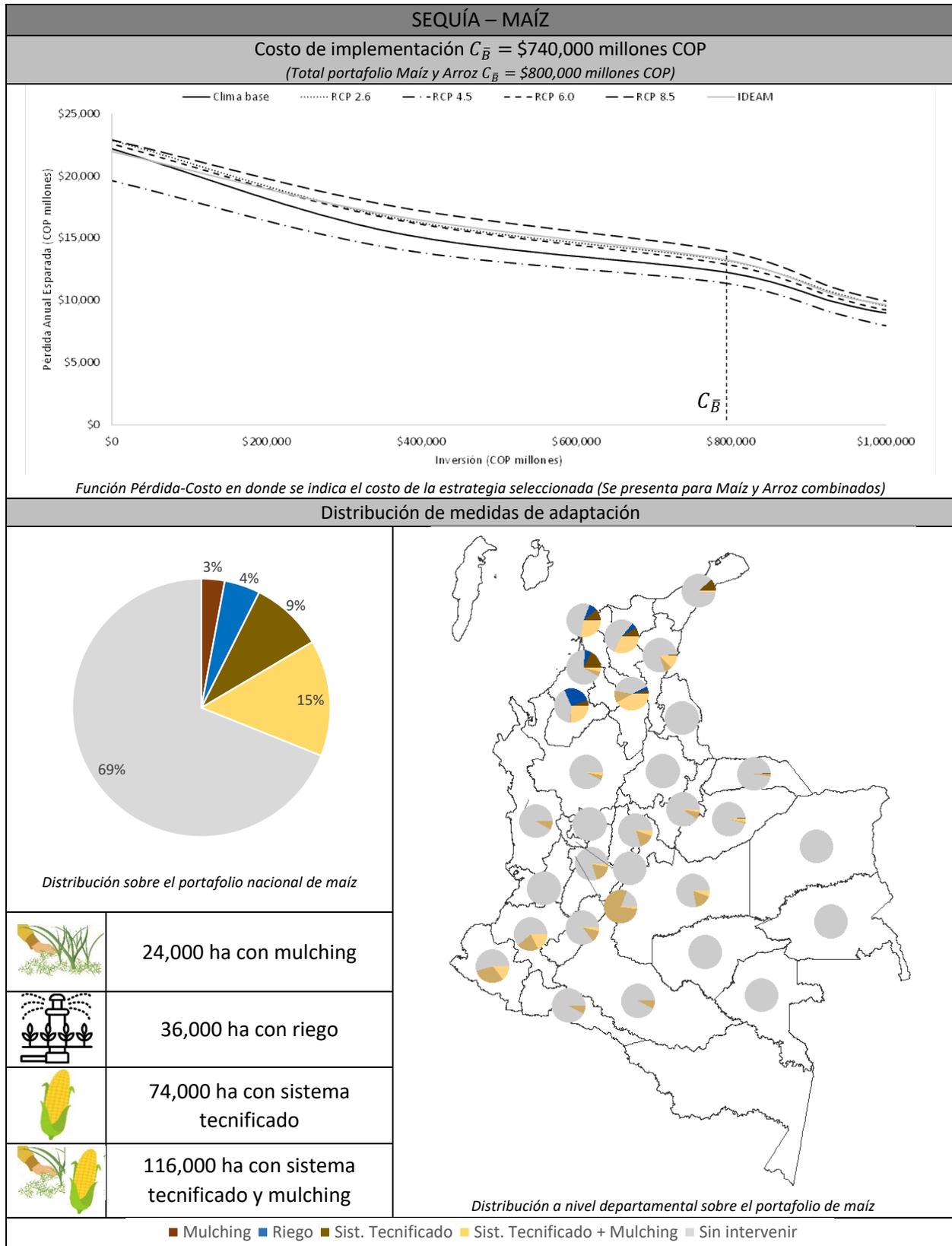


Figura 6-4. Detalle de la estrategia de adaptación seleccionada para sequías en el portafolio nacional de maíz

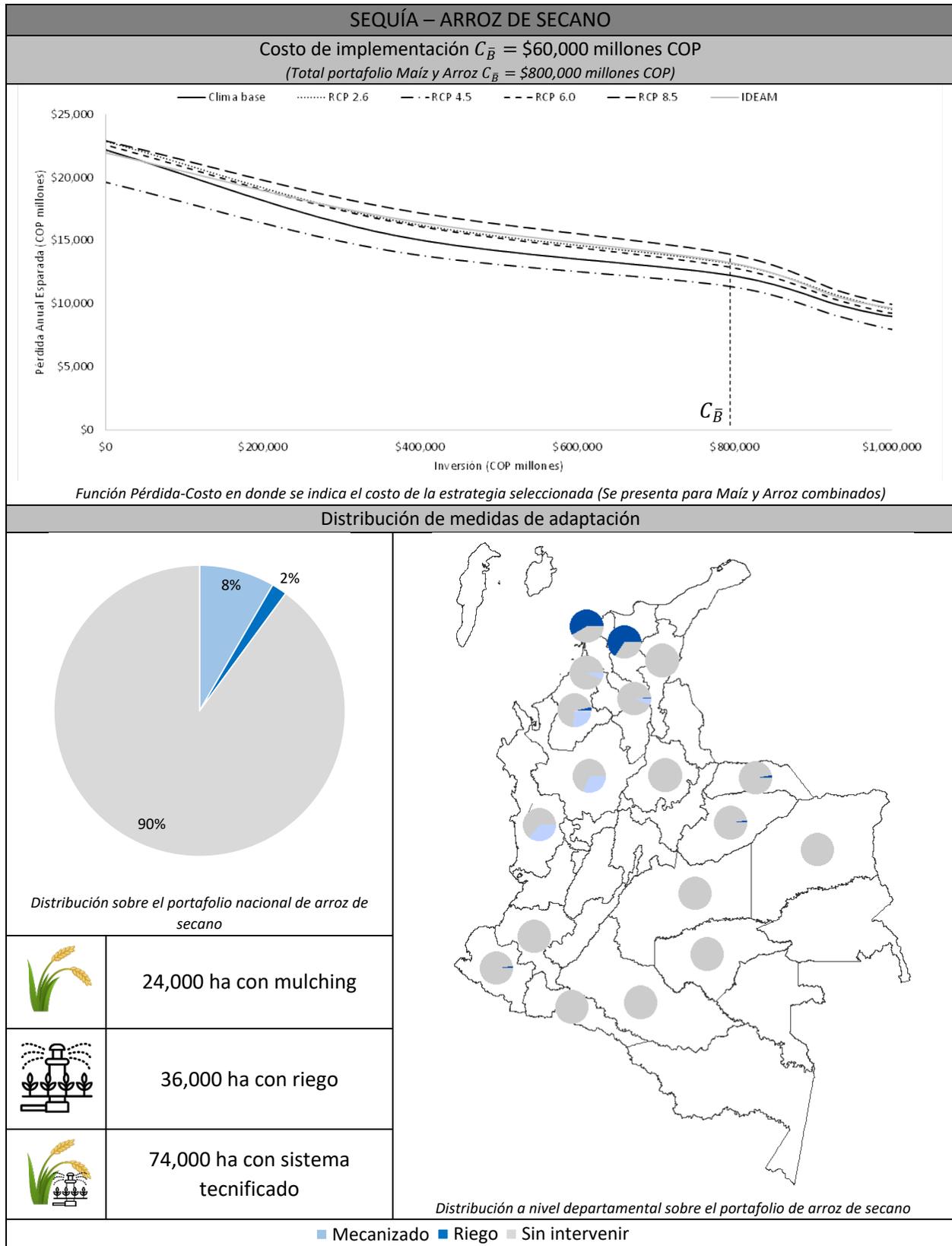


Figura 6-5. Detalle de la estrategia de adaptación seleccionada para sequías en el portafolio nacional de arroz de secano

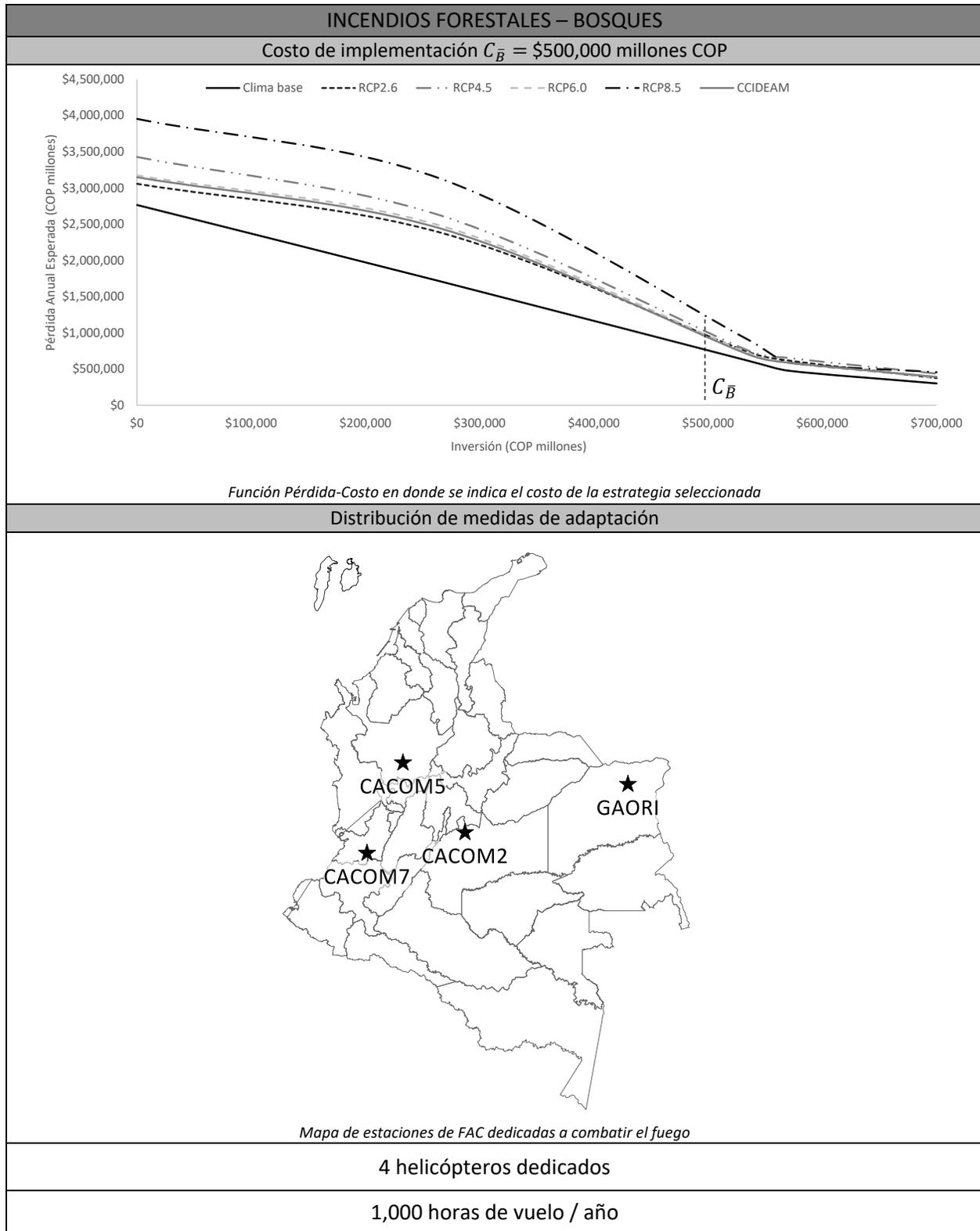


Figura 6-6. Detalle de la estrategia de adaptación seleccionada para incendios forestales en el bosque colombiano

6.3 Metas de adaptación al 2050

A manera de resumen, se presentan en la Tabla 6-1 las metas de adaptación propuestas para Colombia que podrían implementarse en los próximos años. Estas metas en valor presente tienen un costo aproximado e indicativo de **\$7,800,000 millones de pesos**. Este valor, dependiendo del tiempo en el cual se espere llevar a cabo el plan de adaptación o reducción del riesgo, es necesario proyectarlo desde el punto de vista financiero. Adicionalmente, este valor supone la neutralización del riesgo en el caso de edificaciones e infraestructura; es decir, que no habría aumento de elementos expuestos vulnerables en las áreas de influencia de las amenazas relevantes.

Tabla 6-1. Metas de adaptación propuestas para Colombia con el fin de reducir el riesgo

INUNDACIÓN	<i>Vivienda adaptada a inundaciones</i>	Viviendas de ingreso bajo \$2,800,000 millones COP	15,000 viviendas protegidas
			3,500 viviendas reubicadas
			190,000 viviendas palafíticas
HURACÁN	<i>Construcción resistente a huracanes</i>	Edificaciones de San Andrés \$700,000 millones COP	1,300 construcciones palafíticas
			300 construcciones reforzadas
	<i>Reconstrucción con transformación</i>	Edificaciones de Providencia	900 construcciones resistentes a huracanes
			500 construcciones palafíticas
DESLIZAMIENTOS	<i>Infraestructura resiliente al clima</i>	Red vial principal \$3,000,000 millones COP	7 Km en riesgo Muy Alto
			8 Km en riesgo Alto
			125 Km en riesgo Medio Alto
			260 Km en riesgo Medio Bajo
SEQUÍA	<i>Agricultura adaptada</i>	Maíz (blanco y amarillo; tradicional y tecnificado) \$740,000 millones COP	24,000 ha con mulching
			36,000 ha con riego
			74,000 ha con sistema tecnificado
			116,000 ha sist. tec. + mulching
		Arroz de secano (manual y mecanizado) \$60,000 millones COP	32,000 ha con sistema mecanizado
			7,000 ha con riego
			1,000 ha sist. mec. + riesgo
Seguro agrícola	Cobertura a la producción		
INCENDIOS FORESTALES	<i>Protección de bosques y ecosistemas</i>	Bosques y frontera agrícola \$500,000 millones COP	4 helicópteros dedicados
			1,000 horas de vuelo / año

7 CONCLUSIONES

Este trabajo intenta dar un primer paso, tanto a nivel internacional, aportando un enfoque metodológico innovador, como a nivel nacional, al aplicarlo por primera vez a un país como Colombia. Técnicamente se ha desarrollado una metodología sólida, desde el punto de vista matemático, que permite proponer estrategias de adaptación basadas en la modelación probabilista del riesgo catastrófico, incorporando el efecto del cambio climático. Se utilizan técnicas avanzadas para dar cuenta de la incertidumbre profunda del riesgo, teniendo en cuenta que su cuantificación sea multi-amenaza, estocástica, no estacionaria y orientada a proveer información necesaria para la toma de decisiones robustas. En esta sección se presentan las conclusiones y algunas reflexiones generales acerca de los resultados obtenidos en este informe.

7.1 Sobre los cambios que el clima futuro inducirá al paisaje del riesgo

No hay duda de que el cambio climático modifica de forma importante los patrones de riesgo de desastres por eventos hidrometeorológicos en Colombia. Las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial inducen cambios a nivel meteorológico, que conlleva a la exacerbación (en intensidad o frecuencia) de los eventos que caracterizan este tipo de amenazas, incrementando así el riesgo de desastres si se le compara con la situación actual. Dicha situación o estado actual es la resultante de la convolución entre la vulnerabilidad de los elementos expuestos y las amenazas derivadas de la variabilidad climática en las condiciones actuales; es decir, sin incorporar las modificaciones atribuibles al cambio climático. Esta evaluación sirve como nivel de referencia base para medir el riesgo directamente resultante de las perturbaciones futuras del clima, en comparación con el riesgo, hoy en día, ya configurado. La Figura 7-1 muestra los valores de PAE totales para los portafolios evaluados en Colombia, con una indicación del porcentaje de aumento al considerar los diferentes futuros climáticos.

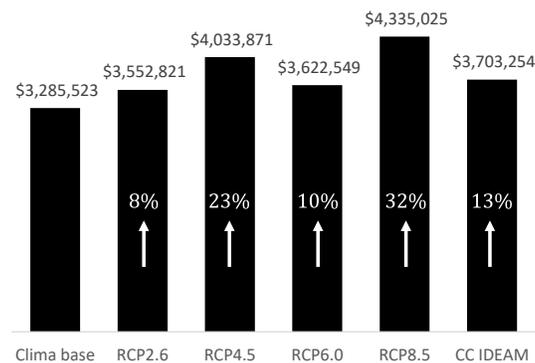


Figura 7-1. Cambio inducido en el riesgo físico (medido en términos de la PAE) por los diferentes futuros climas considerados.
(Cifras en COP millones)

Esto significa que el cambio climático estaría incrementando entre un 8% y un 32% las actuales pérdidas por desastres asociadas a eventos hidrometeorológicos. Esto por supuesto no es uniforme en todos los portafolios y todas las amenazas. Es claro que la mayoría de las pérdidas están asociadas con los incendios forestales, debido principalmente al notable valor de los servicios ecosistémicos y la correspondiente pérdida derivada del impacto ambiental.

Ahora bien, a nivel de combinaciones específicas de amenaza y portafolio de exposición, es posible afirmar que las condiciones futuras del clima pueden ser tanto nocivas como beneficiosas en lo que se refiere a riesgo de desastres. Por ejemplo, es claro como el sector agrícola se vería fuertemente afectado si se considera que la trayectoria de emisiones real al 2050 es la RCP 8.5, mientras que, bajo la misma trayectoria, las pérdidas por deslizamientos en el sector vial se reducirían de manera importante. La Figura 7-2 muestra la distribución de la PAE para las diferentes amenazas calculadas (y sus correspondientes portafolios evaluados), en donde se evidencia que el efecto del cambio climático no puede generalizarse como necesariamente nocivo desde el punto de vista de las pérdidas por desastre. Se indica sobre cada barra de PAE para climas futuros, el cambio que significa con respecto a la PAE del clima base.

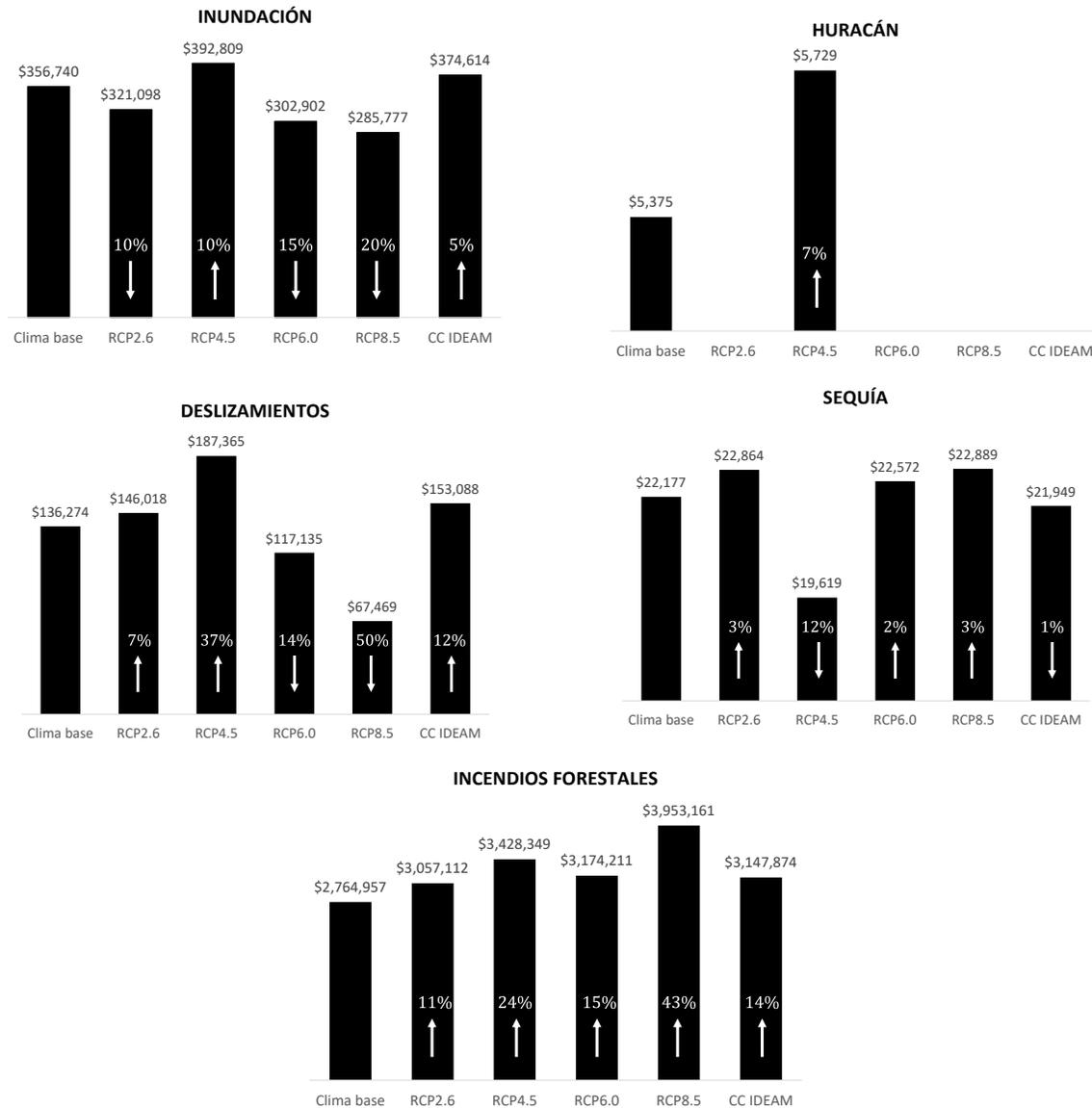


Figura 7-2. Cambio inducido en el riesgo físico (medido en términos de la PAE) para las diferentes amenazas incluidas en este estudio, y para los diferentes futuros climas considerados. (Cifras en COP millones)

En resumen, es posible afirmar que el cambio climático en algunos casos exagera el riesgo de manera importante y en otros casos lo reduce, dependiendo de la amenaza, exposición, vulnerabilidad y futuro clima que se tengan en consideración. Ahora bien, si se observan las métricas calculadas para el clima base, se puede concluir que el país presenta actualmente elevados niveles de riesgo de desastres, incluso sin tener en cuenta el efecto del cambio climático. En consecuencia, es necesario intervenir las condiciones actuales de exposición y vulnerabilidad, como se intenta ilustrar en este documento, con el fin de reducir el riesgo y lograr, por medio de la gestión del riesgo de desastres, un nivel aceptable de adaptación al cambio climático.

7.2 Sobre la adaptación, su costo y su efectividad

A diferencia de la mitigación del cambio climático, que significa reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, como aporte del país a una problemática global, la adaptación se ocupa de lo que a nivel nacional y local se requiere para disminuir los efectos negativos del cambio climático. En ese sentido, se puede hablar de adaptación en múltiples contextos. En este trabajo el análisis se ha centrado en el riesgo de desastres y, por lo tanto, en la adaptación, la que se puede definir como el conjunto de acciones encaminadas a reducir los efectos adversos del cambio climático. Efectos que se manifiestan en forma de riesgo de desastres, para las comunidades, sus medios de vida, el medio ambiente y el ambiente construido.

Desde el punto de vista conceptual, el riesgo de desastres se puede subdividir en cuatro componentes: exposición, vulnerabilidad, amenaza y tendencias de fondo. Dichas tendencias de fondo tienen que ver con perturbaciones que causan una desviación de la estacionariedad usualmente considerada. El cambio climático es un tipo de tendencia de fondo, y la reducción en los cambios que induce en la frecuencia e intensidad de los eventos que caracterizan las amenazas es un problema que se intenta abordar desde la perspectiva de la mitigación o reducción de emisiones. Esto significa que la adaptación debe intervenir los otros tres componentes del problema. En la mayoría de los casos no es posible intervenir la amenaza (con contadas excepciones, como los deslizamientos), por lo que resulta lógico pensar en que la adaptación se encargará de intervenir las condiciones de exposición y vulnerabilidad que conducen a la existencia del riesgo derivado de los eventos climáticos.

Por lo tanto, y desde un punto de vista práctico, es posible aliviar la tensión existente a nivel ontológico entre la adaptación al cambio climático y la gestión del riesgo de desastres, toda vez que las acciones resultantes de ambos intentan intervenir las causas que conducen a la existencia del riesgo y su efectividad puede ser medida en términos de reducción del riesgo. Ahora bien, existen diferentes maneras de intervenir los factores que conducen a la existencia del riesgo de desastres, con diferentes grados de factibilidad y efectividad. En general no es posible afirmar que una medida sea más apropiada que otra sin incorporar el contexto, la factibilidad técnica y política, la capacidad de ejecución institucional, entre otros factores. De aquí resulta la necesidad de optimizar la combinación de medidas de adaptación factibles de ser implementadas, con herramientas como la ingeniería de control del riesgo (Risk Control Engineering – RCE) aplicada en este trabajo.

Ahora bien, no se intenta dar una solución precisa a un problema altamente incierto. Por el contrario, en este trabajo se apela al principio de gradualidad como principio orientador de la gestión del riesgo de desastres. Es decir, no se considera factible que los procesos de adaptación, que se deriven de la selección

de una estrategia óptima, puedan ser plasmados directamente en un plan de acción específico. Esto, debido a que dicho plan depende de la capacidad de ejecución financiera y técnica de las instituciones colombianas; y por lo tanto, dicho plan debe ser el resultado de un proceso de concertación y decisión de dichas instituciones. Se han establecido, entonces, diferentes niveles de adaptación, con el fin de proveer al Gobierno de Colombia de una cuantificación de las implicaciones de optar por una mayor o menor adaptación frente al riesgo que se deriva del clima, pero dejando abierta la posibilidad de intervenciones graduales que, en el largo plazo, conduzcan a un nivel de riesgo aceptable del país.

La evaluación de las diferentes estrategias de adaptación, con sus correspondientes costos de inversión, permite determinar el límite práctico de la adaptación; es decir, el punto a partir del cual mayores inversiones no derivan en reducciones significativas del riesgo y donde, adicionalmente, se desdibuja el efecto del cambio climático debido a que se ha alcanzado un nivel máximo de adaptación posible. La pérdida remanente corresponde a un riesgo residual que no es posible reducir con las medidas consideradas.

La modelación del riesgo climático permite dimensionar estrategias de adaptación que sean técnicamente viables, con montos de inversión incrementales, brindando una colección de posibilidades de intervención del problema en función de la factibilidad financiera. Estos resultados son el insumo técnico necesario para impulsar procesos de toma de decisiones, en donde se evalúen otros aspectos no asociados con el riesgo de desastres, y se busquen consensos entre los diferentes actores a quienes concierne el problema. Esto permite evaluar la factibilidad de identificar los recursos necesarios para diseñar un plan de acción que, en el mediano o largo plazo, logre los objetivos de reducción del riesgo planteados.

Dentro de este plan de acción se deben definir los diferentes proyectos que corresponden a las acciones de intervención seleccionadas y que, para ser implementadas, deben ser diseñadas en detalle. El diseño de cada proyecto es en sí mismo un trabajo de exigente y de gran magnitud, que debe ser ejecutado por grupos interdisciplinarios de especialistas en las disciplinas requeridas según sea el caso. Su implementación final se lleva a cabo gradualmente, impulsando un desarrollo que pueda considerarse sostenible que generaría beneficios adicionales, no necesaria y previamente cuantificados, que estarían asociados con el aumento de la seguridad, la prosperidad y la resiliencia de las comunidades, las regiones y los sectores beneficiados, y lo que derivaría en una mayor confianza en las instituciones.

8 REFERENCIAS

- Álvarez, O., Ruíz, E., Mosquera, M., & Silva, J. (2018). Evaluación económica de sistemas de riego para plantaciones de palma aceitera en la Zona Norte de Colombia. *Palmas*, 38(4), 69-85.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá, Colombia.
- Banco Mundial (2017). Estudio de Factibilidad. Seguro Agrícola Catastrófico en Colombia. Informe preparado para FINAGRO.
- Barajas-Guzmán, M. G., & Barradas, V. L. (2013). Costos y beneficios de la aplicación de acolchados en la reforestación de los bosques tropicales caducifolios. *Botanical Sciences*, 91(3), 363-370.
- 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 Nature. In press.
- Caracol Radio. (2015). Fuerza Aérea ha gastado más de \$500 millones en combustible combatiendo incendios forestales. https://caracol.com.co/radio/2015/12/29/nacional/1451422348_228420.html
- Cardona, O.D. (2012). Un marco conceptual común para la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático: Encuentros y desencuentros de una iniciativa insoslayable. En: *Perspectivas de investigación y acción frente al cambio climático en Latinoamérica*, F. Briones (Coordinador). La Red – CIGIR, pag 13-38, Talleres Gráficos Universitarios, ULA: Mérida, Venezuela. https://www.desenredando.org/public/2012/LaRed_Desastres_y_Sociedad_2012-07_web.pdf
- Cardona, O.D. (2016). Evaluación probabilista del riesgo de inundación en la región de La Mojana con alternativas de intervención. Proyecto Inundación La Mojana. Fondo Adaptación.
- 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). Entregable 2: Informe técnico con los resultados de la evaluación de riesgo de línea base. Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación para la Estrategia a Largo Plazo E2050 de Colombia – Fase 1. Preparado para Expertise France. INGENIAR Risk Intelligence Ltda. Bogotá.
- Collins, W.J., N. Bellouin, M. Doutriaux-Boucher, N. Gedney, T. Hinton, C. D. Jones, S. Liddicoat, G. Martin, F. O'Connor, J. Rae, C. Senior, I. Totterdell, S. Woodward, T. Reichler, J. Kim. (2008). Evaluation of the HadGEM2 model. Met Office Hadley Centre Technical Note no. HCTN 74, <http://www.metoffice.gov.uk/publications/HCTN/index.html>
- DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. (2005). Documento maíz tecnificado en Colombia.
- DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. (2017). Características que se destacan en el cultivo de arroz seco (*Oryza Sativa* L.) en Colombia. Boletín mensual, Insumos y factores asociados a la producción agropecuaria – Número 58.
- DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. (2021). Sistema de información de precios Sipsa. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/sistema-de-informacion-de-precios-sipsa/componente-insumos-1>

- Departamento Nacional de Planeación (2016). Lineamientos para la Construcción de Vivienda Palafítica. Guía Proyectos Tipo N°19. Subdirección Territorial y de Inversiones Públicas.
- Departamento Nacional de Planeación, Ministerio de Agricultura, Banco Agrario (2017). Construcción de Vivienda de Interés Social Rural. Guía Proyectos Tipo N°18. Subdirección Territorial y de Inversiones Públicas, DNP.
- El Tiempo. (2021). Fuera de combate cuatro helicópteros black hawk. El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-140893#:~:text=Los helicópteros Black Hawk tienen,como para el combate aéreo>
- Frutos, J. (2015). Efecto de la utilización del mulch natural, maíz (*Zea mays* L.), caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), vicia (*Vicia sativa* L.), y avena (*Avena sativa* L.) sobre la producción del brócoli (*Brassica oleracea* L.) en el campus Querochaca, Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- Giraldo, M. J., Paola, D., Paredes, T., & Castillo, M. G. (2014). Estudio de costos de mantenimiento en helicópteros militares mediante la aplicación del costeo abc. *Elementos*, 4, 42–59.
- IDEAM (2012). Metodología para la Zonificación de Susceptibilidad General del Terreno a los Movimientos en Masa.
- INGENIAR (2020). Actualización y ajuste de la información obtenida en el Estudio de Factibilidad del Seguro Agrícola Catastrófico para el cultivo de maíz blanco tradicional en los departamentos de Antioquia y Tolima. Estudio desarrollado para FINAGRO.
- IPCC. (2007). Fourth Assessment Report (Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed.). <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar4/>
- IPCC. (2014). Fifth Assessment Report (Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed.). <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar4/>
- Lempert R.J. (2019) Robust Decision Making (RDM). En: Marchau V., Walker W., Bloemen P., Popper S. (eds) *Decision Making under Deep Uncertainty*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2_2
- López, J. (2019). Los puntos que debe tener en cuenta para instalar riego artificial. AGRONEGOCIOS. <https://www.agronegocios.co/tecnologia/los-puntos-que-debe-tener-en-cuenta-para-instalar-riego-artificial-2844262>.
- Luarte, G., & Espinoza, F. (2013). Determinación de los costos totales que incurre un pequeño agricultor en la producción de arándanos y espárragos.
- Marchau, V., Walker, W., Bloemen, P., Popper, S. (2019). *Decision making under deep uncertainty*. Springer. Open Acces. DOI: 10.1007/978-3-030-05252-2
- Martínez, A. (2013). Caracterización socioeconómica de los sistemas de producción de la región de La Mojana en el Caribe de Colombia. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 14. 165. [10.21930/rcta.vol14_num2_art:406](https://doi.org/10.21930/rcta.vol14_num2_art:406).
- Ministerio de Hacienda y Crédito Público. (2021). Proyecto de Ley Presupuesto General de la Nación 2021. https://www.minhacienda.gov.co/webcenter/ShowProperty?nodeId=/ConexionContent/WCC_CLUSTER-157138//idcPrimaryFile&revision=latestreleased

- Ministerio de Transporte. Gestor de Proyectos de Infraestructura. <https://gpi.mintransporte.gov.co/>
- Monje, R. (2017). Costes a tener en cuenta al instalar un sistema de riego. Recuperado de: <https://www.universidadderiego.com/costes-a-tener-en-cuenta-al-instalar-un-sistema-de-riego/>
- Nieto, L. (2019). La mecanización agrícola en Colombia: actualidad y futuro. FOMENTA. <https://fomenta.org.co/la-mecanizacion-agricola-en-colombia-actualidad-y-futuro/>
- Paz, M. D. M., & Aguilar, J. D. (2015). Evaluación de la producción de maíz (zea mays), ica v-305 con tres densidades, abonamiento, fertilización y su mezcla en la vereda Urubamba, finca La Sultana-municipio de Timbío - Cauca.
- Perfetti, J. J., Escobar, D., Castro, F., Cuervo, B., Rodríguez, M., & Vargas, J. I. (2012). Costos de producción de doce productos agropecuarios.
- Ruíz Murcia, F., Gutierrez Valderrama, J. E., Dorado Delgado, J., Mendoza, J. E., Martínez Zuleta, C., Rojas Laserna, M., ... Rodríguez Salguero, M. (2015). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científica para los Tomadores de Decisiones- Enfoque Nacional - Departamental: Tercera Comunicacion Nacional de Cambio Climatico. En Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climatico. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-13-58>IPCC. (2007). Fourth Assessment Report (Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed.). <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar4/>
- Sloarz, P. & Jordan, C. (2001). Ground Pattern Performance of the National Guard Black Hawk Helicopter With the 660-Gallon SEI Industries Bambi Helibucket. Airtanker Drop Guides. United States Department of Agriculture Forest Service.
- Tencio, R. (2018). Cobertura de suelo o “mulch” como práctica sostenible ante el cambio climático. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Dirección de Desarrollo Central Oriental.
- Watson, P. (2019). SEI industries dotará de otro Bambi Bucket a la Fuerza Aérea de Perú. Infodefensa.Com. <https://www.infodefensa.com/latam/2019/12/18/noticia-industries-dotara-bambi-bucket-fuerza-aerea.html>