



El futuro
es de todos

Gobierno
de Colombia



Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes



Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes
UNGRD
Bogotá, D.C., Colombia
2019

Iván Duque Márquez
Presidente de la República

Eduardo José González Angulo
Director General Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres-UNGRD

Lina Dorado González
Subdirectora para el Conocimiento del Riesgo-UNGRD

Autores

Coordinación de Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes
Mabel C. Marulanda Fraume.

El apoyo técnico para la producción de resultados de evaluación probabilista del riesgo por terremoto, inundaciones, tsunamis y ciclones tropicales, evaluación integral del riesgo a nivel departamental y municipal, los casos locales de evaluación y gestión del riesgo y la elaboración de mapas, figuras y perfiles departamentales han sido llevados a cabo como una contribución al Sistema Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia por la firma:

Ingeniar: Risk Intelligence

Omar Dario Cardona A.
Gabriel Bernal G.
Paula Marulanda Fraume.
Claudia Villegas R.
Diana González C.
Maria Alejandra Escovar B.
Martha Liliana Carreño T.

Apoyo técnico de la UNGRD

Gloria León Aristizábal
Sandra Patricia Estupiñán V.
Nathalia Contreras Vásquez
Héctor Pérez Barrera
Joana Pérez Betancourt
María Teresa Martínez Gómez
Paula Andrea Villegas González

Revisión textos incendios de las coberturas vegetales
German Sánchez

Diagramación y Cartografía
Paula Marulanda Fraume

Instituciones colaboradoras

Corporación OSSO
DIMAR
SGC
IDEAM
IGAC

ISBN (Digital): 978-958-5509-17-7

@Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2019.
Distribución gratuita.

La elaboración de esta publicación ha sido posible gracias al apoyo técnico de Ingeniar: Risk Intelligence.

El contenido de esta obra es responsabilidad de los autores.

Tabla de contenido

1. Introducción	10
1.1. Contexto general del territorio Colombiano.....	14
2. Amenazas.....	18
2.1. Terremotos	19
2.2. Tsunami	28
2.3. Volcanes	35
2.4 Fenómenos hidrometeorológicos.....	42
2.4.1 Inundaciones	44
2.4.2 Sequías	50
2.4.3 Ciclones tropicales (viento y marea de tormenta)	58
2.5. Movimientos en masa	64
2.6. Incendios de la cobertura vegetal	71
2.7. Amenazas tecnológicas	80
3. Exposición y Vulnerabilidad	84
3.1. Exposición	85
3.2. Vulnerabilidad física de los elementos expuestos.....	90
4. Evaluación probabilista del riesgo	95
4.1. Riesgo	96
4.2. Evaluación integral del riesgo	101
5. Casos locales	120
5.1. Evaluación del riesgo para la planificación - Manizales	122
5.2. Índice de riesgo sísmico urbano - Medellín.....	125
5.3. Sistema automático de evaluación de daños post terremoto a nivel urbano	127
5.4. Volcán Galeras.....	129
5.5. Evaluación del riesgo por inundaciones en La Mojana	131
5.6. Evaluación probabilista del riesgo por huracán en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.	136
6. Perfiles de riesgo de departamento	145
Al. Anexo	212
Al.1. Evaluación probabilista del riesgo: el modelo global	213
Al.1.1. Metodologías y enfoques de evaluación	217
Al.1.2. Modelación de las amenazas.....	225
Al.1.2.1 Modelación de amenaza sísmica	225

AI.1.2.2 Modelación de amenaza por tsunami229

AI.1.2.3 Modelación de amenaza por ciclones tropicales.....232

AI.1.2.4 Modelación de lluvias (para inundaciones, sequías, deslizamientos)237

AI.2. Enfoque metodológico para la evaluación holística del riesgo249

Referencias253

Contenido de mapas

Mapa 1. División político - administrativa Colombia	16
Mapa 2. Densidad poblacional Colombia.....	17
Mapa 3. Catálogo sísmico Colombia.....	25
Mapa 4. Amenaza sísmica para un periodo de retorno de 475 años (Periodo estructural 0.5 s)	27
Mapa 5. Amenaza por tsunami - Atlántico (Tr 475 años).....	34
Mapa 6. Amenaza por tsunami - Pacífico (Tr 475 años).....	34
Mapa 7. Mapa de localización de volcanes en Colombia	41
Mapa 8. Susceptibilidad a inundación.....	48
Mapa 8a. Amenaza de inundación (Tr 50 años)	49
Mapa 9. Índice de vulnerabilidad por disponibilidad de agua SCH - Condiciones año seco.....	54
Mapa 10. Índice de vulnerabilidad por disponibilidad de agua SCH - Condiciones año medio.	55
Mapa 11. Índice de escasez - Condiciones año seco	56
Mapa 12. Índice de escasez SCH - Condiciones año medio.....	57
Mapa 13. Amenaza de ciclones tropicales (Viento -Tr 100 años).....	63
Mapa 14. Amenaza de ciclones tropicales (Marea de tormenta -Tr 100 años)	63
Mapa 15. Amenaza por movimientos en masa (esc. 1:100.000 - 1:500.000)	70
Mapa 16. Riesgo por incendios de la cobertura vegetal (Condiciones normales).	78
Mapa 17. Riesgo por incendios de la cobertura vegetal (Condiciones del Fenómeno de El Niño).....	79
Mapa 18 . Valor expuesto por departamento.....	89
Mapa 19 . Perdida Anual Esperada por Sismo (Millones de pesos)	107
Mapa 20 . Perdida Anual Esperada por Sismo (‰)	108
Mapa 21 . Perdida Anual Esperada por Tsunami (Millones de pesos)	109
Mapa 22 . Perdida Anual Esperada por Tsunami (‰).....	110
Mapa 23 . Perdida Anual Esperada por Inundación (Millones de pesos).....	111
Mapa 24 . Perdida Anual Esperada por Inundación (‰).....	112
Mapa 25 . Perdida Anual Esperada por Ciclones (Viento y marea de tormenta).....	113
Mapa 26 . Perdida Anual Esperada por Ciclones (Viento y marea de tormenta).....	114
Mapa 27 . Perdida Anual Esperada Multi-amenaza (Millones de pesos).....	115
Mapa 28 . Perdida Anual Esperada Multi-amenaza (‰).....	116
Mapa 29 . Riesgo físico relativo (RF)	117
Mapa 30 . Factor de impacto (F).....	118
Mapa 31 . Riesgo Integral (RI)	119

Contenido de figuras

Figura 1. Tipos de movimiento de las placas tectónicas.....	19
Figura 2. Ciclo de generación y subducción de la corteza terrestre	20
Figura 3. Tipos de ondas sísmicas.....	20
Figura 4. Convergencia de placas litosféricas	21
Figura 5. Fallas principales y potencialmente activas en Colombia	22
Figura 6. Formación de un Tsunami	29
Figura 8. Mapa de inundación por tsunami de origen cercano para la Bahía de Buenaventura	32
Figura 7. Mapa de inundación por tsunami de origen cercano para la Bahía de Tumaco	32
Figura 9. Formas de elevación del magma	35
Figura 11. Clasificación de volcanes según su proceso eruptivo.....	36
Figura 10. Clasificación de volcanes según su estructura de formación.....	36
Figura 12. Mapa de amenaza volcánica del volcán Cerro Negro.....	40
Figura 13. Mapa de amenaza volcánica del volcán Chiles	40
Figura 14. Representación esquemática de las condiciones océano-atmosféricas del Pacífico tropical durante los periodos normales y de ocurrencia del fenómeno de El Niño.....	43
Figura 15. Causas, Efectos e Impactos de Inundaciones.....	45
Figura 16. Formación de huracanes	59
Figura 18. Regiones preferenciales, trayectorias y estaciones para el desarrollo de ciclones tropicales.....	60
Figura 17. Escala Saffir-Simpson	60
Figura 19. Clasificación de movimientos en masa de acuerdo al movimiento	64
Figura 20. Condiciones que aumentan la amenaza por movimientos en masa	65
Figura 21. Diagrama de la metodología para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa...	69
Figura 22. Interrelación entre factores de amenaza de incendios forestales.	72
Figura 23. Número de incendios y área afectada por departamento para los años 2013, 2014, 2015 y 2016.	73
Figura 24. Factores considerados para la evaluación de la amenaza de incendios de la cobertura vegeta.....	75
Figura 25. Factores considerados para la evaluación de la vulnerabilidad a incendios de la cobertura vegetal	76
Figura 26. Procedimiento general para la creación de un modelo simplificado de elementos expuestos	86
Figura 27. Cambio en la valoración del cultivo por fase de desarrollo del cultivo.....	87
Figura 28. Función de vulnerabilidad en términos del valor esperado y la varianza.....	91
Figura 29. Esquema de función de vulnerabilidad debido a terremotos	92
Figura 30. Esquema de función de vulnerabilidad debido a inundaciones	92
Figura 31. Representación esquemática de la respuesta del cultivo al estrés hídrico	93
Figura 32. Marco conceptual de la evaluación probabilista de riesgo multi-amenaza	97
Figura 33. Marco conceptual de la evaluación probabilista de riesgo por sequía	97
Figura 34. Diagrama de flujo de la evaluación probabilista del riesgo	99
Figura 35. Marco conceptual del enfoque holístico a la evaluación probabilista del riesgo.....	102
Figura 36. Distribución de la Pérdida Anual Esperada Relativa (%) AAL para el activo de edificios de Manizales	122

Figura 37. Mapa de amenaza de ceniza volcánica (m).....	123
Figura 38. Esquema financiero de aseguramiento subsidiado para Manizales.....	124
Figura 39. Resultados del índice de riesgo físico, coeficiente de agravamiento y riesgo total por comuna para Medellín	126
Figura 40. Estructura principal del sistema LISA	128
Figura 41. Mapa de amenaza de flujos piroclásticos del Volcán Galeras	129
Figura 42. Distribución por activo en los alrededores del Volcán Galeras de la Pérdida Anual Esperada Relativa	130
Figura 45. Trayectorias de ciclones tropicales históricos al norte de Colombia.....	136
Figura 46. Mapa de velocidad del viento para ráfagas de 3 segundo y altura de marea de tormenta.....	138
Figura 47. Distribución de sistemas estructurales en San Andrés, Providencia y Santa Catalina.....	139
Figura 48. Distribución del valor expuesto por manzanas	140
Figura 50. Curva de PML	141
Figura 51. Pérdida anual esperada por manzanas. Unidades monetarias	142
Figura 52. Pérdida anual esperada por manzanas. Relativa al valor expuesto de cada manzana.....	143
Figura A1-1. Representación gráfica de un evento arbitrario A dentro del espacio de muestreo S	215
Figura A1-2. Subdivisión del espacio de muestreo S en eventos base B	215
Figura A1-3. Intersección entre el evento A y el evento base B	216
Figura A1-4. Cobertura del conteo de población	218
Figura A1-5. Proceso de extracción de población urbana.....	218
Figura A1-6. Asignación del nivel de complejidad y agregación de población	219
Figura A1-7. Distribución del ingreso.....	219
Figura A1-8. Proceso de distribución de población por nivel de ingreso.....	220
Figura A1-9. Estimación empleados por sector.....	220
Figura A1-10. Estimación de empleados del gobierno	221
Figura A1-11. Proceso de estimación de capacidad instalada en salud	221
Figura A1-12. Proceso de estimación de capacidad instalada en educación	222
Figura A1-13. Proceso de distribución por sistema estructural	223
Figura A1-14. Proceso de estimación de valores proxy	224
Figura A1-15. Ejemplo de varias medidas de distancia usadas en funciones de atenuación	225
Figura A1-16. Esquema de una función de atenuación típica y sus componentes.	226
Figura A1-17. Diagrama de refracción de ondas, con contornos de tiempo de arribo	230
Figura A1-18. Proceso de perturbación de la trayectoria aplicado al huracán Sandy.	233
Figura A1-19. Funciones de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada teniendo en cuenta días de no lluvia	238
Figura A1-20. Mapas de valores medio multianuales para precipitación en una cuenca de referencia.	239
Figura A1-21. Promedio diario multianual de precipitación para serie histórica (1981-2010) y serie sintética	240
Figura A1-22. Mapas de distribución espacial de tormentas en la Cuenca de referencia.	241
Figura A1-23. Ejemplo de curvas Huff calculadas para Indiana (EEUU).....	242
Figura A1-24. Clasificación de modelos hidrológicos, propuesta por Singh.....	245
Figura A1-25. Modelo de escorrentía directa ModClark. Modelo conceptual	246
Figura A2-1-. Enfoque holístico a la evaluación probabilista del riesgo.....	249
Figura A2-2. Ejemplo de funciones de transformación.....	251



Mesa de los santos, Santander

El plan de acción regional para la implementación del Marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres 2015-2030 en las Américas, plantea como primera prioridad: comprender el riesgo de desastres. Como respuesta a esto, resulta fundamental que los países de la región avancen en el fortalecimiento de los sistemas de información, del monitoreo y registro de riesgos potenciales y existentes, y del intercambio de conocimientos en materia de gestión de riesgo de desastres.

El Atlas de Riesgo de Colombia ha sido elaborado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, entidad líder en el país en la temática de gestión del riesgo e INGENIAR: Risk Intelligence. Este producto surge ante la necesidad de avanzar en el conocimiento del riesgo a nivel nacional y regional, teniendo en cuenta que la misión de la entidad es mejorar la calidad de vida de las personas y contribuir al desarrollo sostenible, pero, además, avanzar en el conocimiento del riesgo en las Américas, con el fin de comprender el riesgo de desastres en sus dimensiones de amenaza, vulnerabilidad, grado de exposición y características del entorno.

Esta publicación recopila los diferentes avances logrados en el análisis de las diferentes amenazas y presenta nuevos resultados del riesgo en Colombia a nivel departamental. Adicionalmente, es el resultado de un esfuerzo interinstitucional, donde participaron entidades responsables en la temática como: la Corporación OSSO, la Dirección General Marítima (DIMAR), el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Se espera que este tipo de iniciativas, se conviertan en un incentivo para las diferentes entidades nacionales, territoriales y operativas, en el sentido de trabajar articuladas. Además, generar y compartir información que permita entender la importancia de conocer el riesgo y el impacto positivo que este paso puede tener en el desarrollo socioeconómico del país. El conocimiento generado en este Atlas, puede aprovecharse para el análisis y evaluación del riesgo, y en este sentido se convierte en una herramienta fundamental para generar estrategias de reducción del riesgo y manejo de desastres.

A 2022 se espera que las entidades del Sistema, en especial los departamentos y los sectores, con el uso de la información del Atlas, puedan priorizar acciones, con el fin de disminuir significativamente las condiciones de riesgo, la pérdida de vidas y los costos asociados a los desastres.

La Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres continuará fortaleciendo las capacidades de las entidades públicas, privadas, comunitarias y de la sociedad en general, promoviendo la generación de nuevo conocimiento, con el propósito de crear una Colombia más unida y con esperanza.

Eduardo José González Angulo
Director General
Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres

Contenido de acrónimos

AAL	Pérdida Anual Esperada (En español)
AIS	Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
ANLA	Agencia Nacional de Licencias Ambientales
CCO	Comisión Colombiana del Océano
CCCP	Centro de Control de Contaminación del Pacífico
CHEC	Central Hidroeléctrica de Caldas
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CONIF	Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal
Corporación OSSO	ONG para las ciencias de la tierra y prevención de desastres
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DIMAR	Dirección General Marítima
DNP	Dirección Nacional de Planeación
ENA	Estudio Nacional del Agua
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (en español)
GA	Geociencias Australia
HIMAT	Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras
ICEL	Instituto Colombiano de Energía Eléctrica
IDEA	Instituto de Estudios Ambientales
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IDIGER	Instituto Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
ISA	Instituto Geofísico de los Andes
LISA	Laboratorio de Instrumentación Sísmica Automática
NGDC	Centro Nacional para Información Ambiental (en español)
NGI	Instituto Geotécnico de Noruega
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PML	Pérdida Máxima Probable (En español)
PNGRD	Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres
PNGRT	Plan Nacional de Gestión del Riesgo por Tsunami
PNPCIFRA	Protocolo Nacional de Prevención, Control de Incendios Forestales y Restauración de Áreas Afectadas.
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
POMCA	Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
SCR	Subdirección para el Conocimiento del Riesgo de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres

SGC	Servicio Geológico Colombiano
SIMMA	Sistema de Información de Movimientos en Masa
SNDAT	Sistema Nacional de Detección y Alerta por Tsunami
SNGRD	Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres
SNPAD	Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres
UIS	Universidad Industrial de Santander
UNCCD	Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía
UNGRD	Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres
UNISDR	Oficina de Naciones Unidas para Reducción del Riesgo de Desastres
UPTC	Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia



1. Introducción

Las consecuencias socioeconómicas en las últimas décadas en Colombia, debido a la ocurrencia de eventos naturales peligrosos, son un indicador de la alta vulnerabilidad de las comunidades localizadas en áreas propensas a estos fenómenos. La distribución territorial de estas consecuencias no es uniforme y, en general, los municipios que son más afectados por la materialización de estas amenazas ambientales son, usualmente, aquellos con los más bajos niveles de desarrollo y gobernanza donde es evidente la falta de planificación y gestión institucional. Sumado a esto, la continua afectación por estos fenómenos naturales agrava aún más su situación e impide y retrasa el desarrollo y el bienestar social. El riesgo, es decir el potencial de daños y pérdidas por fenómenos naturales, es un reto importante para el país y para la sostenibilidad de su desarrollo.

Como resultado de diferentes desastres ocurridos en Colombia, a partir de 1988 se creó el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (SNPAD), como una organización interinstitucional formal para enfrentar este tipo de problema. Colombia fue uno de los primeros países de la región en poner en marcha una política pública para abordar de manera integral este problema con una visión innovadora, multisectorial

e interdisciplinaria. En 2012 mediante la expedición de la Ley 1523, se adoptó una nueva Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - PNGRD y se estableció el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia (UNGRD, 2013). De esta forma el país modernizó, actualizó y armonizó su política, teniendo en cuenta los principios de descentralización, subsidiaridad, concurrencia y complementariedad institucional, de acuerdo con la Constitución de 1991 y orientando las acciones más hacia el riesgo y sus causas que hacia el desastre mismo.

El aumento de los daños y pérdidas en los activos, en diferentes partes del país, se debe a varios factores, dentro de los cuales está el crecimiento desordenado y vulnerable. Esto combinado con procesos de deterioro ambiental y problemáticas de tipo socioeconómico, relacionadas con el crecimiento y el aumento de la densidad poblacional en áreas propensas, derivan en una construcción social del riesgo, debido a la expansión rápida y desorganizada de los centros urbanos. Adicionalmente, problemas como la pobreza, la desigualdad, el desempleo, la violencia y la migración forzada han obligado a muchas personas a asentarse de una manera no planificada en sitios susceptibles a ser afectados por eventos peligrosos, exacerbando la

vulnerabilidad frente a los diferentes tipos de amenazas naturales y generando nuevas amenazas de tipo socio-natural y antrópico.

En general buscar un mayor desarrollo no debería confundirse con un mayor y simple crecimiento económico. El desarrollo debe ser un proceso incluyente, donde lo que predomine no sea únicamente el crecimiento económico y financiero, sino el beneficio social y la equidad en términos de una mayor educación, mejores sistemas de salud, un mayor acceso a recursos, a infraestructura, una armonía con el medio ambiente y los ecosistemas naturales y una mayor resiliencia frente a situaciones extremas que permitan una mejor calidad de vida. Para lograr estos objetivos, de un crecimiento sostenible, que beneficie a un espectro amplio de la sociedad, y un desarrollo con transformación, en un contexto natural como el que tiene Colombia, es ineludible contar con una gestión integral del riesgo de desastres que permita un desarrollo seguro.

Por lo anterior, los planes de desarrollo y de ordenamiento territorial deben incorporar el riesgo como determinante y la gestión del riesgo de una manera integral, con el fin de corregir aquellos aspectos que, en el pasado han generado el riesgo, o que deben evitarse para que no se generen nuevas

condiciones de riesgo. Conocer qué eventos o fenómenos pueden llegar a presentarse y las amenazas que estos representan para la vida y los bienes, identificar y dimensionar la vulnerabilidad de lo que pueda llegar a estar expuesto y pueda ser afectado y dar cuenta del riesgo o del potencial de consecuencias que se deriva es el primer paso para lograr tomar decisiones informadas y sostenibles que permitan reducir el riesgo de desastres en todos los niveles territoriales, mediante acciones correctivas, prospectivas y compensatorias por parte tanto del sector público como el privado.

Esta publicación es el resultado de diferentes proyectos y contribuciones llevadas a cabo por distintas entidades técnicas y científicas, públicas y privadas, relacionadas con la identificación y análisis de amenazas naturales y con la evaluación del riesgo que de ellas se deriva. La iniciativa de realizar esta publicación ha surgido de la necesidad de brindar a la sociedad colombiana y las entidades encargadas de la toma de decisiones, un documento basado en el conocimiento y la evaluación de las amenazas naturales y del riesgo que existe en el país. Estas evaluaciones se han realizado de acuerdo con el estado del arte y utilizando avanzadas técnicas de caracterización y evaluación para dar cuenta, a nivel nacional y regional, del nivel de las amenazas al que el país está expuesto, identificar los activos expuestos y su grado de vulnerabilidad, y establecer los niveles de riesgo que el país tiene frente a estas amenazas con las cuales hay que convivir.

Con el propósito de dar un paso adelante en el proceso misional del conocimiento del riesgo, de acuerdo con la política y el objetivo del SNGRD, se ha llevado a cabo una compilación de estudios y trabajos relacionados con la evaluación de las amenazas y el riesgo en el país. Reducir

el riesgo requiere de su identificación y conocimiento. Para su consideración como un determinante en los procesos de planificación del desarrollo es necesario evaluarlo en los diferentes niveles territoriales. En este documento se presenta información del riesgo a nivel nacional y departamental, lo cual contribuye a la priorización de zonas de intervención y a identificar donde se deben realizar estudios con mayor resolución. Permite, además conocer el tipo de información disponible y qué entidades pueden aportar información más detallada. Finalmente permite ratificar la necesidad de contar con manuales y guías que definan el alcance y faciliten la realización de estudios con la adecuada resolución que permita una toma de decisiones consistente a nivel local y nacional.

OBJETIVO

El Atlas tiene como objetivo dar a conocer diversos estudios y avances en relación con la evaluación de las diferentes amenazas de origen natural y tecnológico, desarrollados por entidades públicas y privadas en el país; así como también dar a conocer resultados de la evaluación probabilista del riesgo para diferentes amenazas, basados en métricas del riesgo apropiadas para la toma de decisiones.

Se presentan mapas de amenaza sísmica, inundación, tsunami, ciclones tropicales, incendios forestales, sequía y movimientos en masa a nivel nacional. A nivel departamental se presentan perfiles de riesgo multi-amenaza con mapas de la pérdida anual esperada para representar el riesgo físico, y los resultados del índice integral del riesgo de desastres para dar cuenta del impacto potencial, teniendo en cuenta factores de agravamiento asociados con la fragilidad socioeconómica y la falta de resiliencia a nivel municipal.

PÚBLICO OBJETIVO

Este trabajo está dirigido a las diferentes instituciones públicas relacionadas con el desarrollo económico y social y la gestión del riesgo de desastres en el país. Igualmente, se espera que sea de especial utilidad para las entidades territoriales, la academia, las organizaciones no gubernamentales y el sector privado en general.

ADVERTENCIA NECESARIA

Los datos usados para la evaluación probabilista del riesgo que aquí se presenta provienen de información gruesa acerca de las diferentes amenazas naturales consideradas y de los activos o elementos expuestos; por lo tanto, es necesario señalar que los resultados aquí presentados proporcionan estimaciones aproximadas, en un orden de magnitud de las pérdidas económicas que pueden presentarse como resultado de la ocurrencia de los fenómenos naturales considerados. Estos resultados no tienen otro objetivo que ofrecer una imagen general y relativa del riesgo en el país debido a las limitaciones de información antes mencionadas; sin embargo, se espera que estos resultados contribuyan a la priorización de acciones y seguramente, en muchos casos, a la realización de estudios más detallados de riesgo que permitan establecer acciones más específicas de gestión del riesgo de desastres.

También es importante señalar que la identificación, evaluación y comunicación del riesgo con fines de toma de decisiones, es una tarea que exige rigor científico y técnico y un enfoque adecuado y consistente para la planificación y la inversión. Esta publicación presenta descripciones sencillas y resumidas acerca de los enfoques técnicos y conceptuales en que se basan las evaluaciones de las diferentes amenazas,

de la vulnerabilidad y de la evaluación probabilista del riesgo. Por esta razón, no se incluyen detalles técnicos y matemáticos de la forma como deben abordarse dichas evaluaciones, lo cual escapa al alcance de esta contribución y se encuentra en artículos y documentos técnicos a los cuales se hace referencia en el texto.

DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO

Se presenta una descripción resumida de las amenazas naturales y tecnológicas, de la exposición, la vulnerabilidad y de la evaluación probabilista del riesgo de desastres para algunas de las amenazas más relevantes. La representación espacial de las amenazas y del riesgo se ha realizado en una secuencia que permita entender de una manera más sencilla dichas amenazas y el riesgo que se deriva de las mismas en el país. Los resultados del riesgo se presentan de tal forma que se facilite la comparación directa y relativa entre los municipios y departamentos con el propósito de ofrecer una estimación cuantitativa aproximada del riesgo a nivel nacional y territorial y así contribuir a identificar y priorizar futuros estudios más detallados relacionados con la evaluación del riesgo de desastres.

Se incluyen en esta publicación mapas de amenaza, realizados por entidades como la AIS (amenaza sísmica), IDEAM (inundaciones, incendios forestales y sequías) y el SGC (movimientos en masa y localización de volcanes), CIMA (inundaciones), NGI (tsunami), INGENIAR (ciclones tropicales); así como los resultados del riesgo por departamento para sismo e inundaciones para todo el país, tsunami para el pacífico y ciclones tropicales para el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina con base en la amenaza, la exposición y las funciones de vulnerabilidad del GAR15 y GAR Atlas (UNISDR 2015; 2017). La descripción

del modelo probabilista del riesgo y sus componentes está basada en la información generada por cada una de las entidades mencionadas anteriormente.

El índice integral del riesgo de desastres ha sido obtenido utilizando los resultados del riesgo físico y una serie de variables socioeconómicas relevantes que dan cuenta del impacto que pueden tener los daños y pérdidas en cada sitio. Su objetivo es presentar el riesgo de una manera comprensiva u holística para alcanzar una audiencia amplia, resaltar los aspectos sociales, económicos y ambientales que pueden contribuir a incrementar los niveles de riesgo y a crearlo, pero también hacer notar y comunicar cómo el riesgo existente, en caso de que se materialice puede tener serias implicaciones para el desarrollo en el país.

La estructura de esta publicación es la siguiente:

- Contexto general: se describe la división político-administrativa del país, su población y concentración de población en las diferentes regiones y se hace una descripción del contexto económico.
- Amenazas en el territorio: se presenta una descripción general y resumida de la amenaza sísmica, volcánica, por tsunami, inundaciones, sequía, movimientos en masa, incendios forestales y amenazas tecnológicas. Se hace referencia a los enfoques de evaluación, sus características en el país, la institucionalidad asociada a cada una de ellas y su evolución en el tiempo y los resultados de su evaluación o caracterización en Colombia.
- Exposición y vulnerabilidad: se describen los diferentes elementos expuestos a los fenómenos que pueden presentarse y que se deben considerar para una

evaluación probabilista del riesgo. Se explican el tipo de funciones y modelos de vulnerabilidad que se utilizan para relacionar el nivel de intensidad de los fenómenos con el daño y las pérdidas potenciales.

- Evaluación del riesgo: se presenta una descripción de la evaluación probabilista del riesgo, las métricas del riesgo en términos de daños y pérdidas económicas, la evaluación integral del riesgo de desastres usando los resultados del riesgo físico y variables socioeconómicas a nivel municipal, que dan cuenta de la fragilidad social y la falta de resiliencia, así como también los perfiles de riesgo por departamentos que incluyen los resultados de la pérdida anual esperada por municipio, el índice integral del riesgo desastres por municipio y las pérdidas máximas probables por departamento.
- Casos locales ilustrativos: esta sección incluye descripciones breves de la evaluación probabilista del riesgo a nivel local que han sido utilizadas para la toma de decisiones en estas ciudades o regiones del país. Se presentan casos locales en: Manizales, la región de La Mojana, el Volcán Galeras, los ejemplos del LISA y el SisMan LISA en Bogotá y Manizales respectivamente, y el caso analítico de Medellín y la evaluación del riesgo por huracán en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.
- Perfiles de riesgo departamentales: incluyen los resultados de la pérdida anual esperada por municipio, el índice integral del riesgo desastres por municipio y las pérdidas máximas probables por departamento.
- Referencias: se incluye una lista de documentos consultados o de los documentos fuente de la información incluida en la publicación.

1.1. Contexto general del territorio Colombiano

La extensión total de Colombia es de aproximadamente 2.070.408 km², de los cuales 1.141.748 km² (aproximadamente el 55%) corresponde a territorio continental y el área restante corresponde a territorio marítimo. Colombia se encuentra ubicado en el extremo noroccidental de Suramérica. Está dividido en cinco regiones: la región andina conformada por tres cordilleras (occidental, central y oriental), la región amazónica, la región del caribe en la costa norte de Colombia y la región de la orinoquía con enormes llanuras. Territorialmente, Colombia está dividida en 32 departamentos (dirigidos por gobernadores) y 1123 municipios (dirigidos por alcaldes). En el **Mapa 1** se presenta la división político-administrativa del país. Los departamentos tienen autonomía de los recursos otorgados por el Estado y son entes de coordinación entre la nación y los municipios. Las cinco entidades territoriales con una administración especial son Bogotá, Cartagena, Barranquilla, Santa Marta y Buenaventura.

La población de Colombia es de 49.291.609 de habitantes (Estadísticas del DANE, 2017). La mayor parte de su población, así como la mayor actividad económica se concentra en la región andina -en el centro de Colombia-

y en la costa atlántica al norte del país. Los núcleos demográficos con mayor población están conformados por Bogotá y Soacha, Medellín, Bello e Itagüí en el valle de Aburra y Cali y Palmira en el Valle del Cauca. Igualmente, en Cartagena, Barranquilla, Santa Marta, Bucaramanga, Cúcuta, el eje cafetero, Huila y Tolima se concentra un importante número de habitantes. El 10,6% de la población colombiana es afrodescendiente y el 3,4% indígena.

La economía colombiana se basa, fundamentalmente, en la producción de bienes primarios para la exportación y en la producción de bienes de consumo para el mercado interno. Una de las actividades económicas más tradicionales es el cultivo de café, siendo uno de los mayores exportadores de este producto a nivel mundial. El café ha sido parte central de la economía de Colombia desde principios del siglo XX, sin embargo, su importancia y su producción han disminuido significativamente en los últimos años. La producción petrolera en el país también es muy importante, siendo el cuarto productor de América Latina y el sexto del continente. En cuanto a minerales, cabe destacar la explotación de carbón y la producción y exportación de oro, esmeraldas, zafiros y

diamantes. En agricultura, ocupan un lugar importante la floricultura y los cultivos de banano, y en el sector industrial se destacan los textiles, la industria automotriz, la química y la petroquímica (Consultado en: <https://www.colombia.com/colombia-info/informacion-general/economia/>).

Su variada topografía, caracterizada por amplias zonas de montaña, valles y planicies -llanuras y selvas-, favorece que en su territorio existan todos los pisos térmicos y una gran biodiversidad. La zona andina se caracteriza por cordilleras de relieve abrupto y valles interandinos, por donde corren ríos como el Magdalena y el Cauca, a los cuales llegan múltiples cauces de ríos y quebradas. La variedad térmica de esta zona da origen a una alta diversidad ambiental -por su vegetación, paisajes y ecosistemas-, pero también geomorfológica, resultado de procesos permanentes de transformación, por las lluvias del trópico y por la interacción de diferentes placas tectónicas, lo que deriva en una importante actividad sísmica y volcánica. Su ubicación en la zona de convergencia intertropical explica las temporadas de lluvias intensas y épocas de estío que se presentan anualmente. Estas temporadas son exacerbadas por los fenómenos de El Niño y La Niña, afectando

los regímenes de precipitaciones. Estas características que constituyen una amplia diversidad geológica, geomorfológica, hidrológica y climática hacen que Colombia sea también un territorio altamente susceptible a fenómenos naturales peligrosos.

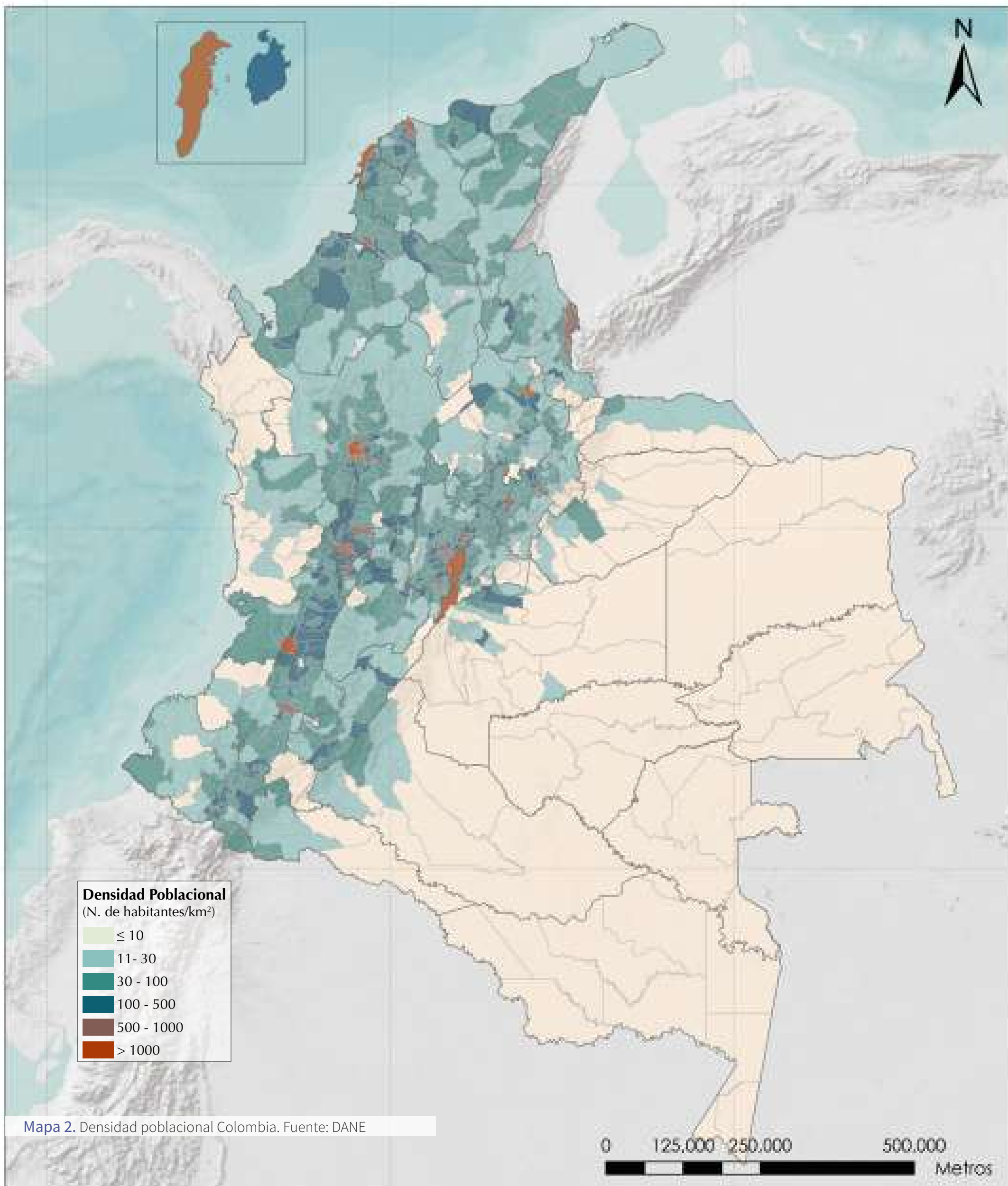
En general, las características del entorno natural deben ser determinantes de la planificación del desarrollo económico y social del país. Si no se tienen en cuenta en forma apropiada, sus diferentes manifestaciones se convierten en amenazas para el contexto social, económico y ambiental del país. Esta situación la confirma la historia de desastres en el territorio nacional. Por ejemplo, se pueden mencionar algunos eventos geológicos que han generado impactos catastróficos, como el terremoto de

Popayán (31 de marzo de 1983), la erupción del volcán Nevado del Ruiz y el flujo de lodos que destruyó a Armero (13 de noviembre de 1985), los sismos del Atrato medio (17 y 18 de octubre de 1992), el sismo de Tierradentro, también conocido como el terremoto de Páez (6 de junio de 1994), el sismo del Eje Cafetero (25 de enero de 1999) (Cardona et al., 2004; CEPAL, 2007). Igualmente se pueden mencionar eventos de origen climático como los fenómenos de El Niño en 1991 y 1997, o de La Niña en 1982, 1988 y en 2010-2011 (Montealegre, 2007; Defensoría del Pueblo, 2011). Este último significó lluvias intensas, deslizamientos y caudales en los ríos sin precedentes en muchos sitios del país; generando importantes pérdidas de vidas, de infraestructura y cientos de viviendas destruidas. Entre los eventos

recientes, se encuentran Pasto-Nariño, Crisis Volcánica 2005-2010; Gramalote Santander, movimiento en masa 2010; Fenómeno del Niño 2014-2016; Salgar-Antioquia, avenida torrencial 2015; la Mesa de los Santos, Norte de Santander, sismo 2015; Mocoa, avenida torrencial 2017. Aparte de estos grandes desastres, Colombia también ha sido afectada de manera recurrente y crónica por eventos menores puntuales, en todo el territorio, socavando en forma permanente el bienestar de muchas comunidades y destruyendo en forma continua los medios de sustento de las personas de menores ingresos. Estos eventos representan un impacto social y económico muy relevante para el país individualmente y de forma acumulada (Marulanda y Cardona, 2006).



Mapa 1. División político - administrativa Colombia. Fuente: IGAC





2. Amenazas



2.1. Terremotos

Los sismos son movimientos del suelo generados por los procesos de liberación repentina de energía que puede ocurrir por el contacto entre placas tectónicas o por fallas localizadas en la corteza de la

Tierra. Como se muestra en la **Figura 1** el desplazamiento relativo entre las placas tectónicas y las fuerzas convectivas interiores de la Tierra generan un incremento gradual de esfuerzos en esas zonas de contacto y

luego, una vez se alcanza la resistencia de la roca, la energía se libera y se transforma en ondas que se propagan en diferentes direcciones generando vibraciones del terreno.

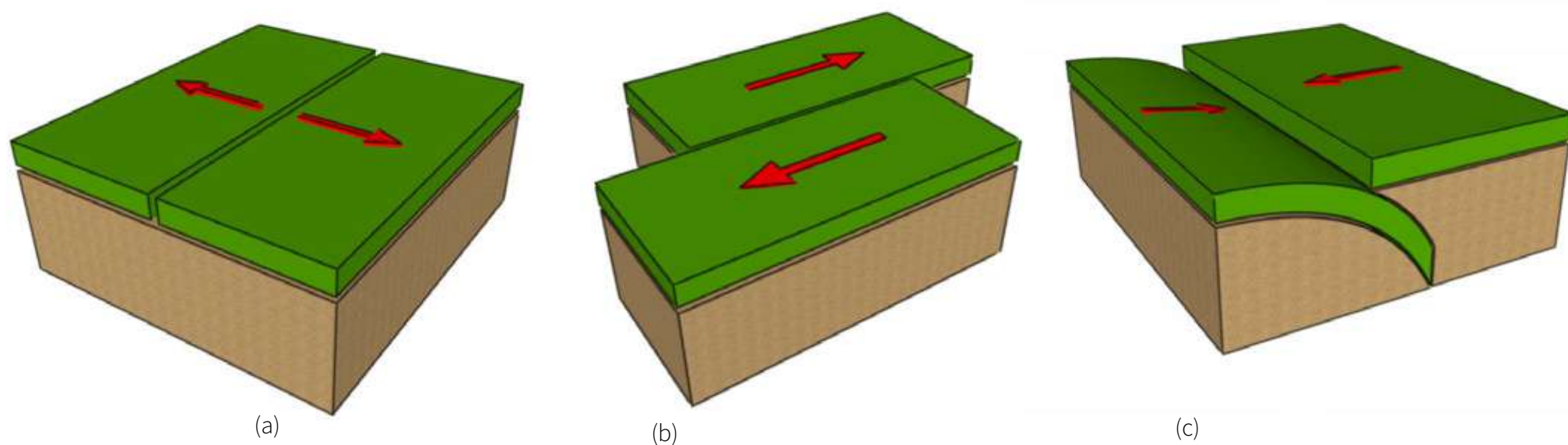


Figura 1. Tipos de movimiento de las placas tectónicas: (a) Fronteras divergentes; (b) Fronteras transformantes; (c) Fronteras convergentes.

¿DONDE OCURREN LOS TERREMOTOS?

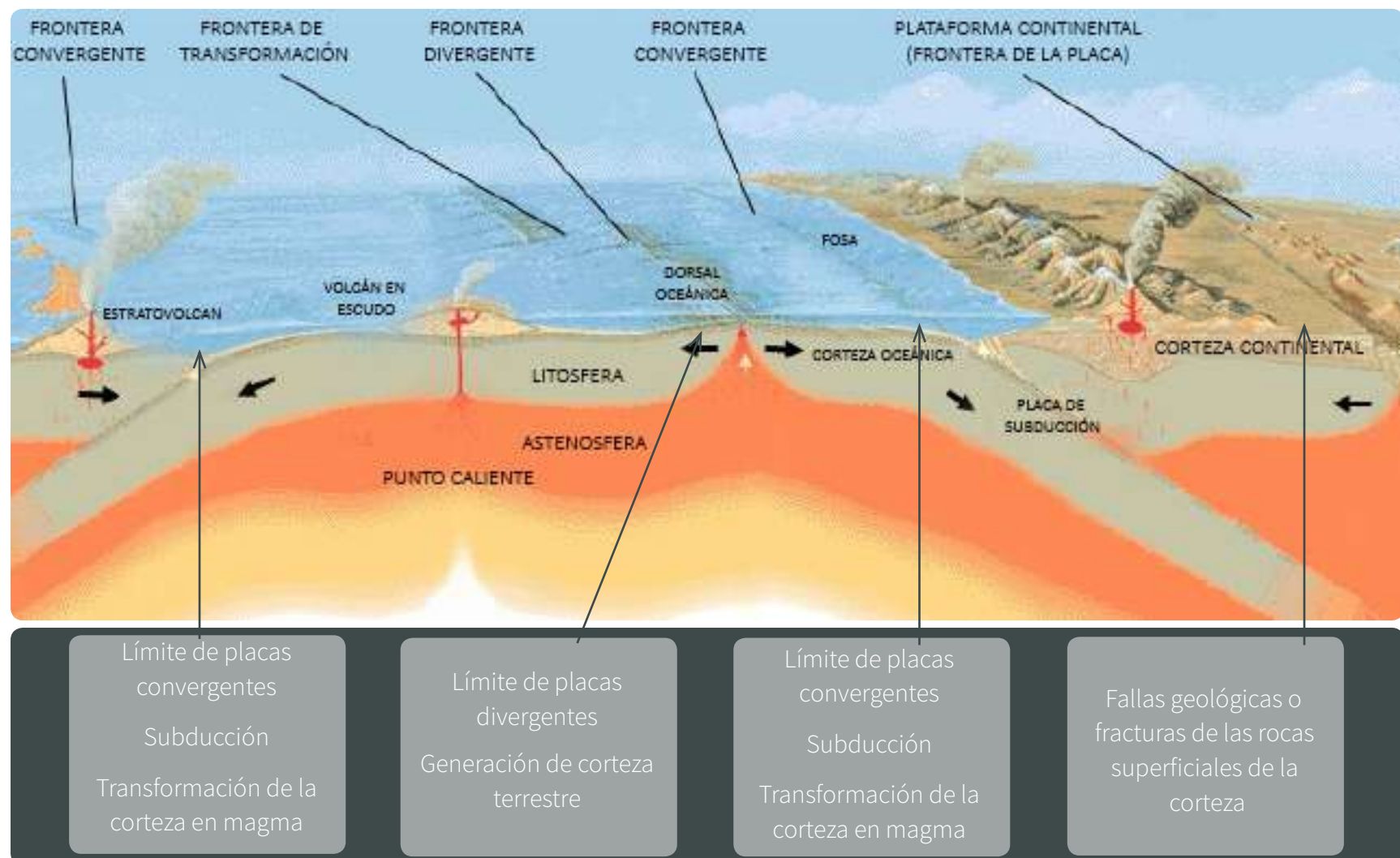


Figura 2. Ciclo de generación y subducción de la corteza terrestre

Existen diferentes tipos de ondas sísmicas y cada una tiene una forma y velocidad de propagación características. Por ejemplo, existen ondas de compresión (u ondas P) y ondas de corte (u ondas S), que se propagan deformando la corteza terrestre como se muestra en la *Figura 3*. Estas ondas se denominan ondas de cuerpo y son las responsables de las mayores afectaciones sobre el ambiente construido. También existen las ondas Love y Rayleigh, que son denominadas ondas de superficie, y que producen, respectivamente, movimientos horizontales de corte y movimientos elípticos verticales en la superficie del terreno, como se muestra también en la *Figura 3*.

La intensidad de los efectos de las ondas

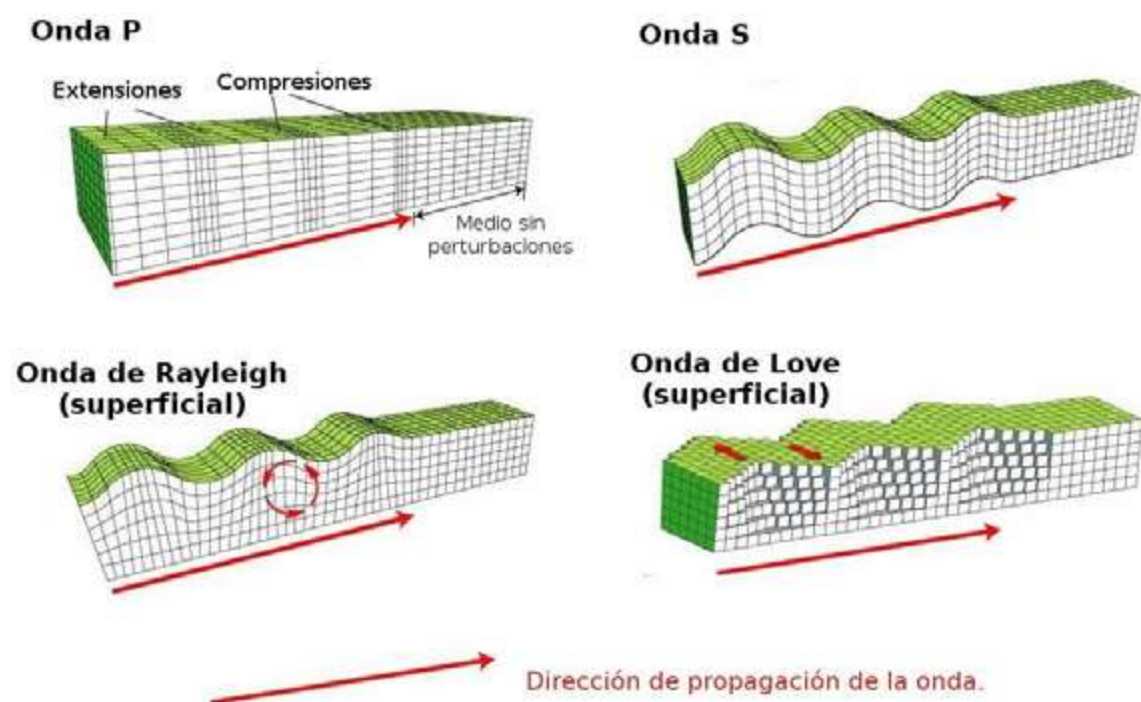


Figura 3. Tipos de ondas sísmicas.

Fuente: <https://www.britannica.com/science/seismic-wave/images-videos>

se atenúa a medida que se estas se alejan de la zona de generación de energía, o fuente sísmica. La atenuación ocurre porque las ondas pierden energía a medida que viajan por la corteza terrestre; así pues, los parámetros inherentes al movimiento sísmico (aceleración, velocidad y desplazamiento del terreno) son diferentes en cada punto geográfico.

Las demandas que el movimiento sísmico induce sobre el ambiente construido, hacen necesario poder calcular la respuesta sísmica de las estructuras ante dichos movimientos, con el fin de determinar los requisitos para el diseño y construcción de edificaciones sismo resistentes. Para dichos cálculos se deben conocer los parámetros sísmicos, sin embargo, aunque es bien conocido que la sismicidad es recurrente y también que los terremotos de bajas magnitudes ($M_w \leq 3.5$) son mucho más frecuentes que aquellos de altas magnitudes ($M_w \geq 7.5$), no es posible estimar cuándo ni dónde ocurrirá el próximo terremoto, así como tampoco conocer su magnitud.

La alta incertidumbre asociada a los eventos sísmicos es una de las razones que ha motivado el desarrollo de metodologías de análisis probabilista de amenaza sísmica con el principal objetivo de proporcionar una estimación a largo plazo de los terremotos en términos de posibles localizaciones y frecuencias de ocurrencia. Adicional al cuándo, dónde y qué tamaño, hay otros aspectos relevantes de la incertidumbre (e.g. cómo se van a propagar y cómo se van a atenuar las ondas), existen metodologías que no solamente las tienen en cuenta explícitamente, sino que también las propagan durante los análisis.

La amenaza sísmica de una región determinada depende de un gran número de variables, algunas de las cuales pueden

ser difíciles de cuantificar en la actualidad. Sin embargo, se han desarrollado modelos simplificados que permiten estimar las variables fundamentales involucradas en el cálculo de la amenaza sísmica, lo cual permite dar un tratamiento científico al problema. Para la evaluación probabilista de la amenaza sísmica, en general se pueden identificar cuatro etapas: 1) selección del modelo geométrico y zonificación tectónica, 2) selección del modelo de sismicidad y estimación de sus parámetros, 3) selección de las relaciones de atenuación de movimiento fuerte y asignación a las fuentes sismogénicas y 4) cálculo de la amenaza sísmica (Salgado et al., 2010; 2015).

Si bien la amenaza sísmica se considera estacionaria y los órdenes de magnitud normalmente no presentan históricamente grandes cambios, la disponibilidad de un mayor número de registros de movimiento fuerte y los consiguientes avances que estos permiten en el desarrollo de relaciones de atenuación, constituyen la razón principal por la cual estos estudios se deben actualizar de manera periódica (Salgado et al., 2010; 2015).

Por otro lado, para identificar la amenaza sísmica de la manera más confiable posible, a nivel local es esencial contar con la microzonificación sísmica, que consiste en la identificación y caracterización geotécnica y geológica de cada sitio para poder evaluar la respuesta de los suelos frente a terremotos. Este tipo de estudios

son fundamentales para efectos de normatividad, planificación, evaluación del riesgo y prevención de desastres.

Los estudios de amenaza sísmica son de especial importancia para el desarrollo de normas y requisitos sísmicos para el diseño y construcción de nuevas edificaciones e infraestructura, así como para el reforzamiento de las ya existentes de acuerdo al nivel de amenaza. Igualmente es indispensable para la definición de los planes de ordenamiento territorial, pues permite identificar las zonas de mayor actividad sísmica y gestionar acciones que reduzcan o prevengan el riesgo sísmico en el territorio, entendido éste como pérdidas potenciales.

AMENAZA SÍSMICA EN COLOMBIA

Colombia se encuentra situada en la convergencia de tres placas litosféricas: Nazca, Caribe y América del sur. El movimiento relativo entre estas tres placas

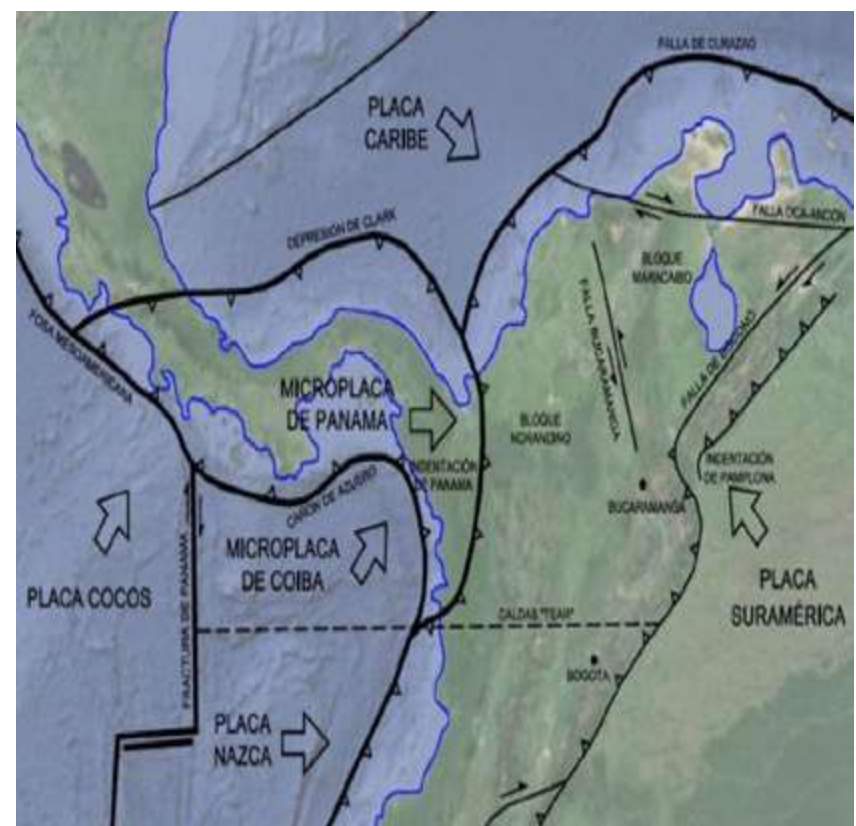


Figura 4. Convergencia de placas litosféricas Nazca, Caribe y América del Sur. Fuente: <http://georem.blogspot.com.co/2017/10/las-placas-tectonicas-situacion-de.html>

ha originado el relieve y la estructura actual de las cordilleras colombianas. La convergencia relativa de Nazca y Sudamérica también es absorbida a lo largo de grandes sistemas de fallas intracontinentales que atraviesan la corteza terrestre y son responsables de la sismicidad superficial en Colombia. La magnitud

máxima probable de los diferentes sistemas de fallas intracontinentales es variable y depende de distintos parámetros como son la longitud, la orientación en el espacio y el tipo de movimiento de los segmentos de falla (AIS, 2016).

El territorio colombiano presenta una gran

cantidad de fallas (**Figura 5**), entre las cuales cabe destacar el sistema de fallas de Romeral y sistema del Piedemonte Llanero. Ambos sistemas se extienden desde el Ecuador hasta el norte de Colombia, presentando distintos segmentos de falla de gran longitud, conectados entre sí. Existen otros sistemas de falla que también contribuyen a

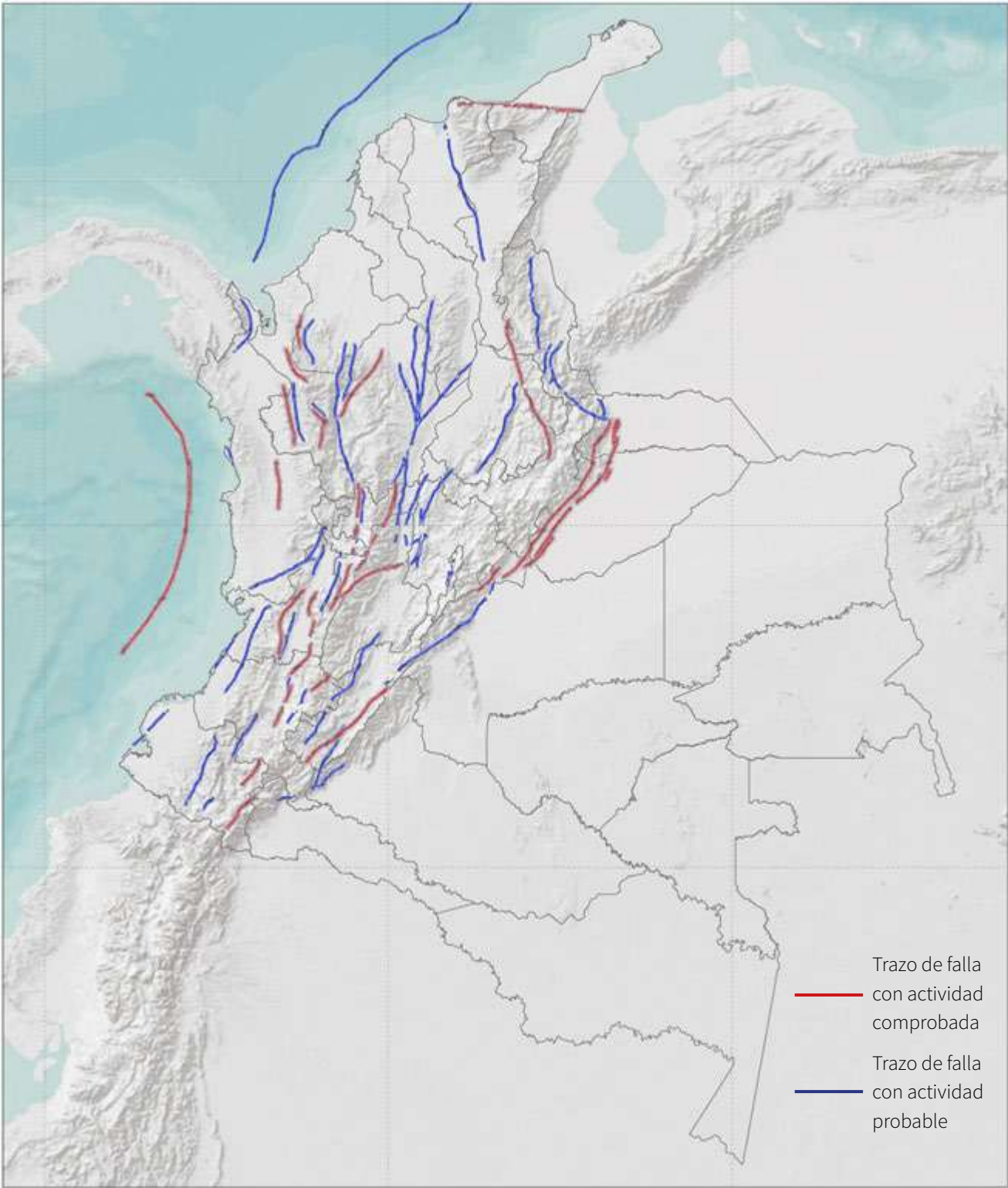


Figura 5. Fallas principales y potencialmente activas en Colombia.
Fuente: AIS, 2009

la tectónica de los Andes Colombianos, en la costa Pacífica, norte de Colombia y distintas fallas en áreas de la cordillera oriental, central y occidental. Asimismo, existen fallas geológicas que no tienen mayor peso en la sismicidad del país a nivel general, pero que son muy importantes a nivel local y deben involucrarse en los estudios de microzonificación sísmica (AIS, 1996).

Debido a que la mayoría de la población colombiana se encuentra concentrada en grandes ciudades localizadas en las zonas de mayor amenaza o peligro, y debido tanto a la acción del hombre como al proceso de industrialización de los últimos años, el potencial de desastre resulta significativamente alto para el país. De acuerdo con el estudio de amenaza sísmica incorporado en el Reglamento NSR-10, “de las cabeceras municipales, 553, correspondientes aproximadamente al 39.7% de la población colombiana, se encuentran en zonas de amenaza sísmica alta; 431, equivalente al 47.3% de la población, en zonas de amenaza sísmica intermedia; y 139, equivalente al 13% de la población, en zonas de amenaza sísmica baja¹ (AIS, 2010).

Colombia en su historia ha sufrido diversos eventos notables. La primera noticia sobre un sismo reportado en el país corresponde a un sismo ocurrido en 1541 entre Cali y Popayán (Ramírez, 1975). Luego, ha habido sismos que han afectado de forma importante diferentes ciudades y regiones del país, como la destrucción total de Cúcuta (1875), el terremoto y maremoto de Tumaco (1906), considerado uno de los más

1 Zona de Amenaza Sísmica Baja: definida para aquellas regiones cuyo sismo de diseño no excede una aceleración pico efectiva (Aa) de 0.10g. Zona de Amenaza Sísmica Intermedia: definida para regiones donde existe la probabilidad de alcanzar valores de aceleración pico efectiva mayores de 0.10g y menores o iguales de 0.20g. Zona de Amenaza Sísmica Alta: definida para aquellas regiones donde se esperan temblores muy fuertes con valores de aceleración pico efectiva mayores de 0.20g. AIS, 2010.

fuertes ocurridos en tiempos modernos (9.2 Mw), el Terremoto del Eje Cafetero (1979), el de Popayán (1983) que generó la creación del Fondo Nacional de Calamidades y la reflexión social de los desastres en América Latina, el Terremoto del Atrato Medio o “Terremoto de Murindó” (1992), Tierradentro (1994) y el Terremoto del Eje Cafetero (1999) que se considera el mayor y más complejo desastre sufrido por el país en términos del área social y económica afectada (Banco Mundial, 2012).

A raíz de los terremotos en Colombia, desde el siglo XIX ha habido aportes importantes a la historia de la sismología del país en cuanto a la recopilación de información y descripción de la intensidad y daños observados de terremotos ocurridos. Aunque en estos aportes no había recomendaciones explícitas para la construcción, si se reconocía la necesidad de contar con construcciones que resistieran estos movimientos de la tierra. Una muestra importante de la adaptación de las construcciones al entorno sísmico, es el “estilo temblorero”² en la página 26 originado a partir de los sismos de 1878 en Manizales, que luego se extendió por todo el viejo Caldas.

De manera formal, la sismología en Colombia comienza alrededor de los años 40 cuando se fundó el Instituto Geofísico de los Andes Colombianos, adscrito a la Universidad Javeriana. En 1972 se incluyen cursos relacionados con los sismos en la Universidad de los Andes, y en 1974 se inicia formalmente el primer postgrado en el tema y se funda la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) en la Universidad de los Andes, y en 1975 se vuelve un ente externo e independiente (Espinosa, 2003).

La AIS ha sido una organización fundamental

2 En este estilo el principal material es el bahareque

para el desarrollo de la ingeniería sísmica en el país. Algunos de sus aportes significativos ha sido la divulgación de temas relacionados con el diseño sismo resistente, así como la generación de normas técnicas de diseño y construcción sismo resistente. La primera norma del país fue publicada a comienzos de los años 80, de carácter no obligatorio. Posteriormente, a raíz del terremoto de Popayán en 1983, surge el Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes, expedido por medio del Decreto 1400 de 1984, de obligatorio cumplimiento. La primera actualización, que corresponde a la norma NSR-98, fue expedida por medio del decreto 33 de 1998, la cual era más exigente e incorporaba una zonificación sísmica mejor fundamentada. La segunda y más reciente actualización que incluye nuevos parámetros de construcción, el Reglamento NSR-10, se comenzó en el 2008 y fue expedido por medio del decreto 926 del 2010.

Además de motivar el desarrollo de un código nacional de construcciones, el sismo de Popayán impulsó la creación de la Red Sismológica Nacional (que se puso en marcha en 1993) con el apoyo de Ingeominas (actualmente Servicio Geológico Colombiano, SGC), esto contribuyó sustancialmente al desarrollo tanto de la sismología como de la ingeniería sísmica en Colombia (Niglio y Valencia, 2013).

Actualmente Colombia cuenta con 53 estaciones sismológicas en zonas de alta actividad sísmica, y 103 estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia. El SGC publica información histórica de los sismos de mayor magnitud en diferentes períodos de tiempo, mapas de sismicidad y de grandes terremotos ocurridos en el país. Además, cuenta con programas y proyectos encaminados al estudio de la amenaza

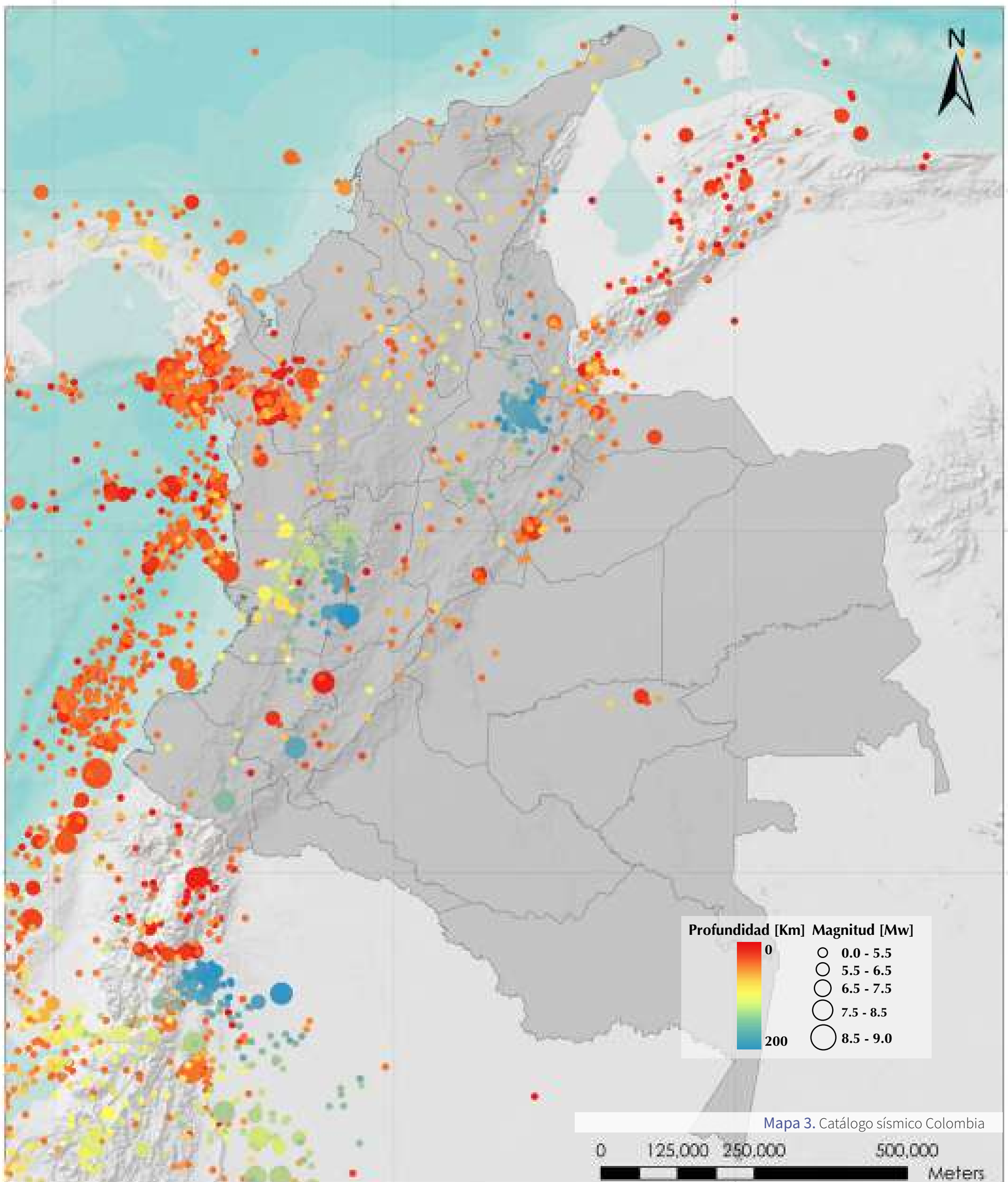
sísmica a través del monitoreo de las redes y contribuye a la actualización del mapa de Amenaza Sísmica de Colombia y estudios de amenaza sísmica y de respuesta de suelos (Consultado en: <https://www.youtube.com/watch?v=94H8YuqOWJk>).

Por otro lado, el Observatorio Sismológico del Suroccidente (OSSO) también participa en el monitoreo de la amenaza sísmica. Cuenta con un conjunto de sismómetros en los departamentos del Valle del Cauca, Cauca y Risaralda cuyo propósito es el estudio de la actividad microsísmica en el occidente del país. Este observatorio genera reportes diarios y mensuales en los que se incluyen mapas y tablas de la actividad sísmica.

A nivel local, Bogotá y Manizales cuentan con el Laboratorio de Instrumentación Sísmica Automática, LISA y SisMan LISA respectivamente, que cuentan, a su vez, con una red de acelerógrafos interconectados por radiofrecuencia. Esta red tiene el propósito de mejorar el conocimiento de la amenaza sísmica a la que están expuestas las ciudades y el de convertirse en una herramienta para la atención a emergencias (Bernal et al. 2016, 2017). La descripción del LISA y el SisMan LISA se puede encontrar en el capítulo de casos locales de esta publicación.

En la actualidad, 16 ciudades del país cuentan con estudios de microzonificación sísmica: Popayán, Bogotá, Manizales, Cali,

Medellín, Armenia, Pereira, Manizales, Ibagué, Valle de Aburrá, Bucaramanga (estudio indicativo), Dosquebradas, Santa Rosa de Cabal, Palmira, Tuluá, y Buga). El primer estudio que se desarrolló en Colombia fue el de Popayán, a partir del sismo de 1983. La Universidad de los Andes y el Ingeominas (ahora Servicio Geológico Colombiano, SGC) desarrollaron este estudio con la participación de la Comunidad Económica Europea. Este dio las pautas para el desarrollo de estudios similares en las demás ciudades (Alcaldía de Manizales, 2002).



Mapa 3. Catálogo sísmico Colombia

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA NACIONAL

Con base en la disponibilidad de modelos y técnicas de cálculo más refinadas para la evaluación de la amenaza sísmica y de mayor cantidad de registros de eventos sísmicos, en 2010 se actualizó la norma de diseño y construcción sismo resistente del país.

La metodología utilizada para la evaluación de la amenaza sísmica en Colombia consistió en (Salgado et al., 2010):

- Identificación y modelación de cada una de las fallas o fuentes sismogénicas a nivel nacional, agrupándolas en segmentos de grandes familias de fallas locales mediante la revisión de los diferentes estudios relacionados con el tema;
- Asignación mediante ubicación geográfica los eventos sísmicos que

se consideran asociados a cada uno de los segmentos, utilizando para ello los catálogos sísmicos nacionales. Existen diferentes catálogos de eventos sísmicos recopilados por diferentes instituciones (Ingeominas - ahora SGC, ISA, Instituto Geofísico de los Andes, Corporación OSSO).

- Caracterización de cada una de las fuentes sísmicas mediante parámetros estadísticos relevantes, tales como magnitud mínima, máxima y frecuencias de eventos para diferentes rangos de magnitudes.
- Aplicación del modelo probabilista de amenaza sísmica (CRISIS V7.2)
- Interpretación y depuración de los resultados para su utilización en el diseño de infraestructura y en otras aplicaciones.

Esta metodología permite obtener espectros de amenaza uniforme, que son utilizados para definir los coeficientes sísmicos para el

diseño estructural de nuevas estructuras y en la evaluación de la capacidad estructural de estructuras existentes. Detalles técnicos de este procedimiento se pueden encontrar en Salgado et al. 2010; 2015.

Los resultados de la evaluación de la amenaza son presentados en mapas nacionales de amenaza sísmica. En el Mapa 4 se presenta la amenaza sísmica de Colombia correspondiente a un periodo de retorno de 475 años, para un periodo estructural de 0,5s. Estos resultados se obtuvieron para el nivel nacional a nivel de roca firme y sirven como dato de entrada para estudios detallados de microzonificación sísmica o estudios de sitio para edificaciones donde se requiere un análisis más detallado de la demanda sísmica.

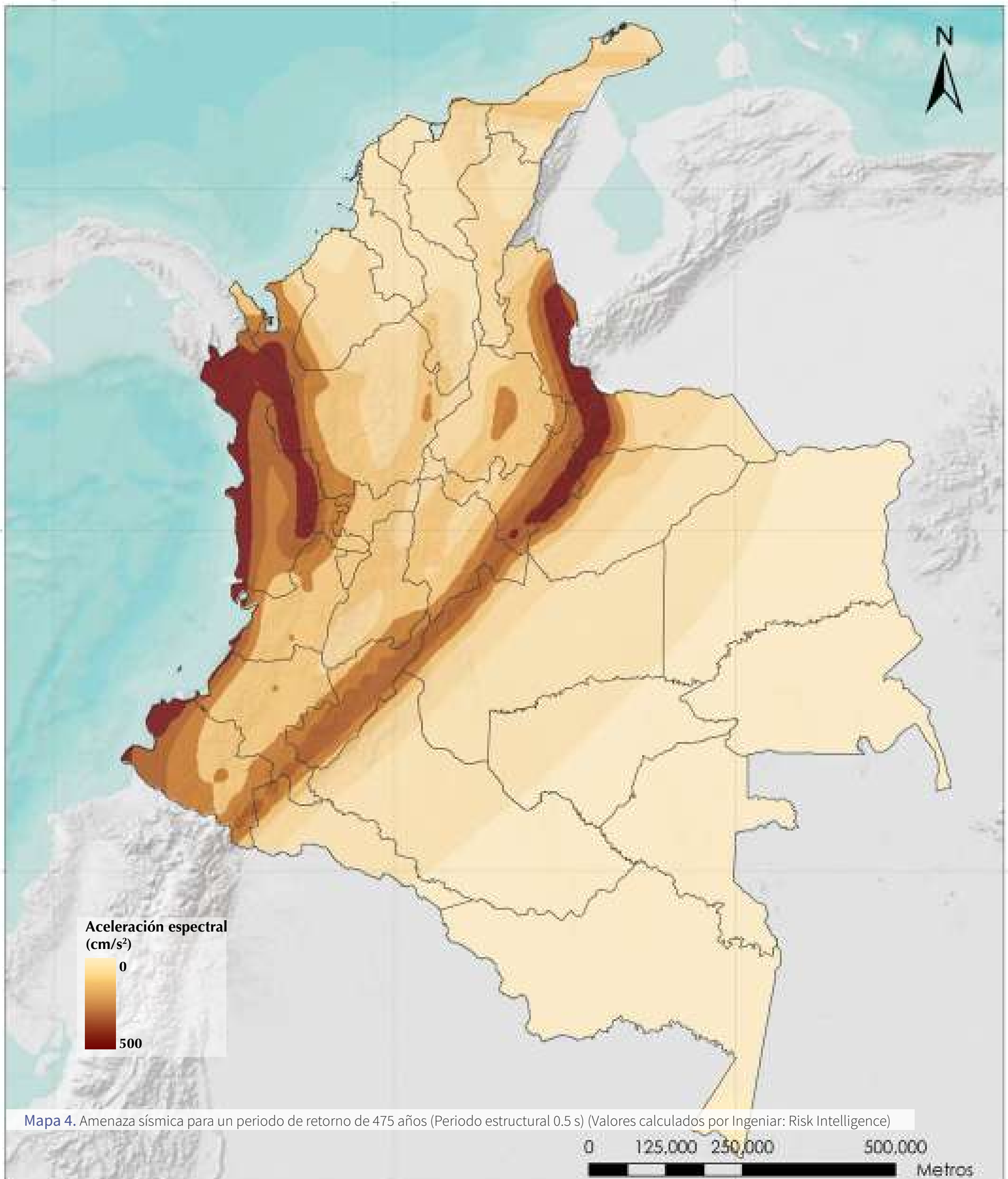




Imagen: AAP/AP

2.2. Tsunami

Un tsunami (del japonés tsu, puerto, nami, ola) es una serie de olas de gran longitud de onda que generalmente ocurren por sismos ocurridos en el fondo marino o cerca de la costa, aunque también pueden generarse por erupciones volcánicas, deslizamientos submarinos o por el impacto de meteoritos en el mar. Pueden afectar las costas y que son mucho mayores que las olas generadas por el viento.

El tsunami golpea con fuerza devastadora; inunda rápidamente las áreas costeras bajas y ocasiona daños materiales y pérdida de vidas. Puede avanzar corriente arriba por las desembocaduras de los ríos, afectando a las poblaciones localizadas cerca de sus cauces. Cuando un tsunami se origina lejos de la costa, incluso al otro lado del océano, puede tomarse horas en llegar. Si el tsunami se produce cerca de la costa, sólo se puede

tomar minutos en llegar.

Un tsunami causado por un terremoto usualmente se origina por el movimiento abrupto de placas tectónicas que, aparte de liberar súbitamente energía sísmica, también genera en el fondo del océano un desplazamiento vertical de un gran volumen de agua. Esta fuerte perturbación en el mar, al igual que cuando se tira una piedra en un estanque, genera ondas que se propagan en todas las direcciones en el océano.

Los casos históricos permiten establecer que, en general, se requieren sismos de subducción de importante magnitud para detonar un tsunami. Un tsunami se propaga con una muy alta velocidad (en promedio 800 km/h en mar abierto). La amplitud de onda lejos de la costa no es significativa; sin embargo, cuando llega a aguas poco

profundas se amplifica, aumentando la altura de la ola y disminuyendo su velocidad. La altura de las olas depende de la batimetría; es decir, de cómo son las características del fondo del mar. Además, su severidad depende de las irregularidades de la costa y de la topografía tierra adentro; es decir, de esto depende también qué tanto puede avanzar sobre la superficie de la tierra. Estas olas pueden viajar grandes distancias y pueden alcanzar la costa después de unos minutos o incluso de muchas horas después de la ocurrencia del evento desencadenante y pueden afectar simultáneamente las costas de varios continentes, generando grandes pérdidas y daños en las franjas que llegan a ser impactadas e inundadas. La **Figura 6** muestra una representación esquemática del proceso de generación de un tsunami.

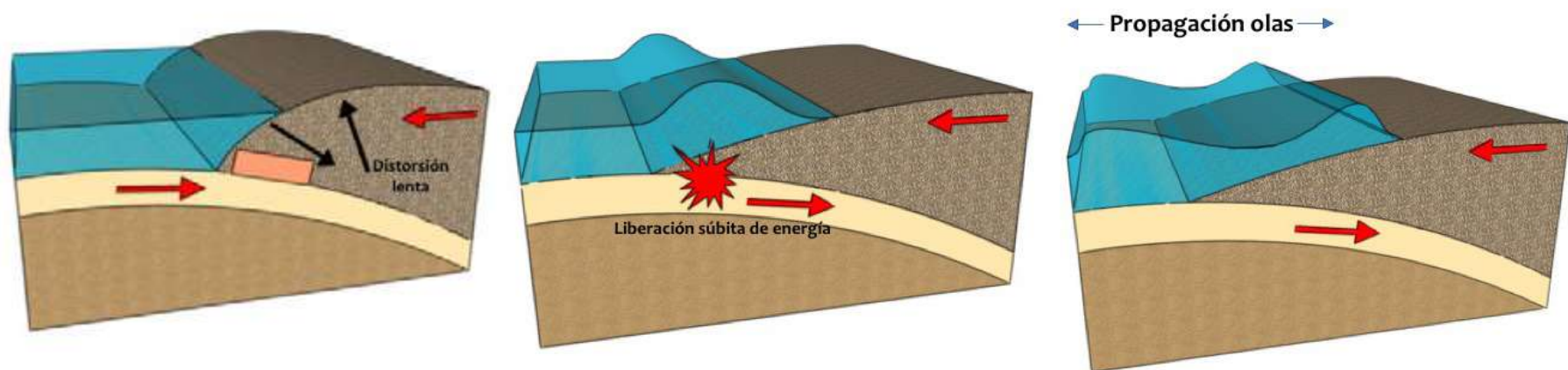


Figura 6. Formación de un Tsunami

Un tsunami es un evento de alto potencial destructivo que puede traer consecuencias devastadoras para las poblaciones costeras vulnerables a este fenómeno. En total, 14 grandes tsunamis han dejado 250.879 muertos en 22 países entre los años 1995 y 2016 (EM-DAT). Los daños y pérdidas que este tipo de eventos puede generar hacen necesario que se desarrollen y apliquen metodologías que permitan estimar su magnitud y su severidad. Sin embargo, dado que el tsunami es un evento poco frecuente y su recurrencia puede ser de cientos de años, los registros de eventos observados son pocos y para la estimación de esta amenaza se requiere de enfoques prospectivos y probabilistas que representen y cuantifiquen los posibles eventos y los efectos que pueden ocurrir.

Diversos métodos se aplican para la evaluación de la amenaza por tsunami, algunas veces estos métodos son complementarios, dado que cubren distintas escalas de tiempo: tsunami prehistóricos (evaluación geológica de depósitos de tsunami), se aplica normalmente a tsunami de fuente cercana; tsunami históricos (testimonios históricos de tsunami); información instrumental que es de gran importancia para la calibración

de modelos de oleaje; comportamiento de zonas de subducción (caracterización de zonas de subducción); pronósticos de plazo intermedio que se realiza a partir de la identificación de patrones espacio-temporales en la sismicidad reportada en catálogos globales; análisis probabilista de amenaza de tsunami (PTHA) (Corporación OSSO, 2016).

La modelación de un tsunami debe abordarse mediante dos análisis complementarios: *i)* su generación, y *ii)* su propagación y arribo. Los análisis de generación permiten estimar la energía que un evento detonante es capaz de transmitir a la masa de agua en forma de ondas gravitacionales. Este análisis involucra un importante conocimiento del proceso detonante y la capacidad de establecer o adoptar modelos de comportamiento, dentro de las condiciones esperadas, para el área bajo estudio; así como la necesidad de establecer o adoptar modelos de interacción entre el suceso detonante y la masa de agua.

Para la evaluación de la amenaza de tsunami se pueden identificar las siguientes etapas: 1) identificación de las fuentes potenciales que la originan, 2) identificación y caracterización de los mecanismos

generadores del fenómeno, 3) conocimiento de la magnitud, intensidad y nivel de energía del fenómeno, 4) determinación de los periodos de recurrencia, 5) representación probabilista de parámetros de interés en zonas costeras (Cardona et al., 2013, 2015; DIMAR 2013).

El análisis de amenaza por tsunami permite detonar estocásticamente terremotos en fuentes submarinas y determinar los tirantes o alturas de inundación en zonas costeras por efecto de la ocurrencia de cada tsunami. El análisis considera las condiciones de generación y propagación de las ondas gravitacionales para determinar la altura máxima de la ola y determinar las condiciones de arribo, las amplificaciones por efectos locales particulares y la capacidad de afectar sitios poblados determinados (Cardona et al., 2013, 2015).

La aplicación del modelo probabilista arroja mapas de amenaza de tsunami para los diferentes parámetros de intensidad definidos y para diferentes periodos de recurrencia (Cardona et al., 2013, 2015; DIMAR 2013). A partir de la modelación probabilista se pueden establecer aproximaciones sobre las características de eventos futuros, de tal manera que puedan

diseñarse planes de acción preventiva o de mitigación para reducir el riesgo en zonas costeras, establecimiento de rutas de evacuación, planes de respuesta a emergencias, desarrollo de sistemas de alerta/alarma en áreas críticas, así como programas educativos concretos (Cardona, 2007) que brinden el soporte que se requiere para tomar decisiones de hacia dónde deben estar orientados los esfuerzos.

AMENAZA DE TSUNAMI EN COLOMBIA

Un tsunami puede presentarse tanto en la costa Pacífica como en la costa Caribe. Sin embargo, la mayor amenaza para Colombia se encuentra en la costa Pacífica donde ya han ocurrido dos desastres por este fenómeno. La costa Pacífica está expuesta a fuentes tsunamigénicas cercanas – como la zona de subducción, la placa de Nazca se mueve por debajo de la placa suramericana– y otras fuentes lejanas a lo largo del Cinturón de Fuego del Pacífico.

En el Caribe Colombiano aún continúan las investigaciones sobre las posibles fuentes tsunamigénicas locales como son los sismos y los deslizamientos submarinos.

Se estima que la amenaza de tsunami es mayor en la costa Pacífica que en el Caribe, sin embargo, las pérdidas por tsunami podrían ser mayores en la costa Caribe por su concentración de población e infraestructura. Los departamentos expuestos son Nariño, Cauca, Valle del Cauca y Chocó, en el Pacífico, y La Guajira, Bolívar, Atlántico, Magdalena, Sucre, Córdoba, Antioquia, Chocó, y San Andrés y Providencia en el Caribe.

La población localizada en los municipios costeros expuestos a la amenaza por tsunami, alcanza los siete millones de

habitantes (seis millones en el Caribe y un millón en el Pacífico); lo que representa el 16% del total de población. Dada la mayor probabilidad de ocurrencia en el Pacífico, el municipio con mayor población expuesta y con posibilidad de pérdidas por este fenómeno es Tumaco (Nariño) (CCO, 2010).

Existen registros históricos de eventos de origen cercano, en la zona de subducción, como los ocurridos en 1882, 1904, 1906, 1942, 1958 y 1979 que afectaron la costa Pacífica. El tsunami de 1979 afectó gravemente el municipio de Tumaco (Nariño) y sus alrededores (Velasco y López, 2016).

Desde el evento de 1979, el Estado colombiano ha hecho un esfuerzo permanente para reducir el riesgo por tsunami en la costa pacífica, a través de la investigación científica, el monitoreo de la amenaza y la preparación para la respuesta en caso de que un evento de este tipo se presente. Los esfuerzos han sido especialmente del nivel nacional y regional y se ha contado con voluntad política local en diferentes momentos.

Uno de los primeros estudios de tsunami en Colombia se llevó a cabo después del evento de 1906 en la costa de Nariño (Rudolph y Szirtes, 1911). Este estudio hizo una contribución al conocimiento de los escenarios de amenaza y riesgo sísmico por tsunami en la Costa Pacífica y en él se hizo la primera propuesta de mitigación mediante la formación natural de diques a partir de empalizadas y el traslado de la ciudad a Isla del Gallo (Corporación OSSO, 2016).

A raíz del desastre de 1979 en el Pacífico colombiano que destruyó de manera importante la población de Tumaco y por completo a San Juan de la Costa, se creó en 1982 el Comité Técnico Nacional de

Alerta por Tsunami, CTNAT , coordinado por la Secretaría Ejecutiva de la Comisión Colombiana del Océano, CCO. Su propósito fue convocar a diferentes instituciones para abordar esta problemática y plantear la necesidad de diseñar una estrategia nacional para enfrentar la amenaza por tsunami en las costas Colombianas. A partir de 1985, el Observatorio Sismológico del Sur Occidente, OSSO, participó en el CTNAT y tuvo como misión desarrollar, apropiar, divulgar el conocimiento relativo a estos fenómenos naturales y el riesgo, y las estrategias y medidas para reducirlo. Asimismo, los centros de investigación del Ministerio de Defensa Nacional-Dirección General Marítima -DIMAR iniciaron proyectos de investigación para evaluar el riesgo por tsunami.

En 1989, bajo la coordinación general de la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres y la Comisión Colombiana de Oceanografía (hoy del Océano), se inició el programa nacional de tsunami, con el apoyo inicial de Naciones Unidas (DHA-UNDRO) y la Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional.

Después del tsunami de Indonesia en 2004, se reconoció la necesidad de contar con sistemas de alarma adecuados y oportunos, por lo que, a partir del 2009, DIMAR cuenta con una red mareográfica específica para la detección de tsunami en el Pacífico colombiano, y ha instalado mareógrafos de radar y presión en la bahía de Tumaco, la bahía de Buenaventura y en la isla de Malpelo. En el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico, se ha desarrollado un sistema de modelación de tipo operacional que permite simular el comportamiento de un tsunami, en términos de la propagación de sus ondas, el tiempo de arribo, la altura y la velocidad de choque en la costa (CCO, 2010).

Actualmente se cuenta con un Protocolo Nacional de Detección y Alerta de Tsunami, operado por el Sistema Nacional de Detección y Alerta de Tsunami. El Sistema, conformado por seis instituciones como la Corporación OSSO, el Servicio Geológico Colombiano, la Dirección General Marítima, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, definió los roles y las responsabilidades de cada entidad con el objetivo de compartir información técnica relevante para declarar los estados de alerta ante la ocurrencia de un tsunami de origen local, regional o transoceánico.

Así mismo, el país cuenta con la representación a nivel internacional, de la Comisión Colombiana del Océano - CCO, quien tiene como función coordinar con los demás países de las cuencas del Pacífico y del Caribe, las alertas internacionales de tsunami y actividades de mitigación.

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA DE TSUNAMI EN COLOMBIA

Aparte del trabajo liderado por el OSSO, en relación con el SNDAT, la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres coordinó el desarrollado de un Programa de Mitigación de Riesgo por Tsunami en Tumaco. En este proyecto, mediante métodos de simulación numérica con base en la aproximación para ondas

largas (Caicedo et al. 1996) se pudo estudiar de manera preliminar el tiempo de llegada, altura de ola e inundación en caso de tsunami. En dicho trabajo se llevó a cabo la simulación de un evento de la fuente cercana (1979:12:12, zona de subducción colombo-ecuatoriana) y de un tsunami de origen lejano (1960:05:22, Chile). Estos escenarios se escogieron para la elaboración del plan de emergencias y contingencias al igual que el estudio de evaluación de la vulnerabilidad física por terremotos y sus fenómenos asociados en poblaciones del Litoral del Nariño debido a la similitud de los resultados de estos modelos con los testimonios y datos mareográficos del tsunami ocurrido en 1979. A partir de estos estudios, el CCCP elaboró una modelación del evento para obtener el número de heridos, muertos y viviendas afectadas (*Figuras 7 y 8*).

La DIMAR ha desarrollado diferentes trabajos relacionados con la evaluación de amenaza por tsunami para la bahía de Tumaco, Buenaventura y Málaga, así como en el golfo de Cúpica. Estos estudios incluyen la definición de escenarios sismo-tectónicos generadores de tsunami, implementación de modelos numéricos de deformación sísmica para definir las condiciones iniciales de generación de este tipo de eventos, aplicación de modelos numéricos de propagación de ondas largas en aguas someras para simular el tránsito de las ondas de tsunami y la evaluación de

su impacto en las zonas costeras utilizando información topo-batimétrica a diferentes escalas.

En la cuenca del Caribe se han llevado a cabo estudios relacionados con la amenaza de tsunami (Caicedo et al., 1996), donde se seleccionó una fuente sísmica cercana, el Cinturón Deformado del Norte de Panamá y una fuente lejana, la zona de subducción del segmento Norte del Arco de las Antillas Menores. En estos estudios se concluye que las alturas de ola probables para la costa de Colombia en el Caribe no son significativamente superiores a las que recurrentemente se presenta por la interacción Atmósfera – Océano y por tanto, no hay evidencias de amenaza de tsunami significativa. Asimismo, estudios realizados para San Andrés y Providencia (Corporación OSSO, 2014) permiten concluir que no hay ninguna fuente de ocurrencia probable que generaría olas de más de decímetros de altura (Corporación OSSO, 2016).

Los resultados de la modelación y otros estudios han tenido aplicaciones en programas de prevención, evacuación y sistemas de alerta temprana, así como también en el ordenamiento territorial de Tumaco y en la preparación de este municipio ante un tsunami. Las *Figuras 7 y 8* presentan los mapas de inundación por tsunami de origen cercano para la Bahía de Tumaco y para la Bahía de Buenaventura.

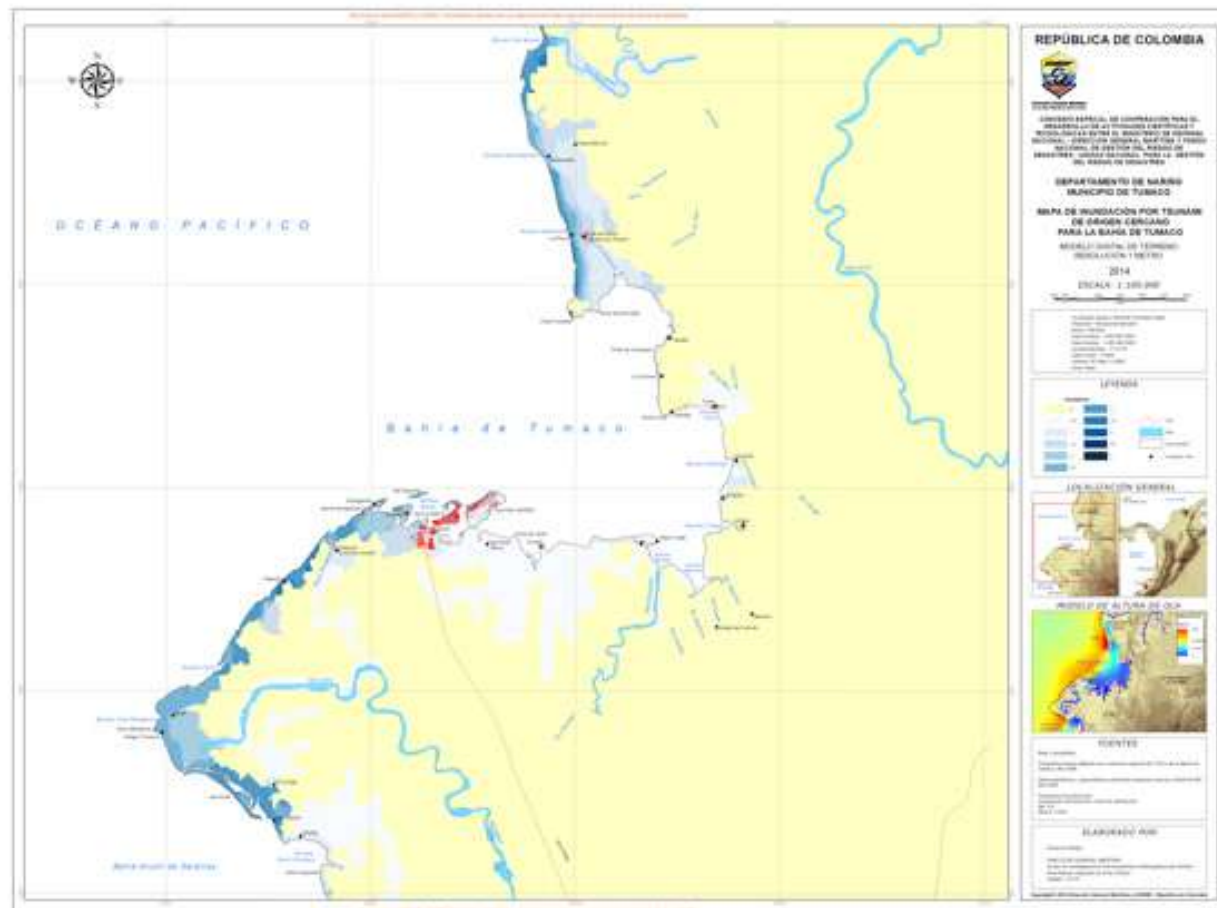


Figura 7. Mapa de inundación por tsunami de origen cercano para la Bahía de Tumaco. Fuente: DIMAR, 2014

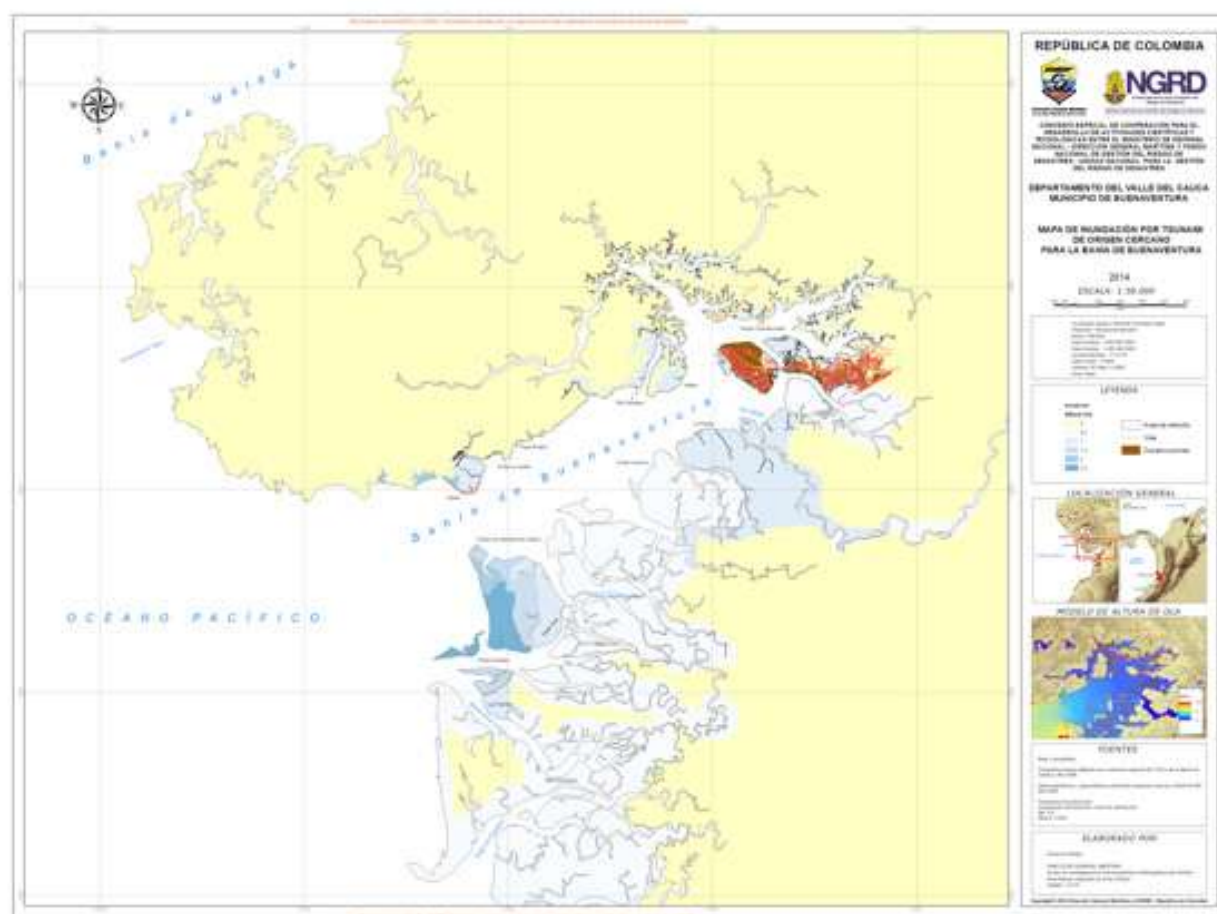
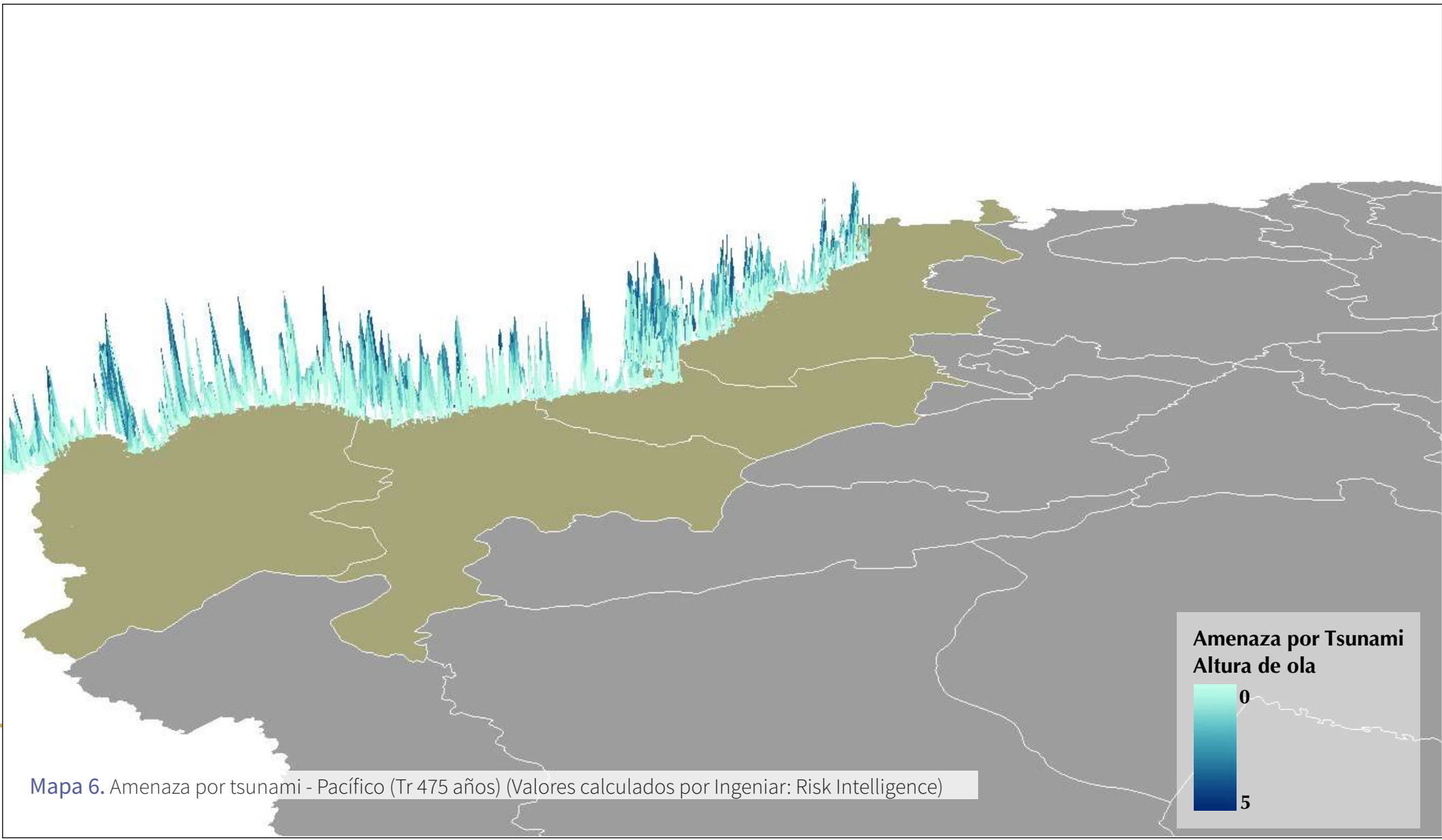
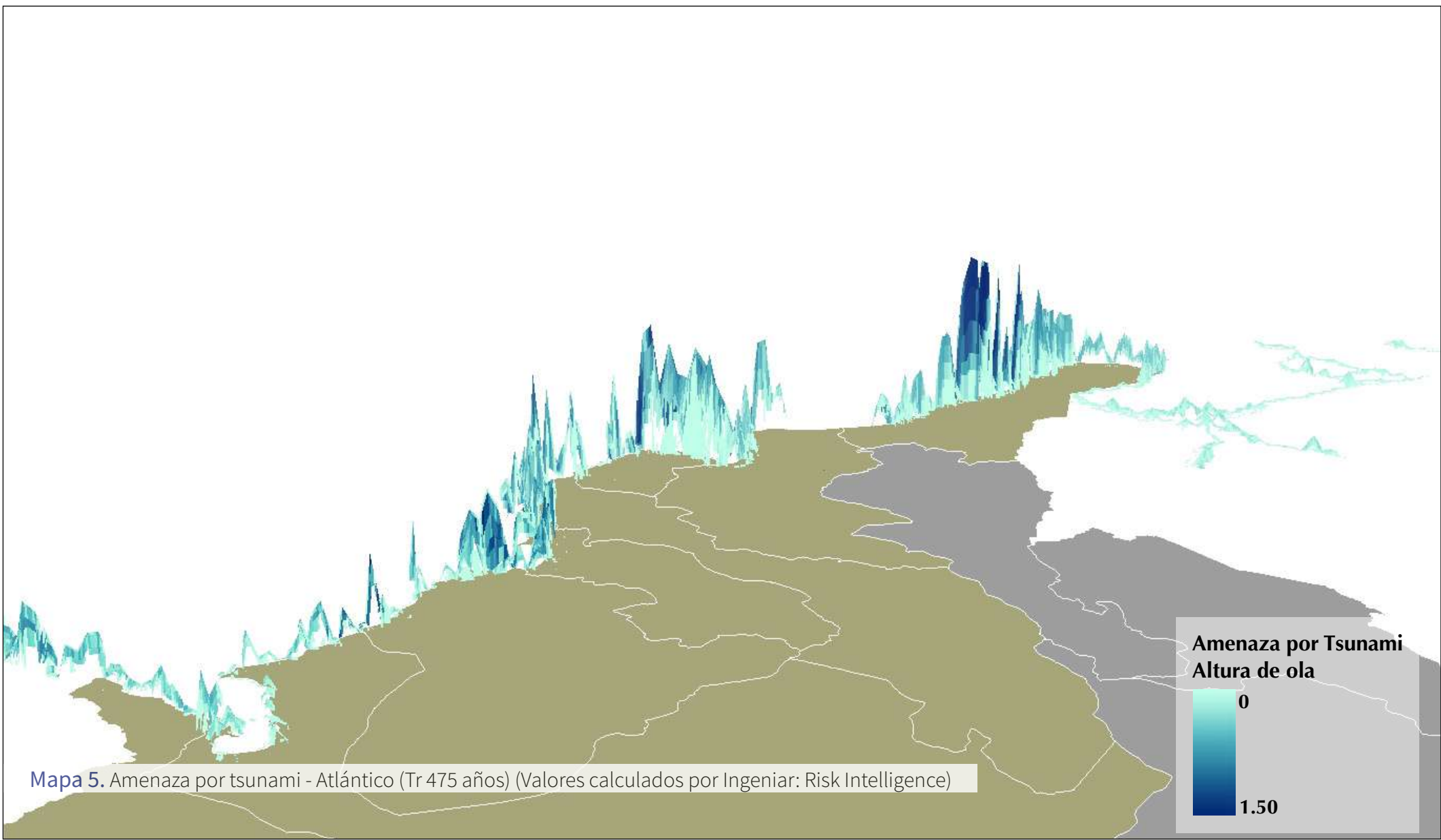


Figura 8. Mapa de inundación por tsunami de origen cercano para la Bahía de Buenaventura. Fuente: DIMAR, 2014

Por otro lado, en el marco del Modelo Global del Riesgo 2015 de la Oficina de las Naciones Unidas para Reducción de los Desastres – UNISDR (UNISDR, 2015; UNISDR, 2017, Ingeniar, 2017) se llevó a cabo el cálculo de la amenaza probabilista de Tsunami (NGI y GA, 2014) a nivel global. Los *Mapas 5 y 6*

presentan amenaza de Tsunami para 475 años de periodo de retorno en términos de profundidad del agua para el pacífico Colombiano y la costa Caribe. A pesar de la resolución global de la modelación de la amenaza, los resultados son consistentes y dan cuenta de la amenaza

existente en toda la costa Colombiana. Asimismo, la modelación de la amenaza de manera probabilista permite contar con la información necesaria (en términos de frecuencia de ocurrencia y valores de profundidad del agua) para el cálculo del riesgo por tsunami en el país.





2.3. Volcanes

Los volcanes son en general aberturas o fisuras en la corteza de la Tierra que establecen una comunicación temporal o permanente entre el manto y la superficie terrestre. Los volcanes son el resultado de procesos tectónicos y se ubican en zonas de alta actividad sísmica. Las placas litosféricas flotan en una capa de magma (roca fundida

y gases disueltos). Entre las zonas de convergencia, o divergencia de estas placas, el magma, que es menos denso que la roca sólida asciende a través de conductos, grietas y fisuras.

Existen diferentes tipos de ascenso de magma como ilustra la Figura 9. La presión

intensa genera una erupción con diversos materiales como vapor de agua, gases, cenizas, rocas y lava, los cuales son lanzados a la atmósfera. La acción volcánica está determinada por la topografía que rodea al volcán y la velocidad del material expulsado.

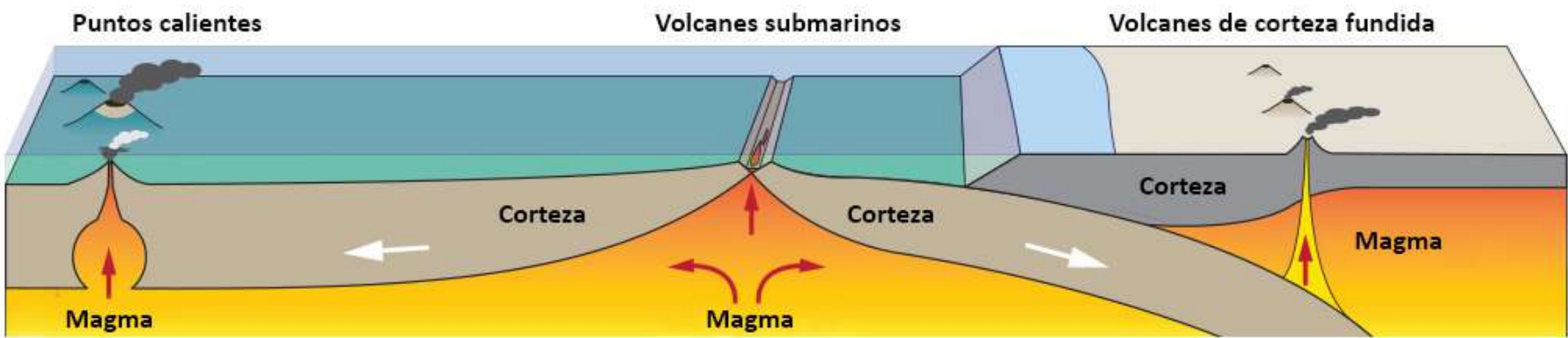


Figura 9. Formas de elevación del magma
(<https://spaceplace.nasa.gov/volcanoes2/en/>)

Los volcanes se clasifican dependiendo del tipo de productos volcánicos, la estructura de su formación y a los procesos eruptivos característicos. Por su composición se clasifican dependiendo de los materiales que contenga y se dividen en: volcanes andesíticos, que son aquellos que contienen un alto porcentaje de sílice, lo

que los hace muy explosivos y generadores de flujos piroclásticos, sus erupciones son producidas por apilamiento de magma sobre y alrededor de un foco volcánico, generalmente de forma piramidal o cónica con perfiles bajos y suaves; y volcanes basálticos, que se caracterizan por contener un bajo porcentaje de sílice, no

son explosivos y usualmente presentan emisiones de lava, por lo cual a sus erupciones se les denomina efusivas. Su mayor amenaza es el flujo de materiales, los cuales varían en su naturaleza (lodo, ceniza, lava) y en cantidad.

Según su estructura de formación como

se presenta en la **Figura 10**, los volcanes se pueden dividir en: conos de escoria, que contienen materiales más simples formados por acumulación de bloques de lava solidificada, expulsada por explosiones sucesivas; estrato volcanes, que se forman por acumulación sucesiva de material piroclástico y acumulación de lava; escudos, formados por acumulación de flujos de lava que ha escurrido por erupciones tranquilas con bastante fluidez; conos cineríticos, formados principalmente por material piroclástico; y domos volcánicos, formados por acumulación de lavas muy viscosas que no pueden viajar largos trayectos.

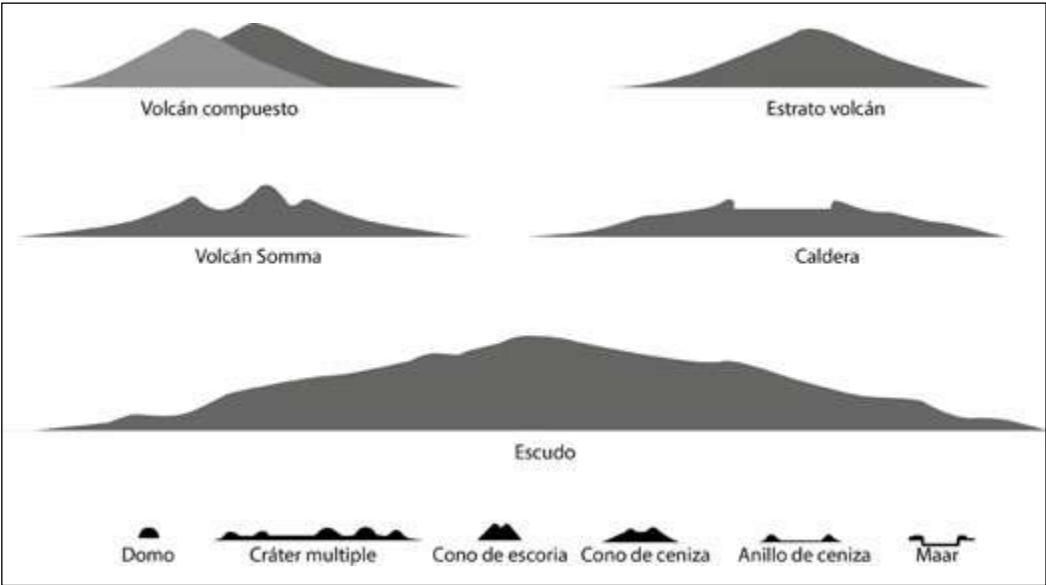


Figura 10. Clasificación de volcanes según su estructura de formación

Según su proceso eruptivo se clasifican en (**Figura 11**): islandés, hawaiano; estromboliano, vulcaniano, peleano, pliniano, hidrovulcanismo, explosión lateral dirigida. Dentro de las erupciones efusivas

se encuentran los flujos de lava, ríos de roca fundida que alcanzan velocidades que pueden variar de metros a kilómetros por hora, dichos flujos se pueden dividir en ácidos y básicos: los flujos ácidos

son viscosos, de velocidades bajas con distancias menores a 20 km; los flujos básicos son más fluidos que los anteriores y sus velocidades son altas, recorriendo distancias mayores a 20 Km.

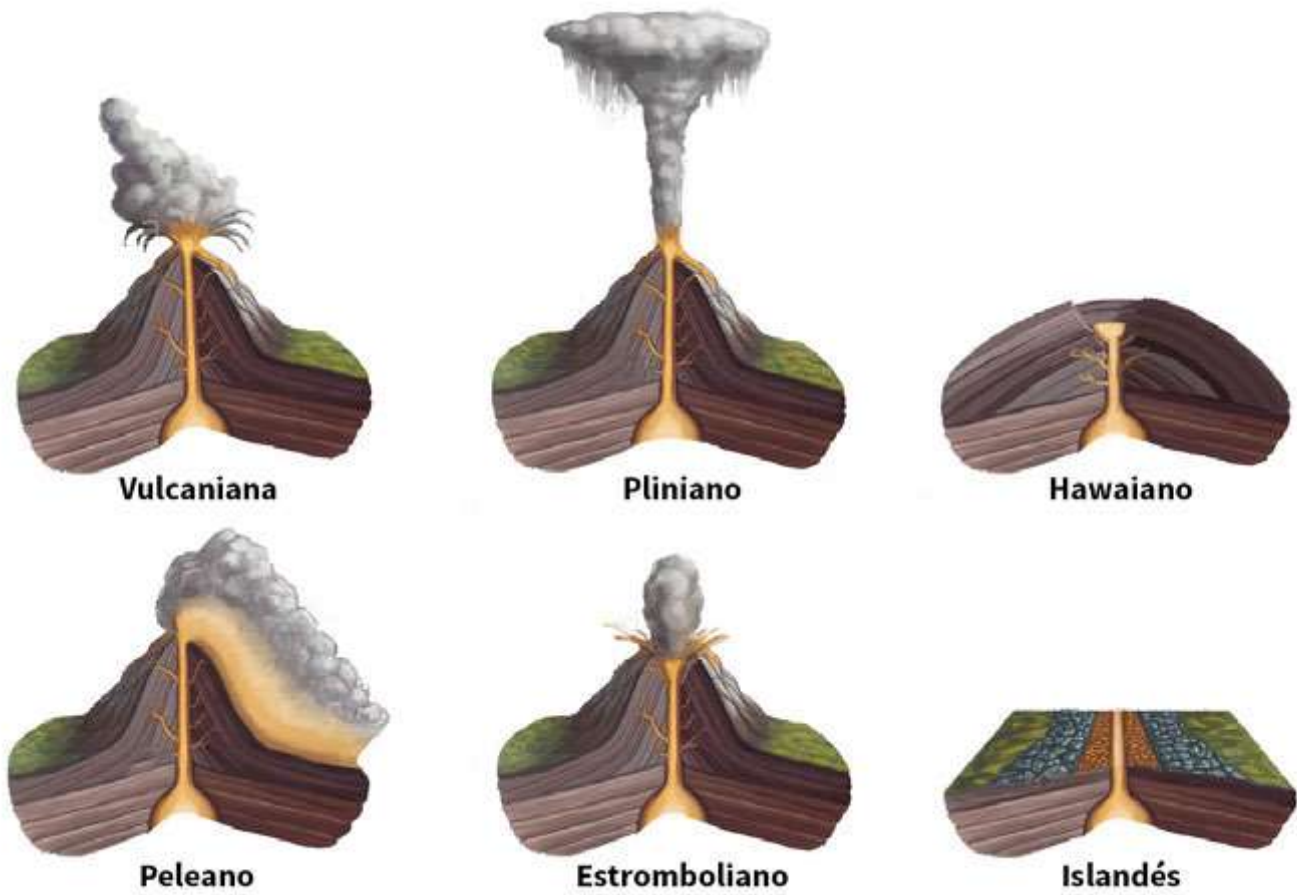


Figura 11. Clasificación de volcanes según su proceso eruptivo

Las erupciones volcánicas son frecuentemente secuencias complejas de fenómenos peligrosos que pueden presentar diferentes tipos de amenaza, directas (muertos, heridos, destrucción de propiedades e infraestructura o hábitat silvestre al momento del evento), o indirectas (cambios ambientales inducidos por la actividad volcánica que puede resultar en destrucción del hábitat y posteriores consecuencias como hambrunas y estrés). Los principales fenómenos de las erupciones volcánicas que pueden generar estos daños son:

- Las emisiones de cenizas que se presentan como pequeñas partículas de rocas volcánicas emitidas a la atmósfera, que pueden afectar grandes extensiones de tierra y causar daños no sólo de tipo climático sino también en propiedades y bienes expuestos;
- Los flujos piroclásticos, compuestos de material granular y gases eruptivos de elevada temperatura, que pueden alcanzar velocidades importantes, siendo uno de los fenómenos más destructivos y mortales que pueden generarse;
- Los flujos de lava, que son corrientes de roca fundida, que destruyen todo en la corriente de flujo debido a sus altas temperaturas y generan incendios;
- Las proyecciones balísticas, son productos piroclásticos expulsados por la boca eruptiva, que por el tamaño y fuerza con la que son eyectados, no son arrastrados por los gases ascendentes de la erupción, sino que adoptan cursos de proyectil alcanzando distancias de hasta algunos kilómetros; pueden causar lesiones o muerte por el impacto.;
- - Lahares o flujos de lodo, son grandes flujos de agua, lodos y piedras de diferentes tamaños que se originan

en las quebradas o ríos que nacen en el volcán y se mueven hacia zonas de menor pendiente. Los lahares pueden alcanzar largas extensiones y velocidad y pueden afectar grandes áreas generando efectos masivamente destructivos;

- Emisión de gases tóxicos como el CO₂ que en algunas ocasiones se concentran en los valles o zonas bajas. Algunos de estos gases pueden causar reacciones químicas tóxicas al entrar en contacto con lagos.

No todas las amenazas son generadas en todas las erupciones o por todos los volcanes. Cada erupción volcánica está caracterizada por su magnitud, intensidad, duración y fenómeno eruptivo, por lo que cada erupción tendrá su propio conjunto de amenazas y puede causar un rango variado de efectos distribuidos en pequeñas o grandes áreas que pueden evolucionar durante la erupción a medida que ésta avanza. Para poder mitigar los efectos de los fenómenos volcánicos es necesario reconocer y considerar cada una de las amenazas y contar con estimaciones confiables.

El conocimiento de los volcanes y la capacidad para anticipar su comportamiento ha avanzado notablemente en las últimas décadas. Sin embargo, su gran complejidad significa que en la mayoría de las circunstancias no se puede predecir exactamente el comienzo y evolución de las erupciones volcánicas y sus consecuencias. Todos los volcanes, así como las amenazas y el riesgo asociado a ellos son únicos de alguna manera, por lo que la predicción exacta del momento y el lugar de una erupción resulta excepcional (Sparks, 2003).

Los estudios integrales de amenaza

volcánica son relativamente escasos debido principalmente a la insuficiencia de información confiable. Sin embargo, y considerando las limitaciones inherentes al análisis de la amenaza volcánica, en el curso de los últimos años se han realizado investigaciones exclusivas que han llevado a desarrollar diferentes métodos de evaluación de la amenaza y el riesgo, los cuales se han aplicado en diferentes lugares alrededor del mundo (Sparks & Aspinall, 2004; Marzocchi & Bebbington, 2012; Sparks et al., 2013; Cardona et al., 2015).

Las amenazas de mayor interés, debido a la frecuencia de ocurrencia en mapas de amenaza y datos de fatalidad (Auker et al., 2013), son los lahares, flujos piroclásticos y caída de ceniza, siendo esta última una de las mejor cuantificadas, ya que puede presentar la mayor distribución y mayor alcance en términos de impactos económicos. Sin embargo, los lahares y los flujos piroclásticos que usualmente presentan efectos más localizados son los que generan mayores pérdidas de vidas, infraestructura y medios de vida. Estos dos últimos tipos de amenaza presentan mayores retos para la modelación y como resultado los análisis de amenaza cuantitativa para lahares y flujos piroclásticos están menos desarrollados que para caída de ceniza.

El desarrollo y aplicación de metodologías probabilistas ha permitido mejorar la capacidad para anticipar eventos volcánicos futuros y sus posibles impactos (Sparks, 2003; Sparks et al., 2012). El uso probabilista de manera formal para toma de decisiones e.g. Análisis Bayesiano, árboles de decisión (Marzocchi & Bebbington, 2012; Sparks et al., 2013; Hincks et al., 2014), podría reducir significativamente la incertidumbre científica y asistir mejor a los oficiales públicos en la toma urgente de decisiones de evacuación y escogencia de políticas

para enfrentar la actividad volcánica.

La selección de acciones apropiadas de mitigación usando modelos probabilistas de predicción y abordar de manera apropiada la incertidumbre es particularmente crítico para manejar la evolución de la emergencia volcánica en volcanes de alto riesgo, donde las acciones de mitigación requieren una alerta avanzada e incurren costos considerables incluyendo aquellos de evacuación.

AMENAZA VOLCÁNICA EN COLOMBIA

En Colombia, los volcanes son de tipo continental y están asociados al proceso orogénico de los Andes resultado de la subducción de la placa Nazca (oceánica) con la placa suramericana (continental). Las estructuras volcánicas se ubican principalmente a lo largo del eje de la cordillera Central y Centro-Occidental. Sin embargo, existen volcanes en casi todo el territorio nacional. Los volcanes actualmente considerados como activos se encuentran a lo largo de la Cordillera Central de Colombia y hacia el sur en la depresión Cauca-Patía y Cordillera Occidental, distribuyéndose en tres segmentos: norte, central y sur (Consultado en: <http://iies.ucaldas.edu.co/es/eventos/vulcanismo-en-colombia>). En el **Mapa 7** se muestra la localización de los volcanes en Colombia.

La actividad volcánica en Colombia ha sido muy variada, y por tanto lo son también sus productos y formas resultantes. En Colombia, los lahares son el fenómeno más representativo de la dinámica de volcanes, sus depósitos se encuentran a lo largo de los ríos procedentes de los volcanes y también hacen parte de los conos de deyección en los piedemontes.

Existen registros históricos de lahares proceden del volcán Nevado del Ruiz de 1595, 1831, 1833, 1845 y de 1985 (Flórez y La Rotta, 1986), se tienen además reportes de erupciones en 1805, 1829, 1831, 1833 y 1989, complementadas por grandes emisiones de ceniza en 1987 y 1988. El volcán Nevado del Tolima también ha presentado lahares, sin embargo, no se encuentran muy bien documentados. La posibilidad de ocurrencia de lahares está básicamente asociada a posibles erupciones en los volcanes nevados del Ruiz, Santa Isabel, Tolima y Huila; este último también activo y con varios episodios recientes. La erupción del volcán Nevado del Ruiz del 13 de noviembre de 1985 causó el desastre en la población de Armero en el departamento del Tolima y en los municipios de Villamaría y Chinchiná, en el departamento de Caldas. Estos lahares fueron debidos a la fusión parcial del casquete glaciar (un 10% aprox.) por erupciones repetidas y que fluyó a lo largo de los ríos Gualí-Azufrado (Magdalena) y río Claro-Chinchiná (Cauca) (Flórez, 1986).

En el país, el estudio sistemático de los volcanes se inició durante la década de los años 70 con actividades de carácter investigativo, académico, cartográfico y de interés geotérmico por parte de entidades gubernamentales como: ICEL, CHEC, Universidad Nacional de Colombia e INGEOMINAS (Consultado en: <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/geoamenazas/Paginas/observatorios-vulcanologicos.aspx>, Monsalve et al., 2000).

En relación con el monitoreo de la actividad volcánica, a pesar de que todas las erupciones ocurridas antes de la erupción del Nevado del Ruiz en 1985 dejaron grandes pérdidas económicas y de vidas humanas, fue únicamente después de esta catástrofe que se empezaron a valorar estas experiencias y a tomar las medidas

pertinentes en la vigilancia y prevención de desastres por la actividad volcánica. Por ejemplo, la erupción del 1 de septiembre de 1989 del Volcán Nevado del Ruiz marcó un hito en la vigilancia volcánica y en la prevención de desastres, gracias al continuo monitoreo y a una excelente coordinación del denominado Comité Regional de Emergencias de Caldas, pudo darse un aviso oportuno a la comunidad caldense, y especialmente a la población de la ciudad de Manizales, la cual soportó una gran caída de ceniza y estuvo en alerta roja durante casi 10 horas, hasta que descendió paulatinamente la actividad y la alerta cambió a color naranja.

En 1989, además de la erupción del Nevado del Ruiz ya mencionada, también se reinició la actividad del volcán Galeras; como respuesta, el INGEOMINAS (hoy SGC) estableció en la ciudad de Pasto un observatorio vulcanológico, encargado de vigilar los volcanes del sur del país, especialmente las manifestaciones del volcán Galeras. Cabe anotar que el volcán Galeras tiene uno de los mejores registros de su actividad desde hace 500 años; se destaca el evento de agosto de 1936 cuando se presentó el único flujo piroclástico en Colombia del que se tenga registro fotográfico en Colombia.

Al incrementarse la actividad volcánica en el país, en 1990 se vio la necesidad de establecer un nuevo observatorio vulcanológico en la ciudad de Popayán, el cual se encarga de la vigilancia de los volcanes de la parte central como son el Nevado del Huila, la Cadena Volcánica de los Coconucos (donde el más reconocido es el volcán Puracé) y Sotará (OPS, 2005).

Respecto a la amenaza volcánica en general, la Subdirección de Geoamenazas del SGC, realiza los estudios geológicos

para determinar la historia eruptiva de los volcanes, así como el monitoreo de la actividad volcánica, generando los boletines sobre la actividad de los volcanes en términos de la energía liberada, la emisión de gases y ceniza, y desarrolla investigaciones en vulcanología y amenaza volcánica. En la actualidad, 21 volcanes activos son monitoreados continuamente. El monitoreo ha permitido obtener modelos de comportamiento de los volcanes más activos, que se han utilizado para alertar a las personas desde unos pocos días hasta varias semanas antes de una erupción inminente; así mismo, se han hecho los mapas de amenaza de los volcanes más activos en Colombia, al igual que el modelamiento de la dispersión de los productos volcánicos. La participación de la comunidad en la cultura de la prevención ha permitido avanzar en los programas de educación y mejorar la conciencia del peligro de los volcanes activos. (Consultado en: <https://www.cepal.org/publicaciones/xml/8/33658/ColombiaCapII.pdf>)

La finalidad de los observatorios vulcanológicos es registrar continuamente información de la actividad de los volcanes a su cargo. En estos observatorios se publican boletines descriptivos, técnicos y de alerta, de actividad histórica y se realizan mapas de amenaza. El SGC cuenta con tres observatorios que vigilan los volcanes de los sectores norte, centro y sur del país. El observatorio de Pasto tiene a su cargo el volcán Galeras, el observatorio de Manizales vigila el volcán del Nevado del Ruiz, Paramillo de Santa Rosa, Volcán Nevado de Santa Isabel, Volcán Nevado del Tolima y Volcán Cerro Machín. El observatorio de Popayán registra información de los volcanes Sotará, Puracé y del volcán nevado

del Huila, que como se señaló ha tenido una reciente reactivación y ya ha causado daños.

Además de la vigilancia en las redes vulcanológicas en el marco del proyecto: “*Modelo Geológico Integral y Potencial de Recursos en el Territorio Colombiano Vulcanismo en el Suroccidente de Colombia*” se ha realizado el estudio del vulcanismo del Neógeno y Cuaternario de Colombia cuyos fines son identificar los procesos tectónicos y magmáticos que dieron origen a este vulcanismo, su relación con los eventos mineralizantes y el estudio de la amenaza volcánica en el territorio colombiano.

El SGC ha realizado mapas de amenaza de los volcanes Nevado del Ruiz, Cerro Machín, Galeras, Nevado del Tolima, Nevado del Huila, Puracé, Chiles, Cerro Negro, Cumbal y se estudian y actualizan los mapas de Doña Juana, Santa Isabel y Cerro Bravo. En cuanto al manejo de las emergencias ocasionadas por erupciones volcánicas se encuentran cartillas y manuales que buscan orientar la planificación previa en caso de desastre, ilustrar medidas para la mitigación y respuesta a la emergencia.

Se construyó la Estrategia Nacional de Comunicación del Riesgo Volcánico que consiste en la articulación de una serie de piezas edu-comunicativas dirigidas a diferentes públicos con el fin de disminuir la vulnerabilidad de la población expuesta a la amenaza volcánica en todo el territorio nacional.

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA VOLCÁNICA EN COLOMBIA

Debido a las características particulares de cada volcán, sus procesos magmáticos

y eruptivos, morfología y topografía, los estudios de amenazas de volcanes que se han desarrollado en el país son específicos para cada uno de los volcanes.

La elaboración de los mapas de amenaza volcánica se basa en información geológica del volcán, cambios morfológicos, disponibilidad de nuevas herramientas para simulación y avances importantes en vulcanología y en metodologías para la evaluación. Igualmente se tiene en cuenta el registro histórico, la documentación desde la colonia, arqueología y relatos, dataciones y los datos del monitoreo.

En el documento guía “*Procedimiento de la evaluación de la amenaza volcánica*” de la dirección de Geoamenazas del SGC, se compilan los lineamientos sobre la evaluación y la elaboración de mapas de amenaza volcánica en el país (SGC, 2013).

En la página web del SGC se encuentra información detallada de cada uno de los volcanes que cuentan con mapa de amenaza volcánica y describe específicamente el tipo de comportamiento que presenta cada uno de ellos: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/>. Las **Figuras 12 y 13** corresponden a los mapas de amenaza de los volcanes Chiles y Cerro Negro elaborados por el SGC.

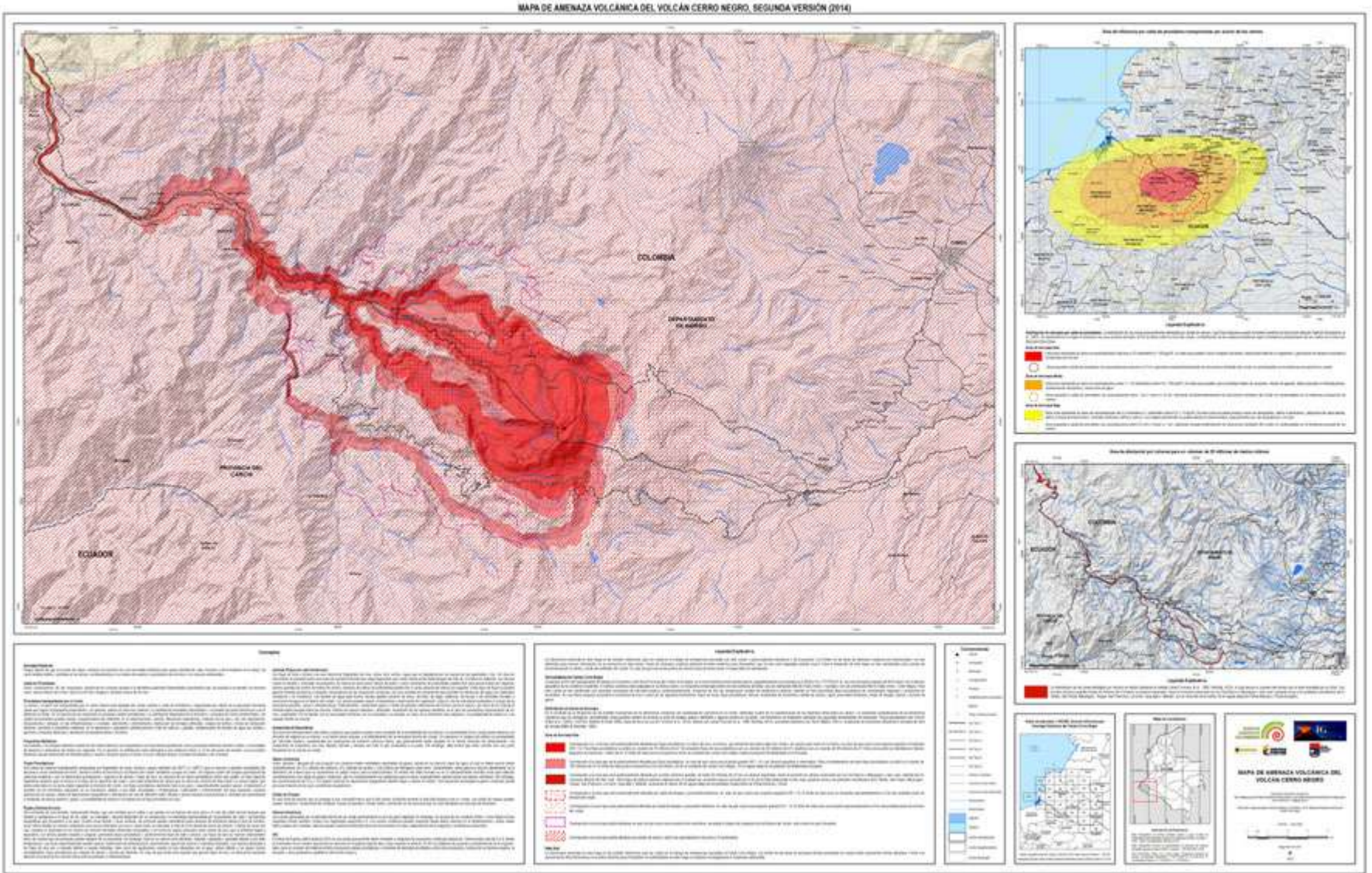


Figura 12. Mapa de amenaza volcánica del volcán Cerro Negro. SGC, 2014

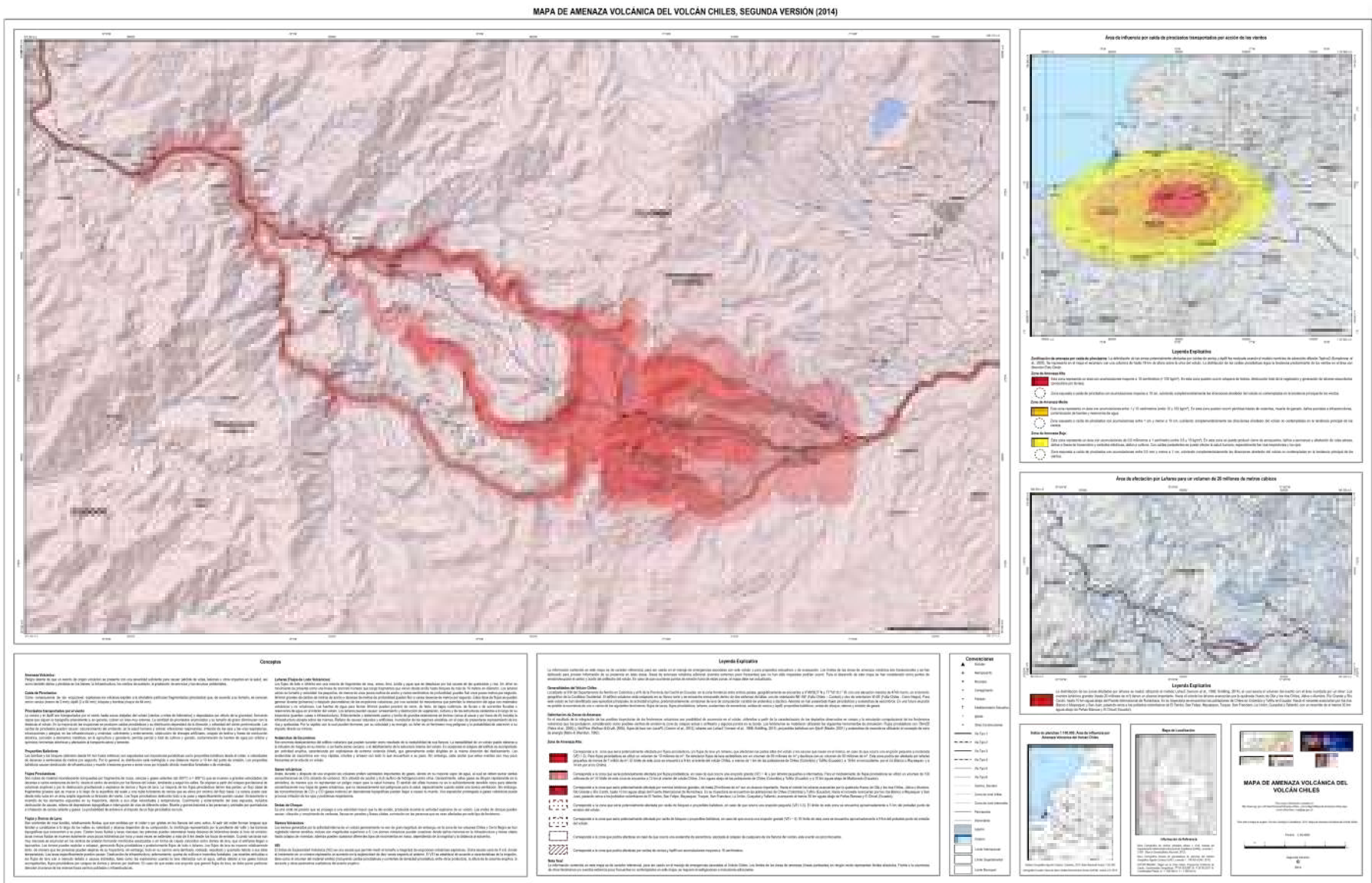
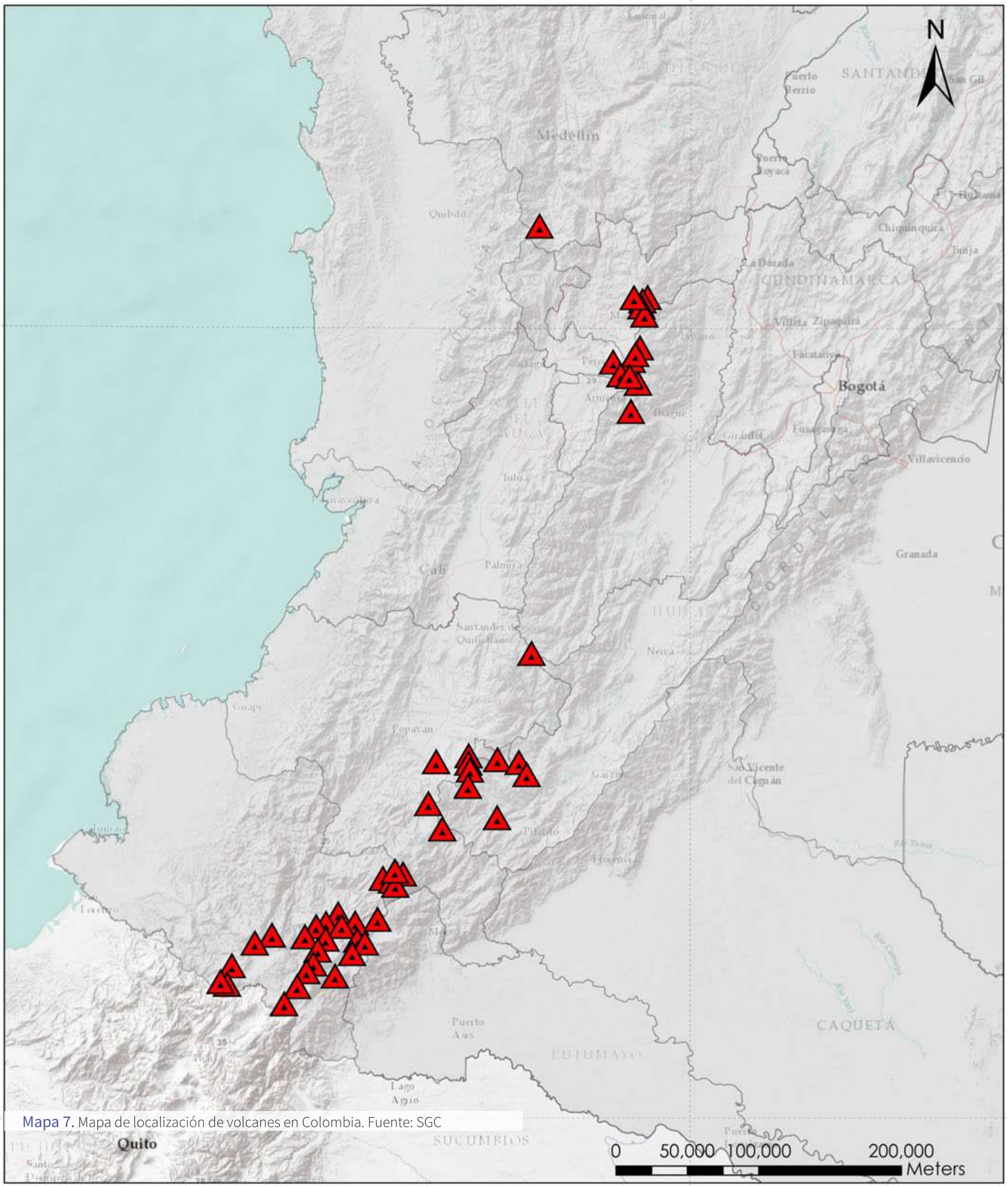


Figura 13. Mapa de amenaza volcánica del volcán Chiles. SGC, 2014



Mapa 7. Mapa de localización de volcanes en Colombia. Fuente: SGC



2.4 Fenómenos hidrometeorológicos

Los fenómenos hidrometeorológicos son procesos de origen atmosférico, oceanográfico, hidrológico. Las amenazas de origen hidrometeorológico más comunes son las inundaciones, sequías y ciclones tropicales.

El territorio colombiano se ubica en la zona tropical, está rodeado de los océanos Atlántico y Pacífico, su condiciones topográficas son diversas, entre montañas, sabanas, selvas y páramos, y por esta razón cuenta con una significativa riqueza de recurso hídrico. Colombia tiene una abundante oferta hídrica, pero, en términos hidrológicos el territorio nacional no es homogéneo, las cinco áreas hidrográficas del país albergan sensibles diferencias que repercuten en la vulnerabilidad tanto del sistema natural como de la estructura socioeconómica.

El promedio de precipitación media anual en el país es de 3,000 mm, superior al

promedio mundial de precipitación anual que se estima en 900 mm y al promedio de Suramérica el cual se estima en 1,600 mm (Velandia, 2014). El patrón de lluvia, sin embargo, es diferente de acuerdo con la zona del país, siendo la Alta Guajira la región con menores lluvias (500 mm y menos) y la Región Pacífica la que presenta los registros más altos (10,000 mm) (IDEAM, 2005). Colombia tiene un régimen de lluvias de distribución bimodal para la mayor parte de la región Andina y de la región Caribe, donde los periodos con mayor lluvia en el centro y norte del país son los meses de abril-mayo y octubre-noviembre, y monomodal en la región Pacífica, los llanos y la Amazonia.

De igual manera se encuentran las condiciones interanuales dentro de las que se destacan los fenómenos enmarcados dentro del ciclo ENOS (El Niño, Oscilación del Sur), el cual se representan los fenómenos de El Niño y su fase opuesta La Niña. Los fenómenos El Niño y La Niña

afectan de manera importante los regímenes de temperatura del aire y precipitación en Colombia. Corresponden, en términos generales, a la aparición, de tiempo en tiempo, de aguas superficiales relativamente más cálidas que lo normal (El Niño) o más frías (La Niña) en el Pacífico tropical central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y el sur de Colombia. Estas alteraciones de la estructura térmica superficial y subsuperficial del océano están asociadas con el debilitamiento (fase cálida) o el fortalecimiento (fase fría) de los vientos alisios del Este y con el desplazamiento del núcleo de convección profunda del Oeste al Centro del océano Pacífico tropical, en condiciones El Niño (**Figura 14**) o con su permanencia e intensificación en el caso de La Niña (Montealegre, 2014).

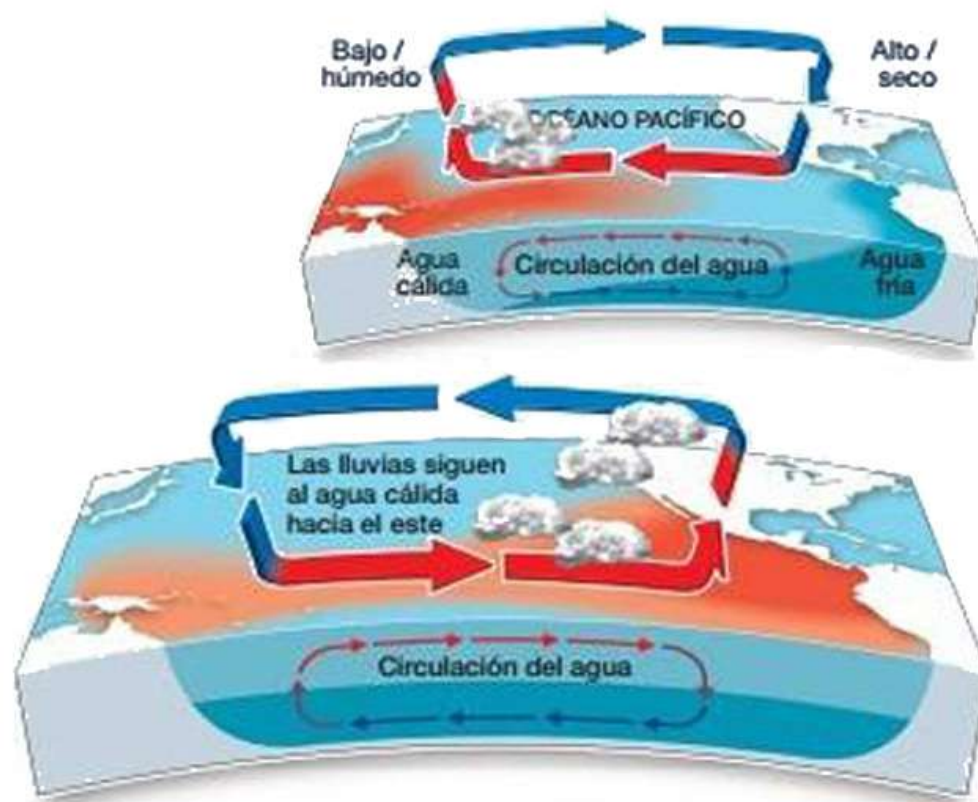


Figura 14. Representación esquemática de las condiciones oceano-atmosféricas del Pacífico tropical durante los periodos normales y de ocurrencia del fenómeno de El Niño. Fuente: NOAA/PM-L/TAO Project, USA

2.4.1 Inundaciones

Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas. Los desbordamientos son un evento natural y recurrente para un río y en general, la magnitud de una inundación provocada por procesos de origen hidrometeorológico, depende de la intensidad de las lluvias, de su distribución en el espacio y tiempo, del tamaño de las cuencas hidrológicas afectadas, de las características del suelo y del drenaje natural o artificial de las cuencas.

El comportamiento estacional de las inundaciones puede verse alterado por las variaciones climáticas de larga escala como el ENSO (la oscilación del sur El Niño), que causa fuertes lluvias y consecuentemente grandes inundaciones en las regiones central y sur de Suramérica, mientras que en el norte las lluvias se reducen significativamente. Adicionalmente, sus impactos pueden variar, desde efectos muy pequeños a efectos significativos por inundaciones severas con altos impactos económicos y sociales (por ejemplo las inundaciones de Tailandia y Colombia en 2011).

Las inundaciones pueden causar impactos negativos en una población, en el sector

agropecuario y la infraestructura (Campos et al., 2009). Igualmente, la complejidad y magnitud de una inundación puede ser directamente afectada por la acción de la intervención humana sobre el cauce del río. El daño causado por las inundaciones es usualmente resultado de actividades del ser humano en áreas propensas y pueden presentarse como consecuencia de cambios en el uso de la tierra; como por ejemplo, la transformación de la cobertura natural del suelo durante el proceso de urbanización (Banco Mundial, 2012).

En la clasificación más sencilla se pueden identificar dos tipos de inundaciones: inundaciones lentas, que son las que ocurren en las zonas planas de los ríos y con valles aluviales extensos. Aunque los incrementos de nivel son de apenas centímetros diariamente, los efectos son de grandes extensiones. Usualmente generan pocas pérdidas de vidas humanas y el tiempo de afectación puede fácilmente llegar a ser del orden de meses. En Colombia, el ejemplo más ilustrativo son las inundaciones recurrentes en la región de la Mojana.

El otro tipo de inundación son las crecientes súbitas, en las que, aunque las áreas de afectación son menores, el poder destructivo es mucho mayor y significa un alto potencial de pérdida de vidas. Este tipo de inundaciones se presentan con la ocurrencia de fuertes precipitaciones en las partes altas de las cuencas, los incrementos de nivel son del orden de metros en pocas horas y su tiempo de permanencia en las zonas afectadas puede ser de horas o de pocos días. Este tipo de inundaciones

se presenta en todas las cuencas de alta pendiente de la región Andina principalmente (Consultado en: Amenazas Inundación: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>, IDEAM)

La **Figura 15** esquematiza las causas, los efectos y los impactos normalmente generados por las inundaciones.

Existen diferentes metodologías para la estimación de la amenaza de inundación. De acuerdo a una consolidación realizada en 2010 por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, para el IDEAM hay cinco metodologías que se han utilizado en Colombia (Velandia, 2014): los métodos históricos, donde se utilizan marcas y placas sobre elementos artificiales; los métodos paleohídricos, que consiste en registros geológicos para determinar depósitos o marcas de inundaciones anteriores de las cuales no se tiene información histórica; los métodos geológicos y geomorfológicos, que utilizan la tipología de las formas del terreno y los depósitos generados a partir de eventos de inundaciones para delimitar la áreas geomorfológicamente activas dentro del cauce fluvial, la frecuencia cualitativa de inundación e incluso inferir órdenes de magnitud de parámetros como la profundidad, velocidad de la corriente o carga sólida transportada; los métodos asistidos por sensores remotos que representan la radiación reflejada por suelos húmedos permitiendo reconocer la delimitación de áreas inundadas; y los métodos hidrológicos e hidráulicos que permiten estimar los caudales generados en una cuenca o corriente, las velocidades y niveles con los que circularía el agua por

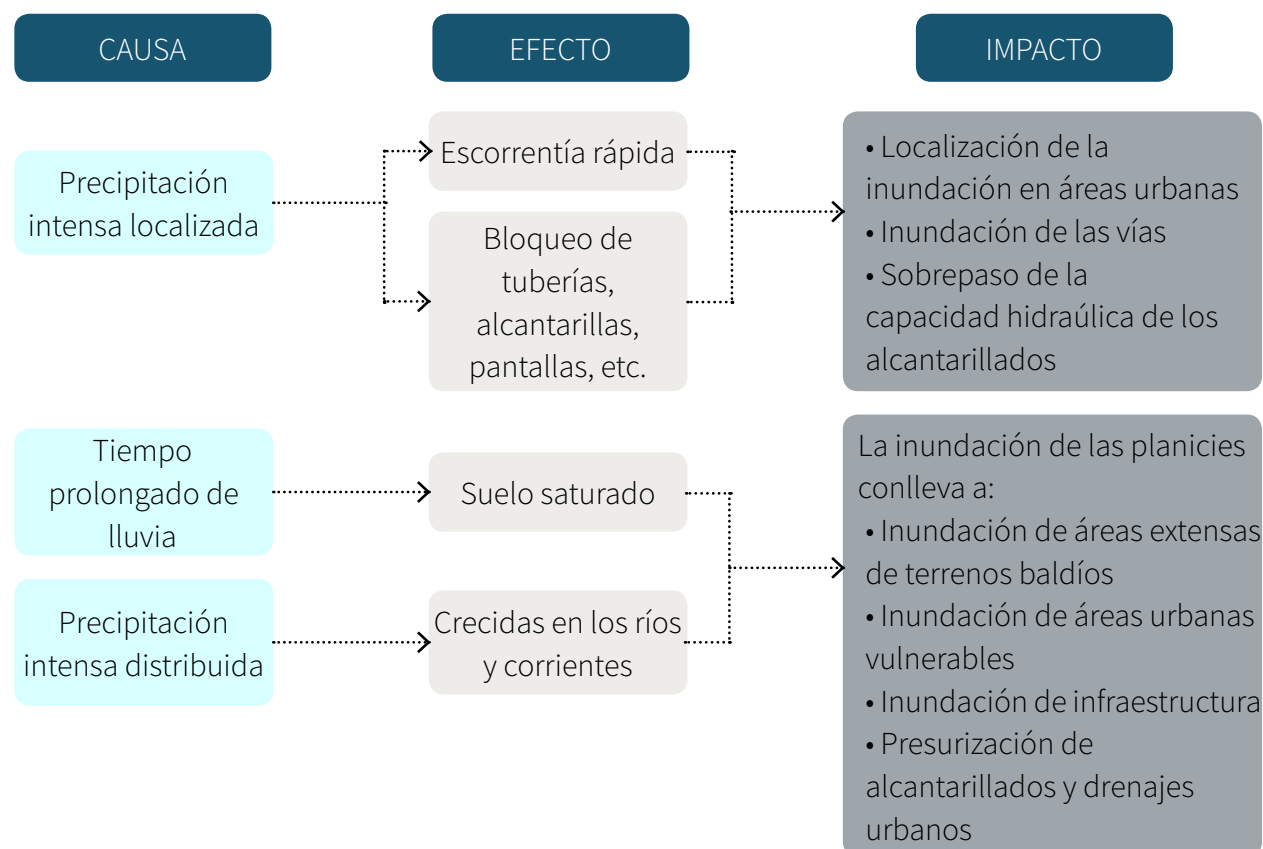


Figura 15. Causas, Efectos e Impactos de Inundaciones.

Fuente: CIACUA – CEDERI, 2006

un determinado tramo fluvial. Estos últimos permiten, además, determinar y asociar períodos de retorno teniendo en cuenta los procesos físicos que generan la inundación. Cualquiera de los métodos enunciados genera una zonificación de amenaza, dependiendo en gran medida de la calidad de información que se ingrese a los modelos en lo que refiere a escala, cobertura, procesamiento de imágenes, detalle de los levantamientos topográficos, etc.

Por otro lado, con el fin de contar con una metodología probabilista de evaluación de la amenaza y el riesgo que permita incluir de manera racional las incertidumbres asociadas a la ocurrencia de los fenómenos naturales, la amenaza de inundación se representa por medio de una colección de escenarios, generados de manera estocástica, los cuales representan de manera integral y en términos de probabilidad, la amenaza de inundación de un territorio. Cada escenario tiene asociada una frecuencia de ocurrencia y contiene

la distribución espacial de parámetros que permiten construir la distribución de probabilidad de las intensidades producidas por su ocurrencia. Esta metodología ha sido desarrollada en el marco de la plataforma CAPRA y se ha aplicado a diferentes escalas geográficas incluyendo el nivel global, para 143 países como parte del Modelo Global del Riesgo del Global Assessment Report, GAR2015 y el GAR Atlas de la Estrategia Internacional para Reducción del Riesgo de Desastres de Naciones Unidas (UNISDR, 2015; Rudari et al., 2015).

Los estudios de amenaza de inundación son útiles para establecer medidas de ordenamiento territorial y planificación física, para regular y controlar usos del suelo y definir zonas de protección ambiental, establecer medidas estructurales para el control de erosión y reforestación, y la definición de medidas de protección comunitarias.

INUNDACIONES EN COLOMBIA

Dadas sus características topográficas y su régimen hidrometeorológico particular, Colombia presenta grandes extensiones susceptibles a sufrir inundaciones, algunas de manera lenta, que afectan grandes extensiones de terreno, principalmente en las partes bajas de las cuencas y en los valles de los ríos principales como son el río Magdalena, el río Cauca, el río Atrato, el río Putumayo y otros que afectan en gran medida los departamentos de Arauca y Casanare, y otras más rápidas asociadas a lluvias intensas en la parte alta de las cuencas con fuertes pendientes.

Entre 2010 y 2011 debido a la presencia del fenómeno de la Niña, en Colombia se presentaron lluvias intensas y los niveles de los ríos aumentaron en muchos casos sin precedentes en los registros históricos, generando una de las peores emergencias ambientales por inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa en

varias poblaciones del centro, occidente y norte del país. Esto obligó al Gobierno Nacional a establecer medidas para minimizar los efectos de eventos extremos futuros (Velandia, 2014).

En el año 2017 se presentaron eventos de precipitación con intensidad y duración fuertes, que generaron daños, afectados y muertos. Uno de los más graves se presentó en la ciudad de Mocoa el 31 de marzo de 2017, donde el desbordamiento de los ríos Mulato y Sangoyaco y la quebrada Taruca arrasó con el norte de la ciudad y dejó la capital de Putumayo inmersa en una inmensa catástrofe (Consultado en: http://www.mininterior.gov.co/sites/default/files/noticias/emergencia_putumayo_inf_tecnico_no_02.pdf).

A nivel institucional, en Colombia el tema de inundaciones, por muchos años, estuvo a cargo del Instituto de Hidrología Meteorología y Adecuación de Tierras - HIMAT, que en 1988 realizó el Plan Nacional de Prevención y Control de Inundaciones. En 1994, por medio del decreto 1277, las funciones de esta institución pasaron a cargo del IDEAM, el cual está a cargo desde ese entonces del monitoreo de las condiciones climáticas, meteorológicas e hidrológicas del país. También está encargado de producir y suministrar datos e información ambiental, coordinar el sistema de Información Ambiental en el que se incluyen los sistemas de observación, bases de datos y modelos del medio ambiente y recursos ambientales (IDEAM-DNP, 2011). El IDEAM cuenta con una red activa de 1932 estaciones meteorológicas, 609 estaciones hidrológicas y 96 estaciones hidrometeorológicas en todo el territorio colombiano. Además el país cuenta con 1.615 estaciones meteorológicas, 867 estaciones hidrológicas y 52 estaciones hidrometeorológicas que pertenecen a

otras entidades (Consultado en: http://www.mininterior.gov.co/sites/default/files/noticias/emergencia_putumayo_inf_tecnico_no_02.pdf, IDEAM)

La información generada por el IDEAM tiene un amplio conjunto de usuarios. En cuanto a la gestión del riesgo, hace parte del SNGRD y se encarga de aportar la información para la emisión de boletines, avisos y alertas sobre las diferentes amenazas que monitorea. Su información también es de especial relevancia para el Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, en relación con el estado y evolución del clima para el balance anual sobre el medio ambiente y los recursos naturales renovables. Aporta información al sector agrícola, con el fin de evitar pérdidas en la producción, mediante boletines agrícolas y pronósticos del clima para la programación y distribución de cultivos. Este tipo de información también es útil para el sector asegurador para las reclamaciones de siniestros. Otros usuarios de la información del IDEAM son los operadores del transporte aéreo, marítimo y del sistema hidroenergético y las industrias pesquera y turística.

En cuanto a lineamientos de política para el manejo del agua, el Decreto 1381 de 1940 estableció el concepto de ordenación de cuencas hidrográficas, el cual tuvo sus inicios hasta la posterior expedición del Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Decreto Ley 2811 de 1974) que dio inicio a la planificación ambiental del territorio. En 1993 se creó el hoy Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible como organismo rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables. En 2010, este Ministerio expidió la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, en la que se define la

cuenca hidrográfica como unidad espacial de análisis y de gestión y en donde se considera cómo el agua interactúa con los demás recursos naturales y ecosistemas estratégicos, así como los elementos antrópicos y los actores clave para la gestión integrada del recurso hídrico. Por otra parte la Ley 1523 de 2012 mediante la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, así como las funciones para los estudios necesarios para el conocimiento, la reducción del riesgo y su integración en los planes de ordenamiento de cuencas, de gestión ambiental, de ordenamiento territorial y de desarrollo (Minambiente, 2014).

El IDEAM, el IGAC y el DANE elaboraron en 2011 la evaluación, análisis y seguimiento por inundaciones asociadas al fenómeno de La Niña 2010-2011 (el desastre de más amplio impacto en el país), con el fin de dar a conocer las afectaciones por las inundaciones (IDEAM, 2012).

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA DE INUNDACION EN COLOMBIA

El IDEAM genera curvas de intensidad, duración, frecuencia y tablas de intensidades máximas para diferentes zonas del país y períodos de retorno de, 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años que permiten identificar las condiciones de lluvia (Consultar en el enlace: <http://www.ideam.gov.co/curvas-idf>) (IDEAM, 2017)³. Adicionalmente, genera mapas de precipitación diaria y mensual que permiten identificar las zonas de mayores lluvias. Además, la institución publica un mapa a nivel nacional de zonas susceptibles a inundarse basado principalmente en eventos ocurridos y en la topografía de las zonas bajas de los valles y cuencas.

Los mapas de inundación a escala 1:100.000 están disponibles para 22 departamentos de Colombia y se basan en la interpretación de imágenes de sensores remotos para los años 1988, 2000, 2011 y 2012 (Consultado en: <http://www.siac.gov.co/inundaciones>). Esta cartografía cuenta con una interpretación casi del 100% del área total de cada departamento y muestra aquellas superficies cubiertas por espejos de agua, así como las coberturas que por sus condiciones edafogenéticas favorecen la ocurrencia de procesos de inundación; por ejemplo, las zonas pantanosas. A su vez, permite estimar el área que está asociada a cada evento en particular.

El IDEAM cuenta con una metodología para la implementación de la cota de inundación y cálculo de los caudales máximos y planes de contingencia. También cuenta en la actualidad con mapas de amenaza por inundación a diferentes escalas desde nacionales (1:500.000 y 1:100.000) hasta escalas locales (1:5.000) para algunas áreas piloto seleccionadas.

También ha desarrollado estudios de mayor nivel de resolución como el estudio *Geomorfología y susceptibilidad a la inundación del valle fluvial del Magdalena*, en el cual se evalúa la susceptibilidad de inundación de zonas aledañas al río Magdalena a través de un análisis de la geomorfología de la zona, de la dinámica fluvial del valle del río Magdalena y de imágenes satelitales (IDEAM, 2011).

Igualmente en el país se desarrolló la guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas, POMCAS (Minambiente, 2014) en donde se establecen los criterios técnicos, procedimientos y metodologías que se deben tener en cuenta en las fases de aprestamiento diagnóstico, prospectiva y zonificación ambiental, formulación, ejecución y, seguimiento y evaluación, así como los lineamientos para abordar los temas de participación y la inclusión de la gestión de riesgo en cada una de las fases previstas para la formulación de los POMCA, acordes con lo definido en los instrumentos de política y marco normativo.

Por otro lado, después del Fenómeno de La Niña 2010-2011, se creó el Fondo Adaptación, el cual entre sus acciones propone la ejecución del “Plan Integral para el Ordenamiento Ambiental y Desarrollo Territorial de La Mojana”, resultado de un esfuerzo interinstitucional mediante un convenio con DNP, IDEAM, Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible y CORMAGDALENA. Este estudio consistió en realizar una evaluación del riesgo por inundación en La Mojana, siguiendo una metodología totalmente probabilista, en la cual se consideraron las incertidumbres asociadas a la ocurrencia de las inundaciones y a la generación de daños en los elementos expuestos. El caso de La Mojana se presenta en la sección de casos locales de esta publicación (Cardona, 2016 a,b).

Asimismo, a nivel nacional, Colombia cuenta con una evaluación probabilista de la amenaza de inundación desarrollada en el marco del GAR15 (UNISDR, 2015) y el GAR Atlas (UNISDR, 2017) por Rudari et al. (2015)) bajo la asesoría técnica de CIMNE & Ingeniar con fines de evaluación probabilista del riesgo. En esta sección se presenta el mapa amenaza de inundación de 50 años de periodo de retorno obtenido de la evaluación global. El *Mapa 8* presenta las zonas susceptibles a inundación (IDEAM, 2010). En el *Mapa 8a* se presenta el mapa de la profundidad de inundación (en metros) de 50 años de periodo de retorno obtenido de la evaluación global.

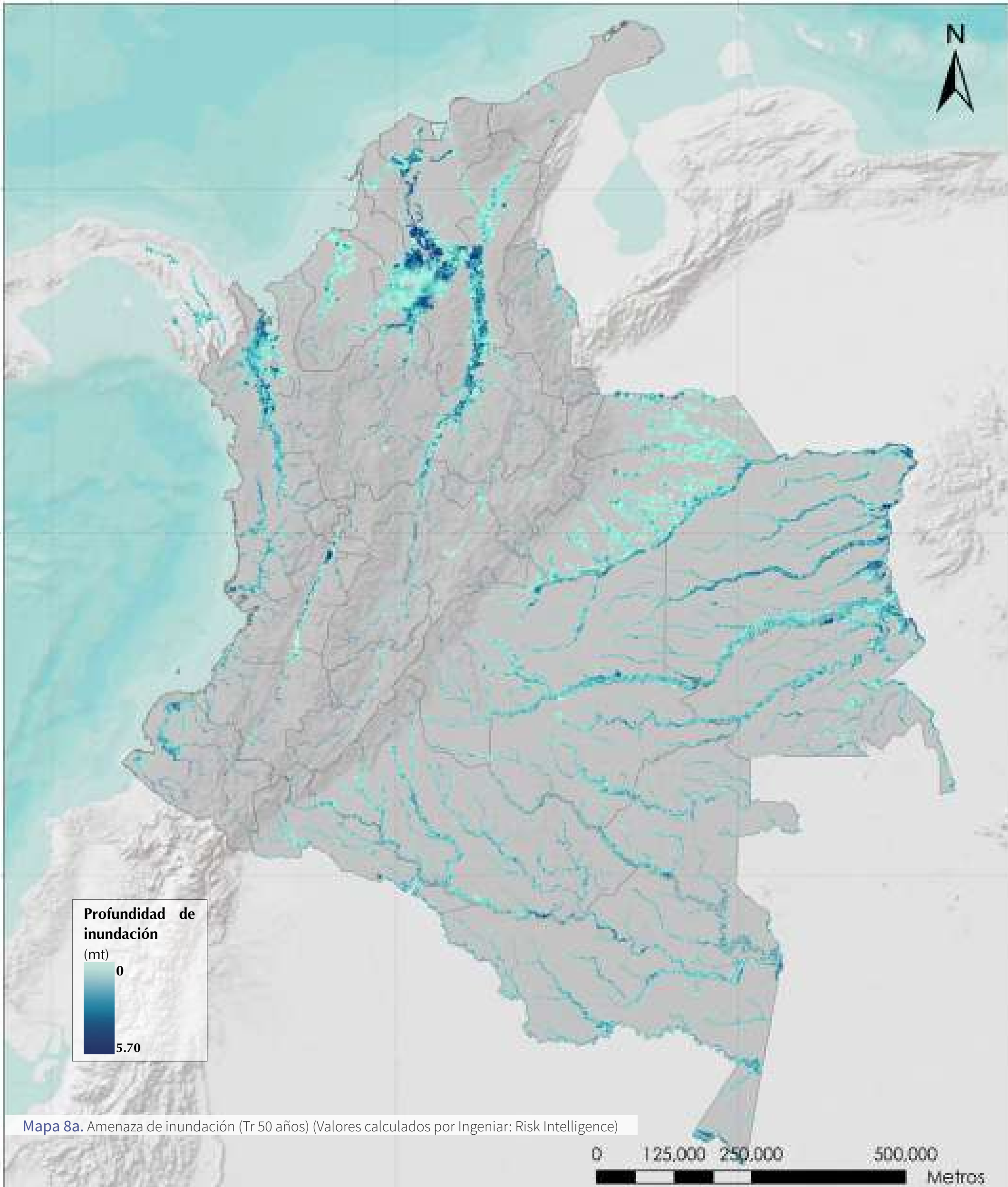
La Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres con el apoyo del IDEAM, en el marco del Plan Nacional de Gestión del Riesgo, viene liderando desde el año 2017 la elaboración de los lineamientos para la evaluación probabilista del riesgo por inundación, que se pueden encontrar en el repositorio de la entidad (Enlace: <http://cedir.gestiondelriesgo.gov.co/>). Este ejercicio surge del desarrollo de estudios de riesgo por inundación lenta en los municipios: Magangué (Bolívar), Mompo (Bolívar), Montelíbano (Córdoba) y San Marcos (Sucre). En los documentos resultados por municipios se pueden encontrar los mapas de amenaza.



**Zonas
susceptibles a
inundación**

Mapa 8. Susceptibilidad a inundación. Fuente: IDEAM

0 125,000 250,000 500,000
Metros



Mapa 8a. Amenaza de inundación (Tr 50 años) (Valores calculados por Ingeniar: Risk Intelligence)

2.4.2 Sequías

De forma general, la sequía se origina por un déficit de lluvias en un periodo extendido de tiempo, que resulta en escasez de agua para alguna actividad o sector. Sus impactos se deben a la interacción entre el evento natural (menor lluvia que la esperada) y la demanda en el suministro de agua, situación que en muchos casos es exacerbada por las actividades humanas. La sequía es una amenaza lenta de la naturaleza. Es un fenómeno poco notorio en sus inicios, con efectos que se pueden extender por largos periodos. Los impactos de las sequías varían de región a región, por lo que ésta puede ser difícil de definir ya que lo que puede ser considerado una sequía en un lugar no sería considerado una sequía en otro. Una única definición de sequía no funciona en todas las circunstancias y en gran parte, es por esto, que los tomadores de decisiones y los planificadores tienen más problemas en reconocer y en planificar para la sequía que para otros fenómenos más evidentes. De hecho, la mayoría de los planificadores se apoyan en variables o índices para decidir cuándo implementar medidas de conservación de agua o de respuesta. Para obtener dichos indicadores es necesario definir el comienzo, la severidad y el final de las sequías (Consultado en: <http://drought.unl.edu/DroughtBasics/WhatIsDrought.aspxii>).

Las sequías se pueden diferenciar en sequía estacional y sequía contingente. La primera es aquella que generalmente se presenta todos los años por la misma época, mientras que la contingente es inesperada; es decir, que se presenta durante una época en que normalmente se esperan lluvias. La intensidad y extensión territorial

de la sequía está estrechamente ligada con la aparición del evento El Niño (e.g. en Colombia), dado que los años de mayor incidencia, son aquellos en que tiene lugar este fenómeno. Sin embargo, existe también otro tipo de sequías que no necesariamente es consecuencia directa de la falta de lluvias, sino que puede resultar de la confluencia de varios factores como temperaturas del aire muy cálidas, humedad baja y vientos fuertes que aumentan la evapotranspiración y disminuyen anómalamente la humedad del suelo (Mo y Lettenmaier, 2016; Otkin et al., 2013; Otkin et al., 2015 citados por Podestá et al., 2018).

Las sequías se clasifican de acuerdo a sus efectos climáticos e impactos en cuatro tipos básicos de medición (Wilhite y Glatz, 1985): meteorológica, hidrológica, agrícola y socioeconómica. Las sequías meteorológicas ocurren cuando los patrones de clima seco predominan en el área, como deficiencia de precipitación en términos de cantidad, intensidad y duración, y al aumento de la evaporación y transpiración a causa de altas temperaturas, vientos fuertes, baja humedad relativa, intenso sol y menor nubosidad. Este tipo de sequías puede comenzar y terminar rápidamente. Las sequías hidrológicas están determinadas por la reducción en caudales de ríos y quebradas, almacenamiento reducido de los embalses y reducción de los humedales. Usualmente se presentan después de muchos meses de sequía meteorológica. Estas sequías toman mucho más tiempo para desarrollarse. Las sequías agrícolas están condicionadas por la deficiencia de agua en el suelo, en términos de estrés hídrico para las plantas, y

la reducción en la biomasa y el rendimiento, y la sequía socioeconómica se da cuando se relaciona el suministro y la demanda de varias comunidades a la sequía (Consultado en: <https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/dyk/drought-definition>)

Dado que las comunidades requieren conocer cuándo y dónde se presentan las condiciones de sequía para prever sus impactos potenciales, durante décadas se han desarrollado varios índices con el fin de medir la sequía en diferentes sectores. Sin embargo, una limitante mayor de éstos índices es que únicamente describen las anomalías generales de las condiciones meteorológicas e hidrológicas y frecuentemente existe poco consenso sobre cual indicador representa mejor la posibilidad de impactos significativos de sequía para un sector determinado*. Dependiendo del tipo de sequía a evaluar, se pueden incluir diferentes parámetros en el cálculo de los índices, ya que ninguno de ellos puede aplicarse universalmente debido a la complejidad de esta amenaza y a las condiciones particulares de las diversas zonas climáticas (Tsakiris, Pangalou y Vangelis, 2007).

El cálculo de la amenaza de sequía permite desarrollar un análisis detallado espacio-temporal para definir la severidad y frecuencia de las sequías en diferentes escalas, que, integrado con la exposición y la vulnerabilidad puede proporcionar información sobre las posibles consecuencias económicas, ambientales o sociales de las sequías. Sin embargo, la evaluación probabilista del riesgo de sequía es poco común hoy en día, por no

decir inexistente, debido a la complejidad de la modelación de la amenaza y de su interacción con los sistemas socio-ecológicos expuestos. Aunque en el pasado la modelación probabilista del riesgo ha permitido evaluar el riesgo por eventos catastróficos (como terremotos, inundaciones, ciclones tropicales, erupciones volcánicas y tsunamis, entre otros), las sequías se diferencian por sus efectos, que a menudo se acumulan lentamente durante un período prolongado de tiempo, incluso pueden pasar años hasta la terminación del evento, con impactos menos palpables y que tienden a extenderse por grandes áreas geográficas (Bernal et. al., 2017).

La sequía está normalmente asociada con un número de resultados que se deben a la escasez de agua, ya sea directa o indirectamente. El análisis probabilista de amenaza por sequía se realiza modelando los eventos regionales de sequía que no han ocurrido aún, a partir de la generación de condiciones climáticas futuras que combinan el déficit de lluvias con altas temperaturas durante un tiempo prolongado, sobre un área geográfica concreta, para después identificar las sequías mediante índices (Bernal et al., 2017). Los indicadores definen la duración, severidad, intensidad, serie de temperatura y serie de precipitación de los eventos de sequía para un determinado número de años de simulación.

Como resultado de la evaluación de amenaza de sequía se obtienen mapas de amenaza por escenario que permiten comparar la intensidad y distribución espacial de los efectos de un único evento. Los mapas de amenaza integrada permiten comparar las intensidades según el periodo de retorno y establecer zonas que están más o menos expuestas a la amenaza de

sequía dentro de la región. Por lo tanto, con el uso de mapas de amenaza integral, la región en estudio se puede clasificar basada en diferentes niveles de severidad, duración y frecuencia de la sequía (Bernal et al., 2017). Esta información es útil para priorizar intervenciones en los lugares más propensos a esta amenaza, para reducir la vulnerabilidad y el riesgo por sequía. Es útil también para definir usos del suelo, desarrollar infraestructura, como redes de irrigación, e implementar otras medidas estructurales y no estructurales que se pueden proponer con base en los resultados de riesgo espacializados. Por ejemplo, para nuevos proyectos agro-industriales, los mapas de amenaza integrada pueden ser usados para definir los lugares donde las sequías son menos severas, o se pueden definir lugares donde las semillas deben ser resistentes a sequías, con el fin de reducir la vulnerabilidad de grandes y pequeños productores. De esta forma, un uso óptimo de los recursos sociales y económicos, derivado de un mejor conocimiento, puede lograrse en las áreas más necesitadas.

Ahora bien, con la información de eventos futuros estocásticos, se realiza una evaluación prospectiva del riesgo de sequía para evaluar ya sea la reducción del rendimiento de los cultivos resultante del estrés hídrico, en sus diferentes etapas de crecimiento, o las pérdidas en el ganado o la reducción en los niveles de las reservas. De estos resultados directos se puede obtener subsecuentemente las consecuencias secundarias (generalmente impactos sociales) como la venta forzada de activos, menor seguridad alimentaria, producción energética reducida e incluso trastorno o estrés emocional y físico.

Los resultados de la evaluación del riesgo proporcionan información de las pérdidas económicas potenciales, que son útiles

para los tomadores de decisiones en términos de diseño de herramientas de protección financiera contra las pérdidas agrícolas debido a sequías severas. Otros usos alternativos del modelo de evaluación del riesgo por sequía incluye análisis costo-beneficio de estrategias de manejo de cultivos (redes de irrigación, construcción de reservas, uso de fertilizantes, rotación de cultivos, semillas resistentes a sequías), un enfoque a largo plazo, como mantenimiento de agua y seguridad alimentaria para las comunidades localizadas en áreas propensas a sequías. Igualmente, las sequías pueden ser caracterizadas considerando escenarios de cambio climático para desarrollar planes de contingencia y diseño ex ante de respuesta institucional (Bernal et. al, 2017).

SEQUIA EN COLOMBIA

Debido a la estacionalidad de las temporadas secas (o de menos lluvias), especialmente en sectores de regiones Caribe, Andina y Orinoquía, se puede presentar sequía meteorológica. Existen claras diferencias a lo largo y ancho del país en términos de dichas temporadas; mientras en algunas zonas de la costa Caribe, es normal que las precipitaciones sean escasas o nulas (entre enero y hasta buena parte de abril), en muchos sectores de la Orinoquía y de los departamentos Andinos, en dichas temporadas (regularmente entre enero y marzo) se suelen presentar pocas cantidades de precipitación, lógicamente disminuyendo notoriamente su intensidad y frecuencia, en relación con los meses de lluvia. Asimismo, la variabilidad climática, ligada en buena parte a la ocurrencia del fenómeno El Niño y las tendencias en los patrones climáticos como resultado del cambio climático, influyen en la presencia de sequías meteorológicas en el país.

Por otro lado, durante los meses entre diciembre y marzo, por ser estacionalmente meses de bajas precipitaciones en las regiones Caribe y Andina, la gran afluencia de población hacia estas regiones (especialmente porque coincide con temporada vacaciones), hace que la demanda de agua y de energía sean altas y por lo tanto generarse una sequía socioeconómica, qué, cuando se está bajo la influencia de un evento El Niño, este podría ser aún más grave (UNGRD, 2017).

El análisis de la información histórica de la precipitación en el país permite identificar variaciones de diferente escala relacionadas con la variabilidad climática (IDEAM 1997, 1998). El régimen hidrológico en Colombia se caracteriza a nivel intra-anual por periodos secos y húmedos y puede ser monomodal y bimodal (uno o dos periodos secos y/o húmedos). Existe una influencia de los procesos termodinámicos de los océanos Atlántico y Pacífico en la variabilidad de la precipitación en diferentes regiones de Colombia (Montealegre, 2009). Dada la variación del caudal mensual que compensa en ocasiones el contraste entre la esorrentía de los periodos secos y aquellos con excedentes de agua, es difícil identificar años secos con base solamente en el valor promedio anual (IDEAM, 2015).

Normalmente los eventos generalizados de sequía están asociados a la presencia de fenómenos El Niño, recordando que estos inciden especialmente, cuando se presentan con una intensidad moderada o fuerte, ocasionando déficits de lluvia en las regiones Andina, Caribe y centro y norte de la Pacífica, igualmente existe un incremento en la temperatura del aire en la región Andina, Caribe y Pacífica, durante los eventos El Niño. Durante la fase opuesta, La Niña, se evidencia el registro de anomalías negativas (condición de enfriamiento) en

las mismas regiones (Consultado en: <http://www.siac.gov.co/web/siac/ninoy NinaMontealegre>, 2014).

El fenómeno de El Niño es una variable fundamental para que la sequía ocurra. El impacto ecológico y socioeconómico de El Niño está relacionado con la vulnerabilidad de los ecosistemas y de los sectores de la actividad nacional; siendo las zonas secas especialmente vulnerables a sus efectos. Este fenómeno se ha presentado en Colombia con diferentes intensidades; es decir, alteraciones de la precipitación en Colombia ocasionadas por fenómenos débiles, moderados y fuertes. Uno de los eventos más fuertes fue el de 1982-1983 y el más fuerte se dio durante 1997-1998, caracterizado por ser atípico, donde se observaron deficiencias de precipitación en gran parte del territorio nacional, siendo muy acentuadas durante algunos periodos. En El Niño ocurrido en 1991-1992 las condiciones de déficit abarcaron extensas áreas de las regiones Andina, Caribe, Norte de la región Pacífica, piedemonte amazónico y un pequeño sector del oriente de la Orinoquía. Este evento tuvo un impacto significativo a nivel económico, particularmente en el sector hidro-energético del país, que a partir de la lección aprendida durante este evento, cuando Colombia se vio abocada al apagón de 1992, algunos sectores productivos han estado más atentos al seguimiento de este evento. Por otro lado, de acuerdo a las alteraciones de la temperatura del aire en el país ocasionadas por fenómenos débiles, moderados y fuertes El Niño, la más destacable ha sido la ocurrida durante 1997-1998 donde las anomalías abarcaron casi todo el territorio nacional, seguida por los fenómenos ocurridos en 2006-2007 y 2009-2010 que, aunque el valor promedio de las anomalías de la temperatura superficial del mar en el Pacífico tropical los ubica dentro de la categoría débil, tuvieron una influencia

muy marcada en el régimen térmico del país dando lugar a fuerte calentamiento en la mayor parte del territorio nacional (Consultado en: <http://www.siac.gov.co/web/siac/ninoy NinaMontealegre>, 2014).

La experiencia más reciente de sequía estuvo relacionada con la ocurrencia del último fenómeno El Niño 2014-2015-2016, cuya influencia en Colombia se manifestó justamente por un déficit de lluvias en las temporadas lluviosas especialmente en las regiones Caribe y Andina, acentuando las temporadas secas. Sus efectos climáticos y sus impactos se sintieron en todos los sectores productivos, ambientales y demás en el país, debido a que los rendimientos de dichos sectores dependen no solo de factores tecnológicos y económicos, sino del recurso clima (UNGRD, 2017).

En 1993, se creó el Ministerio del Medio Ambiente y se organizó el SNA conformado por el conjunto de orientaciones, normas, actividades, recursos, programas e instituciones que permiten la puesta en marcha de los principios generales ambientales. Como resultado del fenómeno de El Niño y con la necesidad de contar con más información y conocimiento sobre su ocurrencia, en la década de los 90 se comenzaron a desarrollar proyectos de investigación en el tema llevados a cabo por el IDEAM, la Universidad Nacional y el Comité Técnico Nacional para el estudio del fenómeno de El Niño (Montealegre, 2007). Igualmente, con la aprobación de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía (UNCCD) en 1994, el gobierno colombiano la ratificó mediante Ley 461 de 1998, entrando a ser parte de la misma a partir del 8 de septiembre de 1999. Así mismo se creó el Comité Técnico Nacional, constituido por el IDEAM, DIMAR, SGC, DNP y la Cancillería, y el cual se impulsó en el marco de la Comisión

Permanente del Pacífico Sur, que opera desde 1977 (MAVDT, 2013).

A partir de El Niño ocurrido en 1991-1992, se realizaron los primeros esfuerzos en el HIMAT (hoy IDEAM) para la evaluación de la amenaza de sequía, mediante la aplicación de modelos de tipo conceptual. Igualmente, se comenzaron a incluir algunos aspectos relacionados con la variabilidad climática estacional e interanual en los pronósticos climáticos y de caudales de esa época (Montealegre, 2014).

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA DE SEQUÍA EN COLOMBIA

Colombia actualmente no cuenta con una evaluación de la amenaza de sequía estrictamente hablando, lo que sí se puede mencionar es que las sequías asociadas al “recrudescimiento” de una temporada seca puede llegar a ser devastadora, pues perturba los procesos de producción de alimentos llegando en ocasiones a detenerlo totalmente. Y claro, ante dicha situación se genera un retroceso en las actividades socioeconómicas de la región que sufre los efectos de la sequía, ocasionando en ocasiones una repercusión en la economía nacional.

En Colombia, los eventos de sequía tienen un alto impacto en diferentes municipios del país. Así, ante la presencia de fenómenos El Niño de intensidad moderada a fuerte se registra desabastecimiento hídrico en diversas fuentes que abastecen acueductos veredales y municipales.

Algunos estudios relacionados con el agua se han desarrollado y el documento más actualizado donde se presentan los últimos avances en el país en los temas hidrológicos

es el Estudio Nacional del Agua, ENA 2014, del IDEAM de 2015. En este estudio se presenta la interdependencia del agua con la biodiversidad, el suelo, el subsuelo y la atmósfera, el comportamiento del ciclo hidrológico en el territorio del país, de sus cuencas hidrográficas, cuerpos de agua y aguas subterráneas; la dinámica, condiciones de ocurrencia y distribución, características de calidad y uso, y los escenarios que deben considerarse necesariamente para la planeación y el desarrollo económico y social del país.

El ENA es un insumo técnico para la planificación y la gestión integrada del recurso hídrico en el marco de la Política Nacional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos que lidera el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Los resultados presentados en dicho informe sirven como base para desarrollar evaluaciones de amenaza de sequía. Actualmente se cuenta en Colombia con una serie de indicadores en relación con las sequías; como por ejemplo el índice de precipitación estándar, el índice de uso de agua y el índice de vulnerabilidad hídrica, entre otros (IDEAM, 2015).

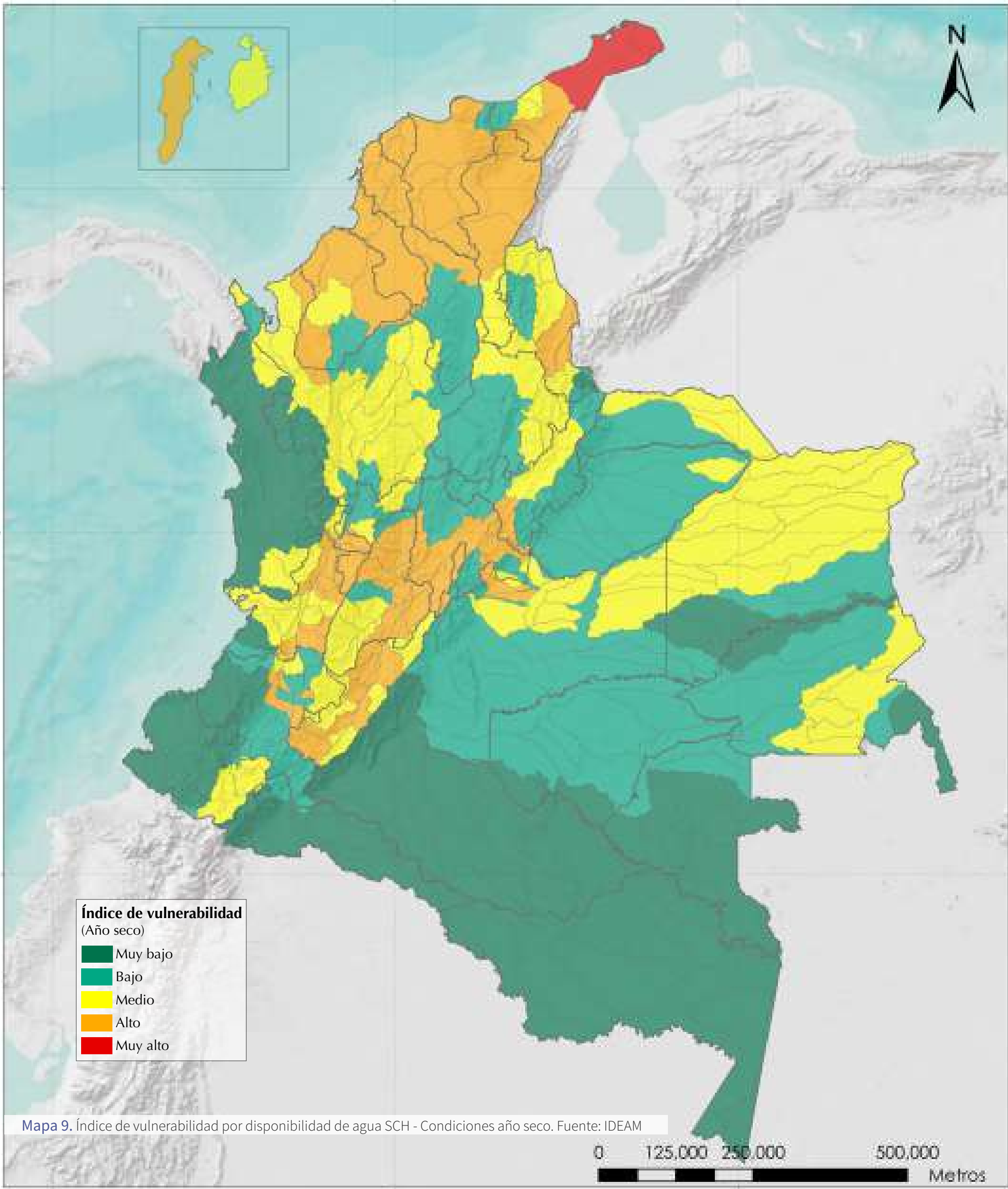
En el ENA se presentan mapas del índice de vulnerabilidad hídrica para el país con el fin de representar espacialmente las subzonas en condiciones de mayor y menor vulnerabilidad hídrica. El índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico IVH se determina a través de una matriz de relación de rangos del índice de regulación hídrica (IRH) y el índice de uso de agua (IUA). El primero determina la capacidad de retener y regular el agua y el segundo la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores en un período determinado en

relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades temporales y espaciales (IDEAM, 2010).

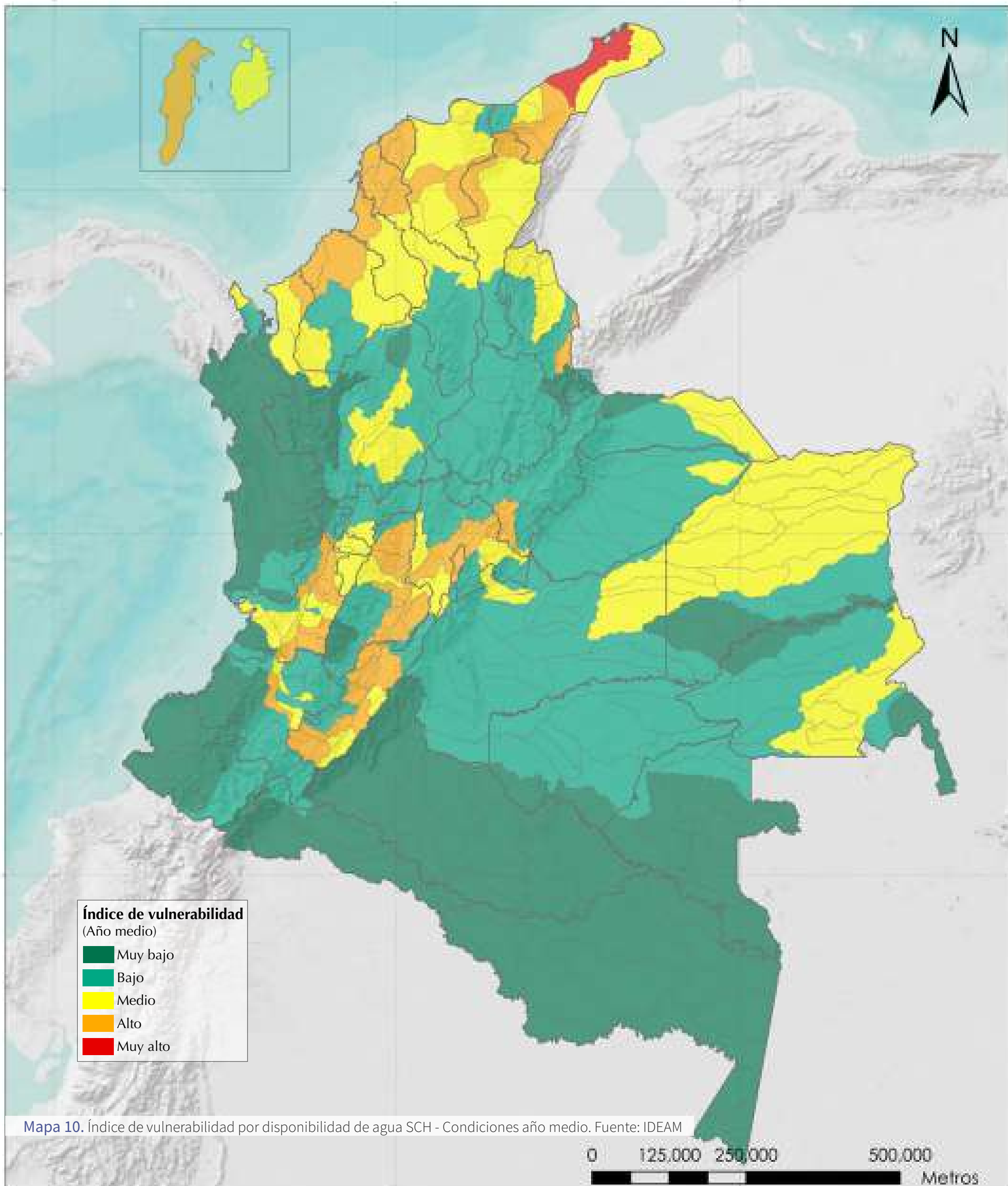
El índice de escasez por otro lado, resulta del análisis de la relación entre la oferta hídrica disponible y la demanda de agua por parte de las actividades socioeconómicas. De acuerdo al Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO, los umbrales críticos de presión sobre el recurso hídrico (OMM, 1997; IDEAM, 2000) se dividen en cuatro categorías: *i)* alto: la demanda alcanza el 40% del agua ofrecida potencialmente por la fuente abastecedora, *ii)* medio: nivel de demanda de agua entre el 20 y 40% de la oferta, *iii)* moderado: demanda entre el 10 y el 20% de la oferta hídrica y *iv)* bajo: demanda menor al 10% de los volúmenes de agua ofrecidos por la fuente (Costa et al., 2015).

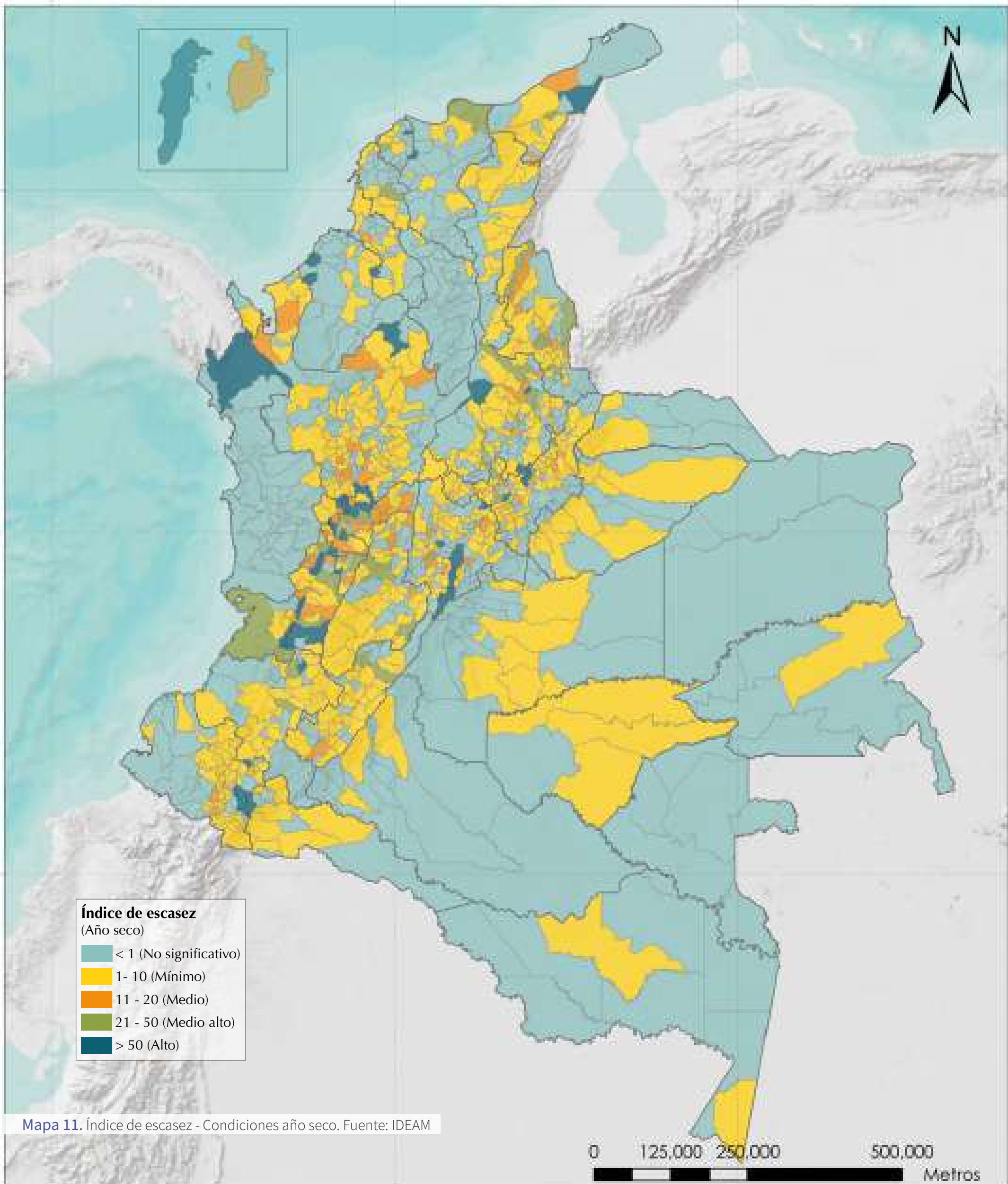
De acuerdo con el el Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico (IVH) las áreas hidrográficas más críticas son Magdalena, Cauca y el Caribe en general, mientras las áreas del Pacífico y Amazonas no presentan condiciones de criticidad pues en ellas la demanda hídrica es reducida.

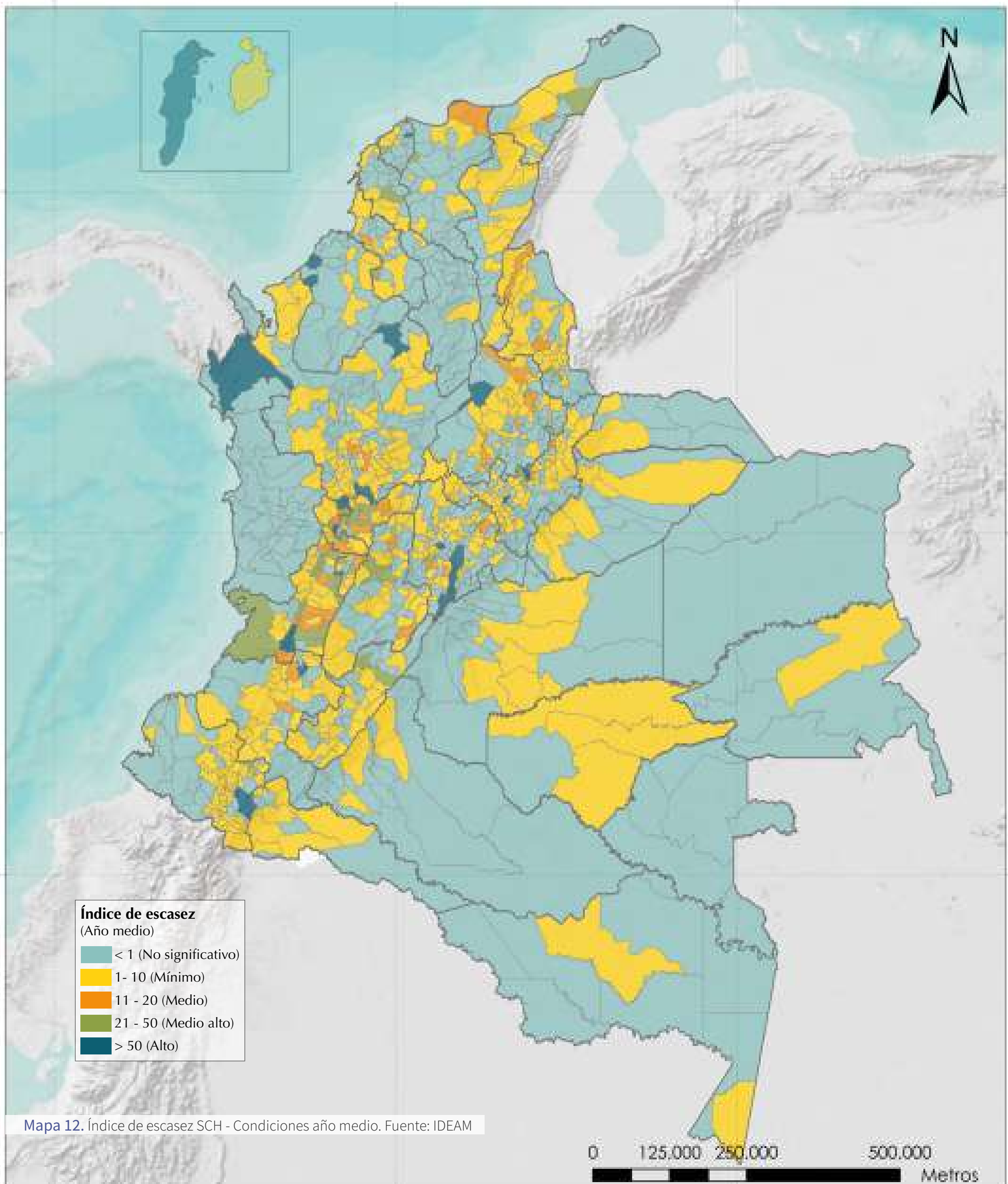
Los *Mapas 9 y 10* presentan los resultados para Colombia del Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico y los *Mapas 11 y 12* los resultados del índice de escasez para condiciones hidrológicas de año seco y año medio. Los análisis detallados de los resultados de estos índices se pueden encontrar en el ENA (IDEAM, 2015): <https://encolombia.com/medio-ambiente/interes-a/estudio-agua/estudiocolombianoaguas9/2/>



Mapa 9. Índice de vulnerabilidad por disponibilidad de agua SCH - Condiciones año seco. Fuente: IDEAM







2.4.3 Ciclones tropicales (viento y marea de tormenta)

Un ciclón tropical es un sistema de tormentas de circulación atmosférica con baja presión en el centro, caracterizado por fuertes vientos y una espiral de tormentas que produce lluvias intensas. Existen diferentes términos para el mismo fenómeno climático: huracanes, ciclones o tifones, dependiendo de la cuenca oceánica (su ubicación) y su fuerza. Este fenómeno se refiere al movimiento del viento en forma circular arremolinado alrededor del ojo central; sus vientos soplan en contra de las manecillas del reloj en el hemisferio norte y en sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio sur, debido al efecto Coriolis, que es el resultado de la rotación de la tierra.

Estos sistemas de tormenta de circulación atmosférica tienen su origen geográfico en mares tropicales. Normalmente se forman sobre grandes cuerpos de agua relativamente cálida, pues las temperaturas del mar que exceden los 27 °C causan una evaporación rápida y una condensación de las capas más superficiales que conduce a mayores velocidades del viento. Al presentarse el movimiento del aire caliente hacia arriba se genera un centro de baja presión, el cual absorbe el aire frío de la

atmósfera fortaleciendo este ciclo. Los vientos más rápidos y presiones más bajas asociadas con los ciclones tropicales causan una mayor evaporación en superficie y de este modo más velocidad. El flujo constante de aire más frío en las capas superficiales aumenta la altura de las nubes y acelera la condensación, convirtiéndose en un bucle de retroalimentación positiva que continúa mientras se encuentren las condiciones favorables para el desarrollo del ciclón tropical. Los factores que más inciden en la formación de ciclones tropicales son la temperatura superficial del mar mayor a 26 °C, latitudes entre los 5 y 20 grados al norte y sur del Ecuador y una alta humedad relativa en la tropósfera (primera capa de la atmósfera). Para que estos se formen se requiere por lo menos tres factores:

- Que la temperatura del agua del mar sea superior a 26 °C generando una rápida evaporación y condensación en las capas superiores.
- Que la cuantía de la evaporación dé lugar a un centro de baja presión, de dimensión intermedia y de gran proyección vertical.

- Que exista una continua entrada de aire más frío en las capas altas como consecuencia, por ejemplo, de los vientos alisios.

Existen diferentes tipos de perturbaciones tropicales, los ciclones tropicales son la forma más desarrollada de estas perturbaciones. Las distintas etapas del desarrollo de las perturbaciones tropicales están definidas por la velocidad sostenida de los vientos del sistema; es decir, los niveles de velocidad del viento que se mantienen por lo menos durante un minuto cerca del centro del sistema. En las etapas formativas, la circulación cerrada isobárica, se conoce como depresión tropical. Si la velocidad sostenida de los vientos excede los 63 Km/h, se convierte en una tormenta tropical, en esta etapa ya se le da un nombre y ya puede representar algún tipo de peligro. Cuando los vientos exceden los 119 Km/h, el sistema se convierte en un ciclón; la forma más severa de las tormentas tropicales. La *Figura 16* muestra esquemáticamente la formación de los huracanes.

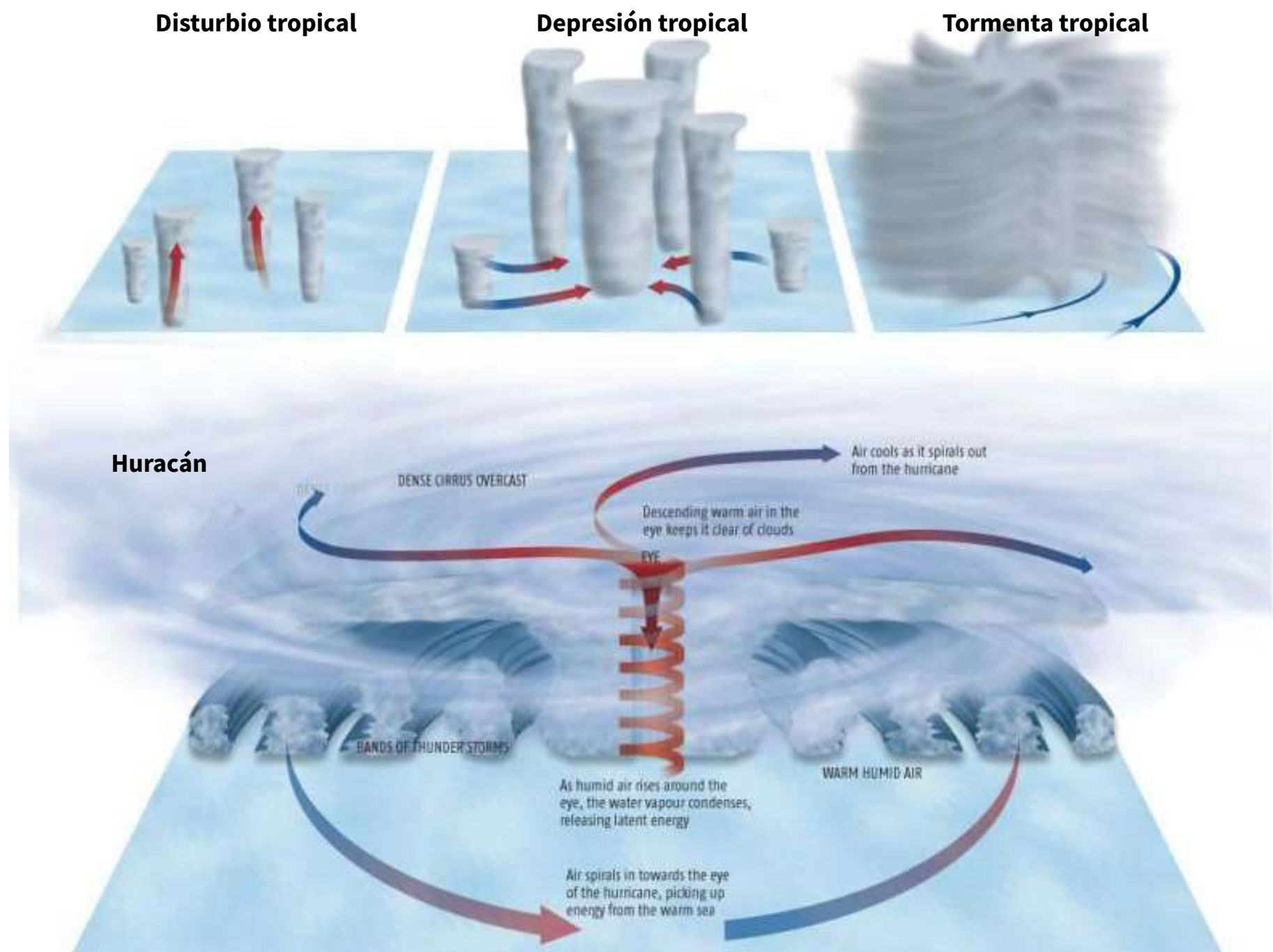


Figura 16. Formación de huracanes

(<https://bibliotecadeinvestigaciones.wordpress.com/ciencias-de-la-tierra/huracanes-tifones-ciclones-tropicales-o-baguios/>)

Existen diferentes escalas propuestas para clasificar la fase y la intensidad de los ciclones tropicales. La escala Saffir-Simpson (Figura 17), definida originalmente para huracanes, es la más conocida y usada. Esta clasifica los ciclones dependiendo de su presión central y proporciona rangos

de valores para la velocidad sostenida del viento y la altura de la ola de la marea de tormenta correspondiente.

Las condiciones necesarias para el desarrollo de ciclones tropicales se dan solamente durante meses específicos del

año, y para diferentes meses en cada cuenca oceánica. Las áreas sombreadas en la Figura 18 ilustra las áreas donde los ciclones tropicales normalmente se desarrollan, las trayectorias promedio y la estación en la que se espera su generación.

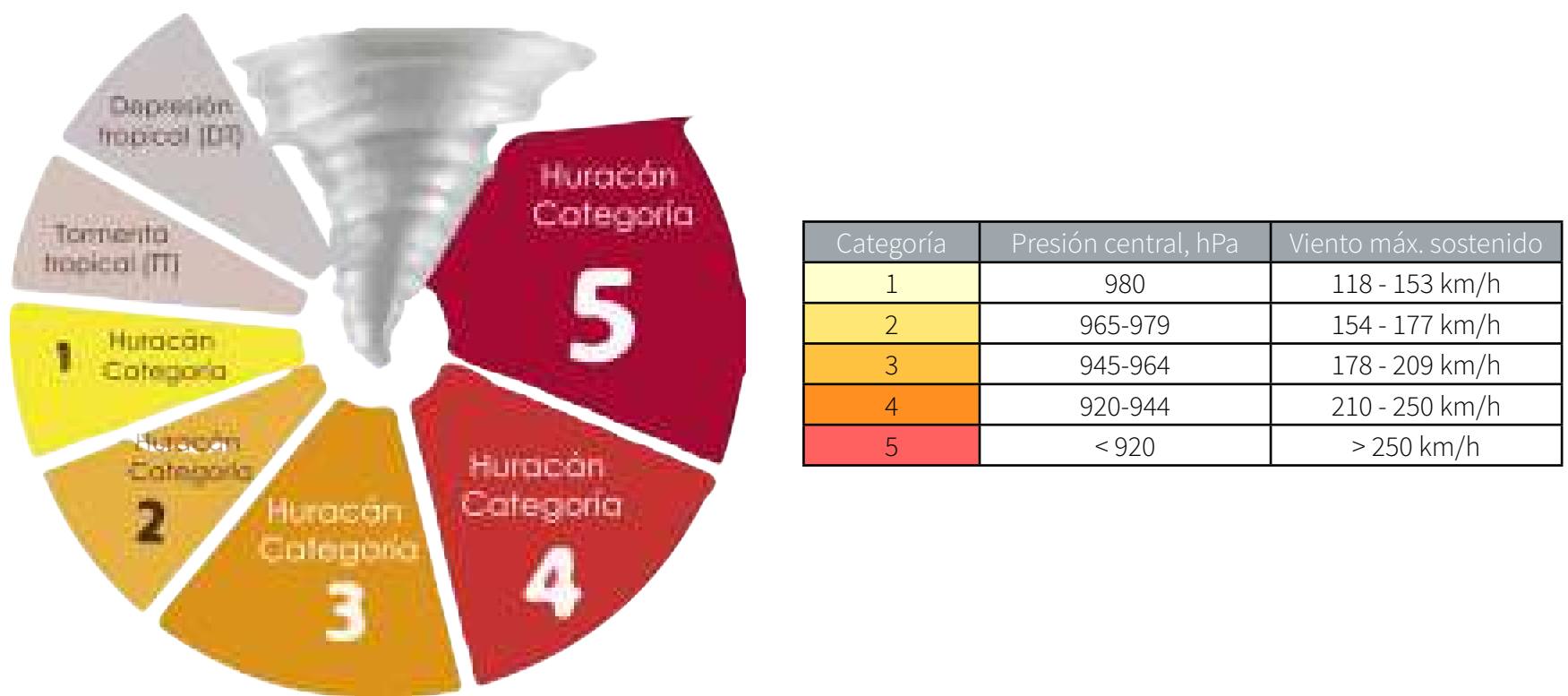


Figura 17. Escala Saffir-Simpson

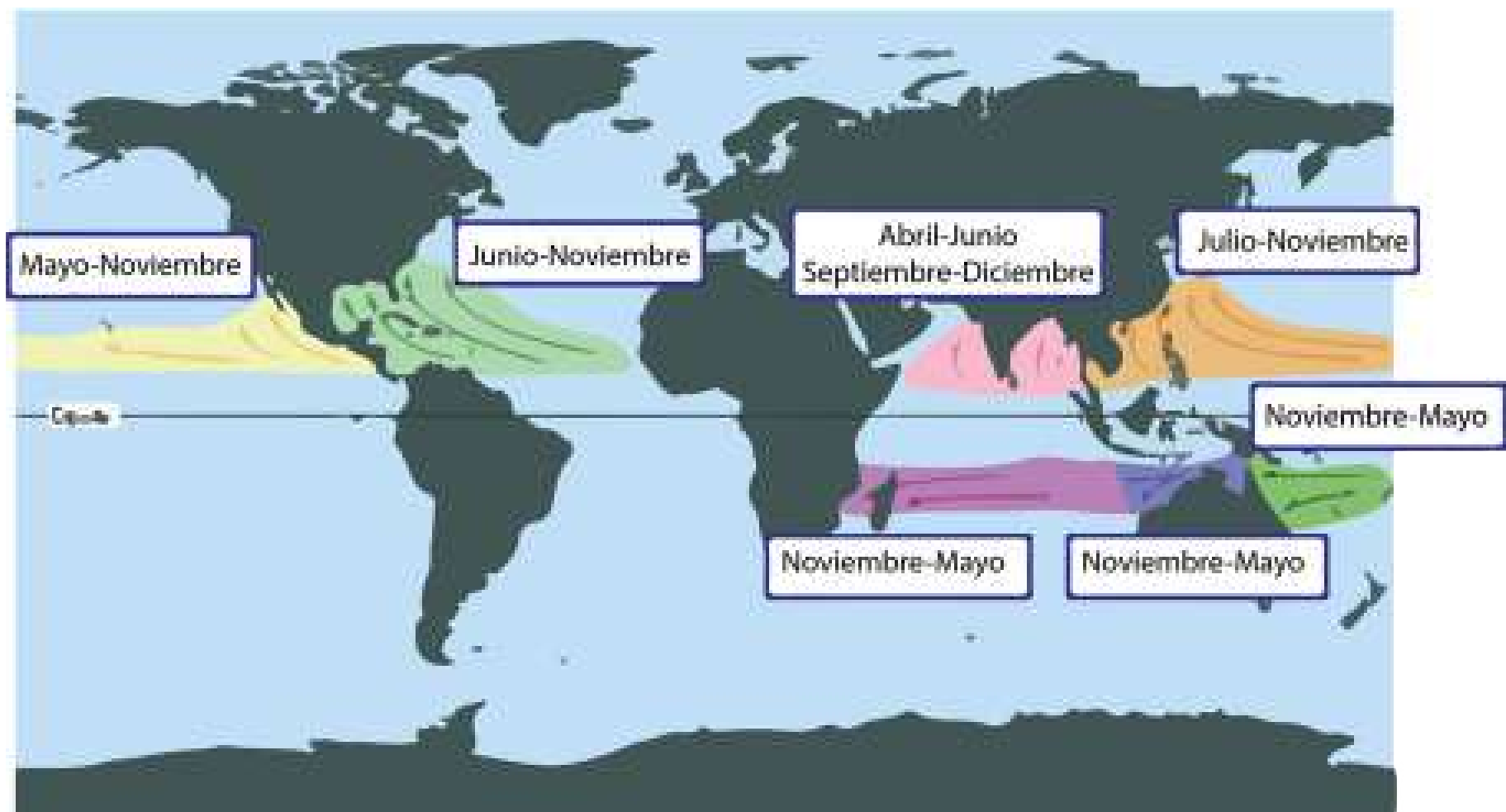


Figura 18. Regiones preferenciales, trayectorias y estaciones para el desarrollo de ciclones tropicales (<https://www.nhc.noaa.gov/climo/>)

Los ciclones tropicales pueden tener cientos de kilómetros de extensión y el daño esperado depende no sólo de la velocidad del viento sino también de otros factores como la velocidad de movimiento, la duración de los vientos fuertes y la lluvia acumulada durante y después de tocar tierra, los cambios súbitos de la dirección de movimiento y la intensidad, la estructura (e.g. tamaño e intensidad) del ciclón tropical, así como la respuesta humana a los ciclones tropicales. Las regiones costeras están particularmente expuestas al impacto de los ciclones tropicales, comparado con las regiones del interior. El daño en la costa puede ser causado por vientos fuertes, lluvia, por marea de tormenta (debido a cambios severos de la presión) y por tornados. La marea de tormenta es un producto tangencial del estrés ejercido sobre la superficie del mar por los vientos fuertes, con una pequeña contribución del campo de baja presión.

Los daños asociados con ciclones de alta intensidad generalmente son devastadores. Cuando un ciclón toca tierra puede generar una marejada que puede alcanzar los 6 metros de altura, extendiéndose por cerca de 160 km, siendo este el efecto más dañino, ya que el 80% de las de las personas que pierden la vida por huracanes se presenta en donde estos tocan tierra. Igualmente, los vientos generan una alta destrucción y representan un gran peligro especialmente para la infraestructura, además de convertir desechos y escombros en proyectiles que son lanzados al aire a gran velocidad. Las lluvias torrenciales causan daño por los eventos que desencadenan, como inundaciones y deslizamientos, que pueden ocurrir muchos kilómetros tierra adentro.

La simulación de los ciclones tropicales es un enfoque ampliamente aceptado para la evaluación de la amenaza. CIMNE &

INGENIAR (Cardona et al., 2015) desarrolló una metodología para la evaluación de la amenaza basada en eventos, generando un conjunto estocástico de ciclones para la evaluación probabilista del riesgo. La generación de los eventos estocásticos está basada en la frecuencia histórica de la ocurrencia de ciclones tropicales y sus diferentes grados de intensidad (Consultado en: <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/IBTrACS>, NOAA)

Una vez se definen los parámetros que caracterizan la ocurrencia de ciclones tropicales, desde el punto de vista físico, mediante la simulación de una serie de eventos aleatorios, se genera el conjunto de eventos estocásticos que contiene todas las formas posibles en que la amenaza se puede manifestar en la región de análisis, en términos de su frecuencia y severidad. La intensidad seleccionada para vientos fuertes es la velocidad de ráfagas de 3-segundos a 10 metros sobre la superficie. Para marea de tormenta, la intensidad es la altura de la ola sobre localizaciones costeras. Mayores detalles de la metodología probabilista de evaluación de la amenaza de ciclones tropicales se encuentra disponible en Cardona et al. (2015).

Los principales usos de la simulación matemática de ciclones son la estimación de las intensidades de viento y marea de tormenta para el diseño de edificios e infraestructura, planes de manejo de emergencias basados en modelaciones de oleaje y líneas de inundación por la marejada para las áreas más propensas al efecto directo de los mismos, así como la estimación de pérdidas para establecer primas de seguros.

CICLONES TROPICALES EN COLOMBIA

Para el caso de Colombia, la probabilidad de que los ciclones tropicales afecten el territorio continental es bastante reducida en comparación con otras zonas del Caribe. Las zonas con amenaza directa de este fenómeno son el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, y la Península de La Guajira, considerando el paso físico de un ciclón sobre estas áreas. En las zonas costeras caribeñas que incluye Santa Marta, Barranquilla y Cartagena, ha existido afectación, pero ha sido más indirecta (lo que se conoce como coletazos)^v

Existen tres efectos geofísicos y meteorológicos que favorecen a la baja afectación por ciclones tropicales al territorio colombiano^{vi}: *i)* la fuerza de Coriolis hace que los huracanes, que provienen de la costa africana, tiendan a moverse en dirección oeste-noroeste, *ii)* la línea de costa del Caribe Colombiano no es horizontal por lo que el oleaje generado no impacta de manera perpendicular a la costa, excepto en la península de la Guajira que se encuentra más expuesta, y *iii)* la Sierra Nevada de Santa Marta, sistema montañoso de 5.600 metros sobre el nivel del mar, y el noreste de Cartagena de Indias, funcionan como un escudo natural que se interpone cuando un sistema de estas características se acerca por el Este de la región, haciendo que la tormenta cambie la trayectoria ligeramente hacia el noroeste del mar Caribe protegiendo gran parte del litoral Caribe centro y sur. Sin embargo, estos sistemas dejan cuantiosas lluvias en las cuencas que pueden dar lugar a crecidas e inundaciones.

Aunque la mayoría de los ciclones tropicales no toquen tierra colombiana, pueden pasar cerca generando eventos asociados al fenómeno como: inundaciones,

movimientos en masa, vientos fuertes/vendavales, marejadas/mar de leva, trombas marinas/tornados, tormentas eléctricas, entre otros. Estos eventos pueden causar aumento del nivel de las aguas por crecientes súbitas, colapsos en estructuras, deslizamientos de tierra, caída de árboles, techos y postes de servicio público, erosión en las laderas, inundaciones en viviendas, pérdidas de embarcaciones menores y afectaciones en botes y a pescadores.

De acuerdo con estudios del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Dirección General Marítima, el 24% de las tormentas tropicales originadas en el Atlántico afectaron el Mar Caribe, y el 8% afectaron las costas colombianas en el Caribe, de estas, el 75% ocurrieron en el mes de agosto y el 25% en el mes de diciembre. En cuanto a huracanes, el 32% (13) de los huracanes originados en el Atlántico afectaron el Mar Caribe, y de estos sólo el 17% afectó las costas colombianas. Septiembre es el mes en el que más se ha presentado huracanes en el área de la costa Caribe Colombiana (1964-2004) (CCO, 2017).

Algunos de los ciclones tropicales más recordados en territorio colombiano fueron Joan ocurrido en octubre 1988 que atravesó la península de la Guajira y se desplazó por el lado sur de San Andrés; Bret en 1993; Roxanne, ocurrido en octubre de 1995 que se originó al norte del Archipiélago de San Andrés y Providencia; César en julio de 1996, que efectuó su desplazamiento por el norte de la península de La Guajira, y Lenny en noviembre de 1999 que, siguiendo una dirección atípica oeste-este afectó indirectamente toda la costa norte colombiana y produjo una fuerte marejada en la costa Caribe (CCO, 2017). San Andrés se ha visto afectado por al menos 12 tormentas y huracanes, siendo Hattie en 1961 una de las más peligrosas y más recientemente la

tormenta Beta en el 2005, que causó daños menores a la infraestructura costera (Ortiz, 2007).

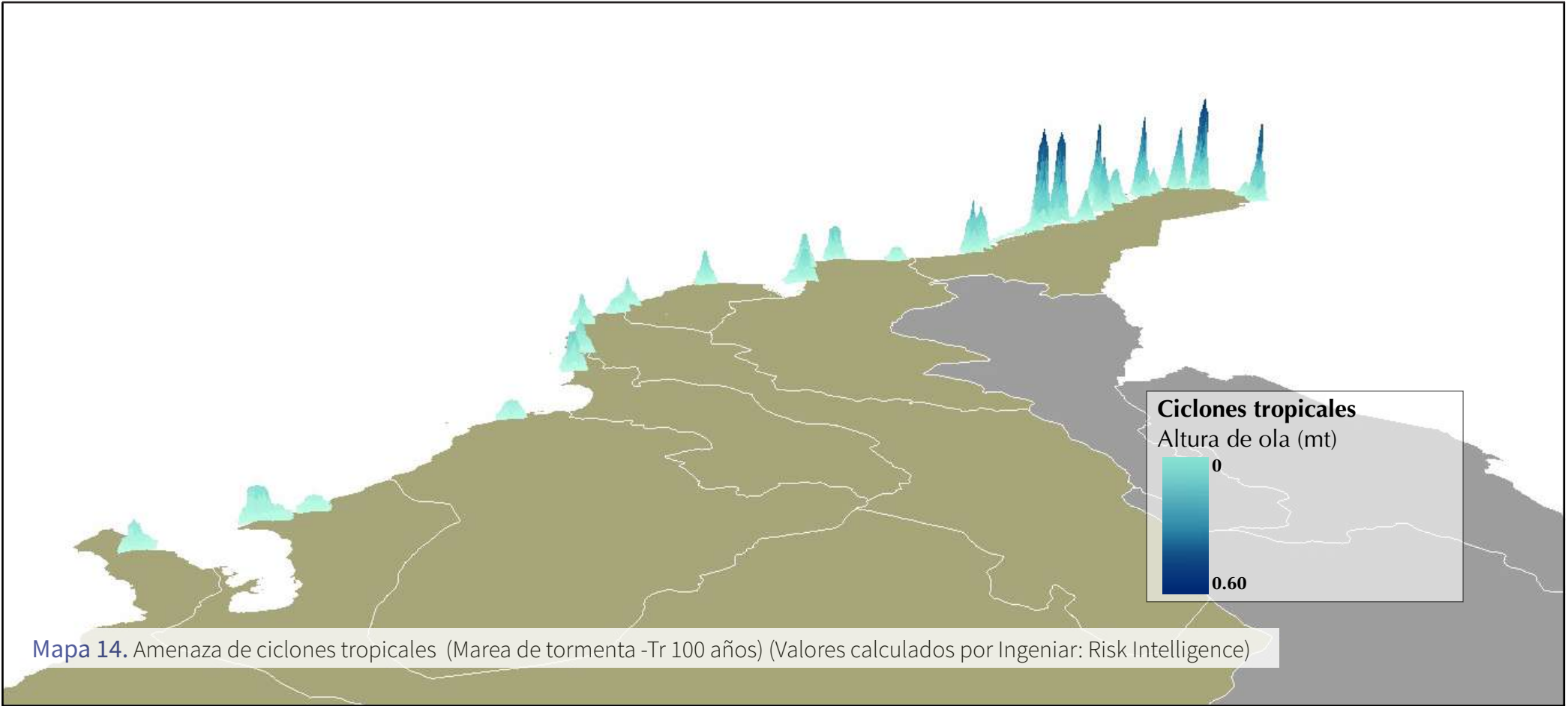
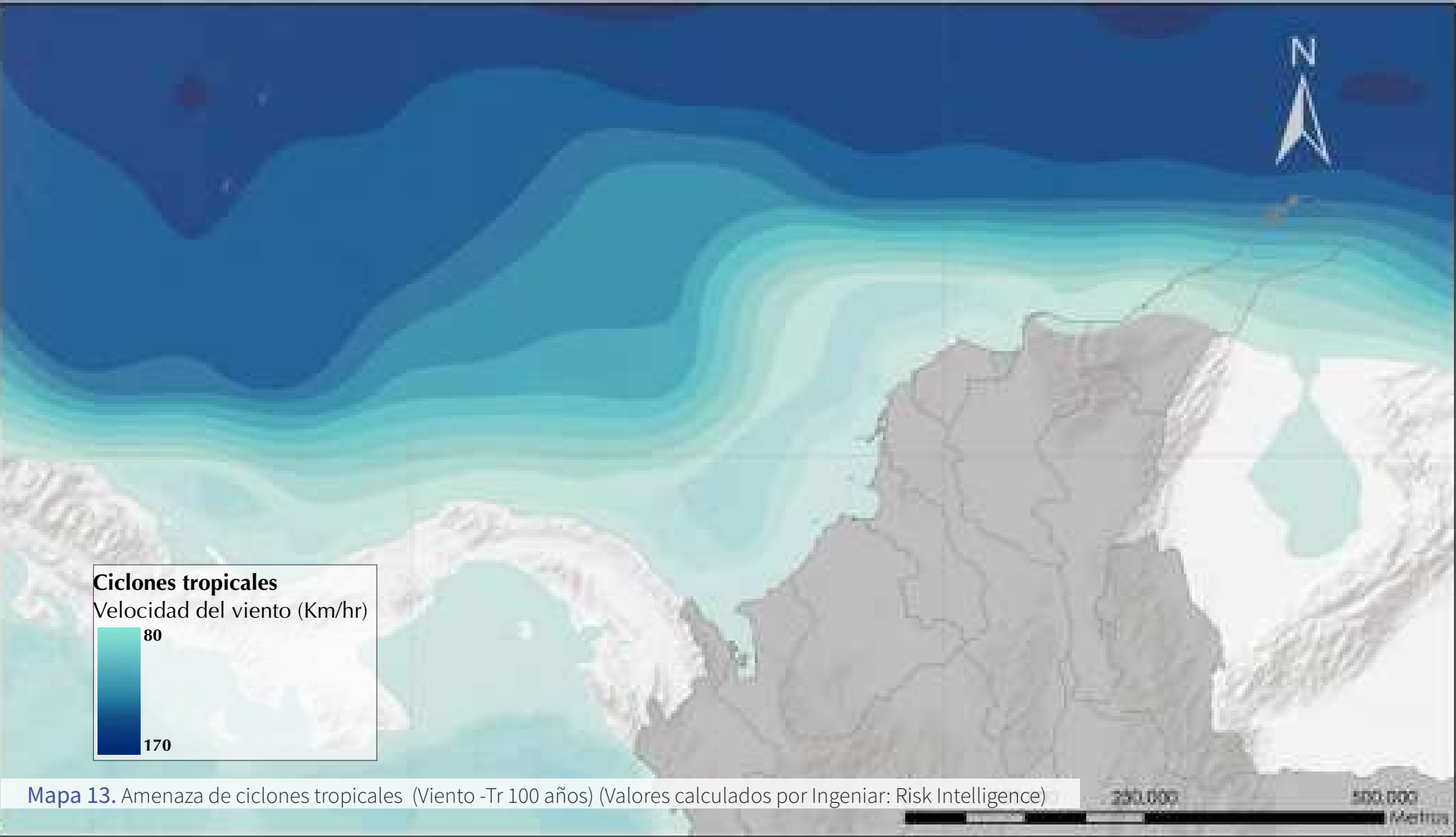
Para el monitoreo de los ciclones tropicales existen sistemas de seguimiento desde los años 50 y de radares, dispositivos de registro marinos, satélites meteorológicos y otros suministros desde los años sesenta que se han ido desarrollando y mejorando con los avances tecnológicos. La NOAA a través del Centro Nacional de Huracanes (CNH-Miami, Florida) se encarga de pronosticar la intensidad y la posible trayectoria de los ciclones tropicales y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) se encarga de facilitar información. En Colombia, el IDEAM es el encargado de monitorear el comportamiento de los ciclones tropicales que incidan directa o indirectamente sobre las condiciones atmosféricas del país especialmente en zonas insulares y costeras (Cadena, 2010).

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA DE CICLONES TROPICALES EN COLOMBIA

Dado que los ciclones tropicales no son un fenómeno muy recurrente en el territorio colombiano, estudios específicos con mayor resolución en las regiones de Colombia expuestas a esta amenaza no se han llevado a cabo. Sin embargo, en los últimos años se han realizado esfuerzos dirigidos a promover el conocimiento y manejo de esta amenaza, específicamente, se realizó la caracterización de escenarios con la infraestructura expuesta, igualmente se han asesorado los planes municipales y departamentales en la zona de influencia de GRD para asegurar la consideración del fenómeno como una amenaza que tiene incidencia en la planificación del territorio y la implementación de sistemas de alerta. Por otro lado, se diseñaron protocolos de

respuesta en los diferentes municipios y departamentos; a nivel nacional se desarrolló el protocolo nacional de respuesta a ciclones tropicales de manera coordinada con IDEAM, DIOH, UNGRD y la Aeronáutica Civil. En relación con el estudio de la amenaza, desde la comisión de educación se ha informado sobre la necesidad de desarrollar e implementar líneas de investigación asociadas a los efectos e impactos por ciclones tropicales. A nivel de comunidades, se han realizado acciones de comunicación del riesgo como cartillas y folletos, incluyendo la producción de piezas en wayuu y se han realizado diversos simulacros, igualmente, cada temporada se emiten circulares y videos para promover la preparación.

En el modelo global del riesgo en el marco del GAR15, Global Assessment Report 2015 (UNISDR, 2015) de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, se llevó a cabo la evaluación probabilista de riesgo por diferentes amenazas naturales, dentro de las cuales se consideraron los ciclones tropicales (vientos fuertes y marea de tormenta). En esta evaluación se obtuvieron resultados para las diferentes regiones del mundo susceptibles a este tipo de fenómeno, entre las cuales se encuentran la Costa Caribe y San Andrés y Providencia en Colombia. La metodología aplicada para la evaluación probabilista de la amenaza de ciclones tropicales (vientos fuertes y marea de tormenta) es la ya mencionada en esta sección. Mayores detalles se puede encontrar en Cardona et al. 2015. Los *Mapas 13 y 14* presentan la velocidad del viento y la altura de ola para marea de tormenta para la región Caribe para 100 años Tr.





2.5. Movimientos en masa

Los derrumbes, desprendimientos o desplazamientos de suelos, rocas o ambos, por efectos de la gravedad, se les denomina en general movimientos en masa (Cruden, 1991). De acuerdo con Varnes (1958, 1978), el criterio principal para clasificar los movimientos en masa es el tipo de movimiento que sigue el material que se desplaza. Además, se considera que los materiales pueden ser de dos clases: rocas y suelos; éstos últimos subdivididos en detritos y tierra. Cada una de las combinaciones del tipo de movimiento

y material presenta una definición para efectos de su identificación (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007). En otras latitudes se utiliza también la palabra genérica de deslizamientos para referirse a estos fenómenos y algunos especialistas incluyen dentro de los movimientos en masa el desprendimiento o derrumbe de capas de nieve, las cuales se les conoce como aludes o avalanchas.

En general, dependiendo de la velocidad,

los movimientos en masa se pueden clasificar en rápidos o lentos. Los primeros se originan frecuentemente en zonas con pendientes fuertes donde domina la caída de rocas y residuos que se acumulan formando un talud. Ejemplos típicos de este tipo son los desprendimientos y los flujos de lodo. La reptación es un tipo de movimiento en masa que se percibe por la inclinación de los árboles, cercas, o el agrietamiento de casas, etc. La *Figura 19* presenta la clasificación de acuerdo al tipo movimiento.



Figura 19. Clasificación de movimientos en masa de acuerdo al movimiento. Fuente: IDIGER

La susceptibilidad de una zona a presentar un movimiento en masa depende tanto de factores internos como externos, que pueden provenir de causas naturales o antrópicas. Los factores internos están principalmente relacionados con el tipo de material del subsuelo que puede ser inherentemente débil como la arcilla que cambia sus propiedades físico-químicas al contacto con el agua o como la arena que presenta baja cohesión. Otros factores internos son la topografía del terreno, y las superficies o zonas de debilidad de suelos y rocas lisas o la orientación y debilidad de las rocas.

El agua influye de una manera importante en los materiales, por un lado, su presencia añade peso a la masa, como en el caso de las arcillas, o bien, el agua subterránea puede erosionar el material conllevando a la inestabilidad del suelo o la misma presión del agua debilita el material.

En el caso de laderas compuestas principalmente por rocas, puede existir una baja cohesión que genera que las rocas al expandirse produzcan fracturas que aumentan la porosidad del material reduciendo así la resistencia de la masa. En este sentido, los eventos naturales más comúnmente asociados con los movimientos en masa, que pueden ocurrir individualmente o en combinación, son: las lluvias fuertes, terremotos, eventos volcánicos y derretimiento del suelo congelado, efectos de socavación o crecientes de ríos. Los efectos de todas estas causas varían ampliamente y dependen de factores como la inclinación de la pendiente, morfología o forma del terreno, tipo de suelo y la geología.

Los factores externos como el uso de la tierra, la deforestación, el manejo de aguas en la zona, las aguas subterráneas, y otras acciones antrópicas incluyendo obras de

infraestructura cercanas o presencia de tuberías y otros sistemas, pueden afectar las condiciones de equilibrio de un terreno con una pendiente determinada. Estos factores son en gran parte consecuencia de la expansión de la población en nuevas tierras y la creación de nuevos vecindarios, pueblos y ciudades, puesto que se genera una perturbación o cambio de los patrones de drenaje, desestabilización de las laderas y remoción de vegetación. Otros factores que influyen en la ocurrencia de movimientos en masa incluyen la sobrecarga en la parte superior de la ladera que hacen que se exceda la resistencia del suelo u otros materiales componentes, la irrigación, fugas en tuberías o excavaciones inadecuadas. En la *Figura 20* se presentan las diferentes condiciones que aumentan la amenaza por movimientos en masa.

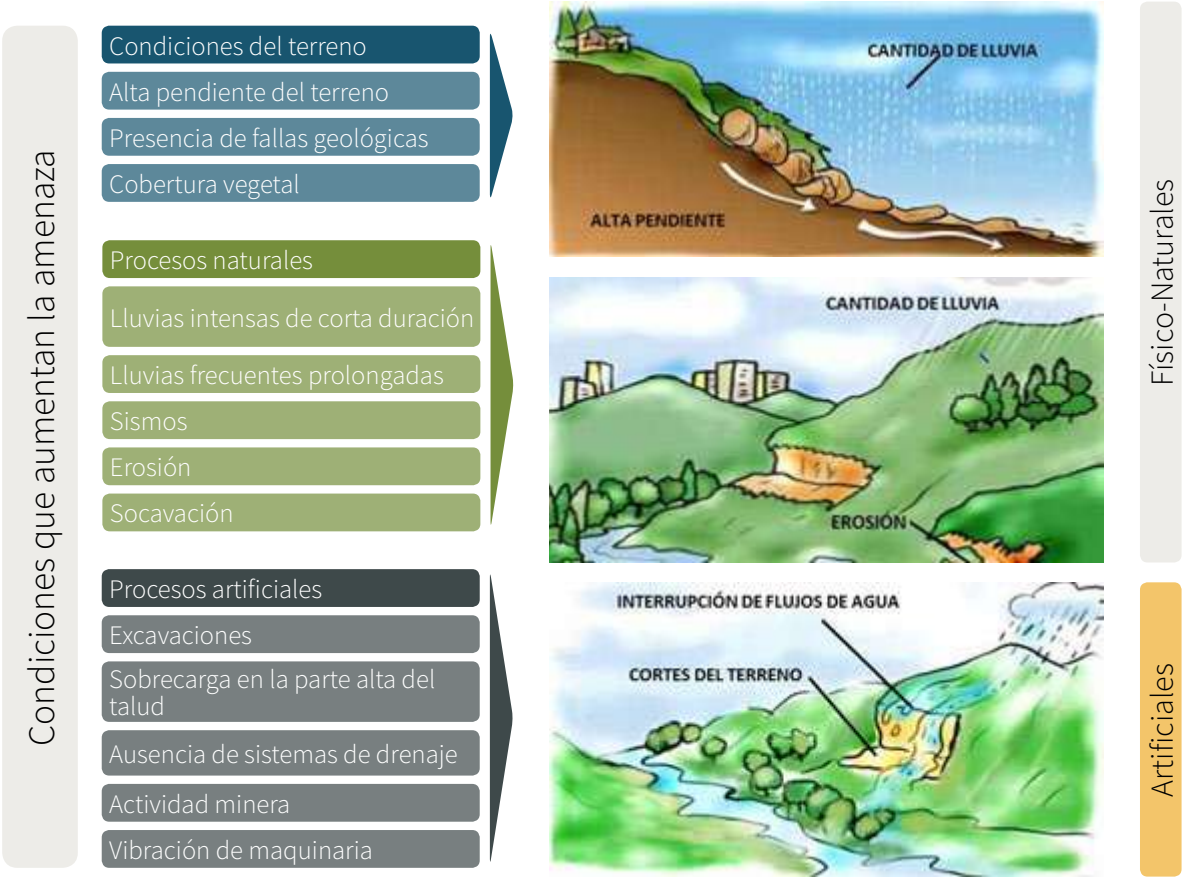


Figura 20. Condiciones que aumentan la amenaza por movimientos en masa. Fuente: IDIGER

Ahora bien, para los movimientos en masa, en el análisis o evaluación de la amenaza se involucra la identificación, reconocimiento y caracterización de movimientos gravitacionales con potencial de afectación a las sociedades, sus bienes materiales y ambientales. Los aspectos fundamentales a tener en cuenta en dicha evaluación son la tipología, mecanismos de falla, propiedades de los materiales involucrados, grado de actividad, extensión física, condiciones o factores determinantes y desencadenantes, umbrales de activación, movilidad, velocidad, magnitud y frecuencia (Alcántara-Ayala 2016; SGC 2015, 2017). Reiteradamente este tipo de análisis de amenaza se utiliza en forma errónea como sinónimo de evaluación del riesgo, especialmente a nivel cartográfico. Sin embargo, debe quedar claro que ésta última posee un nivel de complejidad mucho mayor ya que requiere del análisis de los elementos expuestos y su vulnerabilidad (SGC, 2015, 2017).

Existe un gran número de métodos para evaluar la amenaza por movimientos en masa que ha surgido desde la perspectiva de diversos dominios disciplinarios. Las técnicas más utilizadas incluyen documentación histórica, evaluaciones de campo, fotogrametría, generación de inventarios (Guzzetti et al., 2012), datación, instrumentación, monitoreo, y el uso de métodos heurísticos (Crozier & Glade, 2004), estadísticos (Remondo et al., 2005), determinísticos (Cervi et al., 2010), frecuentistas y probabilistas (Londoño, 2016). Ciertamente, el empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Carrara et al., 1995), teledetección (Metternich, et al., 2005) y modelación de escenarios, ha brindado la posibilidad de mejorar y simplificar el análisis de la dimensión espaciotemporal de los movimientos en masa. Asimismo, desarrollos tecnológicos, como el LiDAR y los vehículos aéreos no tripulados

o drones facilitan el reconocimiento y monitoreo de movimientos en masa. Dada la multidimensionalidad de este tipo de procesos exógenos, usualmente la combinación de diferentes enfoques es la mejor alternativa; sin embargo, dependiendo del objetivo o propósito de la evaluación, unas u otras técnicas son más apropiadas según el nivel de resolución requerido y de los insumos de información necesarios (França 2010; Londoño, 2016), con modelos simplificados es posible asumir superficies probables de falla o una zonificación de susceptibilidad, lo que permite contar con información muy útil para la toma de decisiones desde el punto de vista de ingeniería y de la planificación territorial.

En un análisis probabilista de la amenaza de movimientos en masa el objetivo es calcular de forma confiable los diferentes parámetros probabilistas relacionados con la ocurrencia del fenómeno para diferentes periodos de retorno. Para la evaluación de la amenaza de movimientos en masa se construye un conjunto de eventos a partir de todos los escenarios de eventos estocásticos detonantes de movimientos en masa (como terremotos, inundaciones, etc.). Las lluvias y su efecto en el aumento de la humedad del suelo se consideran escenarios de saturación de los depósitos superficiales potencialmente deslizables, y sus correspondientes frecuencias anuales de ocurrencia. Los escenarios de amenaza obtenidos están asociados con la frecuencia de ocurrencia particular dependiente de frecuencias de ocurrencia de escenarios de humedad y de los fenómenos naturales detonantes. El parámetro de intensidad de amenaza básico que se usa es el inverso del factor de seguridad (factor de inseguridad o de inestabilidad), el cual aumenta con el nivel de amenaza por movimientos en masa. Un enfoque probabilista de evaluación de

la amenaza y el riesgo permite agrupar las pérdidas estimadas por movimientos en masa al grupo general de eventos asociados, independientemente de cuál pudiera ser el evento detonante (ERN-LA, 2008).

Para reducir el riesgo generado por los movimientos en masa es necesario contar con información técnica acerca de los mismos, la cual se puede generar a diferentes escalas, desde la una muy puntual o detallada hasta una indicativa a nivel nacional.

MOVIMIENTOS EN MASA EN COLOMBIA

Colombia se encuentra situada en la convergencia de las placas de Nazca, Caribe y América del sur, lo que explica la presencia de cadenas montañosas, separadas por valles interandinos. La dinámica de esta tectónica favorece la ocurrencia de sismos, erupciones volcánicas y movimientos en masa. Colombia también se encuentra en la zona de confluencia intertropical. No tiene estaciones, pero la presencia de los sistemas montañosos antes mencionados influye en la variabilidad climática. En Colombia existen nieves perpetuas, páramos, selvas húmedas y llanuras tropicales al nivel del mar. En su territorio se presentan temporadas húmedas y temporadas secas, algunas veces influidas por el fenómeno ENSO. La confluencia de las condiciones topográficas, geológicas e hidrológicas y de ocupación y uso del suelo, hace que parte del territorio nacional sea especialmente susceptible a los movimientos en masa. Las zonas propensas se encuentran distribuidas en las cadenas montañosas del país, principalmente en la región Andina en donde se encuentran las principales ciudades y se asienta más del 70% de la población. Los departamentos más propensos al fenómeno de movimientos en masa son Antioquia, Tolima, Valle del Cauca,

Caldas, Boyacá y Nariño.

De acuerdo con datos de la Corporación OSSO y Eafit (2011) y del Banco Mundial (2012), en el periodo 1970-2011, los porcentajes de pérdidas de vidas y de viviendas destruidas por movimientos en masa son significativos: 10% de viviendas destruidas y 36% de vidas perdidas.

Por otro lado, de acuerdo con los registros del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del SGC, desde 1900 hasta 2017, en el país se reportaron 16.969 movimientos en masa siendo el departamento de Antioquia el que mayores eventos presentó seguido por Cundinamarca y Cauca. Los departamentos con mayor número de personas y familias afectadas han sido Caldas, Caquetá, Tolima, Antioquia, Bolívar, Boyacá, Cauca, Cesar, Cundinamarca, Huila, Meta, Nariño, Norte de Santander, Putumayo, Quindío y Santander (SGC, 2017).

Los movimientos en masa han sido de especial atención a nivel nacional en cuanto a los efectos que estos tienen sobre las ciudades y sobre la infraestructura vial. Por esta razón, se han desarrollado estudios de amenaza y metodologías para la evaluación del riesgo que se deriva de este tipo de eventos; estudios entre los que se encuentra la determinación de umbrales de lluvia detonante de movimientos en masa. El SGC ha desarrollado metodologías para la estimación de la amenaza por movimientos en masa a escala 1:100.000, 1:25.000 y para el riesgo a 1:2.000 (SGC 2015, 2017). Igualmente, desde los años cuarenta existen informes relacionados con la caracterización de los movimientos en masa que afectan de manera importante diferentes poblaciones y obras de infraestructura. Desde comienzos de los noventa se han desarrollado trabajos de zonificación de amenaza

por movimientos de masa a diferentes escalas, aplicando diferentes técnicas de zonificación.

El SGC, como entidad técnica nacional adscrita al Ministerio de Minas y Energía, tiene la misión de realizar investigaciones geocientíficas en el país. En lo referente a movimientos en masa, el SGC actualiza el mapa indicativo nacional de amenaza y establece metodologías para el análisis de áreas expuestas a este tipo de procesos. Adicionalmente, presta asesoría técnica y atiende visitas de emergencia para determinar posibles medidas correctivas. El Grupo de Movimientos en Masa del SGC, dentro del inventario Nacional de Amenazas Geológicas incluye el registro y catálogo de movimientos en masa.

Entre los años 2011 y 2016 en el marco del Decreto Nacional 1807 de 2014 del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, el SGC realizó un estudio donde identificó que del total del área del país cerca del 50% se encuentra categorizada en amenaza baja por movimientos en masa, 22% amenaza media, 20% amenaza alta y 4 % en amenaza muy alta (Consultado en: <http://www.idiger.gov.co/rmovmasa>).

Así mismo, a partir de la expedición de la ley de gestión del riesgo de desastres (Ley 1523 de 2012) donde se establece la necesidad de hacer estudios de riesgo a nivel municipal, el SGC y la Universidad Nacional han desarrollado guías metodológicas que definen los lineamientos para realizar estudios de riesgo por movimientos en masa a escala detallada o local para aplicar en cabeceras municipales, poblados pequeños y medianos, y en áreas rurales (SGC, 2015; 2017).

Por su parte, el IDEAM publica pronósticos diarios de la probabilidad de ocurrencia de

movimientos en masa a nivel nacional con base en las lluvias que se estén presentando. Para esto ofrece mapas y descripciones de los departamentos y municipios más propensos a presentar este tipo de eventos (Consultado en: <http://www.ideam.gov.co/web/pronosticos-y-alertas/>). El Centro de Estudios de Desastres y Riesgo, CEDERI, de la Universidad de los Andes, hace varios años elaboró para el INVIAS varios estudios de amenaza y riesgo por movimientos en masa generados a partir de modelos que incluyen las condiciones hidrometeorológicas y geológicas sobre distintos corredores viales a nivel regional (Consultado en: <https://www.cepal.org/publicaciones/xml/8/33658/ColombiaCapII.pdf>).

El OSSO elaboró para el PNUD un estudio de evaluación de la amenaza por movimientos en masa a nivel regional en la cuenca del río Atrato, cubriendo el centro y norte del departamento Chocó, parte de los departamentos de Antioquia, Córdoba y Risaralda y la vertiente Pacífico de la Serranía del Baudó, a partir de la información disponible de curvas de nivel de Colombia, mapas de isoyetas y mapas geológicos (SNPAD-UNDP-OSSO: Apoyo a la recuperación de la zona afectada por el Terremoto del Atrato Medio en 1992-Dinámicas ambientales amenazantes en el Atrato medio (Elementos para el desarrollo sostenible).

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA DE MOVIMIENTOS EN MASA EN COLOMBIA

En el año 2001 se generó el primer mapa de amenaza por movimientos en masa a nivel nacional a escala 1:1.500.000. Este mapa presenta en forma indicativa, la amenaza relativa por fenómenos de erosión y movimientos en masa, definida con base en factores inherentes y desencadenantes

que intervienen este tipo de fenómenos. Los resultados dan cuenta de la densidad, frecuencia y recurrencia de los movimientos en masa permitiendo definir las provincias con la mayor amenaza relativa.

En 2009, en convenio con el IDEAM, se mejoró, complementó y actualizó la información y se elaboraron mapas de susceptibilidad y amenaza relativa a escala 1:500.000. En este estudio se dividió el país en once regiones geográficas y se describieron las características de las variables del modelo, los detonantes considerados y los procesos morfodinámicos actuantes para cada región (Ingeominas-IDEAM, 2010). Recientemente, el SGC, de manera colegiada entre el IDEAM, la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Universidad Industrial de Santander (UIS), Universidad EAFIT, Universidad de Pamplona, Universidad de Caldas y Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, desarrolló un nuevo Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1:100.000 (Consultado en: <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/geoamenazas/Paginas/Proyecto-Mapa-Nacional-de-Amenaza-Relativa.aspx>).

Para esa última actualización del Mapa Nacional de Amenaza se contó con

información de diferentes entidades nacionales como la cartografía básica oficial del país a escala 1:100.000 y el modelo digital de elevación con píxeles de 30 m y la información de suelos edáficos por departamento del IGAC, mapa de coberturas del suelo a escala 1:100.000, registros de lluvia máxima diaria y mapa de zonificación climática nacional del IDEAM, además de la información geológica del país a escala 1:100.000 correspondiente a las fallas y el catálogo e inventario de movimientos en masa del SIMMA. También se incluye la amenaza sísmica, imágenes de sensores remotos y fotografías aéreas del SGC. Adicionalmente, se contó con información secundaria relacionada con estudios de zonificación, planes de ordenamiento territorial de los municipios, fotografías aéreas e imágenes para trabajos de fotointerpretación de procesos activos (SGC, 2017). En el **Mapa 15** se presenta la amenaza por movimientos en masa Escala 1:100.000 integrado con el Mapa de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:500.000, en las zonas donde no fue actualizado el modelo.

Asimismo, recientemente el SGC desarrollo las guías metodológicas para estudios a escala más detallada antes mencionadas. Los resultados de este trabajo se relacionan en un documento metódico y conciso en

el que se indican los datos requeridos, los pasos o procesos que se deben seguir en cada una de las etapas, los resultados que se obtienen y la forma como se deben presentar e interpretar los resultados. Además, se da a conocer parte de un capítulo dedicado al perfil de los profesionales requeridos para la ejecución o supervisión de tales estudios (SGC, 2016).

Tanto la actualización del mapa nacional como las guías metodológicas para estudios a escala más detallada consideran la necesidad de contar con metodologías estándar y reproducibles para la evaluación y zonificación de la amenaza. Para dar alcance a este propósito, para el análisis de la susceptibilidad y amenaza se aplicó el método heurístico basado en la categorización y ponderación de los factores condicionantes y detonantes de inestabilidad de acuerdo con la influencia esperada de estos factores en la generación de movimientos en masa (Brabb et al. 1972; Nilsen y Wright 1979; Anbalagan 1992). En la *Figura 21* se presenta el modelo de susceptibilidad usado para elaborar el mapa de amenaza por movimientos en masa, los atributos por calificar de cada variable y los pesos asignados; para la representación cartográfica, se emplearon cinco categorías: muy alta, alta, media, baja y muy baja.

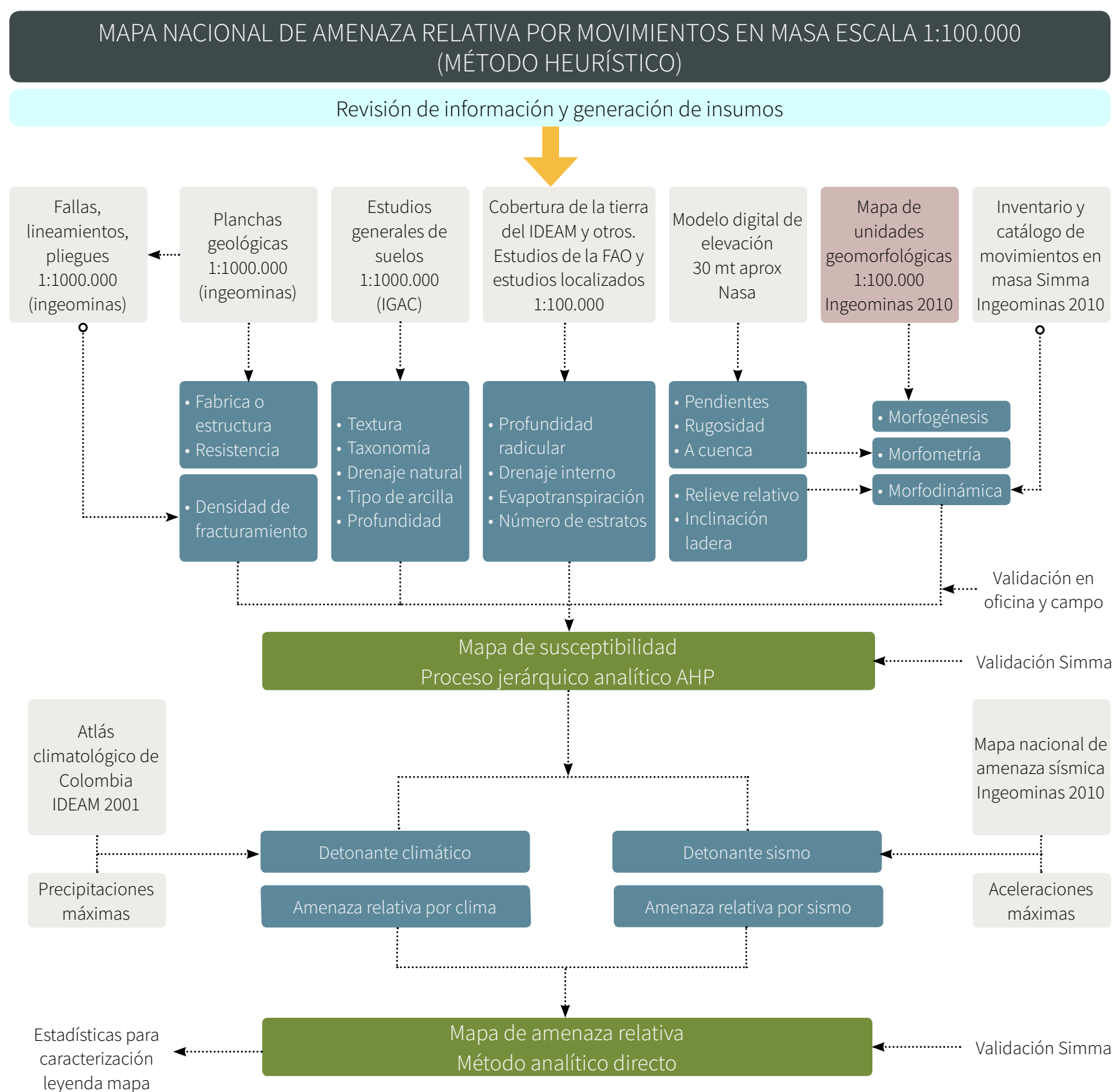
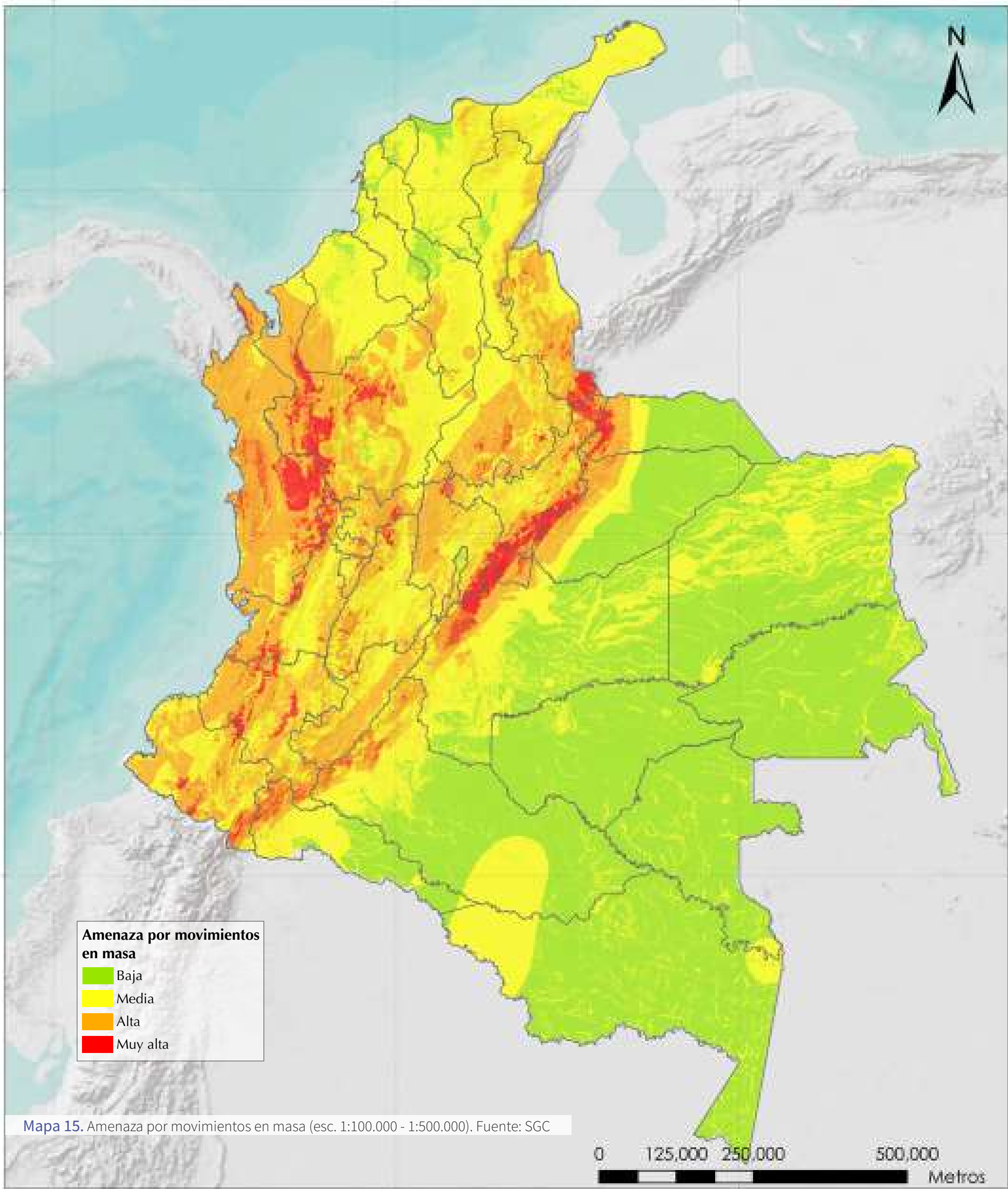


Figura 21. Diagrama de la metodología para la zonificación de la susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa, escala 1:100.000 (SGC, 2013)



Mapa 15. Amenaza por movimientos en masa (esc. 1:100.000 - 1:500.000). Fuente: SGC



2.6. Incendios de la cobertura vegetal

Los incendios de la cobertura vegetal pueden considerarse como perturbaciones ecológicas con importantes efectos en la vegetación, bosques, selvas y zonas áridas o semiáridas. Pueden ser producidos por fuego causado de forma natural o por causa del ser humano y se generan cuando concurren tres elementos: combustible, calor y oxígeno. Por esto, la combinación de estos factores es conocida como el “triángulo del fuego”. El comportamiento del fuego o de esta “gran triada” depende a su vez de tres grandes variables: combustible, tiempo atmosférico y topografía. Estas variables afectan la dinámica de los incendios, la cual responde a diversas condiciones en un mismo sitio, como el tipo de vegetación, la cantidad de combustible y oxígeno, las condiciones meteorológicas, la topografía, las actividades humanas, entre otras. Su ocurrencia y propagación no son controladas o programadas (FAO, 1986). Los incendios forestales pueden afectar pequeñas áreas o miles de hectáreas y pueden ocasionar diversos efectos al suelo, flora y fauna, a la atmósfera, así como a los bienes y servicios, como el agua disponible en el subsuelo, la captura de carbono, la emisión de oxígeno, la alimentación, la recreación, entre otros. Los incendios forestales pueden ser *i)* superficiales, es

decir que se propagan sobre material como pastos y vegetación herbácea de la superficie del suelo hasta 1,5 metros de altura, *ii)* subterráneos, que se propagan en material debajo de la superficie del suelo; como raíces y materia orgánica acumulada, y *iii)* aéreos, que se propagan por la parte alta de los árboles o matorrales (SEGOB, 2011).

Los incendios de la cobertura vegetal no siempre tienen efectos negativos, algunas veces éstos hacen parte de la dinámica ecológica en algunos tipos de vegetación, así como cuando su uso es controlado y regulado por la comunidad. Por ejemplo, en los ecosistemas influenciados por el fuego, una modalidad o variante de ecosistemas sensibles al fuego, los incendios de la cobertura vegetal desempeñan un papel ecológico muy sutil en el mantenimiento de la biodiversidad típica de los ecosistemas de transición y en el predominio relativo de algunas especies de plantas con capacidad para tolerar incendios poco frecuentes y de baja intensidad y severidad. Sin embargo, sus efectos pueden ser catastróficos en ecosistemas sensibles al fuego en donde la mayor parte de las especies biológicas no cuentan con estrategias adaptativas al fuego e incluso presentan condiciones

microclimáticas limitantes para la ignición y propagación natural del fuego (Uhl y Kauffman, 1990), o en ecosistemas independientes del fuego que tienen muy baja probabilidad de presencia natural de incendios debido a la ausencia de vegetación y a las condiciones climáticas extremas, pudiendo significar la desaparición total de este tipo de ecosistemas (del Campo Parra, 2011).

De esta manera, cuando los incendios forman parte de la historia natural de un ecosistema determinado, lo hace dentro de un espectro que permite predecir –con cierto nivel de incertidumbre– los atributos de los eventos por ocurrir (frecuencia, patrón espacial, estacionalidad, intensidad, severidad, fuente principal de ignición) en un área determinada (Van Wilgen y Scholes, 1997, citado por Getzin, 2002; Gill y Allan, 2008). El uso descontrolado de este tipo de incendios con propósitos agrícolas y pecuarios en ambientes, con condiciones meteorológicas favorables para su propagación, resulta problemático cuando su recurrencia supera la capacidad de resiliencia de los ecosistemas y altera de manera irreversible los procesos naturales que sirven de base para la producción de bienes y servicios ambientales. Hoy en

día, los incendios son la expresión de la degradación de los regímenes naturales del fuego en la mayor parte de los ecosistemas terrestres (Van Wilgen y Scholes, 1997, citado por Getzin, 2002; Gill y Allan, 2008).

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, es posible mantener los regímenes de fuego en contextos de relativa estabilidad climática y ecosistémica de largo plazo y sin perturbación humana importante. Cualquier tipo de incendio que se presente por fuera de los límites históricos de intensidad, espacio-temporalidad, severidad y cobertura puede inducir la transformación del ecosistema involucrado en otro totalmente distinto o, en menor grado, la pérdida de su biodiversidad y casi siempre el incremento de la probabilidad de recurrencia de incendios por el ingreso de nuevas especies amigables del fuego.

El conocimiento y entendimiento de los incendios en sistemas agrícolas o agroforestales es avanzado, sin embargo, dada la diversidad ambiental (trópico, alpino, árido, semiárido) y la diversidad cultural, el mosaico de regímenes de fuego, políticas oficiales de manejo de incendios forestales y tradiciones en su manejo comunitario, y problemáticas relacionadas con este tipo de fenómenos y sus efectos ambientales da un producto complejo en el que es necesario avanzar para su mayor entendimiento y mejor manejo.

Dado que este fenómeno es multicausal, altamente dinámico en tiempo y espacio y generador de impactos de alcance variable sobre el medio natural y social, es necesario abordar su estudio y comprensión como entes organizados compuestos por subsistemas como elementos estructurantes

que se disponen y relacionan en diferentes niveles jerárquicos, de tal forma que, para lograr mayores niveles de detalle en el acercamiento a un determinado sistema, se consideran los subsistemas como sistemas aislados que se interconectan y conforman un ente de orden superior (Páramo, 1999; 2000).

El procedimiento para evaluar la amenaza de incendios forestales propuesto por el IDEAM (2011) se fundamenta en la evaluación de cada uno de los componentes de dicha amenaza, a través de una metodología paramétrica, con enfoque espacial, basada en la ponderación y calificación secuencial de los diversos factores mediante un Sistema de Información Geográfica.

El proceso metodológico general se esquematiza en la *Figura 22*. Para su

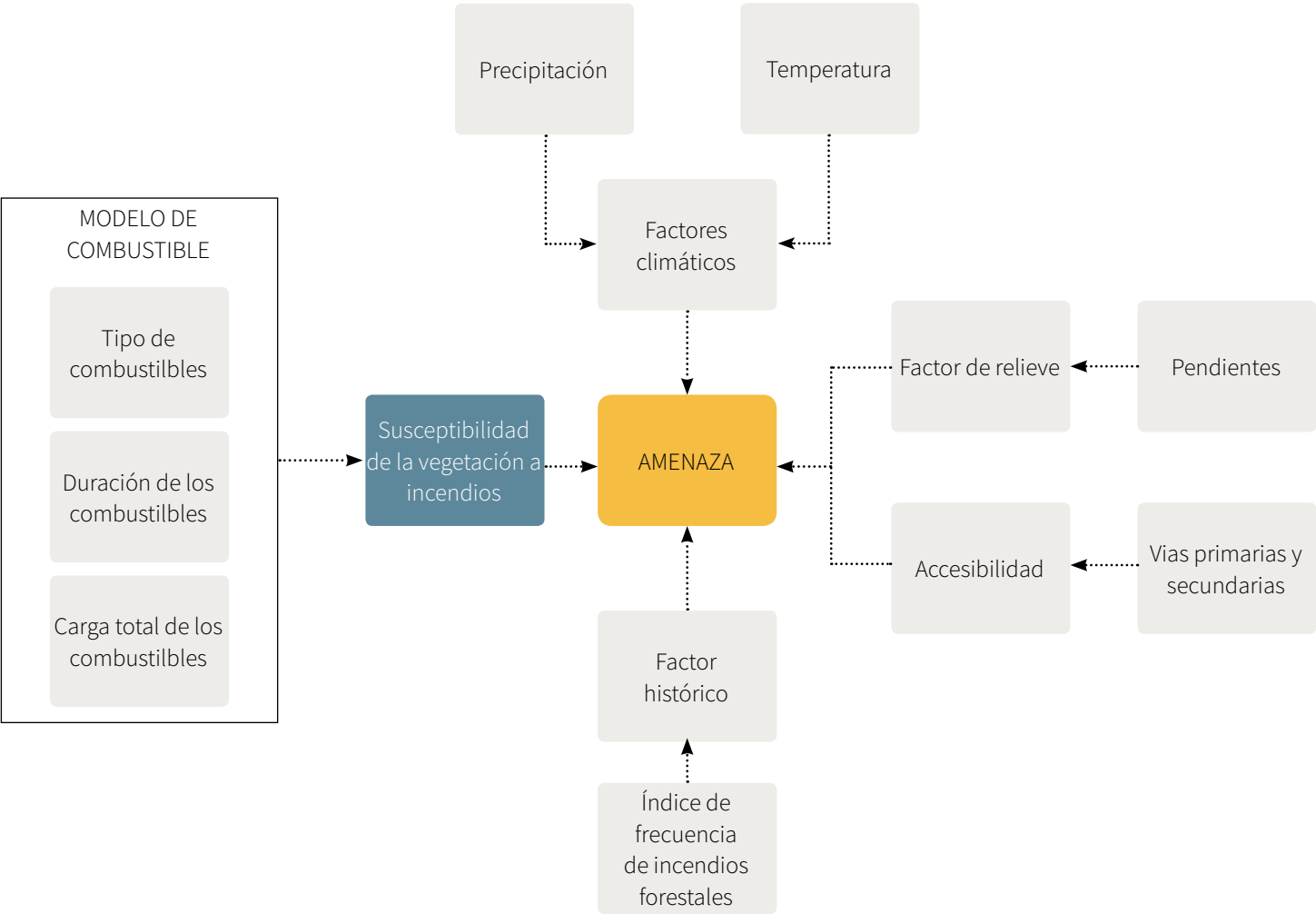


Figura 22. Interrelación entre factores de amenaza de incendios forestales, Fuente: IDEAM, 2011

aplicación se debe contar con información como mínimo de la cobertura vegetal, series históricas de precipitación y temperatura, topografía, red vial y si es posible, un inventario de incendios previos ocurridos en el área.

Los resultados de la evaluación de incendios de coberturas vegetales sirven para apoyar y planificar integralmente actividades de prevención y mitigación de desastres por incendios, permitiendo establecer áreas prioritarias para la gestión de incendios y para procesos de toma de decisiones, así como para la emisión de alertas tempranas.

INCENDIOS FORESTALES EN COLOMBIA

En Colombia la mayor ocurrencia de incendios de coberturas vegetales se presenta en las temporadas secas anuales,

durante los meses de diciembre a marzo y durante los meses de julio y agosto. Estos periodos se intensifican o atenúan en todo el país por los fenómenos de El Niño y La Niña en número de eventos y área total afectada (Carmona et al. 2005). Igualmente, según la susceptibilidad de la vegetación en ciertas áreas del país, como la región Andina, durante El Niño, sus efectos como las sequías prolongadas, el incremento de la temperatura y la insolación aumentan considerablemente la posibilidad de incendios (Anaya, 2009).

No obstante, el comportamiento de los incendios varía considerablemente de acuerdo con la región por las diferencias climáticas y orográficas en el país. Estos fenómenos son poco frecuentes en el Pacífico principalmente por factores climáticos dado que esta región cuenta con condiciones extremas de precipitación.

Por el contrario, la región del Orinoco presenta una alta ocurrencia de incendios debido tanto a su intensa temporada seca como a la influencia humana con el uso de pastizales para ganadería. Similar a la región del Orinoco, es la región Caribe, pero en menor extensión dadas las bajas cargas de combustible. Por otro lado, la región de la Amazonía, especialmente la región de la Macarena, se caracteriza por los procesos recurrentes de fuego entre zonas de sabana y bosques para promover el cambio de coberturas forestales a herbáceas. En la región de los Andes, aunque presenta una baja ocurrencia de incendios, hay quemas importantes en zonas del páramo en áreas consideradas de alto valor ecológico (Anaya, 2009).

Generalmente en Colombia las coberturas vegetales más afectadas son aquellas sometidas a quemas para obtener terrenos

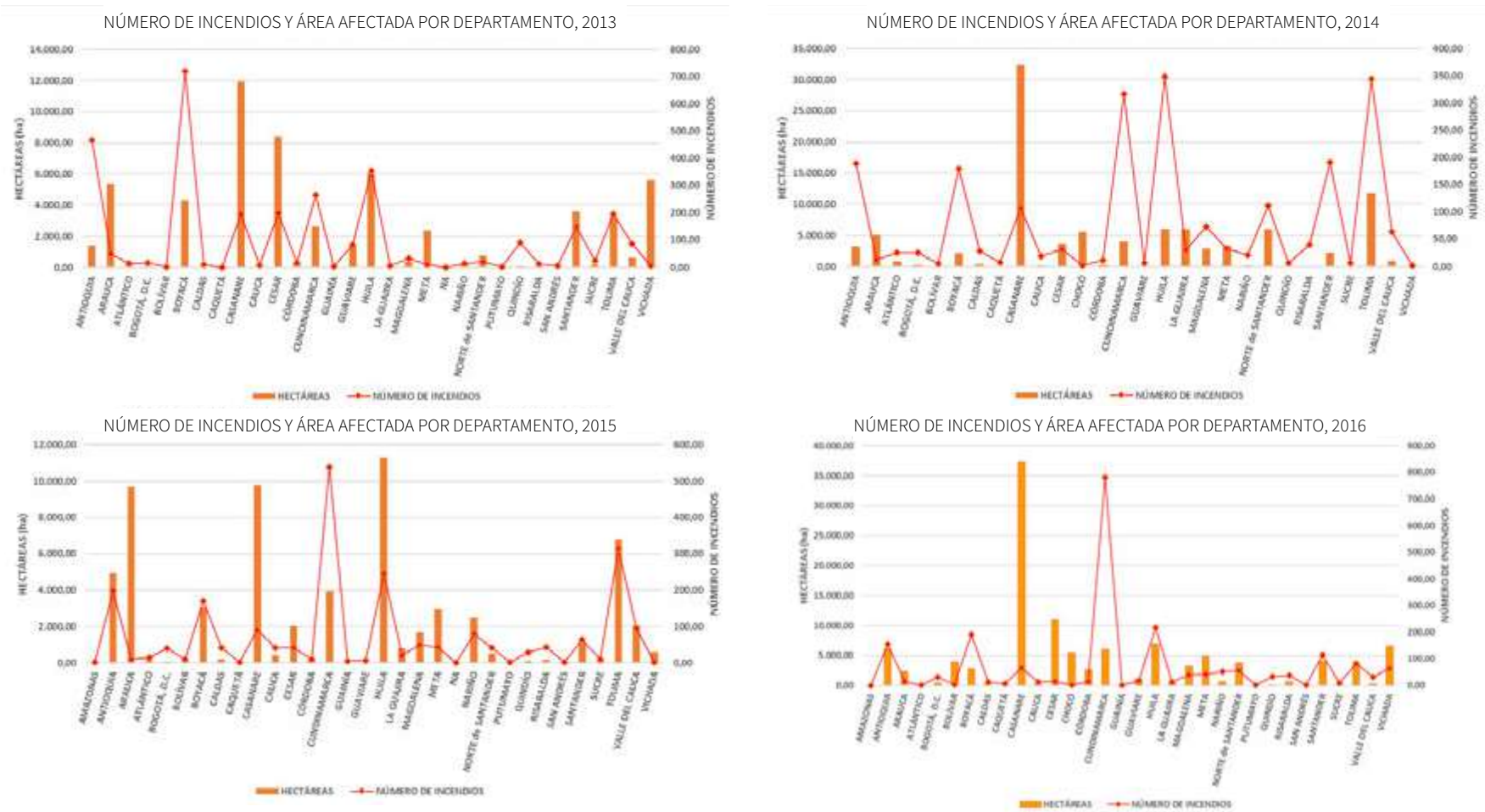


Figura 23. Número de incendios y área afectada por departamento para los años 2013, 2014, 2015 y 2016. Fuente: IDEAM

para fines agrícolas. La *Figura 23* presenta el número de incendios y área afectada por departamento para los años 2013, 2014, 2015 y 2016 (Consultado en: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/estadisticas-incendios>). Según los datos de GLOBSCAR2000 (Simon et al., 2004) Colombia ocupa el cuarto lugar en la relación entre área quemada y superficie total del país en comparación con el resto de Latinoamérica.

Para realizar estudios, prevenir y atender emergencias por causa de incendios forestales, se creó la Comisión Nacional Asesora de Incendios Forestales del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, hoy SNGRD, coordinada por el Ministerio del Medio Ambiente. A diferencia de otros eventos catalogados como desastres, los incendios, por lo menos en Colombia, tienen principalmente un origen antrópico que de acuerdo con las cifras reportadas en el Protocolo Nacional de Prevención, Control de Incendios Forestales y Restauración de Áreas Afectadas (PNPCIFRA) (MAVDT, 2012), asciende al 95% del total de eventos reportados.

Dentro de las funciones del PNPCIFRA se incluyó definir lineamientos para la presencia y control de incendios forestales y estrategias para su aplicación a nivel regional y local, así como determinar la estructura y funcionalidad de un sistema operativo para la prevención, detección y atención de incendios forestales, mediante el desarrollo de conceptos, metodologías, técnicas y el conocimiento de la infraestructura, equipo y demás elementos que permitan prever, atender, controlar y evaluar las conflagraciones forestales en el país.

El IDEAM realiza seguimiento y monitoreo de los incendios de la cobertura vegetal, cuenta con actualizaciones y mejoras de los modelos y aplicativos conceptuales e informáticos que permiten el análisis de la información de las variables en tiempo real con mayor cobertura espacial y temporal, para la emisión de alertas tempranas.

En 2009, el IDEAM con apoyo de CONIF elaboró el mapa de zonificación de riesgo con el objetivo de usarlo como marco de referencia de áreas prioritarias para la gestión. A partir de este mapa, en 2010 el IDEAM desarrolló el protocolo para la realización de mapas de zonificación de posibilidad de incendio de la cobertura vegetal a escala 1:100.000 con el fin de guiar y dar un marco de referencia a los entes regionales y locales encargados de la gestión del riesgo para hacer análisis estandarizados y resultados comparables entre sí (Consultado en: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/zonificacion-del-riesgo-a-incendios>. IDEAM, 2011)

EVALUACIÓN DEL RIESGO POR INCENDIOS DE LAS COBERTURAS VEGETALES EN COLOMBIA

En Colombia, el IDEAM cuenta con un marco de referencia para realizar análisis estandarizados y resultados comparables entre sí para el riesgo por incendios de la cobertura vegetal (IDEAM, 2011), el cual se desarrolló con base en la metodología usada para elaborar el mapa de zonificación de riesgo por incendio de la cobertura vegetal a escala 1:100.000.

La metodología se basa en información como bases de datos de áreas afectadas por incendios forestales, de la cartografía de los

factores de riesgo (amenaza, vulnerabilidad) y de la cartografía de las áreas quemadas. En la metodología se consideran como mínimo dos escenarios posibles (condiciones normales y condiciones bajo el Fenómeno de El Niño) que responden a temporadas climáticas y meteorológicas de gran impacto y que influyen significativamente en la ocurrencia de este tipo de eventos.

Para definir el riesgo se obtiene cada una de sus componentes, la amenaza y la vulnerabilidad. Estos se obtienen a través de una metodología paramétrica, con enfoque espacial basada en la ponderación y calificación secuencial de los diversos factores y variables normalizados generadores de la amenaza y la vulnerabilidad.

La evaluación de la amenaza se realiza a partir de la zonificación y calificación de factores propios del territorio (*Figura 24*): *i)* susceptibilidad de la cobertura vegetal: se obtiene mediante la identificación y valoración de la condición pirogénica de la vegetación con base en el modelo de combustibles propuesto por Páramo (2007), *ii)* factores climáticos que influyen sobre la humedad y cantidad de combustible presente, *iii)* factores de relieve que influyen en la propagación del fuego de acuerdo con las posiciones topográficas, *iv)* el factor histórico refleja la frecuencia de eventos en el área, y *v)* la accesibilidad da cuenta de la probabilidad de que la población pueda llegar a áreas forestales y generar focos de incendios.

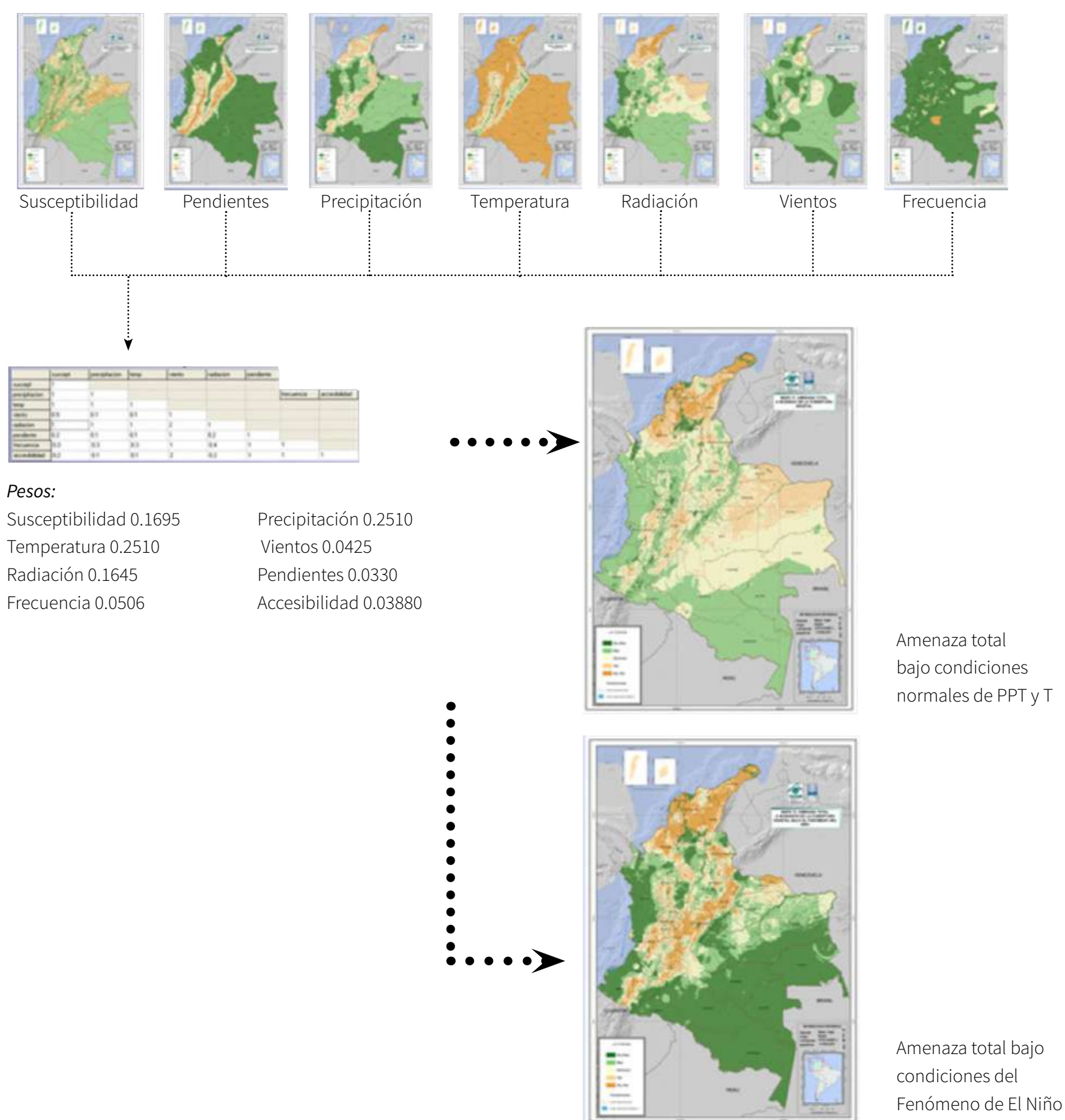


Figura 24. Factores considerados para la evaluación de la amenaza de incendios de la cobertura vegetal en condiciones normales y en condiciones con Fenómeno de El Niño (Páramo, 2007)

Para la componente de vulnerabilidad ante incendios forestales se considera la población, los valores de protección de infraestructuras e instalaciones, las actividades económicas, el patrimonio natural, histórico y cultural y la acción institucional, así como algunos aspectos territoriales. A partir de la información cartográfica temática se realizan las reclasificaciones, normalizaciones de variables, ponderaciones y calificaciones (Figura 25).

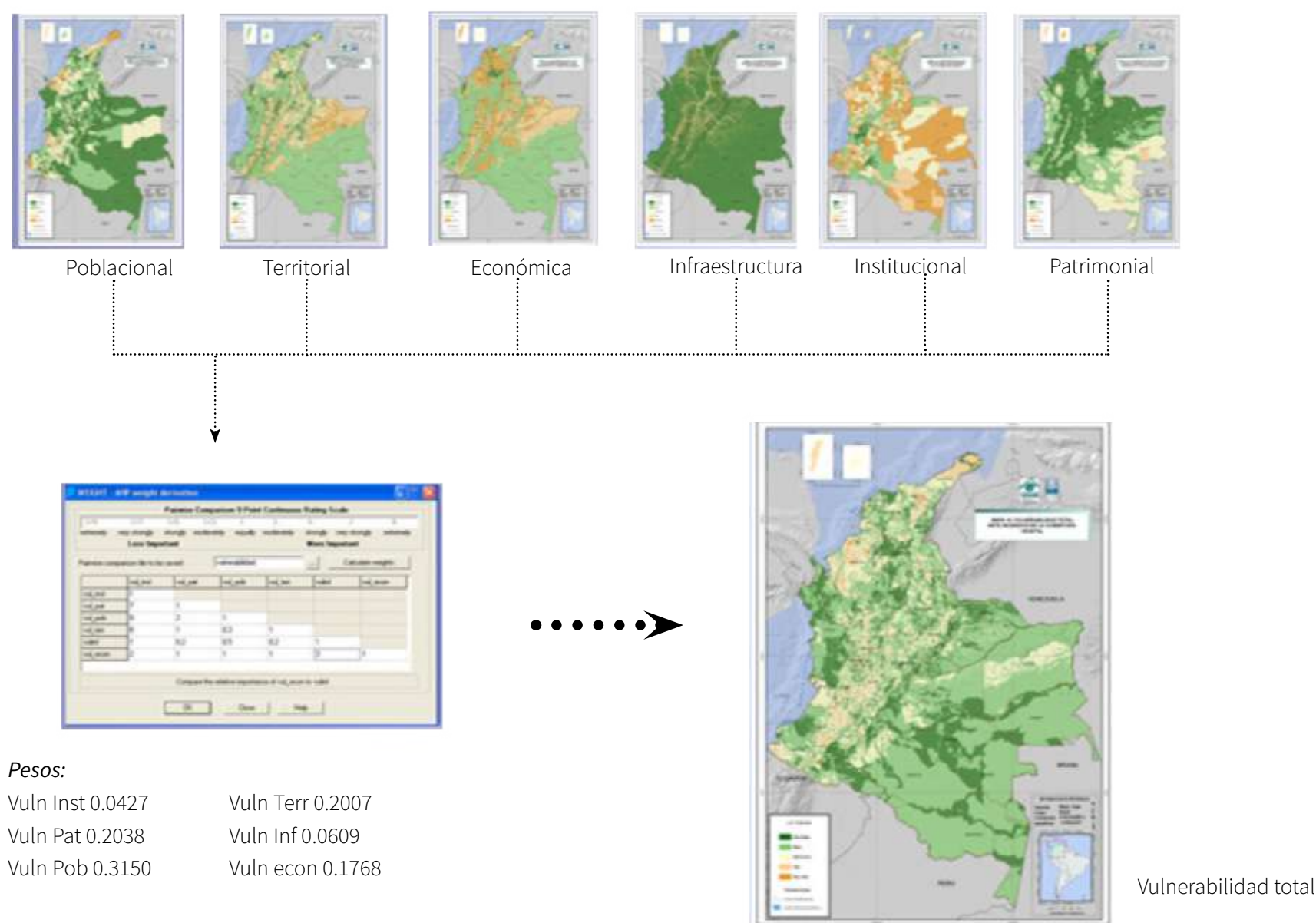


Figura 25. Factores considerados para la evaluación de la vulnerabilidad a incendios de la cobertura vegetal (Páramo, 2007)

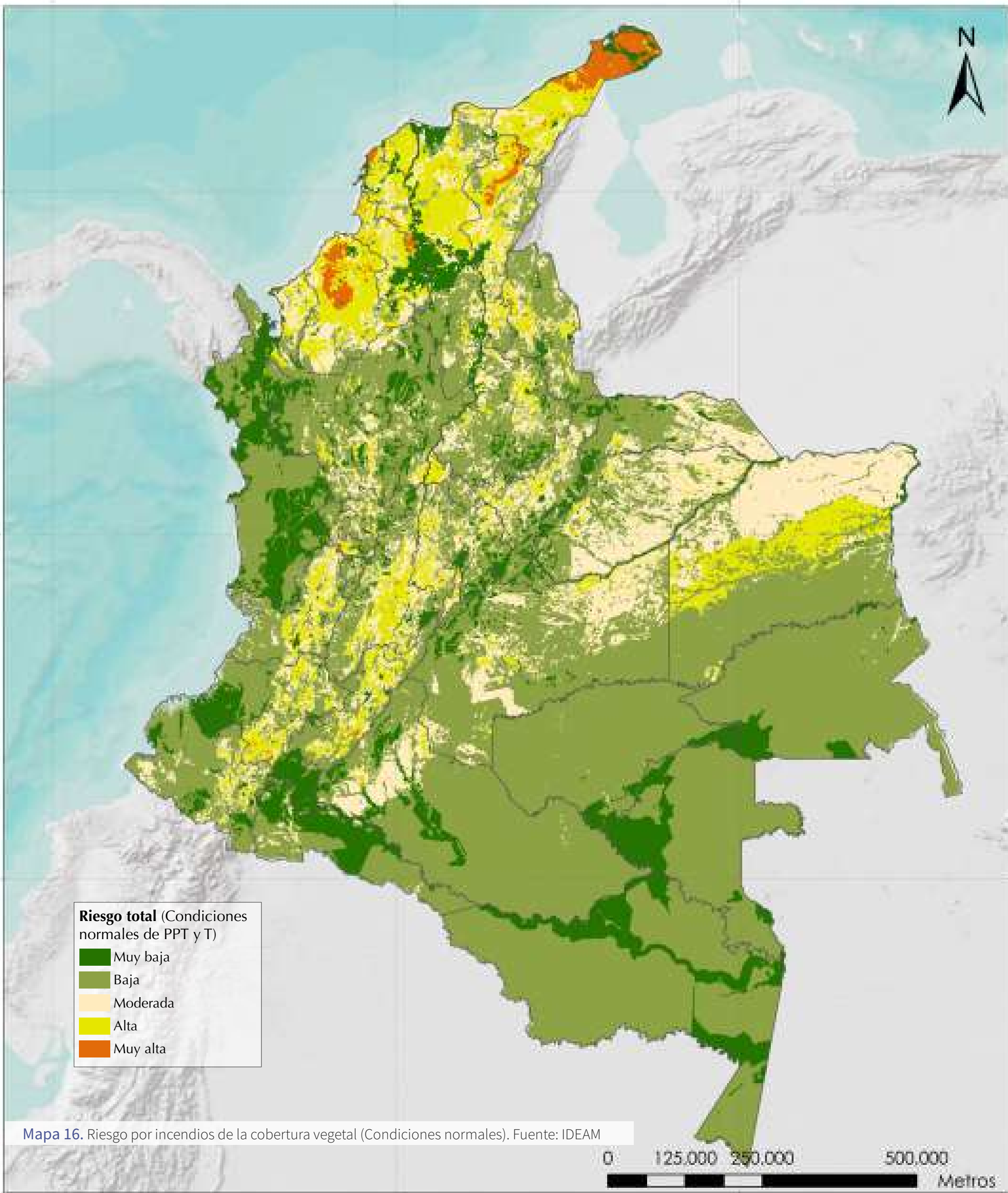
Finalmente se obtiene el riesgo como la probabilidad de que se presenten consecuencias o daños. El riesgo por incendios de las coberturas vegetales se obtiene de la interacción de los elementos dinámicos y cambiantes que constituyen la amenaza y la vulnerabilidad. La cartografía del riesgo define los escenarios existentes, es decir, los tipos de amenaza y vulnerabilidad

pueden especificar posibles escenarios y con ello diferentes aportes dentro de una gestión urbana y de riesgo.

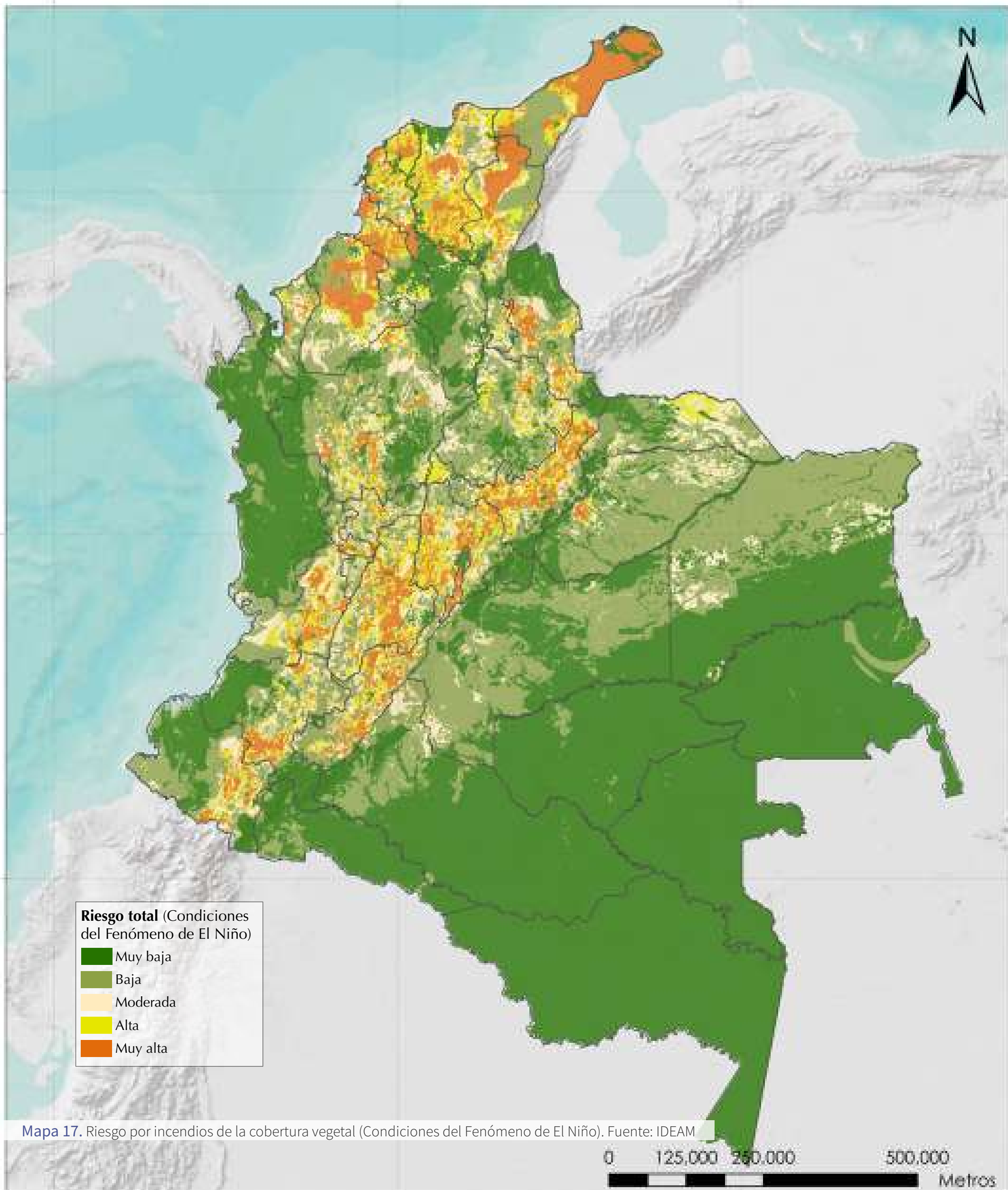
El riesgo por incendios de la cobertura vegetal tanto para condiciones normales de precipitación y temperatura como para condiciones del Fenómeno de El Niño se obtienen también teniendo en cuenta los

factores mencionados anteriormente en la situación de déficit de lluvia que caracteriza El Niño en Colombia.

Los *Mapas 16 y 17* presentan el riesgo por incendios de la cobertura vegetal en Colombia, resultado de la aplicación de la metodología (IDEAM, 2011).



Mapa 16. Riesgo por incendios de la cobertura vegetal (Condiciones normales). Fuente: IDEAM



Mapa 17. Riesgo por incendios de la cobertura vegetal (Condiciones del Fenómeno de El Niño). Fuente: IDEAM



2.7. Amenazas tecnológicas

Las amenazas tecnológicas o amenazas de origen antropogénico están relacionadas con la probabilidad de fallas, accidentes o eventos generados durante el desarrollo de procesos industriales, fallos de infraestructura o de ciertas actividades humanas como el transporte. Las fallas tecnológicas también pueden generarse como resultado de la ocurrencia de eventos de origen natural como sismos, tsunamis, ciclones, inundaciones entre otros, así como también un evento tecnológico peligroso puede generar otros eventos en forma concatenada o en cascada.

Las amenazas relacionadas con el del transporte comprenden accidentes en carreteras, aéreos, marítimos o ferroviarios, fallas en los sistemas de transporte o interrupciones del sistema o algún impedimento para la realización

de viajes. Las amenazas que se derivan de la infraestructura de servicios o líneas vitales incluyen fallas eléctricas, en los sistemas de telecomunicaciones, de redes informáticas, de acueductos, de alcantarillados, poliductos, líneas de gas, falla de presas, o la escasez de comida, sobrecarga en los servicios de salud pública, etc. Y las amenazas de origen industrial están relacionadas con procesos industriales donde se pueda presentar la pérdida de contención de sustancias peligrosas (derrames escapes, incendios o explosiones), fugas de material radioactivo, accidentes en minería (extracción de materiales), incendios y fallas estructurales, entre otros.

La materialización de este tipo de amenazas puede causar muerte o lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad

social y económica o degradación ambiental. Los peligros relacionados con los eventos tecnológicos se clasifican de acuerdo con su origen y a las categorías de actividades relacionadas con su uso o acceso a la tecnología. La *Tabla 1* presenta un resumen de los elementos relacionados con las amenazas y el riesgo tecnológico.

Para prevenir la ocurrencia de este tipo de eventos o para mitigar sus consecuencias, se implementan controles físicos y de gestión tales como diseños apropiados en equipos, mantenimiento, guía de procedimientos de operación o uso, capacitación, disponibilidad de equipos de seguridad activa y pasiva, entre otros. Los tipos de eventos que pueden ocurrir derivados de la falla, inexistencia o uso inapropiado de controles del peligro o amenaza son los que se presentan en la *Tabla 2*.

Tabla 1. Resumen de elementos relacionados con el riesgo tecnológico.
 Fuente: UNGRD, 2018.

RIESGO TECNOLÓGICO		
Peligros	Según el origen	Químico
		Biológico
		En radiación
		Eléctrico
		Mecánico
		En tecnología de información
		En estructuras
		Otros
	Según la categoría de actividad	Domésticas y servicios profesionales individuales
		Comercio, servicios y venta directa
		Producción industrial y almacenamiento
		Producción de energía eléctrica
		Exploración y extracción de recursos mineros
		Exploración y producción de hidrocarburos
		Transporte
		Recuperación, tratamiento y disposición de desechos
		Lugares de interés deportivo, cultural o religioso
		Obras de interés nacional / territorial
		Factores condicionantes / Fallas en controles
Deficiencias en materiales de construcción		
Deficiencias tecnológicas		
Uso de sustancias peligrosas		
Fallas en la operación		
Fallas en el proceso		
Fallas de equipos		
Fallas de diseño		
Error humano		
Fenómenos naturales o socio naturales		
Actores externos		
Daños en la infraestructura		
Tipo de eventos	Derrame	
	Fuga	
	Incendio	
	Explosión	
	Accidentes de transporte	
	Colapso	
Efectos	Químicos o bioquímicos: • Tóxicos • Ecotóxicos	

Efectos	Físicos: • Térmicos • Mecánicos: - Sobrepresión - Proyectiles - Impacto • Colapso
Afectaciones sobre los elementos expuestos	Personas relacionas directa e indirectamente con la actividad
	Ambiente • Recursos naturales • Servicios ambientales
	Infraestructura • Bienes culturales • Infraestructura sectorial • Infraestructura pública y privada
	Recursos económicos

Tabla 2. Tipos de eventos tecnológicos. Fuente: UNGRD, 2018.

Tipo de evento	Definición	
Derrame	Perdida de contención accidental de una materia en estado líquido (UNGRD, 2017)	
Fuga	Pérdida de contención accidental de un material gaseoso o vapor (UNGRD, 2017). Incluye los agentes biológicos liberados accidentalmente o de manera no controlada	
Incendio	Oxidación exotérmina rápida de un material combustible en estado de ignición. El material se puede encontrar en estado sólido, líquido o vapor (Crowl, 2002)	
Explosión	Es una súbita liberación de gas a alta presión en el ambiente. Según su naturaleza las explosiones se pueden clasificar en físicas y químicas (Chemical Process Safety 2nd Edition & Crowl, 2002)	
Accidentes en transporte	Accidentes tecnológicos de transporte en los que están involucrados medios de transporte mecanizados. Incluye accidentes de transporte aéreo, fluvial, marítimo, terrestre y por ductos (IFCR, 2017)	
Colapso	Cualquier condición externa o interna que incapacita a una estructura o elemento estructural a cumplir la función para la que ha sido diseñado, provocando la incapacidad de su función, pérdida de estabilidad y destrucción (Parro, 2017)	

AMENAZA TECNOLÓGICA EN COLOMBIA

En Colombia, de acuerdo con el análisis de eventos de origen tecnológico ocurridos entre 1998 y 2017, correspondiente a 3.466 eventos, los eventos de mayor frecuencia son los incendios seguidos por colapsos, explosiones, derrames y fugas (Visor de Emergencias de la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres). Según las actividades, los eventos se presentan con mayor frecuencia en actividades domésticas y servicios profesionales individuales, seguida de transporte, producción industrial y almacenamiento y comercio y servicios y venta directa. Los departamentos que mayor número de eventos han concentrado son Cundinamarca, Tolima, Antioquia, Quindío y Valle del Cauca (UNGRD, 2018).

En relación con los derrames de hidrocarburos, de acuerdo con la base de datos de la Agencia Nacional de Licencias Ambientales, ANLA, para el periodo 2004-2016, existió un aumento en el número de eventos hasta el año 2014 con una posterior disminución. Cerca del 49% de los derrames fueron causados por acciones de terceros, alrededor del 40% por falla técnica o mecánica y un menor número por accidentes de transporte y eventos de origen natural o socio-natural (NaTech).

Para los derrames de hidrocarburos, el mayor número de eventos se ha registrado en Santander, Putumayo, Antioquia, Norte de Santander y Nariño.

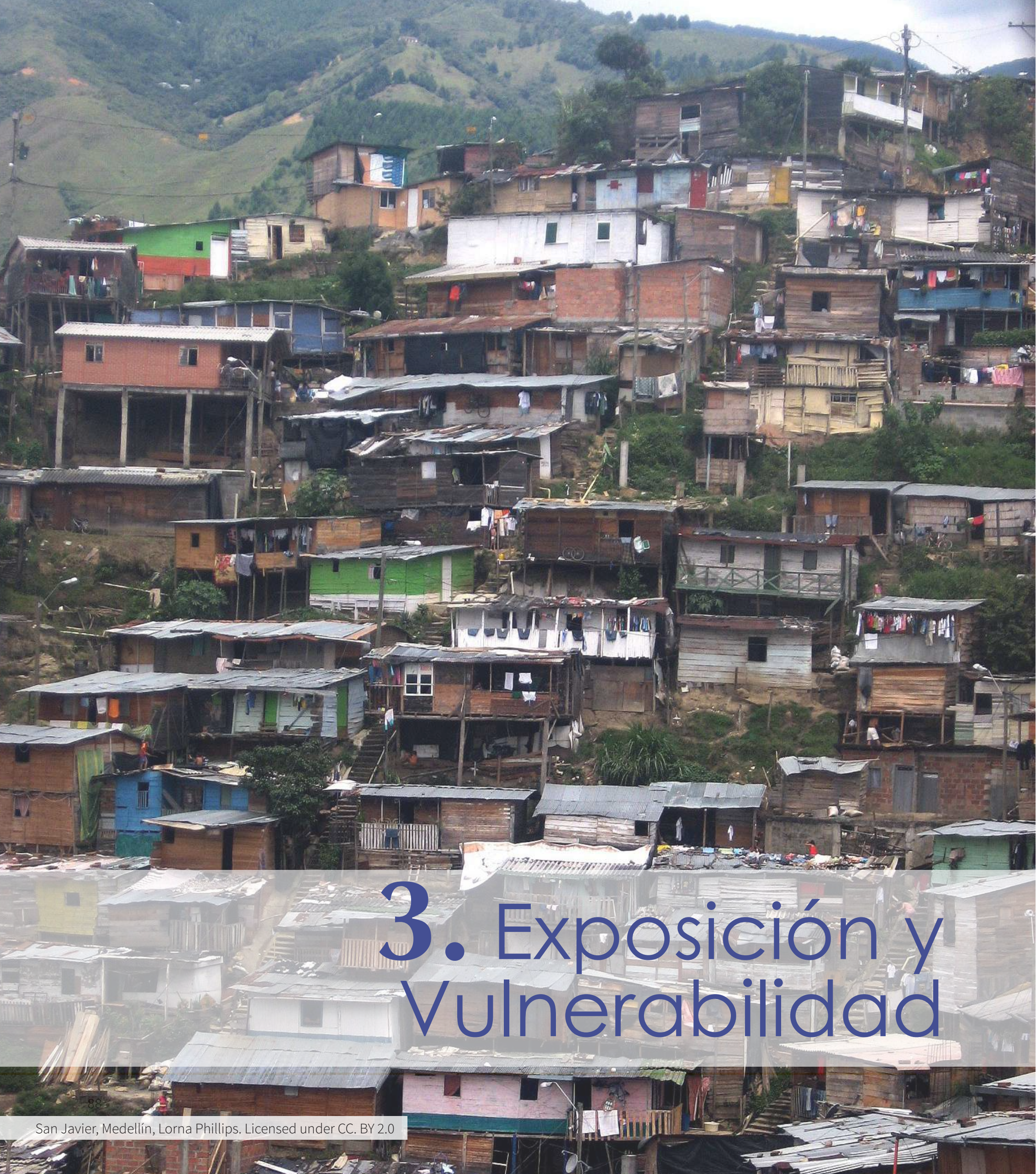
En el marco de la normativa referente a la gestión del riesgo tecnológico, en diciembre de 2017 se expidió el Decreto 2157 por medio del cual se adoptan directrices generales para la elaboración del Plan de Gestión del Riesgo de Desastres de las Entidades Públicas y Privadas (PGRDEPP) reglamentando el artículo 42 de la Ley 1523 de 2012.

Por otro lado, se desarrolló el Plan Nacional de Contingencia contra derrame de hidrocarburos, derivados y sustancias nocivas (PNC), reglamentado por el Decreto 321 de 1999. Este plan se activa como primera medida en el momento en que la “entidad responsable de la instalación, operación, dueño de la sustancia o actividad de donde se originó el derrame” activa su propio plan local de emergencias y reporta a las autoridades ambientales y entidades coordinadoras del SNGRD en los niveles municipal, departamental y nacional sobre el evento presentado. Asimismo, este decreto determina la responsabilidad directa del diseño de planes de contingencia por parte de las industrias, personas naturales y jurídicas, públicas o privadas

que manejen materiales peligrosos.

La actualización del plan se realiza de acuerdo a lo establecido en el artículo 4 del Decreto 321 de 1999, el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 y el Plan Nacional de Gestión del riesgo de Desastres 2015-2025, y es llevada a cabo por el Comité de Trabajo Interinstitucional para el Planteamiento de la Actualización del PNC conformado por la UNGRD, el Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Defensa, Ministerio de Transporte, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, ANLA, Agencia Nacional de Hidrocarburos – ANH, Dirección General Marítima- DIMAR y Armada Nacional.

Igualmente en el marco de adhesión del país a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, OCDE, se han establecido compromisos en el documento CONPES 3868 (DNP, 2016), política de gestión del riesgo asociado al uso de sustancias químicas, en donde uno de sus objetivos está orientado a establecer los elementos técnicos y normativos para la prevención de accidentes mayores asociados al uso de sustancias químicas.



3. Exposición y Vulnerabilidad



3.1. Exposición

En general los elementos expuestos son todo aquello que puede ser afectado cuando un evento intenso se presenta, como las personas, edificaciones, equipos, carreteras, cosechas o ganado, actividades económicas, industrias, etc. Infraestructuras, líneas vitales e instalaciones como escuelas, hospitales o templos también son elementos expuestos, al igual que los ecosistemas o el ambiente natural. Estos elementos no son fácilmente agrupables y en ocasiones deben tratarse como categorías separadas, considerando aspectos tangibles e intangibles de cada uno de ellos (PNUD, 1991)

La exposición, en el marco conceptual de la gestión del riesgo, se refiere entonces a elementos en riesgo; es decir, que pueden sufrir daños y pérdidas (UNISDR, 2009).

Identificar y caracterizar la exposición es un aspecto de especial importancia para la evaluación del riesgo, debido a que para que exista riesgo un activo (o un conjunto de activos) debe estar expuesto al menos a una amenaza. El desarrollo del inventario o de las bases de datos de exposición generalmente considera dos etapas: la identificación y la caracterización. La primera normalmente está relacionada con la selección de aquellos activos que pueden ser afectados y

su geolocalización, mientras que la segunda se refiere a la asignación de aspectos relevantes asociados con el tipo estructura y el valor económico (e.g. de reposición). Las características estructurales de cada elemento, incluidas en la base de datos de exposición, determinan su vulnerabilidad física y permiten la estimación de los niveles de daño y pérdidas.

El nivel de detalle de los inventarios y las bases de datos de exposición varía dependiendo no solamente de la información disponible, sino del propósito y objetivo de los análisis del riesgo, que pueden ser: de comparación entre regiones y países, para aumentar la conciencia acerca del riesgo, para establecer estrategias de gestión del riesgo a nivel nacional, para implementar planes específicos de medidas de intervención o reducción del riesgo, o para el diseño de instrumentos financieros de transferencia del riesgo a nivel local.

Por otro lado, para el análisis de riesgo urbano, generalmente se desarrollan bases de datos de exposición de alta resolución, en donde cada elemento individual es identificado y caracterizado. Para los análisis subnacionales se usan niveles de resolución más gruesos basados en datos de población

y conjunto de indicadores económicos que proporcionen un orden de magnitud de lo que está expuesto y su localización aproximada. De hecho, hay una relación estrecha entre la resolución de las bases de datos de exposición y la resolución de la amenaza, dado que una alta resolución de solo uno de estos aspectos no significa que los resultados de riesgo sean más consistentes y confiables.

Adicionalmente, la identificación y caracterización de los elementos expuestos está asociada con el para qué y para quién tendría relevancia la pérdida. Por ejemplo, los elementos expuestos en una evaluación del riesgo para el sector salud, son las edificaciones públicas de dicho sector, debido a que las pérdidas que se puedan presentar en ellas por la ocurrencia de fenómenos peligrosos serían de relevancia y responsabilidad de las instituciones de salud pública. Las viviendas de bajos recursos, por ejemplo, son una responsabilidad fiscal del Estado, debido a la inhabilidad de los propietarios de dichas viviendas de absorber una situación de desastre. Por lo tanto, es importante determinar para quién es relevante o para quién implica una responsabilidad que se presenten pérdidas y esto define la exposición o los elementos

expuestos. Por esta razón, es necesario que los elementos expuestos sean agrupados en portafolios y que el riesgo se evalúe por sectores.

EDIFICACIONES E INFRAESTRUCTURA

El modelo de exposición es el inventario de activos (edificios e infraestructura) que puede ser afectado por eventos que caracterizan alguna amenaza natural; es decir, el conjunto de elementos expuestos. Definir la exposición es esencial para el análisis del riesgo y el grado de precisión de los resultados depende de su nivel de resolución y detalle. Existen diferentes

niveles de resolución y cuando no existe información disponible suficientemente detallada, o una estimación detallada sobre una unidad administrativa completa (e.g. nivel nacional), es necesario llevar a cabo estimaciones aproximadas que den cuenta o representen el inventario de elementos expuestos. A esto usualmente se le denomina un proxy del modelo de exposición.

Para algunas amenazas se necesita siempre un mayor detalle o un mayor nivel de resolución, debido a que por su carácter puntual no es adecuado hacer evaluaciones gruesas o de áreas muy amplias. De igual forma a nivel local es deseable una

resolución edificio por edificio, lo que implica la identificación y caracterización individual de las edificaciones y por lo tanto construir una base de datos con cada una de ellas.

La *Figura 26* muestra el procedimiento general que se lleva a cabo para desarrollar un modelo simplificado (proxy) de los elementos expuestos para un país.

Como se puede ver, el modelo de exposición está basado en información oficial sobre los índices demográficos, económicos y sociales a nivel sub-nacional, que, combinados con estadísticas acerca de la distribución de los tipos constructivos, dan una idea de

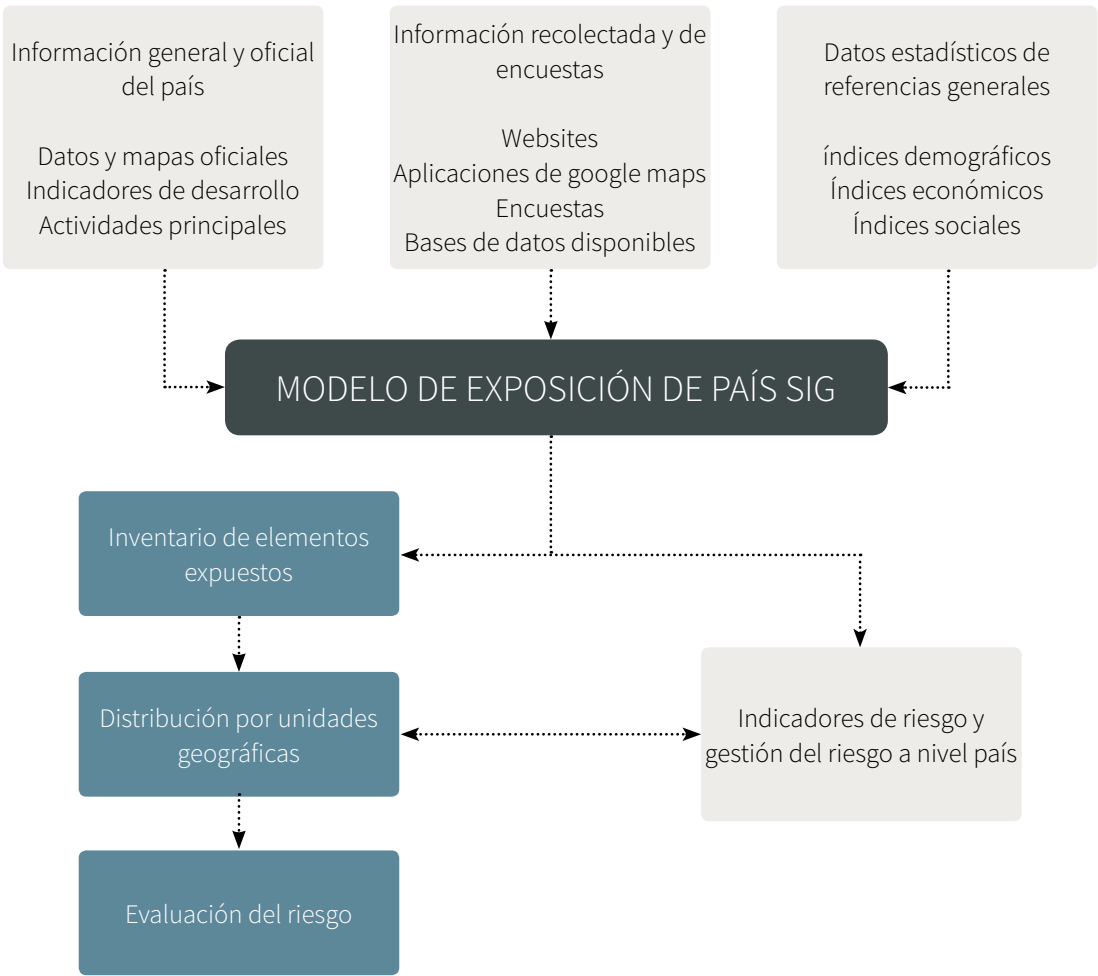


Figura 26. Procedimiento general para la creación de un modelo simplificado de elementos expuestos

qué y dónde se encuentran los activos y cuánto cuestan. En resumen, el principal objetivo del proxy de un país es generar una distribución geográfica adecuada para el inventario y de esta forma representar en términos generales la ubicación de los activos y la población.

Los activos diferentes a edificios regulares también se incluyen en la base de datos de exposición permitiendo la incorporación de infraestructura nacional y local como puentes, centrales eléctricas, puertos, aeropuertos y hoteles entre otros. Adicionalmente, dado que la información se clasifica por responsable o propietario (i.e. público, privado) y por sector (industrial, comercial, residencial, turístico), los resultados del riesgo también se pueden desagregar en dichas categorías; lo que es muy útil para el gobierno.

Cada uno de los elementos expuestos identificados e incluidos en la base de datos debe tener asociada una función de vulnerabilidad para las amenazas consideradas.

CULTIVOS

La evaluación económica de los cultivos propone la evaluación de los costos de producción estableciendo un valor de reposición para cada fase fenológicaⁱⁱⁱ. Los costos de producción de cultivos incluyen los gastos asociados con inversión de materia prima (semillas, fertilizantes, irrigación), trabajo y equipos. El valor de reposición de cada fase fenológica considera el costo de producción de la fase evaluada, los costos de producción de las fases previas y la utilidad que el agricultor hubiese recibido al final de la cosecha, la pérdida o

la ganancia (ver Figura 27). El último valor es el rendimiento de los cultivos multiplicado por el precio al consumidor del área sembrada. La producción, la materia prima y los costos de mano de obra deben ser obtenidos de fuentes oficiales, incluyendo agencias gubernamentales y organizaciones de productores.

Para cada porción del área cultivada, es necesario conocer el tipo de cultivo que crece en el área, su estacionalidad, vulnerabilidad y el valor económico de reposición mínimo. La información acerca del tipo de cultivo, la geometría de la tierra cultivada y su estacionalidad pueden ser obtenidos de censos nacionales o regionales, imágenes satelitales, informes del sector agrícola, autoridades locales y gremios.

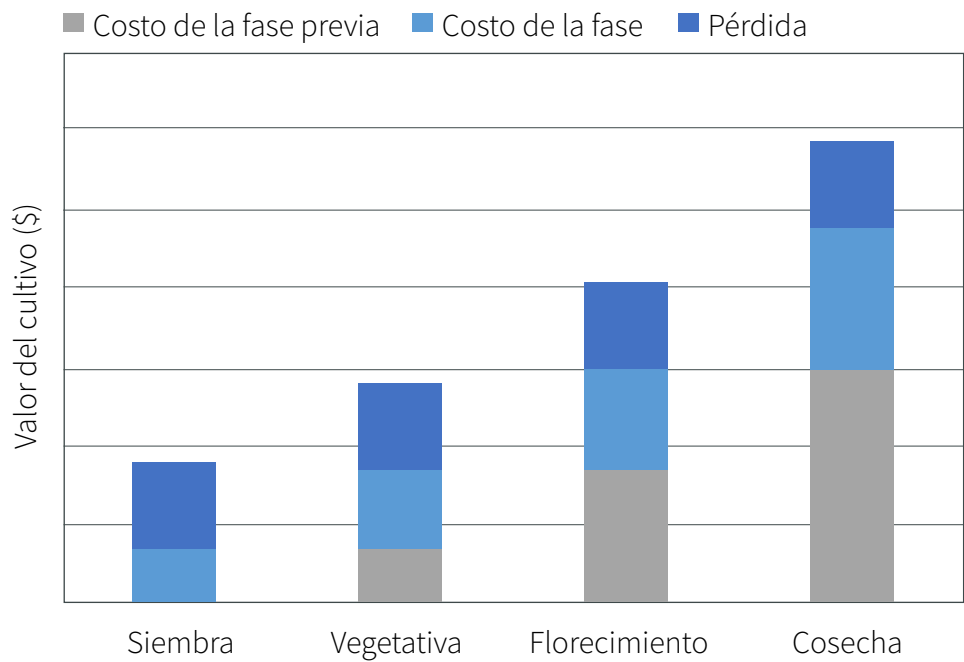


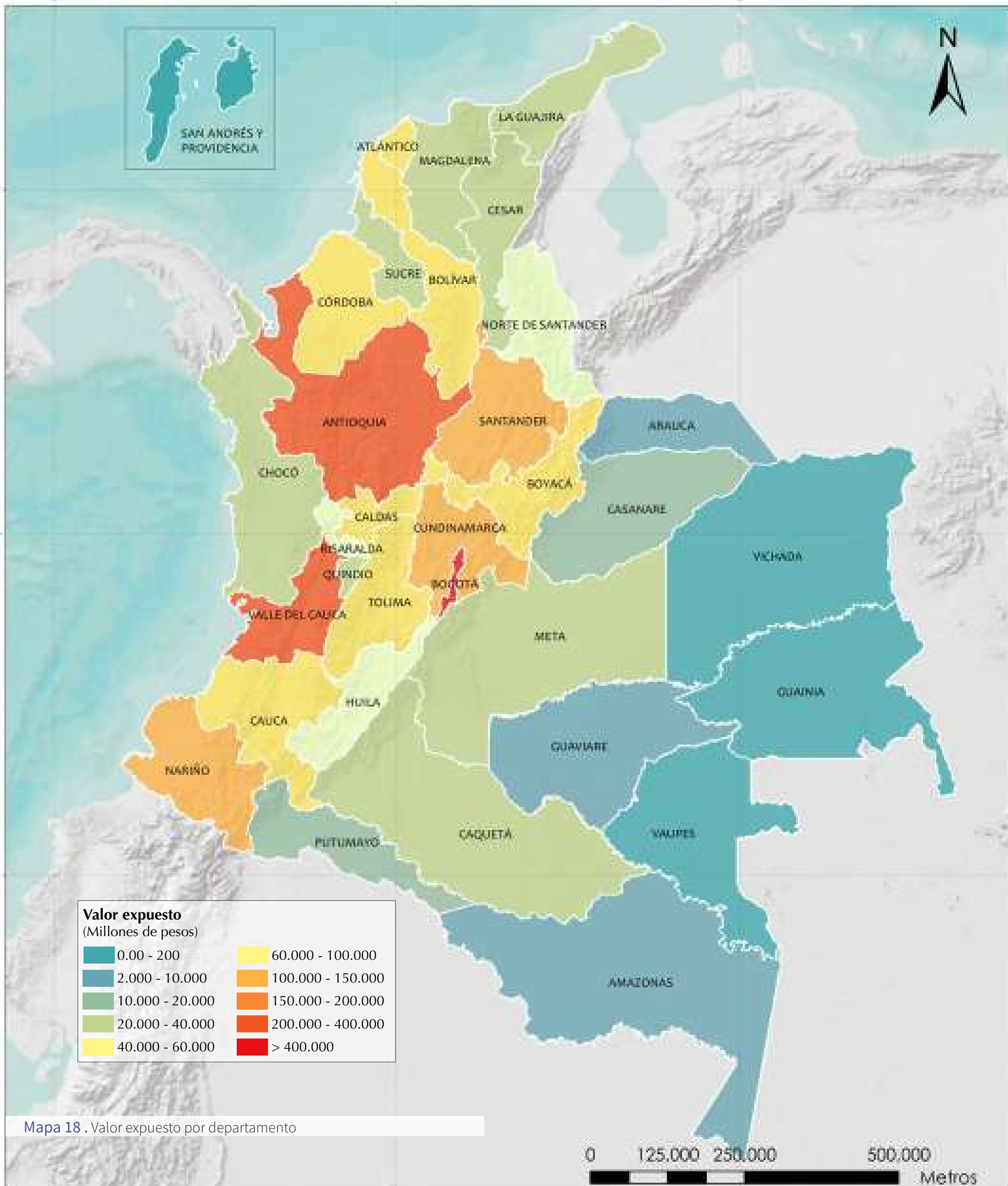
Figura 27. Cambio en la valoración del cultivo por fase de desarrollo del cultivo (Olaya, 2015)

EXPOSICIÓN PARA LA
EVALUACIÓN DEL RIESGO A NIVEL
DEPARTAMENTAL EN COLOMBIA

La evaluación probabilista del riesgo a nivel departamental en este documento se realizó para la amenaza sísmica, inundaciones, tsunamis en el Pacífico Colombiano y ciclones tropicales (viento y marea de tormenta) para el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina y el norte de Colombia. Para esta evaluación se tuvo en cuenta

información existente y se utilizó la base de datos de exposición construida para el GAR15 (UNISDR, 2015) que está basada en información de cobertura internacional relacionada con la distribución de la población, información socio-económica, tipos de edificaciones y datos del stock de capital con datos estadísticos a escala nacional y sub-nacional. Esta base de datos solamente considera los edificios públicos y privados ubicados en áreas urbanas y rurales y no se tienen en cuenta sectores

de infraestructura ni de agricultura. El *Mapa 18* presenta el valor expuesto por departamento. Para esta información se usaron fuentes abiertas de información con cobertura global y se complementó con información proporcionada por expertos (De Bono y Chatenoux, 2015; Pesaresi et al. 2014; Tolis et al. 2013). En el Anexo se explican los pasos del modelo de exposición utilizado.





3.2. Vulnerabilidad física de los elementos expuestos

La vulnerabilidad se puede entender como la susceptibilidad o predisposición de un elemento expuesto a sufrir afectación debido a su fragilidad o a su falta de capacidad para resistir la acción de un evento peligroso. Esta falta de capacidad depende de una serie de características específicas del medio ambiente construido, de la calidad de vida y de los medios de subsistencia de la gente que se encuentra en riesgo. La vulnerabilidad es un conjunto de características que definen las condiciones de inseguridad frente a una amenaza. La generación, acumulación y aumento de estas condiciones son el resultado de un proceso de largo plazo asociado con el desarrollo social, económico y el nivel de gobernanza logrado.

Desde el punto de vista físico, la vulnerabilidad está directamente relacionada con las características estructurales de cada activo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que dicha vulnerabilidad física es usualmente consecuencia de diferentes factores no físicos altamente relacionados con aspectos del desarrollo y que deben ser intervenidos, cuando es posible, con el fin de evitar la exacerbación de la vulnerabilidad y de esta forma el aumento o creación del riesgo.

Por otro lado, la vulnerabilidad es multidimensional; cada elemento, un edificio, una persona, una actividad podrían afectarse de forma diferente por amenazas de distintas intensidades. Mientras más severa sea la amenaza, mayor será el daño que se causa en cada elemento expuesto. Esta relación entre la severidad del evento peligroso y el nivel de daño que puede causar representa la relación de vulnerabilidad (PNUD, 1991).

En el marco de la evaluación probabilista del riesgo catastrófico, la dimensión física de la vulnerabilidad es la que primordialmente está sujeta a la modelación. La relevancia de este componente en el proceso de la evaluación del riesgo es evidente dado que relaciona la intensidad de la amenaza con los daños esperados y por lo tanto con las pérdidas que pueden presentarse. Existen diferentes procedimientos para cuantificar la vulnerabilidad física, pero en el estado del arte de la evaluación probabilista del riesgo, como se usa aquí, se requiere el uso de las funciones o curvas de vulnerabilidad que relacionan la intensidad con el daño que se deriva.

Existen diferentes aspectos relacionados con la vulnerabilidad de un activo expuesto,

como sus características estructurales, el código de construcción utilizado, o los niveles de cumplimiento de sus requerimientos. Por esta razón, a cada tipo estructural se le asigna una función de vulnerabilidad específica de acuerdo con la combinación de dicha información y para cada amenaza considerada. Dado que la intensidad es un nivel físico de la severidad de los eventos que caracterizan una amenaza, la intensidad se usa en las funciones de vulnerabilidad para asociarla al daño o pérdida esperada. Ejemplos de ese tipo de intensidades son la aceleración espectral para el caso de los terremotos, la velocidad del viento para ciclones, la profundidad o la velocidad del agua para inundaciones, el espesor de ceniza para erupciones volcánicas y la altura de la ola de inundación para la marea de tormenta y el tsunami.

Muchos factores pueden influenciar el daño y la pérdida de los elementos expuestos, como las diferentes prácticas constructivas, los materiales y, en el caso de terremotos, a los efectos de sitio. La relación de daño para cada intensidad de cada amenaza no corresponde a un valor único, sino que es tratada como una variable aleatoria que considera la distribución de las posibles

pérdidas. En otras palabras, es necesario que cada función se defina en términos

del valor esperado y la varianza, como se muestra esquemáticamente en la *Figura 28*.

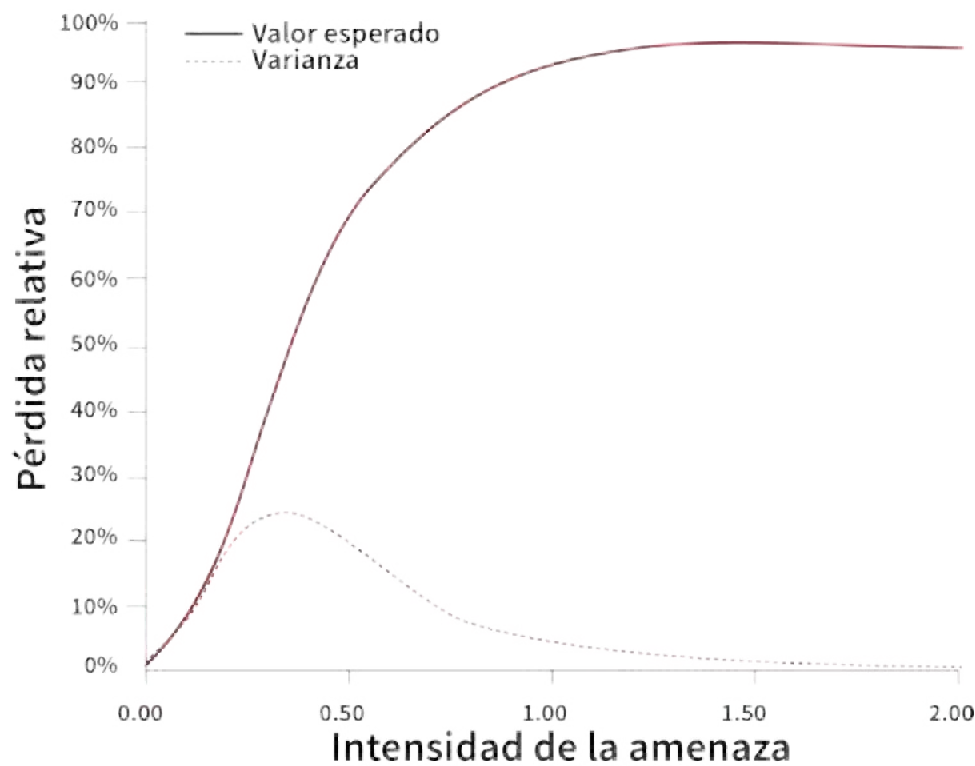


Figura 28. Función de vulnerabilidad en términos del valor esperado y la varianza

En resumen, las funciones de vulnerabilidad caracterizan el nivel de capacidad de cada elemento frente la acción de eventos peligrosos. Estas no solamente proporcionan una representación cuantitativa, objetiva y continua de los niveles de pérdida sino una representación probabilista. Cada función define una distribución de probabilidad de la pérdida relativa (relación de daño medio) para un activo dado como función de una intensidad de la amenaza; que al mismo

tiempo se considera es la que mejor se correlaciona con el daño.

Existen diferentes conjuntos de funciones de vulnerabilidad considerando diferentes prácticas constructivas. Grupos de expertos definen las funciones de vulnerabilidad teniendo en cuenta todas las amenazas a considerar.

Las *Figuras 29 y 30* presentan ejemplos de

funciones de vulnerabilidad para diferentes amenazas. En estas figuras se puede observar que para niveles de intensidad bajos (cerca de cero) no existe daño, pero el daño aumenta en la medida que la intensidad de la amenaza aumenta. El punto de mayor incertidumbre o la mayor variabilidad de la pérdida está generalmente localizada cerca al 50% de la pérdida, pero esta no es la regla general.

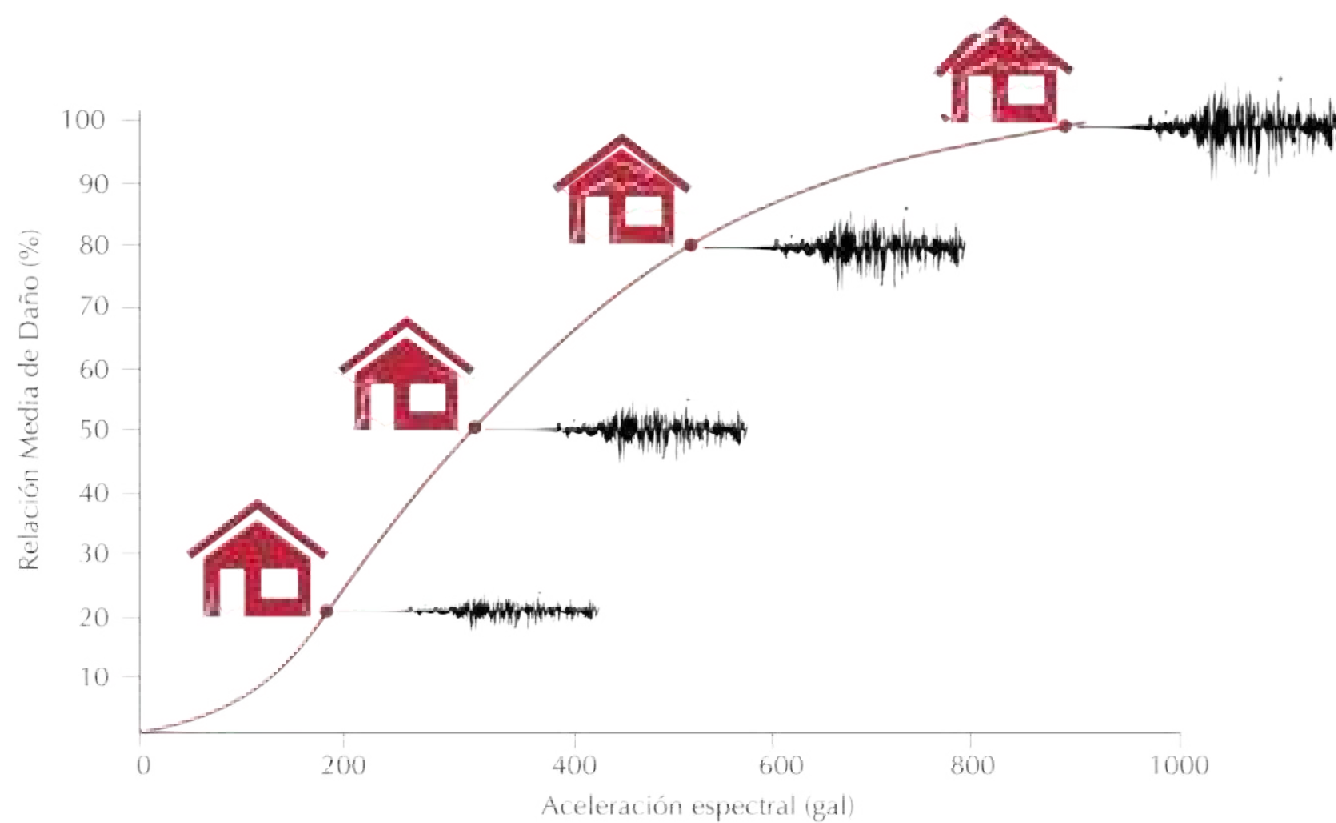


Figura 29. Esquema de función de vulnerabilidad debido a terremotos

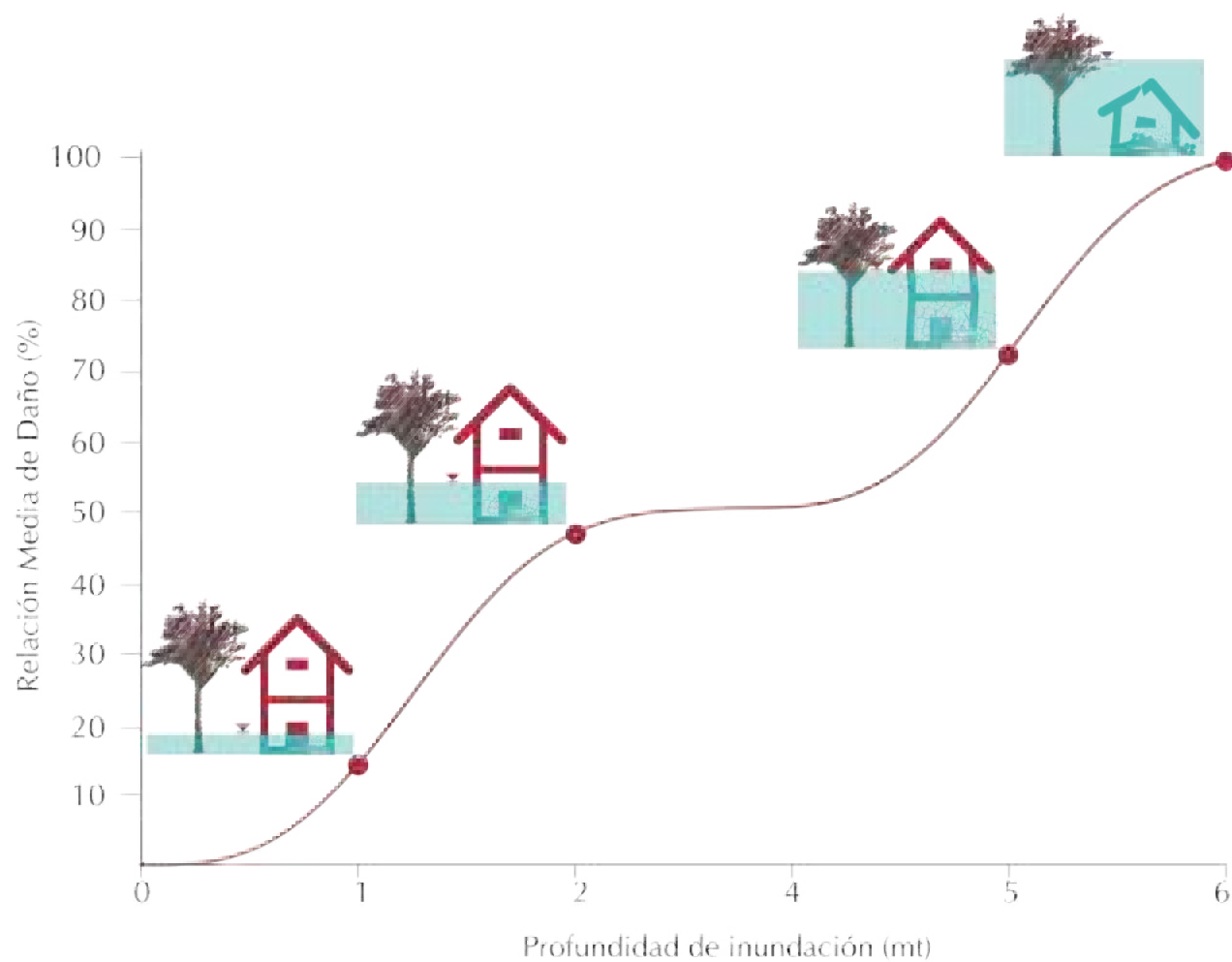


Figura 30. Esquema de función de vulnerabilidad debido a inundaciones

VULNERABILIDAD DE CULTIVOS

La vulnerabilidad de cultivos está relacionada con la pérdida de rendimiento sufrida por un cultivo durante un periodo extendido de escasez de agua (FAO's *Irrigation and Drainage Paper No. 66 Crop yield response to water* by Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012), lo que significa que los modelos de vulnerabilidad son diferentes para cada tipo de cultivo y son independientes de la ocurrencia y frecuencia de la amenaza (Quijano et al. 2015).

En el enfoque de la FAO (Steduto et al. 2012), la respuesta de la producción de cultivos al agua se evalúa con base en parámetros que describen los procesos internos de la planta, su interacción con el suelo y los sistemas de aire en dos etapas: 1) producción bajo condiciones óptimas, sin límites de nutrientes ni recursos hídricos de la planta, y 2) producción bajo condiciones

de estrés hídrico. La metodología calcula la biomasa del cultivo basada en la cantidad de agua transpirada y la producción del cultivo como la proporción de biomasa que va a las partes cosechables de la planta. Los principales componentes del modelo son el clima (temperatura, precipitación, demanda evaporativa y concentración de dióxido de carbono), cultivos (desarrollo, crecimiento y procesos de producción), suelo (balance de agua y sal) y manejo de cultivos (prácticas agrícolas). Cada componente se explica con detalle en el Manual de la FAO (Steduto et al. 2012). Algunas de las características del modelo que son de interés para la evaluación del riesgo por sequía son:

- Relación proporcional entre estrés hídrico y producción reducida de biomasa. En consecuencia, la producción reducida de biomasa está relacionada con la reducción en la producción y las pérdidas económicas

asociadas con la amenaza de sequía.

- Esto incluye el efecto de las anomalías de la humedad del suelo y la respuesta fisiológica de los cultivos a déficits hídricos, parámetros no incorporados en la evaluación de la amenaza.
- El modelo calcula la producción de biomasa en una escala de tiempo diaria para representar mejor las dinámicas de la respuesta de los cultivos al agua en diferentes etapas de crecimiento. Esta característica es conveniente dado que los parámetros climáticos usados para calcular la amenaza de sequía también tienen una escala de tiempo diaria.
- Como la producción de biomasa es calculada de series de precipitación y temperatura, el modelo puede introducir el efecto de escenarios de cambio climático. Este incluye a concentración del dióxido de carbono en la atmósfera.

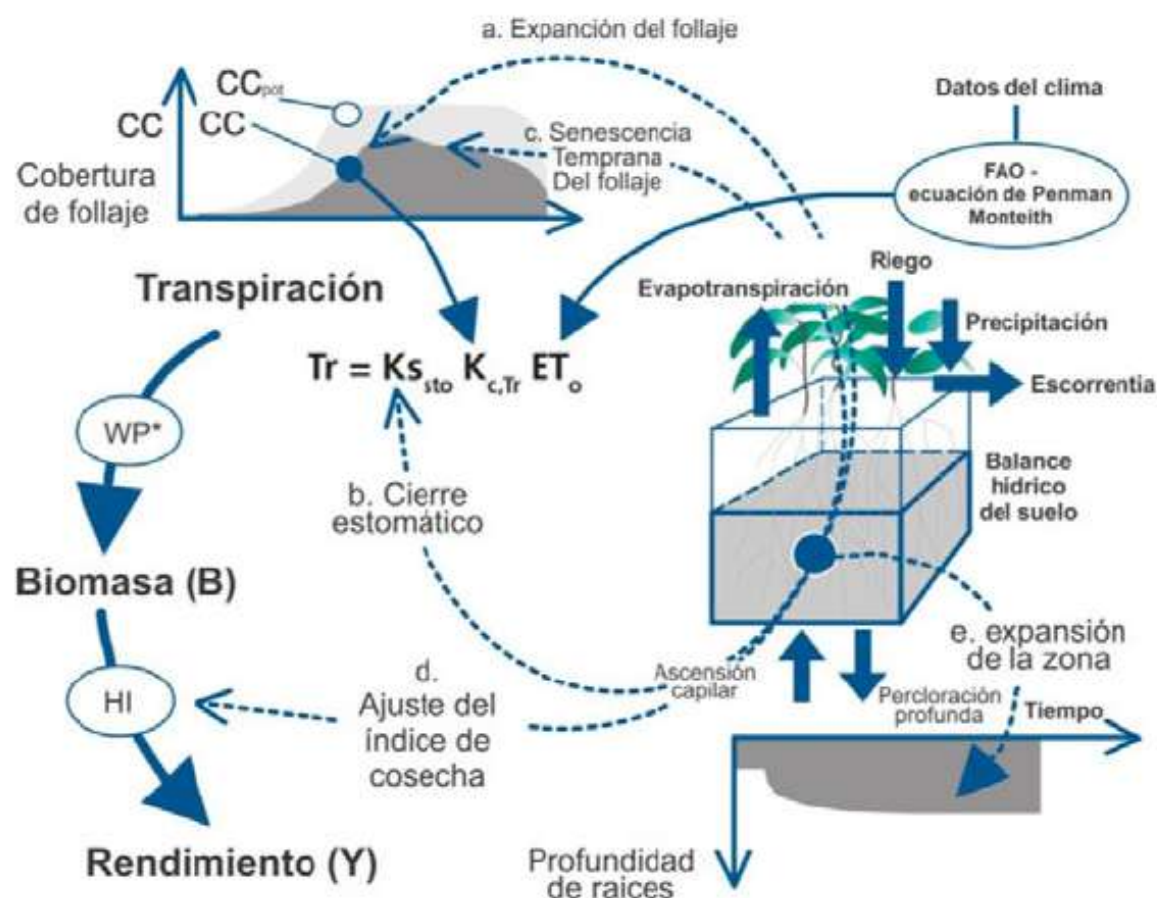


Figura 31. Representación esquemática de la respuesta del cultivo al estrés hídrico (Figura 1.2 en Raes et al. 2011, Capítulo 1)

En general, el modelo de estrés hídrico estima los impactos de la falta de agua en el crecimiento del follaje, conducción de estomas, senescencia del follaje, profundidad de las raíces e índice de cosecha. Considera el proceso completo de cómo los cultivos crecen y se desarrollan en su ciclo de crecimiento específico, crecimiento del follaje, profundidad de sus raíces y acumulación de biomasa cuando el agua se transpira. Todas las etapas de crecimiento o fenológicas son consideradas en el modelo (vegetativo, florecimiento, formación de la producción y maduración), incluyendo diferentes etapas fenológicas para los cultivos herbáceos o forraje. La *Figura 31* muestra los 5 procesos afectados por el estrés hídrico, cabe anotar que todos los procesos mencionados son calculados en series de tiempo diarias. Para mayores detalles ver el Manual de Referencia AquaCrop ((Raes, Steduto, Hsiao, & Fereres, 2011; Steduto et al. 2012).

ASPECTOS SOCIALES

El impacto social, es una función de la capacidad de prever, enfrentar y recuperarse de eventos críticos que implican la pérdida de activos materiales o inmateriales

(UNGRD-IEMP, 2017). Una persona puede ser más o menos vulnerable ante la ocurrencia de eventos críticos externos dependiendo de cómo el individuo administre sus activos tangibles e intangibles, y cómo estos pueden verse afectados ante la ocurrencia de un desastre. La vulnerabilidad social entonces, va más allá de las estructuras físicas, e incluye las diferentes características y capacidades de los individuos.

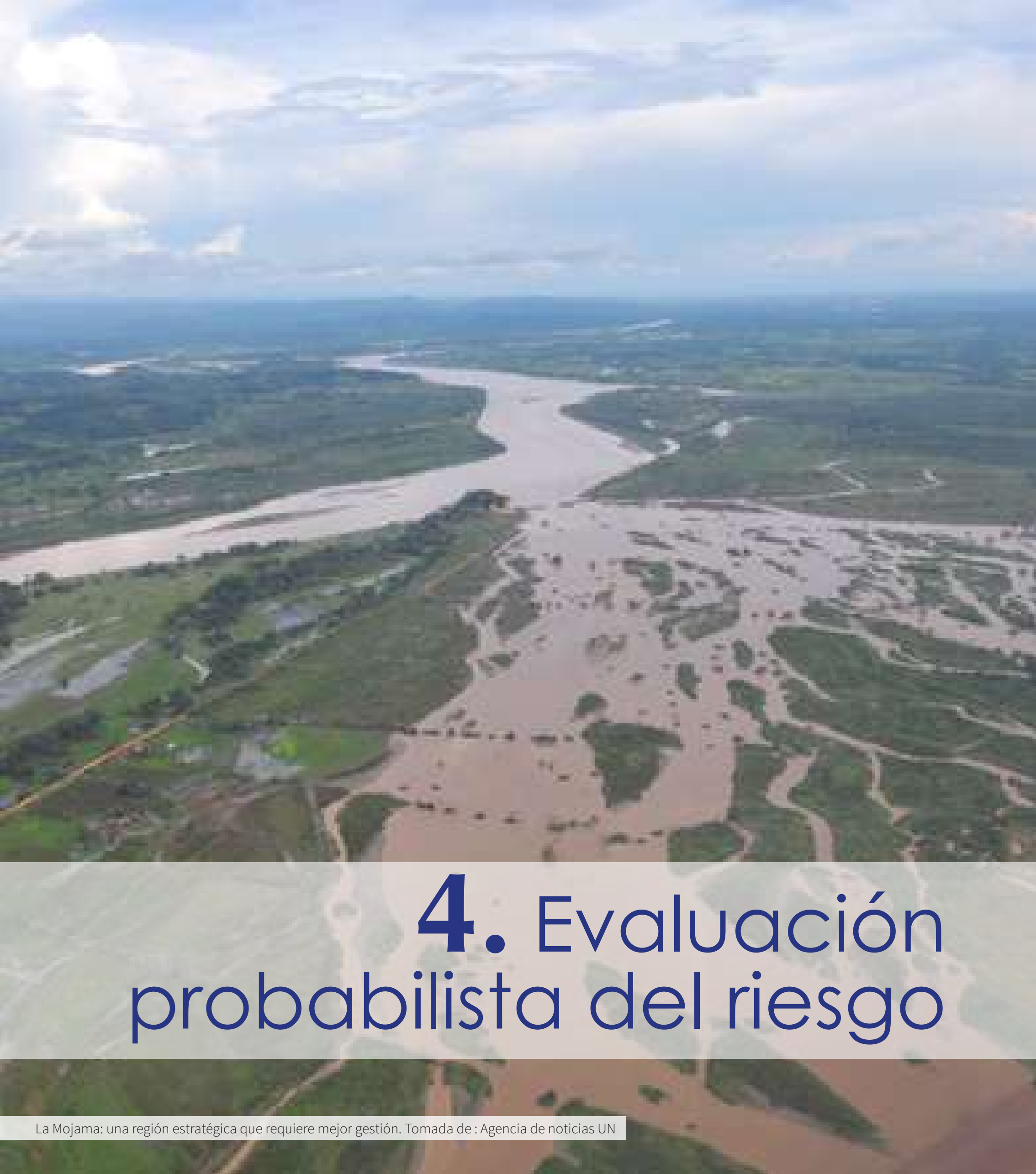
Para analizar la vulnerabilidad y específicamente la dimensión social, la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres y el Instituto de Estudios del Ministerio Público, han desarrollado el documento “Lineamientos para el análisis de la vulnerabilidad social en los estudios de la gestión municipal del riesgo de desastres”. Se hace énfasis en este componente por su carácter transversal que comprende todo el ciclo de la gestión del riesgo de desastres. A partir de su análisis se pueden generar escenarios de situación e intervenciones sociales, conocer la manera como el riesgo se presenta y distribuye en el territorio, quiénes son los más expuestos a las amenazas y los más vulnerables (UNGRD-IEMP, 2017). Dicho documento contiene conceptos, herramientas de participación

social y orientaciones para la consolidación de diagnósticos, referidos a los análisis de la vulnerabilidad social.

VULNERABILIDAD PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO A NIVEL DEPARTAMENTAL EN COLOMBIA

Para la evaluación probabilista del riesgo a nivel departamental en Colombia, que se presenta en esta publicación, la vulnerabilidad considerada es aquella relacionada con las funciones de vulnerabilidad física, las cuales están asociadas a la base de datos de exposición descrita anteriormente (UNISDR, 2015, Cardona et al. 2015). Se asignan funciones de vulnerabilidad a cada uno de los elementos expuestos y para cada una de las amenazas consideradas. Los aspectos sociales se tienen en cuenta utilizando un enfoque holístico del riesgo, mediante la amplificación o agravamiento del riesgo físico dependiendo de las fragilidades sociales y la falta de resiliencia del contexto en el que pueden ocurrir los daños o pérdidas.





4. Evaluación probabilista del riesgo



4.1. Riesgo

Entender la configuración del riesgo es un paso importante para hacerle frente reduciéndolo, previniéndolo o atendiendo la situación una vez se materializa. Cuando se conocen los factores que determinan el riesgo es posible tomar medidas para su gestión. La manera de entenderlo e identificarlo es cuantificándolo, y la precisión de su estimación depende del estado del conocimiento de los factores que lo componen (fenómenos naturales, exposición, vulnerabilidad asociada a los elementos expuestos) y de la calidad de la información disponible; a mayor información detallada sobre eventos ocurridos, mayor facilidad de cuantificar el riesgo. Para el riesgo por eventos menores y recurrentes, como inundaciones o deslizamientos, como han sucedido con mayor frecuencia, es posible contar con un alto número de registros de sus acontecimientos y consecuencias, mientras que el riesgo por eventos menos frecuentes, como los sismos o tsunamis, en donde eventos de cierta severidad no han ocurrido

aún, su baja frecuencia no permite tener información suficiente de su ocurrencia y, por lo tanto, debe ser estimado de manera probabilista (PNUD, 1991).

Si bien el riesgo puede ser evaluado tanto retrospectiva como prospectivamente, debido a la escasa información disponible sobre eventos ocurridos los enfoques clásicos actuariales resultan insuficientes para la correcta cuantificación del riesgo. Por lo tanto, la evaluación del riesgo se debe realizar con un enfoque prospectivo a través de la construcción de modelos probabilistas basados en los registros de eventos ocurridos.

Para evaluar el riesgo se deben considerar tres componentes, ninguno de los cuales puede definirse sin la existencia de los otros dos (UNISDR, 2009):

- Amenaza: fenómeno, sustancia, actividad humana o situación peligrosa que puede causar la muerte, lesiones

u otros impactos sobre la salud, daños materiales, pérdida de los medios de vida y servicios, interrupción de la actividad social y económica, o degradación ambiental.

- Exposición: personas, infraestructura, viviendas, sistemas u otros activos humanos tangibles ubicados en zonas de amenaza sujetos, por lo tanto, a pérdidas potenciales.
- Vulnerabilidad: las características y circunstancias que hacen susceptible a una persona, comunidad, bienes o sistemas a los efectos de las amenazas.

Las *Figuras 32 y 33* presentan las componentes principales para la evaluación probabilista del riesgo. La *Figura 32* hace referencia a amenazas que pueden afectar el medio ambiente construido como terremotos, tsunamis, inundaciones o ciclones, la *Figura 33* está relacionada con amenazas que pueden afectar cultivos.

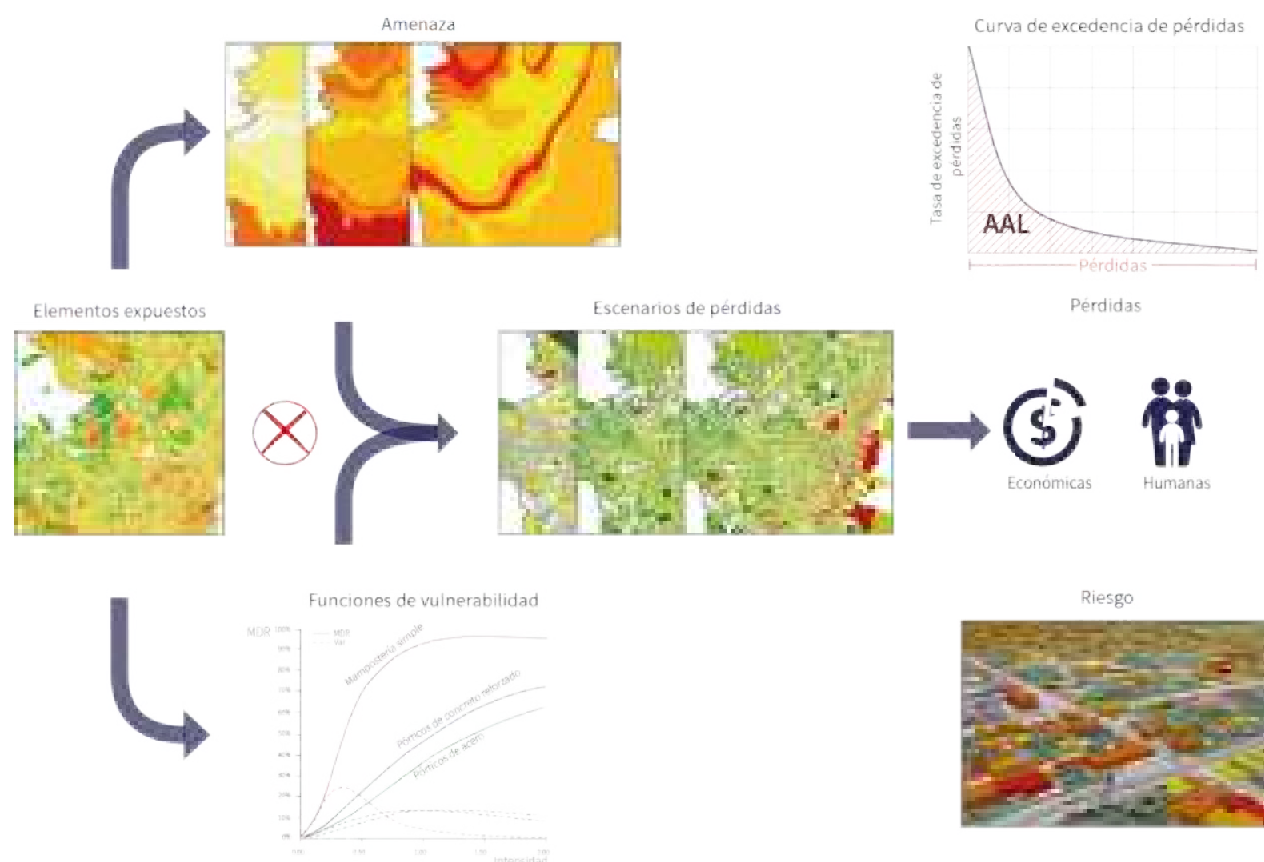


Figura 32. Marco conceptual de la evaluación probabilista de riesgo multi-amenaza. (Cardona, 2001)

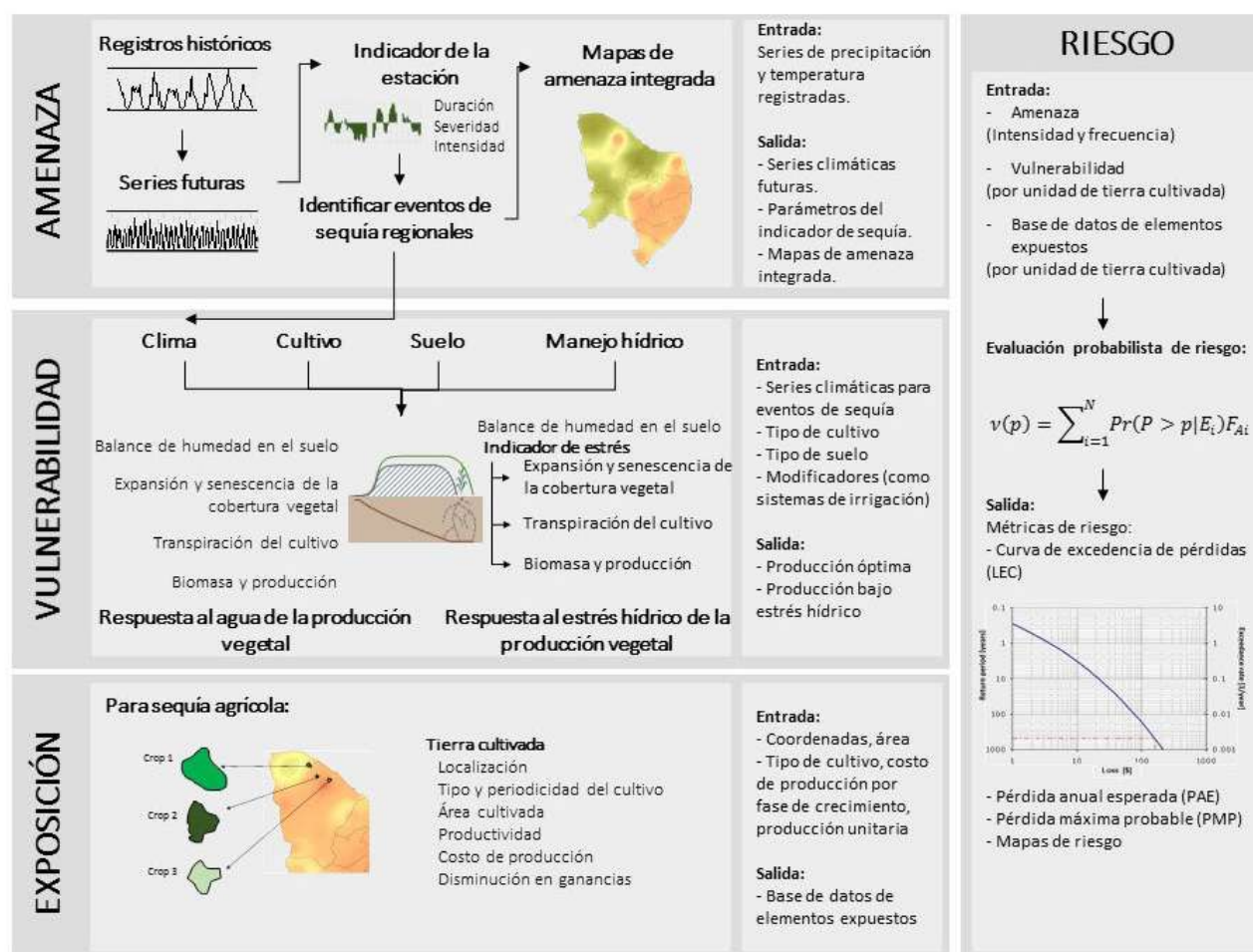


Figura 33. Marco conceptual de la evaluación probabilista de riesgo por sequía (Bernal et al., 2017)

Dada la incertidumbre inherente a los fenómenos que caracterizan la amenaza y sus efectos debido a su naturaleza aleatoria; además de la escasa información histórica, tanto las intensidades de los eventos como la vulnerabilidad asociada a los elementos expuestos deben cuantificarse a través de la dispersión con respecto al valor promedio, puesto que estos valores se asumen como variables aleatorias que se representan a través de distribuciones de probabilidad. El cálculo del riesgo se debe realizar por lo tanto, integrando la distribución de probabilidad de la amenaza y la distribución de probabilidad de la pérdida. En grosso modo, el procedimiento consiste en evaluar las pérdidas en un grupo de activos expuestos durante cada uno de los escenarios que colectivamente describen la amenaza y luego, integrar en forma probabilista los resultados obtenidos, utilizando como factores de peso las frecuencias de ocurrencia de cada escenario.

El análisis probabilista del riesgo involucra incertidumbres que no pueden despreciarse y deben propagarse rigurosamente a lo largo del proceso de cálculo. Las pérdidas probables se obtienen a través de un proceso de convolución entre las intensidades de la amenaza y la vulnerabilidad física de los elementos expuestos; los valores obtenidos de la evaluación probabilista proporcionan

entonces un orden de magnitud de las pérdidas esperadas.

Los resultados son obtenidos en términos de pérdidas y daños potenciales en un conjunto de elementos expuestos (exposición) en un periodo determinado, resultado de la ocurrencia de eventos modelados con diferentes intensidades y origen (amenaza), y del nivel de susceptibilidad al daño de los elementos a dichos eventos e intensidades (vulnerabilidad).

El modelo para el análisis probabilista se construye a partir de cuatro módulos principales:

(i) Evaluación de la amenaza. Los resultados de esta evaluación son representados en un catálogo de eventos estocásticos que deben ser mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos y tener una frecuencia de ocurrencia asignada. Esta representación permite considerar eventos que no han ocurrido aún pero que son posibles.

(ii) Identificación y caracterización de los elementos expuestos. A cada uno de los elementos considerados para la evaluación se le asignan unos atributos de acuerdo a sus características estructurales, material de construcción, valor catastral, tipo de cultivo, costo de

producción por fase de crecimiento, producción por unidad, entre otros.

(iii) Definición de la vulnerabilidad. De acuerdo a las características asociadas a cada uno de los elementos expuestos, se asigna una función de vulnerabilidad o un modelo de vulnerabilidad (para el caso de los cultivos), específica a cada una de las amenazas. Estas funciones y modelos permiten una representación probabilista del grado de daño, que permite a su vez definir las pérdidas económicas y humanas esperadas para cada uno de los componentes.

(iv) Cálculo del riesgo. Integración de daños para estimación de pérdidas

Para el cálculo del riesgo se debe considerar un conjunto exhaustivo de eventos que representen aquellos eventos que pueden afectar los elementos expuestos. Las pérdidas esperadas asociadas a cada uno de ellos sirve como dato de entrada para la construcción de la función de densidad de probabilidad (probability density function, PDF, en inglés) que proporciona el panorama completo del riesgo. La *Figura 34* muestra el diagrama de flujo de la evaluación probabilista del riesgo (Ordaz, 2000; Marulanda, 2013; CIMNE & Ingeniar, 2015).

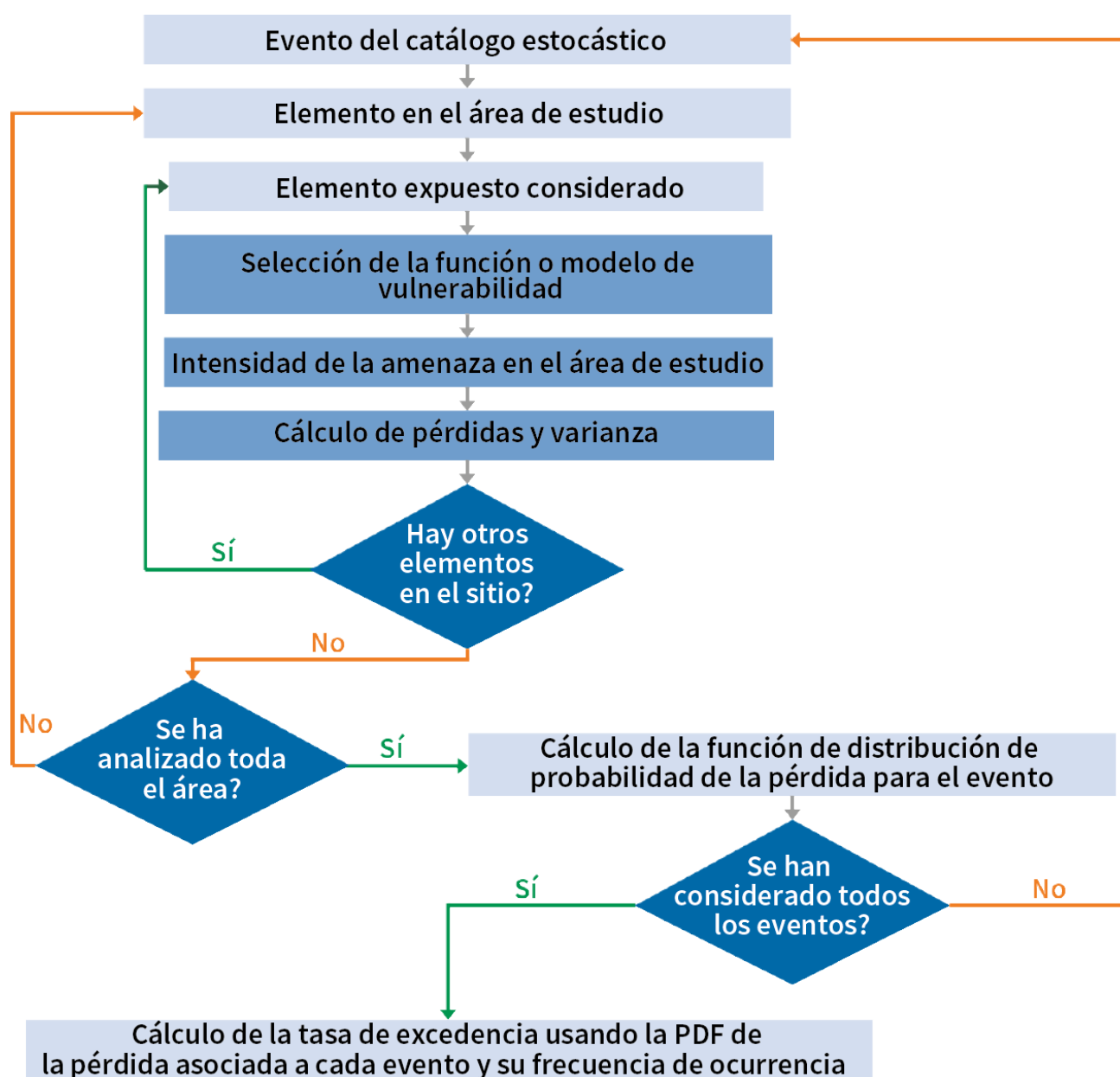


Figura 34. Diagrama de flujo de la evaluación probabilista del riesgo (Marulanda, 2013)

El resultado principal de la evaluación probabilista del riesgo es la Curva de Excedencia de Pérdidas (CEP, o Loss Exceedance Curve, LEC, en inglés), que relaciona los diferentes valores de pérdida con la tasa de excedencia, usualmente expresada en años. La curva de excedencia de pérdidas tiene toda la información relevante de riesgo necesaria para definir el proceso de ocurrencia de eventos que pueden causar pérdidas en los elementos expuestos. Una vez se tiene esta curva, se pueden obtener otras métricas probabilistas que pueden ser útiles para fines de comunicación del riesgo (Cardona et al.,

2012). Las principales métricas puntuales del riesgo son:

Pérdida Anual Esperada (PAE o Average Annual Loss, AAL, en inglés), que es el valor anual esperado de la pérdida o el equivalente al pago anual que se necesitaría para compensar las pérdidas acumuladas en una ventana de tiempo larga. Para el cálculo de la AAL, el proceso de ocurrencia de los escenarios de daño se supone estacionario. En un sistema simple de aseguramiento, la AAL es el equivalente a la prima pura anual. Esta pérdida anual promedio es una métrica útil porque encierra en un valor

único los impactos (en términos de pérdidas económicas) de la ocurrencia de escenarios peligrosos sobre elementos expuestos vulnerables. La AAL es un indicador robusto dado que determina el valor esperado de la pérdida y no su incertidumbre.

Pérdida Máxima Probable (PMP o Probable Maximum Loss, PML, en inglés), es el valor asociado a una pérdida que no ocurre muy frecuentemente y por lo tanto generalmente está relacionada con periodos de retorno largo (o lo que es lo mismo, con bajas tasas de excedencia). En realidad, la PML es una curva que relaciona las pérdidas con sus

correspondientes periodos de retorno. No existen estándares para seleccionar periodos de retorno fijos para el análisis, lo que responde al hecho de que depende del nivel de aversion al riesgo de quien está haciendo la evaluación.

La población está expuesta a una amplia gama de amenazas. Evidentemente es

imposible pronosticar todas las amenazas a las que se está expuesto, por lo que es importante identificar aquellas que pueden afectar de forma severa ciertas áreas así como caracterizar correctamente los elementos expuestos y la vulnerabilidad frente a esas amenazas asociadas a ellos para tomar medidas para prevenir o reducir el riesgo . Sin embargo, es esencial

reconocer que muchos aspectos de la vulnerabilidad (sociales, económicos, culturales, ambientales) son similares frente a cualquier amenaza y por lo tanto deben ser aspectos a considerar, en general, para fortalecer acciones que conduzcan a una sociedad más resiliente (PNUD, 1991).



4.2. Evaluación integral del riesgo

Actualmente es ampliamente aceptado que el riesgo de desastres es el resultado de la posible ocurrencia de eventos y de la fragilidad que tienen los elementos que son susceptibles a sufrir posibles daños. El impacto para las comunidades expuestas está asociado tanto con los daños directos e indirectos como con las consecuencias de dichos daños o pérdidas. Existe suficiente conocimiento y entendimiento en la actualidad, por ejemplo, en términos del alcance de los códigos de construcción, que para que una infraestructura sea resiliente, tiene que ser capaz de resistir eventos de ciertas características; por lo tanto, se puede decir que los eventos naturales son “destructivos sólo en la medida en que el hombre lo ha hecho así, al invertir o construir su bienestar sin considerar los efectos que las amenazas de la naturaleza pueden causar sobre ese bienestar” (Ambraseys, 2010).

El riesgo de desastres no está asociado únicamente a la ocurrencia de eventos peligrosos intensos sino también a las condiciones de vulnerabilidad. La vulnerabilidad está estrechamente asociada a insostenibilidad y deficiente gobernanza en áreas propensas a eventos peligrosos. Esa insostenibilidad y esas

deficiencias normalmente están vinculadas a fragilidades socioeconómicas y a falta de resiliencia de los asentamientos humanos expuestos (Cardona et al., 2012; IPCC, 2012).

La vulnerabilidad física de los elementos expuestos es, usualmente, el resultado de prácticas inadecuadas de una comunidad como parte de procesos de desarrollo no planificados que conducen a la construcción de elementos o infraestructura susceptibles, y en muchos casos, a la generación de nuevas amenazas (amenazas antropogénicas). Cabe anotar que la vulnerabilidad física que existe actualmente es el producto de decisiones que se tomaron en el pasado y que son el resultado de diferentes situaciones sociales, culturales, económicas, institucionales y ambientales. Aunque en muchos casos se toman buenas decisiones y se han generado buenas políticas, prácticas y acciones relacionadas con la gestión del riesgo, es muy difícil, sino imposible, reducir el riesgo físico existente en el corto plazo.

La reducción del riesgo físico implica un proceso permanente a largo plazo, cuyos resultados sólo se verán reflejados con el pasar del tiempo. Las condiciones socioeconómicas adversas actuales y la falta

de resiliencia imperante, inevitablemente, va a derivar en más daños y pérdidas en las próximas décadas.

Las características intrínsecas actuales de la sociedad definen mejores o peores condiciones que amplifican o reducen el impacto y la capacidad de las comunidades para recuperarse de eventos adversos y crear un nuevo ambiente construido más fuerte o más débil. Mediante el mejoramiento de las condiciones socioeconómicas de la sociedad se pueden abordar dos aspectos: *i)* mayor capacidad de recuperación frente al impacto de los eventos y *ii)* mayor capacidad para “reconstruir mejor” y evitar futuros desastres.

La evaluación integral del riesgo tiene como objetivo revelar el riesgo desde la perspectiva del desarrollo usando por un lado las pérdidas o el daño físico potencial como riesgo físico, que está vinculado directamente con la ocurrencia de eventos, y por otro, capturando cómo los factores subyacentes del riesgo o amplificadores del riesgo –sociales, económicos, o ambientales– que no son dependientes de la amenaza, pueden empeorar las condiciones del riesgo debido a la falta de capacidad para anticiparse o resistir o responder y

recuperarse de los efectos adversos. Este tipo de evaluación se ha llevado a cabo a nivel urbano para diferentes ciudades en el mundo (Cardona 2001; Birkman et al. 2013; Cardona et al. 2012; Carreño et al. 2007; Jaramillo, 2014; Marulanda et al. 2009; Marulanda et al. 2013; Salgado-Gálvez et al. 2016), a nivel de país (Burton and Silva, 2014) y a nivel global (UNISDR, 2017; Marulanda et al. 2017).

El indicador obtenido de la evaluación holística o integral del riesgo (RI) es una forma útil de evaluar, comparar y comunicar el riesgo para promover acciones efectivas para intervención de las condiciones de vulnerabilidad medidas en sus diferentes dimensiones. Mediante este tipo de indicadores se logra comunicar aspectos complejos de la ciencia a la dirigencia política o al público dado que describe un problema de un sistema complejo en términos simples.

Es importante resaltar que enfoques basados en indicadores, en general, no identifican las medidas de gestión del riesgo, pues éstas se deben identificar usando modelos integrados y análisis completos. Los indicadores compuestos son imágenes que permiten una interpretación más fácil de los aspectos multidimensionales en lugar de tratar de encontrar una tendencia en muchos indicadores por separado. Los indicadores compuestos son útiles para resaltar algunos aspectos del riesgo, y por lo tanto, se puede obtener información más detallada al desagregar los resultados para llegar a conclusiones y definir cursos de acción. De esta manera, se da un primer paso para el entendimiento del riesgo, que, acompañado con métricas del riesgo y en algunos casos estudios más detallados, son útiles para toma de decisiones con información relevante.

La Figura 35 presenta el marco conceptual del enfoque integral del riesgo, donde se muestra como el riesgo es función de la amenaza y la vulnerabilidad (factores físicos y socioeconómicos). La evaluación integral indica que para reducir el riesgo existente o prevenir la generación de nuevo riesgo se requiere de un sistema de gestión del riesgo integral basado en una estructura inter-institucional acompañada por la implementación de políticas y estrategias para intervenir no sólo los elementos susceptibles sino los diversos factores de la sociedad que pueden crear o incrementar el riesgo, así como intervenir, cuando sea posible las amenazas creadas (antropogénicas, tecnológicas, etc.). De la misma manera, en el caso de que ocurra un evento peligroso, se deben llevar a cabo acciones de respuesta a emergencia y recuperación como parte del marco de la gestión del riesgo.

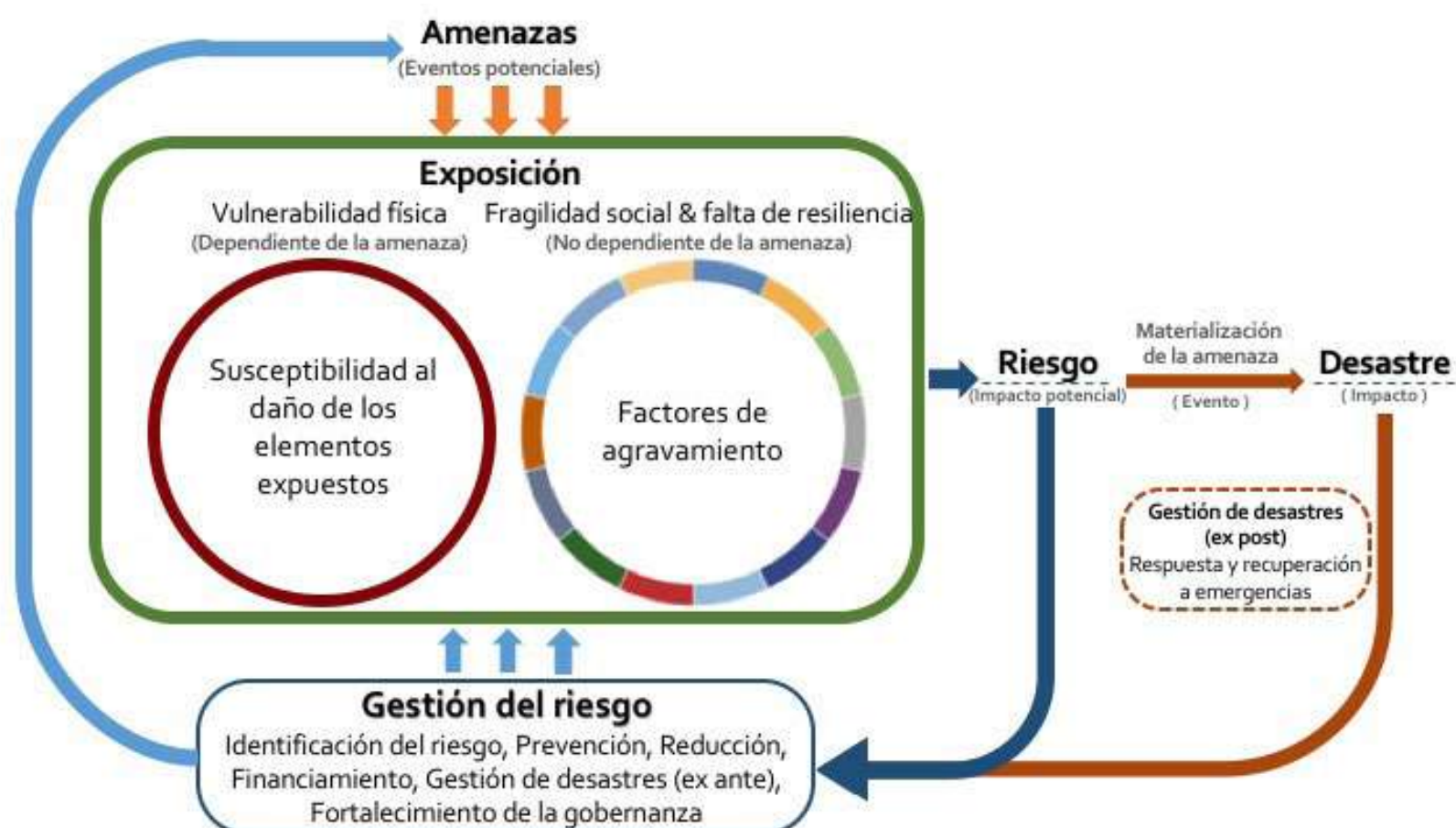


Figura 35. Marco conceptual del enfoque holístico a la evaluación probabilista del riesgo. Cardona & Barbat (2000)

EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO POR SISMO, INUNDACIONES, TSUNAMI Y CICLONES TROPICALES A NIVEL NACIONAL

En esta sección se presentan los resultados del riesgo físico por sismos, inundaciones, tsunami (en el Pacífico) y ciclones tropicales (San Andrés y Providencia y norte de Colombia) y del riesgo integral u holístico para todo el país. Se presentan *mapas (19-28)* a nivel nacional de la pérdida anual esperada por cada una de las amenazas y el valor considerando todas las amenazas.

El capítulo final contiene los “Perfiles de riesgo de departamento”. Cada perfil presenta un mapa de la distribución de

la AAL (pérdida anual esperada) en los municipios de cada departamento, la contribución de cada amenaza a la AAL total, el ranking del departamento de acuerdo al valor relativo de la AAL, PMLs (pérdidas máximas probables) para diferentes períodos de retorno, probabilidad de exceder ciertas pérdidas en una ventana de tiempo de 50 años, la evaluación integral del riesgo de desastres del departamento, la posición en el riesgo integral con respecto a los otros departamentos del país, valores del riesgo integral (RI), riesgo físico (RF) y del factor de impacto (F); así como las variables transformadas utilizadas para el cálculo del factor de impacto (F). Finalmente se presenta en la *Tabla 3* los resultados de riesgo físico, factor de impacto y riesgo integral para cada uno de los municipios que conforman cada departamento.

Para la evaluación probabilista del riesgo; el enfoque utilizado en este primer Atlas de Riesgo de Colombia, se usó la información disponible de la Evaluación Global del Riesgo (Global Risk Assessment) desarrollada para el informe GAR15 y GAR Atlas 2017 de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres. El nivel de resolución de esta información es grueso, sin embargo, los resultados son consistentes y dan cuenta del nivel de riesgo que cada departamento tiene en términos relativos y que puede ser útil para conocer, entender y priorizar áreas para estudios con mayor resolución. La *Tabla 3* presenta los resultados de riesgo para los departamentos en términos de la AAL para diferentes amenazas (multi-amenaza), expresada en millones de pesos y la AAL al millar, con respecto al valor expuesto.

Tabla 3. Resultados de riesgo por departamento

Departamento	Valor Expuesto [Col\$ millones]	PAE Multi-amenaza [Col\$ millones]	PAE Multi-amenaza [por mil, %]	Riesgo Físico Relativo: RF	Factor de Impacto: F	Riesgo Integral Relativo: RI	PML 500 Terremoto	PML 500 Inundación	PML 500 Huracan	PML 500 Tsunami
Bogotá, D.C.	673,237,996	1,571,114	2.33	0.11	0.26	0.14	141,965,986	2,932,541	-	-
Antioquia	390,800,661	2,249,907	5.76	0.64	0.25	0.80	80,404,588	19,540,395	-	40,593
Valle del Cauca	206,158,652	1,245,904	6.04	0.69	0.26	0.86	35,330,791	5,003,928	-	1,745,597
Cundinamarca	142,770,958	598,105	4.19	0.35	0.23	0.43	27,124,419	5,466,262	-	-
Santander	117,600,856	655,420	5.57	0.61	0.26	0.77	17,047,014	4,671,158	-	-
Nariño	109,466,226	792,025	7.24	0.85	0.64	1.39	15,110,303	2,379,171	-	365,904
Cauca	80,980,218	697,753	8.62	0.96	0.66	1.59	13,885,905	4,283,732	-	75,272
Boyacá	65,354,569	492,024	7.53	0.88	0.36	1.19	12,489,583	4,385,241	-	-
Atlántico	94,915,760	134,340	1.42	0.04	0.38	0.06	11,307,264	6,944,923	34,503	25,849
Córdoba	89,499,737	276,138	3.09	0.19	0.62	0.31	11,259,242	4,081,847	-	10,290
Tolima	66,005,353	375,048	5.68	0.63	0.41	0.89	10,938,035	1,999,295	-	-
Caldas	60,518,762	392,269	6.48	0.75	0.32	0.99	10,643,730	321,922	-	-
Risaralda	46,033,970	294,574	6.40	0.74	0.38	1.02	8,979,470	741,277	-	-
Bolívar	86,893,370	280,886	3.23	0.21	0.63	0.34	8,684,788	4,868,424	51,691	78,449
Norte de Santander	44,181,140	293,876	6.65	0.78	0.49	1.16	8,044,916	601,528	-	-
Huila	47,239,842	362,534	7.67	0.89	0.48	1.32	7,369,800	447,752	-	-
Sucre	39,838,667	137,005	3.44	0.24	0.71	0.41	5,191,648	1,551,883	-	76,069
Chocó	29,644,140	322,495	10.88	1.00	0.70	1.70	5,054,557	1,991,603	-	229,392
Quindío	26,808,642	136,945	5.11	0.52	0.37	0.71	4,872,175	4,628	-	-
Magdalena	37,321,073	188,805	5.06	0.51	0.67	0.86	4,236,474	2,762,220	31,795	14,957
Cesar	33,650,937	110,053	3.27	0.21	0.61	0.34	3,998,047	1,853,894	1,127	-
La Guajira	27,460,452	61,480	2.24	0.10	0.73	0.17	3,373,804	3,099,771	135,377	100,869
Meta	20,857,744	94,596	4.54	0.41	0.34	0.55	2,996,304	1,046,120	-	-
Caquetá	28,047,658	142,341	5.07	0.51	0.68	0.86	2,194,266	2,488,169	-	-
Casanare	12,557,006	74,102	5.90	0.66	0.50	1.00	2,099,590	845,030	-	-
Arauca	7,749,719	36,712	4.74	0.45	0.61	0.72	980,988	240,304	-	-
Putumayo	10,110,582	74,160	7.33	0.86	0.60	1.37	969,305	1,166,149	-	-
Guaviare	6,271,236	15,043	2.40	0.12	0.72	0.20	201,950	886,137	-	-
Archip. San Andrés	2,497,720	9,643	3.86	0.49	0.49	0.44	117,243	393,829	495,043	-
Vichada	1,841,468	30,035	16.31	1.00	0.80	1.80	27,899	641,027	-	-
Vaupés	1,510,898	18,321	12.13	1.00	0.76	1.76	12,424	525,824	-	-
Guainia	664,937	13,187	19.83	1.00	0.90	1.90	5,838	305,587	-	-
Amazonas	2,055,236	12,476	6.07	0.69	0.74	1.20	4,866	393,829	-	-

También para cada departamento se han incluido los PML para 500 años de periodo de retorno para terremoto, inundaciones, huracanes y tsunami.

Para la evaluación integral u holística del riesgo se utilizaron los resultados de la pérdida anual esperada por departamento y por municipio respectivamente, obtenida de la evaluación probabilista del riesgo por terremotos, inundaciones, tsunami (en el Pacífico) y ciclones tropicales (San Andrés y Providencia y norte de Colombia) y un conjunto de indicadores socioeconómicos a nivel departamental y municipal. El índice de riesgo integral (RI) se obtuvo con base en el riesgo físico (RF) y el factor de impacto (F) utilizando la ecuación de Moncho.

Los valores de Riesgo Físico (RF) se obtuvieron a partir de la normalización por medio de funciones de transformación de la pérdida anual esperada de la evaluación probabilista del riesgo (Carreño et al., 2007). Todos los valores de pérdida anual esperada mayores a 10 ‰ del valor expuesto se consideran como el valor máximo de riesgo físico (1)

Para el factor de impacto se usaron 16 indicadores socioeconómicos disponibles en bases de datos del país. Estos se seleccionaron teniendo en cuenta la disponibilidad de información para la mayoría de los municipios de Colombia considerando además que reflejaran la realidad socioeconómica y de

gobernabilidad de cada municipio. Las variables escogidas para el factor de impacto son independientes de la amenaza dado que lo que se quiere representar son los factores subyacentes del riesgo que existen o se crean independientemente de las amenazas a las que una sociedad se encuentre expuesta. Estos indicadores dan cuenta de la fragilidad social y la falta de resiliencia, que son aspectos que agravan el impacto directo o riesgo físico actual y que a su vez son impulsores o causas subyacentes del aumento del riesgo o de los futuros desastres, visto desde una perspectiva integral. La *Tabla 4* presenta los indicadores seleccionados para el factor de impacto.

Tabla 4. Indicadores seleccionados para el cálculo del riesgo integral (RI)

Aspecto	Descriptor		Definición
Fragilidad social	XFS1	Personas en miseria	Índice de necesidades básicas insatisfechas, componente personas en miseria. [%]
	XFS2	Vivienda	Índice de necesidades básicas insatisfechas, componente vivienda. [%]
	XFS3	Hacinamiento	Viviendas con hacinamiento crítico (%)
	XFS4	Servicios de agua potable y saneamiento básico	Índice de necesidades básicas insatisfechas, componente servicios (%)
	XFS5	Población dependiente	Índice de necesidades básicas insatisfechas, componente dependencia (%)
	XFS6	Tasa de mortalidad infantil	Tasa bruta de mortalidad en menores de 1 año. [por 1000 nacidos vivos]
	XFS7	Población analfabeta	Población analfabeta (%)
	XFS8	Desempleo	Población en edad de trabajar sin ocupación formal (%)
Falta de resiliencia	XFR1	Gobernabilidad	Índice de desempeño integral
	XFR2	Gestión del riesgo	Índice municipal de riesgo, componente gestión del riesgo
	XFR3	Ingresos	Ingresos tributarios per cápita
	XFR4	Ingresos	Ingresos no tributarios per cápita
	XFR5	Importancia económica	Valor agregado per cápita
	XFR6	Población	Porcentaje de población en cabecera (INV)
	XFR7	Densidad empresarial	Densidad empresarial por cada 1000 hab
	XFR8	Centros de salud	N. IPS por cada 1000 hab

Las variables utilizadas en esta evaluación para representar la fragilidad social son las siguientes: personas en miseria, condiciones de vivienda, hacinamiento, viviendas con servicios inadecuados y dependencia económica (obtenidos del informe de Necesidades Básicas Insatisfechas del DANE), tasa de mortalidad infantil, población analfabeta y desempleo. Estas variables se seleccionaron como funciones de desarrollo económico, considerando que las condiciones de vida reflejan una situación comparativamente desfavorable que indican una noción de susceptibilidad de una comunidad frente a eventos de amenaza, cualquiera que sea su naturaleza o severidad. Las diferencias en

la vulnerabilidad del contexto social y físico de los elementos expuestos, determina la naturaleza selectiva de los efectos de fenómenos naturales (Cardona, 2001).

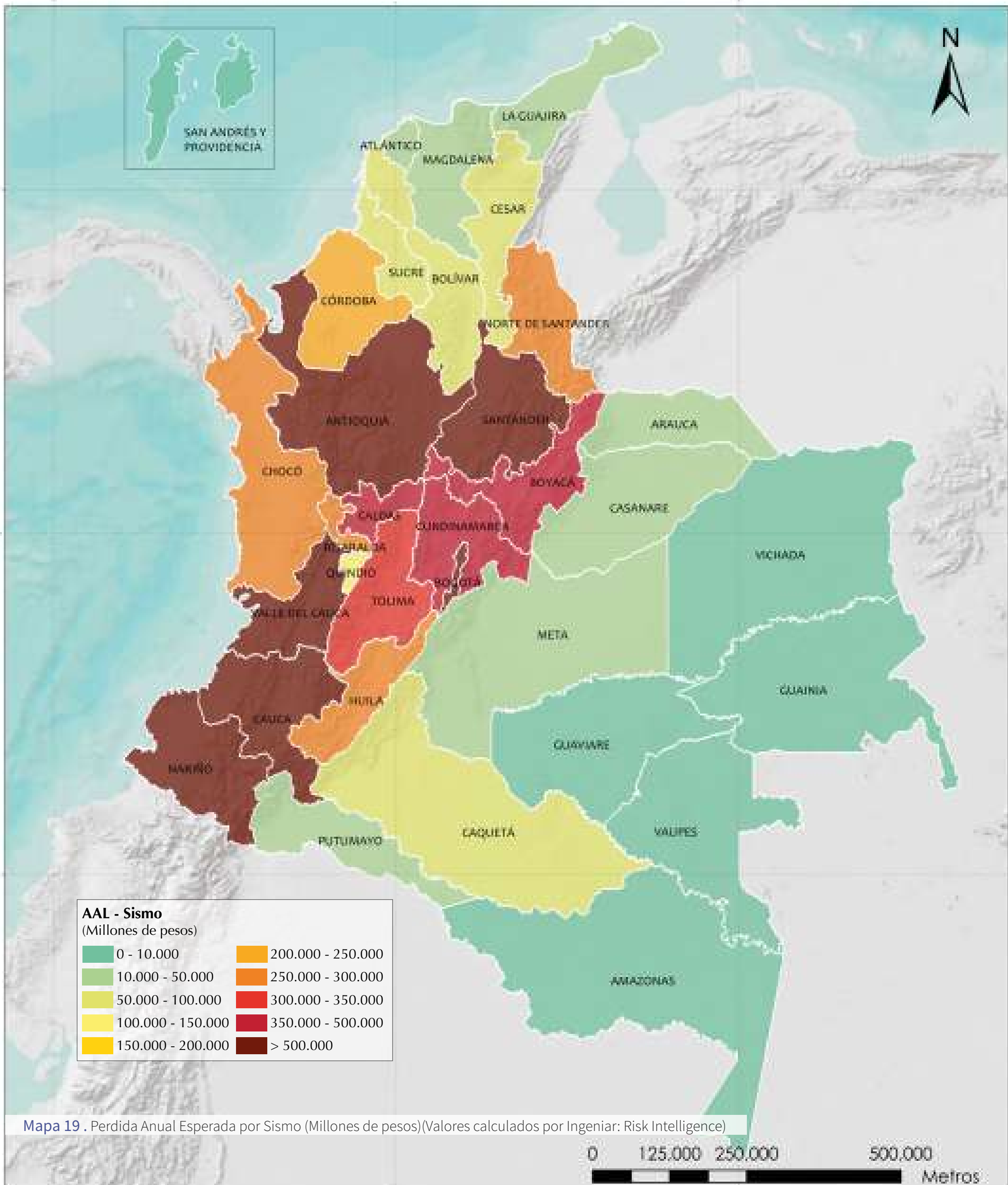
Para la falta de resiliencia se utilizaron algunos indicadores considerados en el cálculo del Índice Municipal de Riesgo de Desastres (DNP, 2018), como ingresos tributarios y no tributarios, importancia económica y densidad empresarial integral, además del indicador de gestión del riesgo obtenido para dicho índice, al considerar que son factores relevantes que representan la desigualdad de ingresos y los efectos de desequilibrio en la distribución fiscal. La pobreza restringe

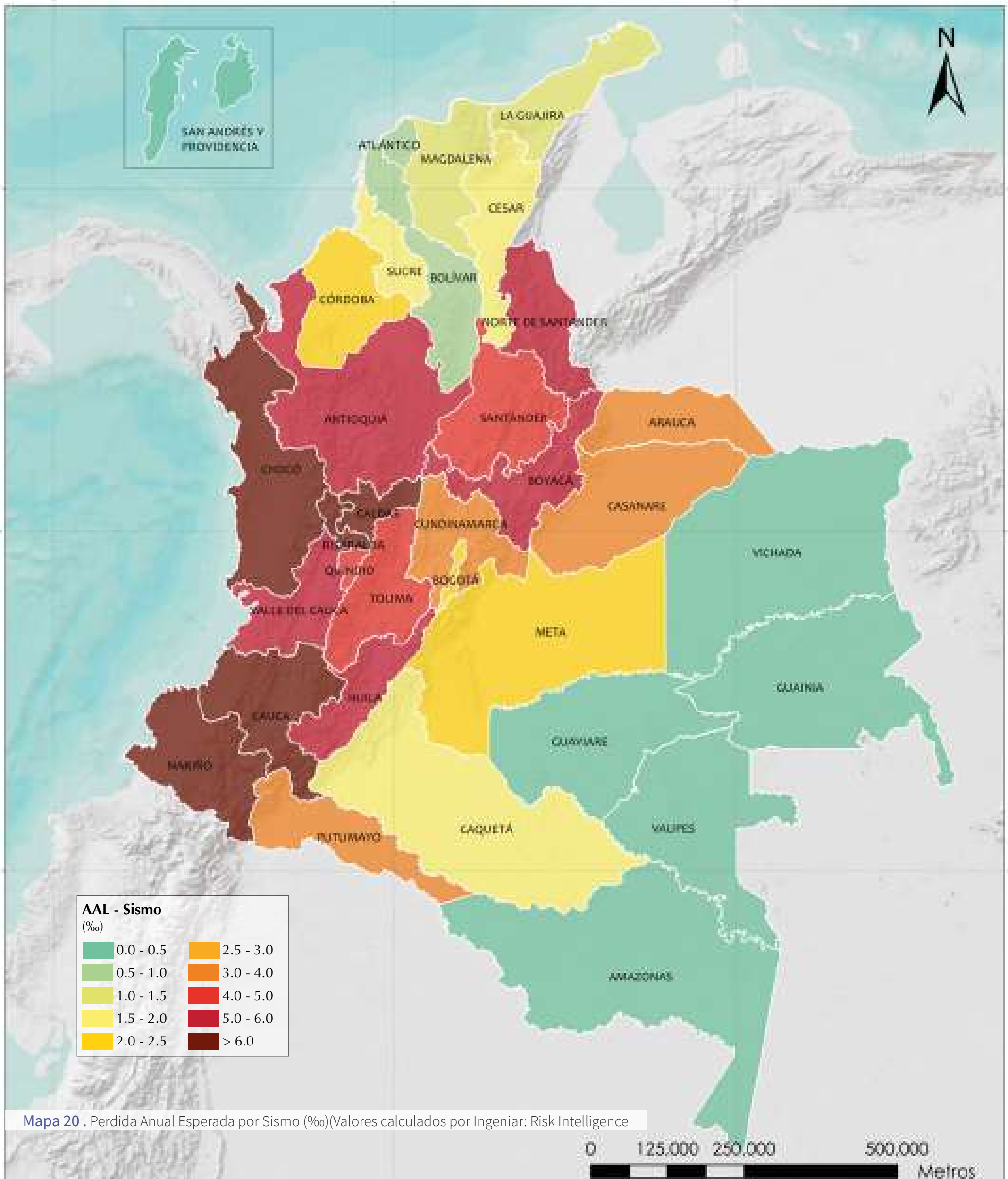
la capacidad de una comunidad de hacer frente a los desastres, resultando en un funcionamiento particularmente frágil, una condición de vulnerabilidad que refleja, en general, una predisposición intrínseca y adversa a ser afectado cuando un evento ocurre. Igualmente se utilizaron el inverso de la población en cabecera y la tasa de Instituciones Prestadoras de Salud por cada 1.000 habitantes, como variables representativas de la calidad de vida de la población.

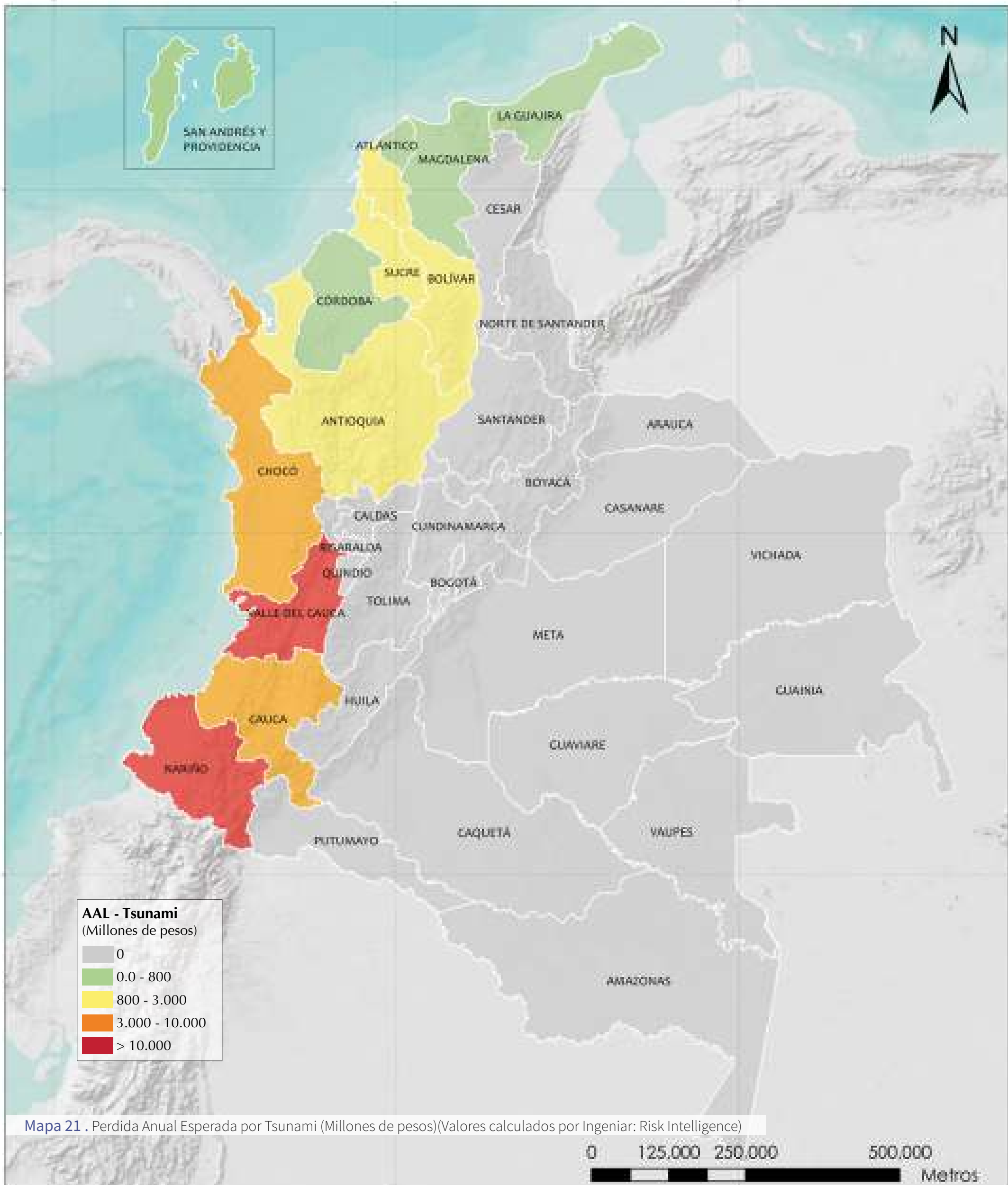
La *Tabla 5* presenta los resultados de riesgo físico, factor de impacto y riesgo integral para las ciudades capitales de los departamentos del país.

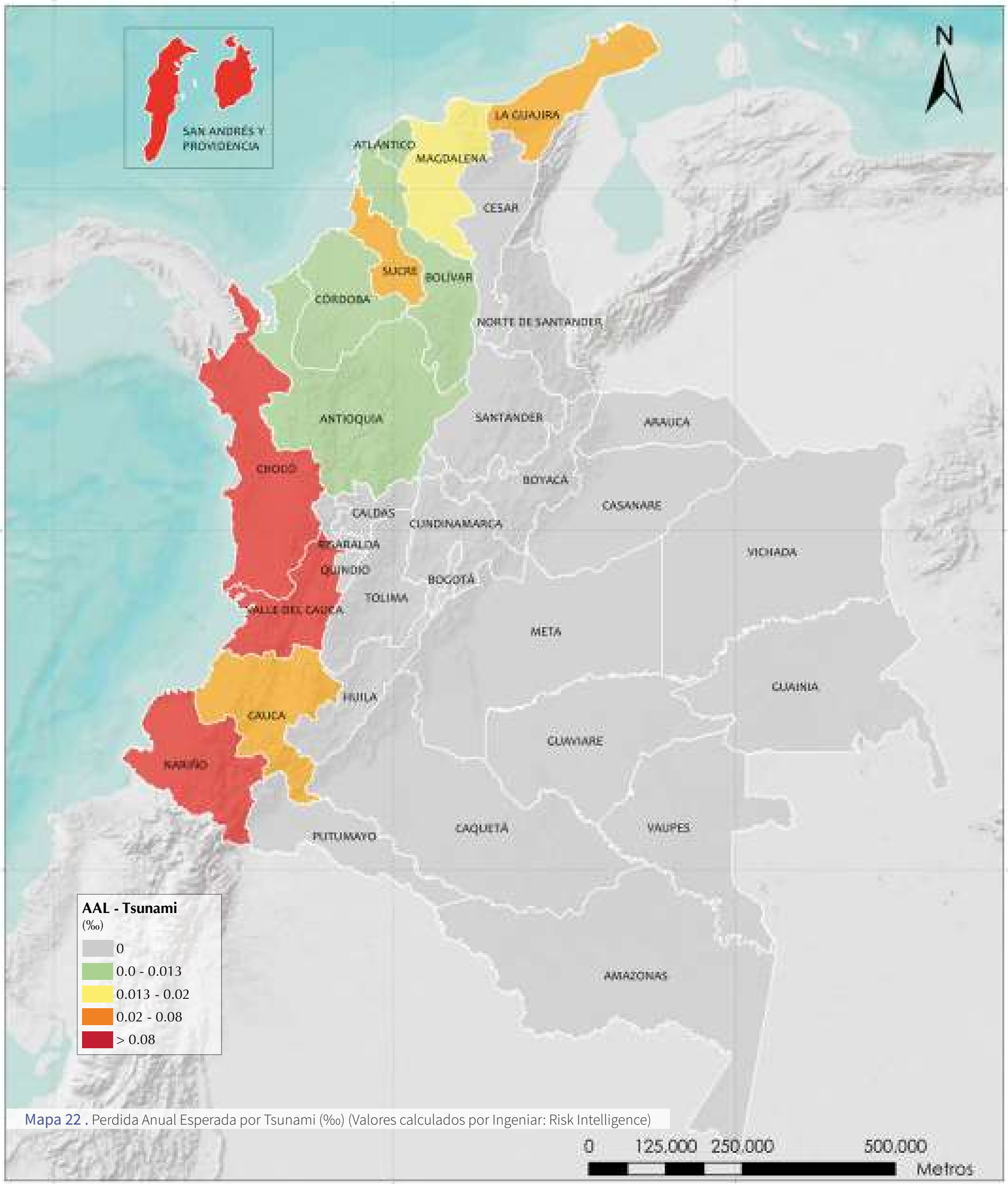
Tabla 5.Resultados Riesgo Integral y sus componentes para las ciudades capitales

Departamento	Ciudad	PAE Multi-amenaza [Col \$ mill]	PAE Multi-amenaza [por mil ‰]	Riesgo Físico Relativo: RF	Factor de Impacto: F	Riesgo Integral Relativo: RI
Guainía	Inírida	7.740	21,01	21,01	1,00	1,00
Vaupés	Mitú	9.667	10,15	10,15	1,00	1,00
Vichada	Puerto Carreño	16.209	20,44	20,44	1,00	1,00
Chocó	Quibdó	115.848	7,40	7,40	0,86	0,86
Norte de Santander	Cúcuta	130.494	5,81	5,81	0,65	0,65
Risaralda	Pereira	167.650	5,72	5,72	0,63	0,63
Cundinamarca	Agua de Dios	2.362	5,56	5,56	0,61	0,61
Caldas	Manizales	182.936	5,31	5,31	0,56	0,56
Putumayo	Mocoa	7.244	5,29	5,29	0,56	0,56
Cauca	Popayán	175.109	5,23	5,23	0,54	0,54
Antioquia	Medellín	1.066.358	4,87	4,87	0,47	0,47
Huila	Neiva	80.661	4,84	4,84	0,47	0,47
Valle del Cauca	Cali	589.467	4,77	4,77	0,45	0,45
Archip. San Andrés	San Andrés	9.643	3,86	0,49	0,49	0,44
Nariño	Pasto	244.779	4,50	4,50	0,41	0,41
Casanare	Yopal	19.288	4,42	4,42	0,39	0,39
Quindío	Armenia	42.169	4,34	4,34	0,38	0,38
Arauca	Arauca	7.584	4,27	4,27	0,36	0,36
Caquetá	Florencia	42.318	3,65	3,65	0,27	0,27
Tolima	Ibagué	125.862	3,58	3,58	0,26	0,26
Santander	Bucaramanga	143.492	3,37	3,37	0,23	0,23
Boyacá	Tunja	34.808	3,34	3,34	0,22	0,22
Meta	Villavicencio	29.282	2,95	2,95	0,17	0,17
Bogotá, D.C.	Bogotá, D.C.	1.571.114	2,33	0,11	0,25	0,14
Córdoba	Montería	67.495	2,20	2,20	0,10	0,10
Amazonas	Leticia	2.125	2,15	2,15	0,09	0,09
La Guajira	Riohacha	10.959	1,56	1,56	0,05	0,05
Cesar	Valledupar	22.167	1,51	1,51	0,05	0,05
Guaviare	San José del G.	6.815	1,50	1,50	0,05	0,05
Sucre	Sincelejo	18.306	1,14	1,14	0,03	0,03
Atlántico	Barranquilla	50.879	0,99	0,99	0,02	0,02
Magdalena	Santa Marta	11.475	0,94	0,94	0,02	0,02
Bolívar	Cartagena	24.173	0,49	0,49	0,00	0,00

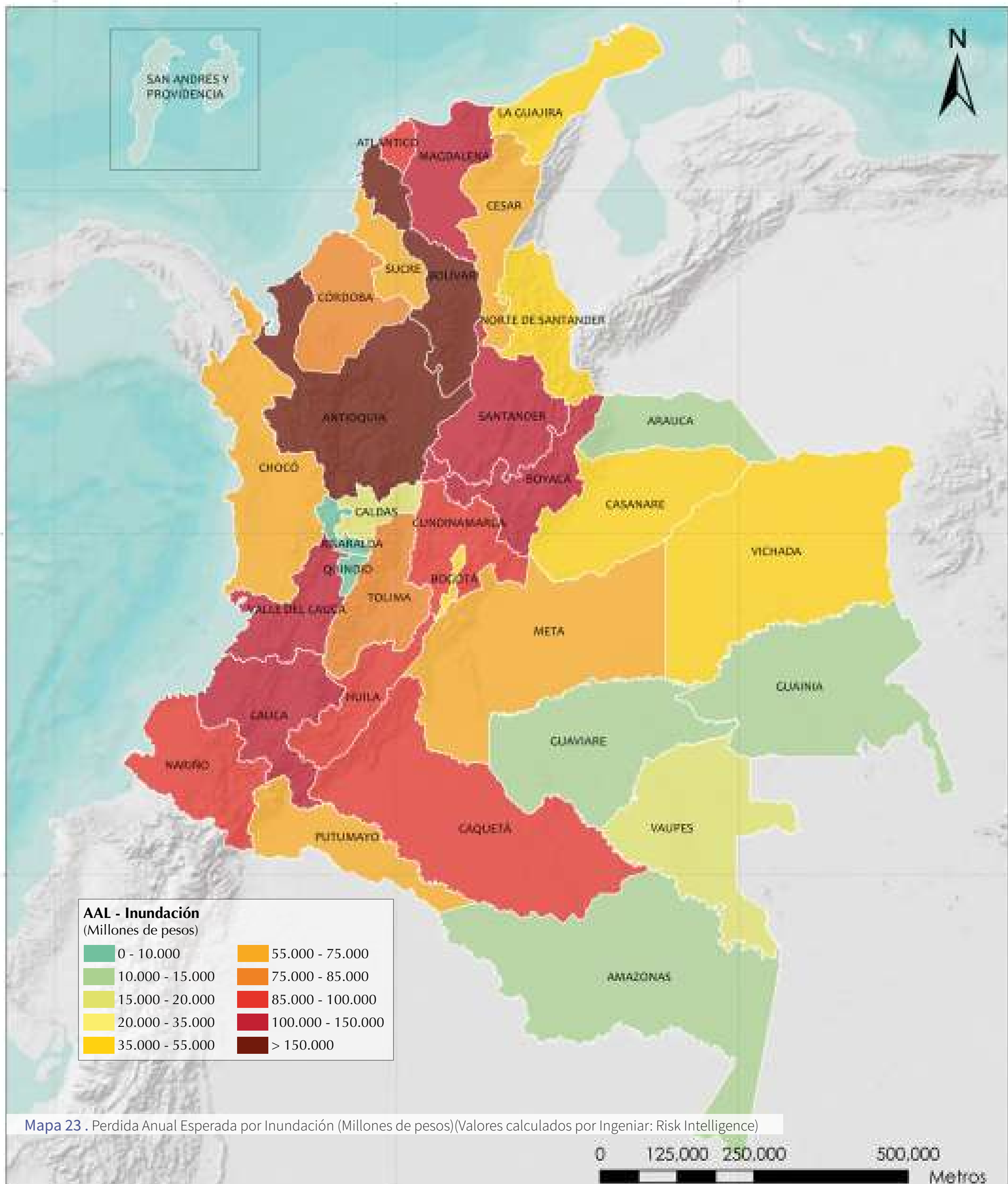


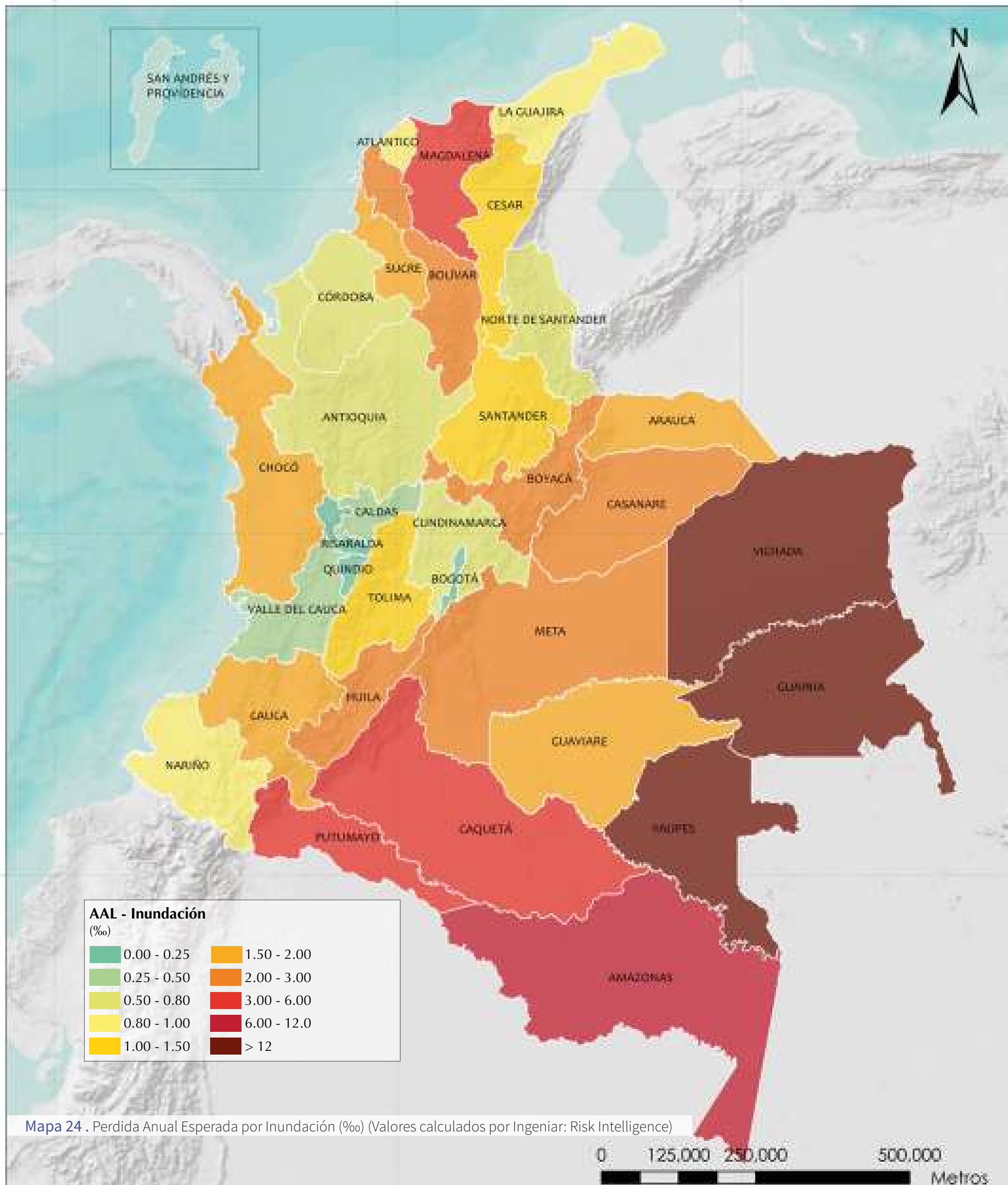


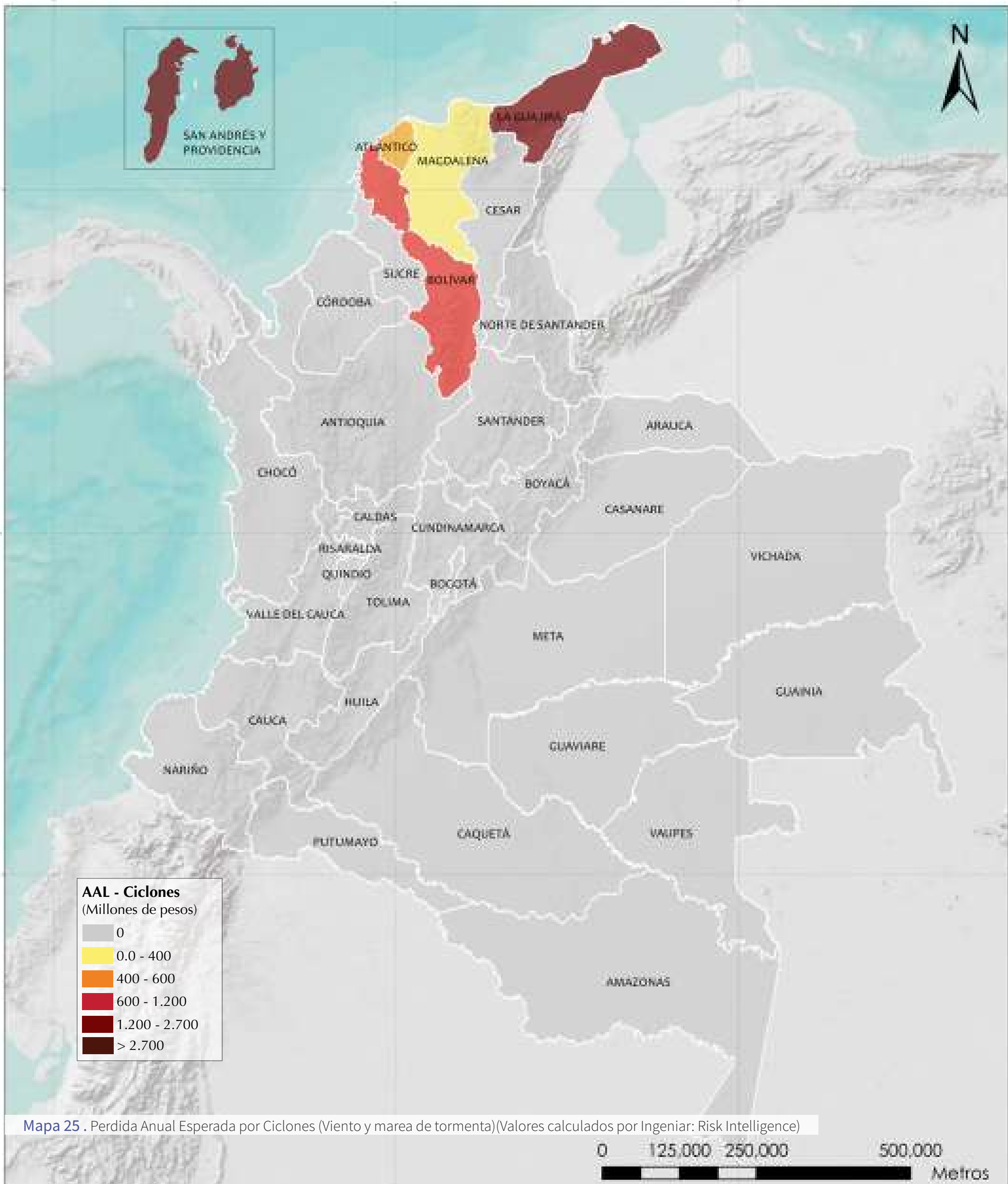


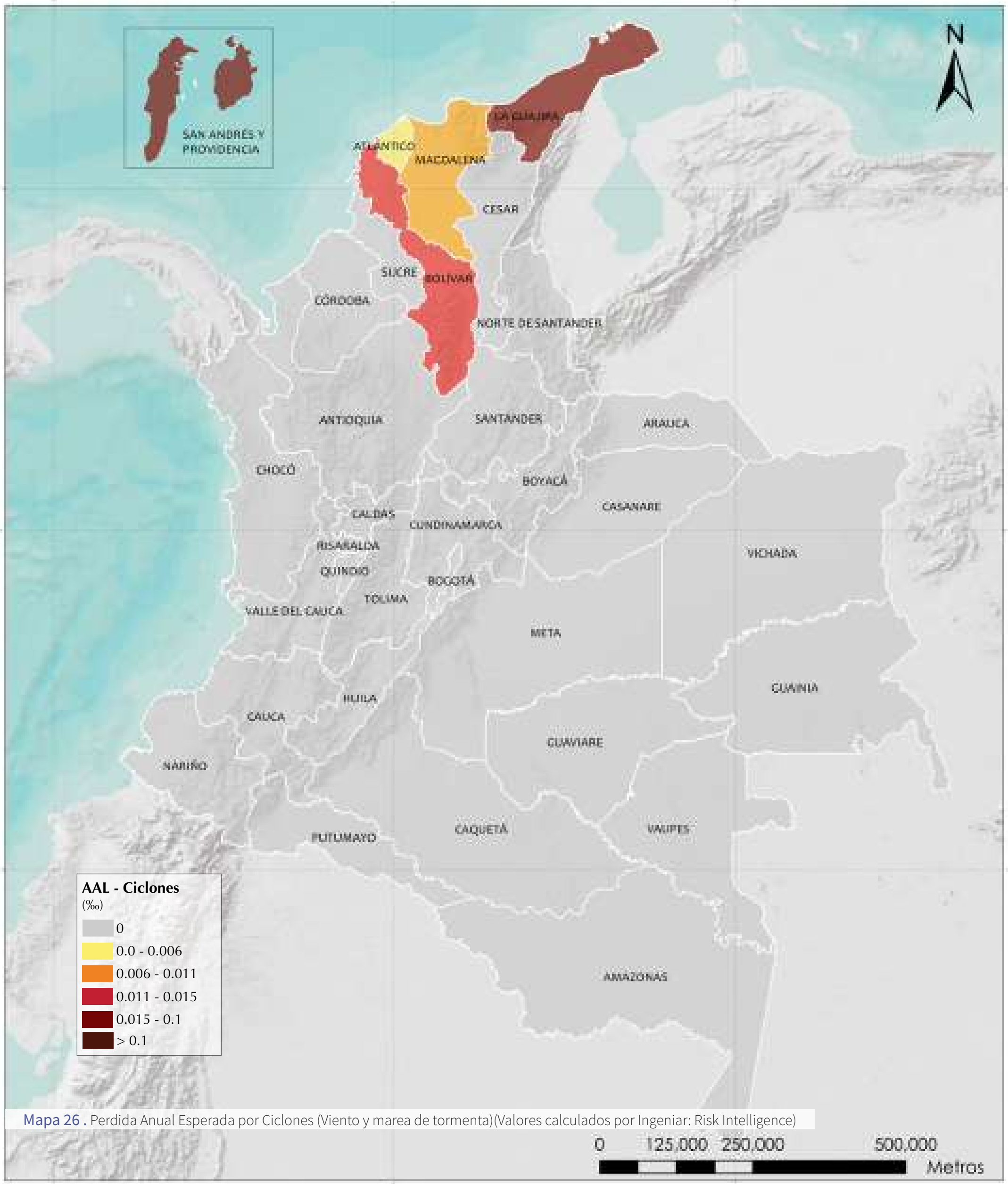


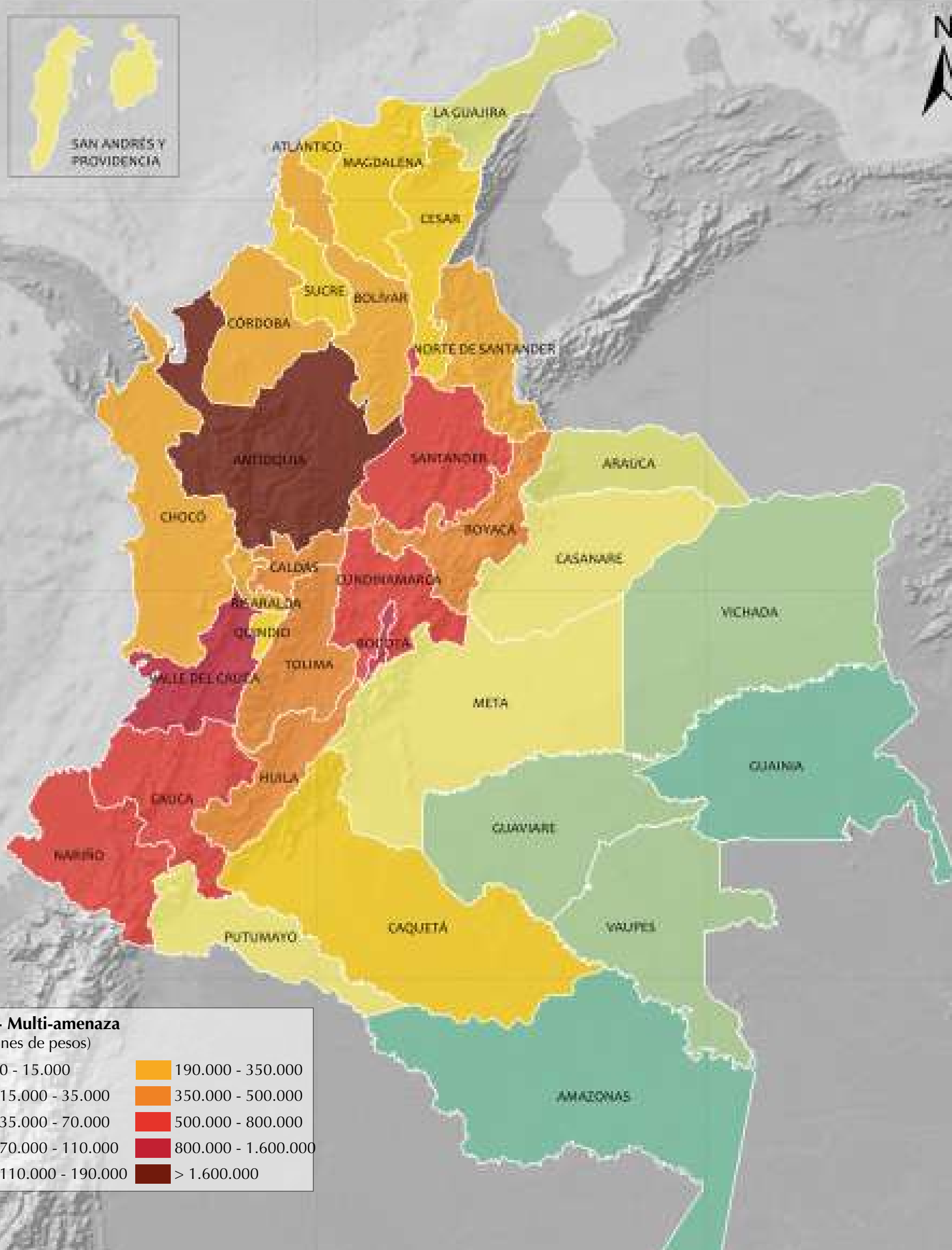
Mapa 22 . Perdida Anual Esperada por Tsunami (%) (Valores calculados por Ingeniar: Risk Intelligence)











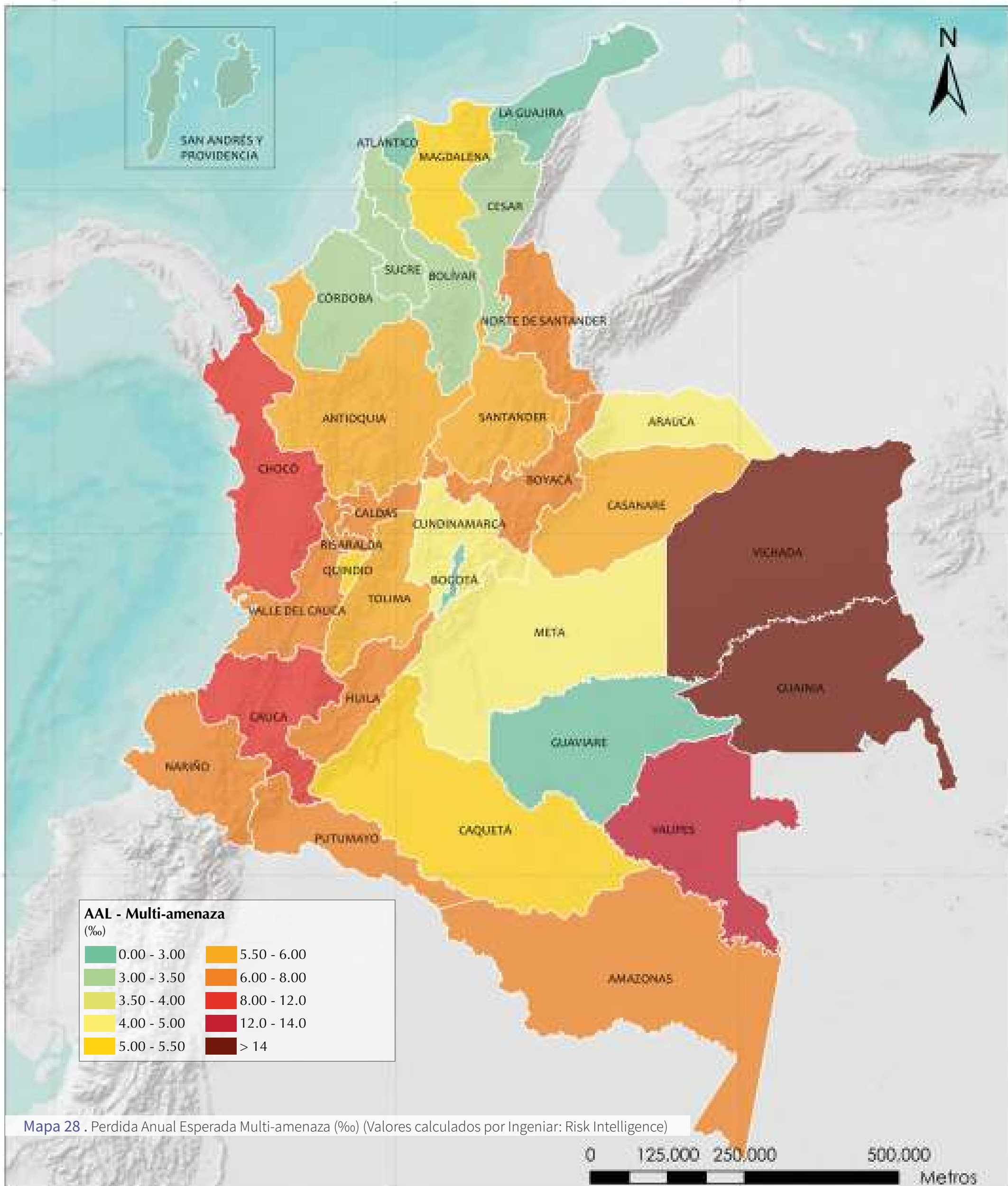
AAL - Multi-amenaza

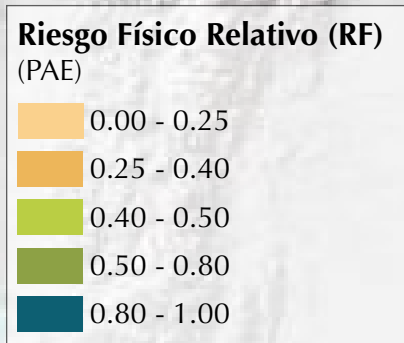
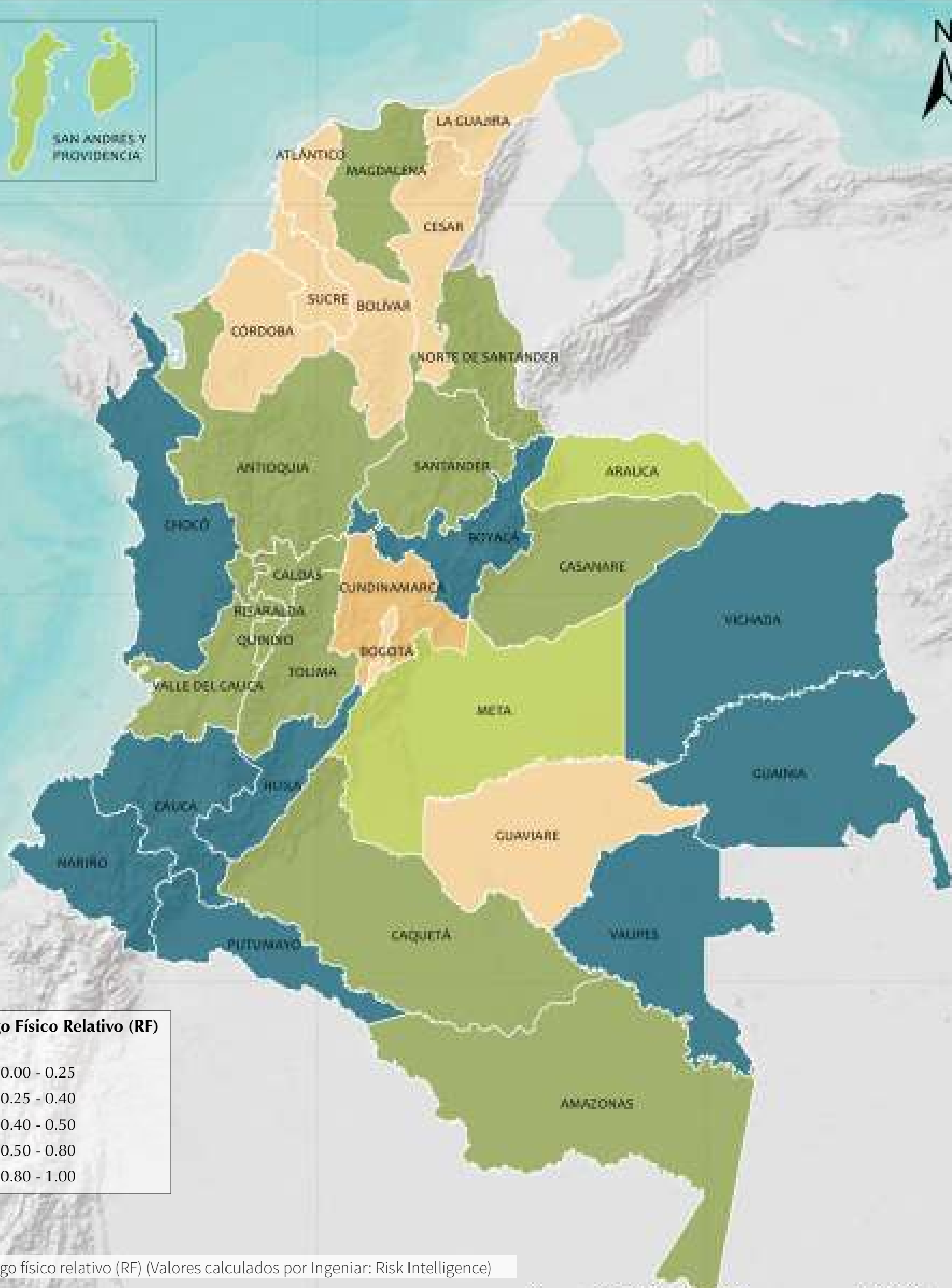
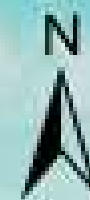
(Millones de pesos)

0 - 15.000	190.000 - 350.000
15.000 - 35.000	350.000 - 500.000
35.000 - 70.000	500.000 - 800.000
70.000 - 110.000	800.000 - 1.600.000
110.000 - 190.000	> 1.600.000

Mapa 27 . Perdida Anual Esperada Multi-amenaza (Millones de pesos) (Valores calculados por Ingeniar: Risk Intelligence)

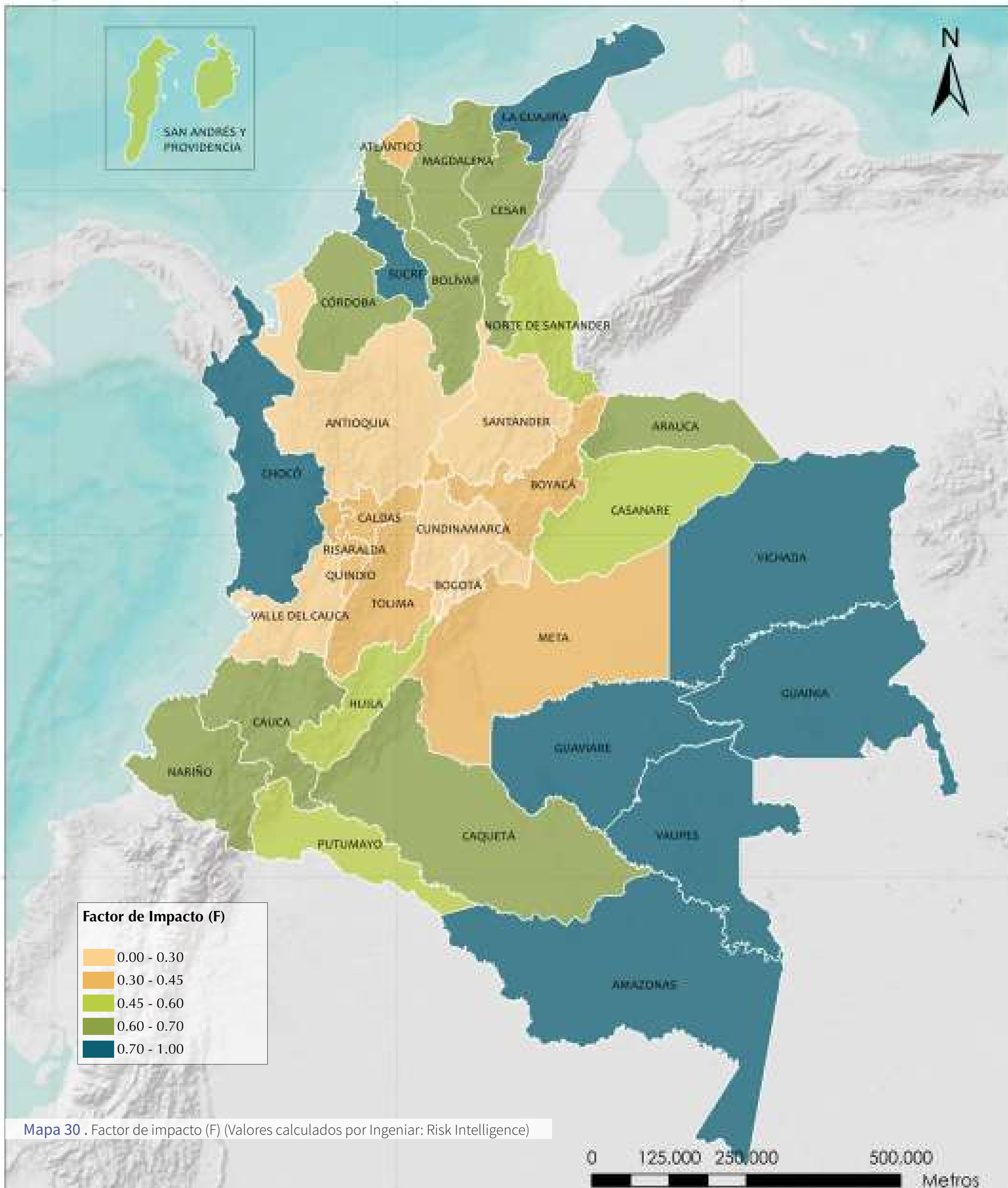
0 125.000 250.000 500.000
Metros

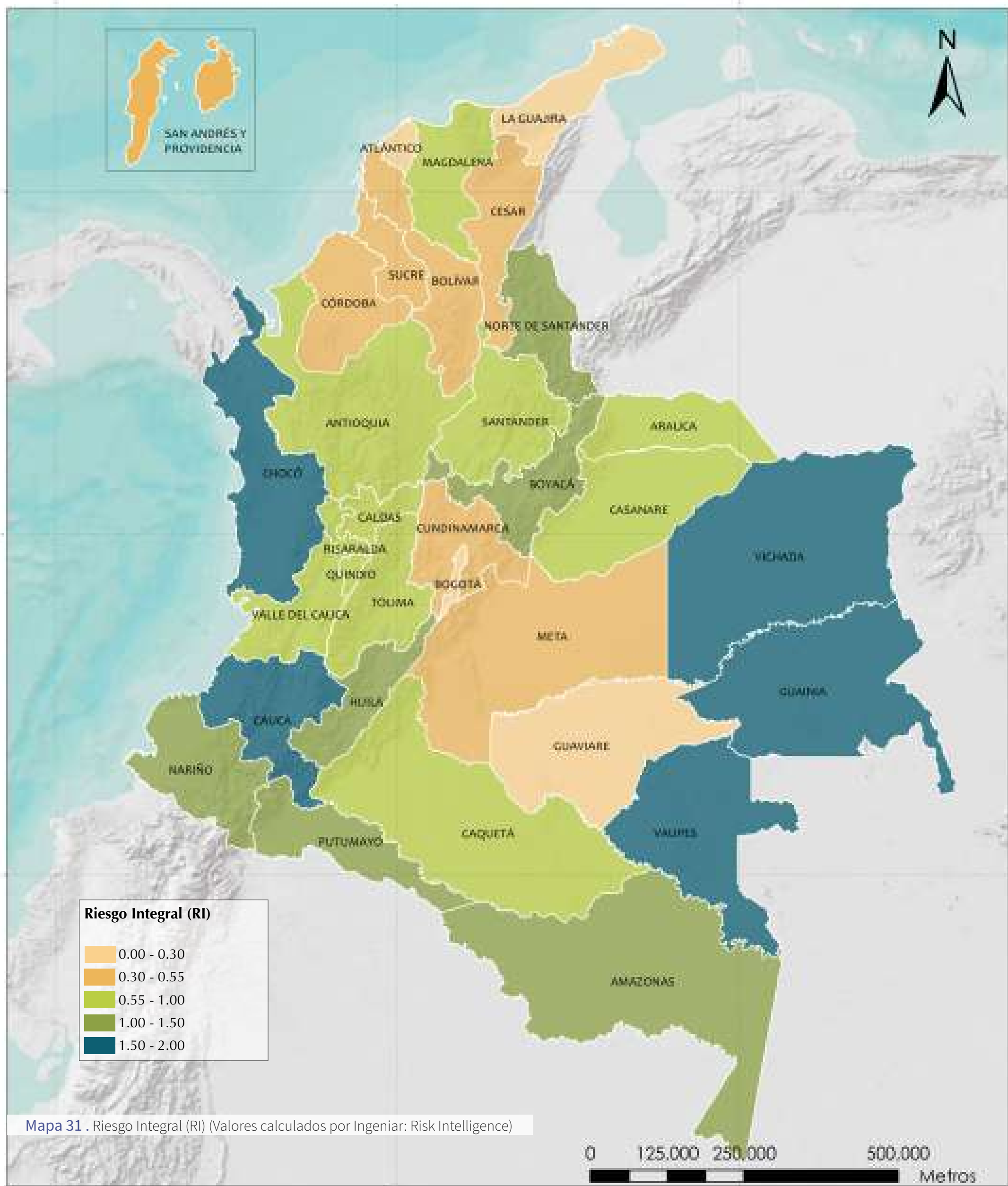




Mapa 29 . Riesgo físico relativo (RF) (Valores calculados por Ingeniar: Risk Intelligence)











5. Casos locales

En este capítulo se presentan diferentes casos locales de evaluación de amenazas y riesgo desarrollados por Ingeniar: Risk Intelligence. Algunas de estos estudios se han llevado a cabo en el marco de proyectos de desarrollo y de gestión del riesgo de ciudades como Bogotá, Manizales y Pasto y de regiones como La Mojana (Cardona, 2016). El caso de Medellín es un caso analítico con información de la amenaza sísmica y el levantamiento de la información de exposición de las edificaciones de la ciudad.

Por otro lado, la evaluación probabilista del riesgo por huracán en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina ha sido desarrollado exclusivamente para esta

publicación -Atlas de Riesgo de Colombia: Revelando los Desastres Latentes-. Se generó un modelo específico de amenaza por viento y marea de tormenta, la base de datos de exposición se obtuvo con base en información disponible en el DANE, se asignaron las funciones de vulnerabilidad correspondientes a cada tipo estructural y finalmente se llevó a cabo la evaluación del riesgo por viento y marea de tormenta utilizando la plataforma CAPRA Nueva Generación, desarrollada por Ingeniar: Risk Intelligence¹.

Los casos locales y la evaluación del riesgo a nivel nacional siguen la misma “aritmética” de cálculo, como se ilustra en esta publicación. El Atlas es un punto de

partida para estimular la evaluación en detalle y con alta resolución del riesgo a nivel subnacional para impulsar la toma de decisiones informada y la formulación de acciones e intervenciones de reducción y transferencia del riesgo y de manejo de desastres.



5.1. Evaluación del riesgo para la planificación - Manizales

En el marco de un convenio interinstitucional entre Corpocaldas y Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, se desarrolló un conjunto de estudios, en forma articulada, para cuantificar, de forma probabilista, el riesgo físico de la ciudad de Manizales, llevando a cabo de manera consistente la evaluación de amenazas, la caracterización de la exposición de la ciudad, la vulnerabilidad de los activos o elementos expuestos y la valoración del riesgo propiamente dicho. El propósito, en parte de esta iniciativa, fue fortalecer los sistemas de información, instrumentación y monitoreo y llevar a cabo la evaluación detallada del riesgo por los fenómenos naturales más relevantes, con el fin de establecer una estrategia integral de reducción del riesgo de desastres, cubriendo aspectos como el refuerzo de estructuras existentes, la actualización del esquema de subsidio cruzado para el aseguramiento colectivo por terremoto, el análisis probabilista de beneficio/costo de intervenciones estructurales y la incorporación de las amenazas y el riesgo en la planificación, el ordenamiento territorial, los usos del suelo y en los planes de gestión del riesgo y respuesta a emergencias de la

ciudad.

Algunos de los estudios que se elaboraron fueron los siguientes:

- La evaluación probabilista de la

amenaza sísmica como insumo para la actualización y armonización de la microzonificación sísmica para la aplicación de las normas nacionales de sismo resistencia (NSR-10) y para llevar a cabo la evaluación probabilista

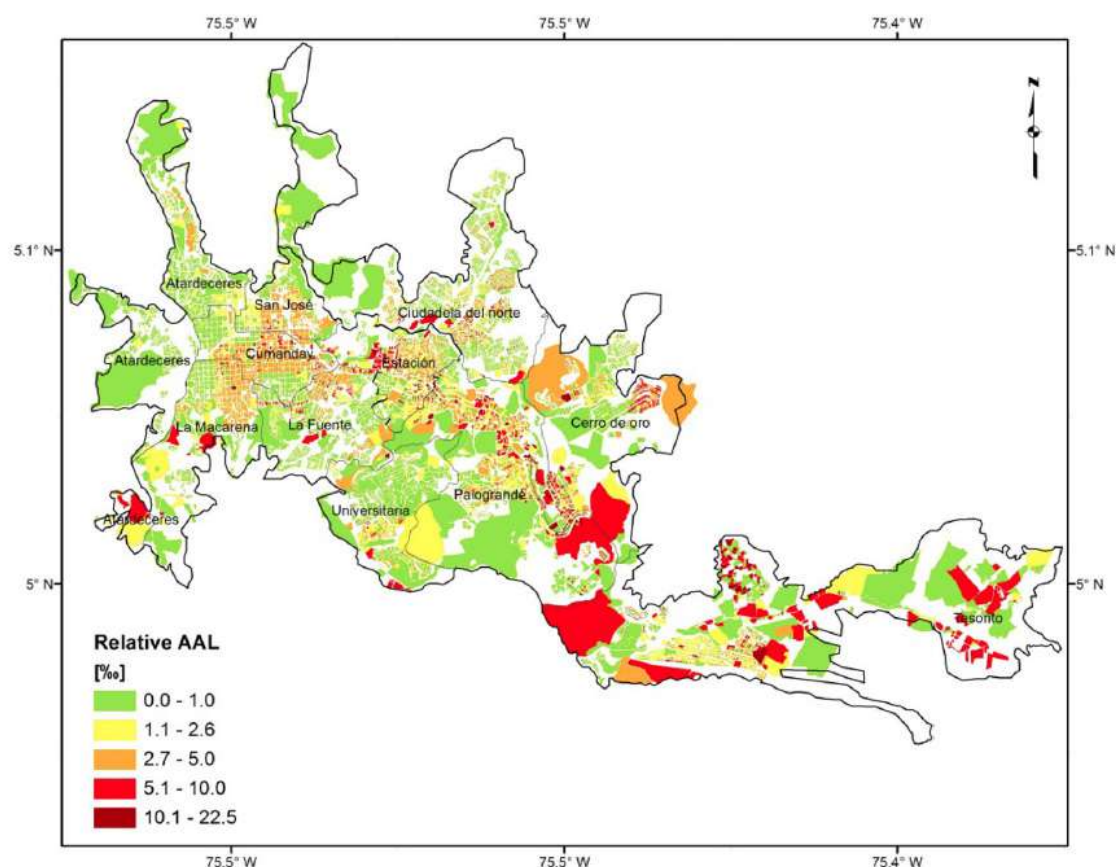


Figura 36. Distribución de la Pérdida Anual Esperada Relativa (%) AAL para el activo de edificios de Manizales (Marulanda, 2014).

del riesgo en forma detallada, edificio por edificio, con fines de protección financiera (seguros), mejorar la respuesta a emergencias y la evaluación automática de daños pos-terremoto, utilizando una nueva instrumentación sísmica. Igualmente, con el inventario de las redes de acueducto y alcantarillado, se realizó el estudio del riesgo del sistema de Aguas de Manizales, con el propósito de fortalecer el plan de contingencia de la empresa, definir el instrumento financiero más apropiado de transferencia del riesgo y priorizar las medidas de reducción de vulnerabilidad y riesgo para elevar el nivel de resiliencia de la red ante la acción sísmica y por deslizamientos detonados por lluvias y sismo (Salgado et al. 2017) (Figura 36).

- Ampliación de la red de estaciones hidrometeorológicas de la ciudad, se

implementaron sistemas de alerta en varias quebradas y se llevaron a cabo estudios sobre el cambio en las lluvias y la temperatura debido al calentamiento global. Se revisaron las estimaciones de la amenaza por inundaciones para las rondas hídricas como complemento a los estudios probabilistas de inundaciones realizados para la cuenca del río Chinchiná en el marco del POMCA de dicha cuenca.

- Inventario de rellenos y de deslizamientos, se instrumentaron laderas para monitorear su nivel freático y se evaluó la amenaza y el riesgo por deslizamientos con base en información topográfica y geológica detallada con píxeles de 1 m y un total de veintinueve variables que dan cuenta en forma diferencial de la susceptibilidad de movimientos en masa. La amenaza

y riesgo para las edificaciones, por deslizamientos, se utilizaron como insumos para el plan de ordenamiento territorial (POT) de la ciudad, sirviendo como determinante para la definición de áreas de desarrollo condicionado, usos del suelo y la estructura ecológica de la ciudad.

- Se realizó un análisis probabilista de la amenaza de caída de cenizas volcánicas debido a posibles erupciones del Volcán Nevado del Ruiz ubicado a 25 km al sureste de Manizales y estudios sobre flujos de lodo que podrían generarse y transitar en el río Chinchiná (Figura 37)ⁱⁱ. Estos estudios sirvieron para definir los retiros y parques lineales en una de las zonas de expansión de la ciudad de acuerdo con el nuevo POT recientemente aprobado.

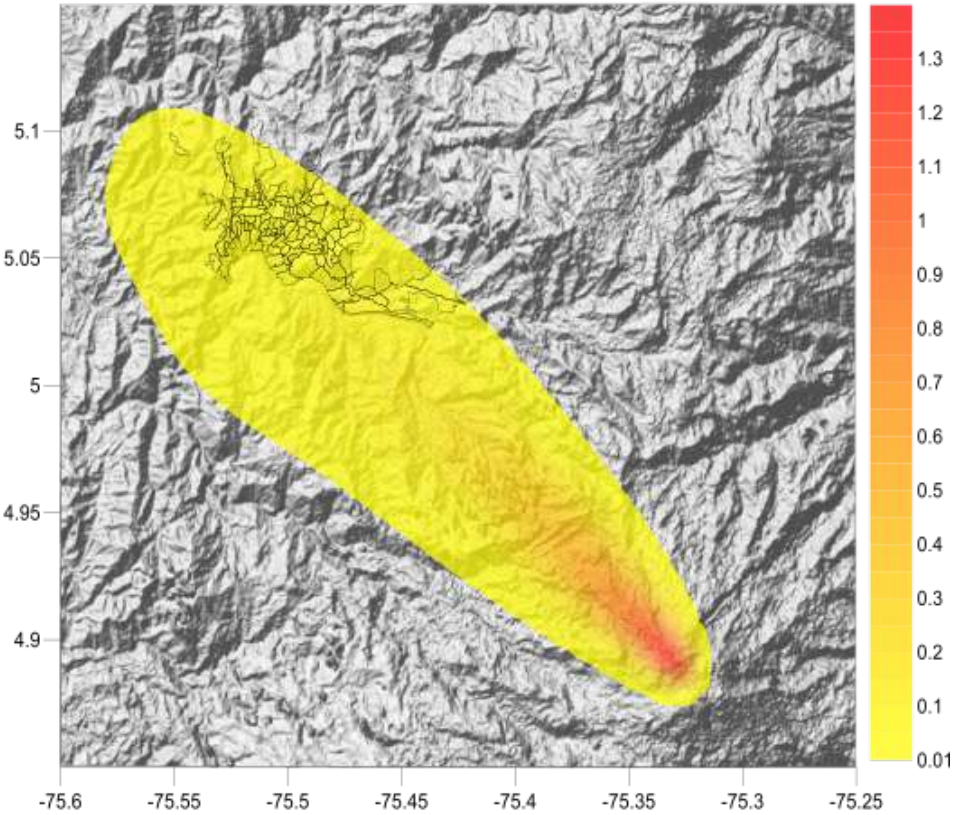


Figura 37. Mapa de amenaza de ceniza volcánica (m) (Salgado et al. 2014)

Todos estos estudios de amenazas sirvieron para la estimación holística multi-amenaza del riesgo en la ciudad, que ha servido para el plan de gestión del riesgo de desastres y la estrategia para la respuesta a emergencias, aprobados por decreto por la administración municipal (Carreño et al. 2018). De igual forma, el esquema de aseguramiento colectivo, que se utiliza en la ciudad, está basado en los resultados de la evaluación probabilista del riesgo realizada en forma detallada edificio por edificio. Los beneficiarios de este mecanismo de aseguramiento no sólo son los grupos de propietarios de edificaciones de los estratos

medio y alto (de acuerdo con la clasificación socioeconómica en Colombia, estratos 3 a 6) que suscriben sus pólizas en forma voluntaria con el pago del impuesto predial, sino también los propietarios de más bajos ingresos (estratos 1 y 2 y parte del 3). Se trata de una especie de subsidio cruzado, como lo ilustra la *Figura 38*, mediante el cual con base en la participación de los propietarios que adquieren voluntariamente el seguro se cubre el seguro de los propietarios que no están en posibilidad de adquirirlo ni en capacidad de pagar el impuesto, cuyo cobro permite el recaudo de las primas (Marulanda et al. 2014, 2017).

Mediante este instrumento de transferencia del riesgo, el gobierno local no asegura las edificaciones de los ciudadanos, sino que recauda las primas que trasfiere a la compañía de seguros que lleva el programa, pero al mismo tiempo promueve la cultura de seguro y logra que en caso de incendios, deslizamientos, inundaciones o un terremoto importante hay la posibilidad de contar con recursos para enfrentar la crisis y la recuperación post-desastre.

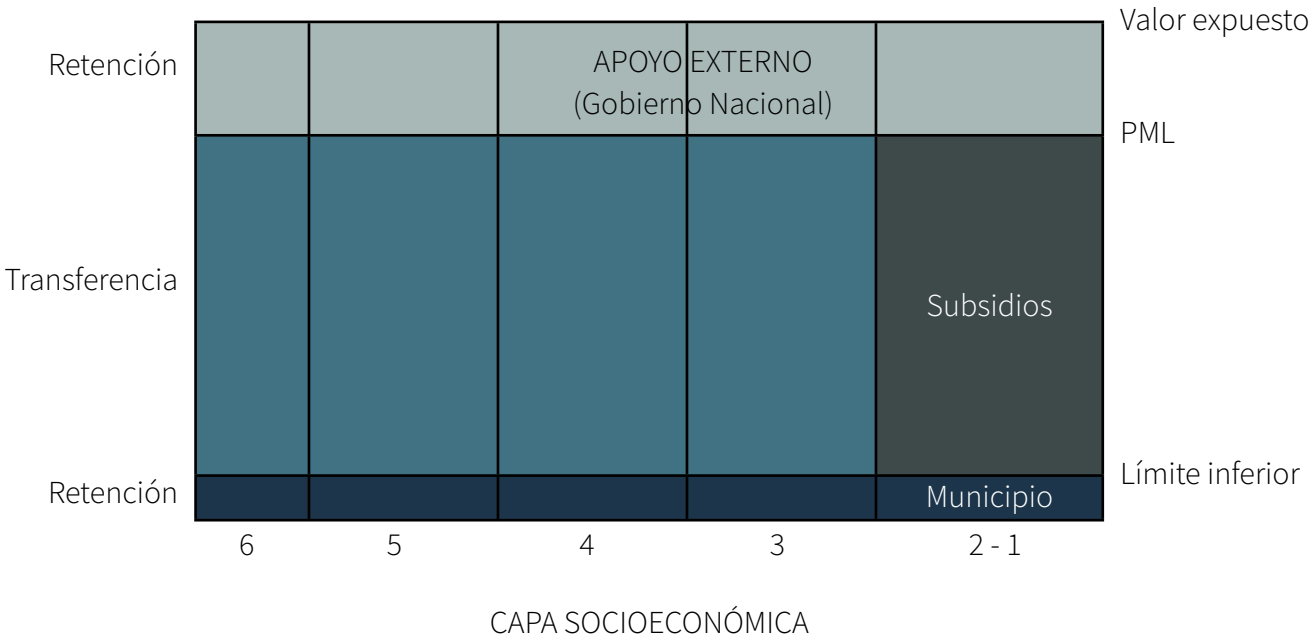


Figura 38. Esquema financiero de aseguramiento subsidiado para Manizales (Marulanda et al. 2014)



5.2. Índice de riesgo sísmico urbano - Medellín

De acuerdo con último censo, Medellín es una ciudad de más de 2 millones de habitantes y tiene más de 240 mil edificaciones públicas y privadas. La ciudad está localizada en una zona de amenaza sísmica intermedia, para efectos de aplicación de las normas de diseño y construcción sismorresistente, sin embargo debido a que no han ocurrido terremotos destructivos importantes desde su fundación, algunas personas tienen una percepción de que el riesgo sísmico de la ciudad es bajo, a pesar que terremotos asociados a las diferentes fallas activas del entorno cercano podrían generar daños importantes e interrupciones significativas en su infraestructura (AIS 2010; Salgado-Gálvez et al. 2010, 2014^a, 2014b, 2015).

En los últimos años, Medellín ha experimentado un rápido crecimiento y una importante transformación urbana que es de especial relevancia desde el punto de vista económico para el país (DANE, 2014). Diferentes áreas de la ciudad han cambiado en términos de tipos de edificaciones,

densidad poblacional y disponibilidad de espacios públicos dado que las casas de pocos pisos han estado siendo demolidas para construir edificios altos en los que se concentra una importante parte de la población; en un proceso claramente definido en zonas de ingresos medio-altos y altos de la ciudad. Esto también ilustra la importante desigualdad, desde el punto de vista social, que existe en la ciudad y en el país.

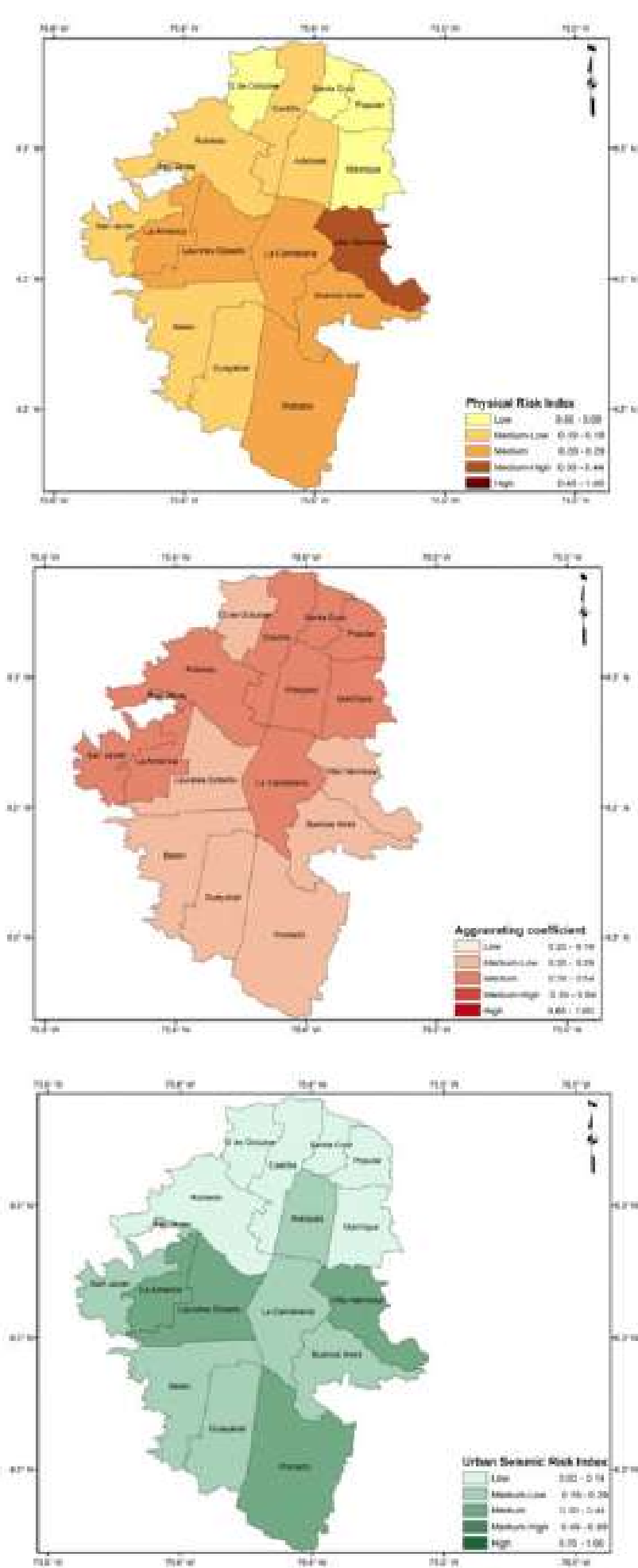
Mediante el uso de los resultados de la evaluación probabilista del riesgo sísmico de la ciudad (Salgado Gálvez et al 2014a), con un nivel de resolución edificio por edificio (Alcaldía de Medellín 2010), considerando la amenaza sísmica en términos del conjunto de eventos generados en forma estocástica, usando el programa CRISIS 2007 (Ordaz et al. 2007), y la respuesta dinámica del suelo (SIMPAD et al. 1999), se calcularon, a nivel de comuna, las pérdidas anuales esperadas por sectores así como los afectados y otros posibles efectos directos (Salgado-Gálvez et al. 2014a). Mediante el uso del módulo

de evaluación holística de la plataforma CAPRA para la evaluación multi amenaza del riesgo, se realizó la evaluación integral considerando aspectos de fragilidad social y de falta de resiliencia de cada una de las 16 comunas de la ciudad mediante el uso de indicadores socio-económicos con el objetivo de capturar las condiciones que agravan los efectos físicos directos y derivan en el impacto o las implicaciones en cada comuna, permitiendo lectura integral del riesgo (Carreño et al. 2012). En la *Figura 39* se presentan los mapas de los resultados obtenidos para el riesgo físico, el coeficiente de agravamiento y el riesgo total para las comunas de Medellín.

El índice de riesgo sísmico urbano es útil para comunicar el riesgo a los tomadores de decisiones y expertos y permite además identificar las zonas que pueden ser potencialmente problemáticas desde diferentes dimensiones de la vulnerabilidad y las acciones diferenciadas de reducción del riesgo en cada comuna.

Este enfoque del riesgo ha sido de utilidad no sólo para identificar la concentración del riesgo físico sino también para identificar las condiciones sociales y de resiliencia que agravan o amplifican el riesgo físico y a su vez son también aspectos que favorecen la construcción del riesgo si no son intervenidos en las diferentes comunas de la ciudad. Por lo tanto, este enfoque es una técnica útil para facilitar tanto la gestión prospectiva como la correctiva del riesgo de desastres considerando la reducción del riesgo como un componente de la planificación urbana y del desarrollo socioeconómico; lo que sólo es factible de lograr mediante acciones institucionales a nivel y con un enfoque local. De igual manera este es un ejemplo de cómo una investigación multidisciplinar en reducción del riesgo de desastres contribuye a evidenciar que los análisis del riesgo son ineludibles y de gran relevancia para los procesos de toma de decisiones, relacionados con la seguridad, la sostenibilidad y la transformación del desarrollo (Salgado-Gálvez et al. 2014c).

Figura 39.
Resultados del
índice de riesgo
físico, coeficiente
de agravamiento
y riesgo total por
comuna para
Medellín (Salgado et
al. 2016).





5.3. Sistema automático de evaluación de daños post terremoto a nivel urbano - Bogotá (LISA) y Manizales (SISMAN - LISA)

LISA (Laboratorio de Instrumentación Sísmica Automática) es una herramienta pensada para aportar en la gestión del riesgo sísmico de Bogotá y Manizales, en particular en lo que se refiere a la atención a emergencias, dado que brinda insumos importantes para la correcta asignación de los recursos físicos y humanos en situación de crisis. El sistema funciona mediante el monitoreo en tiempo real de la Red de Acelerógrafos de cada ciudad en la cual, tras la ocurrencia de un sismo, y a nivel de roca firme, se registran las aceleraciones del movimiento fuerte. Este acelerograma es enviado mediante telemetría al repositorio central de información del Instituto Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático (IDIGER), en el caso de Bogotá, y al Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) de la Universidad Nacional de Colombia, en el caso de Manizales, en donde el sistema LISA realiza inicialmente el procesamiento de validación sobre la señal para determinar

si corresponde o no a un evento sísmico. Una vez validada la señal, se modela la respuesta dinámica unidimensional de los suelos mediante un modelo geotécnico compuesto por estratigrafías sintéticas sobre una malla densa de puntos que conforman una estructura rectangular de sitios de cálculo sobre el área de la ciudad. De esta manera se obtiene un acelerograma completo a nivel de superficie del terreno en cada nodo de la malla. A partir de estos acelerogramas, se obtienen mapas de distribución de intensidad de movimiento fuerte para toda la ciudad (shakemap), en términos de aceleración pico del suelo (PGA) y aceleraciones espectrales, entre otras. En seguida, el sistema determina, para cada edificación de la ciudad, el valor esperado del daño dada la ocurrencia de la intensidad de movimiento fuerte en su ubicación, así como la probabilidad de colapso de la edificación (también en las tuberías de acueducto y alcantarillado, en el

caso de Manizales) y el número probable de personas fallecidas y heridas. El resultado es reportado en cuestión de minutos, en forma de cifras generales indicativas y mapas agregados por manzana y barrio, a cuentas de correo y teléfonos celulares de usuarios autorizados del IDIGER, en Bogotá, o del Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres, en Manizales. La *Figura 40* ilustra la estructura principal del Sistema LISA.

El LISA debe verse no como una plataforma rígida, sino como un sistema flexible que está continuamente en proceso de actualización en la medida que se obtiene más y mejor información. Esto debido a que todas las capas de información y datos que alimentan el sistema son reemplazables por las nuevas versiones de los mismos. Esto convierte al LISA en un instrumento vivo capaz de beneficiarse de los avances en la ciencia y técnica de la ingeniería sísmica.



Figura 40. Estructura principal del sistema LISA (Bernal y Cardona, 2018a)



5.4. Volcán Galeras

El volcán Galeras está ubicado aproximadamente a 10 kilómetros al oeste del área urbana de Pasto, la capital del Departamento de Nariño en Colombia. Este es uno de los volcanes más activos en el área y ha sido estudiado ampliamente por diferentes investigadores nacionales e internacionales. El volcán tiene un observatorio con personal permanente y equipos de última tecnología con datos en tiempo real y telemétricos que al mismo tiempo permiten contar con un sistema de alerta muy robusto y ejemplar.

A continuación se hace referencia a la evaluación probabilista del riesgo que hizo parte de un proyecto de asistencia técnica financiado por Banco Mundial, donde el principal objetivo consistió en involucrar expertos locales en el campo de la evaluación de la amenaza volcánica en la evaluación probabilista del riesgo para complementar, integrar y desarrollar aplicaciones relacionadas con la gestión y reducción del riesgo de desastres.

Con base en estudios previos de amenaza y con información existente de la exposición y la vulnerabilidad (principalmente, debido a caída de ceniza), esta evaluación del riesgo se desarrolló en conjunto con el SGC, con el

fin de contribuir a mejorar la capacidad de los especialistas y así poder replicar este tipo de evaluaciones en otros casos de interés.

La amenaza volcánica se cuantificó en términos de tres intensidades, caída de ceniza, flujos piroclásticos y lava. Los últimos dos requieren información topográfica detallada en términos de modelos digitales de elevación. La evaluación del riesgo se llevó a cabo en los municipios localizados alrededor del volcán que son los que podrían resultar más afectados en caso de una fuerte erupción.

La evaluación de la amenaza se llevó a cabo usando información existente y estudios que fueron usados como insumos para la representación probabilista. La *Figura 41* presenta el mapa de amenaza en términos de flujos piroclásticos para el Volcán Galeras obtenido con el software VHAST (Bernal, 2010).

La caracterización de los activos expuestos se desarrolló en términos de las condiciones actuales y el tipo de cubierta de las edificaciones. Ésta última es un parámetro de gran relevancia cuando se estima el riesgo por la caída de cenizas volcánicas.

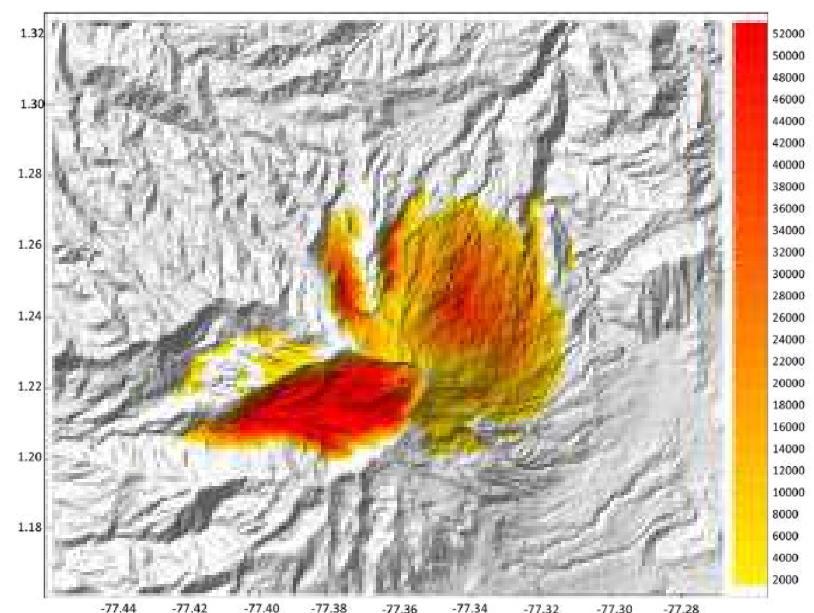


Figura 41. Mapa de amenaza de flujos piroclásticos del Volcán Galeras

Las funciones de vulnerabilidad para flujos piroclásticos o lava son de tipo binario; es decir, si el elemento es afectado en algún grado por el evento peligroso, la pérdida asociada es en la práctica total. Una situación diferente ocurre con la caída de cenizas volcánicas, dado que la afectación en los elementos expuestos depende en gran parte de la cantidad de ceniza acumulada en las cubiertas.

Los resultados del riesgo se obtuvieron en términos de la curva de excedencia de pérdidas de la cual se obtuvo la Pérdida Anual Esperada. La *Figura 42* presenta los resultados del riesgo en forma de mapas en términos de la pérdida anual esperada relativa y absoluta debido a la caída de ceniza en el portafolio de elementos expuestos.

Mayores detalles de la evaluación del riesgo se pueden encontrar en Cardona et al., 2015.

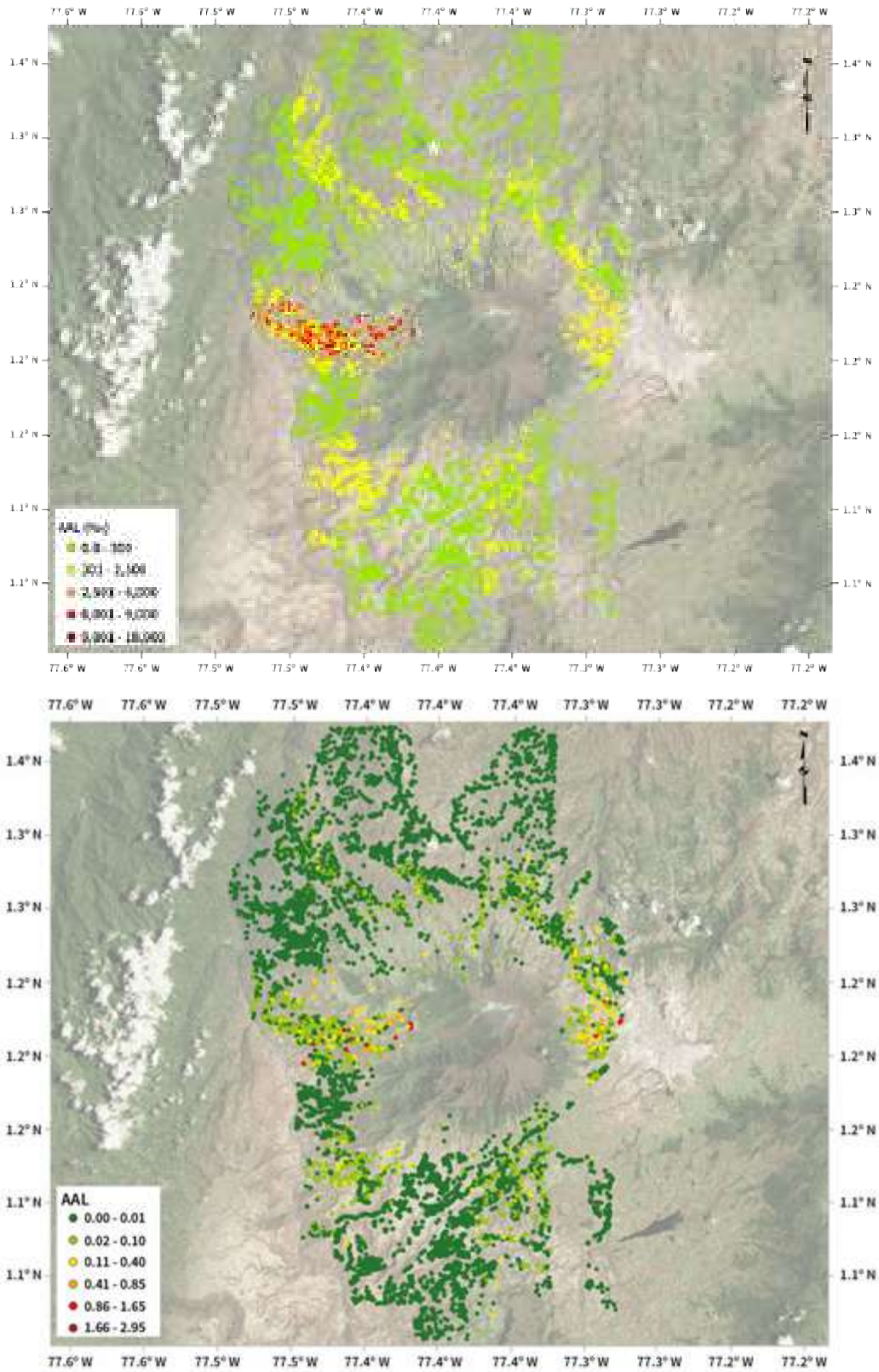


Figura 42. Arriba: Distribución por activo en los alrededores del Volcán Galeras de la Pérdida Anual Esperada Relativa (%). Abajo: Distribución por activo en los alrededores del Volcán Galeras de la Pérdida Anual Esperada Absoluta (millones de pesos) (Bernal y Cardona, 2011).



5.5. Evaluación del riesgo por inundaciones en La Mojana

La región de La Mojana es una gran área de planicie justo en la transición entre la región Andina y la región Caribe localizada en el noroeste de Colombia. En esta área confluyen el Río Magdalena, el Río Cauca y el Río San Jorge, formando así una especie de delta aluvial en el interior del país, en donde en sus casi 1.089.200 hectáreas (DDTS-DNP, s.f) habitan más de 400 mil personas distribuidas en once municipios entre los departamentos de Antioquia, Bolívar, Córdoba y Sucre.

En esta región abundan los cauces de agua y, al ser un terreno extremadamente plano, también abundan ciénagas y humedales permanentes y temporales. Colombia cuenta en total con 20.252.500 hectáreas de humedales (Ministerio del Medio Ambiente, 1999), de los cuales el 71% de los humedales permanentes o semipermanentes se encuentran en la región Caribe, de los cuales el Complejo de la Depresión Momposina se considera el más importante, seguido del Complejo del Magdalena Medio y el del Río Atrato (Ministerio del Medio Ambiente, 2002). Los humedales de La Mojana forman parte de la Depresión Momposina y su

importancia radica en que estos actúan como reguladores de los tres ríos que limitan La Mojana, amortiguando inundaciones y facilitando la decantación y acumulación de sedimentos que son funciones clave para el equilibrio ecológico de la región y el país (Aguilera, 2004). Las planicies de La Mojana son periódicamente inundadas en pulsos de inundación que generan zonas de transición acuática-terrestre conocidas como playones donde las especies periódicamente aprovechan la gran cantidad de sedimentos traídos por la inundación, y donde a su vez los pobladores aprovechan estas especies. Por esta razón, la dinámica de los pulsos de inundación afecta no sólo el ecosistema sino también a los pobladores.

En La Mojana el 52,2% de la población es rural y el 47,7% habita en las cabeceras. En municipios como Nechí, Magangué y San Marcos, que son los más poblados, la población urbana es mayor a la rural, pero en los demás municipios la población rural llega a cifras superiores al 70% (DANE, 2005). Esto necesariamente repercute en las actividades económicas y productivas de la región, donde existe una preponderancia

de actividades agropecuarias, agrícolas y de pesca como la fuente generadora de ingresos tanto de la población rural como en las cabeceras. La ganadería es posiblemente la principal actividad económica en la región, la cual ha sufrido una gran expansión en años recientes (Leibovich et al. 2015).. En general la población de La Mojana se encuentra en situación de pobreza: en el 2005, usando el Índice de Pobreza Multidimensional, el 83,8% de la población era pobre, un 70% superior al promedio nacional (DANE, 2005).

La unión de todas estas condiciones presentes en La Mojana crea un ambiente de alto riesgo tanto físico como social. La temporada de lluvias agravada por el fenómeno de La Niña del 2010 – 2011 causó efectos amplios y severos en toda la región, inundando cabeceras municipales, destruyendo viviendas y construcciones comerciales e institucionales, inundando también cultivos y ganado, y en general causando afectados y desplazados: según la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (Leibovich et al. 2015) entre el 2010 y el 2012 hubo un total de 417.321

personas afectadas y 35.482 viviendas afectadas. Anteriormente, en el 2004 – 2005 ocurrió otro evento masivo de inundación donde 142.824 personas y 8.642 viviendas se vieron afectadas, y más atrás aún, en el periodo entre 1999 y 2009 ocurrieron otros eventos de inundación importantes. Estas consecuencias devastadoras son facilitadas muchas veces por la misma acción de los pobladores y del Estado al interferir con el comportamiento natural del ecosistema creando asentamientos espontáneos en zonas inundables sin ningún tipo de planeación u ordenamiento, talando vegetación nativa para dar paso a tierras ganaderas, construyendo diques-carreteras para evitar el desborde de agua, y abriendo huecos a los mismos diques en épocas de sequía.

En el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014: “Prosperidad para todos” se planteó como uno de los lineamientos estratégicos para la formulación de políticas y estrategias regionales diferenciadas del eje de crecimiento sostenible, la planificación y ordenamiento del uso productivo del suelo a través de la implementación de estrategias de reconversión de los actuales usos con el fin de aumentar la productividad regional, proteger y restaurar los ecosistemas. En el plan se propone la ejecución del “Plan Integral para el Ordenamiento Ambiental y Desarrollo Territorial de La Mojana” en el cual se estableció su desarrollo integral a nivel de macro-proyecto con impacto en el desarrollo regional y nacional, buscando convocar a los diferentes actores en torno a su conservación y restauración, la generación de nuevas opciones de desarrollo social y económico, el fortalecimiento de su cohesión social y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población de los municipios que la integran.

En el desarrollo del proyecto de La Mojana del Fondo Adaptación, participaron diversos actores, los cuales jugaron un papel importante, cada cual desde su ámbito de aplicación. Cabe mencionar a grupos como el Equipo de Modelación Hidrodinámica del Fondo Adaptación (actualmente el Centro Nacional de Modelación del IDEAM), la Unión Temporal Colombo-Canadiense, Geografía Urbana, Pastoral Social, Herencia Caribe, Evolution, Suelos e Ingeniería, El Equipo de Formulación del Plan de Acción y finalmente el Equipo de Modelación Probabilista del Riesgo (Omar Darío Cardona A.). Este último, jugó un papel fundamental en el sentido de asesorar, hacer seguimiento en el ajuste del enfoque metodológico de la modelación hidrológica e hidráulica a un enfoque por escenarios, el cual es necesario para la evaluación probabilista del riesgo. El equipo de Modelación Probabilista del Riesgo recopiló los productos de todos los demás equipos como insumos para proveer una modelación del riesgo que integra todos los aspectos relevantes para la región. También se destaca el papel de las personas que estuvieron a cargo de la coordinación y supervisión que facilitaron que la integralidad del conjunto de actividades se lograra y por haber atendido las recomendaciones de este equipo en la búsqueda de dicha integralidad.

Este estudio consistió en realizar una evaluación del riesgo físico por inundación en La Mojana, siguiendo una metodología totalmente probabilista, en la cual las incertidumbres asociadas a la ocurrencia de las inundaciones y a la generación de daños en los elementos expuestos, son incluidas en los cálculos de una manera racional, lo cual permite estimar métricas del riesgo asociadas a probabilidades de ocurrencia de diferentes cuantías de pérdida económica. Para esto, primero se modeló la amenaza por inundación, para lo cual se trabajó con

el Equipo de Modelación Hidrodinámica del Fondo Adaptación (actualmente el Centro Nacional de Modelación del IDEAM). Así mismo, este subproducto de la amenaza permitió la priorización de las intervenciones de vivienda programadas por el Fondo Adaptación. Después se conformó una base de datos de elementos expuestos (edificaciones) en la región a partir de diversas fuentes de información (Unión Temporal Colombo-Canadiense, Pastoral Social y los sectoriales de vivienda, salud y educación del Fondo), la cual contiene la mejor información disponible sobre edificaciones en la región. Así mismo, y con base en los resultados entregados por la Unión Temporal Colombo-Canadiense, y estudios anteriores ejecutados por terceros (CORPOICA, Asociaciones gremiales), se produjo una base de datos de cultivos, a un nivel de detalle sin precedentes en trabajos de esta naturaleza. Con base en interpretación de imágenes satelitales, se entrenó una red neuronal para determinar si el espectro conformado por las diferentes bandas de información de las imágenes satelitales correspondía a determinado cultivo, o a territorios con otros usos o incluso cuerpos de agua.

En cuanto a la vulnerabilidad, con base en la información existente de elementos expuestos se desarrollaron modelos de vulnerabilidad ante inundaciones de diferentes tipos de construcciones y de cultivos. El enfoque utilizado fue totalmente probabilista, con curvas de vulnerabilidad que dan cuenta de la variación de los momentos de probabilidad de las pérdidas en los elementos expuestos, como función del nivel de inundación. Con estos tres módulos se realizó el cálculo del riesgo probabilista, el cual se basa en matemáticas actuariales para describir hacia el futuro el proceso de ocurrencia de desastres y, por lo tanto, cuantificar desde la actualidad

lo que puede ocurrir más adelante dadas las condiciones de exposición y vulnerabilidad en la región. Adicionalmente, se consideraron alternativas de intervención sobre el dique Marginal (cuyos efectos en la amenaza fueron modelados por el Equipo de Modelación Hidrodinámica) y sobre las viviendas rurales (hacerlas palafíticas) y las cabeceras municipales (construirles defensas), para las cuales se realizaron evaluaciones del riesgo que permiten de manera muy clara conocer el efecto o impacto de las intervenciones estructurales en la reducción o aumento del riesgo en la región, y para sus 11 municipios. Las combinaciones de estas intervenciones fueron sometidas a un proceso de optimización con el fin de seleccionar las 10 opciones de intervención más adecuadas para La Mojana.

Estas 10 opciones fueron comparadas entre sí, en términos de riesgo físico, de su impacto ambiental, y en términos de riesgo total, este último calculado de manera integral mediante una técnica de estimación holística del riesgo, la cual permite incorporar aspectos subyacentes del orden social, ambiental e institucional, que son las causas de fondo de la vulnerabilidad y el riesgo en la región. De esta manera fue posible recomendar una serie de líneas y proyectos como propuesta para la evaluación, descripción y priorización en el marco del Plan de Acción de Reducción del Riesgo y la Adaptación al Cambio Climático, en el cual se identifican medidas no estructurales para intervenir dichas causas de fondo, junto con las recomendaciones de intervención estructural dadas por las 10 opciones seleccionadas.

Este trabajo significó la realización de un estudio sin precedentes en relación con la evaluación de la amenaza y riesgo por inundaciones en el país. Es un referente

a nivel nacional, pero también a nivel internacional, debido a que no abundan estudios con el nivel de detalle y rigor con el que se evaluó el riesgo de esta región, dejando como resultado un aporte importante a un proceso construido por múltiples actores. Este estudio es un resultado de la gestión del conocimiento que el Fondo Adaptación y en general el país debe intentar lograr en cada caso para garantizar que a futuro las inversiones en reducción de la amenaza y riesgo sean planificadas con base en estudios robustos, cuidadosos y rigurosos que aborden la evaluación del riesgo en toda su complejidad y de manera que las decisiones sean informadas y se tomen con base en el mejor conocimiento posible (Cardona 2016 a, b).

EVALUACIÓN BENEFICIO-COSTO

Tras evaluar el riesgo de la región de La Mojana en el estado actual se exploraron diferentes medidas de intervención estructural para evaluar su efecto en la región y así poder definir opciones para reducir el riesgo. Se consideraron diferentes variables de intervenciones que generaron una infinidad de combinaciones por considerar y posteriormente se realizó un análisis de beneficio/costo para calificar de mejor manera la bondad de cada combinación. Finalmente, se seleccionaron 8 opciones, entre las que se recomendó la que mejor se adaptaba al objetivo y condiciones del proyecto de intervención.

La intervención recomendada incluye la construcción de muros de protección en la cabecera urbana de Magangué y San Marcos y la adaptación de 13.437 viviendas rurales en palafitos en los municipios de Ayapel y San Benito Abad. La relación beneficio/costo de esta intervención es de 0,20, con un tiempo de alcanzar el punto

de equilibrio de 5,1 años. Esta opción se obtuvo luego de restringir el rango de costos de la intervención entre \$400.000 y \$600,000 millones de pesos (considerando restricción de recursos para la inversión en medidas estructurales y no estructurales) y atendiendo los municipios que obtenían los mayores valores de prima en la condición actual. Por esta razón, se priorizaron los muros de Magangué y San Marcos (con prima en la condición actual de 19,4‰ y 41,2‰, respectivamente) y las viviendas palafíticas de todas las alturas de diseño en Ayapel y San Benito Abad (con prima en la condición actual de 13,6‰ y 16,5‰, respectivamente).

Al comparar las PAE de la la condición actual y la intervención recomendada se puede ver una disminución generalizada para todos los municipios y una disminución notable en la PAE agregada. Para la opción de intervención las pérdidas anuales esperadas (AAL) son de \$49.596 millones, equivalente al 4,7‰ de su valor expuesto, reduciendo considerablemente la AAL comparada con el estado actual, que tiene pérdidas de \$166.600 millones (equivalente a 15,9‰ de su valor expuesto). El rango de pérdidas máximas probables entre 100 y 1.000 años está entre 1,8% y 3,48% para la opción de intervención, mientras que en la condición actual este rango está entre 5.7% y 9.1% del valor total expuesto. Esto indica que la aplicación de la intervención recomendada tiene un efecto positivo en la reducción de las pérdidas máximas probables y en la pérdida anual esperada. En la *Tabla 6* se presentan el valor expuesto y las pérdidas anuales esperadas (AAL) en valor absoluto y relativo, para la condición actual y la opción de intervención recomendada, la *Figura 43* presenta las gráficas de la curva de PML (que representan todo el rango de pérdidas económicas esperadas y su correspondiente periodo de retorno) para los dos casos.

Finalmente, la *Figura 44* muestra los mapas actual y para la opción de intervención de AAL por municipio para la condición recomendada.

Tabla 6. Resultados de riesgo para la condición actual e intervenida (Cardona 2016a, b)

CONDICIÓN ACTUAL			INTERVENCIÓN RECOMENDADA		
Valor expuesto	COP x 10 ⁶	10.461.875	Valor expuesto	COP x 10 ⁶	10.461.875
Pérdida anual esperada	COP x 10 ⁶	167.000	Pérdida anual esperada	COP x 10 ⁶	49.596
	‰	16,0		‰	4,74
PML			PML		
Periodo de retorno	Pérdida		Periodo de retorno	Pérdida	
años	COP x 10 ⁶	%	años	COP x 10 ⁶	%
100	\$ 598.105	5,7	100	\$ 189.784	1,81
250	\$ 687.136	6,6	250	\$ 227.023	2,17
500	\$ 849.609	8,1	500	\$ 326.780	3,12
1000	\$ 949.206	9,1	1000	\$ 364.604	3,48

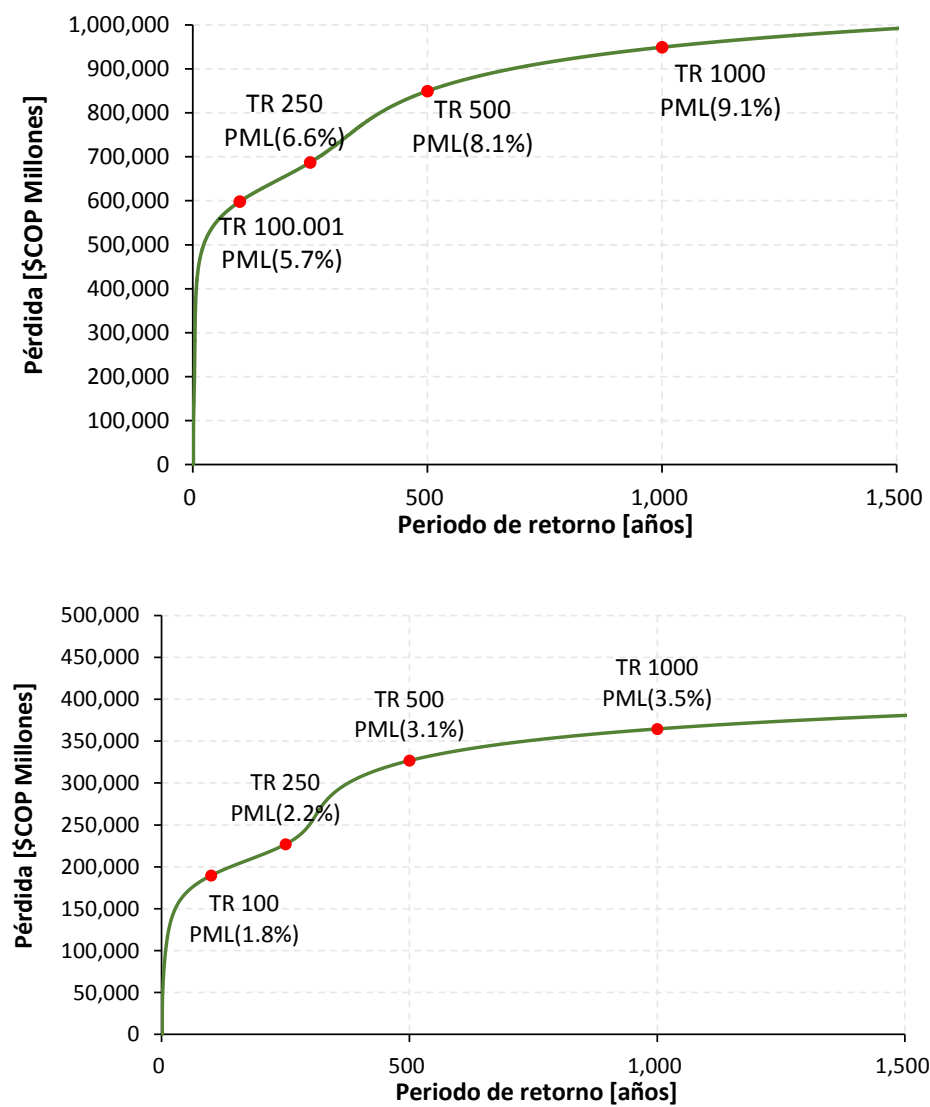


Figura 43. Curva de PML para condición actual (arriba) e intervenida (abajo)

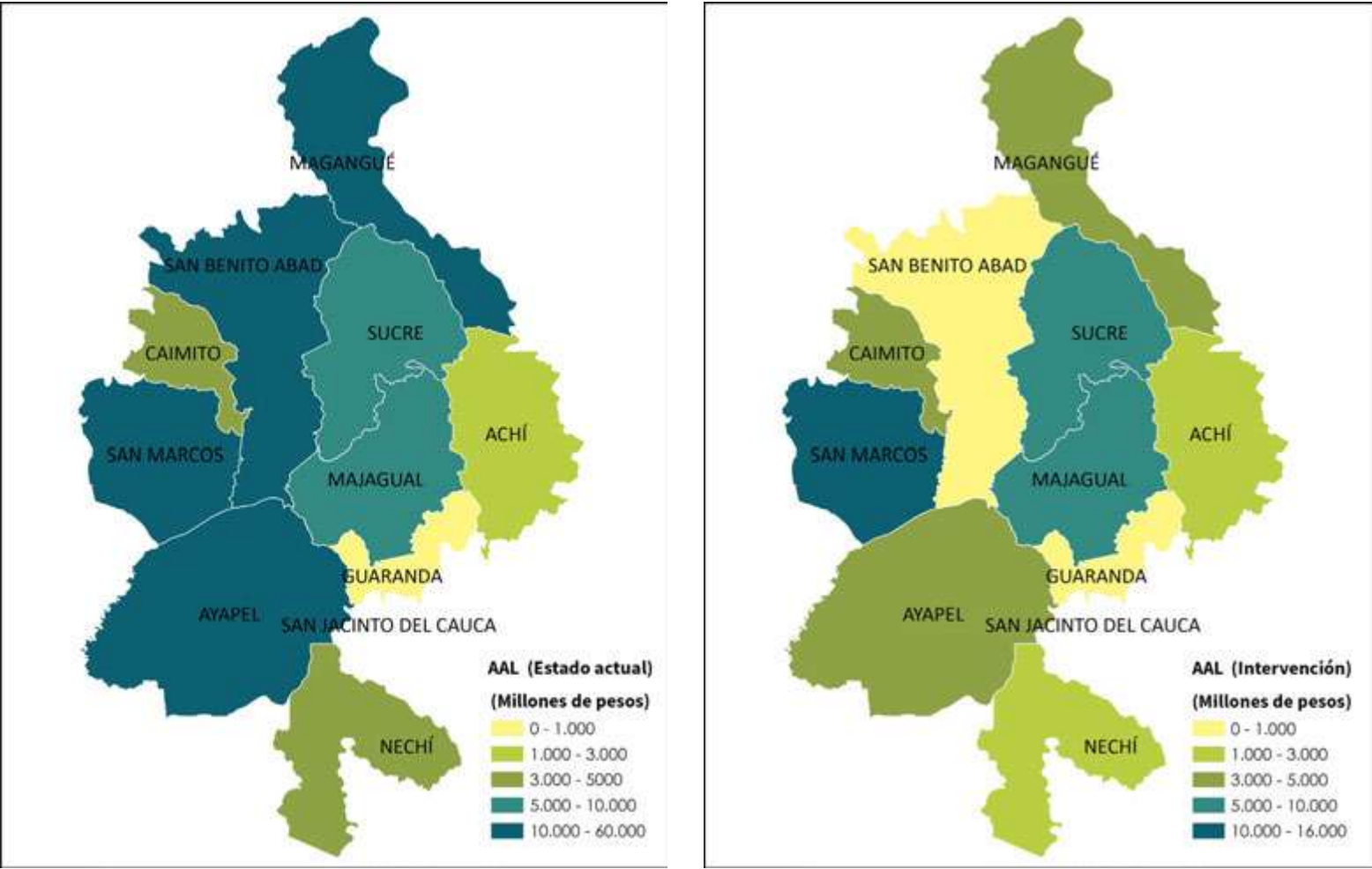


Figura 44. PAE por municipios para las condición actual (izq) e intervenida (der)



5.6. Evaluación probabilista del riesgo por huracán en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

La evaluación de la amenaza por ciclones tropicales o huracanes -como se les denomina en la cuenca del Caribe- en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina se ha realizado con base en la simulación estocástica de este tipo de fenómenos. La simulación estocástica es ampliamente aceptada y usada a nivel internacional para la evaluación de amenazas y riesgo. En el caso de los huracanes implica la generación de eventos futuros factibles utilizando la base de datos de ciclones históricos IBTrACS, administrada por la NOAA, la cual contiene información depurada y validada por los diversos servicios meteorológicos a nivel mundial. La *Figura 45* presenta las trayectorias de los huracanes históricos al norte de Colombia.

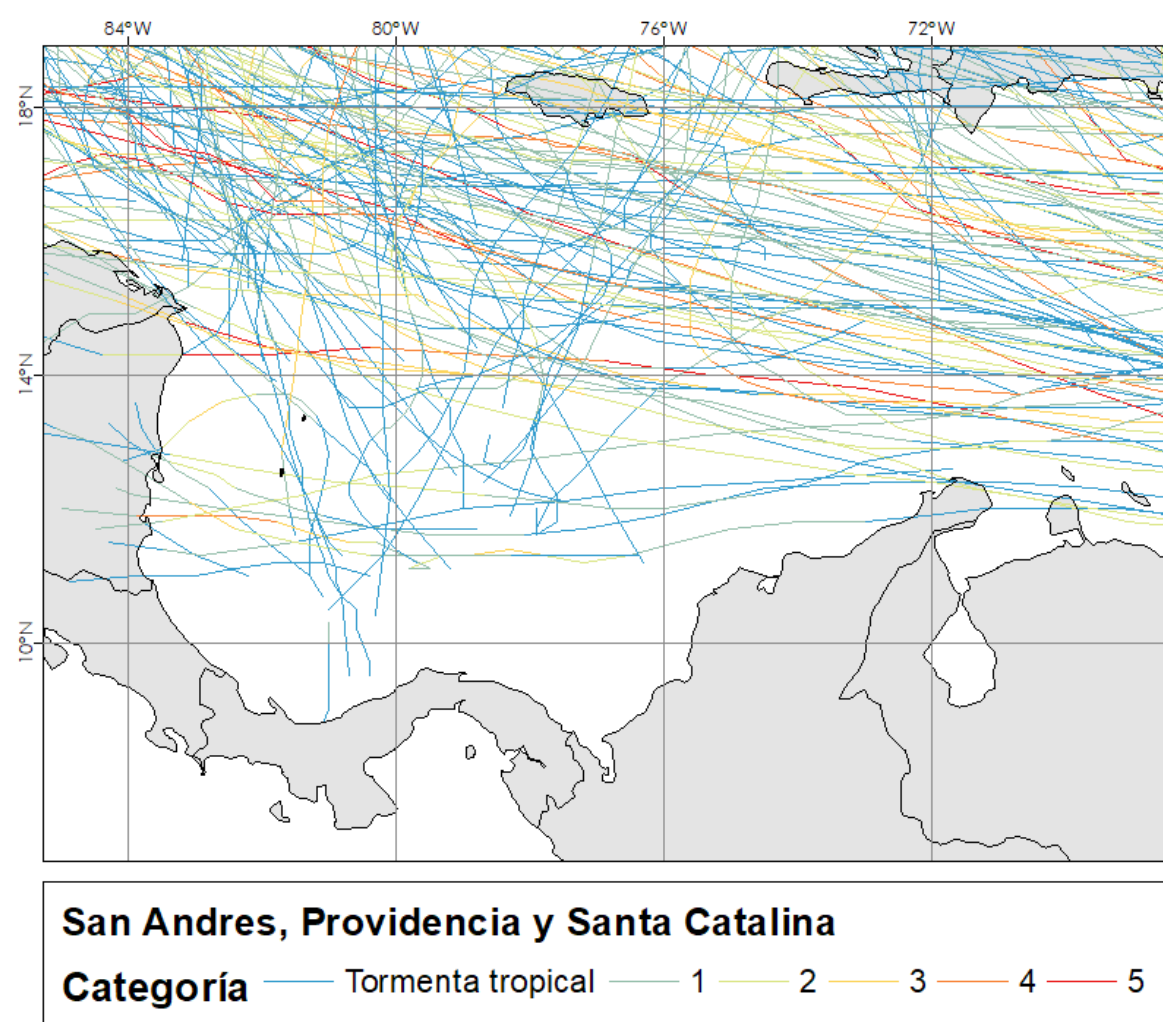


Figura 45. Trayectorias de ciclones tropicales históricos al norte de Colombia

Las trayectorias de los futuros huracanes se generan en forma aleatoria a partir de la perturbación de trayectorias históricas, utilizando procesos estocásticos tipo Random Walk o Wiener bidimensional. Estas trayectorias se modifican posteriormente mediante la incorporación de un modelo de balance para considerar la influencia del sistema atmosférico-oceánico en la formación de los ciclones tropicales.

Una vez definido el conjunto completo de huracanes factibles, sus efectos se modelan a nivel local. Dichos efectos, en este estudio, son el campo de viento y la marea de tormenta. En ambos casos se aplican modelos basados en la física del fenómeno para establecer la severidad de cada huracán en términos de vientos fuertes e inundación costera por marea de tormenta.

La modelación del campo de viento puede resumirse en cuatro pasos:

1. Dadas las características del huracán (como su presión central, velocidad de avance y radio a los máximos vientos), se calcula la velocidad del viento a la altura gradiente. La altura gradiente es la altitud a la cual la velocidad del viento no se ve afectada por las condiciones de

la superficie del terreno. Por lo general, se supone que la velocidad del viento a la altura gradiente define una velocidad media representativa del vórtice.

2. A partir de la velocidad del viento a la altura gradiente, se calcula una velocidad superficial aplicando un modelo de capa límite atmosférica.

3. La velocidad superficial media (típicamente para 10 m de altura sobre la superficie) se modifica por condiciones específicas del sitio, como efectos topográficos y rugosidad superficial.

4. Finalmente, se transforma la velocidad resultante en la correspondiente a una ráfaga promedio de 3 segundos de duración, la cual está fuertemente correlacionada con la resistencia de las estructuras a cargas de viento.

Existen diferentes maneras de abordar la modelación de los pasos presentados anteriormente. Vickery et al. (2009) presenta una descripción completa del estado del arte en modelación del campo de viento. Para este caso, se empleó el software TCHM (Bernal, 2014), el cual implementa el modelo empleado por INGENIAR & CIMNE (2015) para el cálculo de la amenaza por ciclones tropicales a nivel mundial.

La marea de tormenta es ampliamente reconocida como uno de los efectos más destructivos relacionados con los huracanes. La modelación de la marea de tormenta tiene por objetivo determinar la sobreelevación del nivel del mar en la costa y la profundidad de inundación resultante tierra adentro. Dicha sobreelevación debe modelarse como la combinación de la causada por el empuje horizontal del campo de viento y la que se genera como resultado de la disminución de la presión atmosférica en el ojo del huracán. La amenaza de marea de tormenta se calcula en términos de la distribución geográfica de la profundidad de inundación costera. En este caso se hizo la modelación también utilizando el software TCHM (Bernal, 2014).

La amenaza se determina como el efecto que todos los huracanes sintéticos tienen sobre el archipiélago, ponderado por sus correspondientes frecuencias de ocurrencia. Del resultado integrado, se obtienen mapas de diferentes periodos de retorno. La *Figura 46* presenta el mapa de amenaza de 100 años de periodo de retorno para el archipiélago.

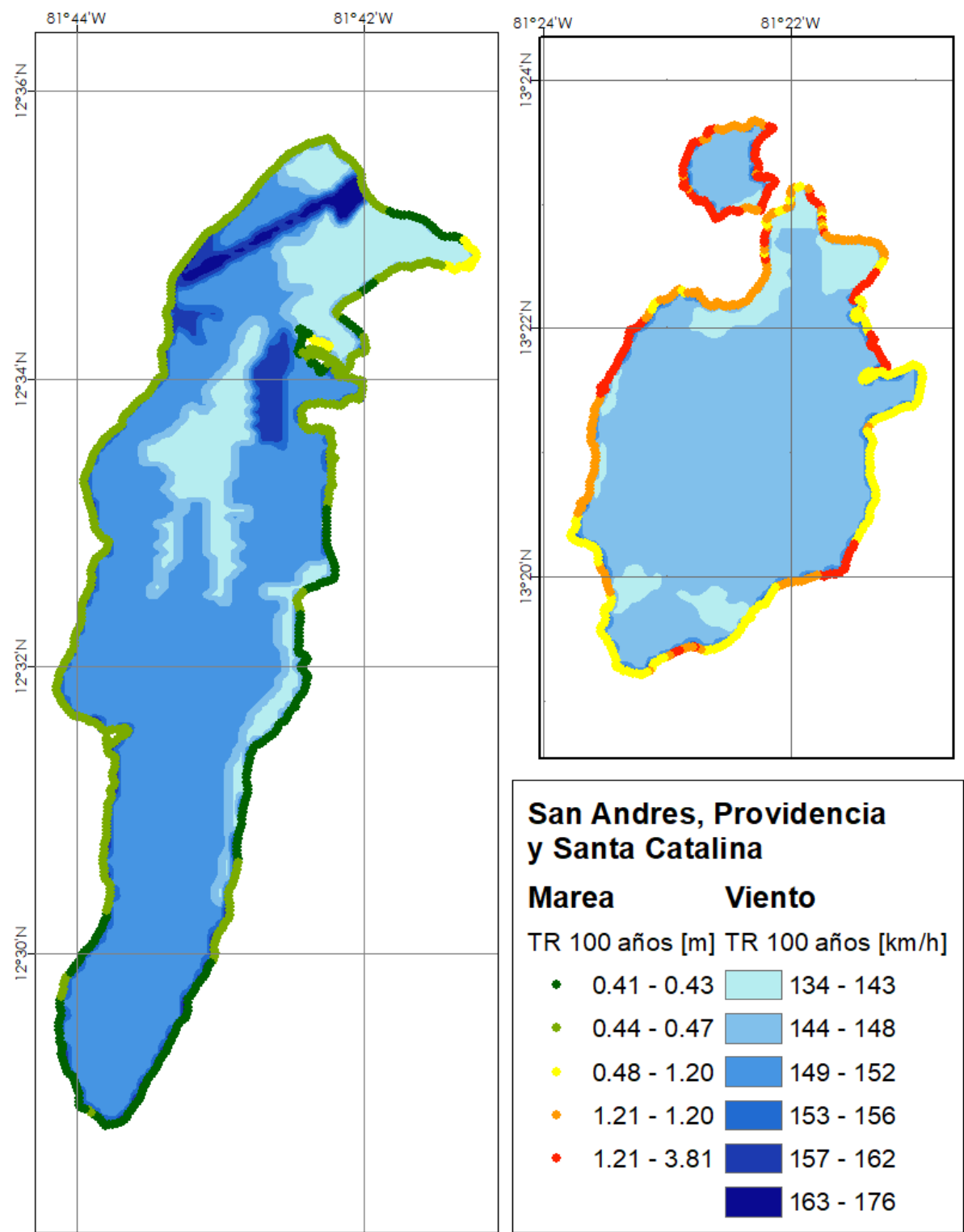


Figura 46. Mapa de velocidad del viento para ráfagas de 3 segundo y altura de marea de tormenta. 100 años de periodo de retorno.

Los elementos expuestos del archipiélago, en este estudio, se han limitado al conjunto de edificaciones existentes. Como base cartográfica se usó la información disponible en el DANE (Marco Geoestadístico Nacional y REDATAM). Luego, a nivel de cada manzana, se estableció su valor de reposición,

junto con el número de habitantes y la distribución de los sistemas estructurales a ser considerados en el cálculo. Estos sistemas estructurales se refieren a los tipos constructivos predominantes en las islas, los cuales corresponden a: pórticos de concreto reforzado, madera, mampostería y pórticos

de acero. La participación de estos sistemas en el total de predios, así como en el valor expuesto total, se presenta en la *Figura 47*. La distribución del valor expuesto, por manzana se presenta en la *Figura 48*.

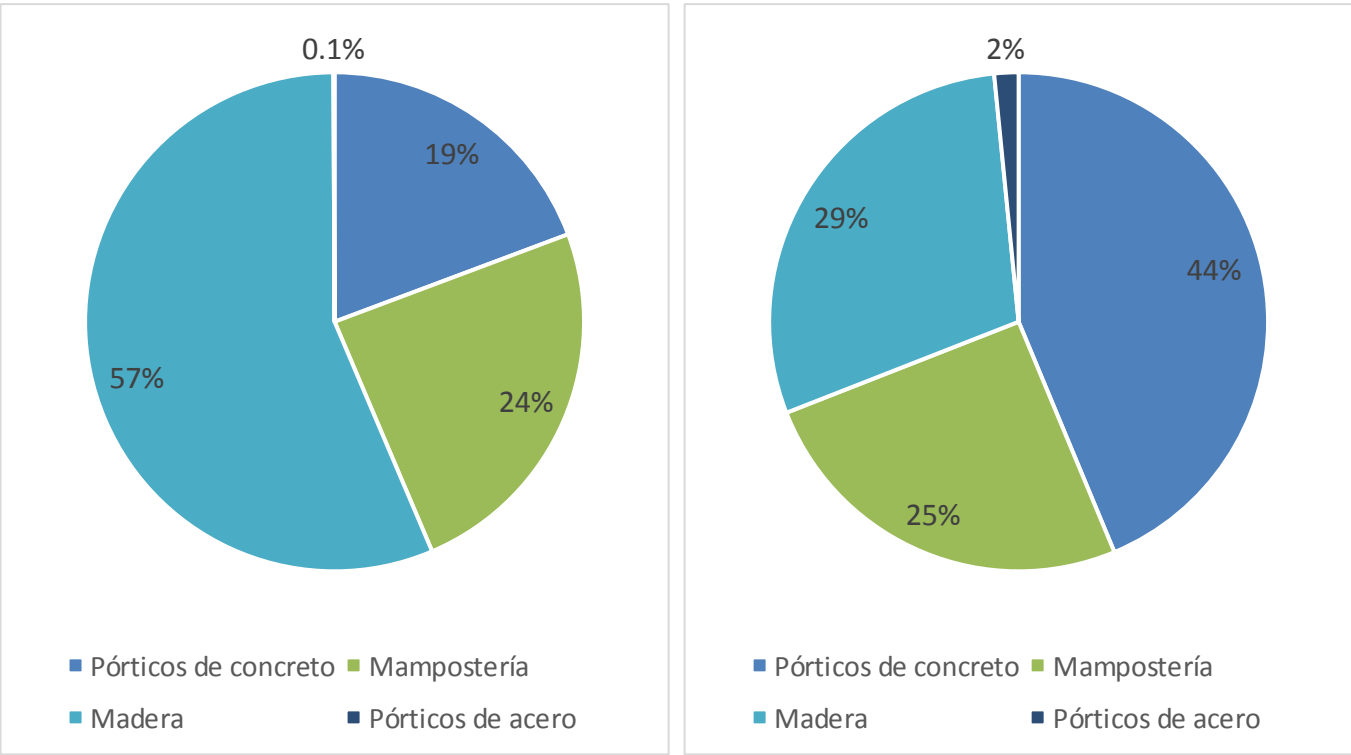


Figura 47. Distribución de sistemas estructurales en San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Izq.: participación por número de predios. Der.: participación en el valor expuesto total

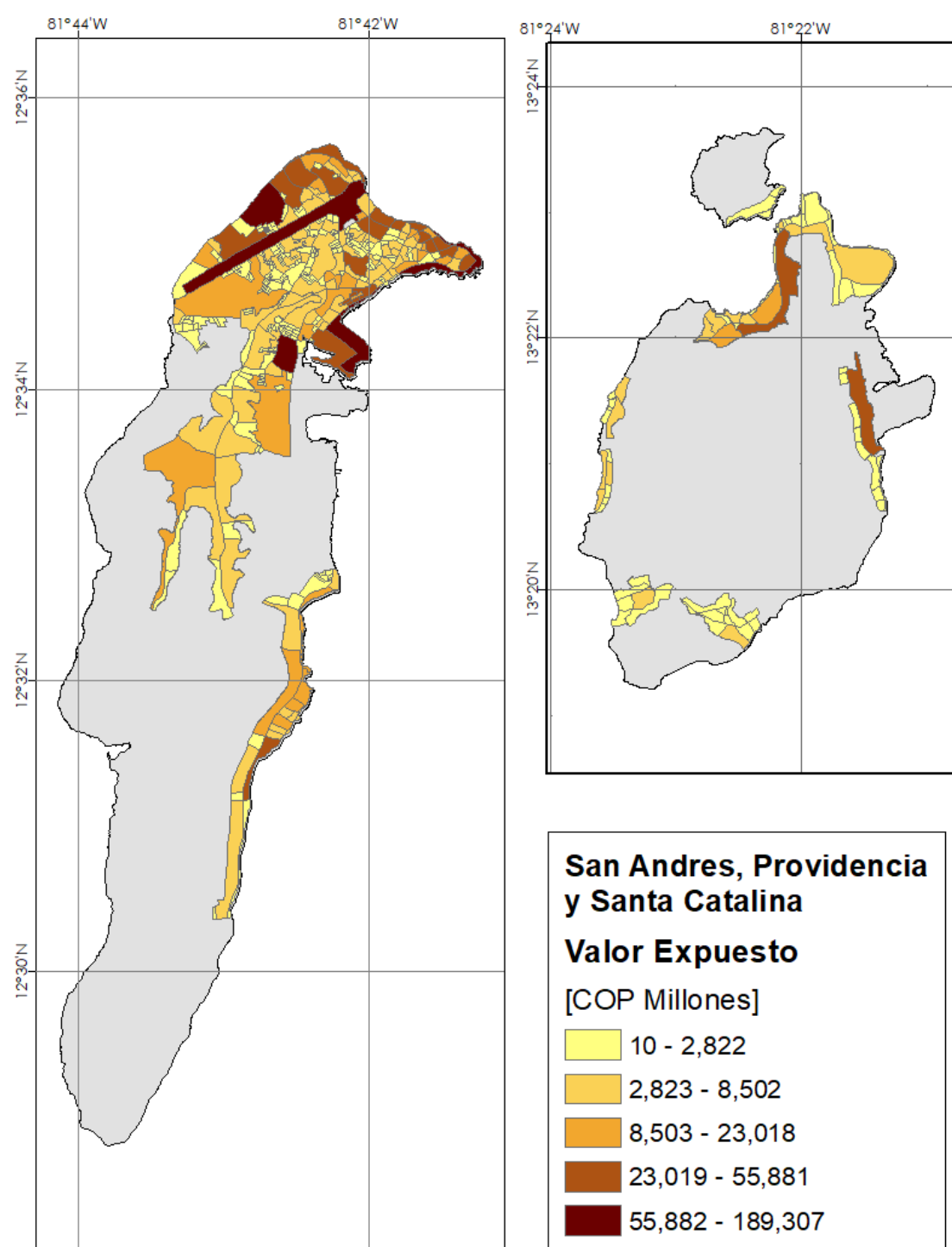


Figura 48. Distribución del valor expuesto por manzanas

La vulnerabilidad de estos sistemas estructurales se modela por medio de funciones de vulnerabilidad, las cuales definen el nivel de daño o pérdida que sufrirá un elemento expuesto como función del nivel de la amenaza en su ubicación. En este caso, se definieron funciones de vulnerabilidad en términos de la velocidad

del viento, para ráfagas de 3 segundos, y de la altura inundación costera por la marea de tormenta.

La evaluación del riesgo se llevó a cabo usando el software CAPRA Nueva Generación (Bernal y Cardona 2018), el cual permite determinar las pérdidas

económicas causadas por los huracanes en el archipiélago, mediante la aplicación de las teorías matemáticas de probabilidad de ruina y riesgo catastrófico, de la misma manera que los cálculos de riesgo incluidos en este Atlas a nivel nacional. De este modo, las métricas más importantes de riesgo (AAL y PML) fueron también obtenidas para el

archipiélago.

La *Tabla 7* presenta las cifras generales de pérdida para el archipiélago. La *Figura 50* muestra la curva de PML para el portafolio de edificaciones. Nótese que la AAL es de

3.3‰, mientras que el PML de 1500 años es del 27.8% (con respecto al valor expuesto), lo que posiciona a San Andrés, Providencia y Santa Catalina como el departamento de Colombia con mayor riesgo por huracán. Algo de esperarse dada su ubicación en el

mar Caribe.

La distribución de la AAL, tanto en unidades monetarias, como relativa al valor de cada manzana, se presenta en las *Figuras 51 y 52* respectivamente.

Tabla 7. Resultados de riesgo para el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina

Valor expuesto	USD\$	\$ 2,497,720.41
Pérdida anual esperada	USD\$	\$ 8,262.23
	‰	3.31
PML		
Periodo de retorno	Pérdida	
años	USD\$	%
20	\$ 35,360.33	1.42
50	\$ 115,064.83	4.61
100	\$ 203,891.79	8.16
250	\$ 365,779.52	14.64
500	\$ 495,043.02	19.82
1000	\$ 623,600.17	24.97
1500	\$ 695,902.10	27.86
2000	\$ 745,418.24	29.84

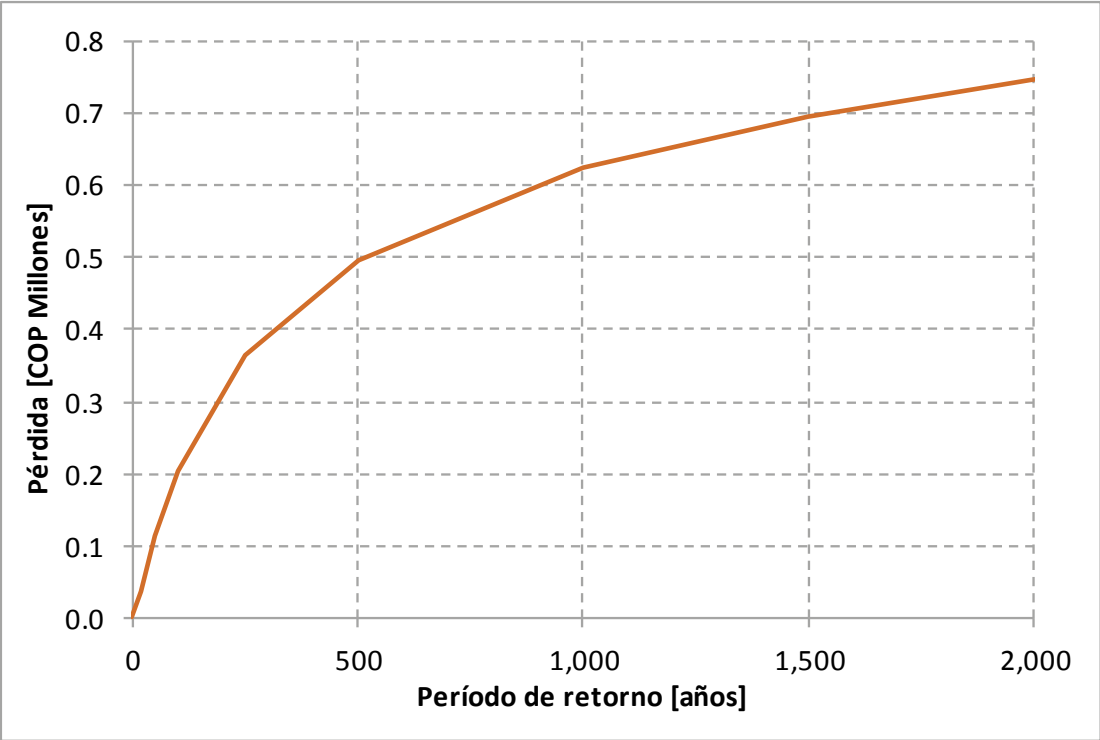


Figura 50. Curva de PML

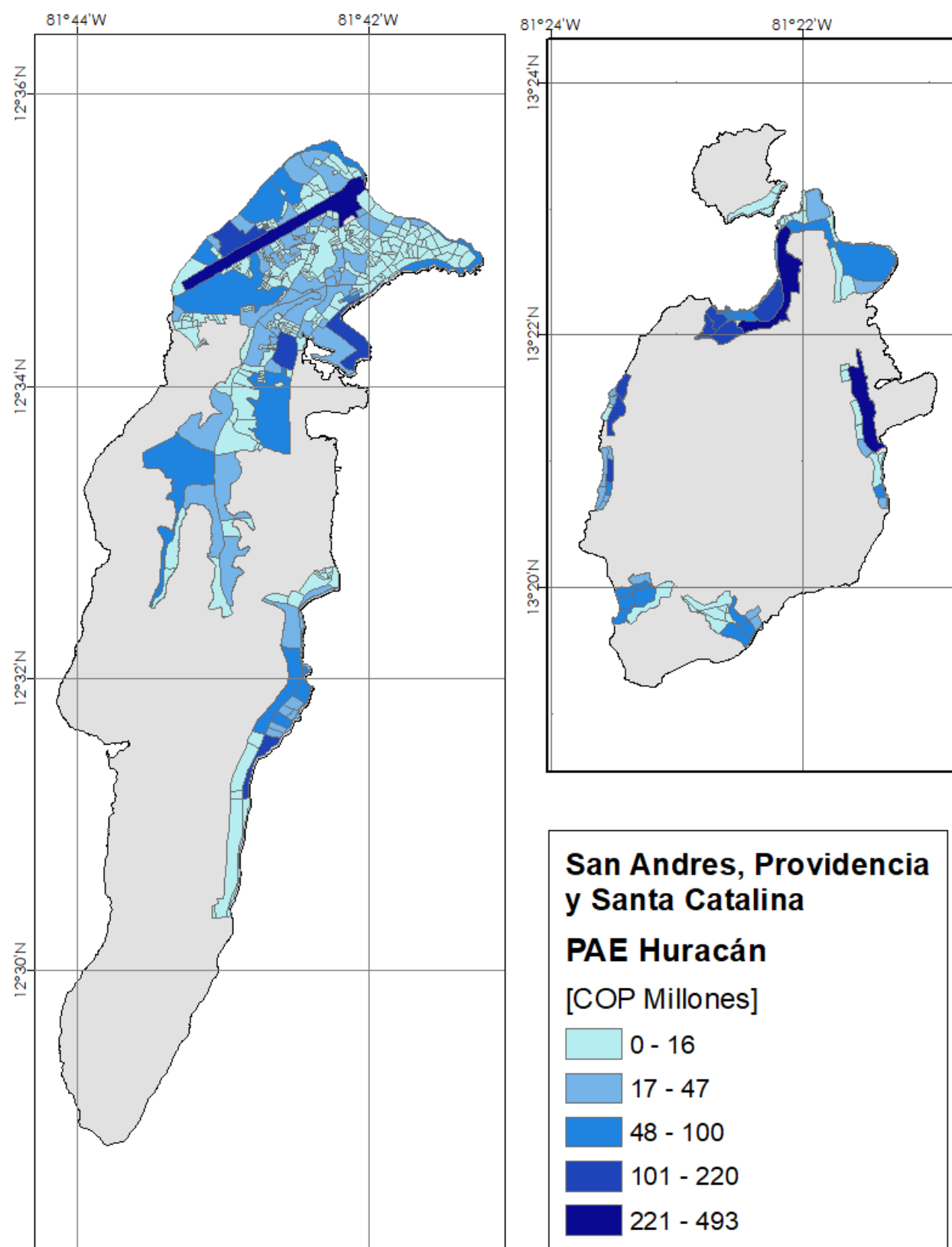


Figura 51. Pérdida anual esperada por manzanas. Unidades monetarias

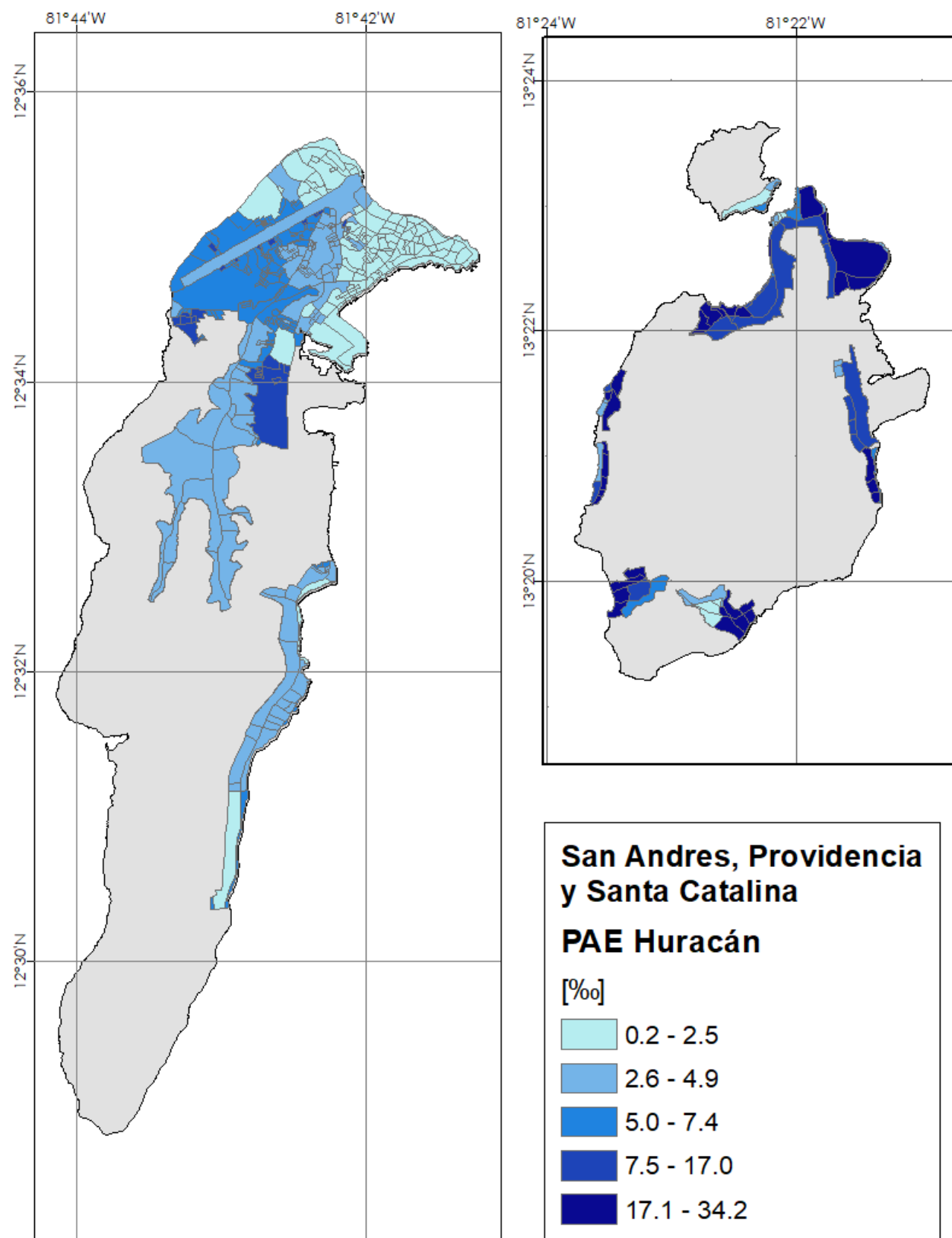


Figura 52. Pérdida anual esperada por manzanas. Relativa al valor expuesto de cada manzana.

Esta evaluación demuestra la importancia del tema de riesgo por huracán en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Los resultados presentados

son un primer paso en el conocimiento del riesgo en el archipiélago y tienen el objetivo de impulsar que se realicen evaluaciones con un mayor nivel de refinamiento, que

permitan la formulación de medidas de gestión del riesgo de desastres acorde con las realidades del contexto social y material de las islas.

A close-up photograph of a cracked asphalt road surface. The crack runs diagonally from the top right towards the bottom left, creating a deep, jagged fissure in the grey pavement. The texture of the asphalt is visible, showing small stones and a rough surface.

6. Perfiles de riesgo de departamento

Este capítulo incluye los perfiles de riesgo de los 32 departamentos de Colombia. En estos perfiles se ilustran los resultados de la evaluación probabilista del riesgo por terremoto e inundaciones (para los 32 departamentos), tsunami para el Pacífico Colombiano y el norte del país y huracanes (viento y marea de tormenta) para el norte de Colombia y el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Igualmente se incluyen los resultados de la evaluación del Riesgo Integral (RI) tanto a nivel departamental como a nivel municipal, en donde se consideran variables socioeconómicas (fragilidad social y falta de resiliencia) de los departamentos y de los municipios para estimar cómo estos factores pueden agravar o amplificar los efectos directos de los desastres.

Las cifras presentadas aquí dan cuenta de un orden de magnitud de las pérdidas probables por los daños que se podrían presentar por la materialización de las amenazas naturales consideradas. Es importante resaltar que estas evaluaciones utilizaron información gruesa o aproximada (generada para el Modelo Global de Riesgo para el GAR15 de UNISDR) y por lo tanto los valores pueden llegar a variar en algunos casos en forma significativa con respecto

a evaluaciones con información más detallada o con mayor nivel de resolución. No obstante, los resultados calculados para esta publicación presentan una imagen general de cómo se distribuye el riesgo de desastres en el país.

DESCRIPCIÓN DE LOS PERFILES DE RIESGO DE DEPARTAMENTO

INFORMACIÓN GENERAL

Información del número de habitantes del departamento, Producto Interno Bruto departamental en millones de pesos, índice de Gini e Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI).

RIESGO MULTI-AMENAZA

Mapa de distribución por municipios AAL multi-amenaza relativa al valor expuesto (%).

Ranking departamental de la AAL

Posición del departamento con respecto a todos los departamentos del país de acuerdo con el valor relativo de la AAL multi-amenaza. El valor en la gráfica de barras corresponde al valor de la AAL multi-

amenaza al millar para el departamento.

Contribución de cada amenaza a la AAL

Porcentaje de participación de cada una de las amenazas evaluadas a la AAL total.

Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años

Se presentan tres gráficas:

- 1. Pérdidas probables con periodo de retorno de 100 años. Probabilidad de 39,4% de exceder dicha pérdida en 50 años.
 - 2. Pérdidas probables con periodo de retorno de 250 años. Probabilidad de 18% de exceder dicha pérdida en 50 años
 - 3. Pérdidas probables con periodo de retorno de 500 años. Probabilidad de 10% de exceder dicha pérdida en 50 años
- La porción blanca del circulo externo de cada gráfica se refiere a la probabilidad de excedencia en 50 años (39,4%, 18% y 10% respectivamente).
 - La porción naranja del circulo del medio da cuenta de la proporción de la pérdida por terremoto de 100, 250 y 500 años de periodo de retorno respectivamente con

respecto al PIB departamental.

- La porción azul del círculo interno significa la proporción de la pérdida por inundaciones de 100, 250 y 500 años de periodo de retorno respectivamente con respecto al PIB departamental.
- Las cifras dentro de los círculos son el porcentaje de las pérdidas por terremoto (naranja) y por inundaciones (azul) con respecto al PIB departamental.
- En la parte inferior se incluyen las pérdidas en millones de pesos para las dos amenazas para los tres periodos de retorno incluidos.

Pérdidas Máximas Probables

Esta gráfica incluye pérdidas máximas probables (PMLs) para 50, 100, 250, 500, 1000 y 1500 años de periodo de retorno (o 18%, 10%, 4%, 2%, 1% y 0,7% de probabilidad de excedencia en 10 años) para las diferentes amenazas a las que el departamento está expuesto.

EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL

Ranking departamental del Riesgo Integral (RI). Posición del departamento

con respecto a todos los departamentos del país de acuerdo al valor del RI para el departamento.

- Valor del RI del departamento (entre 0 – valor mínimo y 2 – valor máximo).
- Valor de RF del departamento (entre 0 – valor mínimo y 1 – valor máximo). El valor del RF se obtiene a partir de la normalización de la AAL relativa al valor expuesto. La función de transformación tiene una forma de S y todos los valores de AAL relativa mayores a 10 por mil adquieren un valor de 1 en el RF.
- Valor del F del departamento (entre 0 – valor mínimo y 1 – valor máximo). El valor del factor de impacto se obtiene a partir de la transformación o normalización de los 16 indicadores de fragilidad social (8 variables) y falta de resiliencia (8 variables) escogidos para su cálculo.

Variables del Factor de Impacto

Presenta los 16 indicadores utilizados para el cálculo del F. Los valores correspondientes a cada variable son los valores “transformados” o normalizados. Esta normalización se llevó a cabo a través de funciones de transformación, para el

caso de la fragilidad socio-económica las funciones son crecientes y para el caso de la falta de resiliencia se utilizan funciones decrecientes. La transformación hace las variables conmensurables. Los pesos de cada variable transformada se han mantenido iguales y podrían modificarse si se realiza un proceso analítico jerárquico que determine la pertinencia en consenso de modificar los pesos actuales.

El círculo a la derecha indica el valor (normalizado) de cada una de las variables consideradas en el F.

EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

La tabla incluye todos los municipios del departamento con el valor de la AAL en millones de pesos y relativa al valor expuesto, los valores de Riesgo Físico (RF), el Factor de Impacto (F) y Riesgo Integral (RI) o total para cada municipio.

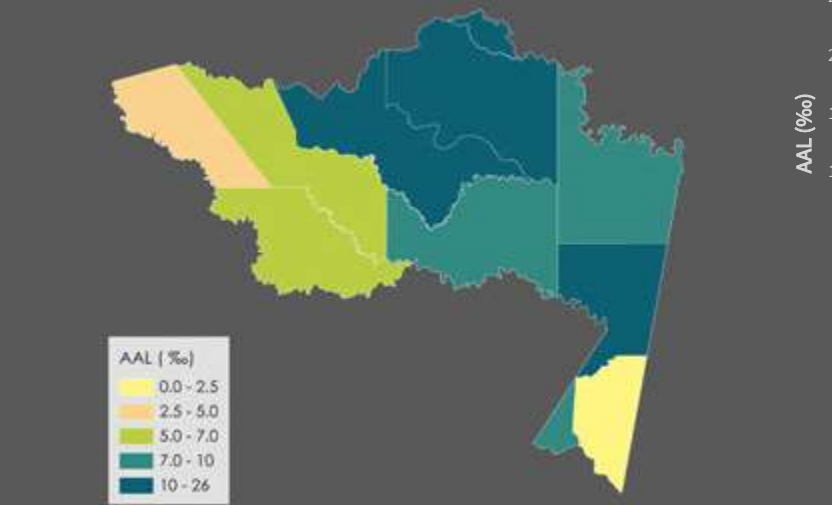


AMAZONAS

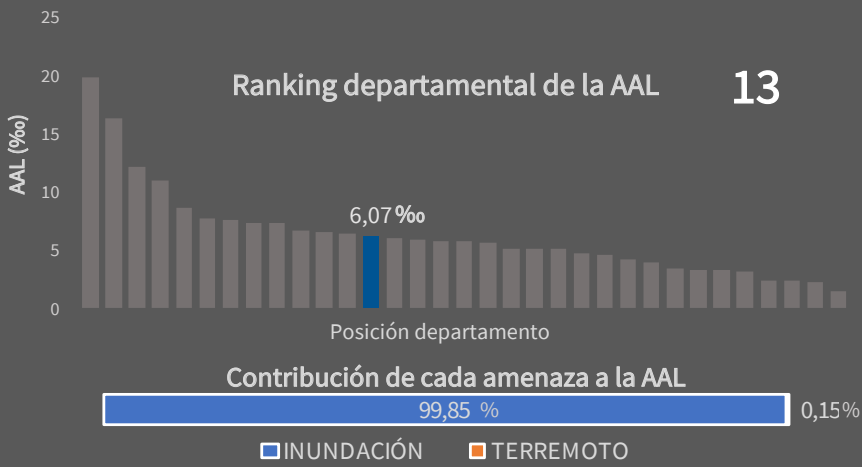
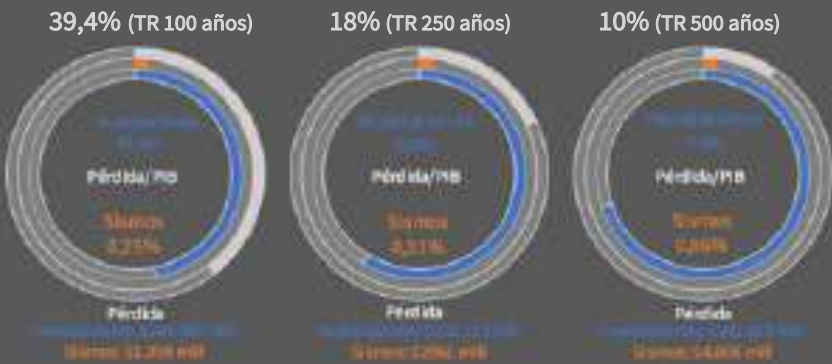
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	77.088	Índice de Gini	N.D.
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	563	Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	44,4

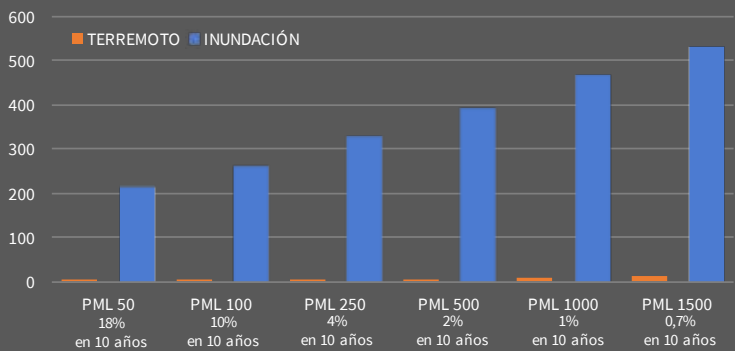
RIESGO MULTI-AMENAZA



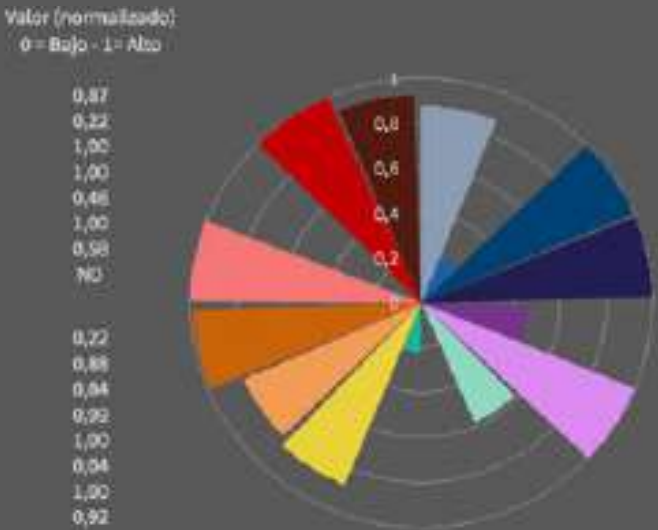
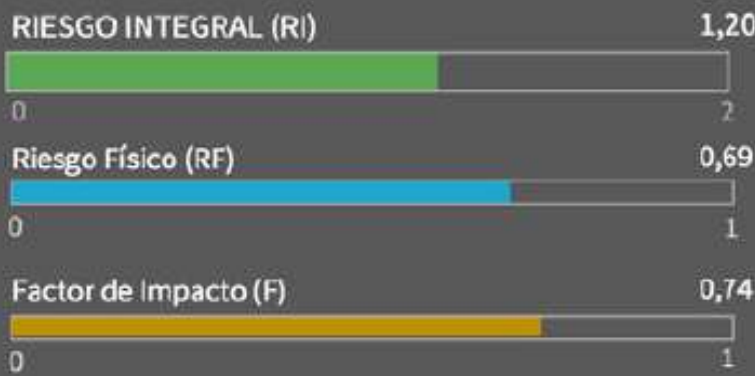
Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años



Pérdidas Máximas Probables



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

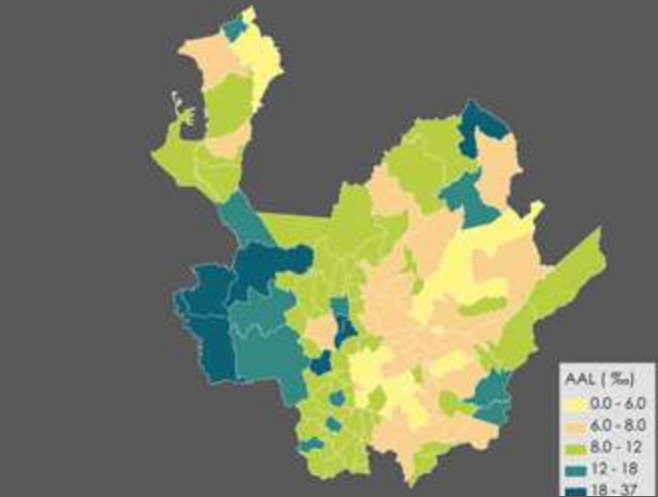
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%]	RF	F	RI
Tarapacá	1.605	12,87	1,00	0,78	1,78
Puerto Santander	1.028	10,50	1,00	0,66	1,66
Puerto Nariño	3.140	9,91	1,00	0,66	1,66
La Pedrera	515	7,95	0,92	0,65	1,51
Miriti-Paraná	519	11,60	1,00	0,48	1,48
Puerto Arica	587	8,90	0,98	0,45	1,42
La Victoria	1.085	25,90	1,00	0,40	1,40
El Encanto	1.096	6,85	0,80	0,45	1,16
La Chorrera	470	5,64	0,62	0,57	0,97
Puerto Alegría	304	4,57	0,42	0,52	0,63
Leticia	2.125	2,15	0,09	0,47	0,14

ANTIOQUIA

INFORMACIÓN GENERAL

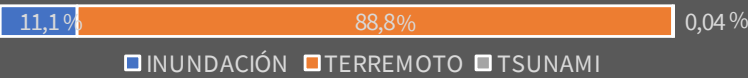
Población (Habitantes)	6.534.857	Indice de Gini	0,50
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	110.194.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	23,0

RIESGO MULTI-AMENAZA



Ranking departamental de la AAL 16

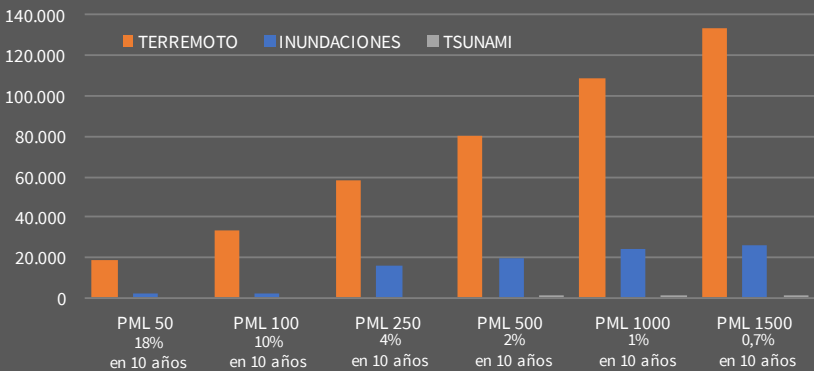
Contribución de cada amenaza a la AAL



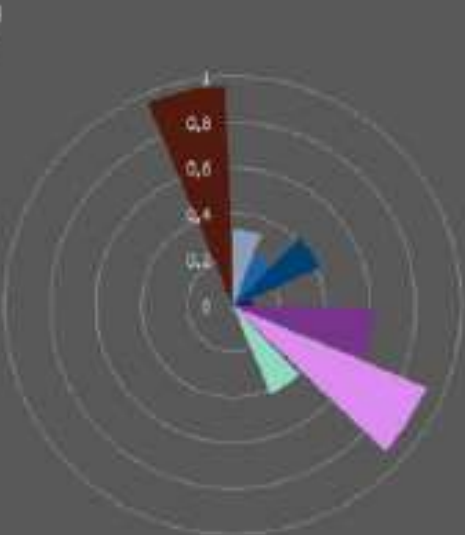
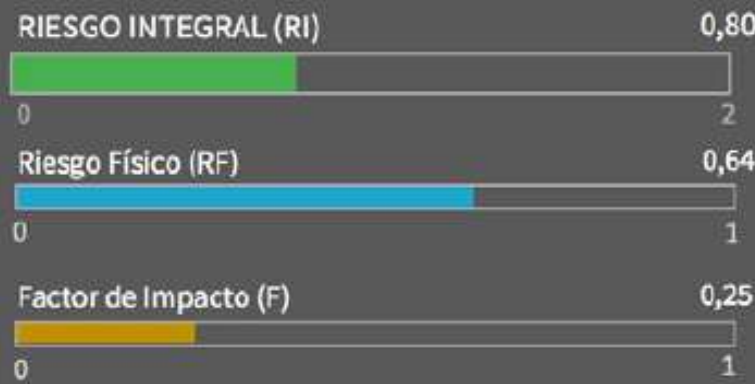
Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años



Pérdidas Máximas Probables



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%]	RF	F	RI
San Juan de Urabá	8.744	12,58	1,00	0,84	1,84
Campamento	2.476	9,61	1,00	0,81	1,80
Sabanalarga	3.214	11,12	1,00	0,79	1,79
Mutatá	5.009	14,93	1,00	0,78	1,78
Nechí	20.432	23,87	1,00	0,77	1,77
Olaya	2.988	36,59	1,00	0,76	1,76
Turbo	60.217	11,36	1,00	0,76	1,76
Peque	3.166	9,29	0,99	0,76	1,74
Murindó	3.128	24,14	1,00	0,74	1,74
Yondó	10.245	11,37	1,00	0,73	1,73
Puerto Berrío	2.896	9,30	0,99	0,74	1,73
Cáceres	9.185	8,17	0,93	0,85	1,73
Zaragoza	7.000	12,61	1,00	0,71	1,71
Chigorodó	35.135	11,30	1,00	0,70	1,70
Carepa	24.761	10,02	1,00	0,69	1,69
Betulia	7.028	11,98	1,00	0,69	1,69
Puerto Triunfo	3.342	17,84	1,00	0,69	1,69
Dabeiba	12.737	18,28	1,00	0,68	1,68
Anza	7.110	18,96	1,00	0,67	1,67
Vigía del Fuerte	3.440	19,88	1,00	0,66	1,66
Giraldo	1.497	9,78	1,00	0,65	1,65
Valdivia	5.935	10,80	1,00	0,65	1,65
Caicedo	1.856	10,36	1,00	0,64	1,64
La Pintada	2.732	9,97	1,00	0,63	1,63
Caucasia	39.811	8,50	0,95	0,71	1,63
Cañasgordas	3.632	9,49	0,99	0,64	1,63
Tarso	1.773	12,28	1,00	0,63	1,63
Ituango	8.710	9,21	0,99	0,64	1,62
Salgar	5.642	10,84	1,00	0,62	1,62
Uramita	3.541	11,48	1,00	0,62	1,62
Puerto Nare	6.030	15,72	1,00	0,62	1,62
Concordia	7.677	10,18	1,00	0,61	1,61
Urrao	19.992	16,11	1,00	0,60	1,60
Guadalupe	2.273	9,80	1,00	0,59	1,59
Ebéjico	3.260	9,68	1,00	0,59	1,59
Heliconia	1.439	9,69	1,00	0,59	1,58
Buritacá	2.462	10,09	1,00	0,58	1,58
Frontino	10.251	15,36	1,00	0,57	1,57
Pueblorrico	3.146	10,98	1,00	0,57	1,57
Andes	13.451	11,52	1,00	0,57	1,57
Támesis	5.437	10,17	1,00	0,57	1,57
Tarazá	6.865	7,19	0,84	0,86	1,56
Ciudad Bolívar	6.510	11,96	1,00	0,56	1,56
Betania	5.981	17,66	1,00	0,55	1,55
Angelópolis	2.541	8,83	0,97	0,59	1,54
Armenia	705	9,87	1,00	0,54	1,54
Argelia	2.888	8,71	0,97	0,59	1,54
Briceño	1.785	8,27	0,94	0,63	1,53
Titinibí	8.386	15,47	1,00	0,52	1,52
Yalí	2.142	11,42	1,00	0,52	1,52
Caramanta	552	9,99	1,00	0,51	1,51
Toledo	1.158	8,65	0,96	0,57	1,51
Hispania	2.060	11,04	1,00	0,51	1,51
San Luis	3.046	8,66	0,96	0,56	1,50
Caracolí	1.644	8,93	0,98	0,54	1,50
Abriaquí	709	10,52	1,00	0,50	1,50
Jericó	7.298	10,21	1,00	0,50	1,50
San Andrés de Cuerquía	1.413	8,32	0,94	0,59	1,50
Montebello	1.233	8,98	0,98	0,52	1,49
Necoclí	11.946	7,23	0,85	0,76	1,49
Venecia	4.297	9,22	0,99	0,50	1,49
Sopetrán	7.810	22,87	1,00	0,48	1,48
Valparaiso	2.148	9,96	1,00	0,48	1,48

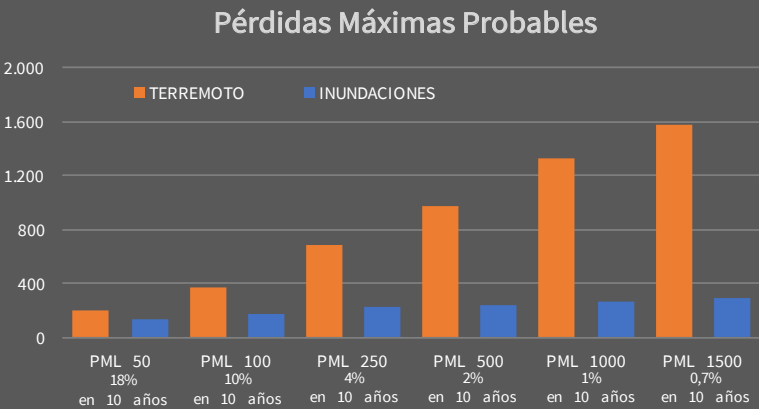
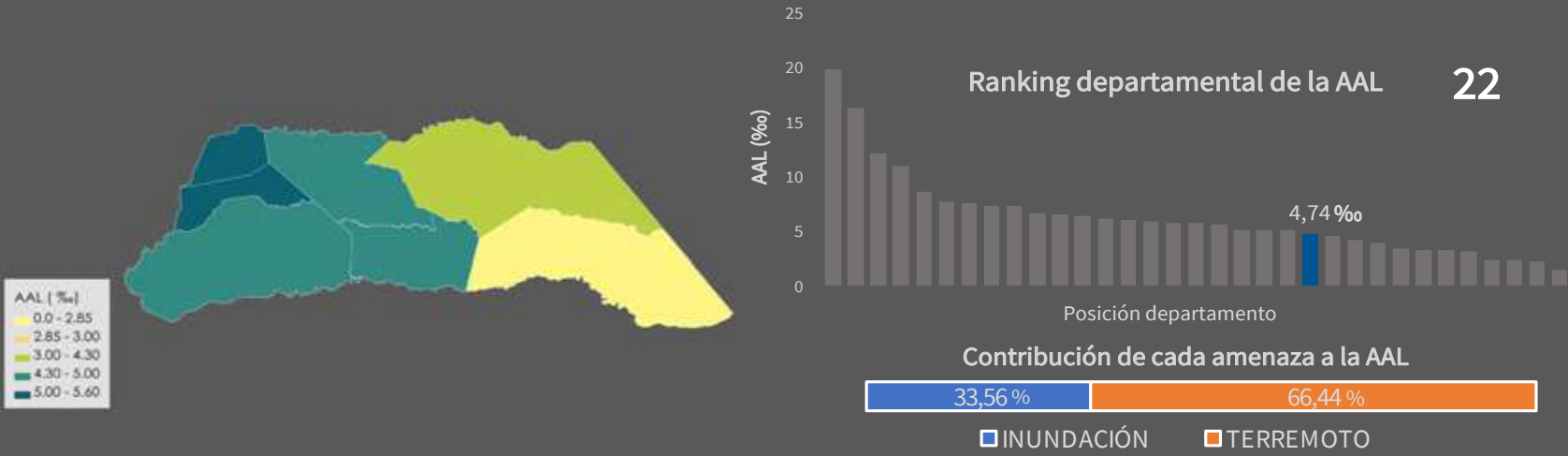
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%]	RF	F	RI
Amagá	6.865	8,75	0,97	0,52	1,47
Liborina	3.083	14,54	1,00	0,46	1,46
Jardín	4.143	10,57	1,00	0,46	1,46
Fredonia	6.329	8,27	0,94	0,55	1,45
Anorí	2.145	7,21	0,84	0,72	1,45
Nariño	3.819	8,24	0,94	0,54	1,45
Santafé de Antioquia	10.619	7,98	0,92	0,57	1,44
Belmira	2.752	8,09	0,93	0,54	1,42
San Francisco	2.327	7,37	0,86	0,65	1,42
San José de La Montaña	825	8,60	0,96	0,48	1,42
Santa Bárbara	5.694	8,71	0,97	0,47	1,42
Peñol	2.411	9,37	0,99	0,42	1,41
San Jerónimo	5.067	8,67	0,96	0,46	1,41
Abejorral	7.693	7,83	0,91	0,55	1,41
La Unión	8.279	7,84	0,91	0,52	1,38
San Roque	3.691	7,58	0,88	0,55	1,37
Apartadó	68.335	7,56	0,88	0,55	1,37
San Pedro	5.128	8,39	0,95	0,42	1,34
El Bagre	15.026	6,31	0,73	0,82	1,33
Remedios	3.843	6,51	0,76	0,75	1,32
Concepción	2.738	7,91	0,91	0,44	1,32
Cocorná	2.522	7,12	0,83	0,57	1,31
Angostura	2.515	6,95	0,81	0,60	1,31
San Carlos	3.433	6,76	0,79	0,60	1,26
Sonson	9.905	7,10	0,83	0,51	1,26
Granada	2.972	6,97	0,82	0,53	1,25
Retiro	4.335	8,50	0,95	0,30	1,24
Yolombó	4.990	6,79	0,79	0,56	1,24
Entreríos	2.959	7,92	0,91	0,35	1,24
La Estrella	8.472	7,53	0,88	0,39	1,22
Yarumal	10.560	6,83	0,80	0,53	1,22
Santa Rosa de Osos	11.443	7,29	0,85	0,40	1,20
Santo Domingo	1.144	6,60	0,77	0,54	1,18
Alejandría	263	6,77	0,79	0,49	1,18
Don Matías	7.592	7,18	0,84	0,40	1,17
Guatapé	4.332	7,19	0,84	0,37	1,15
Carolina	696	6,69	0,78	0,46	1,14
Guarne	12.938	6,73	0,79	0,44	1,13
Barbosa	11.329	6,62	0,77	0,46	1,12
Arboletes	4.287	5,75	0,64	0,75	1,12
San Vicente	6.566	6,37	0,74	0,50	1,10
Maceo	2.279	6,46	0,75	0,47	1,10
San Pedro de Urabá	7.920	5,56	0,61	0,81	1,09
San Rafael	2.849	5,90	0,66	0,52	1,01
Segovia	10.758	5,26	0,55	0,70	0,94
Gómez Plata	2.080	5,54	0,60	0,51	0,91
Caldas	26.079	5,56	0,61	0,36	0,82
Vegachí	1.832	4,90	0,48	0,55	0,75
Envigado	2.441	5,61	0,61	0,21	0,75
Girardota	14.475	5,13	0,53	0,42	0,74
Amalfi	4.094	4,93	0,49	0,52	0,74
Cisneros	3.996	5,02	0,50	0,44	0,72
La Ceja	18.324	5,00	0,50	0,39	0,69
Sabaneta	33.297	5,17	0,53	0,26	0,67
Copacabana	6.757	4,93	0,49	0,35	0,66
Medellín	1.066.358	4,87	0,47	0,26	0,60
Rionegro	22.086	4,85	0,47	0,25	0,59
Itagui	126.343	4,56	0,42	0,34	0,56
Bello	104.231	4,49	0,40	0,37	0,55
Marinilla	27.767	4,22	0,36	0,34	0,48
El Carmen de Viboral	9.802	3,86	0,30	0,46	0,44
El Santuario	6.156	3,69	0,27	0,41	0,38

ARAUCA

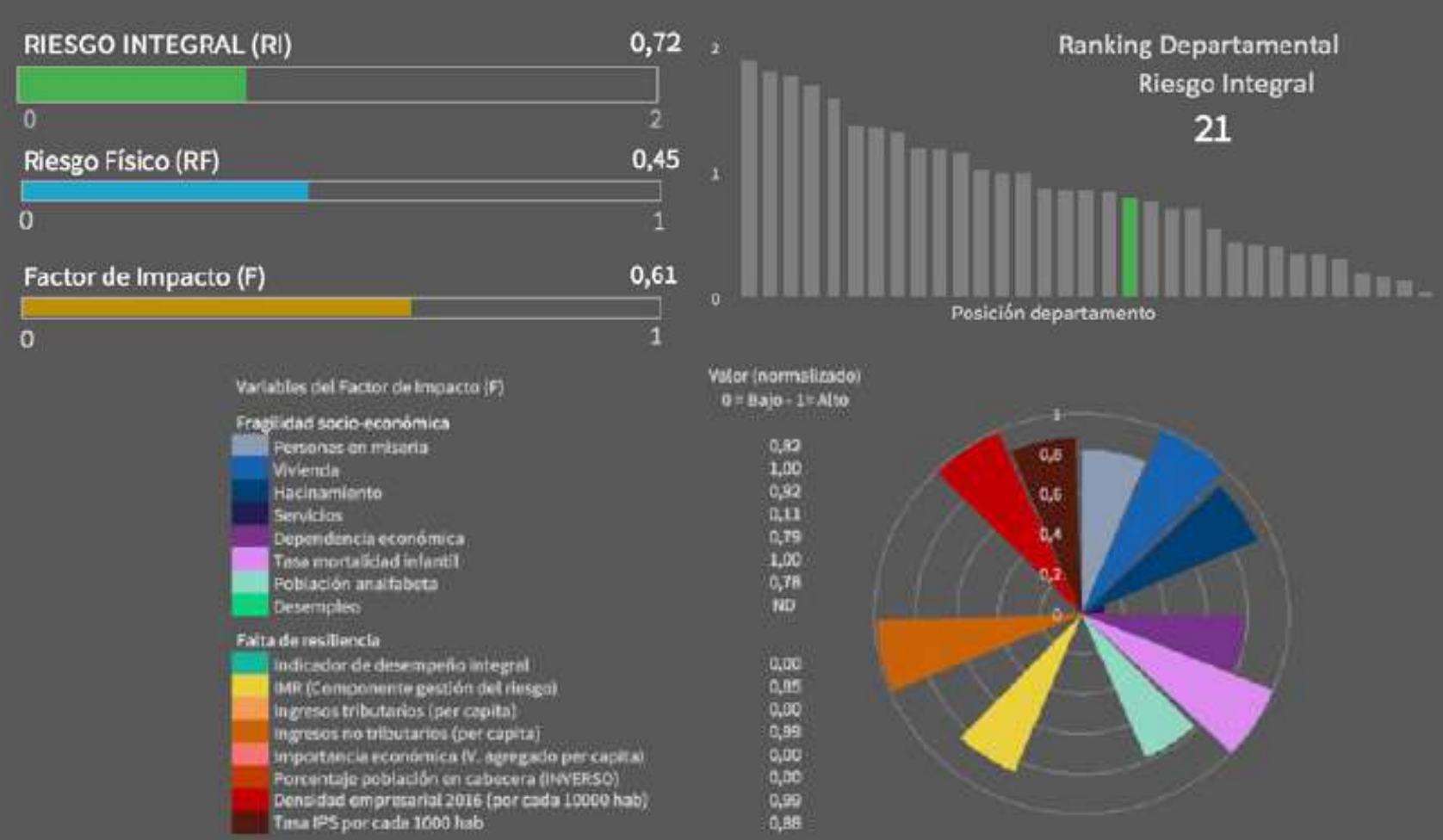
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	265.190	Indice de Gini	ND
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	4.533.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	35,9

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

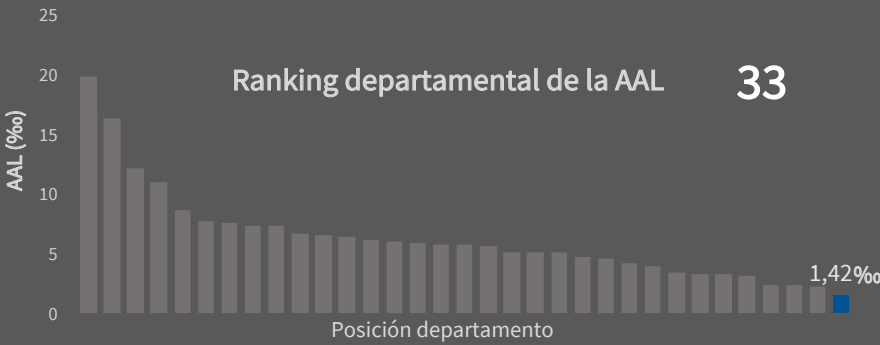
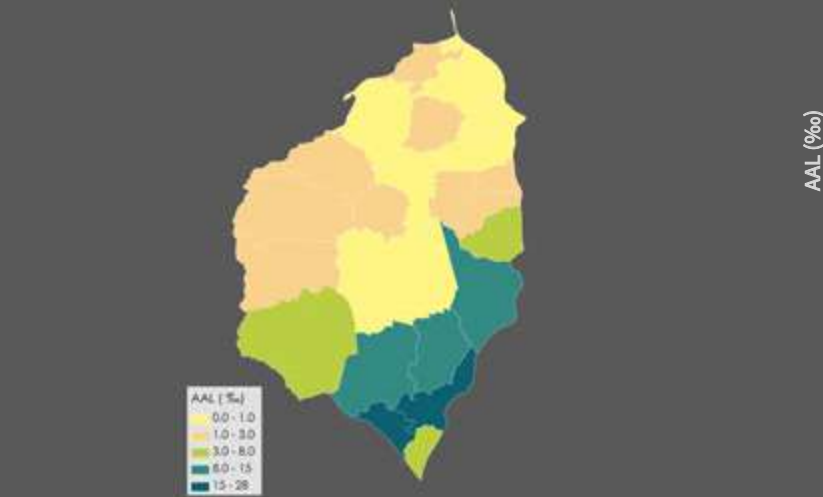
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaz [‰]	RF	F	RI
Fortul	3.809	5,61	0,61	0,77	1,09
Saravena	8.943	5,53	0,60	0,56	0,93
Tame	9.856	4,95	0,49	0,75	0,86
Puerto Rondón	548	4,96	0,49	0,60	0,79
Arauquita	4.281	4,38	0,38	0,71	0,65
Arauca	7.584	4,27	0,36	0,56	0,57
Cravo Norte	1.691	2,85	0,16	0,67	0,27

ATLÁNTICO

INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	2.489.514	Indice de Gini	0,44
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	32.751.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	24,7

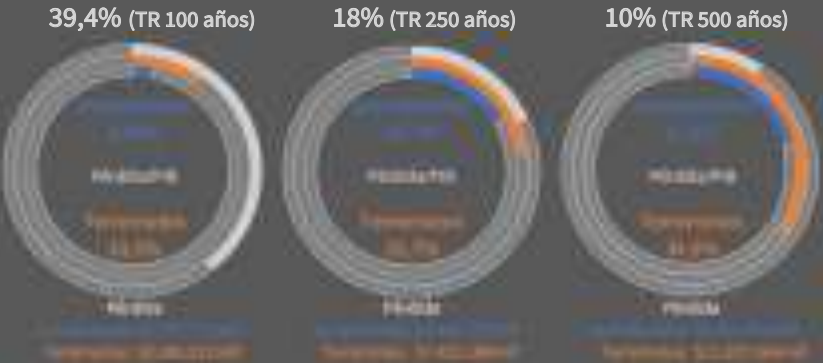
RIESGO MULTI-AMENAZA



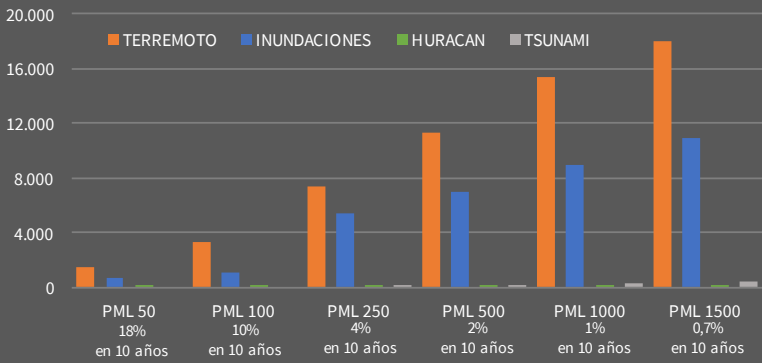
Contribución de cada amenaza a la AAL



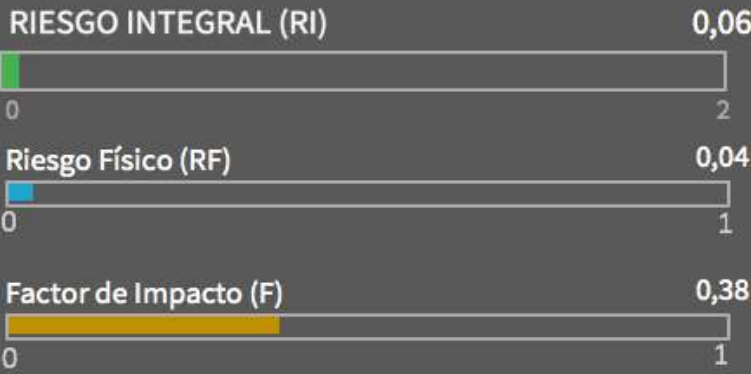
Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años



Pérdidas Máximas Probables



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



Variables del Factor de Impacto (F)

Fragilidad socio-económica

- Personas en miseria
- Vivienda
- Hacinamiento
- Servicios
- Dependencia económica
- Tasa mortalidad infantil
- Población analfabeta
- Desempleo

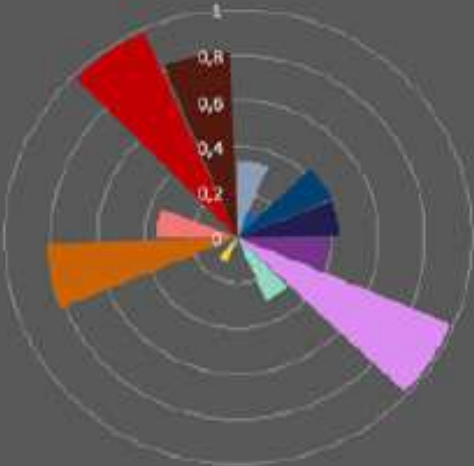
Falta de resiliencia

- Indicador de desempeño integral
- IMR (Componente gestión del riesgo)
- Ingresos tributarios (per capita)
- Ingresos no tributarios (per capita)
- Importancia económica (V. agregado per capita)
- Porcentaje población en cabecera (INVERSO)
- Densidad empresarial 2016 (por cada 10000 hab)
- Tasa IPS por cada 1000 hab

Valor (normalizado)

0= Bajo - 1= Alto

- 0,33
- 0,12
- 0,43
- 0,43
- 0,39
- 0,98
- 0,30
- 0,01
- 0,04
- 0,12
- 0,00
- 0,02
- 0,35
- 0,00
- 0,99
- 0,82



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [‰]	RF	F	RI
Santa Lucía	9.692	27,26	1,00	0,88	1,88
Ponedera	7.059	11,88	1,00	0,82	1,82
Campo de La Cruz	13.289	19,59	1,00	0,76	1,76
Candelaria	3.768	11,71	1,00	0,76	1,76
Manatí	6.705	13,30	1,00	0,68	1,68
Suan	2.564	7,98	0,92	0,74	1,60
Palmar de Varela	3.058	5,44	0,58	0,67	0,97
Repelón	3.703	3,99	0,32	0,73	0,55
Santo Tomás	5.650	2,76	0,15	0,68	0,25
Puerto Colombia	524	1,57	0,05	0,39	0,07
Usiacurí	483	1,30	0,03	0,72	0,06
Piojó	176	1,21	0,03	0,73	0,05
Juan de Acosta	498	1,21	0,03	0,66	0,05
Luruaco	841	1,02	0,02	0,86	0,04
Sabanagrande	944	1,05	0,02	0,73	0,04
Polonuevo	660	1,07	0,02	0,66	0,04
Galapa	1.270	1,04	0,02	0,66	0,04
Tubará	972	0,92	0,02	0,61	0,03
Barranquilla	50.879	0,99	0,02	0,37	0,03
Sabanalarga	2.834	0,84	0,01	0,74	0,02
Malambo	2.584	0,73	0,01	0,64	0,02
Baranoa	1.579	0,68	0,01	0,58	0,01
Soledad	14.611	0,66	0,01	0,51	0,01

BOGOTÁ, D.C.

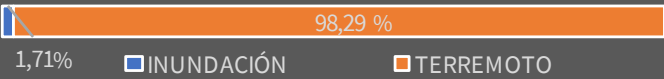
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	7.980.001	Indice de Gini	0,50
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	204.317.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	9,2

RIESGO MULTI-AMENAZA



Contribución de cada amenaza a la AAL



Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años

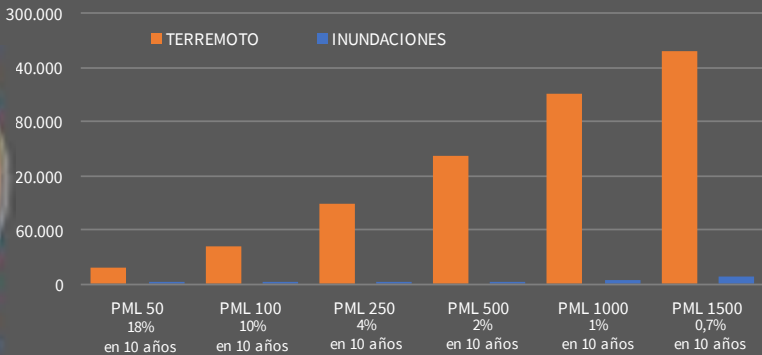
39,4% (TR 100 años)

18% (TR 250 años)

10% (TR 500 años)



Pérdidas Máximas Probables



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



Variables del Factor de Impacto (F)

Fragilidad socio-económica

- Personas en miseria
- Viviendo
- Hacinamiento
- Servicios
- Dependencia económica
- Tasa mortalidad infantil
- Población analfabeta
- Desempleo

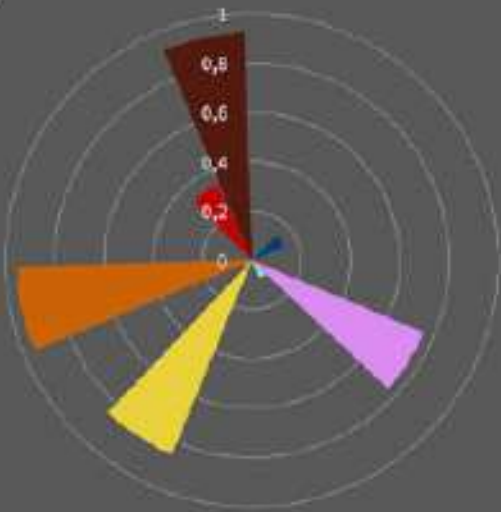
Falta de resiliencia

- Indicador de desempeño integral
- IMR (Componente gestión del riesgo)
- Ingresos tributarios (per capita)
- Ingresos no tributarios (per capita)
- Importancia económica (v. agregado per capita)
- Porcentaje población en cabecera (INVERSO)
- Densidad empresarial 2016 (por cada 10000 hab)
- Tasa IPS por cada 1000 hab

Valor (normalizado)

0 = Bajo - 1= Alto

- 0,01
- 0,00
- 0,14
- 0,00
- 0,03
- 0,76
- 0,08
- 0,02
- 0,00
- 0,85
- 0,04
- 0,95
- 0,00
- 0,00
- 0,34
- 0,92

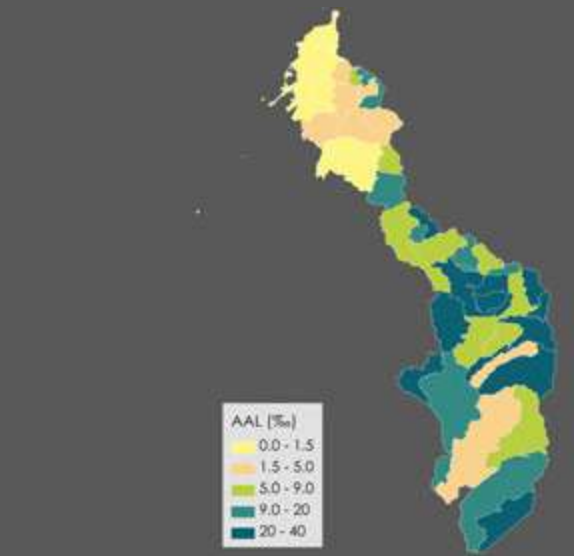


BOLÍVAR

INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	2.121.956	Indice de Gini	0,46
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	30.596.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	46,6

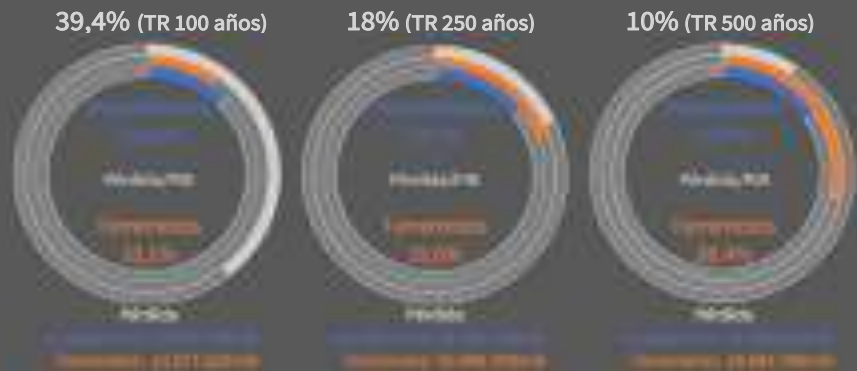
RIESGO MULTI-AMENAZA



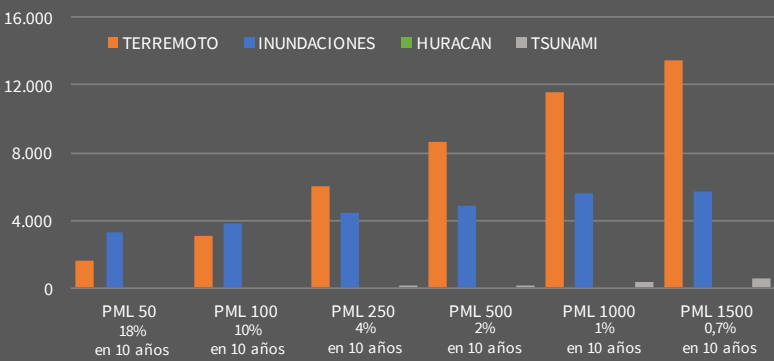
Contribución de cada amenaza a la AAL



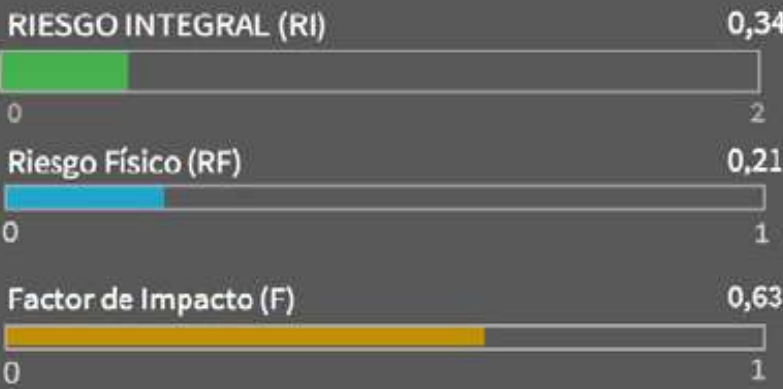
Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años



Pérdidas Máximas Probables



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



Variables del Factor de Impacto (F)

Fragilidad socio-económica

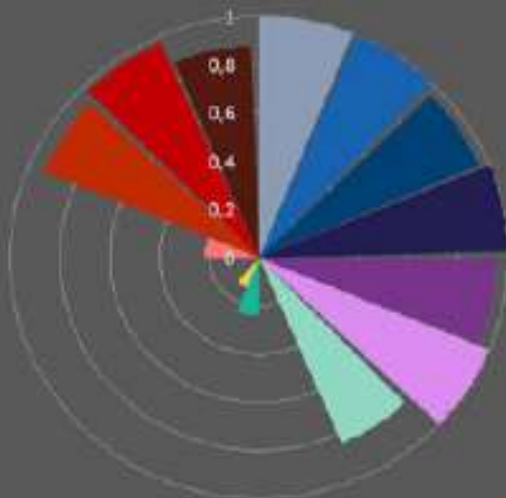
- Persolas en miseria
- Vivienda
- Hacinamiento
- Servicios
- Dependencia económica
- Tasa mortalidad infantil
- Población analfabeta
- Desempleo

Falta de resiliencia

- Indicador de desempeño integral
- IMR (Componente gestión del riesgo)
- Ingresos tributarios (per capita)
- Ingresos no tributarios (per capita)
- Importancia económica (V. agregado per capita)
- Porcentaje población en cabecera (INVERSO)
- Densidad empresarial 2016 (por cada 10000 hab)
- Tasa IPS por cada 1000 hab

Valor (normalizado)
0 = Bajo - 1 = Alto

1,00
1,00
0,96
1,00
0,95
1,00
0,84
0,01
0,24
0,13
0,00
0,00
0,22
0,93
0,97
0,88



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

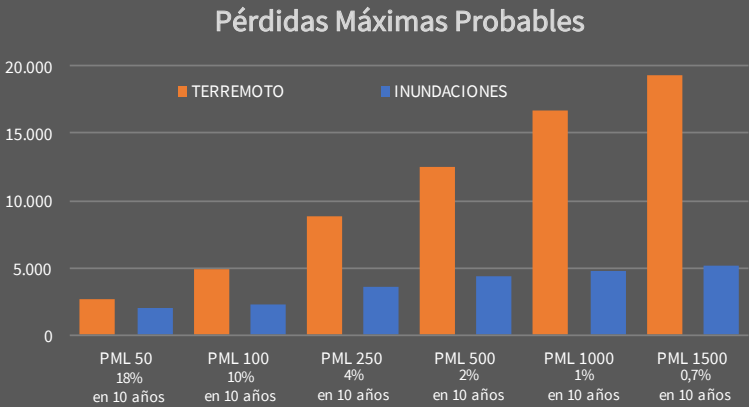
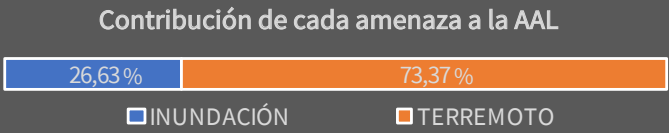
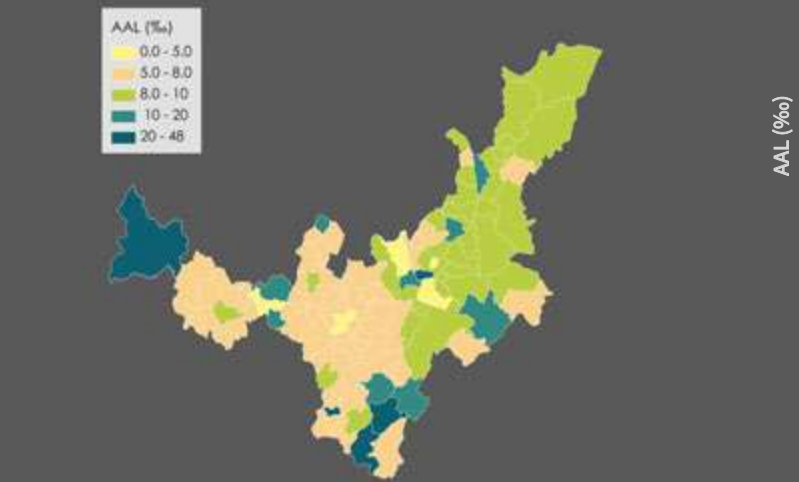
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%o]	RF	F	RI
Calamar	8.777	16,92	1,00	0,90	1,90
Achí	14.537	22,01	1,00	0,88	1,88
Barranco de Loba	13.668	29,24	1,00	0,87	1,87
El Peñón	8.617	22,24	1,00	0,86	1,86
San Fernando	4.746	16,38	1,00	0,85	1,85
San Pablo	3.855	11,62	1,00	0,84	1,84
Córdoba	5.792	11,09	1,00	0,84	1,84
San Jacinto del Cauca	11.841	33,66	1,00	0,83	1,83
Regidor	2.923	30,36	1,00	0,83	1,83
San Martín de Loba	3.699	8,94	0,98	0,87	1,82
Hatillo de Loba	9.542	19,71	1,00	0,82	1,82
Río Viejo (1)(3)	13.161	25,02	1,00	0,81	1,81
Pinillos	10.175	29,69	1,00	0,81	1,81
Talaigua Nuevo	1.094	40,31	1,00	0,81	1,81
Cicuco	17.425	12,26	1,00	0,81	1,81
Montecristo	6.053	11,85	1,00	0,81	1,81
Altos del Rosario	9.798	27,89	1,00	0,80	1,80
Morales	10.845	21,52	1,00	0,78	1,78
San Cristóbal	2.573	11,70	1,00	0,74	1,74
Cantagallo	11.163	22,20	1,00	0,63	1,63
Tiquisio	4.388	7,42	0,87	0,86	1,61
Simití	4.442	7,07	0,83	0,81	1,50
Norosí (1)	764	6,97	0,82	0,82	1,48
Zambrano	2.470	6,31	0,73	0,85	1,34
Margarita	4.699	6,00	0,68	0,85	1,26
Mompós	8.284	6,16	0,71	0,68	1,19
Magangué	31.023	5,71	0,63	0,80	1,14
Soplaviento	312	5,77	0,64	0,71	1,10
Arenal	1.167	4,24	0,36	0,78	0,64
Arroyohondo	1.093	3,52	0,25	0,80	0,45
Santa Rosa del Sur	3.561	3,62	0,26	0,67	0,44
San Estanislao	2.250	3,36	0,23	0,88	0,42
María La Baja	4.201	2,36	0,11	0,81	0,20
El Guamo	629	2,30	0,11	0,82	0,19
San Juan Nepomuceno	2.037	1,78	0,06	0,84	0,12
Mahates	1.498	1,62	0,05	0,76	0,09
San Jacinto	1.428	1,44	0,04	0,81	0,07
Arjona	3.863	1,36	0,04	0,81	0,07
Turbaná	819	1,34	0,04	0,77	0,06
Santa Catalina	467	1,24	0,03	0,84	0,06
Villanueva	625	1,06	0,02	0,78	0,04
Santa Rosa	860	1,03	0,02	0,82	0,04
Clemencia	583	1,00	0,02	0,85	0,04
El Carmen de Bolívar	3.082	0,95	0,02	0,81	0,03
Turbaco	1.884	0,67	0,01	0,66	0,01
Cartagena	24.173	0,49	0,00	0,49	0,01

BOYACÁ

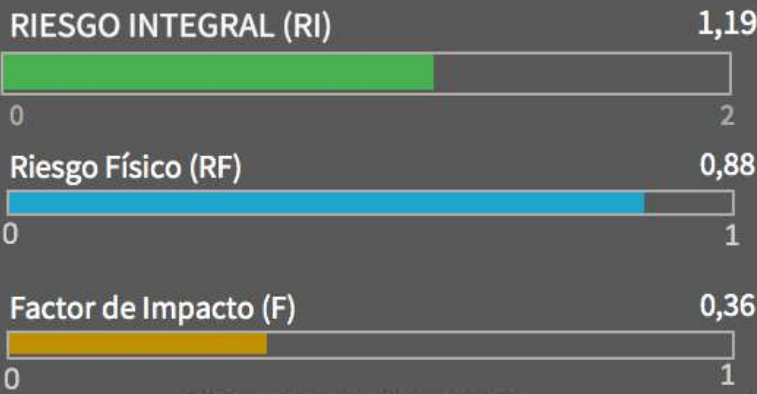
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	1.278.107	Indice de Gini	0,51
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	23.450.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	30,8

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



Variables del Factor de Impacto (F)

Fragilidad socio-económica

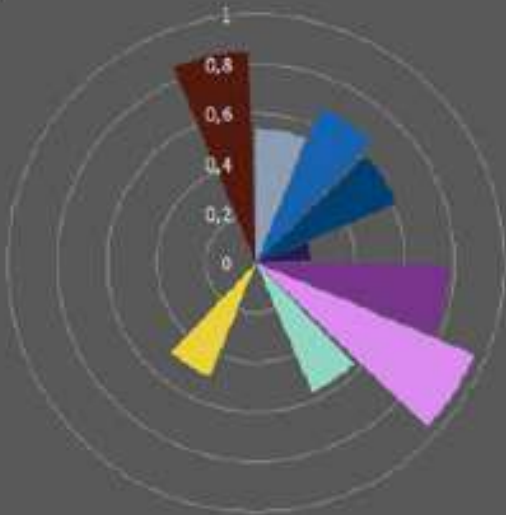
- Personas en miseria
- Vivienda
- Hacinamiento
- Servicios
- Dependencia económica
- Tasa mortalidad infantil
- Población analfabeta
- Desempleo

Falta de resiliencia

- Indicador de desempeño integral
- IMR (Componente gestión del riesgo)
- Ingresos tributarios (per capita)
- Ingresos no tributarios (per capita)
- Importancia económica (V. agregado per capita)
- Porcentaje población en cabecera (INVERSO)
- Densidad empresarial 2016 (por cada 10000 hab)
- Tasa IPS por cada 1000 hab

Valores (normalizado)
0 = Bajo - 1 = Alto

- 0,54
- 0,67
- 0,62
- 0,22
- 0,77
- 0,95
- 0,57
- 0,01
- 0,02
- 0,49
- 0,00
- 0,00
- 0,00
- 0,00
- 0,00
- 0,04
- 0,95



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%]	RF	F	RI
Chita	3.582	8,73	0,97	0,67	1,62
Santana	3.960	13,76	1,00	0,61	1,61
Pisba	772	8,39	0,95	0,70	1,61
Maripí	2.996	8,63	0,96	0,66	1,59
Labranzagrande	2.567	11,70	1,00	0,59	1,59
Chiscas	1.995	8,87	0,97	0,63	1,58
Cultiva	240	8,22	0,94	0,69	1,58
Saboyá	10.493	17,38	1,00	0,58	1,58
San Miguel de Sema	1.711	10,32	1,00	0,58	1,58
Tasco	3.148	9,64	1,00	0,58	1,57
Puerto Boyacá	92.346	23,41	1,00	0,57	1,57
Cubará	2.700	9,99	1,00	0,57	1,57
Boavita	3.411	13,56	1,00	0,56	1,56
Socotá	3.980	8,95	0,98	0,59	1,56
Umbita	2.734	8,59	0,96	0,62	1,55
El Espino	1.403	8,59	0,96	0,61	1,54
Campohermoso	3.148	22,05	1,00	0,53	1,53
Güicán	2.531	9,12	0,98	0,55	1,53
Aquitania	6.009	8,54	0,96	0,59	1,53
Sutatenza	3.662	47,77	1,00	0,52	1,52
Susacón	1.594	8,33	0,94	0,60	1,51
Betétiva	578	8,19	0,93	0,61	1,51
Santa María	4.160	26,48	1,00	0,51	1,51
Jericó	1.391	8,01	0,92	0,62	1,49
Miraflores	5.624	10,05	1,00	0,49	1,49
Sativanorte	928	8,35	0,95	0,58	1,49
Páez	2.231	14,44	1,00	0,49	1,49
Mongua	2.120	8,44	0,95	0,55	1,48
Covarachía	766	8,05	0,92	0,60	1,47
Muzo	2.397	7,78	0,90	0,63	1,47
Gameza	1.019	8,48	0,95	0,53	1,46
San Mateo	1.284	8,46	0,95	0,53	1,46
Tota	2.155	8,04	0,92	0,58	1,46
Panqueba	525	8,69	0,97	0,49	1,44
Macanal	1.466	8,05	0,92	0,55	1,43
Tibasosa	5.661	12,46	1,00	0,43	1,43
Siachoque	1.833	7,48	0,87	0,64	1,43
Tópaga	2.027	8,34	0,94	0,51	1,43
La Uvita	1.489	8,57	0,96	0,49	1,43
Floresta	1.637	8,16	0,93	0,53	1,43
Tutazá	801	8,02	0,92	0,54	1,42
El Cocuy	2.362	7,77	0,90	0,58	1,42
Soatá	3.542	8,27	0,94	0,50	1,41
Gachantivá	895	8,08	0,93	0,52	1,41
Pesca	3.223	7,91	0,91	0,54	1,41
Viracachá	1.534	7,37	0,86	0,63	1,40
Sativasur	349	8,53	0,96	0,46	1,40
Guacamayas	702	8,61	0,96	0,45	1,39
Cerínza	1.491	8,00	0,92	0,51	1,39
Paz de Río	2.739	12,17	1,00	0,39	1,39
Chíquiza	1.736	6,82	0,80	0,74	1,38
Nobsa	21.319	21,69	1,00	0,38	1,38
San Pablo de Borbur	2.740	7,16	0,84	0,65	1,38
Socha	2.501	8,54	0,96	0,44	1,38
Pajarito	840	7,99	0,92	0,50	1,37
Paya	346	6,97	0,82	0,68	1,37
Toca	2.654	7,55	0,88	0,56	1,37
La Victoria	153	7,01	0,82	0,67	1,37
Berbeo	130	7,90	0,91	0,50	1,37
Monguí	1.755	8,34	0,94	0,45	1,37
Pauna	3.171	7,07	0,83	0,65	1,37
Rondón	1.812	7,60	0,88	0,54	1,36

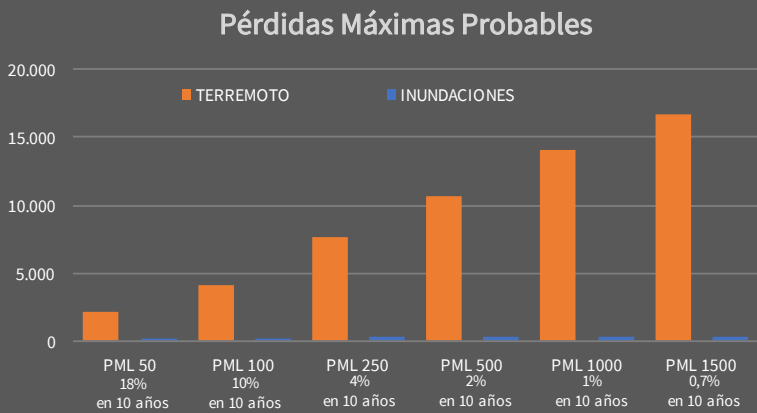
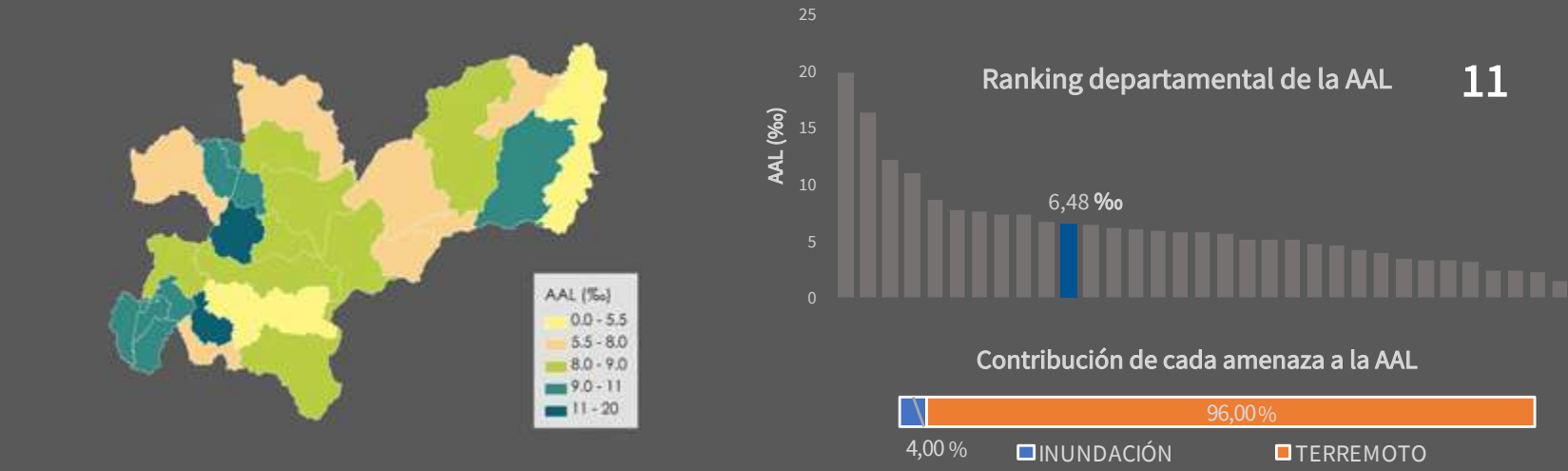
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%]	RF	F	RI
Otanche	1.605	7,48	0,87	0,56	1,36
Zetaquirá	1.243	7,71	0,89	0,52	1,36
Corrales	777	8,30	0,94	0,44	1,36
Paipa	12.192	8,91	0,98	0,38	1,35
San Eduardo	1.018	7,94	0,92	0,46	1,34
Tenza	447	7,98	0,92	0,45	1,34
Ciénega	1.317	7,35	0,86	0,55	1,33
Iza	1.283	8,13	0,93	0,43	1,33
Quípama	3.696	7,04	0,83	0,61	1,33
Sotaquirá	2.500	7,28	0,85	0,55	1,32
Firavitoba	2.182	8,06	0,92	0,43	1,32
Oicatá	1.291	7,18	0,84	0,57	1,32
Soracá	1.313	7,20	0,84	0,56	1,32
Chinavita	1.257	7,24	0,85	0,55	1,32
Caldas	1.560	6,67	0,78	0,68	1,31
Chivatá	1.279	7,33	0,86	0,53	1,31
Tibaná	2.954	6,99	0,82	0,60	1,31
Motavita	2.286	6,97	0,82	0,60	1,30
Chitaraque	1.659	7,17	0,84	0,55	1,30
Togüí	1.737	7,19	0,84	0,54	1,30
Cucaita	1.142	6,79	0,79	0,63	1,29
Tipacoque	1.374	6,90	0,81	0,59	1,28
Pachavita	632	7,15	0,84	0,53	1,28
Jenesano	1.231	7,03	0,82	0,54	1,27
Cómbita	3.212	7,08	0,83	0,53	1,27
Chivor	1.083	7,23	0,85	0,49	1,26
Briceño	982	6,89	0,81	0,56	1,25
Santa Rosa de Viterbo	4.543	7,43	0,87	0,44	1,25
Sora	907	6,77	0,79	0,58	1,25
Moniquirá	15.152	7,23	0,85	0,46	1,24
Guayatá	3.039	6,96	0,82	0,51	1,23
Coper	1.130	6,64	0,77	0,58	1,22
Tunungá	585	6,94	0,81	0,50	1,22
Ráquira	3.291	6,40	0,74	0,64	1,21
Almeida	479	7,28	0,85	0,42	1,21
Turmequé	3.260	6,71	0,78	0,53	1,20
Boyacá	1.358	7,07	0,83	0,45	1,20
Sáchica	1.318	6,67	0,78	0,55	1,20
Somondoco	867	7,12	0,83	0,44	1,20
Tuta	2.637	7,42	0,87	0,38	1,19
Nuevo Colón	1.496	6,82	0,80	0,49	1,19
San José de Pare	2.293	6,44	0,75	0,59	1,19
Buenavista	1.346	6,67	0,78	0,51	1,18
Tinjacá	1.387	6,54	0,76	0,54	1,17
Santa Sofía	746	6,76	0,79	0,44	1,14
Ramiriquí	3.568	6,61	0,77	0,48	1,14
Ventaquemada	4.028	6,27	0,72	0,54	1,11
Garagoa	4.849	6,54	0,76	0,46	1,11
San Luis de Gaceno	1.496	6,24	0,72	0,51	1,09
Guateque	3.174	6,54	0,76	0,43	1,08
Belén	2.785	6,38	0,74	0,46	1,08
Samacá	5.801	6,43	0,75	0,45	1,08
La Capilla	1.877	6,26	0,72	0,46	1,05
Arcabuco	1.702	5,96	0,67	0,43	0,97
Sutamarchán	1.443	5,53	0,60	0,50	0,90
Villa de Leyva	2.850	5,66	0,62	0,40	0,88
Sogamoso	34.151	4,75	0,45	0,29	0,58
Duitama	28.168	4,37	0,38	0,31	0,50
Chiquinquirá	11.168	3,24	0,21	0,41	0,30
Tunja	34.808	3,34	0,22	0,28	0,29
Busbanzá	0	0,00	0,00	0,51	0,00

CALDAS

INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	989.934	Indice de Gini	0,50
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	11.936.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	17,8

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

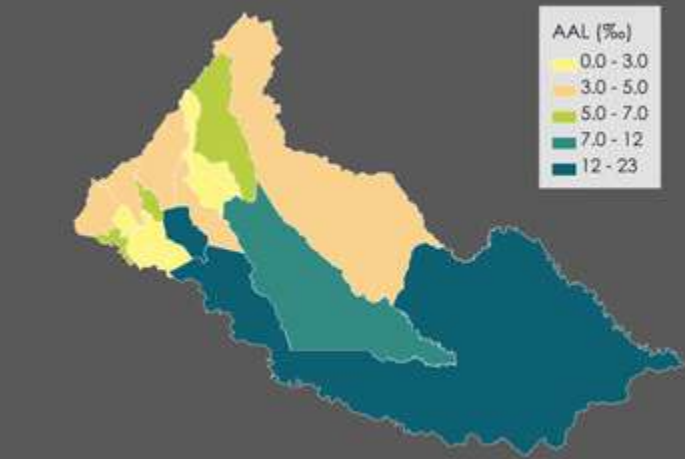
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [‰]	RF	F	RI
San José	2.073	10,14	1,00	0,58	1,58
Palestina	15.722	19,45	1,00	0,57	1,57
Marmato	5.185	10,12	1,00	0,55	1,55
Victoria	3.139	10,20	1,00	0,52	1,52
Risaralda	977	10,85	1,00	0,51	1,51
Belalcázar	3.337	10,49	1,00	0,50	1,50
Filadelfia	5.608	11,18	1,00	0,49	1,49
Viterbo	7.385	10,94	1,00	0,48	1,48
La Merced	1.351	9,87	1,00	0,46	1,46
Pácora	6.039	8,90	0,98	0,49	1,45
Samaná	5.683	8,39	0,95	0,52	1,44
Supía	11.253	9,02	0,98	0,47	1,44
Marulanda	1.479	8,41	0,95	0,48	1,41
Salamina	7.467	8,62	0,96	0,44	1,39
Neira	13.026	8,05	0,92	0,49	1,38
Villamaría	14.461	8,75	0,97	0,42	1,38
Pensilvania	5.464	7,63	0,89	0,55	1,37
Aranzazu	4.446	8,15	0,93	0,47	1,37
Anserma	20.212	8,29	0,94	0,45	1,37
Aguadas	12.970	7,78	0,90	0,43	1,29
Norcasia	2.788	6,99	0,82	0,54	1,26
Marquetalia	3.664	6,73	0,79	0,52	1,20
Riosucio	20.917	6,87	0,80	0,46	1,17
Manzanares	5.288	6,52	0,76	0,54	1,17
Chinchiná	19.097	5,88	0,66	0,45	0,96
Manizales	182.936	5,31	0,56	0,30	0,73
La Dorada	10.303	4,70	0,44	0,49	0,66

CAQUETÁ

INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	483.846	Indice de Gini	0,46
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	3.695.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	41,7

RIESGO MULTI-AMENAZA



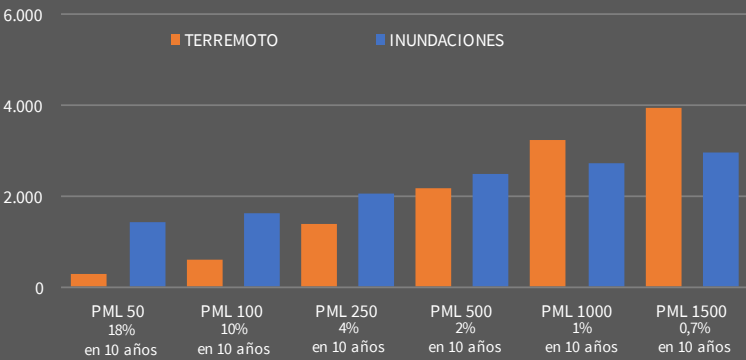
Contribución de cada amenaza a la AAL



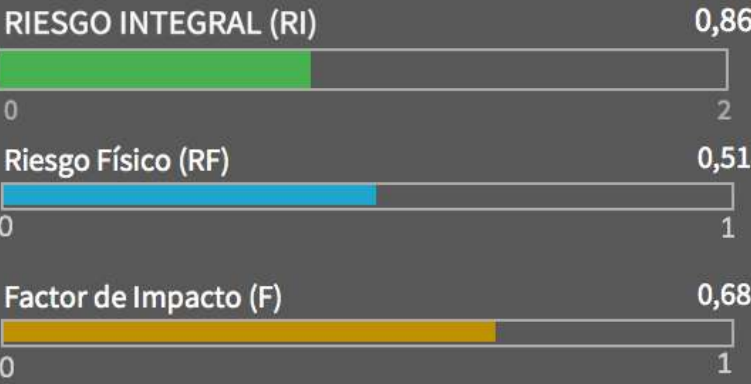
Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años



Pérdidas Máximas Probables



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



Variables del Factor de Impacto (F)

Fragilidad socio-económica

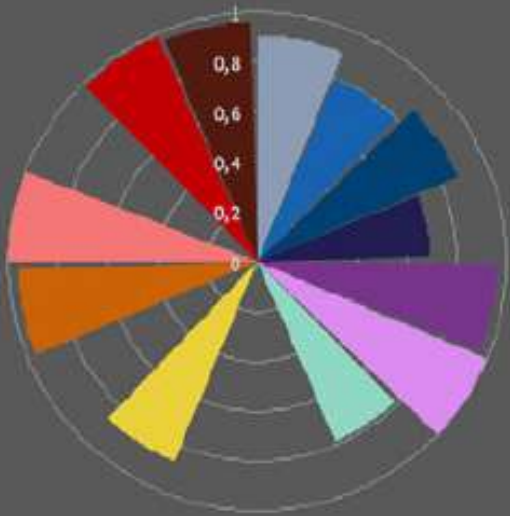
- Personas en miseria
- Vivienda
- Hacinamiento
- Servicios
- Dependencia económica
- Tasa mortalidad infantil
- Población analfabeta
- Desempleo

Falta de resiliencia

- Indicador de desempeño integral
- IMR (Componente gestión del riesgo)
- Ingresos tributarios (per capita)
- Ingresos no tributarios (per capita)
- Importancia económica (V. agregado per capita)
- Porcentaje población en cabecera (INVERSO)
- Densidad empresarial 2016 (por cada 10000 hab)
- Tasa IPS por cada 1000 hab

Valor (normalizado)
0 = Bajo - 1 = Alto

- 0,91
- 0,80
- 0,87
- 0,70
- 0,96
- 1,00
- 0,78
- 0,01
- 0,04
- 0,87
- 0,00
- 0,96
- 1,00
- 0,00
- 0,99
- 0,96



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

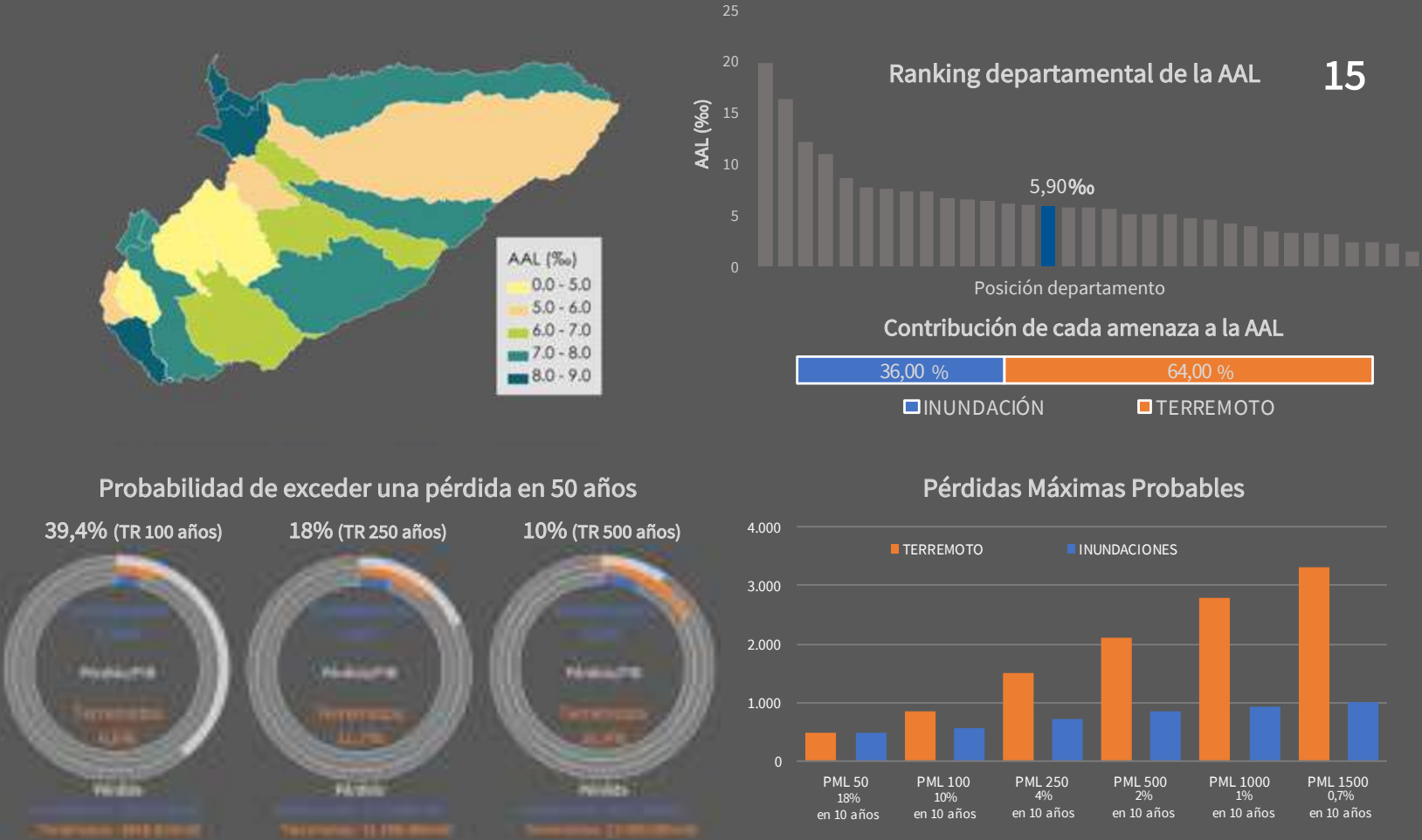
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]		AAL Multi-amenaza [‰]		RF		F		RI	
Solano		21.251		22,84		1,00		0,87		1,87
Milán		6.010		12,55		1,00		0,82		1,82
Cartagena del Chairá		21.498		10,76		1,00		0,74		1,74
Morelia		1.230		5,12		0,52		0,69		0,88
Puerto Rico		9.712		5,16		0,53		0,65		0,88
Curillo		1.625		5,11		0,52		0,64		0,86
La Montañita		4.641		4,14		0,34		0,78		0,61
San Vicente del Caguán		17.523		4,18		0,35		0,70		0,59
Belén de Los Andaquies		4.974		4,17		0,35		0,66		0,58
San José del Fragua		4.247		3,77		0,28		0,71		0,49
Florencia		42.318		3,65		0,27		0,48		0,39
Valparaíso		1.661		2,92		0,17		0,69		0,29
El Doncello		2.624		2,66		0,14		0,65		0,23
Albania		675		2,48		0,12		0,61		0,20
Solita		513		2,45		0,12		0,63		0,20
El Paujil		1.839		1,99		0,08		0,74		0,14

CASANARE

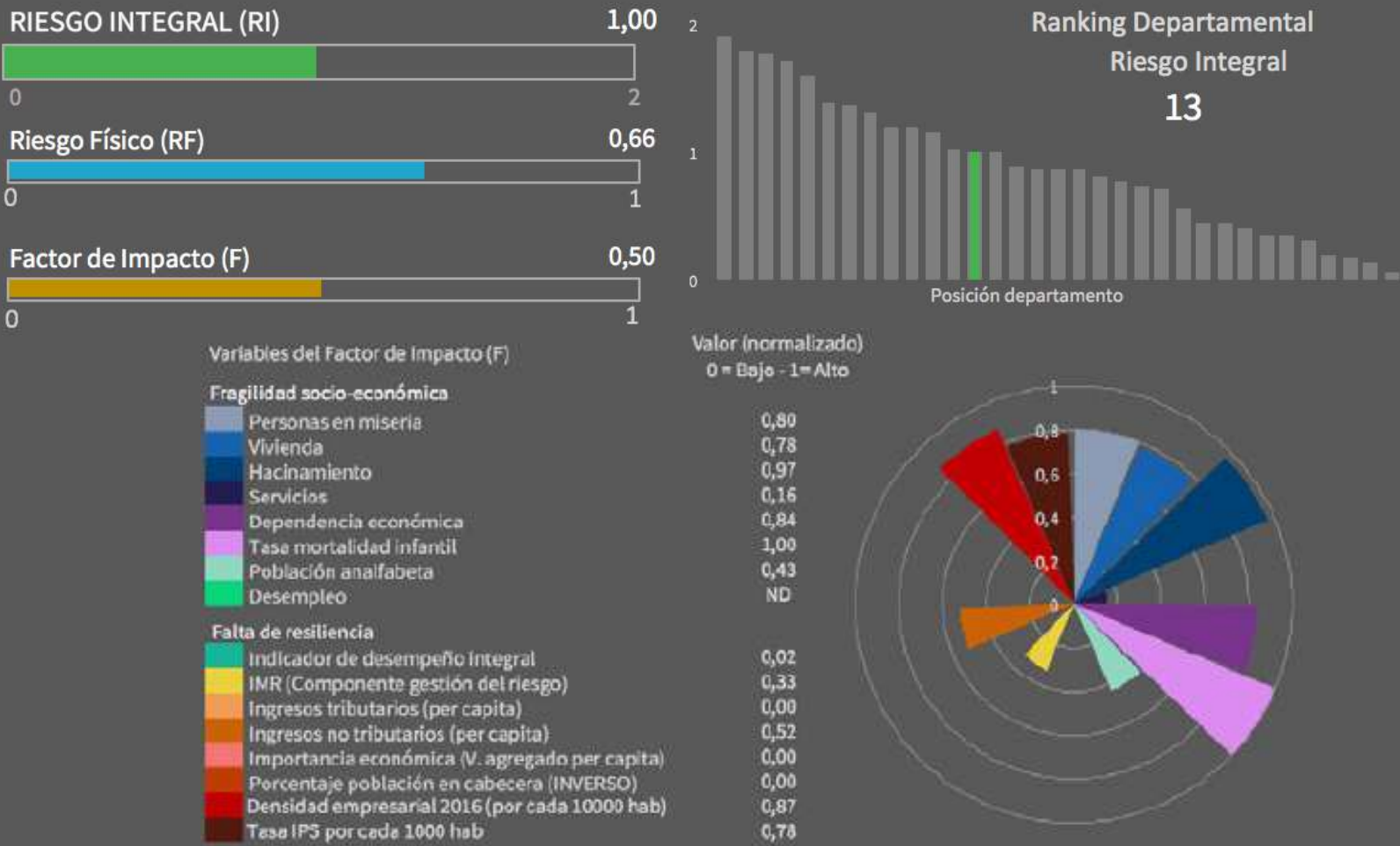
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	362.721	Índice de Gini	ND
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	12.815.000	Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	35,5

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

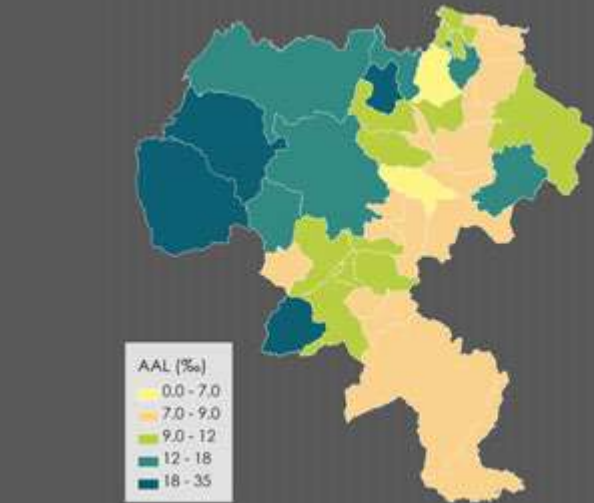
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [‰]	RF	F	RI
Támara	3.037	8,25	0,94	0,68	1,58
Trinidad	4.465	7,94	0,92	0,64	1,50
Hato Corozal	3.925	7,36	0,86	0,70	1,47
Orocué	3.329	7,71	0,90	0,63	1,46
Recetor	780	7,24	0,85	0,66	1,40
Villanueva	7.995	8,92	0,98	0,43	1,40
Sácama	577	8,11	0,93	0,49	1,38
La Salina	456	8,43	0,95	0,44	1,37
Chameza	791	7,42	0,87	0,53	1,33
San Luis de Palenque	1.982	6,70	0,78	0,57	1,23
Tauramena	5.324	7,10	0,83	0,46	1,21
Nunchía	2.581	6,00	0,68	0,72	1,17
Pore	1.902	6,44	0,75	0,56	1,16
Maní	2.970	6,71	0,78	0,45	1,14
Paz de Ariporo	6.273	5,54	0,60	0,54	0,93
Sabanalarga	932	5,55	0,60	0,39	0,84
Monterrey	2.578	4,97	0,49	0,38	0,68
Aguazul	4.917	4,76	0,45	0,40	0,64
Yopal	19.288	4,42	0,39	0,34	0,52

CAUCA

INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	1.391.836	Índice de Gini	0,50
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	13.929.000	Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	46,6

RIESGO MULTI-AMENAZA



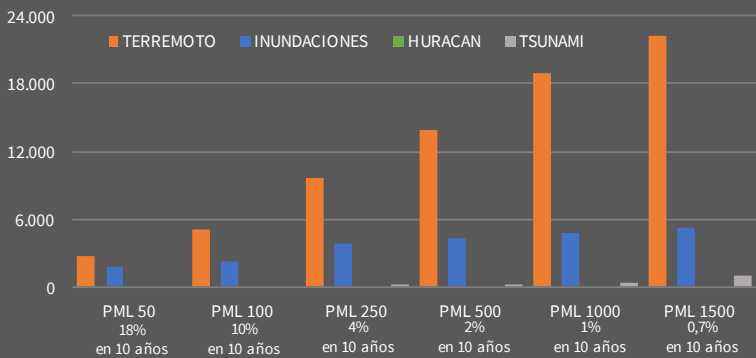
Contribución de cada amenaza a la AAL



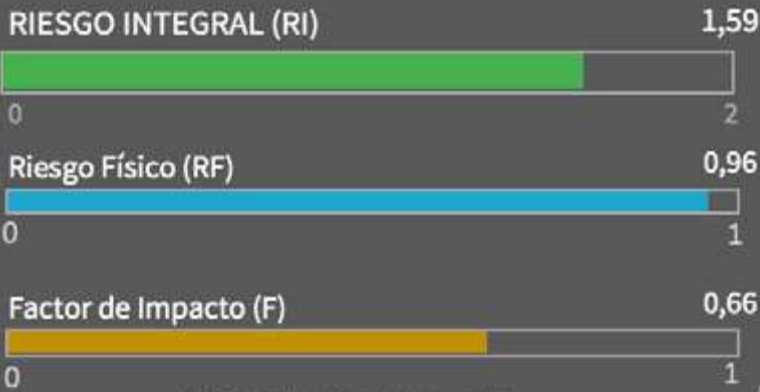
Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años



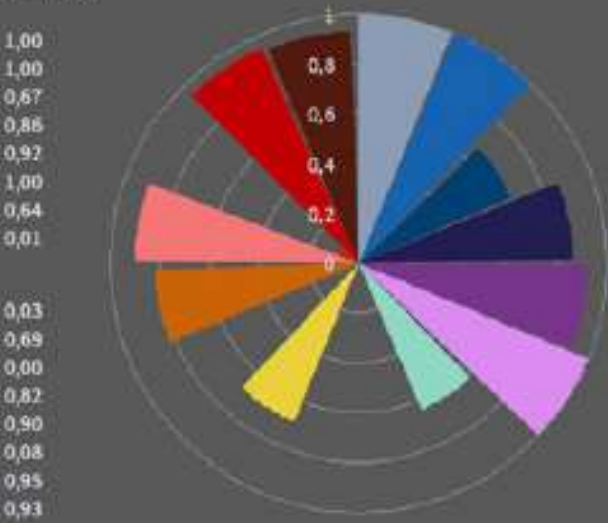
Pérdidas Máximas Probables



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



Variables del Factor de Impacto (F)



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

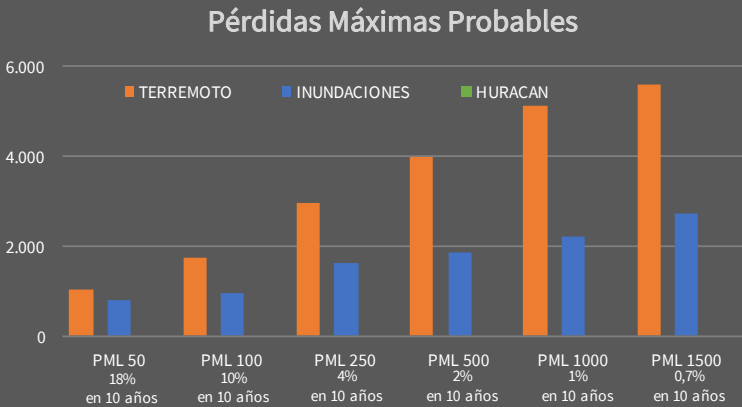
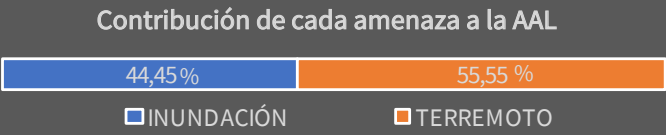
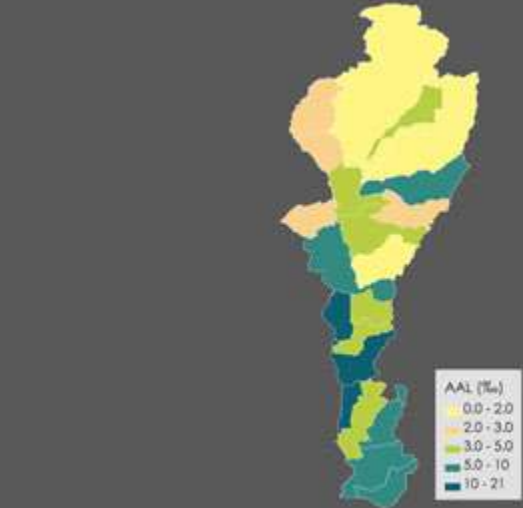
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%o]	RF	F	RI
Argelia	15.151	16,16	1,00	0,85	1,85
Sucre	2.535	9,15	0,99	0,81	1,78
Suárez	31.812	34,34	1,00	0,75	1,75
Mercaderes	35.833	21,86	1,00	0,73	1,73
El Tambo	23.749	15,88	1,00	0,73	1,73
Timbiquí	15.232	18,43	1,00	0,72	1,72
López	11.139	16,01	1,00	0,71	1,71
Guapi	22.825	18,82	1,00	0,71	1,71
Balboa	6.064	8,96	0,98	0,74	1,71
Almaguer	7.904	8,62	0,96	0,77	1,70
Sotara	6.148	8,99	0,98	0,72	1,68
Toribio	7.128	8,65	0,96	0,73	1,67
La Sierra	3.469	9,15	0,99	0,69	1,67
Paez	12.305	10,26	1,00	0,66	1,66
Santa Rosa	10.613	8,61	0,96	0,72	1,65
La Vega	11.677	9,03	0,98	0,68	1,65
Caldono	9.950	9,61	1,00	0,65	1,64
Bolívar	19.258	10,60	1,00	0,64	1,64
Morales	9.252	10,09	1,00	0,62	1,62
Jambaló	5.294	8,80	0,97	0,66	1,61
Inzá	14.227	12,18	1,00	0,61	1,61
Puracé	6.519	8,35	0,95	0,70	1,61
Patía	18.862	10,10	1,00	0,61	1,61
San Sebastián	3.972	8,99	0,98	0,64	1,61
Miranda	14.511	8,72	0,97	0,66	1,60
Totoró	6.445	8,61	0,96	0,66	1,60
Buenos Aires	14.436	16,59	1,00	0,59	1,59
Guachené (1)	4.251	10,23	1,00	0,59	1,59
Florencia	1.805	9,24	0,99	0,60	1,59
Cajibío	15.911	11,05	1,00	0,59	1,59
Rosas	4.743	8,21	0,94	0,64	1,54
Piendamó	12.193	8,70	0,97	0,57	1,52
Corinto	8.130	8,66	0,96	0,56	1,50
Piamonte	1.677	7,22	0,85	0,77	1,50
Villa Rica	29.230	9,63	1,00	0,50	1,49
Padilla	4.829	10,11	1,00	0,47	1,47
Puerto Tejada	13.895	9,48	0,99	0,48	1,47
Caloto(1)(3)	14.711	12,03	1,00	0,43	1,43
Timbío	13.242	7,77	0,90	0,57	1,42
Silvia	11.684	7,98	0,92	0,54	1,41
Santander de Quilichao	40.030	6,91	0,81	0,43	1,16
Popayán	175.109	5,23	0,54	0,33	0,73

CESAR

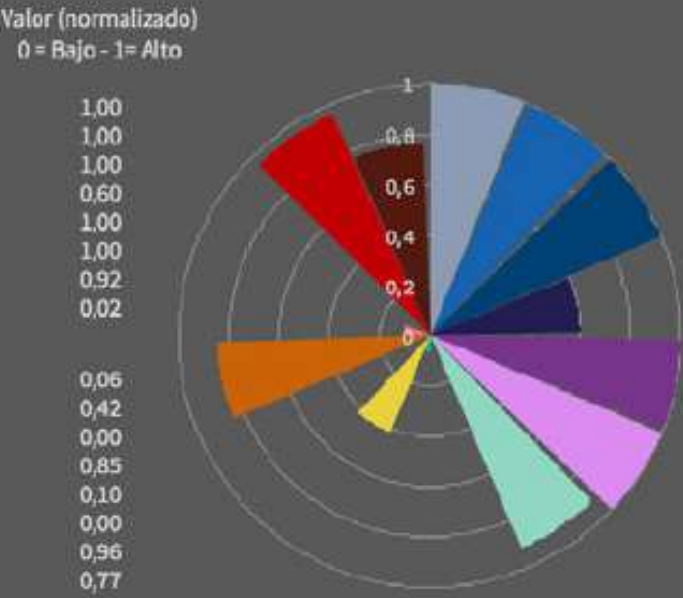
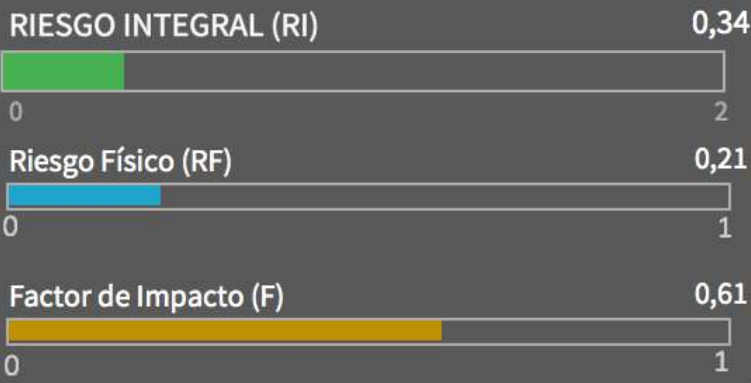
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	1.041.204	Indice de Gini	0,49
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	14.344.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	44,7

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

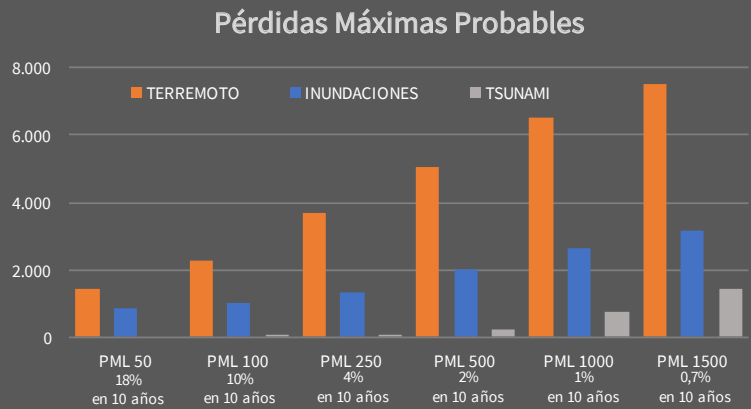
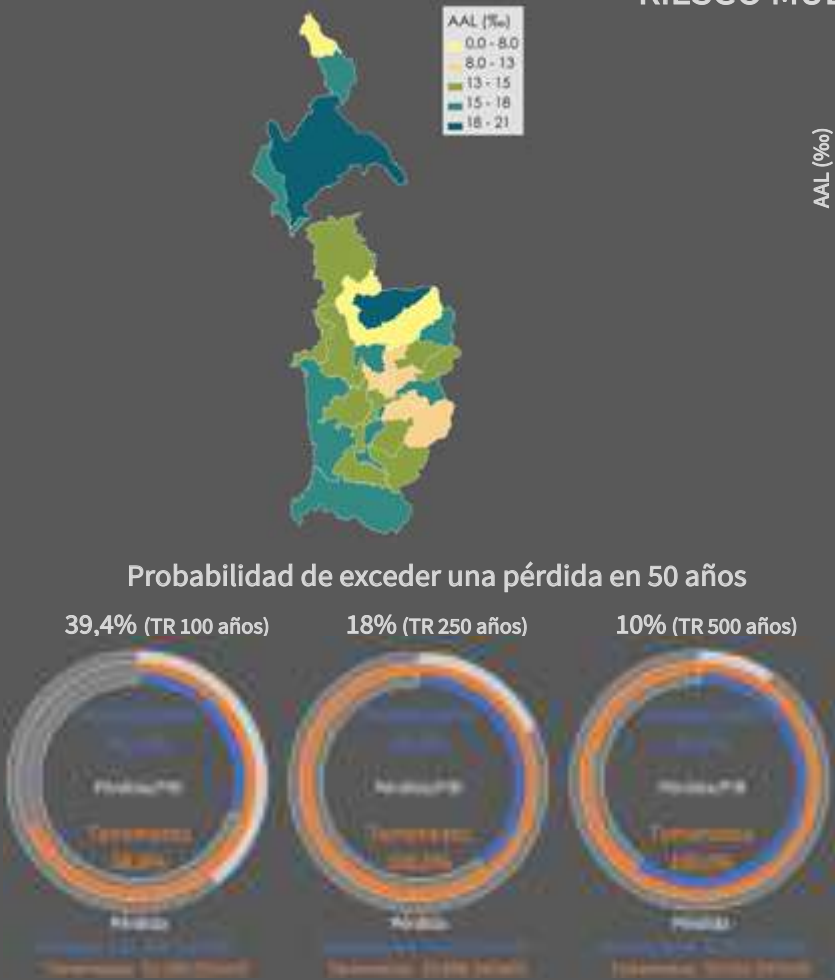
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]		AAL Multi-amenaza [‰]		RF		F		RI	
Tamalameque		6.046		16,86		1,00		0,82		1,82
La Gloria		12.264		21,18		1,00		0,77		1,77
Gamarra		7.555		18,54		1,00		0,73		1,73
San Martín		4.328		7,20		0,84		0,67		1,41
Chimichagua		6.410		5,77		0,64		0,84		1,18
Becerril		2.754		5,62		0,62		0,68		1,03
San Alberto		3.699		5,55		0,60		0,57		0,95
González		1.410		5,02		0,50		0,65		0,83
Aguachica		15.639		4,85		0,47		0,70		0,80
Río de Oro		2.366		5,00		0,50		0,59		0,80
San Diego		1.002		4,82		0,46		0,61		0,75
Pelaya		2.645		3,54		0,25		0,79		0,45
Pailitas		1.900		3,57		0,26		0,75		0,45
El Paso		2.059		3,41		0,23		0,81		0,42
Chiriguaná		2.825		3,21		0,21		0,76		0,36
Astrea		1.638		2,68		0,14		0,80		0,26
Bosconia		2.526		2,25		0,10		0,71		0,17
El Copey		1.850		2,17		0,09		0,73		0,16
La Jagua de Ibirico		1.584		2,20		0,10		0,60		0,16
La Paz		2.022		1,89		0,07		0,73		0,12
Agustín Codazzi		3.151		1,79		0,06		0,74		0,11
Manaure		238		1,68		0,06		0,75		0,10
Valledupar		22.167		1,51		0,05		0,52		0,07
Curumaní		1.244		1,35		0,04		0,69		0,06
Pueblo Bello		732		1,25		0,03		0,82		0,06

CHOCÓ

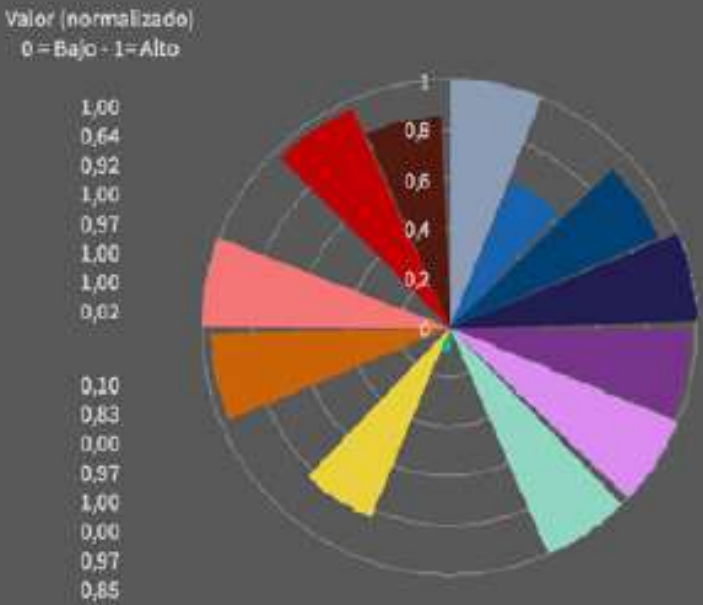
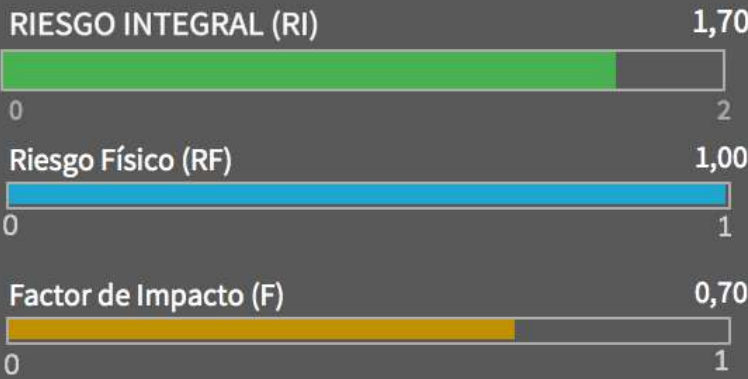
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	505.016	Indice de Gini	0,57
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	3.310.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	79,2

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

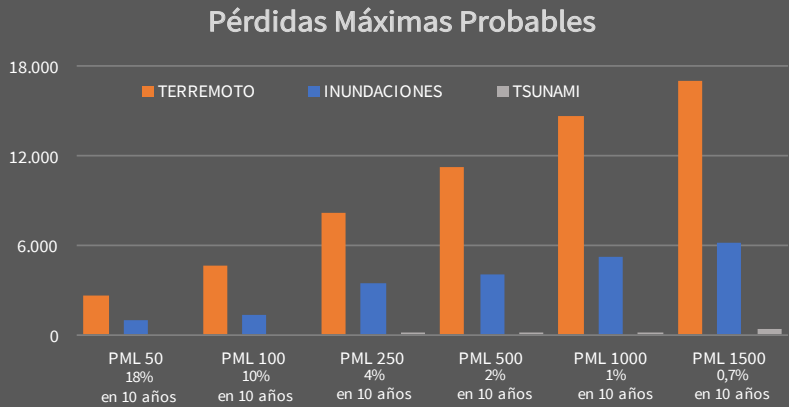
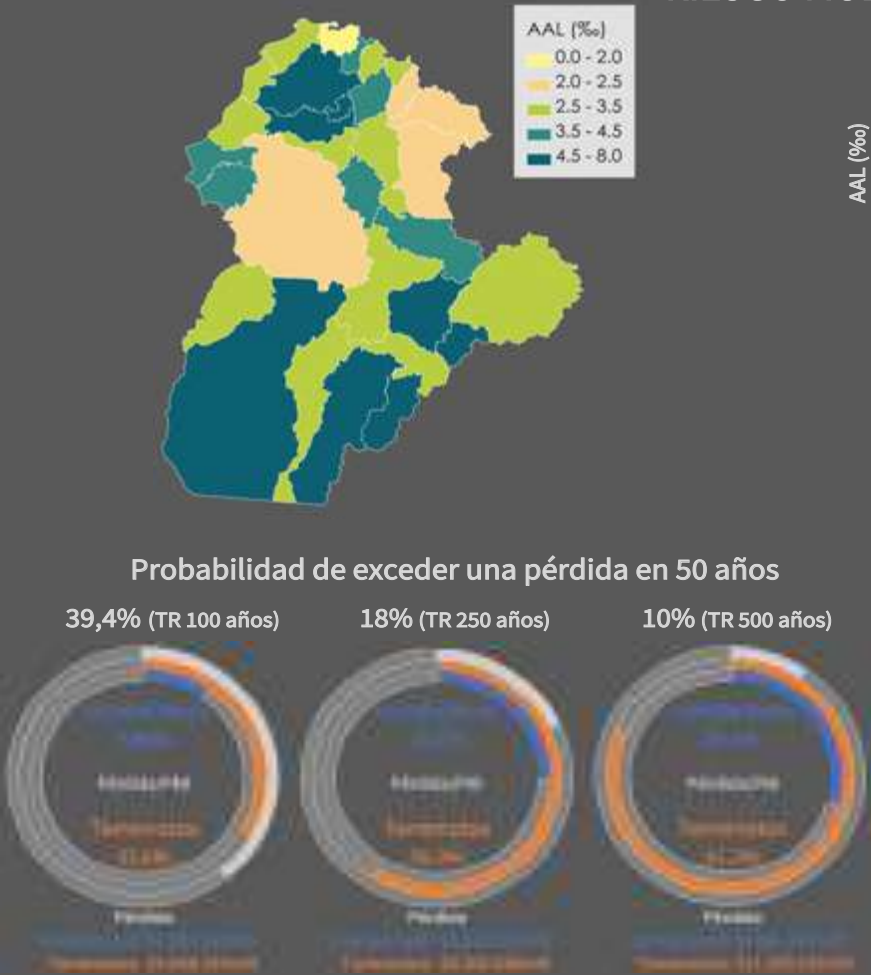
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%o]	RF	F	RI
Medio Baudó	1.973	13,43	1,00	0,84	1,84
Medio Atrato	11.164	18,13	1,00	0,83	1,83
Sipí	3.888	13,10	1,00	0,79	1,79
Carmen del Darien	10.951	21,17	1,00	0,78	1,78
Río Iro	1.797	10,62	1,00	0,78	1,78
Unguía	7.747	15,39	1,00	0,76	1,76
Alto Baudó	15.538	14,74	1,00	0,76	1,76
Riosucio(2)	16.794	19,76	1,00	0,76	1,76
Bajo Baudó	13.172	15,17	1,00	0,72	1,72
Lloró	6.322	13,44	1,00	0,72	1,72
Tadó	10.160	16,68	1,00	0,71	1,71
El Litoral del San Juan	9.672	16,16	1,00	0,70	1,70
Río Quito	2.964	15,90	1,00	0,70	1,70
Condoto	7.102	10,91	1,00	0,69	1,69
Bojaya	5.964	14,61	1,00	0,69	1,69
Bagadó	9.508	13,34	1,00	0,69	1,69
El Cantón del San Pablo	1.792	12,30	1,00	0,63	1,63
Atrato	2.876	12,01	1,00	0,62	1,62
Nuquí	3.658	13,77	1,00	0,62	1,62
San José del Palmar	5.275	11,95	1,00	0,61	1,61
Juradó	2.520	16,13	1,00	0,61	1,61
Cértegui	7.476	10,68	1,00	0,59	1,59
Nóvita	6.250	13,87	1,00	0,58	1,58
Medio San Juan	4.847	17,44	1,00	0,58	1,58
Unión Panamericana	2.528	12,80	1,00	0,57	1,57
Istmina	14.089	13,84	1,00	0,55	1,55
Bahía Solano	6.499	21,02	1,00	0,54	1,54
El Carmen de Atrato	12.434	16,03	1,00	0,52	1,52
Quibdó	115.848	7,40	0,86	0,62	1,40
Acandí	1.685	4,88	0,48	0,73	0,82

CÓRDOBA

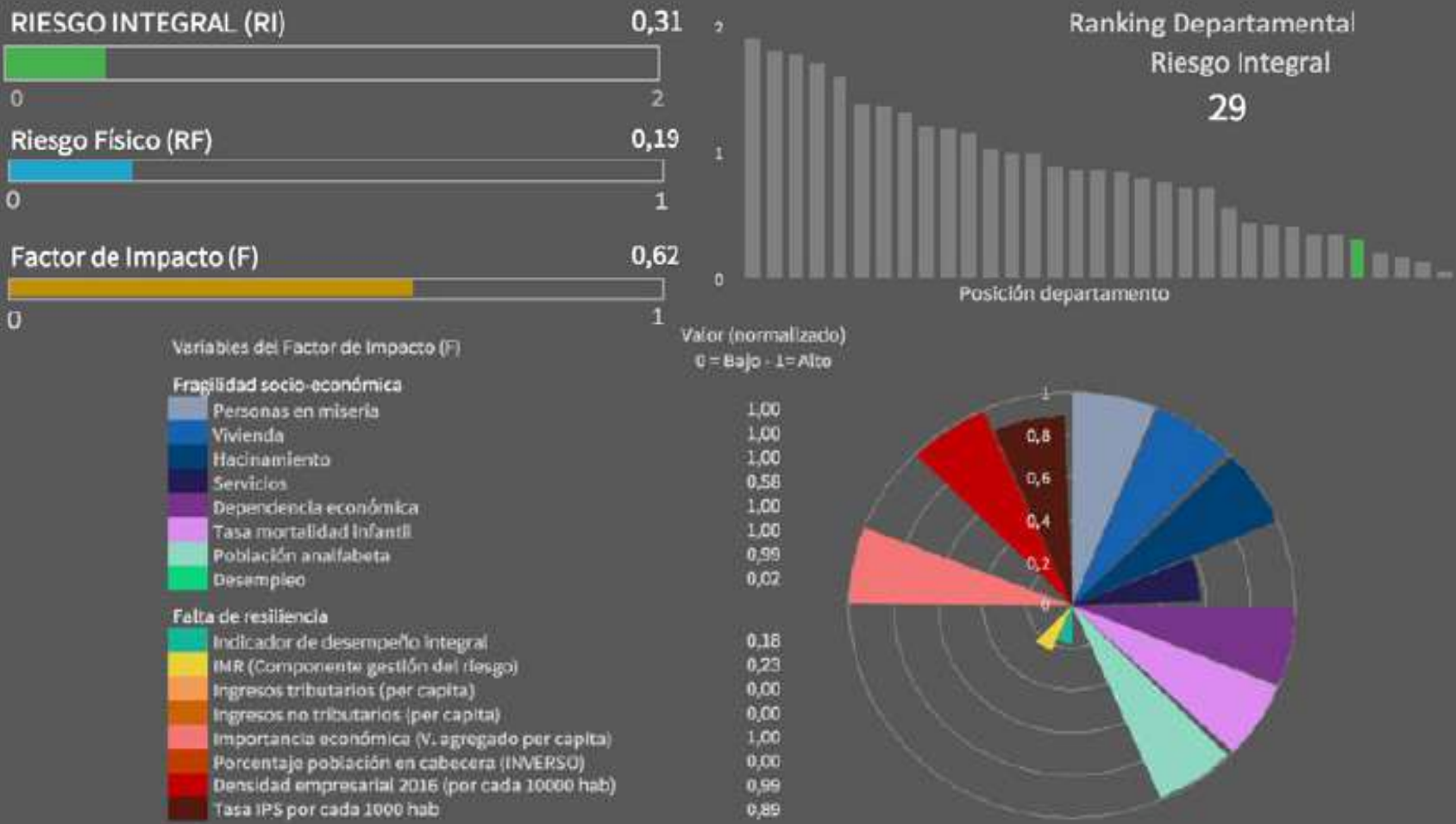
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	1.736.170	Indice de Gini	0,47
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	13.843.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	59,1

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

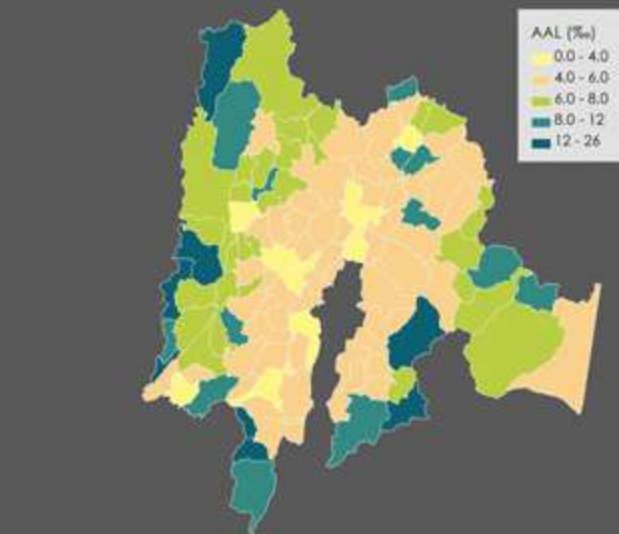
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%]	RF	F	RI
La Apartada	5.546	7,79	0,90	0,79	1,62
Tierralta	10.623	7,39	0,86	0,81	1,56
Buenavista	7.010	7,25	0,85	0,80	1,53
Puerto Libertador	4.516	7,33	0,86	0,75	1,50
San Pelayo	9.800	5,47	0,59	0,80	1,06
Lorica	36.101	5,28	0,55	0,79	0,99
San José de Uré(1)	2.505	5,30	0,56	0,69	0,94
Cotorra	2.541	4,58	0,42	0,82	0,77
Pueblo Nuevo	4.843	4,18	0,35	0,76	0,61
San Carlos	3.694	3,82	0,29	0,90	0,55
Purísima	3.209	3,91	0,31	0,80	0,55
Chimá	1.509	3,68	0,27	0,87	0,51
Los Córdoba	1.688	3,64	0,27	0,86	0,49
Canalete	2.951	3,69	0,27	0,79	0,49
Montelíbano(1)(3)	19.291	3,43	0,24	0,70	0,40
Puerto Escondido	2.252	3,22	0,21	0,89	0,39
Valencia	15.802	3,23	0,21	0,76	0,37
San Bernardo del Viento	3.324	3,19	0,20	0,74	0,35
Planeta Rica	11.378	2,89	0,17	0,79	0,30
Ayapel	6.546	2,80	0,16	0,74	0,27
Ciénaga de Oro	7.081	2,70	0,15	0,82	0,26
Moñitos	1.122	2,73	0,15	0,75	0,26
Momil	2.222	2,71	0,15	0,78	0,26
Cereté	16.659	2,75	0,15	0,68	0,25
Tuchín (1)	1.068	2,52	0,13	0,76	0,22
Chinú	7.110	2,36	0,11	0,77	0,20
San Andrés Sotavento (1) (3)	5.306	2,20	0,10	0,88	0,18
Montería	67.495	2,20	0,10	0,59	0,15
Sahagún	10.897	2,02	0,08	0,73	0,14
San Antero	2.051	1,75	0,06	0,80	0,11

CUNDINAMARCA

INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	2.721.368	Indice de Gini	0,43
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	41.593.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	21,3

RIESGO MULTI-AMENAZA

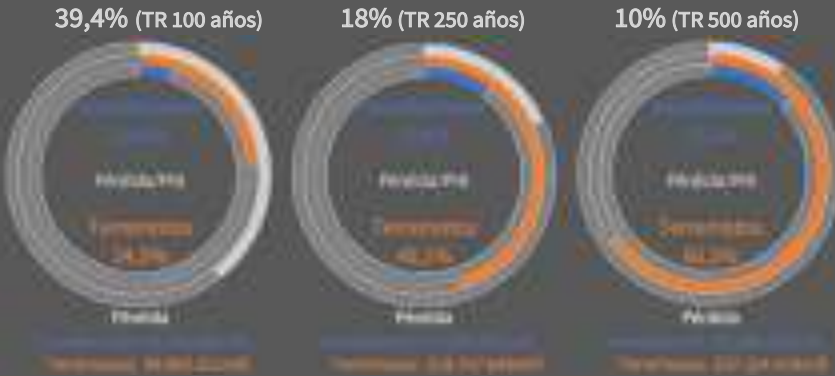


Ranking departamental de la AAL 24

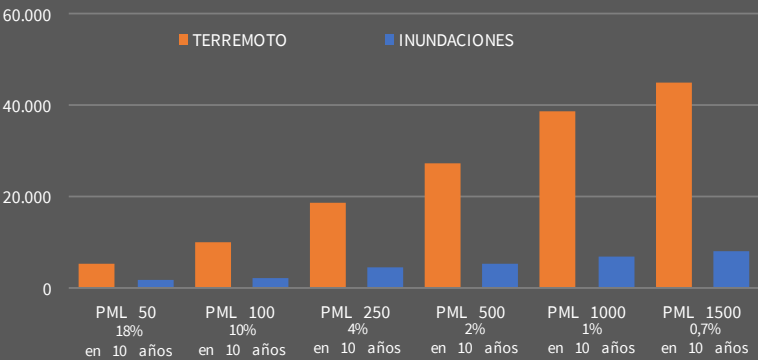
Contribución de cada amenaza a la AAL



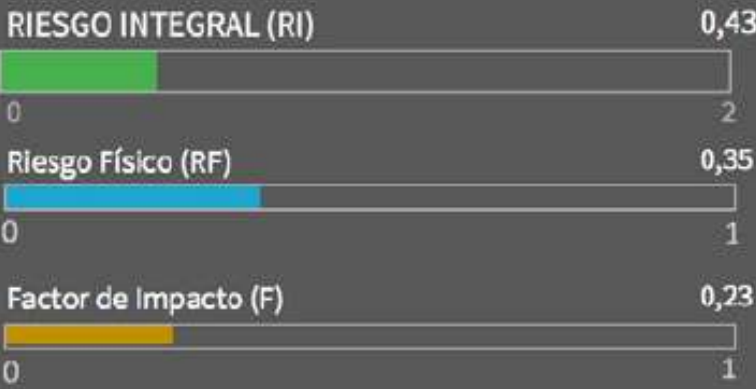
Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años



Pérdidas Máximas Probables



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



Variables del Factor de Impacto (F)

Fragilidad socio-económica

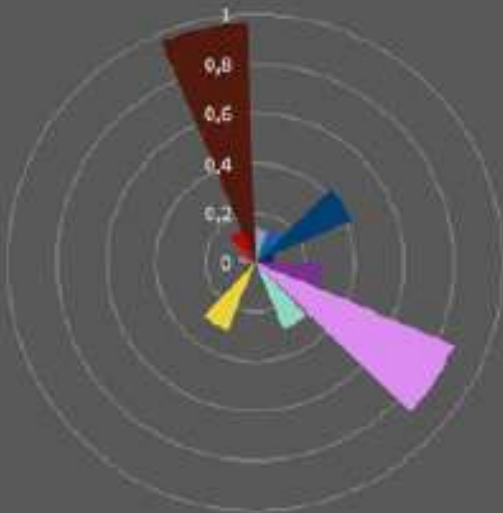
- Personas en miseria
- Vivienda
- Hacinamiento
- Servicios
- Dependencia económica
- Tasa mortalidad infantil
- Población analfabeta
- Desempleo

Falta de resiliencia

- Indicador de desempeño integral
- IMR (Componente gestión del riesgo)
- Ingresos tributarios (per capita)
- Ingresos no tributarios (per capita)
- Importancia económica (V. agregado per capita)
- Porcentaje población en cabecera (INVERSO)
- Densidad empresarial 2016 (por cada 10000 hab)
- Tasa IPS por cada 1000 hab

Valor (normalizado)
0 = Bajo - 1 = Alto

- 0,14
- 0,15
- 0,42
- 0,08
- 0,27
- 0,67
- 0,29
- 0,01
- 0,00
- 0,30
- 0,00
- 0,00
- 0,07
- 0,00
- 0,14
- 0,97



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%]	RF	F	RI
Guataquí	320	10,44	1,00	0,67	1,67
Beltrán	1.430	12,27	1,00	0,66	1,66
Caparrapí	4.554	9,59	1,00	0,59	1,59
Cucunubá	2.411	9,96	1,00	0,57	1,57
Nariño	3.551	21,24	1,00	0,57	1,57
Cabrera	2.293	10,42	1,00	0,57	1,57
Ubalá	3.710	8,64	0,96	0,63	1,57
Pandi	4.044	26,05	1,00	0,57	1,57
Yacopí	4.337	7,89	0,91	0,70	1,55
San Juan de Río Seco	8.127	19,54	1,00	0,53	1,53
Gutiérrez	1.541	10,03	1,00	0,53	1,53
Sesquillé	2.362	11,08	1,00	0,53	1,53
Venecia	3.532	18,90	1,00	0,51	1,51
Nimaima	943	10,03	1,00	0,51	1,51
Sutatausa	2.128	10,31	1,00	0,51	1,51
Puerto Salgar	41.932	14,35	1,00	0,50	1,50
Fomeque	5.595	13,16	1,00	0,48	1,48
Guayabetal	2.889	22,59	1,00	0,47	1,47
Útica	2.024	7,78	0,90	0,61	1,45
Simijaca	3.128	8,52	0,96	0,49	1,43
Anapolima	6.076	10,79	1,00	0,40	1,40
Nilo	16.699	8,05	0,92	0,50	1,39
Fúquene	1.224	7,73	0,90	0,49	1,34
Apulo	3.229	7,21	0,84	0,55	1,31
Guaduas	21.310	7,03	0,82	0,59	1,31
Topaipí	970	6,36	0,74	0,72	1,26
El Peñón	986	6,32	0,73	0,72	1,25
Quebradnegra	883	6,52	0,76	0,65	1,25
Pulí	650	6,37	0,74	0,64	1,21
La Peña	1.585	6,42	0,74	0,62	1,20
Gachala	983	6,67	0,78	0,54	1,20
Jerusalén	821	6,41	0,74	0,61	1,20
Chaguaní	445	6,38	0,74	0,60	1,18
Palme	1.312	6,22	0,71	0,64	1,17
Vianí	1.386	6,42	0,74	0,56	1,16
Quipile	2.811	6,21	0,71	0,62	1,15
Quetame	816	6,34	0,73	0,57	1,15
Medina	2.060	6,26	0,72	0,58	1,14
Guachetá	2.682	6,38	0,74	0,53	1,13
Bituima	292	6,45	0,75	0,50	1,12
Vergara	1.720	6,18	0,71	0,58	1,12
Guayabal de Siquima	1.052	6,39	0,74	0,49	1,10
Tocalima	3.869	6,20	0,71	0,54	1,09
Gama	1.097	6,23	0,72	0,52	1,09
Albán	1.171	6,29	0,72	0,49	1,08
Tibirita	311	6,20	0,71	0,51	1,08
Zipacón	466	5,98	0,68	0,58	1,07
Nocaima	815	6,30	0,73	0,47	1,07
San Cayetano	1.040	5,89	0,66	0,61	1,07
Villagómez	463	6,04	0,69	0,55	1,07
Manta	1.163	6,16	0,71	0,50	1,06
Cachipay	1.117	6,07	0,69	0,52	1,05
San Francisco	1.006	5,97	0,67	0,55	1,05
Fosca	1.495	5,87	0,66	0,56	1,03
Viotá	987	5,63	0,62	0,67	1,03
La Palma	2.240	5,87	0,66	0,55	1,02
Macheta	1.503	5,94	0,67	0,52	1,02
Supatá	1.442	5,89	0,66	0,53	1,01

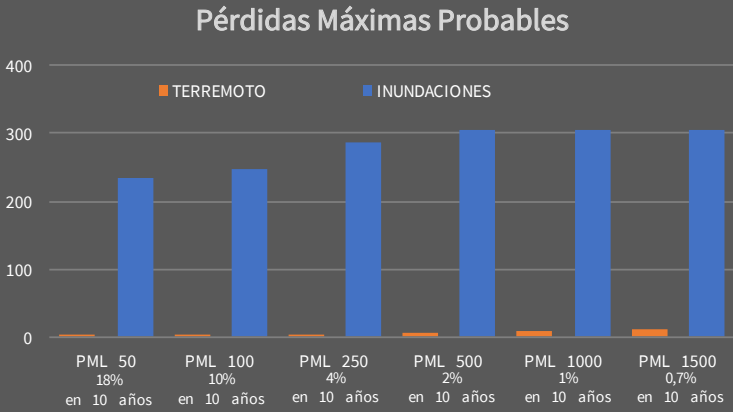
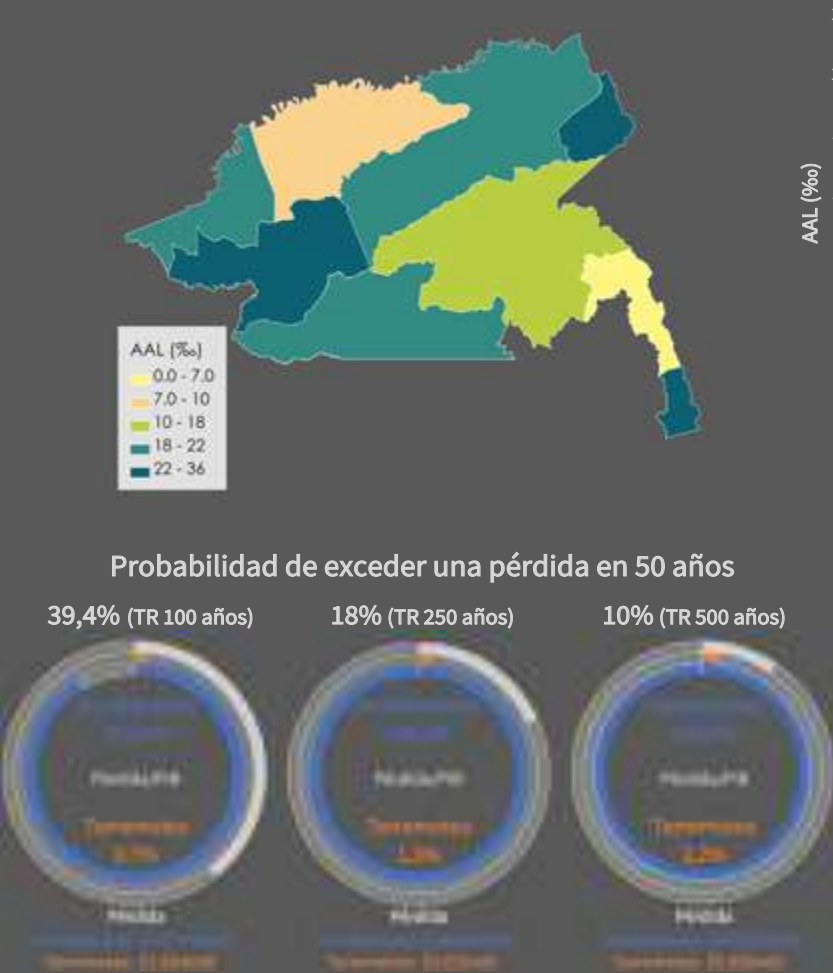
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%]	RF	F	RI
Gachetá	899	6,05	0,69	0,46	1,01
Tibacuy	2.017	5,48	0,59	0,70	1,00
Tena	470	5,80	0,65	0,55	1,00
Ubaque	1.261	5,61	0,61	0,60	0,98
San Antonio del Tequendama	1.749	5,63	0,62	0,58	0,98
Lenguazaque	1.957	5,73	0,63	0,53	0,97
Tausa	1.573	5,65	0,62	0,56	0,97
Anolaima	3.602	5,77	0,64	0,49	0,96
Une	1.514	5,67	0,62	0,52	0,95
El Rosal	2.633	5,76	0,64	0,48	0,95
Suesca	2.702	5,63	0,62	0,51	0,93
Choachí	973	5,65	0,62	0,48	0,92
Junín	2.665	5,50	0,60	0,54	0,92
Girardot	24.580	5,93	0,67	0,37	0,91
Silvania	3.742	5,49	0,59	0,52	0,90
Chipaque	2.099	5,57	0,61	0,48	0,90
El Colegio	4.689	5,67	0,62	0,43	0,90
San Bernardo	1.192	5,46	0,59	0,52	0,89
Pasca	1.029	5,42	0,58	0,52	0,88
Nemocón	2.340	5,59	0,61	0,44	0,88
La Mesa	7.177	5,78	0,64	0,37	0,88
Guasca	2.183	5,59	0,61	0,44	0,88
Carmen de Carupa	1.882	5,25	0,55	0,59	0,87
La Calera	1.819	5,56	0,61	0,43	0,87
Tocancipá	7.854	5,87	0,66	0,32	0,87
Villapinzón	3.673	5,37	0,57	0,50	0,86
Agua de Dios	2.362	5,56	0,61	0,41	0,86
Sibaté	5.184	5,44	0,58	0,45	0,85
Chocontá	3.825	5,29	0,56	0,52	0,84
Bojacá	2.712	5,33	0,56	0,49	0,84
Tenjo	3.787	5,60	0,61	0,36	0,84
Sopó	4.038	5,54	0,60	0,34	0,81
Subachoque	2.695	5,30	0,56	0,43	0,80
Caqueza	2.999	5,11	0,52	0,46	0,76
Arbeláez	3.825	5,08	0,52	0,47	0,76
Tabio	4.706	5,03	0,51	0,48	0,75
Sasaima	1.820	5,00	0,50	0,47	0,74
Guatavita	2.225	4,94	0,49	0,49	0,73
La Vega	2.721	5,04	0,51	0,41	0,72
Susa	1.870	4,75	0,45	0,58	0,71
Pacho	3.576	4,82	0,47	0,44	0,67
Paratebueno	1.098	4,44	0,40	0,56	0,62
Gachancipá	1.352	4,72	0,45	0,35	0,60
Granada	1.215	4,44	0,39	0,50	0,59
Funza	6.750	4,15	0,34	0,35	0,47
Mosquera	22.476	4,17	0,35	0,30	0,45
Cogua	5.428	4,03	0,32	0,38	0,45
Fusagasugá	16.539	3,91	0,31	0,40	0,43
Cota	4.328	4,02	0,32	0,31	0,43
Villeta	3.410	3,71	0,28	0,40	0,39
Ricaurte	4.606	3,38	0,23	0,47	0,34
Cajicá	8.464	3,58	0,26	0,28	0,33
Madrid	14.117	3,20	0,21	0,41	0,29
Zipaquirá	13.073	3,14	0,20	0,38	0,27
Facatativá	15.614	2,95	0,17	0,41	0,25
Villa de San Diego de Ubaté	3.843	2,84	0,16	0,42	0,23
Chía	12.773	2,59	0,13	0,30	0,17
Soacha	135.370	2,33	0,11	0,44	0,16

GUAINIA

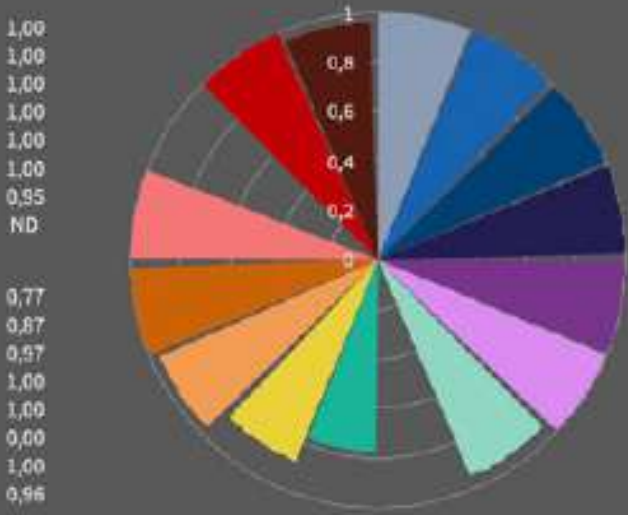
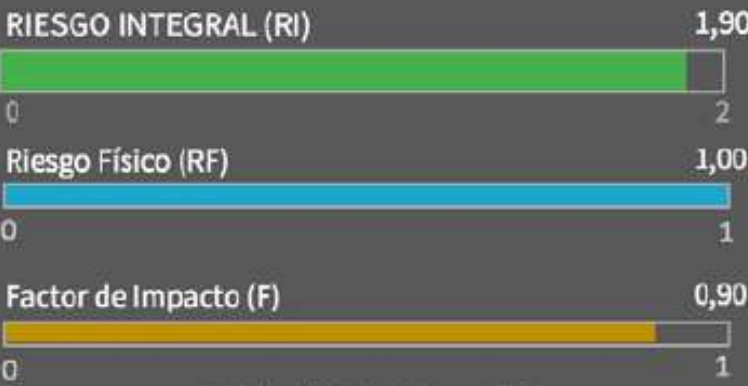
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	42.123	Indice de Gini	ND
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	271	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	60,6

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

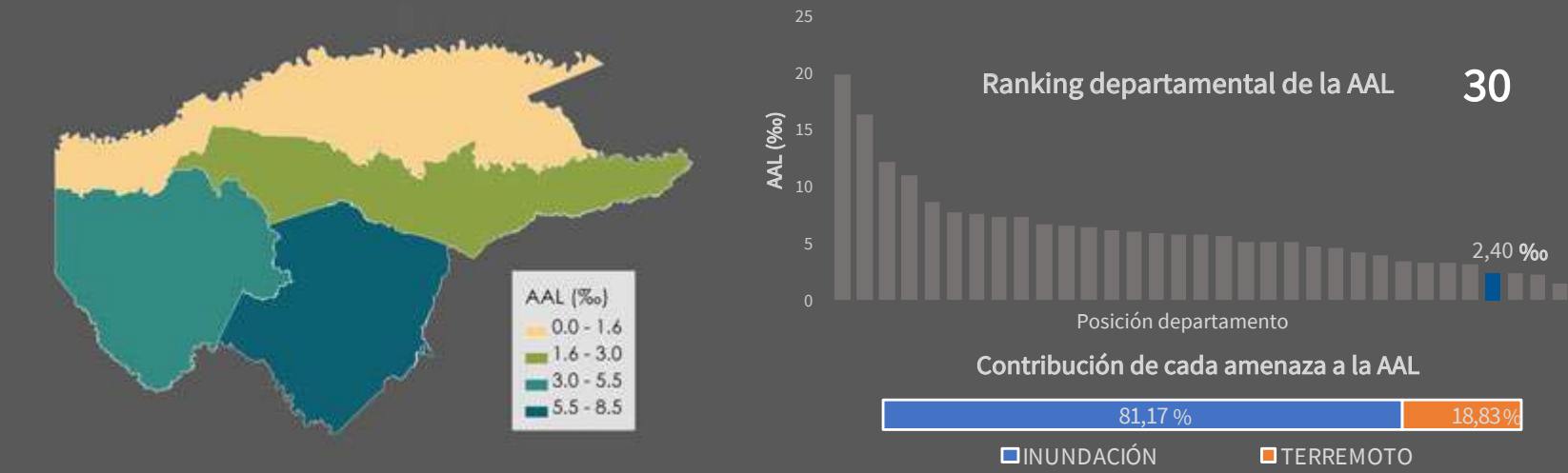
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%o]	RF	F	RI
Puerto Colombia	851	15,55	1,00	0,78	1,78
Inírida	7.740	21,01	1,00	0,77	1,77
La Guadalupe	590	26,77	1,00	0,75	1,75
Cacahual	748	26,91	1,00	0,75	1,75
Pana Pana	764	20,05	1,00	0,71	1,71
Mapiripán	205	20,49	1,00	0,68	1,68
Morichal	1.574	36,28	1,00	0,67	1,67
Barranco Minas	646	7,29	0,85	0,78	1,52
San Felipe	67	5,75	0,64	0,72	1,10

GUAVIARE

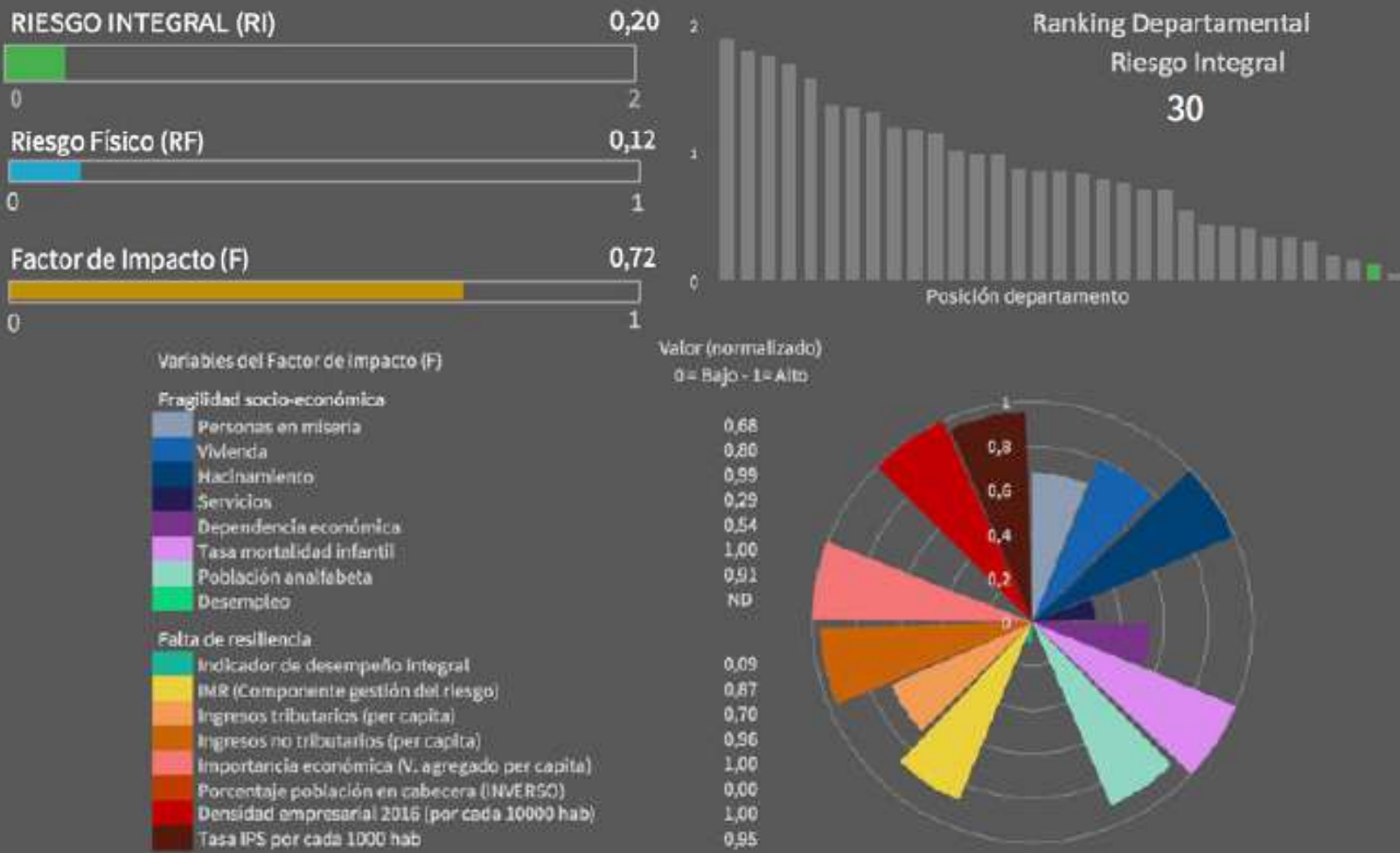
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	112.621	Indice de Gini	ND
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	719	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	39,9

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

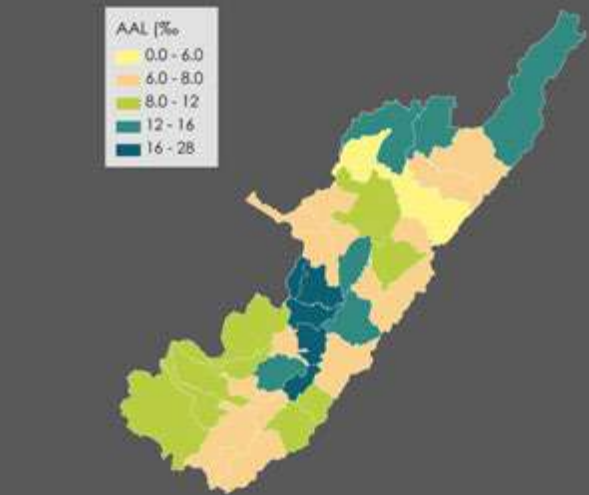
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [‰]	RF	F	RI
Miraflores	3.270	8,37	0,95	0,61	1,52
Calamar	2.438	5,30	0,56	0,53	0,85
El Retorno	2.520	2,87	0,16	0,81	0,30
San José del Guaviare	6.815	1,50	0,05	0,58	0,07

HUILA

INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	1.168.869	Indice de Gini	0,49
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	14.487.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	32,6

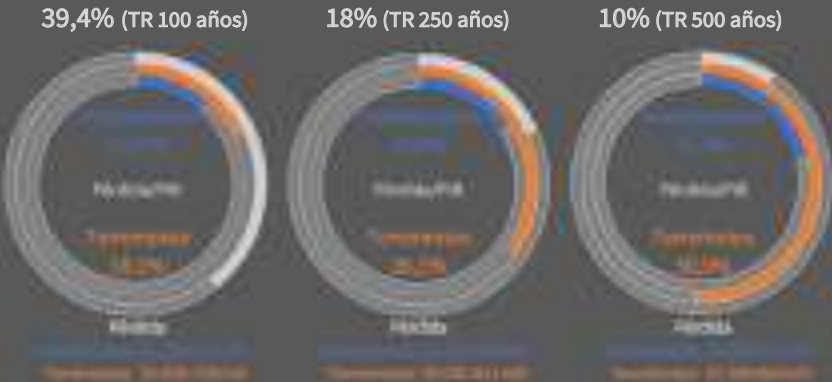
RIESGO MULTI-AMENAZA



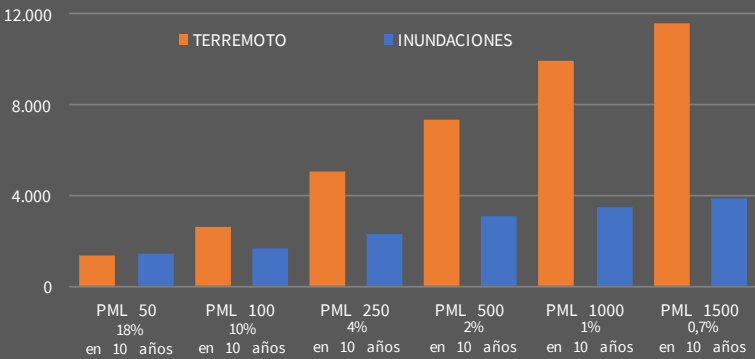
Contribución de cada amenaza a la AAL



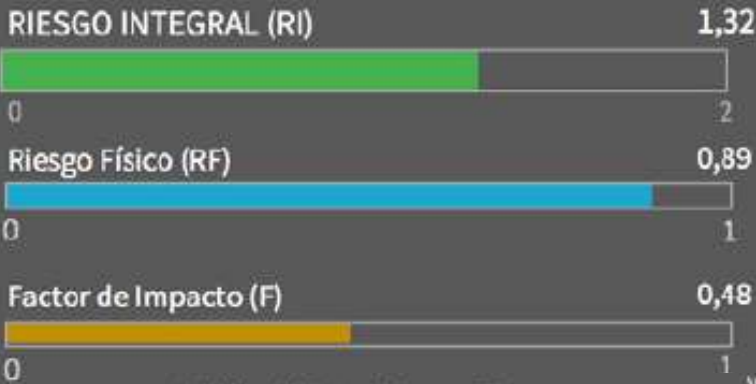
Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años



Pérdidas Máximas Probables

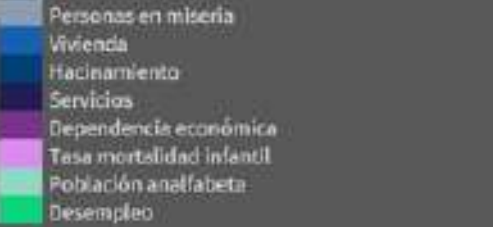


EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL

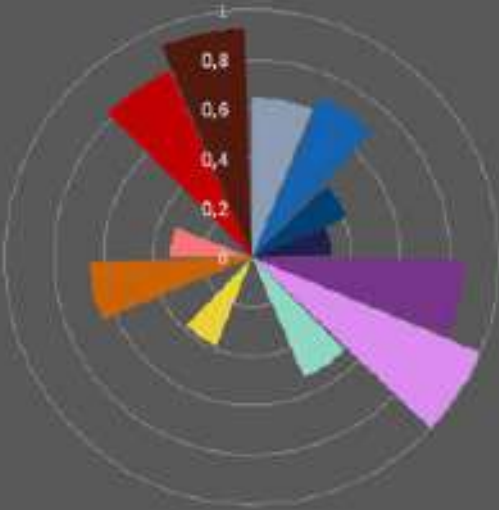
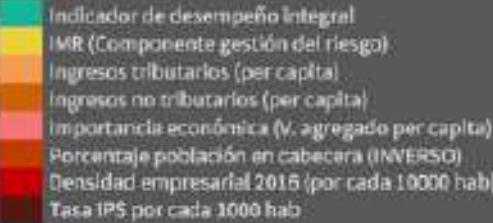


Variables del Factor de Impacto (F)

Fragilidad socio-económica



Falta de resiliencia



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

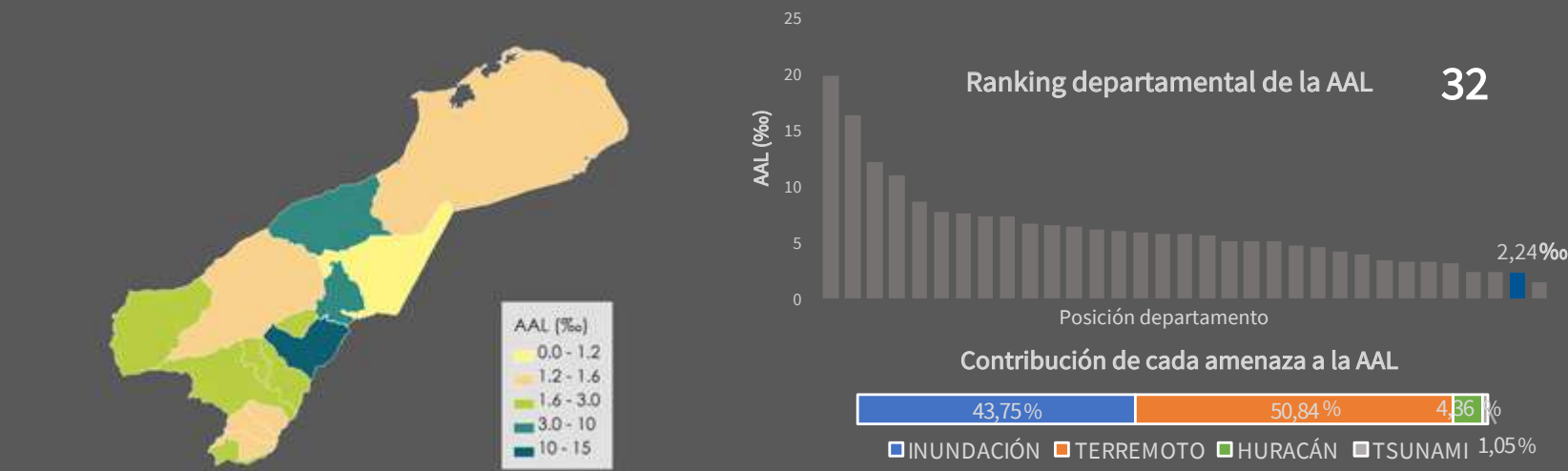
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [‰]	RF	F	RI
Colombia	4.870	12,75	1,00	0,71	1,71
Aipe	5.718	12,41	1,00	0,65	1,65
Agrado	14.162	20,06	1,00	0,63	1,63
Nátaga	3.801	16,64	1,00	0,61	1,61
Tarqui	8.508	14,52	1,00	0,61	1,61
Isnos	8.705	10,94	1,00	0,60	1,60
San Agustín	9.608	8,98	0,98	0,64	1,60
Villavieja	7.740	12,89	1,00	0,57	1,57
La Plata	21.369	9,31	0,99	0,57	1,56
Baraya	2.407	7,52	0,88	0,78	1,56
Gigante	10.582	12,34	1,00	0,55	1,55
Guadalupe	9.565	9,64	1,00	0,54	1,54
Suaza	6.126	8,44	0,95	0,59	1,51
La Argentina	4.569	8,16	0,93	0,62	1,51
Campoalegre	14.546	11,04	1,00	0,51	1,51
Saladoblanco	4.612	8,27	0,94	0,60	1,51
Palermo	24.815	8,22	0,94	0,59	1,49
Tesalia	8.687	16,38	1,00	0,48	1,48
Paicol	5.474	20,56	1,00	0,47	1,47
Tello	4.405	7,15	0,84	0,71	1,44
Yaguará	5.443	13,14	1,00	0,43	1,43
Palestina	661	7,50	0,88	0,63	1,43
Altamira	10.923	28,40	1,00	0,40	1,40
Iquira	2.636	7,81	0,90	0,54	1,40
Hobo	2.138	7,87	0,91	0,52	1,39
Elías	3.367	7,74	0,90	0,54	1,39
Rivera	6.297	7,67	0,89	0,53	1,37
Santa María	1.587	7,67	0,89	0,53	1,36
Acevedo	2.460	6,39	0,74	0,76	1,30
Algeciras	5.286	6,58	0,77	0,68	1,29
Timaná	4.208	7,08	0,83	0,55	1,28
Oporapa	2.034	6,43	0,74	0,71	1,27
Pital	2.676	6,76	0,79	0,58	1,25
Teruel	2.196	6,46	0,75	0,51	1,13
Pitalito	27.975	6,32	0,73	0,52	1,11
Garzón	21.717	6,25	0,72	0,47	1,06
Neiva	80.661	4,84	0,47	0,33	0,62

LA GUAJIRA

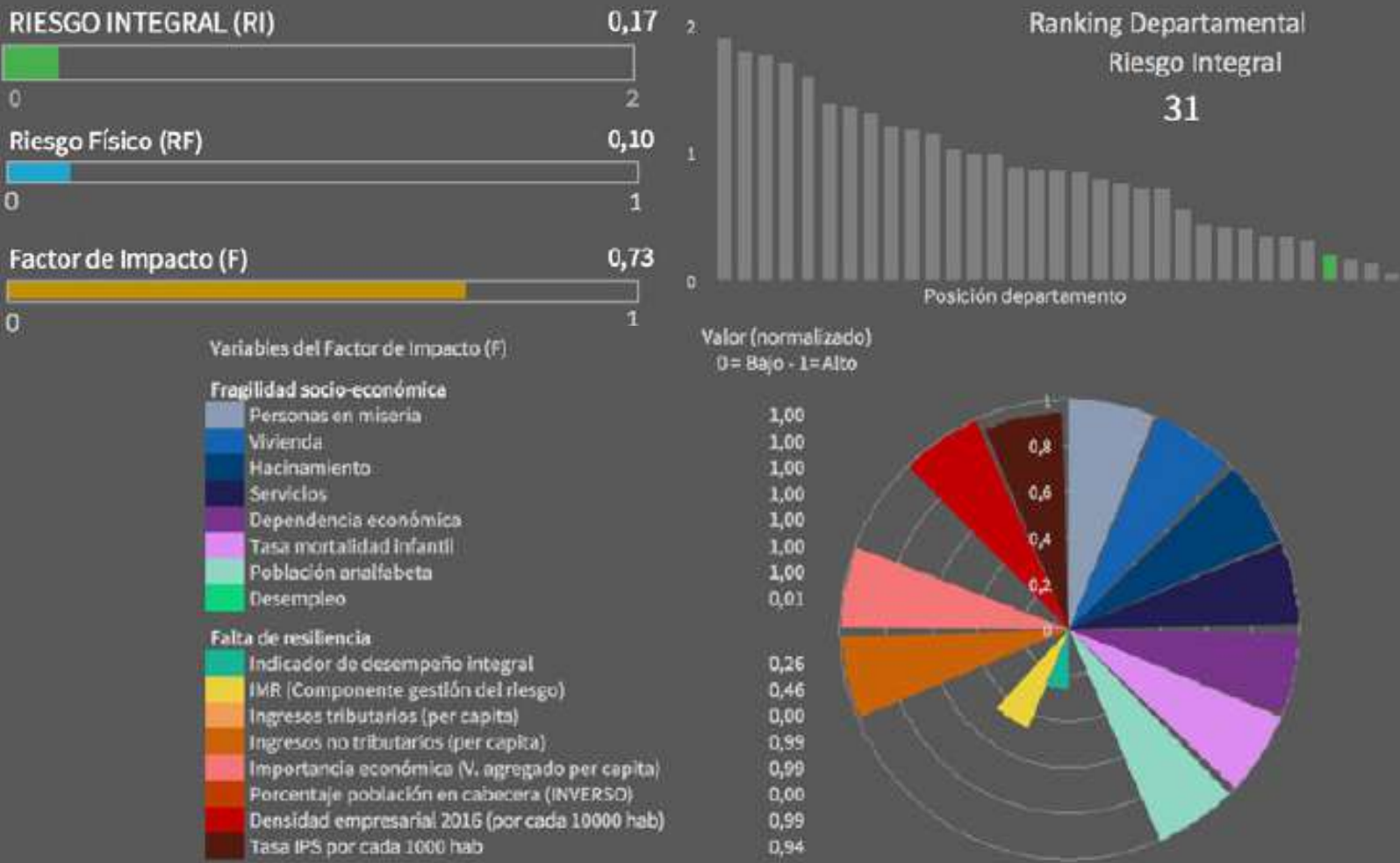
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	985.452	Indice de Gini	0,55
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	8.107.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	65,2

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

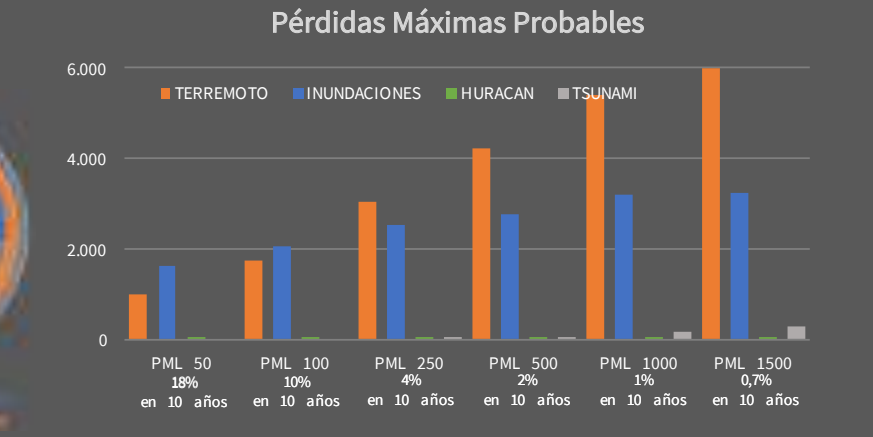
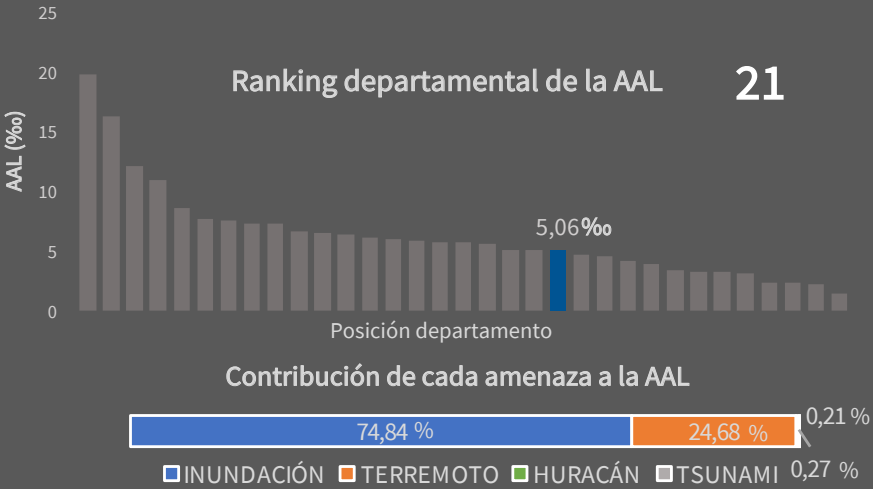
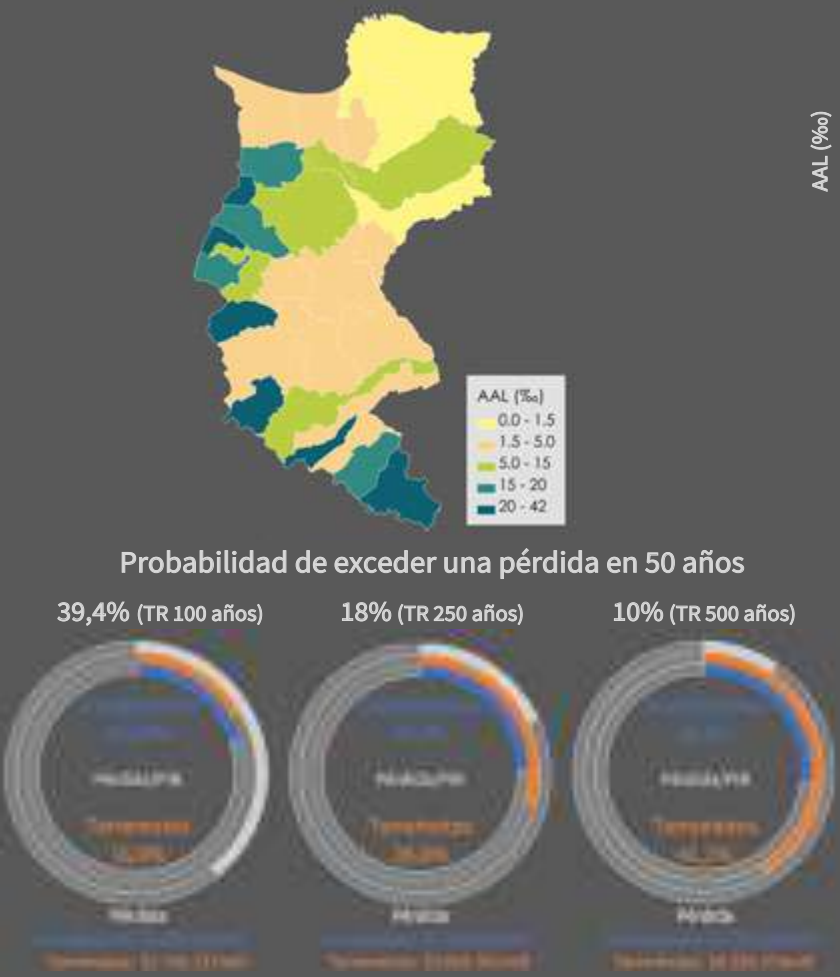
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%]	RF	F	RI
Barrancas	16.214	15,01	1,00	0,66	1,66
Albania	1.506	4,62	0,43	0,52	0,65
Manaure	11.158	3,60	0,26	0,78	0,46
Dibulla	1.635	2,45	0,12	0,81	0,22
Hatonuevo	899	2,37	0,11	0,75	0,20
Distracción	798	2,10	0,09	0,77	0,16
La Jagua del Pilar	546	1,92	0,07	0,78	0,13
San Juan del Cesar	2.241	1,72	0,06	0,63	0,10
Uribia	7.559	1,57	0,05	0,86	0,09
El Molino	392	1,59	0,05	0,79	0,09
Fonseca	1.600	1,63	0,05	0,60	0,09
Riohacha	10.959	1,56	0,05	0,72	0,08
Villanueva	957	1,43	0,04	0,69	0,07
Urumita	452	1,28	0,03	0,70	0,06
Maicao	4.566	0,78	0,01	0,72	0,02

MAGDALENA

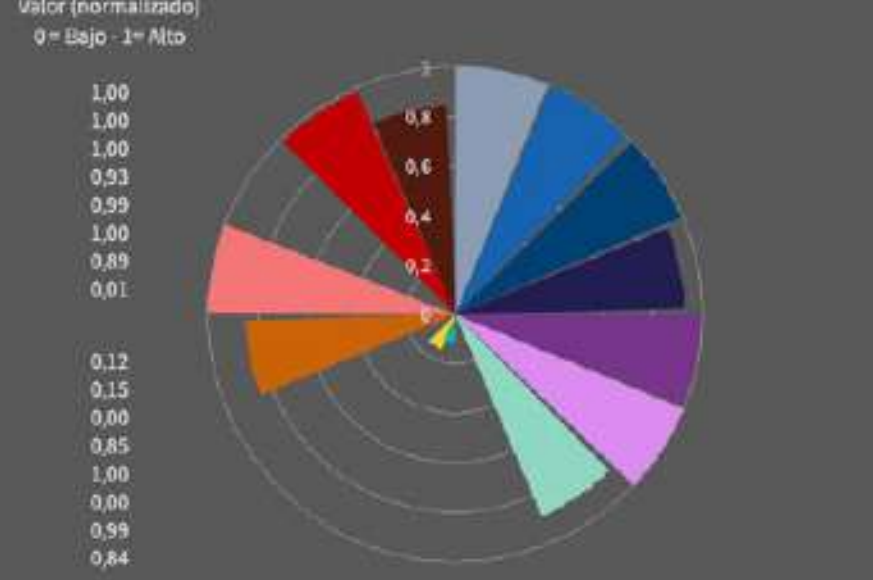
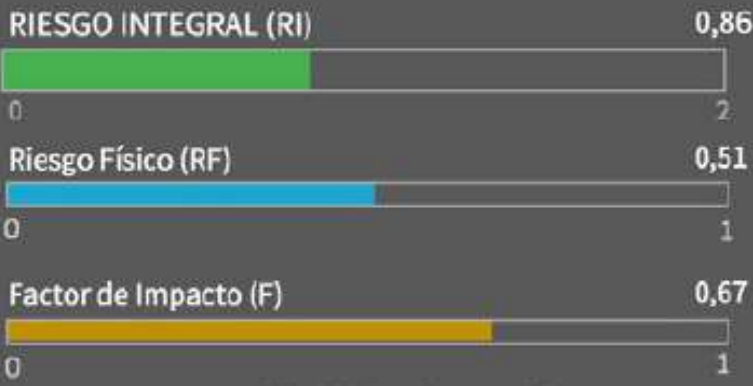
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	1.272.442	Indice de Gini	0,49
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	10.305.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	47,7

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

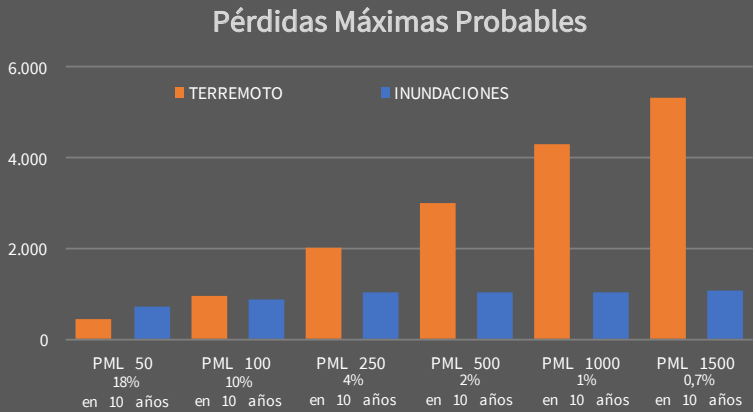
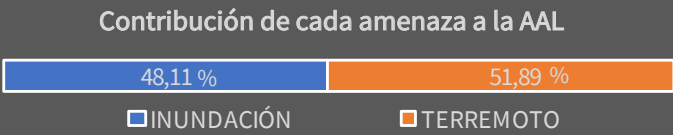
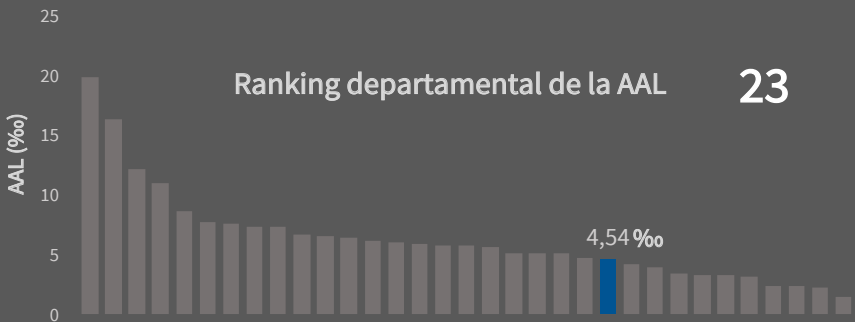
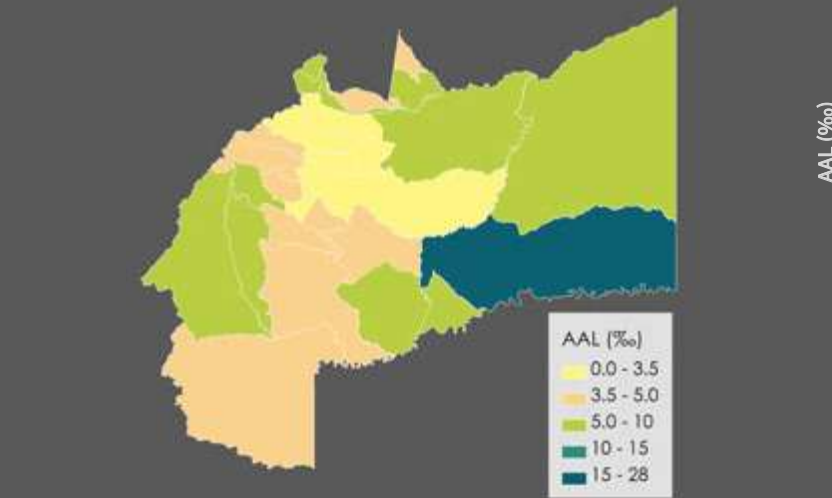
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [‰]	RF	F	RI
El Piñon	12.152	16,90	1,00	0,84	1,84
Cerro San Antonio	17.800	37,05	1,00	0,82	1,82
Zapayán	2.789	10,20	1,00	0,82	1,82
Tenerife	8.123	23,11	1,00	0,81	1,81
Salamina	10.748	41,22	1,00	0,79	1,79
Remolino	4.680	16,96	1,00	0,78	1,78
Guamal	7.142	17,01	1,00	0,78	1,78
Santa Bárbara de Pinto	7.496	28,52	1,00	0,78	1,78
San Zenón	9.432	29,30	1,00	0,77	1,77
El Banco	30.642	20,22	1,00	0,77	1,77
Pedraza	6.272	17,95	1,00	0,76	1,76
Pivijay	14.442	8,96	0,98	0,74	1,70
Concordia	1.206	7,62	0,89	0,84	1,63
El Retén	1.421	7,16	0,84	0,75	1,47
Santa Ana	4.820	6,92	0,81	0,71	1,38
Aracataca	2.778	5,70	0,63	0,80	1,13
Puebloviejo	1.375	3,15	0,20	0,82	0,36
Plato	5.336	2,95	0,17	0,83	0,32
Pijiño del Carmen	1.413	3,00	0,18	0,75	0,32
Sitionuevo	9.886	2,83	0,16	0,77	0,28
San Sebastián de Buenavista	1.493	2,65	0,14	0,78	0,25
Zona Bananera	2.157	2,48	0,12	0,83	0,23
Ariguaní	2.156	2,23	0,10	0,79	0,18
Algarrobo	1.304	2,07	0,09	0,79	0,15
Nueva Granada	988	1,97	0,08	0,78	0,14
Sabanas de San Angel	1.055	1,84	0,07	0,83	0,12
Chivolo	857	1,72	0,06	0,81	0,11
Fundación	3.263	1,47	0,04	0,69	0,07
Ciénaga	4.104	1,11	0,02	0,73	0,04
Santa Marta	11.475	0,94	0,02	0,50	0,03

META

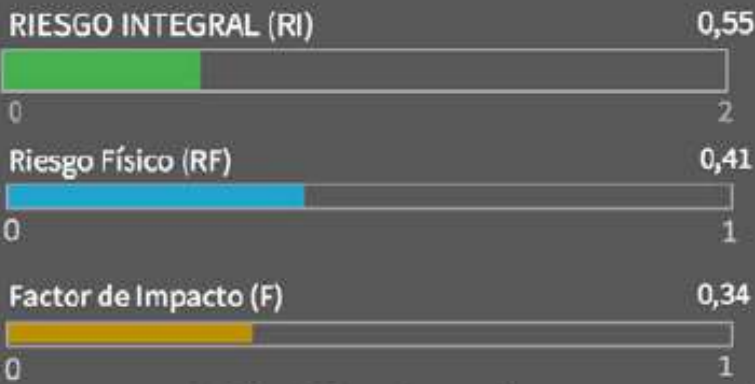
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	979.710	Indice de Gini	0,47
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	30.640.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	25,0

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



Variables del Factor de Impacto (F)

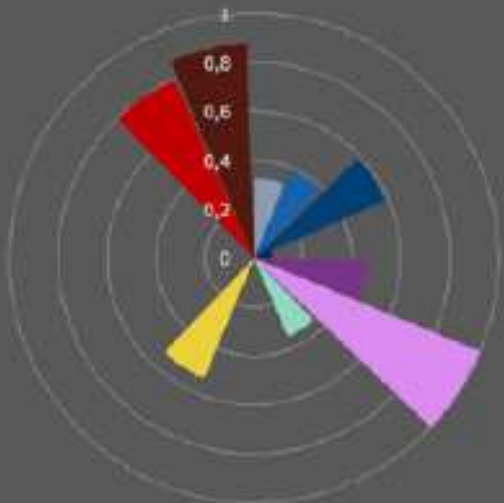
- Fragilidad socio-económica
 - Personas en miseria
 - Vivienda
 - Hacinamiento
 - Servicios
 - Dependencia económica
 - Tasa mortalidad infantil
 - Población analfabeta
 - Desempleo

Falta de resiliencia

- Indicador de desempeño integral
- IMR (Componente gestión del riesgo)
- Ingresos tributarios (per capita)
- Ingresos no tributarios (per capita)
- Importancia económica (V. agregado per capita)
- Porcentaje población en cabecera (INVERSO)
- Densidad empresarial 2016 (por cada 10000 hab)
- Tasa IPS por cada 1000 hab

valor (normalizado)
0 = Bajo - 1 = Alto

- 0,33
- 0,39
- 0,59
- 0,07
- 0,46
- 1,00
- 0,35
- 0,03
- 0,01
- 0,53
- 0,00
- 0,00
- 0,00
- 0,00
- 0,80
- 0,97



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

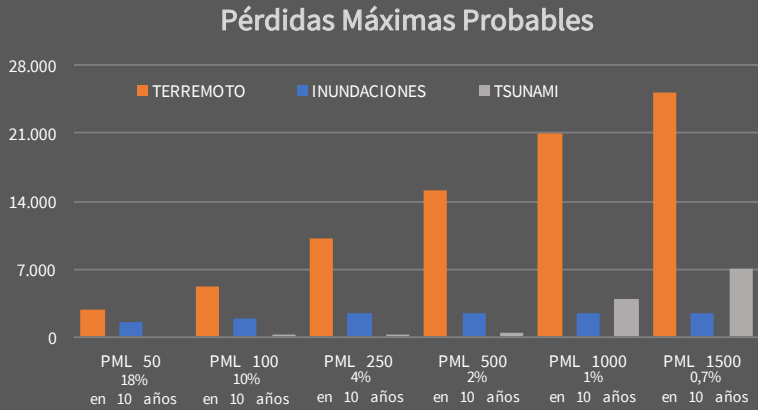
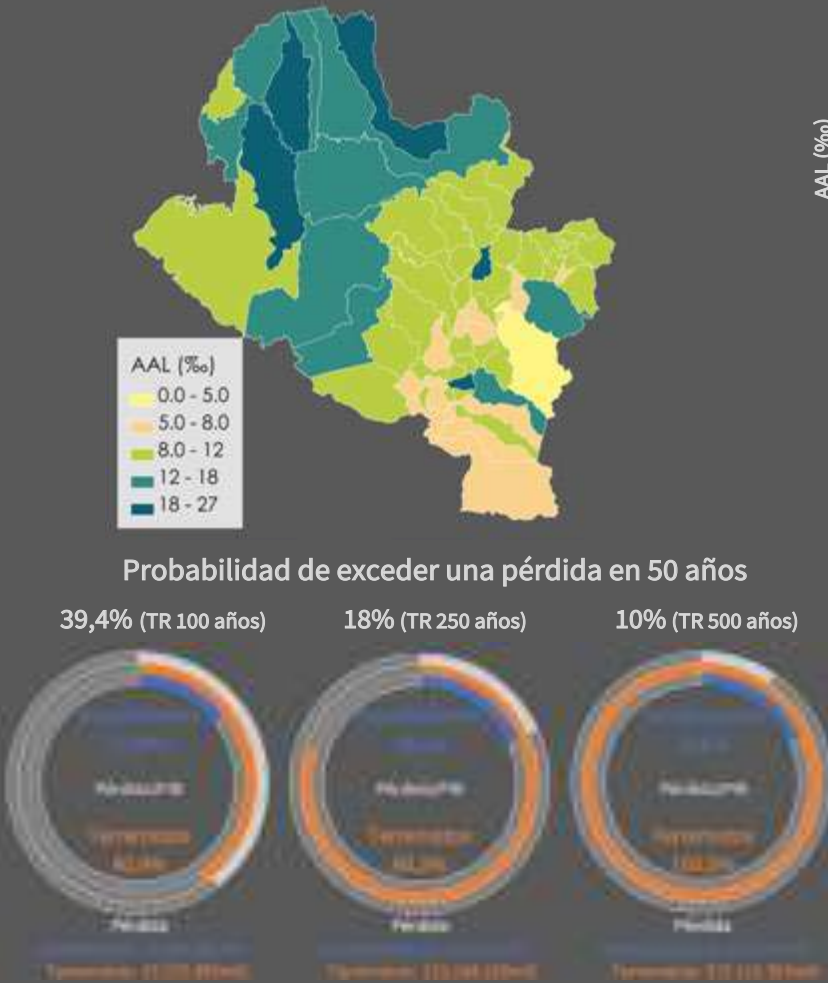
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [‰]	RF	F	RI
Mapiripán	19.172	27,83	1,00	0,80	1,80
Mesetas	2.663	9,78	1,00	0,76	1,76
Puerto López	6.684	8,69	0,97	0,54	1,49
Cabuyaro	982	7,81	0,90	0,60	1,45
Puerto Rico	3.025	6,50	0,76	0,82	1,38
Puerto Concordia	2.651	6,34	0,73	0,81	1,33
Lejanías	1.391	6,17	0,71	0,60	1,13
Restrepo	2.060	6,49	0,75	0,37	1,03
Uribe	2.057	5,39	0,57	0,70	0,98
San Juanito	280	5,74	0,64	0,50	0,95
Puerto Gaitán	2.389	5,47	0,59	0,55	0,91
El Calvario	271	5,32	0,56	0,51	0,85
Vistahermosa	2.465	4,63	0,43	0,75	0,75
Cubarral	551	4,76	0,45	0,52	0,69
Barranca de Upía	304	4,70	0,44	0,55	0,69
Puerto Lleras	1.023	3,99	0,32	0,72	0,55
Fuente de Oro	1.188	3,98	0,32	0,69	0,54
El Dorado	231	3,96	0,31	0,57	0,49
San Juan de Arama	949	3,75	0,28	0,64	0,46
La Macarena	2.483	3,51	0,25	0,83	0,45
Guamal	847	3,96	0,31	0,38	0,43
El Castillo	400	3,61	0,26	0,66	0,43
Cumaral	1.514	3,68	0,27	0,47	0,40
Castilla la Nueva	600	3,28	0,22	0,34	0,29
Acacías	4.409	3,12	0,19	0,41	0,27
San Martín	1.764	2,96	0,18	0,53	0,27
Villavicencio	29.282	2,95	0,17	0,38	0,24
San Carlos de Guaroa	502	2,45	0,12	0,59	0,19
Granada	2.460	1,87	0,07	0,51	0,11

NARIÑO

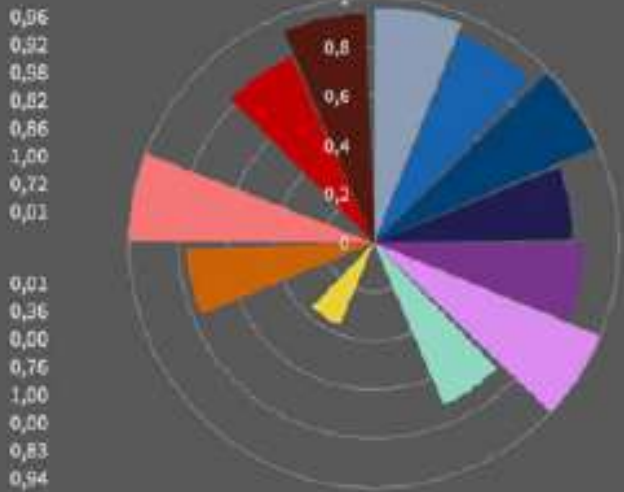
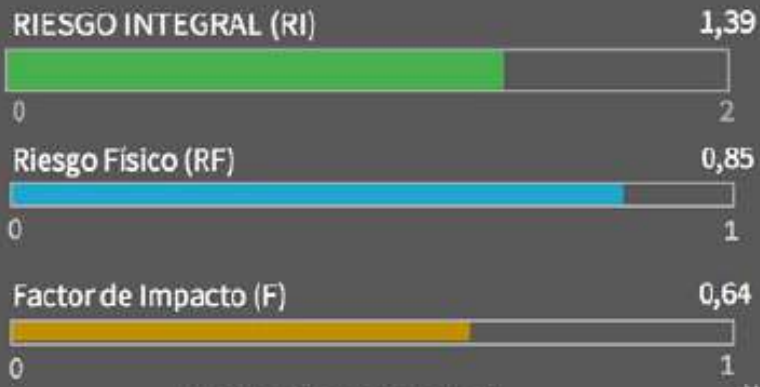
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	1.765.906	Indice de Gini	0,51
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	12.774.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	43,8

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

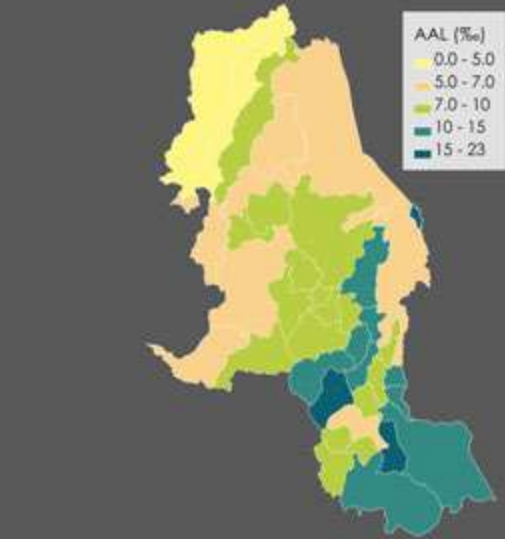
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [‰]	RF	F	RI
Cumbitara	2.776	11,32	1,00	0,83	1,83
Santa Bárbara	8.838	19,23	1,00	0,81	1,81
El Rosario	3.417	10,87	1,00	0,80	1,80
La Tola	2.830	17,04	1,00	0,80	1,80
Magüi	9.295	14,64	1,00	0,79	1,79
Francisco Pizarro	3.839	14,62	1,00	0,77	1,77
Leiva	3.608	10,56	1,00	0,75	1,75
Barbacoas	14.182	14,45	1,00	0,73	1,73
El Charco	13.732	16,24	1,00	0,73	1,73
Funes	5.233	15,27	1,00	0,72	1,72
Arboleda	1.591	8,72	0,97	0,78	1,72
Mosquera	4.880	15,18	1,00	0,72	1,72
San Andres de Tumaco	115.665	11,40	1,00	0,72	1,72
Ricaurte	7.508	15,18	1,00	0,70	1,70
Taminango	5.240	9,51	1,00	0,69	1,69
Roberto Payán	19.924	22,30	1,00	0,69	1,69
Buesaco	12.031	13,73	1,00	0,68	1,68
Colón	754	8,77	0,97	0,72	1,67
Policarpa	4.108	9,81	1,00	0,67	1,67
El Peñol	4.343	21,16	1,00	0,66	1,66
Iles	5.877	22,62	1,00	0,66	1,66
Contadero	1.512	11,17	1,00	0,66	1,66
Mallama	2.983	8,83	0,97	0,69	1,64
San Lorenzo	4.893	8,53	0,96	0,71	1,64
La Cruz	6.071	8,84	0,97	0,68	1,64
Yacuanquer	2.758	8,41	0,95	0,71	1,62
Los Andes	10.660	11,39	1,00	0,62	1,62
Olaya Herrera	44.892	26,67	1,00	0,61	1,61
Imués	4.852	8,88	0,97	0,65	1,61
Santacruz	6.487	8,86	0,97	0,64	1,60
Linares	2.926	8,68	0,97	0,65	1,60
Córdoba	2.378	8,25	0,94	0,69	1,59
Providencia	999	8,85	0,97	0,61	1,57
La Llanada	2.958	10,52	1,00	0,55	1,55
Cuaspud	2.838	7,76	0,90	0,72	1,54
Tangua	3.850	8,05	0,92	0,66	1,54
Guaitarilla	4.563	9,65	1,00	0,54	1,54
Samaniego	15.866	8,82	0,97	0,58	1,54
El Tablón de Gómez	7.225	8,20	0,94	0,64	1,53
San Bernardo	3.154	8,31	0,94	0,62	1,53
Sapuyes	2.087	8,49	0,95	0,59	1,51
Ospina	3.484	8,28	0,94	0,61	1,51
La Unión	4.190	8,42	0,95	0,59	1,51
Aldana	1.416	8,32	0,94	0,59	1,50
La Florida	2.045	8,41	0,95	0,58	1,50
Chachagüí	2.701	7,83	0,91	0,65	1,49
San Pablo	4.906	8,34	0,95	0,58	1,49
El Tambo	6.650	8,45	0,95	0,54	1,47
San Pedro de Cartago	3.094	8,11	0,93	0,57	1,46
Guachucal	3.905	7,96	0,92	0,58	1,45
Cumbal	3.895	8,19	0,93	0,55	1,45
Albán	3.167	7,94	0,92	0,57	1,44
Puerres	4.118	7,90	0,91	0,57	1,43
Gualmatán	373	8,15	0,93	0,53	1,42
Belén	1.148	8,78	0,97	0,47	1,42
Consaca	1.899	7,17	0,84	0,68	1,41
Ancuyá	2.938	7,53	0,88	0,60	1,41
Sandoná	6.736	7,63	0,89	0,57	1,39
Túquerres	17.776	7,56	0,88	0,52	1,34
Potosí	3.398	7,05	0,83	0,58	1,31
Pupiales	12.625	7,01	0,82	0,58	1,30
Nariño	1.310	6,70	0,78	0,50	1,18
Ipiales	71.847	5,69	0,63	0,44	0,90
Pasto	244.779	4,50	0,41	0,37	0,56

NORTE DE SANTANDER

INFORMACIÓN GENERAL

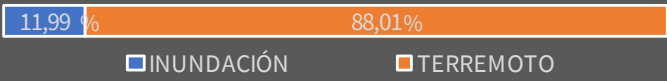
Población (Habitantes)	1.367.708	Indice de Gini	0,47
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	13.251.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	30,4

RIESGO MULTI-AMENAZA

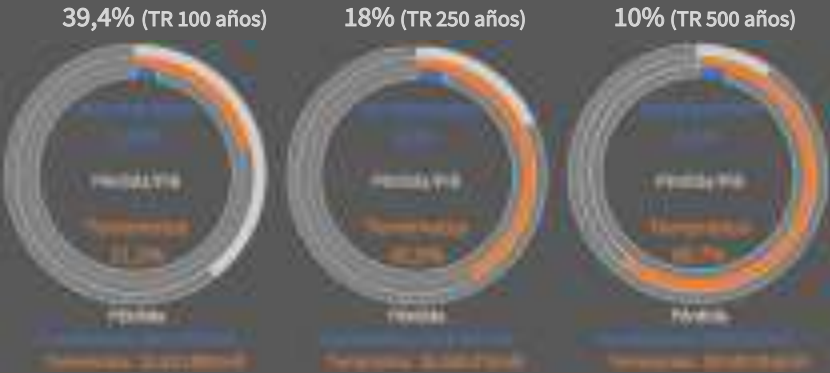


Ranking departamental de la AAL 10

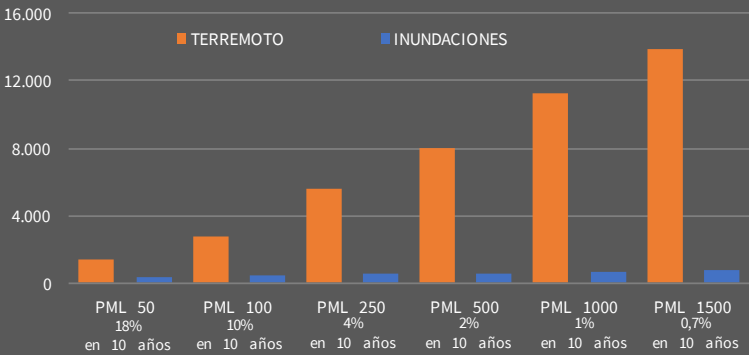
Contribución de cada amenaza a la AAL



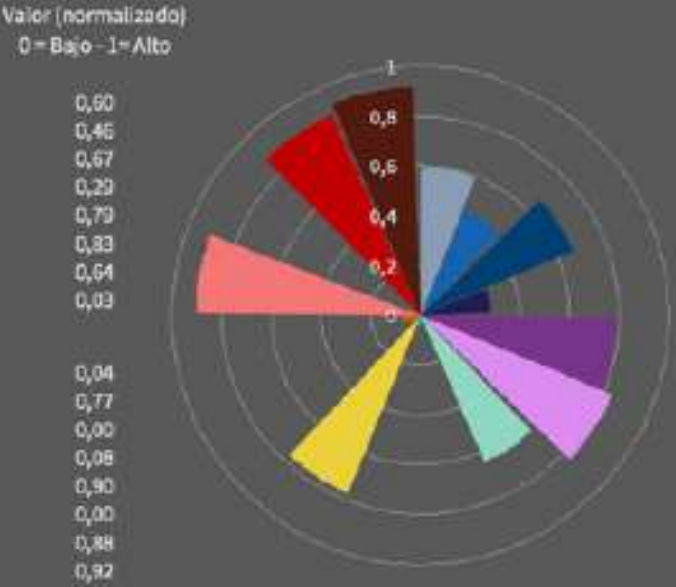
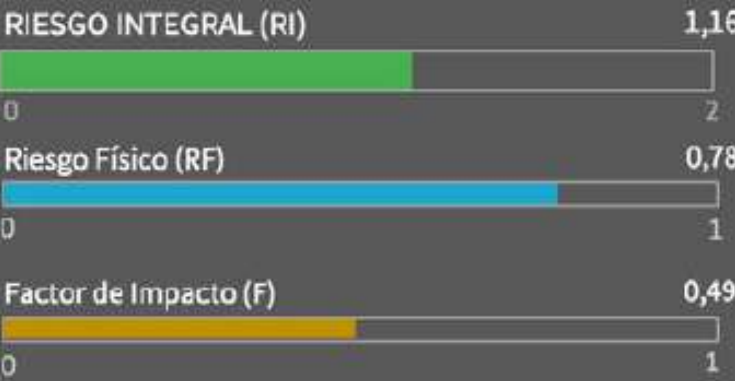
Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años



Pérdidas Máximas Probables



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

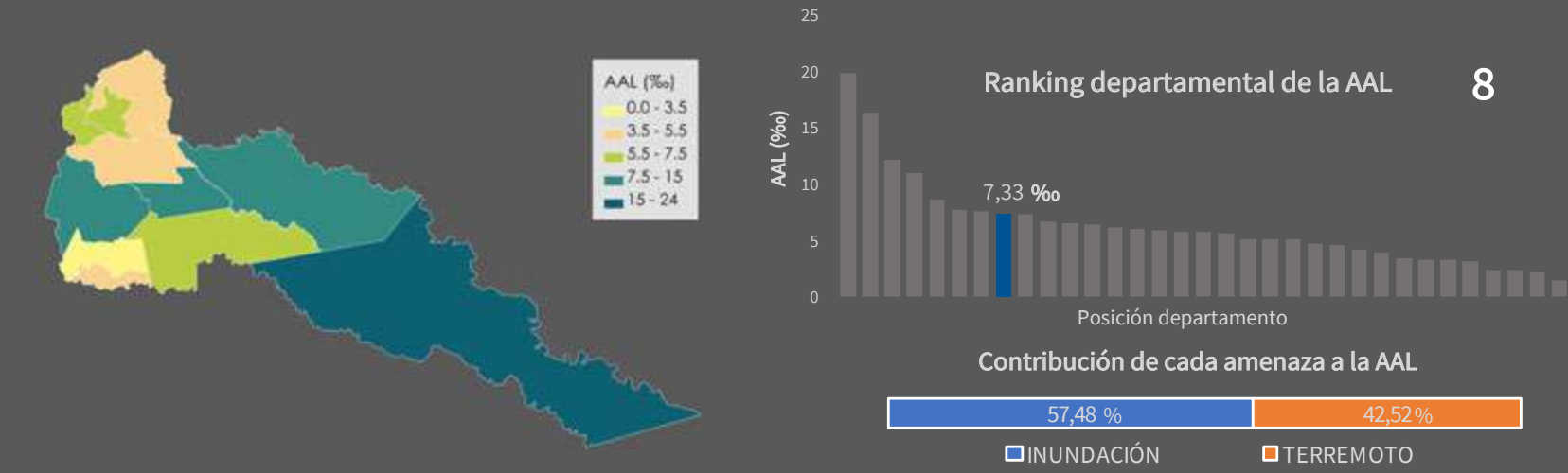
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [‰]	RF	F	RI
Puerto Santander	3.263	22,50	1,00	0,69	1,69
El Zulia	9.318	13,51	1,00	0,66	1,66
Teorama	4.546	9,17	0,99	0,68	1,65
Cucutilla	4.629	19,01	1,00	0,65	1,65
Salazar	2.713	8,62	0,96	0,70	1,64
Arboledas	3.462	13,42	1,00	0,60	1,60
Sardinata	6.339	9,02	0,98	0,61	1,57
Chitagá	4.655	12,71	1,00	0,57	1,57
San Cayetano	3.692	14,05	1,00	0,56	1,56
Santiago	1.662	9,41	0,99	0,57	1,56
Ragonvalia	2.119	11,29	1,00	0,55	1,55
Toledo	7.618	12,58	1,00	0,54	1,54
Pamplonita	1.602	9,80	1,00	0,54	1,54
Herrán	3.357	11,52	1,00	0,54	1,54
Bucarasica	831	7,50	0,87	0,74	1,52
Labateca	2.245	19,42	1,00	0,51	1,51
Durania	1.798	11,96	1,00	0,51	1,51
Cácota	951	9,23	0,99	0,52	1,50
Hacarí	2.419	7,27	0,85	0,74	1,48
Chinácota	5.154	9,94	1,00	0,47	1,47
Mutiscua	1.158	8,58	0,96	0,53	1,47
Gramalote	1.686	8,66	0,96	0,50	1,45
Bochalema	1.459	10,01	1,00	0,45	1,45
Lourdes	240	8,29	0,94	0,52	1,44
Silos	1.063	8,47	0,95	0,50	1,43
Villa Caro	1.395	7,18	0,84	0,68	1,41
Los Patios	2.753	9,95	1,00	0,41	1,41
El Tarra	2.358	6,96	0,81	0,71	1,40
La Playa	1.632	7,24	0,85	0,56	1,32
San Calixto	3.169	6,55	0,76	0,73	1,32
Cachirá	2.882	7,12	0,83	0,55	1,29
La Esperanza	2.275	6,28	0,72	0,69	1,22
Tibú	6.596	6,00	0,68	0,69	1,15
Villa del Rosario	22.551	6,32	0,73	0,47	1,07
Cúcuta	130.494	5,81	0,65	0,41	0,92
Abrego	7.292	5,38	0,57	0,58	0,91
Ocaña	17.447	5,12	0,52	0,45	0,76
Pamplona	10.597	5,08	0,52	0,35	0,70
El Carmen	2.127	4,30	0,37	0,68	0,62
Convención	2.332	4,05	0,33	0,55	0,51

PUTUMAYO

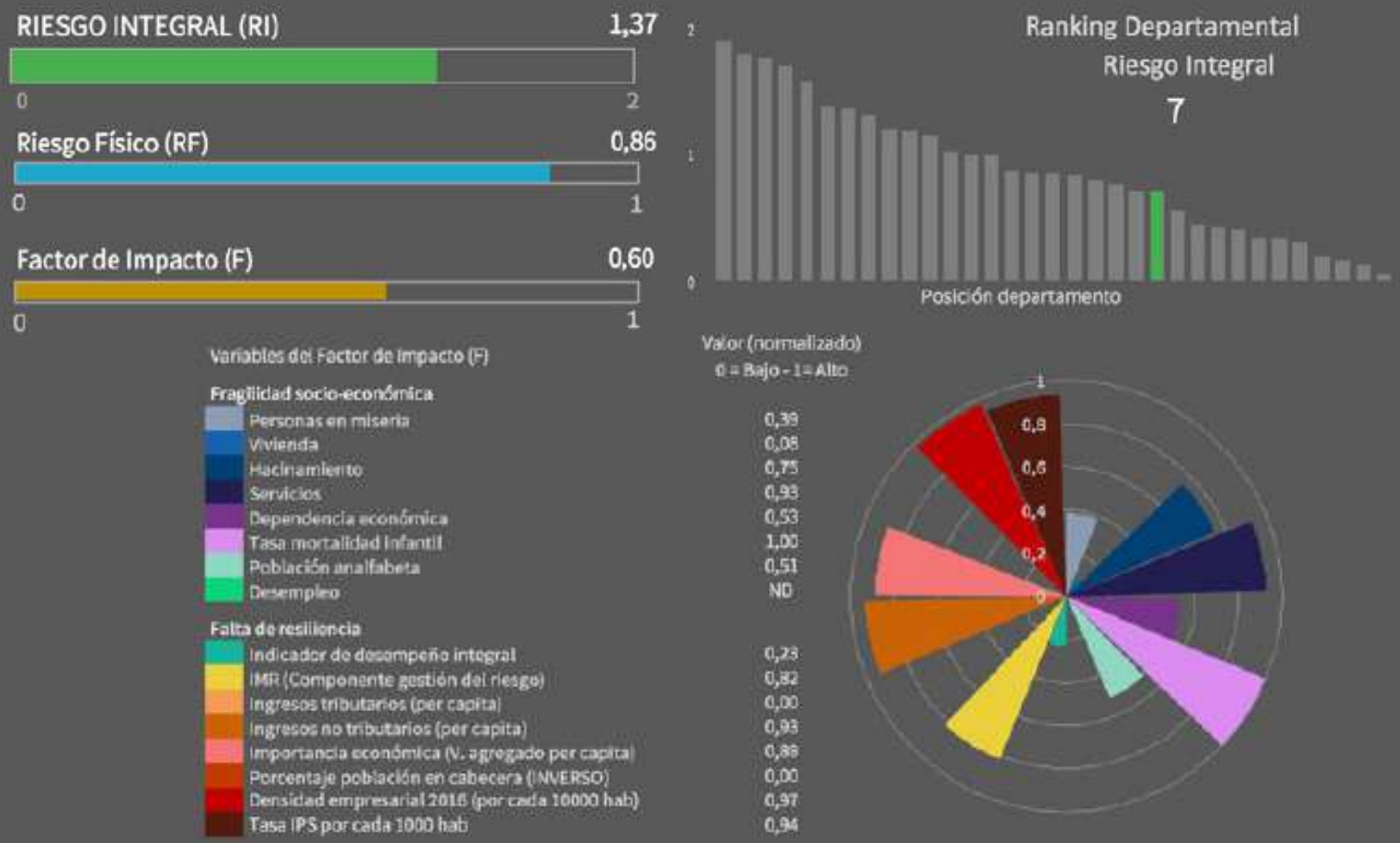
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	349.537	Indice de Gini	ND
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	3.329.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	36,0

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

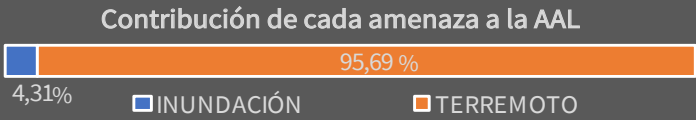
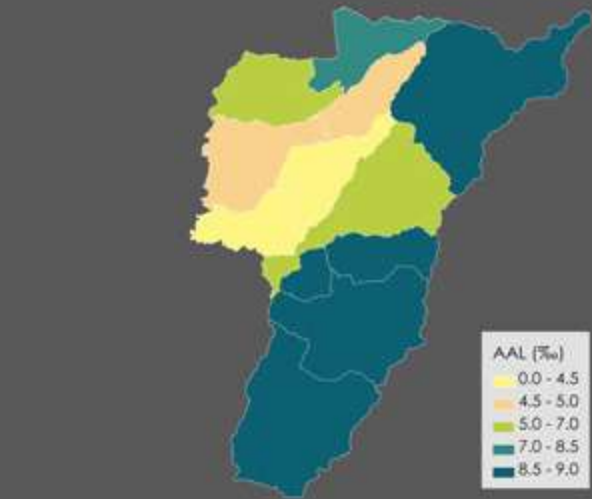
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%o]	RF	F	RI
Leguízamo	11.247	23,62	1,00	0,67	1,67
Orito	17.920	13,14	1,00	0,66	1,66
Puerto Guzmán	5.297	7,52	0,88	0,84	1,61
Puerto Caicedo	4.377	10,53	1,00	0,58	1,58
Colón	1.061	6,54	0,76	0,47	1,12
Santiago	1.438	5,89	0,66	0,56	1,03
San Francisco	798	5,92	0,67	0,50	1,00
Puerto Asís	10.369	5,65	0,62	0,51	0,94
Mocoa	7.244	5,29	0,56	0,39	0,78
Sibundoy	2.943	5,13	0,53	0,41	0,74
San Miguel	4.175	4,81	0,46	0,59	0,73
Villagarzón	3.528	4,72	0,45	0,50	0,67
Valle del Guamuez	3.762	3,10	0,19	0,53	0,29

QUINDIO

INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	568.506	Indice de Gini	0,45
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	6.182.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	16,2

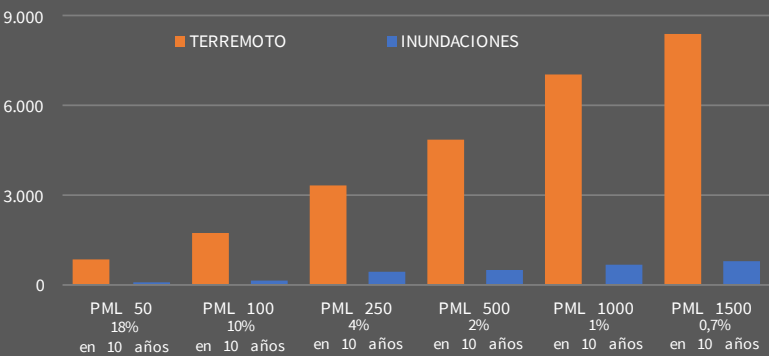
RIESGO MULTI-AMENAZA



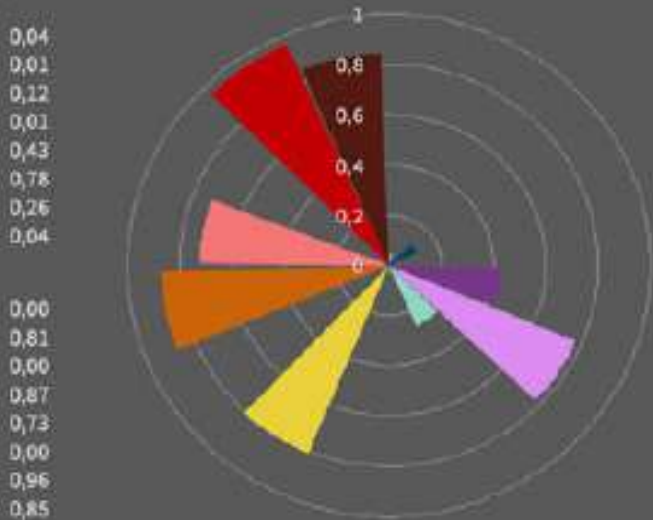
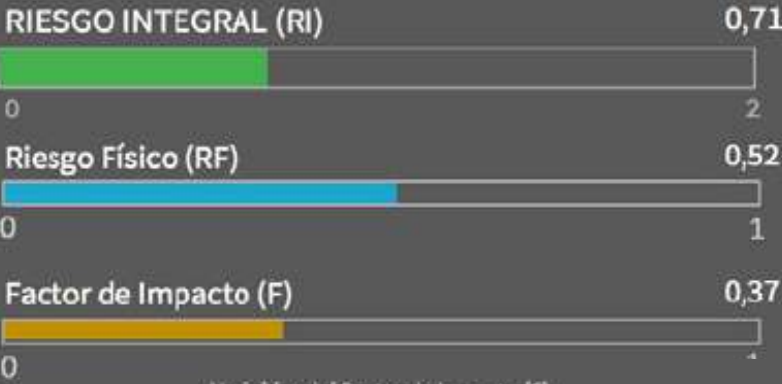
Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años



Pérdidas Máximas Probables



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

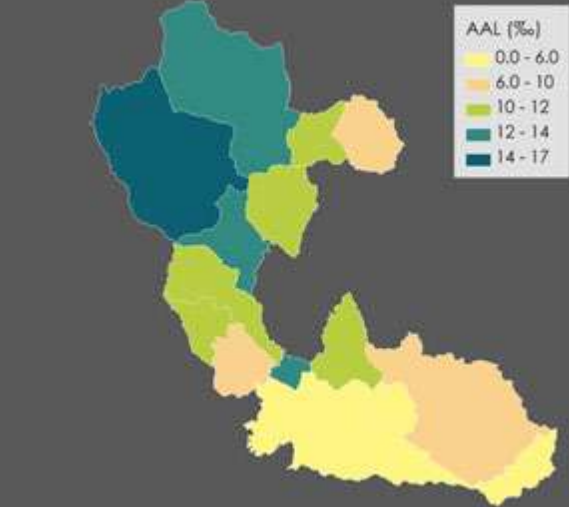
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [‰]	RF	F	RI
Génova	4.295	8,94	0,98	0,54	1,51
Pijao	2.622	8,81	0,97	0,47	1,42
Córdoba	666	8,86	0,97	0,42	1,38
Buenavista	1.261	8,95	0,98	0,39	1,35
Salento	2.461	8,81	0,97	0,38	1,34
Filandia	3.310	7,37	0,86	0,44	1,24
Quimbaya	9.743	6,81	0,80	0,48	1,18
Calarcá	18.287	6,68	0,78	0,44	1,12
Montenegro	8.409	4,79	0,46	0,52	0,70
Circasia	35.304	4,67	0,44	0,46	0,64
La Tebaida	8.418	4,46	0,40	0,47	0,59
Armenia	42.169	4,34	0,38	0,30	0,49

RISARALDA

INFORMACIÓN GENERAL

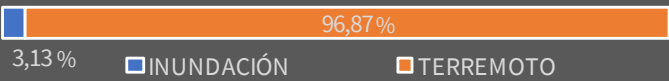
Población (Habitantes)	957.254	Índice de Gini	0,43
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	11.734.000	Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	17,5

RIESGO MULTI-AMENAZA



Ranking departamental de la AAL 12

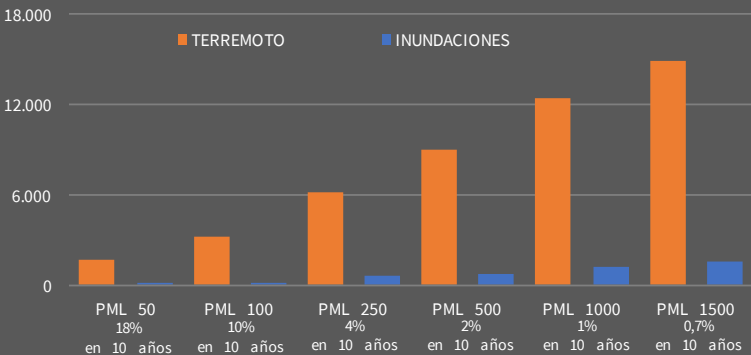
Contribución de cada amenaza a la AAL



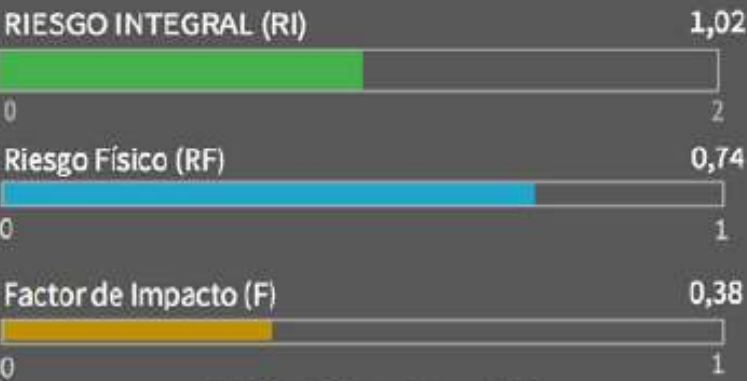
Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años



Pérdidas Máximas Probables



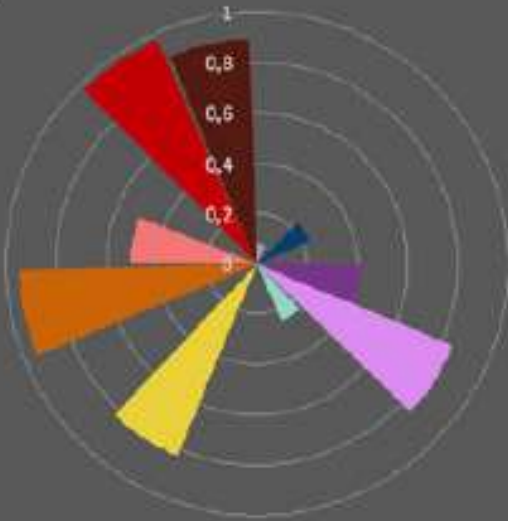
EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



Variables del Factor de Impacto (F)



Valor (normalizado)
0= Bajo - 1= Alto



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

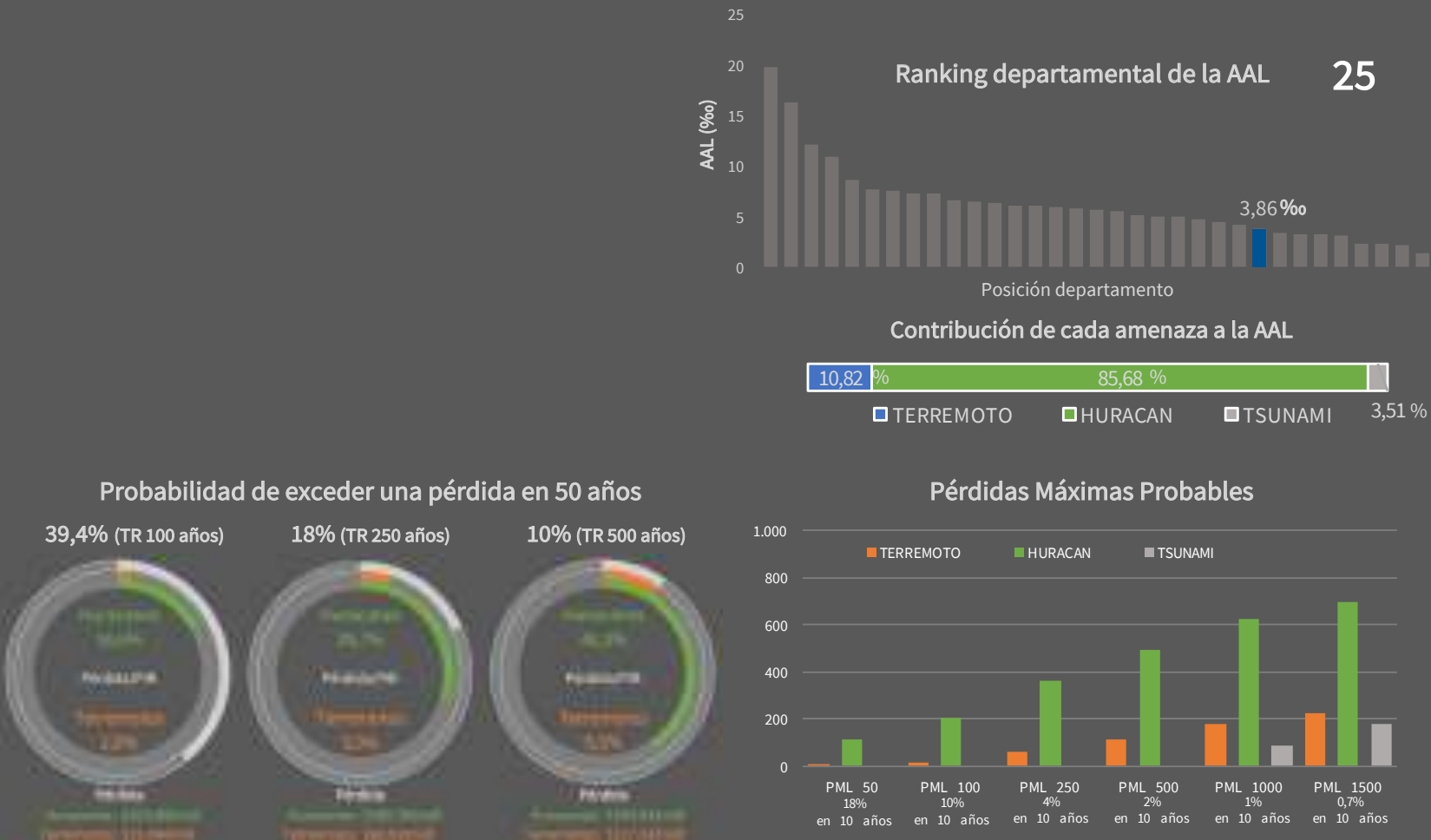
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [‰]	RF	F	RI
Pueblo Rico	3.336	16,68	1,00	0,64	1,64
Marsella	4.375	10,93	1,00	0,54	1,54
Mistrató	5.836	12,60	1,00	0,54	1,54
Santuario	3.505	11,93	1,00	0,52	1,52
Quinchía	8.621	9,03	0,98	0,54	1,51
La Celia	4.035	11,50	1,00	0,50	1,50
La Virginia	417	12,54	1,00	0,50	1,50
Guática	6.840	10,44	1,00	0,50	1,50
Belén de Umbría	8.399	10,63	1,00	0,47	1,47
Apía	7.889	12,13	1,00	0,45	1,45
Balboa	13.051	7,85	0,91	0,53	1,39
Santa Rosa de Cabal	24.221	6,60	0,77	0,40	1,07
Dosquebradas	36.399	5,50	0,60	0,40	0,83
Pereira	167.650	5,72	0,63	0,27	0,80

ARCHIPIELAGO DE SAN ANDRES, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA

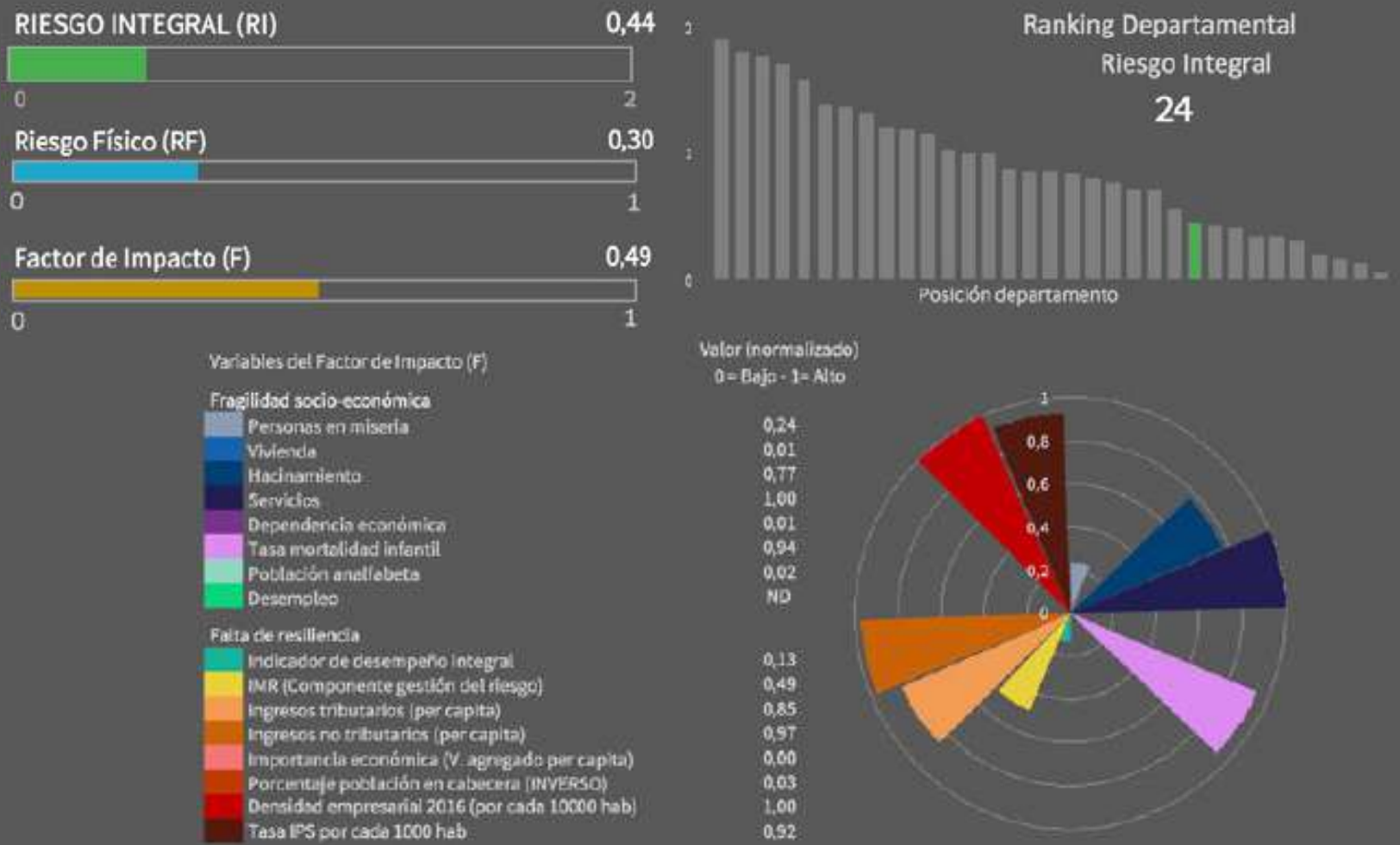
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	77.101	Indice de Gini	0,40
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	1.230.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	40,8

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL

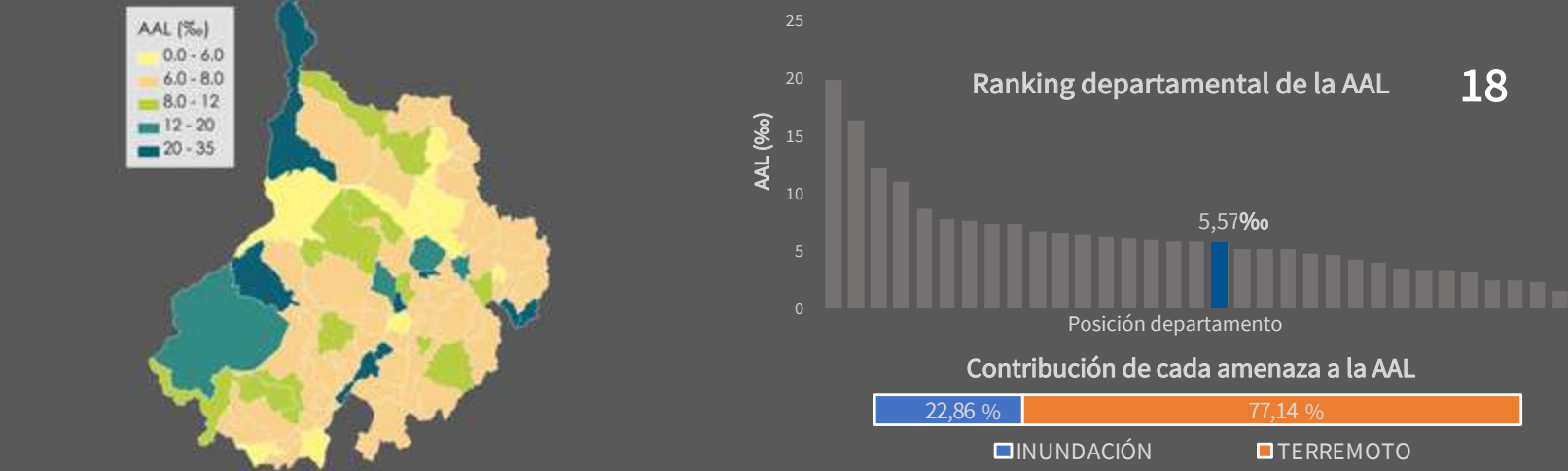


SANTANDER

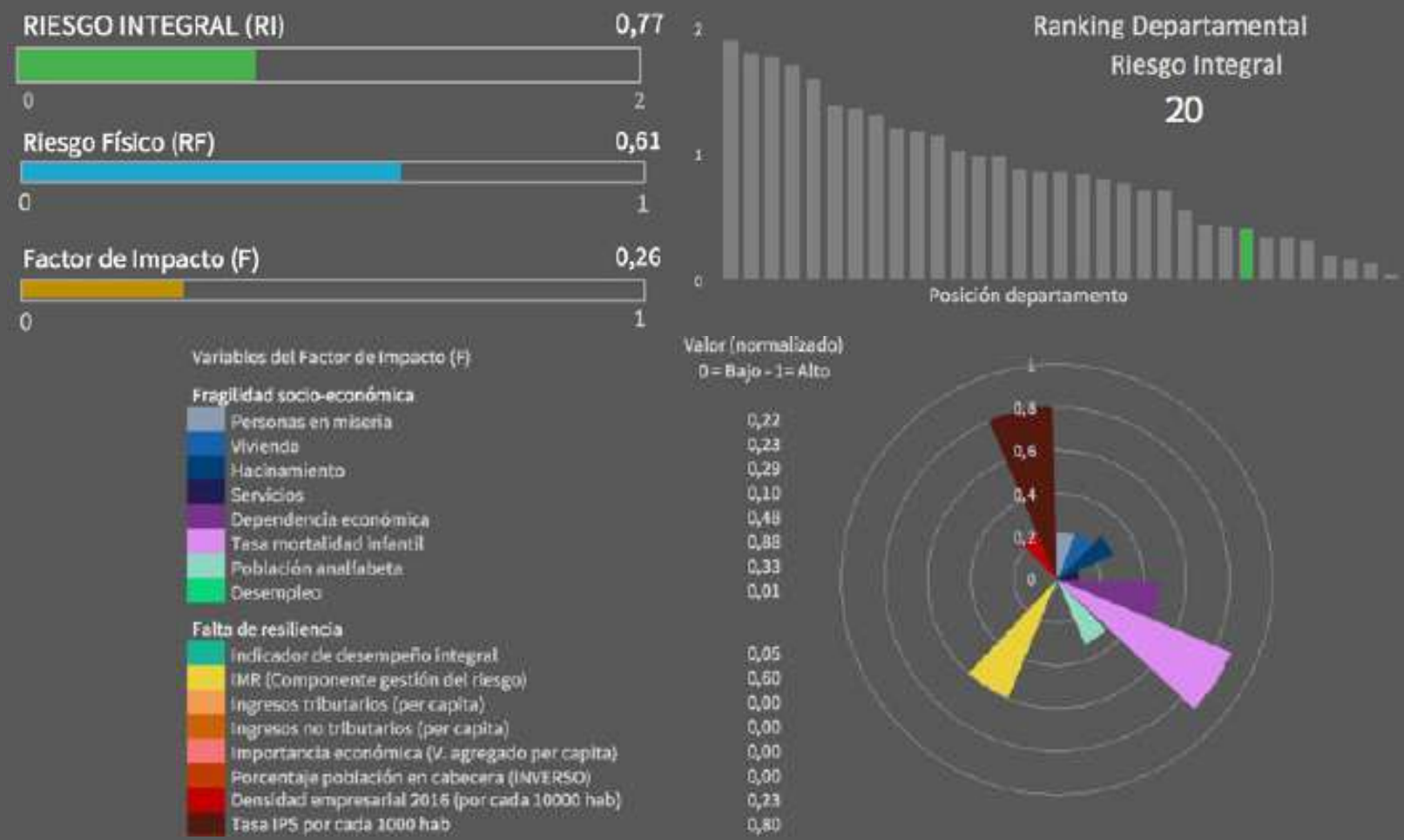
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	2.071.016	Indice de Gini	0,45
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	63.172.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	21,9

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%]	RF	F	RI
Jordán	2.190	33,43	1,00	0,75	1,75
Puerto Wilches	53.351	28,20	1,00	0,75	1,75
San Benito	6.149	32,78	1,00	0,69	1,69
Puerto Parra	3.421	27,08	1,00	0,69	1,69
El Peñón	2.271	9,26	0,99	0,68	1,66
Cabrera	8.206	34,93	1,00	0,65	1,65
Macaravita	2.854	24,06	1,00	0,63	1,63
Cimitarra	46.213	12,81	1,00	0,63	1,63
Santa Helena del Opón	2.298	11,50	1,00	0,60	1,60
Ocamonte	853	10,63	1,00	0,60	1,60
Rionegro	13.510	10,46	1,00	0,59	1,59
Carcasí	1.842	7,93	0,91	0,73	1,59
Los Santos	6.157	12,41	1,00	0,58	1,58
Molagavita	3.027	10,28	1,00	0,57	1,57
Galán	1.539	18,96	1,00	0,56	1,56
Coromoro	2.212	8,64	0,96	0,60	1,54
Cepitá	2.051	18,04	1,00	0,52	1,52
Capitanejo	9.459	28,00	1,00	0,52	1,52
Bolívar	5.845	8,24	0,94	0,60	1,50
Guapotá	3.607	24,27	1,00	0,47	1,47
Palmar	85	7,65	0,89	0,65	1,47
Hato	1.267	7,74	0,90	0,62	1,45
Guadalupe	10.262	31,49	1,00	0,45	1,45
Betulia	3.604	11,90	1,00	0,44	1,44
Santa Bárbara	785	7,57	0,88	0,61	1,42
Aratoca	2.377	7,94	0,92	0,53	1,40
Guaca	2.699	7,57	0,88	0,58	1,39
Cerrito	2.158	7,87	0,91	0,53	1,39
San José de Miranda	932	7,58	0,88	0,56	1,38
Enciso	1.176	7,64	0,89	0,55	1,38
Chima	616	7,59	0,88	0,56	1,38
Suaita	3.348	7,33	0,86	0,60	1,37
San Vicente de Chucurí	10.336	8,37	0,95	0,45	1,37
Onzaga	1.692	7,59	0,88	0,55	1,37
El Carmen de Chucurí	6.361	7,68	0,89	0,53	1,37
San Miguel	1.037	7,72	0,90	0,52	1,36
Páramo	1.315	7,43	0,87	0,57	1,36
Concepción	2.358	7,83	0,91	0,50	1,36
Chipatá	1.878	6,94	0,81	0,67	1,35
Vetas	512	7,49	0,87	0,55	1,35
Landázuri	4.094	6,80	0,80	0,69	1,35
Palmas del Socorro	526	7,44	0,87	0,54	1,34
Mogotes	4.122	7,47	0,87	0,53	1,33
Tona	2.214	7,42	0,87	0,54	1,33

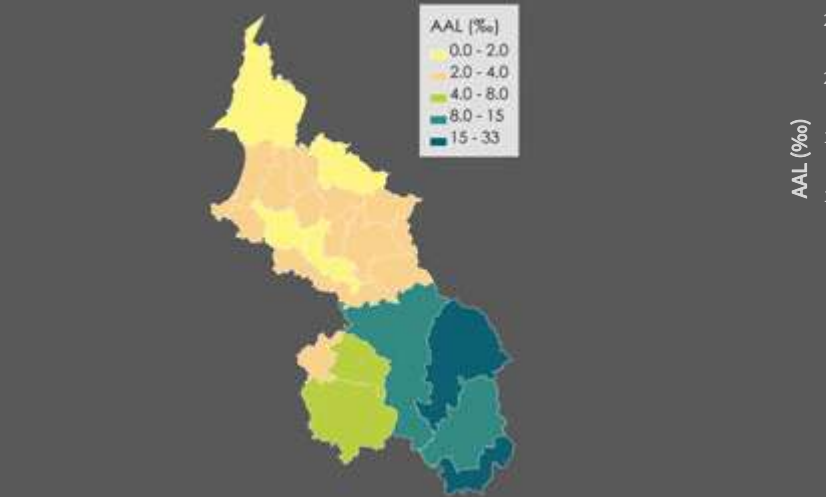
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%]	RF	F	RI
Contratación	1.095	7,57	0,88	0,51	1,33
Confinés	1.344	7,35	0,86	0,55	1,33
Guavatá	1.250	6,77	0,79	0,68	1,33
Encino	835	7,29	0,85	0,55	1,32
El Guacamayo	866	7,46	0,87	0,52	1,32
Barichara	2.453	8,64	0,96	0,36	1,31
Charalá	5.160	7,79	0,90	0,45	1,31
San Andrés	2.706	7,48	0,87	0,50	1,31
Sucre	1.634	6,74	0,79	0,66	1,31
Villanueva	2.237	7,60	0,88	0,47	1,30
Oiba	3.540	7,25	0,85	0,53	1,30
San Joaquín	970	7,52	0,88	0,48	1,30
Charta	893	7,30	0,85	0,52	1,30
Suratá	1.579	7,07	0,83	0,57	1,30
Simacota	2.906	7,21	0,84	0,52	1,29
Gambita	2.240	6,83	0,80	0,58	1,27
Valle de San José	1.415	7,48	0,87	0,45	1,26
Pinchote	351	7,47	0,87	0,44	1,26
California	492	7,32	0,86	0,47	1,26
Aguada	167	7,22	0,85	0,47	1,25
Lebríja	11.023	7,32	0,86	0,45	1,24
La Paz	1.826	7,26	0,85	0,46	1,24
Vélez	7.799	7,30	0,85	0,45	1,24
El Playón	3.308	6,68	0,78	0,58	1,23
Jesús María	864	6,68	0,78	0,56	1,21
La Belleza	2.564	6,65	0,78	0,56	1,21
Albania	1.206	6,59	0,77	0,58	1,21
Zapatoca	3.100	7,15	0,84	0,42	1,19
Curití	3.882	6,74	0,79	0,51	1,19
Gúepsa	437	6,90	0,81	0,47	1,19
Sabana de Torres	7.665	6,71	0,78	0,45	1,14
Barbosa	196	6,72	0,79	0,38	1,09
Matanza	1.606	5,91	0,66	0,51	1,00
Florián	1.435	5,42	0,58	0,64	0,95
San Gil	15.159	6,03	0,69	0,27	0,87
Málaga	4.795	5,59	0,61	0,35	0,82
Puente Nacional	3.426	5,20	0,54	0,47	0,79
Socorro	6.889	4,80	0,46	0,33	0,61
Girón	34.502	4,60	0,42	0,36	0,58
Piedecuesta	36.617	4,49	0,40	0,37	0,55
Barrancabermeja	46.489	3,67	0,27	0,34	0,36
Floridablanca	40.199	3,43	0,24	0,34	0,32
Bucaramanga	143.492	3,37	0,23	0,18	0,27

SUCRE

INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	859.913	Indice de Gini	0,46
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	6.575.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	54,9

RIESGO MULTI-AMENAZA



26

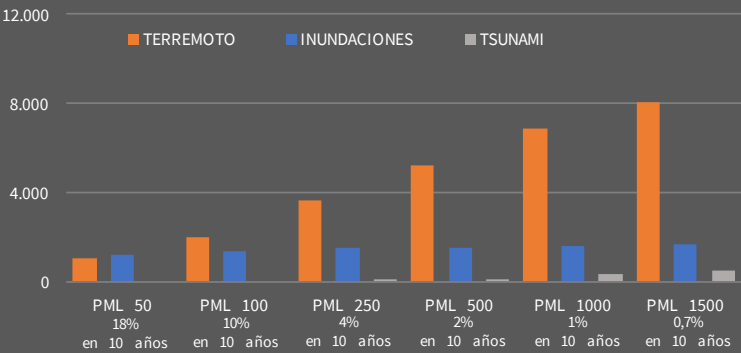
Contribución de cada amenaza a la AAL



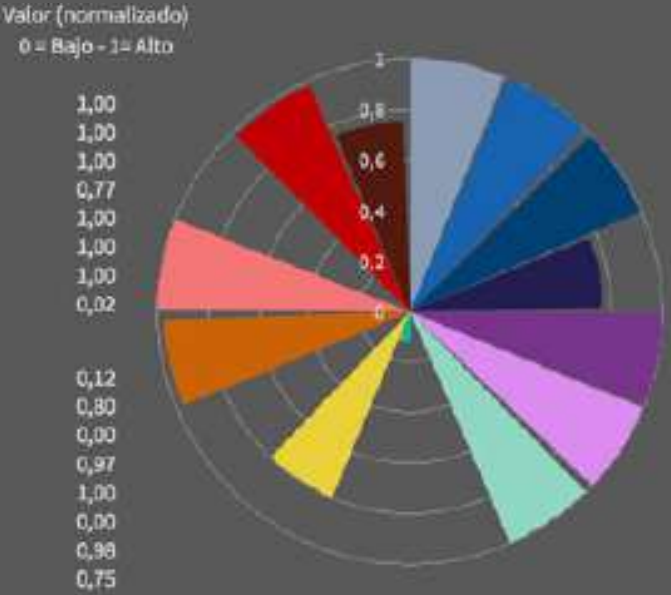
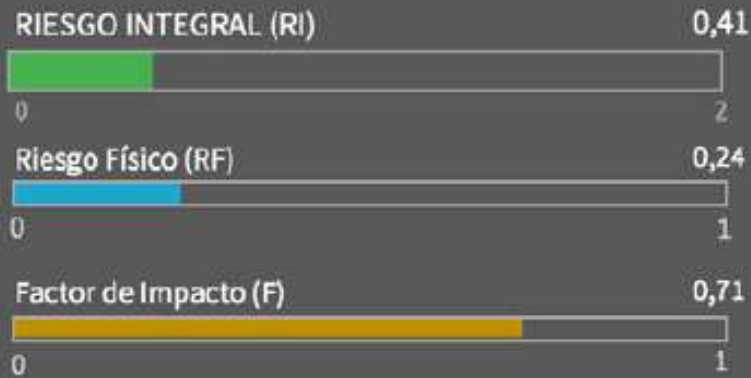
Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años



Pérdidas Máximas Probables



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

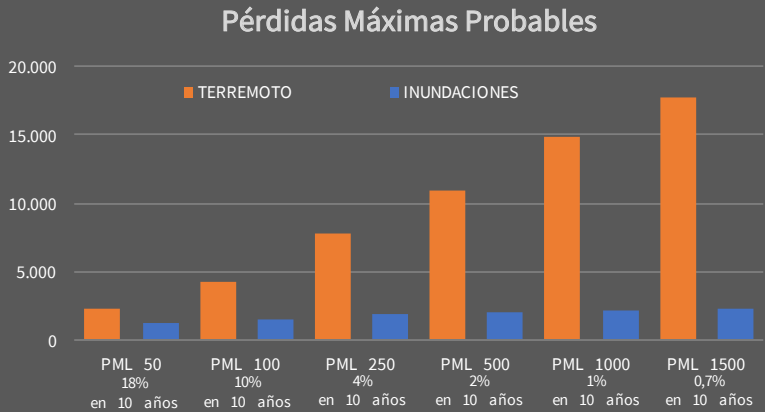
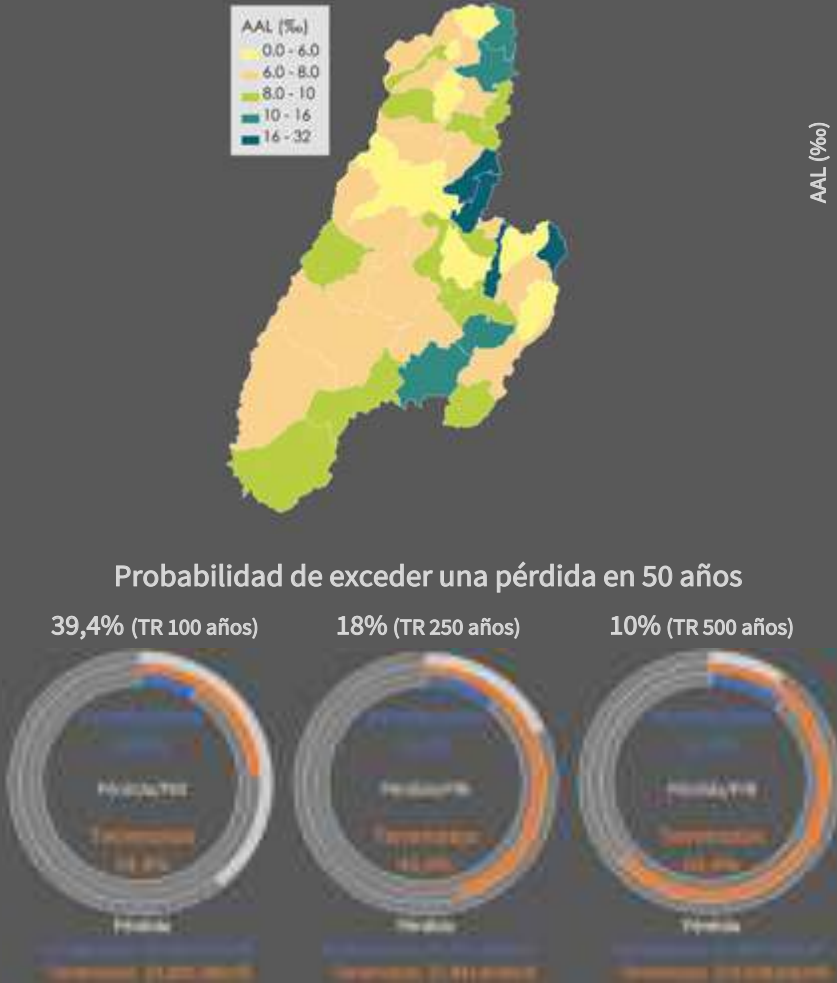
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]		AAL Multi-amenaza [‰]		RF		F		RI	
Sucre		22.590		27,82		1,00		0,80		1,80
San Benito Abad		8.874		8,98		0,98		0,84		1,80
Guaranda		17.663		32,88		1,00		0,78		1,78
Majagual		17.213		14,12		1,00		0,74		1,74
Caimito		2.772		6,13		0,70		0,80		1,26
San Marcos		10.856		4,45		0,40		0,81		0,72
La Unión		1.246		3,27		0,21		0,75		0,37
Galeras		1.407		2,69		0,14		0,78		0,26
El Roble		2.618		2,61		0,14		0,82		0,25
Morroa		1.076		2,58		0,13		0,74		0,23
Palmito		1.124		2,54		0,13		0,78		0,23
Santiago de Tolú		2.551		2,57		0,13		0,74		0,23
San Juan de Betulia		1.627		2,51		0,13		0,78		0,22
Chalán		278		2,45		0,12		0,81		0,22
Los Palmitos		924		2,44		0,12		0,78		0,21
Coveñas		842		2,54		0,13		0,64		0,21
Buenavista		658		2,40		0,12		0,77		0,20
Sampués		4.246		2,35		0,11		0,77		0,20
San Pedro		1.960		2,26		0,10		0,80		0,18
San Luis de Sincé		3.662		2,22		0,10		0,75		0,17
Tolú Viejo		4.083		2,21		0,10		0,75		0,17
Coloso		587		2,15		0,09		0,74		0,16
Ovejas		1.796		1,94		0,08		0,81		0,14
San Onofre		3.318		1,84		0,07		0,80		0,12
Corozal		4.731		1,77		0,06		0,72		0,11
Sincelejo		18.306		1,14		0,03		0,66		0,04

TOLIMA

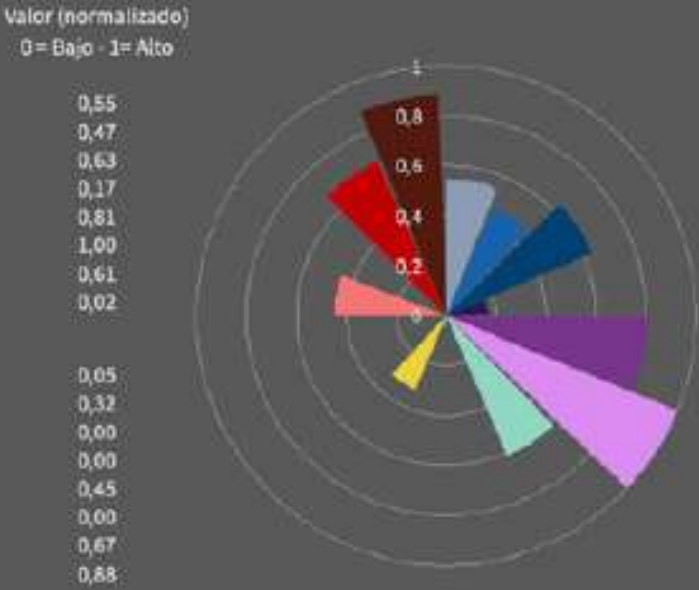
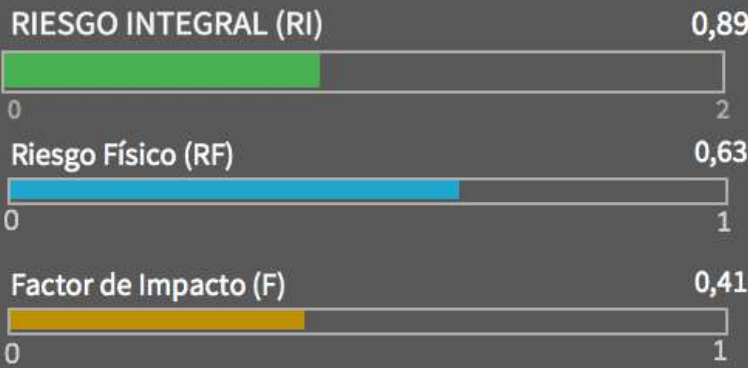
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	1.412.220	Indice de Gini	0,49
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	17.262.000	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	29,8

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

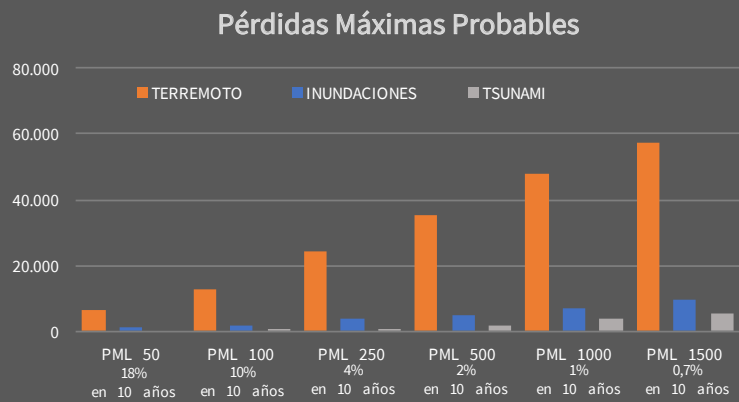
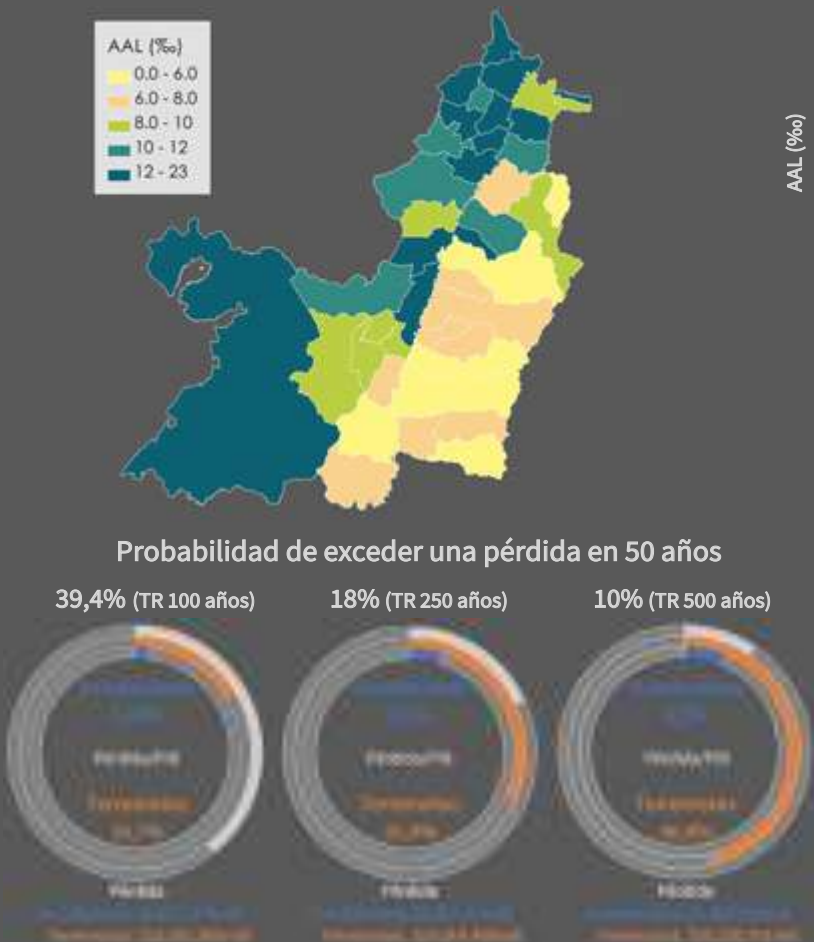
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [‰]	RF	F	RI
Suárez	7.022	31,05	1,00	0,75	1,75
San Luis	6.231	9,88	1,00	0,73	1,73
Natagaima	8.398	12,25	1,00	0,70	1,70
Coello	3.312	17,68	1,00	0,66	1,66
Ataco	4.718	8,03	0,92	0,76	1,62
Piedras	4.038	16,69	1,00	0,59	1,59
Venadillo	4.690	8,69	0,97	0,65	1,59
Armero	7.002	10,81	1,00	0,59	1,59
Planadas	9.785	8,80	0,97	0,64	1,59
Roncesvalles	1.635	8,36	0,95	0,65	1,56
Purificación	15.369	9,71	1,00	0,56	1,56
Anzoátegui	3.531	7,25	0,85	0,83	1,55
Coyaima	7.077	7,53	0,88	0,77	1,55
Rioblanco	5.819	7,74	0,90	0,72	1,54
Icononzo	4.803	17,62	1,00	0,54	1,54
Ambalema	2.894	9,38	0,99	0,54	1,53
Prado	2.984	11,18	1,00	0,51	1,51
Murillo	1.871	8,10	0,93	0,63	1,51
Alpujarra	1.392	8,43	0,95	0,58	1,50
Ortega	7.617	7,58	0,88	0,69	1,50
Casabianca	1.244	8,22	0,94	0,59	1,49
Rovira	4.800	7,79	0,90	0,64	1,48
Espinal	43.044	9,57	1,00	0,47	1,46
Honda	4.047	13,53	1,00	0,45	1,45
Santa Isabel	1.343	7,75	0,90	0,60	1,43
Saldaña	3.086	8,09	0,93	0,52	1,41
Valle de San Juan	1.228	6,95	0,81	0,73	1,41
San Antonio	2.598	7,10	0,83	0,68	1,40
Villahermosa	2.684	7,78	0,90	0,54	1,39
Herveo	2.569	7,71	0,89	0,53	1,37
Flandes	9.077	7,74	0,90	0,50	1,34
Falan	1.658	7,08	0,83	0,60	1,32
Alvarado	1.779	7,10	0,83	0,59	1,32
Cajamarca	4.011	7,31	0,86	0,52	1,30
Fresno	4.764	6,98	0,82	0,56	1,28
Cunday	1.614	6,71	0,78	0,63	1,28
Chaparral	13.937	6,75	0,79	0,59	1,25
Dolores	1.681	6,70	0,78	0,59	1,24
Lérida	5.061	6,97	0,82	0,51	1,24
Villarrica	1.106	5,93	0,67	0,58	1,05
Palocabildo	4.175	5,83	0,65	0,61	1,05
Guamo	8.333	5,80	0,65	0,58	1,02
Carmen de Apicalá	2.028	5,53	0,60	0,49	0,89
Melgar	2.152	5,95	0,67	0,33	0,89
Líbano	7.666	3,50	0,24	0,53	0,37
Ibagué	125.862	3,58	0,26	0,35	0,35
Mariquita	3.314	3,28	0,21	0,43	0,31

VALLE DEL CAUCA

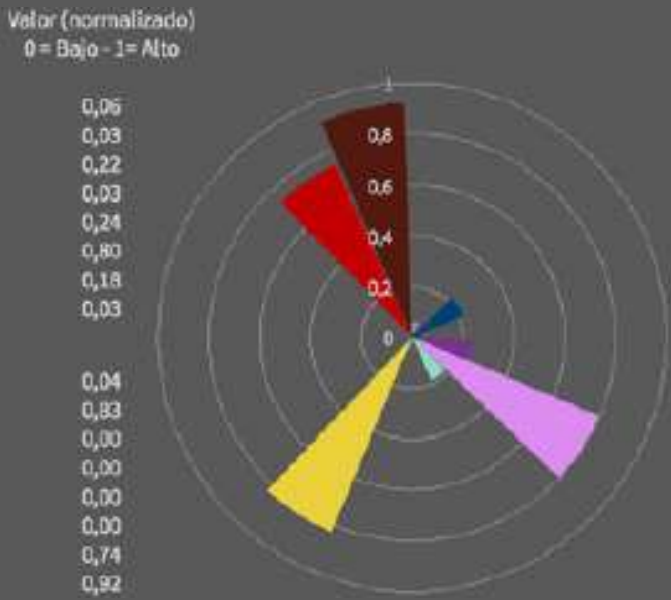
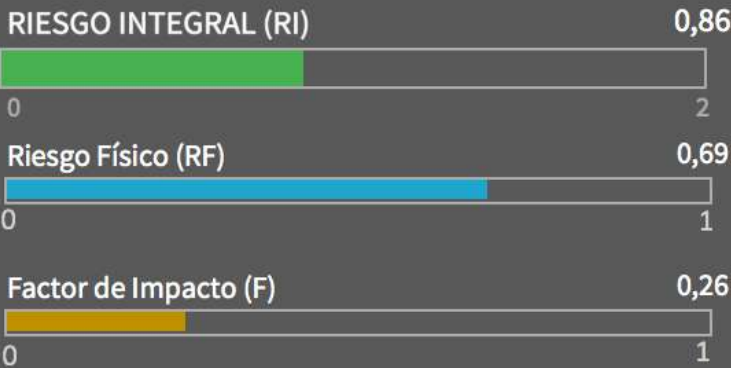
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	4.660.741	Índice de Gini	0,47
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	76.751.000	Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	15,7

RIESGO MULTI-AMENAZA



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

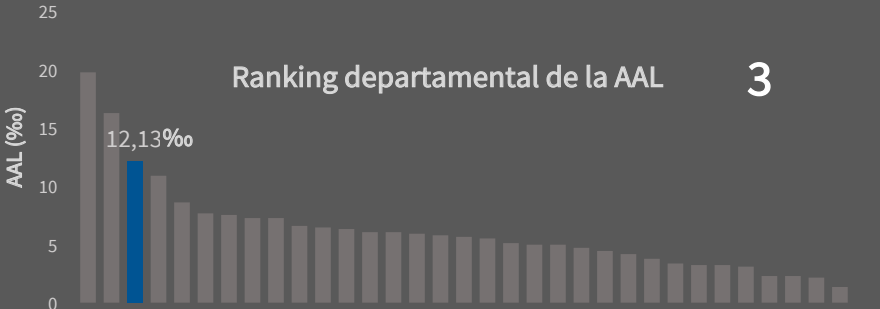
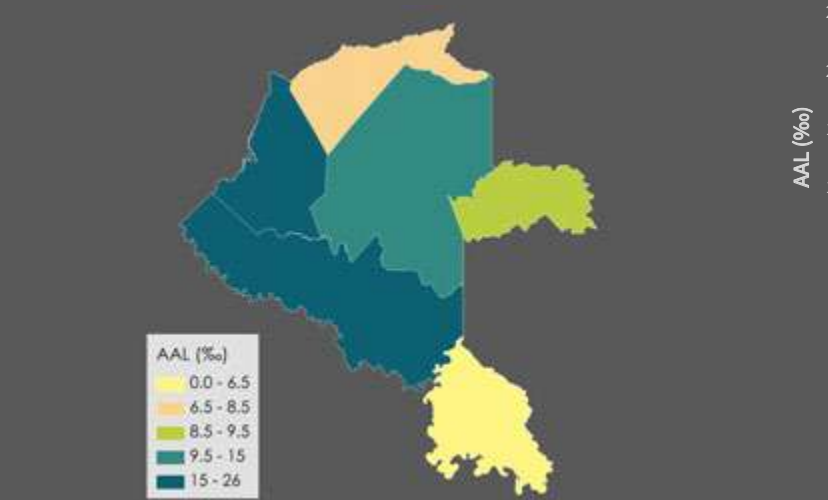
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [%]	RF	F	RI
Buenaventura	84.904	14,80	1,00	0,66	1,66
Obando	10.357	17,49	1,00	0,60	1,60
El Cairo	1.992	12,67	1,00	0,59	1,59
Ansermanuevo	13.367	16,73	1,00	0,59	1,59
Argelia	1.976	11,90	1,00	0,57	1,57
Toro	13.458	22,70	1,00	0,57	1,57
El Águila	4.298	12,23	1,00	0,56	1,56
Riofrío	11.417	18,60	1,00	0,55	1,55
Trujillo	5.451	9,36	0,99	0,53	1,52
Alcalá	4.526	9,00	0,98	0,55	1,51
La Cumbre	3.136	9,53	1,00	0,52	1,51
Bolívar	6.205	11,27	1,00	0,51	1,51
Dagua	12.581	9,91	1,00	0,51	1,51
El Dovio	4.448	10,92	1,00	0,50	1,50
Yotoco	7.516	13,39	1,00	0,49	1,49
La Victoria	5.621	10,75	1,00	0,49	1,49
Versalles	3.019	12,37	1,00	0,49	1,49
Restrepo	6.203	9,58	1,00	0,48	1,48
Ulloa	760	18,18	1,00	0,47	1,47
Vijes	2.555	9,43	0,99	0,47	1,46
Sevilla	11.654	9,04	0,98	0,48	1,46
Andalucía	5.797	12,47	1,00	0,44	1,44
Calima	5.899	11,09	1,00	0,43	1,43
Bugalagrande	12.404	10,71	1,00	0,43	1,43
La Unión	15.981	12,21	1,00	0,43	1,43
Cartago	35.056	9,36	0,99	0,41	1,40
Roldanillo	19.838	12,40	1,00	0,38	1,38
Candelaria	17.655	7,72	0,90	0,48	1,32
Pradera	11.229	7,41	0,87	0,52	1,32
San Pedro	5.828	7,98	0,92	0,43	1,32
Ginebra	4.785	7,30	0,85	0,44	1,23
Jamundí	32.895	7,21	0,84	0,45	1,22
Yumbo	30.506	7,58	0,88	0,35	1,19
Guacarí	7.103	6,37	0,74	0,48	1,09
Zarzal	12.442	6,26	0,72	0,45	1,04
El Cerrito	10.978	5,77	0,64	0,44	0,93
Buga	36.576	6,04	0,69	0,31	0,90
Tuluá	56.015	5,72	0,63	0,39	0,88
Florida	16.049	5,44	0,58	0,48	0,87
Palmira	97.626	5,27	0,55	0,35	0,74
Caicedonia	6.329	4,56	0,42	0,47	0,61
Cali	589.467	4,77	0,45	0,32	0,60

VAUPÉS

INFORMACIÓN GENERAL

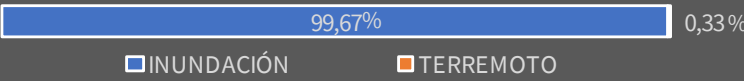
Población (Habitantes)	44.079	Indice de Gini	ND
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	221	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	54,8

RIESGO MULTI-AMENAZA

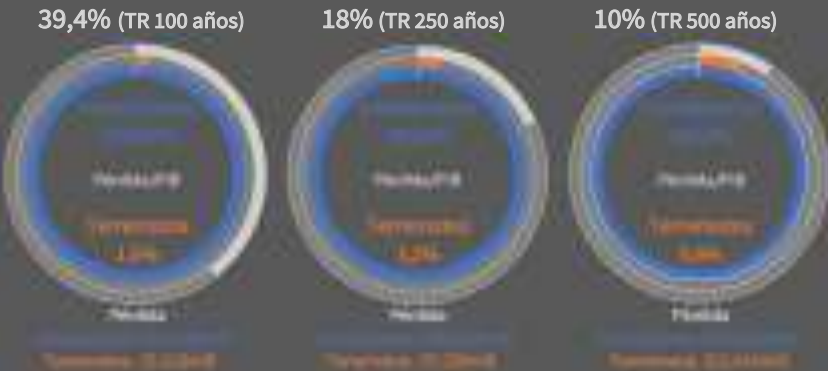


Ranking departamental de la AAL 3

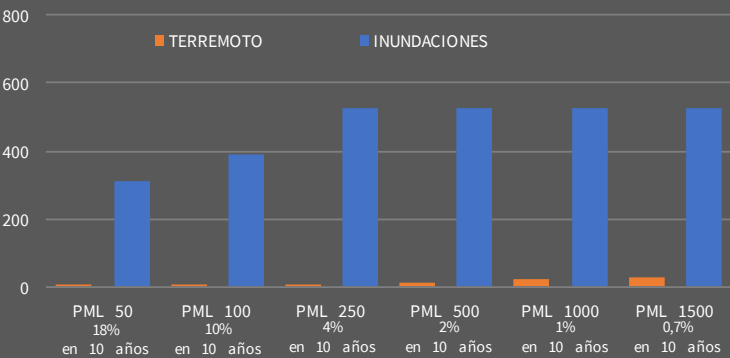
Contribución de cada amenaza a la AAL



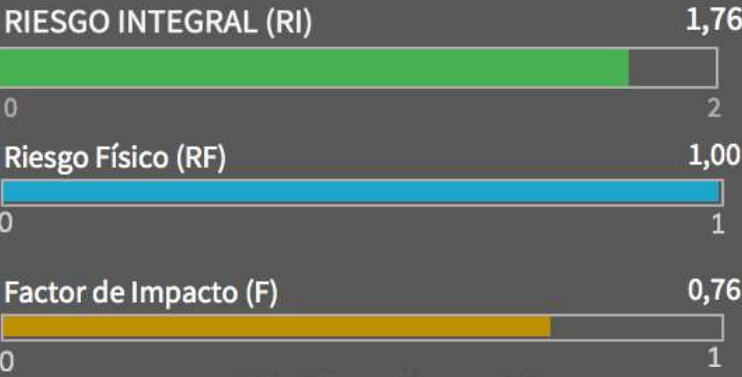
Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años



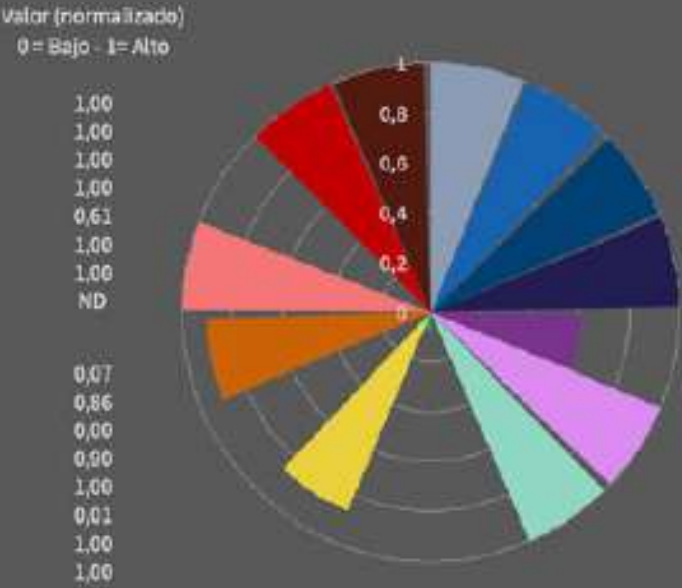
Pérdidas Máximas Probables



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



Ranking Departamental Riesgo Integral 3



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

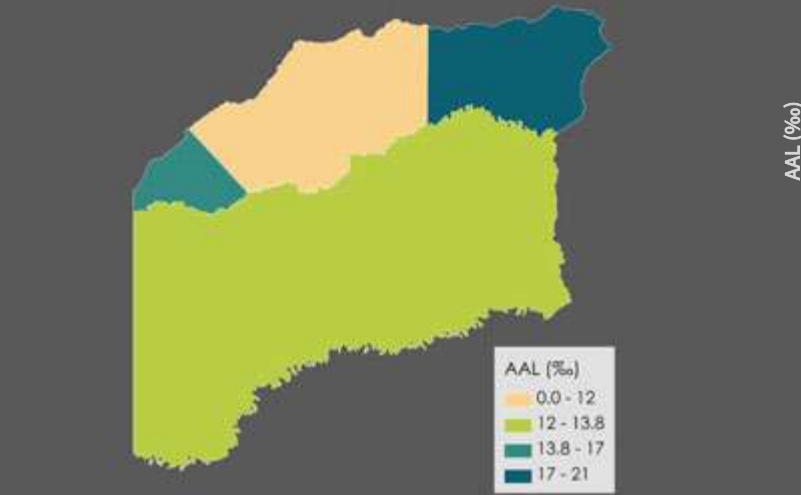
Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]	AAL Multi-amenaza [‰]	RF	F	RI
Caruru	2.889	25,30	1,00	0,81	1,81
Pacoa	4.067	17,80	1,00	0,76	1,76
Yavaraté	363	9,21	0,99	0,77	1,75
Mitú	9.667	10,15	1,00	0,70	1,70
Papunaua	949	8,40	0,95	0,58	1,49
Taraira	385	6,05	0,69	0,52	1,05

VICHADA

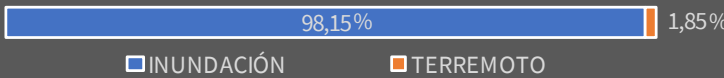
INFORMACIÓN GENERAL

Población (Habitantes)	73.702	Indice de Gini	ND
Producto Interno Bruto (PIB) Departamento (millones de pesos)	433	Indice de Necesidades Básicas Insatisfechas (INB)	67,0

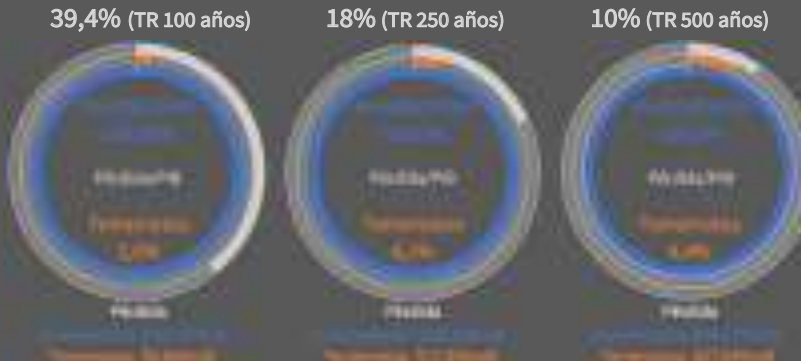
RIESGO MULTI-AMENAZA



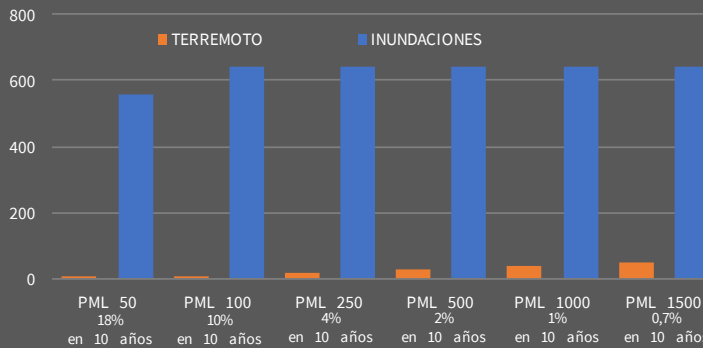
Contribución de cada amenaza a la AAL



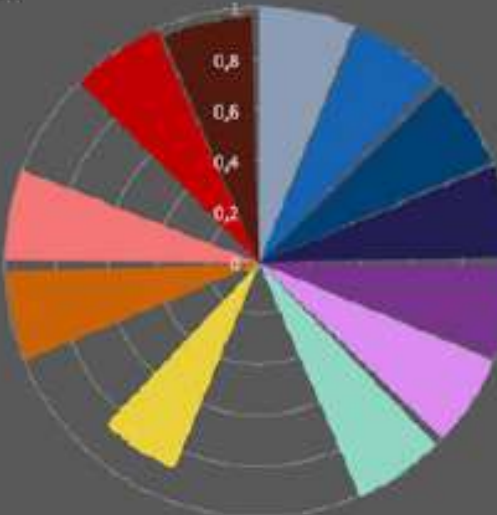
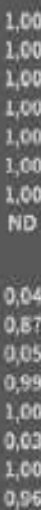
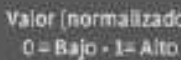
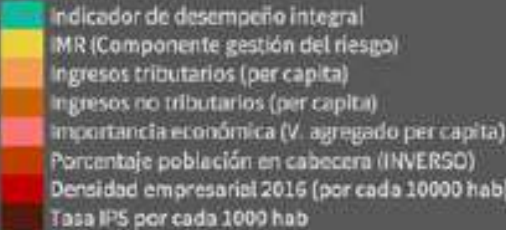
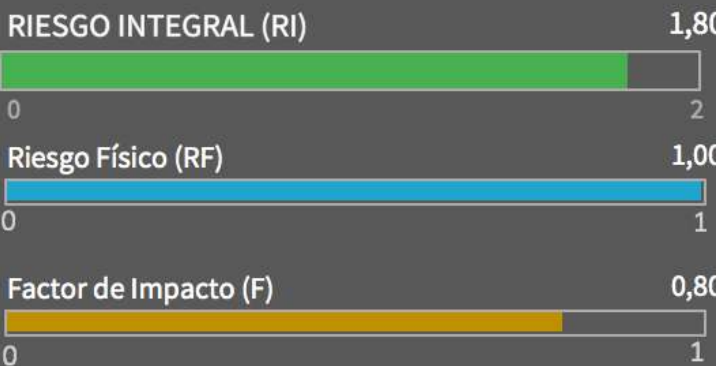
Probabilidad de exceder una pérdida en 50 años



Pérdidas Máximas Probables



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES DEPARTAMENTAL



EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES MUNICIPAL

RI Municipal

Municipio	AAL Multi-amenaza [Col\$ millones]		AAL Multi-amenaza [‰]		RF		F		RI	
Puerto Carreño		16.209		20,44		1,00		0,63		1,63
Santa Rosalía		1.177		13,80		1,00		0,68		1,68
Cumaribo		10.222		13,54		1,00		0,70		1,70
La Primavera		2.427		11,68		1,00		0,80		1,80



Al. Anexo



Al.1. Evaluación probabilista del riesgo: el modelo global

El Modelo global del riesgo, desarrollado inicialmente para la evaluación del riesgo a nivel global del GAR 13 (Global Assessment Report, UNISDR) y luego actualizado para el GAR 15, considera los componentes relevantes para la evaluación del riesgo de desastres: los elementos o bienes expuestos, el nivel de amenaza que estos enfrentan y su vulnerabilidad frente a dicha amenaza. El modelo global, fue la base técnica para la evaluación del riesgo para Colombia objeto de esta publicación. En este anexo se presentan las bases técnicas del modelo, cuyo objetivo fue la obtención una evaluación del riesgo para todos los países del mundo, considerando las grandes amenazas que resultan en riesgo catastrófico. La evaluación tanto de las amenazas como del riesgo que se realizó para este estudio está basada en análisis probabilistas que resultan en las métricas del riesgo mencionadas en el capítulo 4 de esta publicación. Estas métricas son consideradas como la forma mas apropiada de medir el riesgo de desastre a cualquier escala.

Este modelo, hasta ahora el único de su tipo, considera eventos que no han

ocurrido todavía a través del uso de un método predictivo probabilista que calcula las pérdidas debidas a posibles eventos futuros. El cálculo es realizado considerando las incertidumbres propias de las amenazas, la exposición y la vulnerabilidad. En algunos aspectos, este análisis es similar al utilizado en la industria de seguros y reaseguros, la principal diferencia, sin embargo, es que la evaluación realizada con fines de seguro y reaseguro solo cubre carteras limitadas de elementos asegurados. Por otro lado, para este caso el riesgo se calculó utilizando un proxy del valor total de los bienes de un país, considerando igualmente la responsabilidad fiscal del estado, que fue calculada a su vez, considerando tanto los bienes públicos como aquellos de hogares de bajos ingresos, ya que estos requerirán la intervención del estado para la rehabilitación y reconstrucción. La evaluación de pérdidas futuras en estos portafolios permite cuantificar el riesgo soberano por desastres, el cual debe ser tenido en cuenta por los ministerios de hacienda, economía y planeación, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad fiscal de los países.

La evaluación del riesgo realizada en este estudio se realizó con un modelo abierto de uso libre: la plataforma CAPRA (Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment). Esta plataforma de fuente abierta puede ser usada gratuitamente.

ALCANCE Y LÍMITES DEL MODELO A NIVEL GLOBAL

Una evaluación del riesgo a nivel global solo es posible a un nivel de resolución grueso. Esto significa que debe hacerse de forma consistente en cada fase sin entrar en demasiados detalles o alta precisión. Un alto nivel de precisión sería, en realidad, irrelevante para la escala de análisis. No sería posible producir una evaluación global a alta resolución debido a la falta de información detallada para todos los países, así como por la falta de tiempo y los recursos económicos que un estudio de este tipo requeriría. El análisis a nivel global permite obtener resultados que proveen una idea de magnitud del riesgo de desastre a escala nacional. Igualmente, permite obtener una clasificación general y rankings entre países con base en el riesgo, usando indicadores relativos. Estos indicadores

son especialmente útiles para identificar el riesgo de desastre a nivel global y para fines comparativos, para resaltar la necesidad de implementar medidas para la reducción del riesgo, protección financiera y preparación frente a los desastres. Igualmente, para alentar a los países a realizar evaluaciones del riesgo con mejores detalles a nivel subnacional y urbano, usando el enfoque probabilista.

Cabe anotar que la resolución y la precisión no están solamente asociadas con la evaluación de la amenaza, sino también con la representación de la exposición y la caracterización de la vulnerabilidad. Por esta razón, es necesario tener consistencia y compatibilidad en el nivel de rigor y detalles en las diferentes fases de la evaluación del riesgo. La elección de la resolución está relacionada con el tipo de decisiones que se pretende tomar con el resultado de la evaluación. Para este estudio, las simplificaciones y suposiciones, apropiadas para el trabajo a nivel global, significan que la precisión fue sacrificada. Sin embargo, se obtuvo un “panorama común” del riesgo para los países que permite una vista inicial y comparativa de su dimensión económica y capacidad para recuperarse del impacto de los desastres. En otras palabras, este análisis provee información sobre la resiliencia económica de los países en términos de indicadores del flujo económico de los países. El uso de información mas detallada está relacionado con la necesidad de realizar análisis beneficio-costos para la implementación de medidas de reducción del riesgo. Es importante señalar que a media que la escala se disminuya a nivel nacional y subnacional, se requieren análisis mas detallados, aún utilizando el mismo enfoque metodológico aplicado en esta evaluación. Las métricas probabilistas pueden ser usadas en todas las escalas territoriales, y la precisión apropiada para el

estudio depende del objetivo requerido y el uso de los resultados.

Las metodologías para evaluar la amenaza y el riesgo, para definir la exposición y la vulnerabilidad que componen el Modelo Global, así como los resultados de riesgo, métricas e indicadores, son un paso hacia la disminución de la brecha entre gobiernos y usuarios de esta información y la industria de modelación del riesgo que posee el “know-how” de este tipo de evaluaciones. Sin una gestión del riesgo eficiente en las próximas décadas, las herramientas e información apropiadas deben estar a la mano de los actores involucrados en la gestión del riesgo en las mas altas esferas de la administración pública, para que de esta forma pueda permear a los niveles posteriores. El Modelo Global de Riesgo provee una visión global del riesgo, como una semilla que debería derivar en evaluaciones locales del riesgo detalladas para todos los países. Un entendimiento integral del riesgo es la base para una gestión del riesgo efectiva.

REPRESENTACIÓN DE LA AMENAZA Y EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO

Las amenazas asociadas a fenómenos naturales son medidas con base en su frecuencia de ocurrencia y severidad, esta última es caracterizada a través de un parámetro de intensidad calculado en ubicaciones geográficas específicas. La evaluación de la amenaza, por lo tanto, está basada en la frecuencia de ocurrencia histórica del fenómeno y sus diferentes niveles de intensidad. Una vez se definen los parámetros que caracterizan la ocurrencia del fenómeno desde el punto de vista físico, es necesario generar un conjunto de eventos estocásticos -a través de la simulación de una serie de eventos aleatorios- los cuales, analíticamente hablando, definen todas las

formas posibles en las que dicho fenómeno se podría manifestar en la región analizada, en términos de su frecuencia y severidad.

Posteriormente, la amenaza es caracterizada en cada punto en un territorio determinado, a través de la probabilidad de distribución de las intensidades asociadas, definida en términos de su valor central y su medida de dispersión, que da cuenta de la incertidumbre asociada con la ocurrencia de dicho grado de intensidad. Es importante resaltar que, con respecto al estudio del riesgo catastrófico, es relevante estudiar aquellos casos donde el fenómeno puede causar pérdidas correlacionadas; en otras palabras, daños simultáneos en un área extensa.

ENFOQUE BASADO EN EVENTOS

El propósito de la evaluación probabilista del riesgo es la caracterización de las pérdidas en un conjunto de elementos expuestos, dadas la ocurrencia de eventos de amenaza. Como se mencionó anteriormente, dadas las incertidumbres propias de la estimación, la pérdida es modelada como una variable aleatoria. En general, lo que se busca conocer sobre la pérdida es:

- El universo de todas las pérdidas posibles (eg. El dominio de la variable aleatoria que describe la pérdida)
- La función de densidad de probabilidad de la pérdida, que está definida dentro del dominio de la variable

Un evento de pérdida, A, definido dentro del universo de todas las pérdidas posibles (o espacio de muestreo) S, puede representarse en un diagrama de conjuntos (Ver Figura A1-1). El evento A es un subconjunto de S, y está definido de una forma completamente

arbitraria, eg. su definición depende exclusivamente de la pregunta que se quiere responder. En este sentido, el evento A se puede definir, por ejemplo, como el conjunto de pérdidas mayores a 10 millones, o el conjunto de pérdidas menores

a 100 millones. Esto significa que A viene definido por el tomador de decisiones, según el tipo de decisión considerada. Sin embargo, la definición de A en si misma no es de interés, y lo que se busca conocer es la probabilidad de A, denotado como $P(A)$.

Entonces si, por ejemplo, A está definido como el conjunto de pérdidas mayores a 10 millones, estamos realmente interesados en conocer la probabilidad de que la pérdida sea mayor a 10 millones, eg $P(A)$.

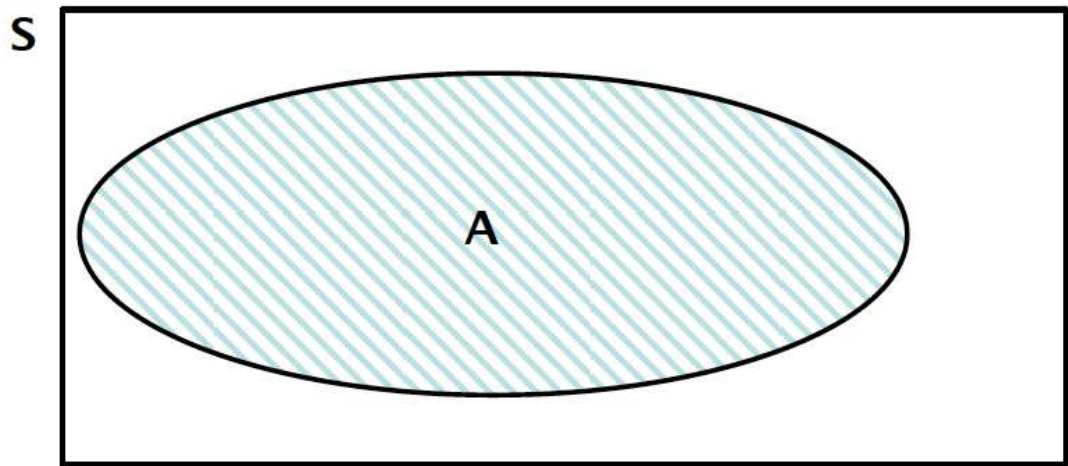


Figura A1-1. Representación gráfica de un evento arbitrario A dentro del espacio de muestreo S

Dado que A se define arbitrariamente, no es conveniente realizar un análisis individual de riesgo para cada evento específico

A. Necesitamos encontrar una forma en la cual $P(A)$ pueda ser determinada por cualquier evento A de interés, esto se logra

subdividiendo el espacio de muestreo S por un número finito de eventos base conocidos, B (Figura A1-2)

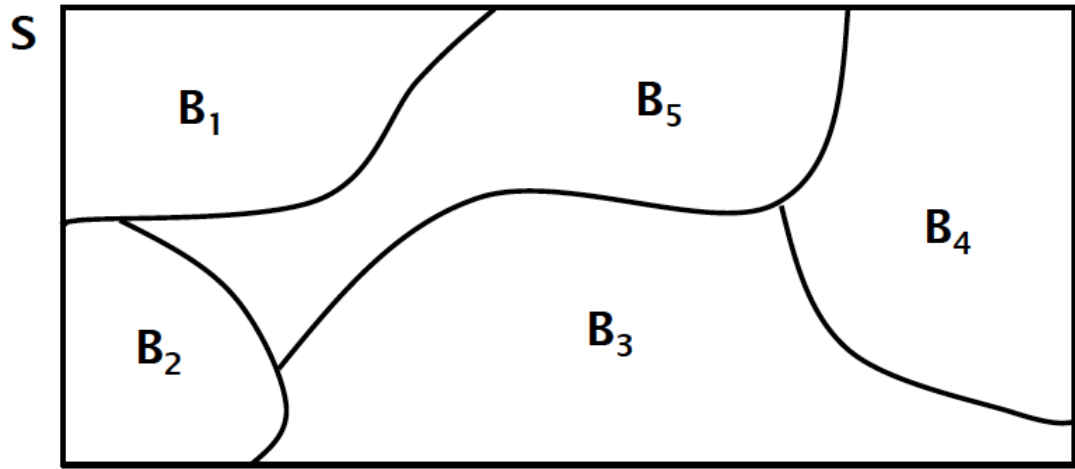


Figura A1-2. Subdivisión del espacio de muestreo S en eventos base B

Los eventos base B deben cumplir las siguientes características:

- Ser mutuamente excluyentes.

- Matemáticamente esto significa que estos nunca se intersectan, esto es, que la intersección es un conjunto vacío. En términos de análisis del riesgo, esto

significa que los eventos de pérdida B no pueden ocurrir simultáneamente.

- Ser colectivamente exhaustivos. En términos matemáticos esto significa que

la unión de todos los conjuntos B iguala el espacio de muestreo S. En términos de análisis del riesgo, esto significa que

los eventos B, vistos como un todo, representan integralmente el universo de todas las pérdidas posibles.

Para determinar P(A) para cualquier evento A, usamos intersecciones que ocurren entre un evento A y un evento B (Figura A1.3).

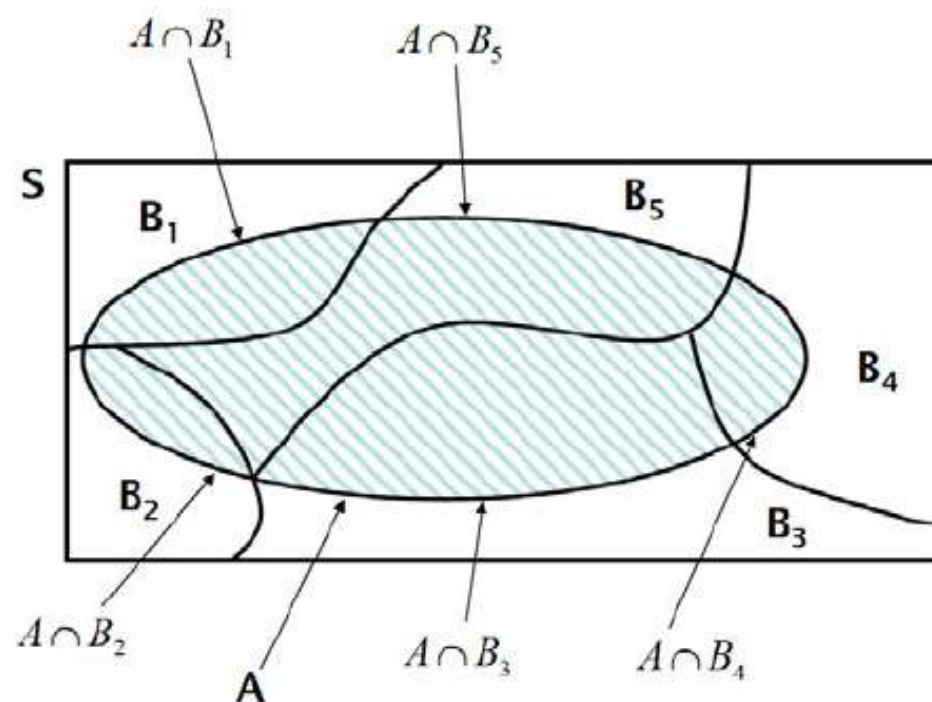


Figura A1-3. Intersección entre el evento A y el evento base B

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

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(A \cap B_j)$$

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

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

Por lo tanto, sustituyendo la Ecuación 1 en la Ecuación 2, obtenemos la solución de P(A) mostrada en la ecuación 3, que es simplemente la definición del teorema de la probabilidad total:

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(A | B_j) \cdot P(B_j)$$

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

En resumen, dentro del contexto de evaluación del riesgo, la definición de los eventos de interés A es completamente arbitraria, por lo tanto su probabilidad P(A) es calculada como una función de la distribución de probabilidad de la pérdida de los eventos base de pérdida B. Esto implica que la base de eventos B no puede ser definida arbitrariamente.

En análisis del riesgo, la colección de eventos base B es construida de la definición de escenarios de amenaza. La colección de escenarios de amenaza es generada, usualmente de manera estocástica, la cual representa integralmente todas las formas en la cual la amenaza se podría manifestar en el territorio de análisis.

La medida de intensidad referidas corresponden a las variables físicas que representan la severidad del fenómeno en el área de análisis.

AI.1.1. Metodologías y enfoques de evaluación

Para el desarrollo de este Atlas de Riesgo se han utilizados técnicas del estado del arte con el fin de caracterizar la exposición, evaluar las amenazas consideradas y modelar el riesgo de desastres con un enfoque probabilista y holístico o integral. A continuación, se presenta un resumen de los principales aspectos analíticos y técnicos que describen la forma como se han realizado las evaluaciones y obtenido los resultados. Estos enfoques también se han utilizado a nivel global en el Atlas GAR (UNISDR, 2017), documento también realizado con las técnicas desarrolladas por INGENIAR: Risk Intelligence.

MODELACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

Los elementos expuestos son fundamentales para la evaluación del riesgo, debido a que comprenden los objetos sobre los cuales se evalúan las pérdidas potenciales; es decir, son la fuente de las pérdidas que se pueden presentar debido al hecho de estar expuestos a las amenazas y ser susceptibles de sufrir un daño. En términos matemáticos, los elementos expuestos proveen individualmente el valor absoluto máximo posible de la pérdida en su ubicación, así como los sumandos de la función de

densidad de probabilidad de la pérdida de un escenario característico de la amenaza. Es decir, son en primera medida el elemento integrador de la amenaza y la vulnerabilidad en su ubicación, y en segunda medida, el elemento integrador de las pérdidas totales para un escenario o evento. Su adecuada caracterización es de gran importancia para la adecuada estimación de las pérdidas. A continuación, se presentan los pasos para la construcción de un modelo de exposición coarse grain que permite configurar, valorar y caracterizar los elementos expuestos frente a diferentes amenazas con un nivel de detalle básico para contar con una imagen operativa del riesgo a nivel municipal. El mismo enfoque analítico del riesgo presentado aquí se puede utilizar para evaluar el riesgo a nivel local (e.g. urbano), lo que cambiaría sería el nivel de detalle del modelo de exposición. El procedimiento descrito a continuación ha sido el utilizado también a nivel global para el Atlas GAR (UNISDR, 2017).

1. Clasificación de acuerdo con el nivel de desarrollo

El país se clasificó según su economía, por medio del Ingreso Nacional Bruto (INB) per cápita en cuatro grupos definidos como en

la *Tabla AI.1*.

Tabla AI-1. Distribución de la población por nivel de ingreso

Nivel de ingreso	Límite INB per capita *
Bajo	<=\$1,025
Medio bajo	<=\$4,035
Medio alto	<=\$12,475
Alto	>\$12,476

2. Extraer el conteo de población urbana

La cobertura con el conteo de población global empleada ha sido la definida por LandScan (ORNL, 2007) y actualizada al año más reciente con los correspondientes indicadores de crecimiento de población.

El conteo de población urbana se obtuvo de la cobertura nacional de población interceptada con una máscara ajustada de áreas urbanas. Dicha máscara está conformada por la cobertura de áreas construidas del MODIS 500m (Schneider et al., 2009; 2010) en adición de las celdas contiguas de la cobertura original de población (LandScan) que contienen más de 2,000 habitantes.

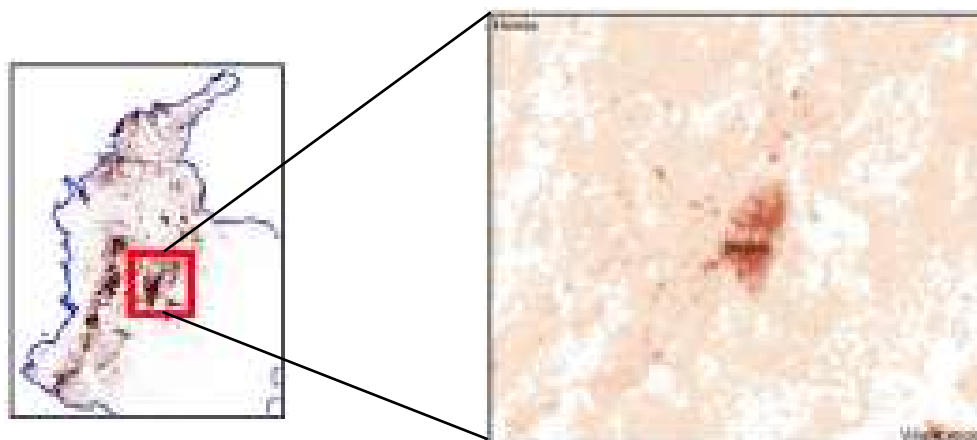


Figura A1-4. Cobertura del conteo de población

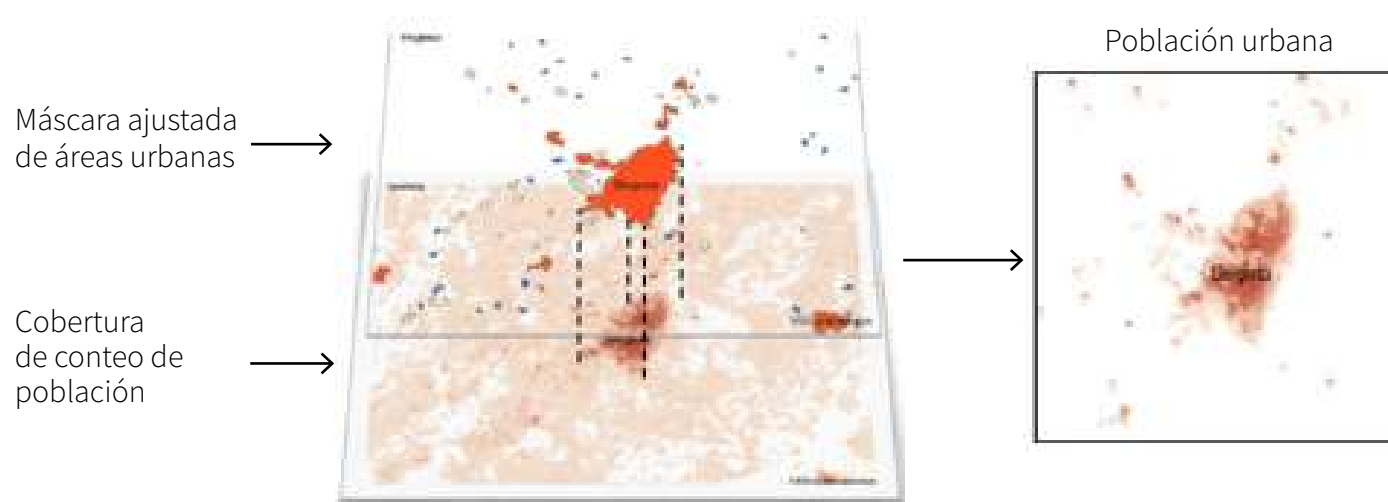


Figura A1-5. Proceso de extracción de población urbana

3. Clasificación de cada una de las áreas urbanas por nivel de complejidad

Una vez extraído el **conteo de población urbana**, se realizó una clasificación por **nivel de complejidad** basado en total de la población de cada área urbana como se presenta en la *Tabla A1.2* (tamaño de

asentamientos (Satterthwaite, 2006).

Asignado el **nivel de complejidad**, se realizó un muestreo de población en grupos de celdas de 5x5 km, con el objeto de reducir el tamaño de la base de datos (número de registros) así como reducir el tiempo de análisis de la información para la exposición

y consecuentemente el tiempo necesario para obtener resultados del análisis. De aquí en adelante se asignará a cada celda de 5x5 km un identificador para continuar con el procesamiento de información en bruto y no geográficamente.

Tabla A1-2. Criterio de clasificación de acuerdo con Satterthwaite (2006)

Nivel de complejidad	Índice	Descripción
Urbano mayor	1	$\geq 20,000$ habitantes
Urbano menor	2	$< 20,000$ y $> 2,000$ habitantes
Rural	3	$\leq 2,000$ habitantes

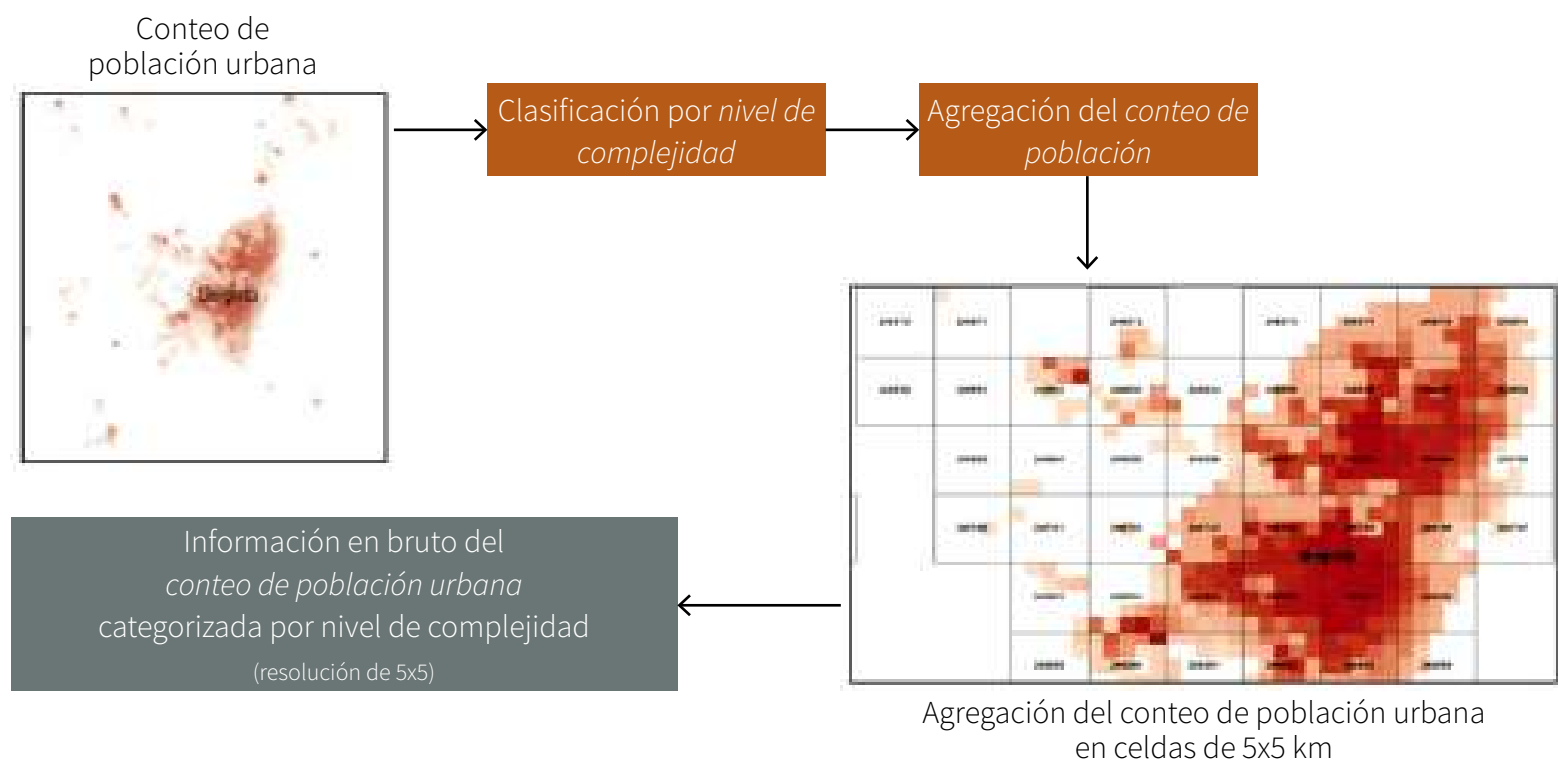


Figura A1-6. Asignación del nivel de complejidad y agregación de población

4. Distribución de población por nivel de ingreso

Con el objetivo de estimar los activos dedicados al uso residencial es necesario estimar la **población por nivel de ingreso**,

para tal fin se utilizó la curva de distribución de ingreso en la población GINI (curva de Lorenz).

Con dichos límites se realiza la distribución de población en áreas urbanas por nivel de

ingreso de según la siguiente ecuación

$$poblacion (\%pop_i, pop\ area\ urbana_j) = \%pop_i * (pop\ area\ urbana_j / 1000) [población]$$

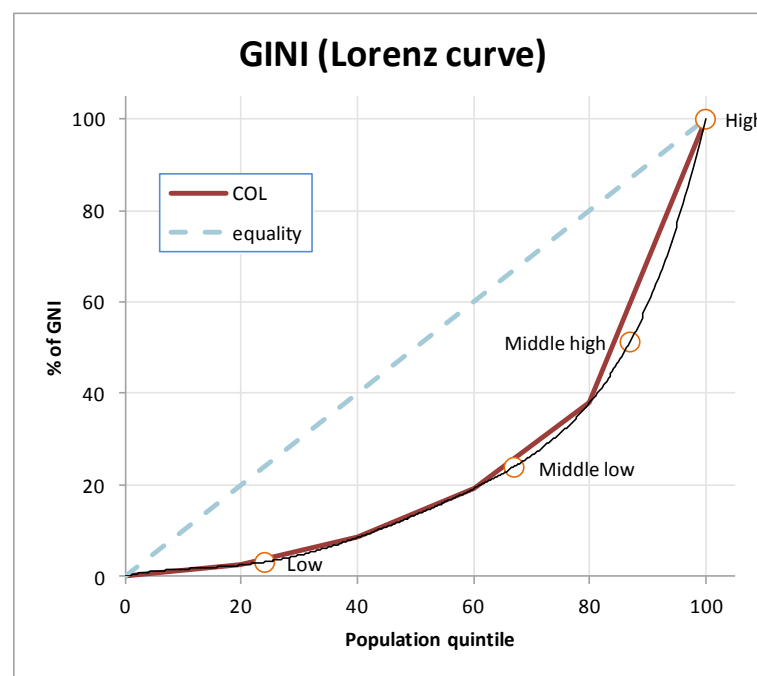


Figura A1-7. Distribución del ingreso

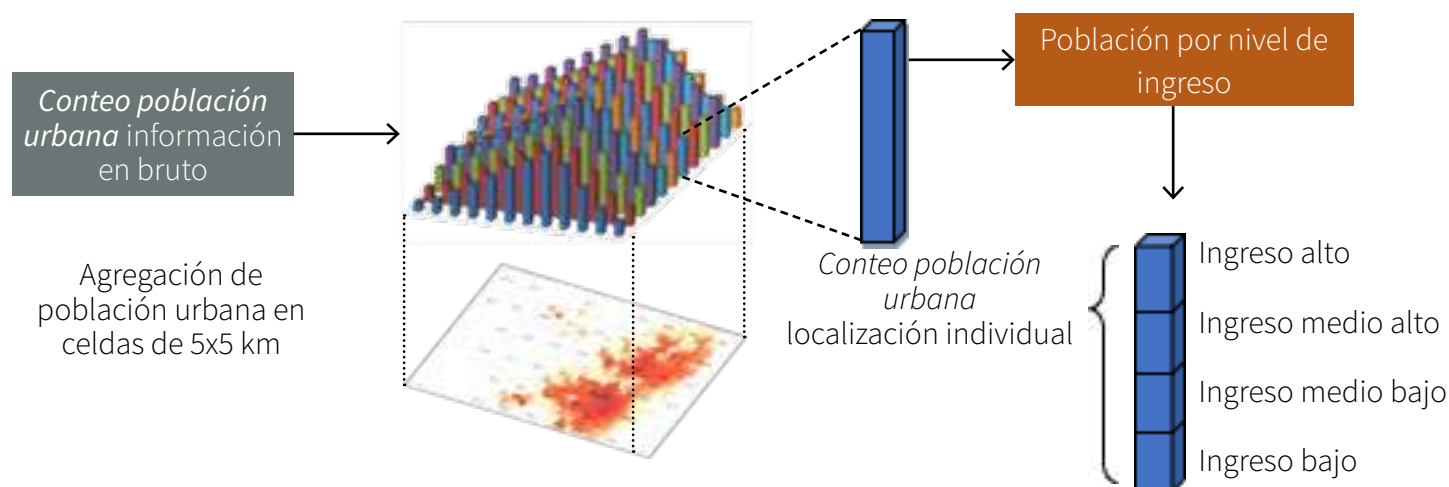


Figura A1-8. Proceso de distribución de población por nivel de ingreso

5. Estimación de población por ocupación

Con el objetivo de estimar los activos dedicados a actividades no residenciales es necesario estimar la fuerza laboral por

sector. Con base en indicadores nacionales de empleo en los sectores de servicios e industria es posible estimar el **número de empleados** en cada uno usando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} & \text{empleados } (\% \text{empl.sector}, \text{pop.area urbana}_j) \\ & = \text{empleo} \\ & * \% \text{empl.sector}_i (\text{pop.area urbana}_j / 1000) \\ & [\text{empleados} \times 10^3] \end{aligned}$$

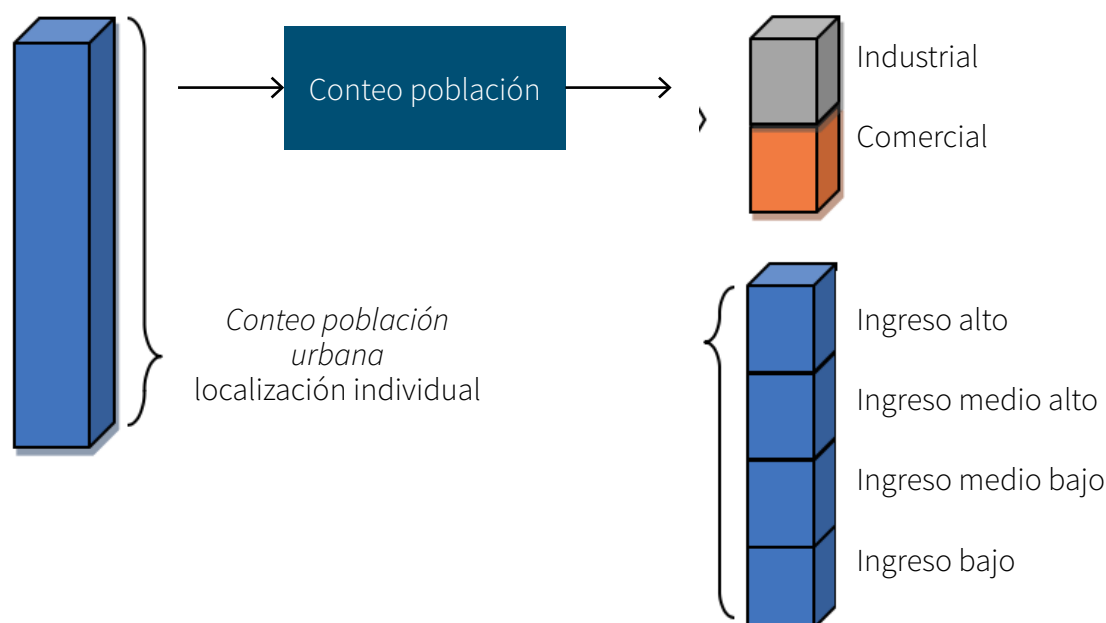


Figura A1-9. Estimación empleados por sector

6. Estimación empleados del gobierno

Con el objetivo de estimar los activos

dedicados a actividades de administración gubernamental, es necesario estimar el **número de empleados** a partir indicadores

de empleo del gobierno siguiendo la misma ecuación anterior con el indicador adecuado.

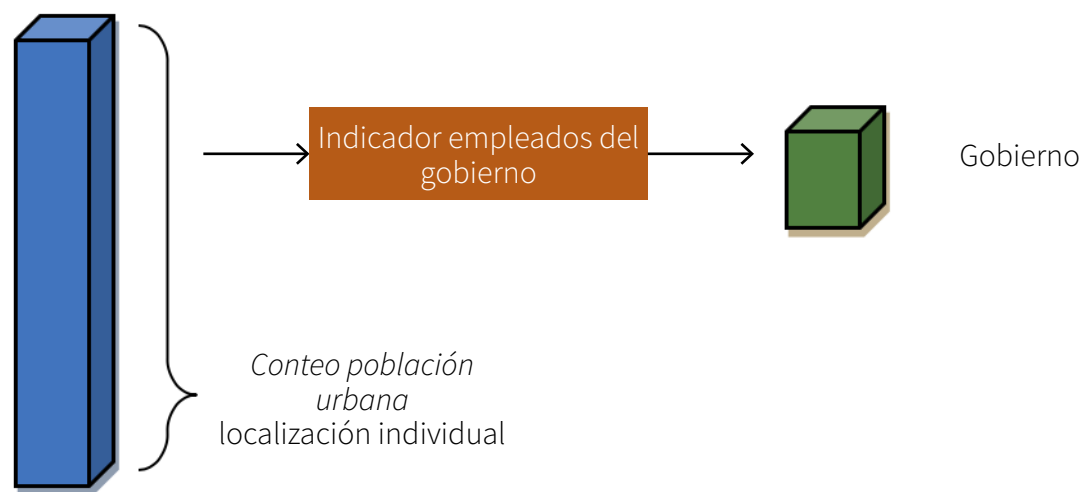


Figura A1-10. Estimación de empleados del gobierno

7. Estimación de capacidad instalada de servicios de salud

Para estimar la capacidad de servicios de salud por tipo de administración (pública/privada) se realiza una estimación del **número de camas hospitalarias/capacidad de atender personas** basado en indicadores

nacionales de camas por cada 1000 habitantes, con este indicador además de indicadores de gastos en salud según la fuente (Gasto público/privado en salud) se estiman el número de camas hospitalarias/capacidad de atender personas según tipo de administración de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$camas_{tipo\ admin} (camas, fuente\ gasto\ salud_i) = camas \cdot \left(\frac{fuente\ gasto\ salud_i}{gasto\ total\ salud.} \right) [camas/1000Hab]$$

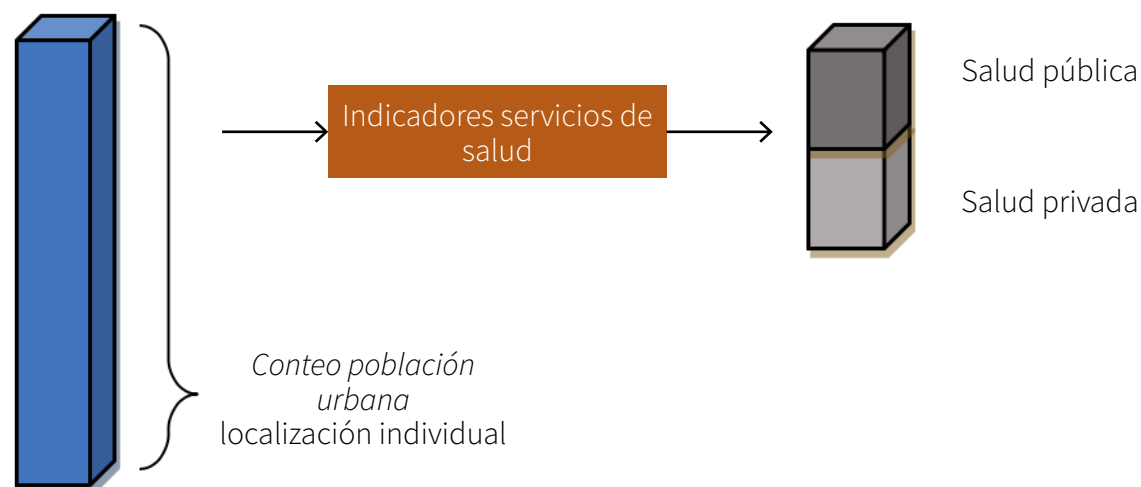


Figura A1-11. Proceso de estimación de capacidad instalada en salud

8. Estimación de capacidad instalada en servicios de educación	educativos por tipo de administración.	$*(1-((asistencia\ priv.)/100)) \quad [estudiantes]$
Con el objetivo de estimar la capacidad instalada en servicios de educación, se realiza la estimación del número de estudiantes por tipo de administración (pública/privada) en base a indicadores nacionales del número de estudiantes por nivel educativo y la asistencia a centro	$estudiantes\ privados$ $=est.secundaria*((asistencia\ priv.)/100)+ est. primaria$ $*((asistencia\ priv.)/100) \quad [estudiantes]$	Con los indicadores anteriores es posible estimar el número de estudiantes por tipo de administración en cada una de las localizaciones con la siguiente ecuación:
	$estudiantes\ publicos$ $=est.secundaria*(1-((asistencia\ priv.)/100))+ est.primaria$	$estudiantes\ (estudiantes_i, pop\ area\ urbana_i)$ $=((pop\ area\ urbana_i)/(total\ area\ urbana))$ $*(estudiantes/1000) \quad [estudiantes \times 10^3]$

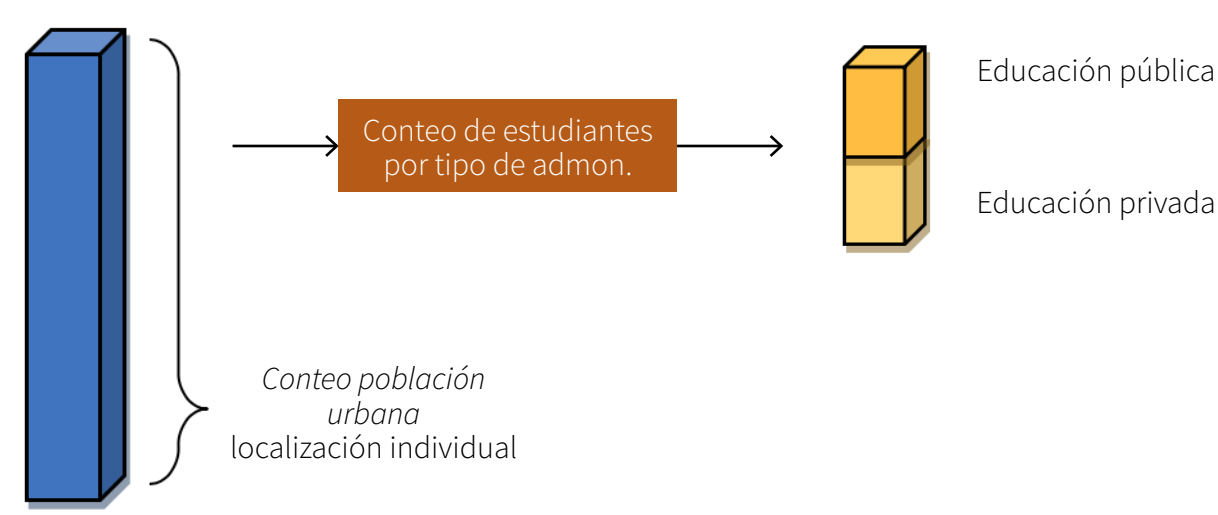


Figura A1-12. Proceso de estimación de capacidad instalada en educación

9. Redistribución de población por sistema estructural y nivel de ingreso/sector	por WAPMERR en usos residenciales/ no residenciales también por nivel de complejidad, esta se realiza respecto de las razones calculadas con base en la información contenida en el catálogo de distribución de sistemas estructurales por usos residenciales/no residenciales (Jaiswal et al., 2010)	estructurales haya. Así, ahora cada registro corresponderá a un sistema estructural de un nivel de ingreso/sector específico en una localización de 5x5 km de un área urbana de nivel de complejidad asociado. Lo anterior resulta en una base de datos que se mueve de una distribución de población pura a una distribución de tipo de activos (población en sistemas estructurales) según la siguiente ecuación:
Una vez estimado el censo de población en usos residenciales y no residenciales es necesario redistribuir dicha población en diferentes sistemas estructurales presentes en el país. Para este propósito se hizo uso de la información provista por el grupo WAPMERR (utilizada para el Atlas Global GAR 2017, de la UNISDR), que contiene la información de distribución de población por nivel de complejidad y sistema estructural.	Con la información recopilada y calculada anteriormente es posible redistribuir la población en los diferentes sistemas estructurales. Se debe prestar atención en el formato de la nueva información generada, pues en la nueva información en bruto no sólo habrá un registro por localización (paso 1 a 7) sino tantos registros por localización como la combinación de sectores y sistemas	$población(\%pop\ sist.estruc._i, pop.sector_j)=$ $pop.sector_j * \%pop\ sist.estruc._i$ $[población]$
También fue necesario realizar también una redistribución de la información provista		

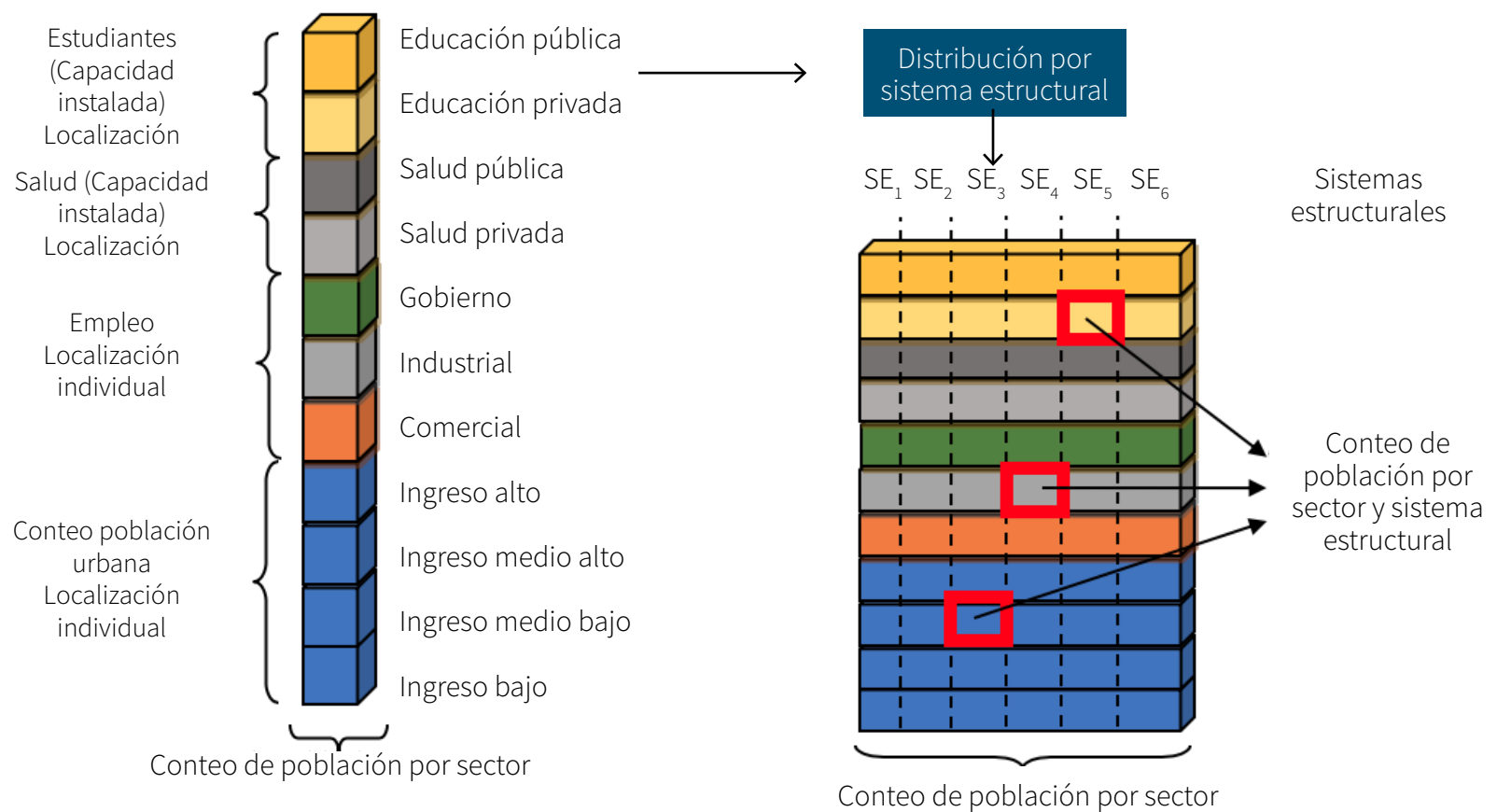


Figura A1-13.Proceso de distribución por sistema estructural

10. Ponderación del valor expuesto aproximado basado en valores/áreas unitarias

Una vez estimado el número de personas/ocupantes en cada uno de los usos/sectores, el área construida es ponderada respecto de valores unitarios por habitante, y así mismo en lo relativo al valor del metro cuadrado de construcción con el objetivo de realizar una distribución del stock de capital.

Con los valores unitarios de ponderación anteriores, se estima el peso de cada elemento expuesto en el **valor total expuesto del país** como se indica en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} & proxy\ area\ construida_{abcd} (nivel\ de \\ & desarrollo_o, nivel\ complejidad_b, sector_o, SE_d) \\ & = poblacion_{bcd} * val.unit.area\ construida_{abc} \\ & [factor\ area\ construida\ por\ nivel\ de \\ & complejidad, sector\ y\ sistema\ estructural] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & proxy\ area\ construida_{abcd} (nivel\ de \\ & desarrollo_o, nivel\ complejidad_b, sector_o, SE_d) \\ & = proxy\ area\ construida_{abcd} * val.unit.costo_{abc} \\ & [factor\ valor\ expuesto\ por\ nivel\ de \\ & complejidad, sector\ y\ sistema\ estructural] \end{aligned}$$

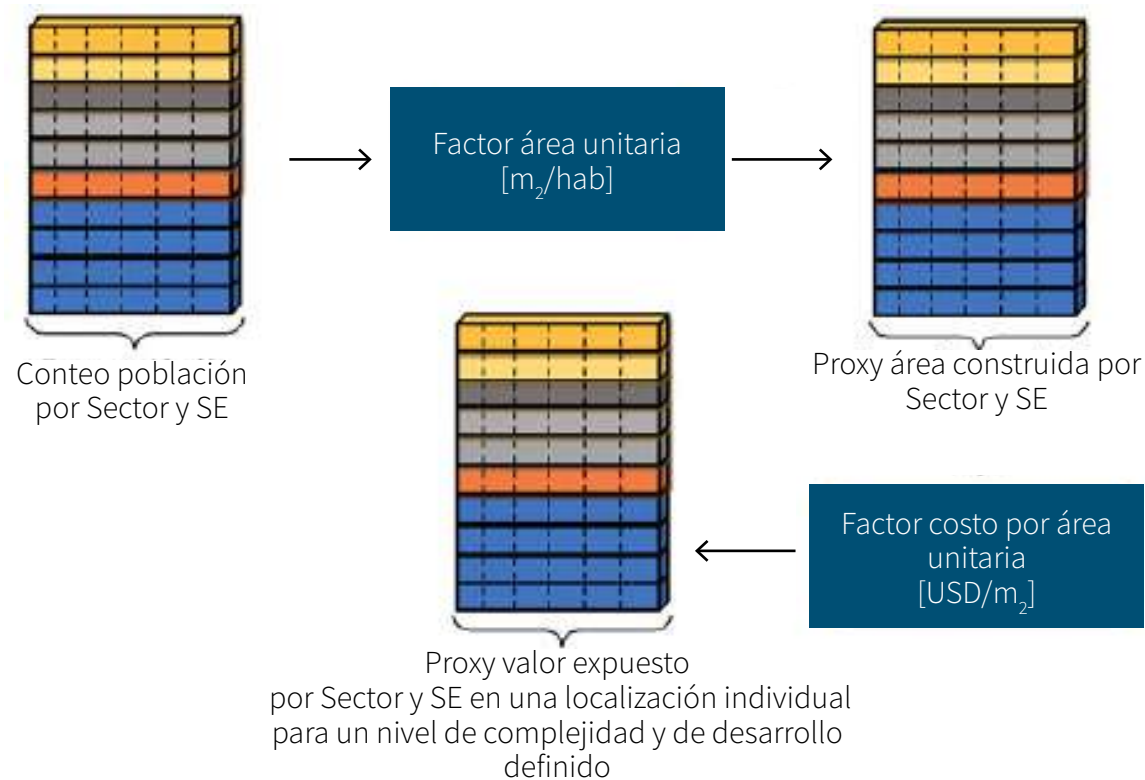


Figura A1-14. Proceso de estimación de valores proxy

11. Distribución del stock de capital basado en población por sistema estructural y nivel de ingreso/sector

Todos los pasos anteriores fueron realizados con el ánimo de obtener un indicador (proxy del valor expuesto) basado en población para distribuir en stock de capital. El valor del stock de capital se distribuye a nivel subnacional de acuerdo con la cobertura del producto interno bruto (PIB), multiplicando

el valor normalizado del **proxy valor expuesto** calculado en el paso anterior. El valor expuesto se estimó con la siguiente ecuación:

$$VALFIS(stock\ de\ capital_{lat,long}, proxy\ valor\ expuesto_i) = stock\ de\ capital_{lat,long} * (proxy\ valor\ expuesto_i / (proxy\ exposed\ value\ nacional))$$

[valor expuesto, por área urbana, sector y

sistema estructural]

Cada registro (valor expuesto) representa cierto **sistema estructural** de un **nivel de ingreso/sector** en un **área urbana** con una representación particular en el centroide del grupo de celdas respectivo de 5x5 km.

AI.1.2. Modelación de las amenazas

AI.1.2.1 MODELACIÓN DE AMENAZA SÍSMICA

El peligro que induce la actividad sísmica sobre regiones aledañas a poblaciones o asentamientos humanos ha derivado en la necesidad de establecer parámetros que definan el nivel de la amenaza y metodologías generales que permitan estimar dichos parámetros. Los parámetros que definen el nivel de peligro en un modelo de amenaza sísmica se conocen como *parámetros de movimiento fuerte*. Estos parámetros definen la intensidad del movimiento en el sitio de análisis. Su estimación se hace por medio de ecuaciones conocidas como *funciones de atenuación*, las cuales dependen principalmente de la distancia de la fuente sismogénica al sitio, la magnitud sísmica, y el tipo de mecanismo focal de ruptura.

Parámetros de movimiento fuerte

Los parámetros de movimiento fuerte permiten definir la amenaza en un área en

particular, por lo cual se constituyen en el objetivo primordial de los estudios y análisis de amenaza sísmica. El movimiento del terreno se caracteriza por tener variables representativas tanto en amplitud, como frecuencia y duración. Algunos parámetros logran caracterizar el movimiento en uno de estos componentes, mientras otros pueden caracterizar los tres. Dada la complejidad asociada al tránsito de las ondas sísmicas por la corteza terrestre, resulta imposible reproducir perfectamente el movimiento del terreno en un sitio determinado, por muy completo que sea el modelo que se adopte. De acuerdo con esto, la elección del modelo de estimación del movimiento fuerte debe hacerse de acuerdo con los alcances del estudio que se realice.

Uno de los principales componentes en un análisis de amenaza sísmica es el estudio de las funciones de atenuación de los parámetros de intensidad que caracterizan el movimiento. La mayor parte de la energía de un sismo se libera en forma de ondas de esfuerzo, que se desplazan por la corteza

de la tierra. Dado que la magnitud está relacionada con la energía liberada en el foco del sismo, la intensidad de dichas ondas se encuentra relacionada con la magnitud. Los efectos de la magnitud son principalmente: el aumento en la amplitud de la intensidad, la variación en el contenido frecuencial y el aumento en la duración de la vibración.

En la medida que las ondas se desplazan por el medio rocoso, son absorbidas parcial y progresivamente por los materiales por los que transitan. Como resultado, la energía por unidad de volumen varía en función de la distancia. Dado que la intensidad está relacionada con la energía de las ondas, se encuentra también relacionada con la distancia. Muchas funciones de atenuación relacionan la intensidad en términos de algún parámetro de movimiento fuerte, con una de las distancias presentadas en la *Figura A1-15*, las cuales caracterizan de diferente manera el origen del movimiento vibratorio.

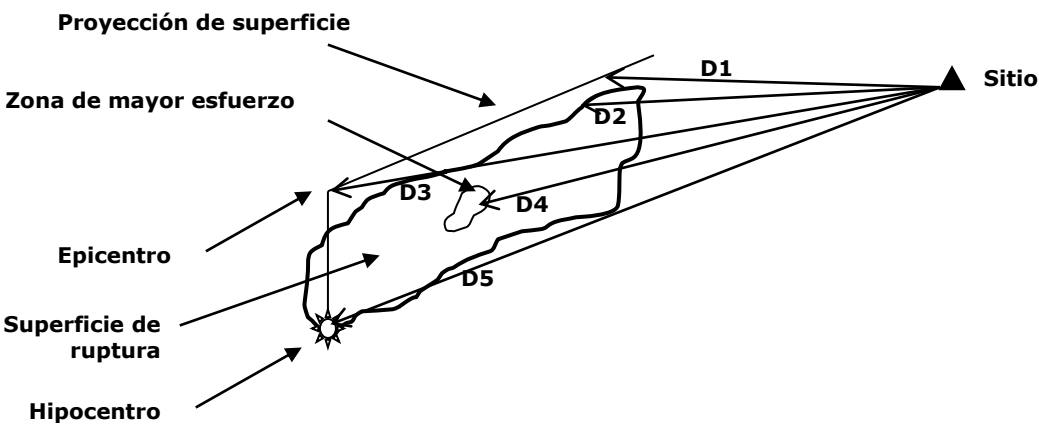


Figura A1-15. Ejemplo de varias medidas de distancia usadas en funciones de atenuación. (Kramer, 1996)

La distancia D1 representa la distancia del sitio a la proyección en superficie del plano de falla. D2 es la distancia a la superficie de falla. D3 es la distancia epicentral. D4 corresponde a la distancia hasta la zona en la superficie de falla que liberó una mayor cantidad de energía, la cual no necesariamente corresponde con el hipocentro. Y por último D5 es la *distancia hipocentral*.

La aceleración máxima (PGA) es el parámetro más empleado en los estudios de amenaza sísmica para representar el movimiento del terreno, por lo cual se han propuesto diversos modelos de atenuación de este parámetro con la distancia y las propiedades del medio transmisor. A

medida que se cuenta con mayor cantidad de registros de sismos, es posible refinar las funciones de atenuación, lo que deriva en una frecuente publicación de correlaciones nuevas y más refinadas. El nivel de refinamiento aumenta a medida que se desarrollan métodos de procesamiento más avanzados. Un sinnúmero de funciones de atenuación de aceleración máxima han sido desarrolladas a nivel mundial en las últimas 4 décadas, dada la alta relevancia de este insumo dentro de los análisis de amenaza sísmica.

Dada la importancia que ha tenido el espectro de respuesta dentro de la práctica de la ingeniería sísmica, se han desarrollado relaciones de atenuación para obtener las

ordenadas del espectro de manera directa. Esto puede realizarse a partir de regresiones sobre espectros calculados a registros acelerográficos de zonas con buena instrumentación sísmica.

Alternativamente, se puede calibrar un modelo teórico de las características físicas de una fuente, medio de tránsito de ondas, y comportamiento de la respuesta en el sitio, para predecir la forma del espectro de amplitudes de Fourier (EAF). A partir de la solución del rompimiento instantáneo sobre una superficie esférica en un medio perfectamente elástico, es posible estimar las amplitudes del espectro de Fourier.

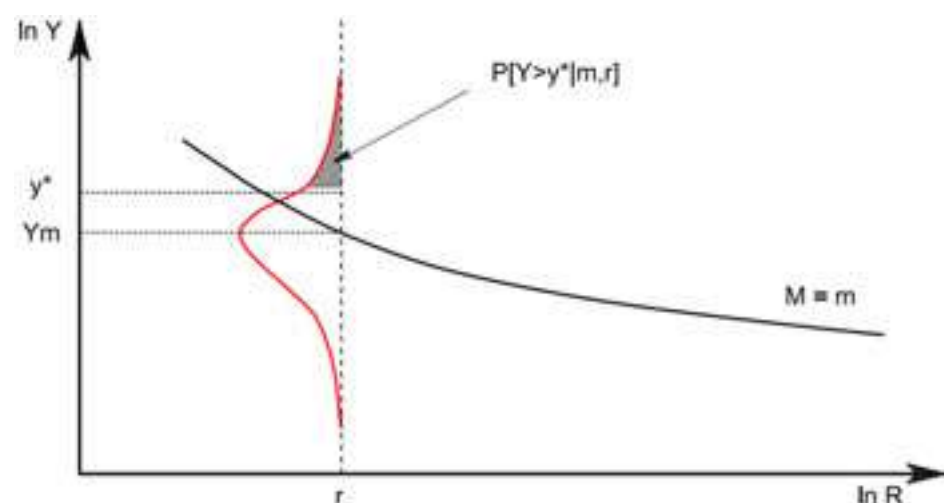


Figura A1-16. Esquema de una función de atenuación típica y sus componentes, incluyendo la distribución de probabilidad de la intensidad (Y) pronosticada.

EVALUACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA SÍSMICA

La evaluación probabilista de la amenaza sísmica se basa en la ecuación propuesta por Esteva (1970) para el cálculo de tasas de excedencia de medidas de intensidad de movimiento sísmico, como función de las características de generación de los terremotos y la atenuación de las ondas sísmicas a su paso por la corteza terrestre, la cual a su vez es una aplicación del teorema

de la probabilidad total. Por lo tanto, la tasa de excedencia de alguna medida de intensidad asociada a la ocurrencia de un evento de amenaza, en un punto particular del territorio de análisis, se puede calcular como la suma ponderada de la probabilidad de excedencia del nivel de intensidad para el cual se está calculando, para todos los escenarios que definen la amenaza, usando como factores de ponderación las frecuencias anuales de ocurrencia de los terremotos.

Por lo tanto, para calcular las tasas de excedencia de valores de intensidad es necesario construir un conjunto de escenarios estocásticos, mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos, cada uno con una distribución geográfica de momentos de probabilidad que caractericen las medidas de intensidad de movimiento fuerte. Desde hace más de 30 años se ha desarrollado una metodología robusta de evaluación probabilista de la amenaza sísmica, mediante la cual es posible involucrar de manera analítica la

incertidumbre asociada a variables como la tasa de ocurrencia de terremotos en una región, la magnitud y ubicación de los sismos y la atenuación de la energía del movimiento fuerte. La metodología de evaluación probabilista de la amenaza sísmica fue establecida inicialmente por Cornell (1968) y Esteva (1970), y puede resumirse en cuatro pasos principales, según lo establece Reiter (1990):

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

Caracterización de las fuentes sísmicas

La caracterización de las fuentes generadoras de terremotos puede hacerse mediante diferentes geometrías. Es usual modelar las fuentes como planos en el espacio, dado que esta geometría se ajusta

muy bien a las características generales de las zonas de deformación y rompimiento de la corteza terrestre. Es usual también asignar una probabilidad uniforme a la ocurrencia de los terremotos dentro de la geometría de las fuentes. Dado que esta suposición implica que toda la energía del terremoto es irradiada desde el hipocentro, Der-Kiureghian y Ang (1977) plantearon una manera de considerar el tamaño de la superficie de ruptura dentro de análisis de amenaza. Relaciones entre la magnitud sísmica y el tamaño de la zona de ruptura, considerando fuentes planas pueden encontrarse en Brune (1970), Singh et al. (1982) o Wells y Coppersmith (1994).

Parámetros de sismicidad de fuentes sismogénicas

Es común considerar que el proceso de generación de terremotos en una fuente sigue un proceso de Poisson, es decir, se considera que el número de ocurrencias en una ventana de tiempo dada es independiente del número de ocurrencias en cualquier otra ventana de tiempo, o en otras palabras, que el proceso no tiene memoria. Esta manera de ver la recurrencia de magnitudes permite establecer tanto la distribución de probabilidad de la ocurrencia de terremotos de diferente magnitud, como la distribución de probabilidad del tiempo entre la ocurrencia de dos terremotos consecutivos.

En el modelo poissoniano, la actividad de la i -ésima fuente sísmica se especifica en términos de la tasa de excedencia de las magnitudes, $\lambda(M)$, generadas por esta fuente. La tasa de excedencia de magnitudes mide qué tan frecuentemente se generan temblores con magnitud superior a una específica. Para la mayor parte de las fuentes sísmicas, la función $\lambda(M)$ es una versión modificada de la relación de Gutenberg y

Richter. En estos casos, la sismicidad queda descrita como,

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \quad (1)$$

en donde M_0 es la mínima magnitud o magnitud umbral. λ_0 , β , y M_u son parámetros que definen la tasa de excedencia de cada una de las fuentes sísmicas. Estos parámetros, diferentes para cada fuente, se estiman mediante procedimientos estadísticos de máxima verosimilitud e información experta. De esta manera, cada una de las fuentes sismogénicas queda caracterizada mediante los siguientes parámetros de sismicidad:

- Recurrencia de magnitudes: se identifica mediante el parámetro β que representa la pendiente promedio de la curva de recurrencia de magnitudes (curva de número de eventos con magnitud mayor que M , versus magnitud sísmica M) en la zona de magnitudes bajas.
- Magnitud máxima, M_u : se estima con base en la máxima longitud de ruptura posible de cada una de las fuentes y en otras características morfológicas.
- Tasa de recurrencia de sismos con magnitud mayor que la de umbral, λ_0 : corresponde al número promedio de eventos por año de sismos con magnitud mayor que M_0 que ocurren en una determinada fuente.

Atenuación de las intensidades de movimiento fuerte

Una vez determinada la tasa de actividad de cada una de las fuentes sísmicas, es necesario evaluar los efectos que, en términos de intensidad sísmica, produce cada una de ellas en un sitio de interés. Para ello se requiere saber qué intensidad se presentaría en el sitio en cuestión, hasta

ahora supuesto en terreno firme, si en la i -ésima fuente ocurriera un temblor con magnitud dada.

La intensidad de movimiento fuerte, s , se modela como una variable aleatoria con el fin de incorporar de manera racional la incertidumbre asociada a su estimación. En la práctica común de la ingeniería sísmica, el interés se centra en la estimación de parámetros de movimiento de amplitud máxima (PGA, PGV y PGD), así como ordenadas del espectro de respuesta. Es usual representar estos parámetros de movimiento fuerte como variables aleatorias distribuidas lognormal, con momentos de probabilidad dados por la función de atenuación.

Por otra parte, desde hace más de 30 años la sismología moderna ha estudiado el problema de propagación de las ondas sísmicas por la corteza terrestre, y ha derivado expresiones matemáticas que permiten caracterizar la forma del espectro

de amplitudes de Fourier del movimiento fuerte para una magnitud y una distancia conocidas. Estos modelos se conocen como modelos de espectro de fuente (Aki, 1967; Brune, 1970). Estos modelos están basados en formulaciones sismológicas clásicas, las cuales permiten definir la forma matemática de los desplazamientos de las fuentes cuando ocurre un sismo, así como el contenido frecuencial del movimiento fuerte, para diferentes mecanismos de dislocación.

En décadas pasadas varios autores han usado modelos de espectro de fuente para derivar funciones de atenuación (Ordaz y Singh, 1992; Atkinson 1995; Gallego 1999; Tavaloki y Pezeshk, 2005; Zafarani y Soghrat, 2012; Bernal 2014).

CÁLCULO DE LA AMENAZA SÍSMICA

Una vez conocidas la sismicidad de las fuentes y los patrones de atenuación de las ondas generadas en cada una de

ellas, puede calcularse la amenaza sísmica considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio de interés (donde se encuentra el elemento expuesto). La amenaza, expresada en términos de las tasas de excedencia de intensidades s , se calcula como:

$$\lambda(s) = \sum_{i=1}^N \int_{M_0}^{M_u} \frac{\partial \lambda_i(M)}{\partial M} Pr(S > s | M, R_i) dM \quad (2)$$

En donde la sumatoria abarca la totalidad de las fuentes sísmicas N , y $Pr(S > s | M, R_i)$ es la probabilidad de que la intensidad exceda un cierto valor, dadas la magnitud del sismo M , y la distancia entre la i -ésima fuente y el sitio R_i . Las funciones $\lambda_i(M)$ son las tasas de actividad de las fuentes sísmicas. La integral se realiza desde M_0 hasta M_u , lo que indica que se toma en cuenta, para cada fuente sísmica, la contribución de todas las magnitudes.

AI.1.2.2 MODELACIÓN DE AMENAZA POR TSUNAMI

Las ondas gravitacionales generadas en el océano cuando un fenómeno detonante desplaza verticalmente una gran masa de agua es lo que se le conoce como tsunami. Este tipo de ondas puede viajar por miles de kilómetros e impactar las costas de varios continentes. Existen diferentes tipos de tsunami los cuales se diferencian principalmente en el mecanismo detonante que los genera.

MODELACIÓN DE LA AMENAZA

Es posible identificar tres procesos principales que participan en la amenaza de tsunami: *i)* generación, *ii)* propagación, y *iii)* arribo. La *generación* tiene que ver con las condiciones en las cuales se induce el movimiento vertical de la masa de agua oceánica, generando ondas gravitacionales. La propagación tiene que ver con la manera como dichas ondas se propagan por el océano hasta alcanzar las costas. Y el *arribo* involucra la amplificación de las amplitudes de onda de tsunami por efecto de la disminución de la batimetría.

Si bien los procesos de generación y propagación son de gran importancia como condiciones iniciales para la modelación del arribo de las ondas, su estudio no es el objetivo de esta evaluación dado que para el análisis del riesgo de desastre son relevantes únicamente las condiciones de arribo e impacto. Por esta razón se utiliza la formulación asintótica del modelo de generación y propagación de Dutykh y Dias (2007), y el modelo acoplado de arribo propuesto por Madsen y Fuhrman (2009).

Modelo de generación

En la modelación del mecanismo de

generación de tsunamis tectónicos se deben involucrar dos aspectos relevantes. Estos son: *i)* el acoplamiento entre el medio sólido elástico que representa la corteza terrestre y el medio líquido que representa el océano y *ii)* la relación entre los desplazamientos verticales en la superficie del océano y el lecho marino.

El problema de generación está asociado con el comportamiento del sistema agua-lecho, y la manera como las ondas sísmicas influyen en las ondas hidrodinámicas que se generan. Es posible aproximar este problema por medio de dos planteamientos diferentes:

- Sistema acoplado: Un sistema agua-lecho acoplado significa que las ondas sísmicas que viajan por la corteza influyen en el comportamiento de la masa de agua. Se trata de un sistema refinado en el cual deben tenerse en cuenta las variaciones en la forma del lecho marino dentro del análisis de propagación del tsunami.
- Sistema desacoplado: El sistema desacoplado indica que no existe una relación directa entre la deformación del lecho y el movimiento de la masa de agua. En otras palabras, las deformaciones elásticas de la corteza por efecto del paso de las ondas sísmicas se consideran despreciables. En caso de que el desplazamiento cosísmico del lecho marino sea de dimensiones apreciables, es común suponer un lecho rígido de geometría igual a la máxima deformación elástica inducida por el sismo.

Modelo de propagación

En el estudio de la propagación de las ondas de tsunami por el océano se aplica

generalmente la teoría de ondas en aguas poco profundas. A este tipo de ondas se les conoce también como gravitacionales, dado que la gravedad es la que controla el mecanismo de restauración del medio. Cuando transitan ondas gravitacionales por un medio para el cual la longitud de onda, λ , es mucho mayor que su profundidad ($\lambda \gg d$), la aceleración vertical resultante es despreciable en comparación con la gravedad. Esto implica que el movimiento de la masa de agua, en dirección horizontal, es prácticamente constante desde el fondo hasta la superficie. Esta es la característica primordial de las ondas largas u ondas en aguas poco profundas (*shallow-water waves*). Para el caso del tsunami, la profundidad de los océanos se encuentra típicamente alrededor de los 5 km, mientras que la longitud del frente de ondas puede ser de varios cientos de kilómetros, razón por la cual la aproximación de onda larga es suficientemente válida para caracterizar el tránsito de la energía del tsunami en mar abierto.

El desarrollo matemático de la teoría de ondas en aguas poco profundas se basa en la formulación de Stokes, la cual describe el movimiento unidimensional de un fluido no viscoso, sujeto a fuerza gravitacional constante, y limitado por un fondo rígido y una superficie libre. A pesar de ser conocidas desde hace más de 150 años, las ecuaciones asociadas a la formulación de Stokes no tienen aún una solución establecida para el caso general. Por este motivo se han desarrollado formulaciones específicas para ser aplicadas en diferentes casos en los cuales algunas suposiciones pueden simplificar el problema. Para el caso del tsunami se requiere solucionar la formulación de Stokes únicamente para el caso de ondas largas con amplitudes bajas en la superficie libre, propagándose en una dirección, en un medio incompresible y de

profundidad somera y constante.

Al suponer que el comportamiento hidrodinámico de los tsunamis se basa en la teoría de ondas largas, es posible emplear la teoría geométrica de propagación óptica de rayos para determinar aproximadamente el tiempo que le toma al frente de ondas arribar a un destino específico. Esta información es

crucial para el funcionamiento correcto de los sistemas de alerta, de manera que sean capaces de predecir el tiempo de llegada de las ondas, y permitan la ejecución de los protocolos de evacuación y respuesta a la emergencia. Con los mapas de refracción de ondas, se presentan los contornos de igual tiempo de arribo. En el cálculo de

estos mapas se considera únicamente la condición de refracción de ondas, despreciando el efecto de reflexión, dado que no se trata de un mapa de amplitudes o amplificaciones de onda. La *Figura A1-17* presenta un mapa de refracción de ondas para el tsunami de Indonesia del 26 de diciembre de 2004.

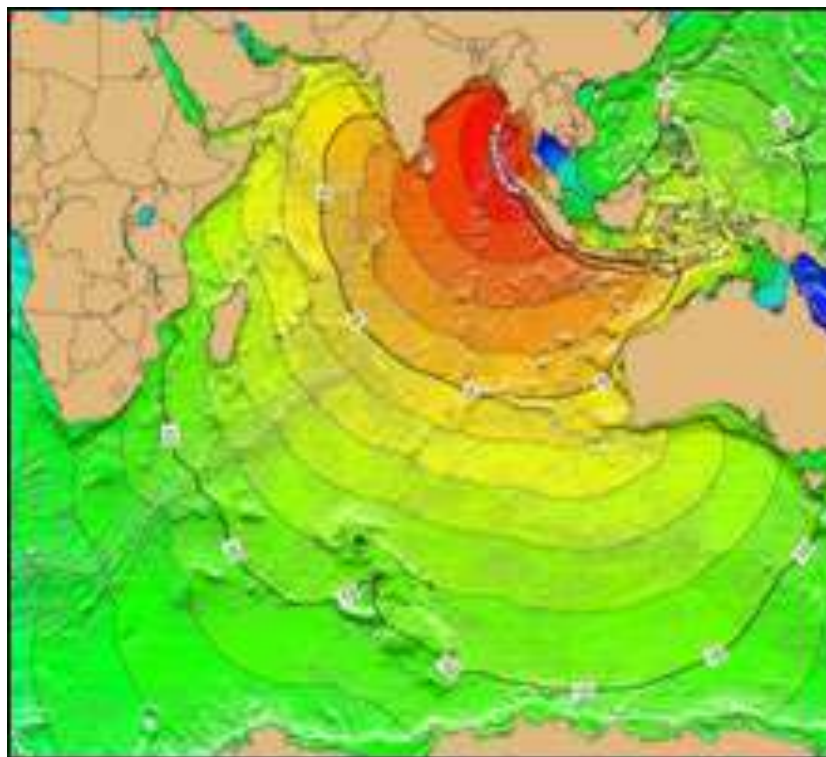


Figura A1-17. Diagrama de refracción de ondas, con contornos de tiempo de arribo. Tsunami de Indonesia, 26 de diciembre de 2004. (Fuente: NOAA)

Modelo de arribo

En mar abierto la amplitud de las ondas de tsunami es baja y prácticamente imperceptible. Sin embargo, al acercarse a la costa la amplitud aumenta significativamente hasta romper en forma de una ola destructiva. Esta amplificación se debe a la disminución de la profundidad del agua en las zonas costeras.

En mar abierto, las ondas gravitacionales viajan a una velocidad igual a $\sqrt{gh}$, en donde h es la profundidad del lecho marino y g la aceleración de la gravedad. Como se trata de ondas largas, es decir, que

tienen longitudes de onda muy grandes en comparación a la profundidad del medio de tránsito, la velocidad de avance se mantiene prácticamente constante. A medida que la profundidad del lecho marino empieza a disminuir, también disminuye la velocidad del frente de onda. Sin embargo, la parte posterior de la onda se encuentra una longitud de onda mar adentro con relación al frente de onda, por lo cual su velocidad sigue siendo controlada por la profundidad del lecho marino en ese punto. En consecuencia, la longitud de onda empieza a recortarse, es decir, que la onda se comprime horizontalmente para compensar el cambio de velocidad. Debido a la muy

baja compresibilidad del agua, la amplitud de la superficie del mar aumenta en el frente de onda por efecto de la compresión, lo cual genera olas de gran tamaño que rompen contra las zonas costeras.

En la actualidad existen modelos analíticos para la solución del arribo de las ondas de tsunami a la costa. Algunos de estos modelos han sido ampliamente usados para determinar alturas de ola por efecto de la ocurrencia de tsunamis. Estas formulaciones se basan en las siguientes suposiciones:

- Los efectos del rompimiento de olas en la costa son despreciables.

- Los efectos de la disipación de energía en el fondo son despreciables.
- Se asume reflexión total de las ondas en la línea de costa. Esto quiere decir que se considera que la línea de costa no se modifica en ningún momento.
- Se consideran ondas gravitacionales periódicas, es decir, que se ignora la naturaleza transiente de los tsunamis.
- Se asume que la pendiente batimétrica es constante.

Según Madsen y Fuhrman (2009), la altura de la ola en la línea de costa se puede determinar de la siguiente manera:

$$\frac{R}{a_0} = 2\sqrt{\pi} \left(\frac{h_0 \omega^2}{g s^2} \right)^{0.25} \quad (3)$$

en donde R es la amplitud de la ola en la línea de costa, a_0 es la amplitud en la superficie libre mar adentro, h_0 es la profundidad del lecho marino mar adentro, ω es la frecuencia angular de la onda

gravitacional de tsunami y s es la pendiente batimétrica promedio, entendida como la distancia horizontal sobre la vertical. Esta definición implica que valores bajos de s corresponden a pendientes altas y valores altos de s corresponden a pendientes bajas. Dado que la amplitud final de las ondas depende de la pendiente batimétrica promedio y de la longitud de la onda gravitacional y su amplitud en mar abierto, Iribarren y Nogales (1964) definieron un parámetro adimensional que describe la alteración que sufren las ondas por los procesos que ocurren cerca a la costa. Este parámetro se conoce como el *número de Iribarren o parámetro de surf*, y está definido como:

$$\xi = \frac{s}{\sqrt{\frac{a_0}{L_\infty}}} \quad (4)$$

en donde L_∞ es la longitud de onda en mar abierto. Madsen y Fuhrman (2009) obtuvieron formulaciones analíticas para el cálculo de la amplitud de la onda y su velocidad en la línea de costa, en función

del número de Iribarren:

$$\frac{R}{a_0} = 2\pi^{3/4} \left(\frac{a_0}{h_0} \right)^{-1/4} \xi^{-1/2} \quad (5)$$

$$\frac{U_m}{\sqrt{g a_0}} = \frac{\sqrt{\pi}}{\xi} \left(\frac{R}{a_0} \right) \quad (6)$$

Para valores bajos de s , las ecuaciones anteriores tienen a infinito. Esto quiere decir que cuando la batimetría es extremadamente pendiente la solución no lineal deja de ser válida, básicamente debido a que la amplitud de las olas no puede crecer indefinidamente. Esta característica fue definida por Carrier y Greenspan (1958) como el criterio de rompimiento. Madsen y Fuhrman (2009) escribieron el *criterio de rompimiento* en función del número de Iribarren como:

$$\frac{R}{a_0} \leq \frac{R_{max}}{a_0} = \frac{1}{\pi} \xi^2 \quad (7)$$

donde R_{max} corresponde a la máxima amplitud que pueden alcanzar las olas para las características implícitas en ξ .

AI.1.2.3 MODELACIÓN DE AMENAZA POR CICLONES TROPICALES

La simulación de ciclones tropicales es un enfoque ampliamente aceptado para la evaluación de esta amenaza. Los usos principales de la simulación de ciclones son la estimación de las intensidades del viento y marea de tormenta para el diseño de edificaciones e infraestructura y la estimación de pérdidas para establecer primas de seguros (Vickery et al., 2009).

Una evaluación basada en eventos se utiliza para crear un conjunto de ciclones estocásticos que, a su vez, se usa para la evaluación de pérdidas. La amenaza asociada con ciclones tropicales se define por medio de su frecuencia anual de ocurrencia y su severidad, caracterizando esta última a través de un parámetro de intensidad calculado en cada ubicación geográfica específica. La intensidad seleccionada para vientos fuertes es la velocidad para ráfagas de 3 segundos a 10 metros de la superficie (v_{10}). Para la marea de tormenta, la intensidad es la altura de subida del agua en la costa (η). La evaluación de la amenaza está basada en la frecuencia histórica de ocurrencia de ciclones tropicales y sus diferentes grados de intensidad. Una vez definidos los parámetros que caracterizan la ocurrencia de ciclones tropicales, desde el punto de vista físico, es necesario generar un conjunto de eventos estocásticos a través de la simulación de una serie de eventos aleatorios. El conjunto de eventos aleatorios incluye todas las formas

posibles en las que la amenaza relacionada con ciclones tropicales podría manifestarse en las regiones de análisis en términos de frecuencia y severidad.

Para cada evento se caracteriza la amenaza, en cualquier punto de un territorio dado, a través de la probabilidad de distribución de la intensidad (v_{10} , η), definida en términos de su valor esperado y su varianza. La amenaza viene entonces representada como un conjunto de eventos estocásticos con intensidades promedio y frecuencias de ocurrencia compatibles con la información histórica disponible.

Perturbación de las trayectorias de los ciclones

Para cada ciclón histórico, se genera un conjunto de cien trayectorias “hijas” siguiendo un proceso bidimensional de Wiener en el cual la trayectoria histórica es perturbada artificialmente para crear una nueva trayectoria hija. Este proceso de perturbación es presentado en la ecuación 8 para la coordenada de latitud (X) de los puntos de la trayectoria:

$$X(t_{k+1}) = X(t_k) + \Delta X_{k,k+1} + e \quad (8)$$

donde $X(t_k)$ es la coordenada de longitud de un punto de la trayectoria en el instante t_k , $X(t_{k+1})$ es la coordenada de longitud del siguiente punto de la trayectoria registrado en el instante t_{k+1} , $\Delta X_{k,k+1}$ es la longitud delta conocida entre el instante k y $k+1$, y e es una variable aleatoria que sigue una distribución normal con $\mu=0.0$ y $\sigma=0.5$. Un proceso equivalente debe realizarse

simultáneamente para la coordenada de latitud (Y). Después del proceso de perturbación, las características principales del ciclón se mantienen inalteradas, lo que significa que cada punto de trayectoria hija tendrá la misma presión central y velocidad de viento sostenida que el original.

La Figura A1-18 muestra el resultado del proceso de perturbación aplicado a la trayectoria del Huracán Sandy (2012). La línea roja muestra la trayectoria original de Sandy sobre las Bahamas, y las líneas azules son las 10 simulaciones obtenidas de Sandy para aplicar el proceso bidimensional de Wiener.

MODELACIÓN DE AMENAZA DE VIENTO

Tal como presentado por Vickery et al., (2009a), la modelación del campo de viento es un proceso de tres pasos: *i)* dadas las características del ciclón como presión central y el radio de vientos máximos (Rmv), se calcula la velocidad del viento a altura de gradiente. La altura de gradiente es la altitud en la cual la velocidad del viento no se ve afectada por las condiciones de la superficie. Esta se asume, usualmente, como equivalente a la velocidad media del viento, *ii)* de la velocidad del viento a altura de gradiente, se calcula la velocidad media de superficie, aplicando un modelo de capa límite atmosférica (CLA); y *iii)* la velocidad media de superficie es modificada por condiciones específicas del sitio, como amplificación topográfica y rugosidad de la superficie, y se ajusta a un tiempo promedio utilizando factores de ráfaga.



Figura A1-18. Proceso de perturbación de la trayectoria aplicado al huracán Sandy.

Campo de viento del gradiente

La velocidad del viento del gradiente (VG) se calcula utilizando la representación presentada por Holland (1980), en la cual VG es dada como

$$v_G = \left(\frac{RMW}{r} \right)^2 \cdot \frac{B \cdot \Delta P \cdot \exp\left(-\left(\frac{RMW}{r}\right)^2\right)}{\rho} + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{f \cdot r}{2} \quad (9)$$

donde r es la distancia de observación (eg. La distancia del sitio de cálculo al centro de la tormenta), B es el parámetro de Holland, ΔP es el gradiente de presión ($\Delta P = P_n - P_0$, donde P_n es la presión atmosférica nominal establecida a 100.5 KPa), ρ es la densidad del aire, y f es el parámetro de fuerza de Coriolis, definido como

$$f = 2\Omega \sin \phi \quad (9)$$

donde Ω es la velocidad de rotación angular de La Tierra, y ϕ es la latitud del ojo del

ciclón. El radio de vientos máximos (Rmv) se calcula como función de la presión central del ciclón P_0 ,

$$RMW = 0.4785 P_0 - 413.01 \quad (10)$$

Vickery y Wadhwa (2008) encontraron que es posible modelar el parámetro de Holland B como función de un parámetro no dimensional, A , definido como

$$B = 1.732 - 2.237 \sqrt{A} \quad (11)$$

$$A = \frac{RMW \cdot f}{\sqrt{2R_d T_s \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta P}{P_0 \cdot e}\right)}} \quad (12)$$

donde R_d es la constante de gas aire y es la temperatura de superficie del mar (dada en °K).

Velocidad del viento en superficie

La velocidad del viento a altura de gradiente (VG) es modificada para obtener la velocidad a nivel de superficies (10 metros sobre agua o tierra, v_{10}) utilizando un modelo de capa límite atmosférica. Vickery et al. (2009b) modelaron la variación de la velocidad media del viento, $u(z)$ con altura z , en la capa límite del ciclón como

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - 0.4 \left(\frac{z}{H^*}\right)^2 \right] \quad (13)$$

donde k el coeficiente de von-Karman ($k=0.4$), u_* es la velocidad de fricción, z_0 es la longitud de rugosidad aerodinámica, y H^* es la altura de la capa límite. Vickery et al., (2009b) modelaron H^* como

$$H^* = 343.7 + \frac{0.26}{I} \tag{14}$$

$$\tau = \rho \cdot C_d \cdot u^2 \tag{17}$$

donde *I* es la inestabilidad inercial, definida por Kepert (2001) como

$$I = \sqrt{\left(f + \frac{2V_G}{r}\right)\left(f + \frac{V_G}{r} + \frac{\partial V_G}{\partial r}\right)} \tag{15}$$

Cuando se usa este modelo, el término $\partial V_G/\partial r$ no es considerado. La velocidad de fricción, *u**, se define como

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \tag{16}$$

donde τ es es la tensión del viento en superficie, definida como

donde *Cd* es el coeficiente de arrastre, y *u* es la velocidad del viento en superficie.

Modificadores de sitio de la velocidad del viento

Las condiciones locales modifican el valor final de la velocidad del viento en cada ubicación geográfica. Dentro del modelo de viento, la rugosidad de superficie y el efecto topográfico son considerados como los principales modificadores de la velocidad del viento a nivel local.

Rugosidad de la superficie

La rugosidad de la superficie es directamente considerada en el cálculo de la velocidad del viento en superficie, utilizando parámetros *z0* (longitud de rugosidad aerodinámica) y *Cd* (coeficiente de arrastre). Estos parámetros dependen del tipo de terreno sobre el que se calcula la velocidad del viento. Para nuestro modelo, utilizamos el valor central de los rangos propuestos por la OMM (OMM, 2010), para ocho clases generales de terreno (ver Tabla).

CLASE DE TERRENO	DESCRIPCIÓN DEL TERRENO	LONGITUD DE RUGOSIDAD Z ₀ (M)	COEFICIENTE DE ARRASTRE DE LA SUPERFICIE C ₁₀
Mar	Condiciones de mar abierto para todas las velocidades del viento, llanura de marea, desiertos indiferenciados y asfalto.	0.0002-0.005	0.001-0.003
Liso	Terrenos indiferenciados con vegetación insignificante como playas amplias, cayos y arrecifes expuestos.	0.005-0.03	0.003-0.005
Abierto	Agua de zonas costeras para vientos >30m/s, terreno abierto y llano, hierba, algunos obstáculos aislados, alrededores de aeropuertos.	0.03-0.10	0.005-0.008
Abierto rugoso	Cultivos bajos, pocos árboles, grandes obstáculos ocasionales.	0.10-0.25	0.008-0.012
Rugoso	Ligeramente boscoso, cultivos altos, centros de pequeñas ciudades.	0.25-0.5	0.012-0.019
Muy rugoso	Bosques de manglar, plantaciones de palma, áreas metropolitanas.	0.5-1.0	0.019-0.032
Cerrado	Bosques tropicales maduros, edificios del casco urbano.	1.0-2.0	0.032-0.065
Caótico	Mezcla de edificaciones altas y bajas, grandes zonas boscosas irregulares con muchos claros.	>2.0	>0.065

Efecto topográfico

El efecto topográfico es evaluado a través de la identificación de áreas protegidas y expuestas al viento en un Modelo de Elevación Digital (MED). El factor del efecto topográfico (FT) es definido por la exposición del sitio topográfico, como:

- Baja exposición. Corresponde a depresiones topográficas (eg. Sitio protegido). FT = 0.8.
- Exposición normal. Corresponde a un sitio plano. FT = 1.0.
- Alta exposición. Corresponde a la cima de las montañas (eg. Sitio expuesto). FT = 1.2.

Para cada nodo en el MED, dada su ubicación geográfica (X, Y), se cuantifica su exposición buscando en las cuatro direcciones cardinales (norte, sur, este y oeste). Esta búsqueda es delimitada estableciendo los siguientes parámetros:

- N_{max} : Distancia máxima horizontal en la cual se evaluará la exposición con respecto a una ubicación fija.
- m : Pendiente topográfica de referencia, utilizada para evaluar la exposición del sitio con respecto a los terrenos adyacentes.

Entonces, para cada sitio (X, Y) en el MED, buscamos un sitio (K, L) hasta que falle la siguiente condición:

$$Z_{K,L} \geq Z_{X,Y} + Z_{Lim} \quad (18)$$

donde Z_{Lim} es la diferencia de altura requerida entre los sitios (X, Y) y (K, L) para obtener una pendiente m .

Si el sitio (K, L) existe, entonces el sitio (X, Y) se clasifica como baja exposición, que corresponde a una depresión topográfica.

Si esta condición no se cumple, entonces la pendiente media topográfica (m_T) entre el sitio (X, Y) y el sitio (K, L) se calcula como

$$m_T = \frac{Z_{X,Y} - Z_{K,L}}{D} \quad (66)$$

donde D es la distancia entre el sitio (X, Y) y el sitio (K, L). Si $|m_T| \leq m$, entonces el sitio (X, Y) se clasifica como exposición normal. Finalmente, si $|m_T| > m$ entonces el sitio (X, Y) se clasifica como alta exposición.

Factor de ráfaga

Los modelos de vulnerabilidad utilizados en el cálculo del riesgo correlacionan la pérdida con la velocidad del viento para ráfagas de 3 segundos. Esto quiere decir, que necesitamos determinar la velocidad para un tiempo promedio diferente al tiempo producido por el modelo del campo básico del viento. Se utiliza la fórmula del factor de ráfaga propuesta por ESDU (1983) dado que, aunque fue desarrollada para tormentas extra-tropicales, muchos autores concluyeron que no hay evidencia que sugiera que los factores de ráfaga asociados con los ciclones tropicales sean diferentes a los asociados con las tormentas extra-tropicales (Sparks y Huang, 1999; Vickery y Skerlj, 2005).

El factor de ráfaga K_T es definido en ESDU (1983) como

$$K_T = 1 + gI_u \quad (19)$$

donde g es el factor de cresta y I_u es la intensidad de turbulencia. El factor de cresta g se modela como

$$g = 1 - 0.193 \left[\frac{T_u}{\tau} + 0.1 \right]^{-0.63} \quad (20)$$

donde τ es la duración objetivo de ráfaga (3 segundos) y $T_u = 3.13z^{0.2}$. La intensidad de turbulencia I_u se calcula como

$$I_u = \frac{7.5\eta(0.538 + 0.09\ln(z/z_0))^{0.18}}{2.5(1 + 0.156\ln(u_* / f \cdot z_0)) \cdot (\ln(z/z_0) + 34.5 f \cdot z / u_*)} \quad (21)$$

donde

$$\eta = 1 - \frac{6 \cdot f \cdot z}{u_*} \quad (22)$$

Finalmente, la velocidad media del viento a 10 metros sobre agua o tierra se calcula como

$$v_{10} = u(z = 10m) \cdot F_T \cdot K_T \quad (23)$$

Los campos de viento están dados en términos de la distribución geográfica de v_{10} . Por lo tanto, para cada ciclón histórico se calcula cien campos, cada uno correspondiente a una simulación de la trayectoria histórica. Para cada conjunto de campos de viento, se calcula el valor esperado y la varianza del viento en cada ubicación de la malla, que representan, respectivamente, el primer momento natural y segundo momento central de una distribución de probabilidad Gamma que define la naturaleza aleatoria de v_{10} . Por lo tanto, se calcula un escenario probabilista de amenaza para cada ciclón histórico.

MODELACIÓN DE AMENAZA POR MAREA DE TORMENTA

La marea de tormenta es reconocida por ser uno de los efectos mas destructivos relacionados con los ciclones tropicales. El objetivo es determinar la altura de subida del nivel del mar en la línea de la costa como consecuencia del estrés tangencial ejercido por los fuertes vientos y la baja presión atmosférica. La altura total del agua en la costa (η) es modelada como compuesta por dos partes,

$$\eta = \eta_C + \eta_P \quad (24)$$

donde η_C es la altura de subida del agua generada por el viento, y η_P es la subida barométrica. Se asume una condición inicial de un nivel del mar medio sobre todas las ubicaciones costeras calculadas.

Dado que la subida del agua generada por el viento es uno de las mas importantes y significativas inundaciones costeras debido a la marea de tormenta, se incluye a altura barométrica en el modelo simplemente añadiendo el efecto barométrico inverso, y considerando ajuste total (eg. una disminución de la presión barométrica de 1mb corresponde a un aumento del nivel del mar de 0.01m).

$$\eta_P = 0.01(P_n - P(r)) \quad (25)$$

donde P_n es una presión atmosférica nominal (tomada como un valor constante de 100.5 Kpa), y $P(r)$ es la presión en la costa producida por el campo de presión del ciclón. $P(r)$ puede ser modelada como

$$P(r) = P_0 + \Delta P \exp\left(-\frac{RMW}{r}\right) \quad (26)$$

Para la subida generada por el viento, usamos un modelo simple pero robusto para predicción del nivel del mar en la costa, propuesto por Tilburg y Garvine (2003), basado en los patrones de circulación costera de Ekman, en los cuales la subida generada por el viento (η_C) es modelada considerando el efecto del viento a lo largo y a través de la plataforma continental,

$$\eta_C = \frac{fLU_x}{g} \sqrt{\frac{\rho_a c_a U}{\rho \cdot c_b |U_x|}} - \frac{\rho_a c_a U_x U}{\rho g \alpha} \ln\left(1 + \frac{\alpha L}{D_0}\right) \quad (27)$$

donde U es la velocidad total del viento, U_x es el componente de la velocidad del viento a través de la plataforma, ρ_a es la densidad del aire, ρ es la densidad del agua de mar, c_a es el coeficiente de arrastre en superficie, c_b es el coeficiente de arrastre en el fondo, g es la aceleración de gravedad, L es el ancho de la plataforma, α es la pendiente media del fondo desde la costa a la distancia L , y D_0 es la pared costera vertical. Finalmente, la altura de inundación en la costa (h) se calcula sustrayendo la elevación topográfica

en tierra (h_T) de la altura de subida obtenida en la línea de la costa

$$h = h_T - \eta \quad (28)$$

La amenaza por marea de tormenta es modelada en términos de la distribución geográfica de h . Similar al caso de los campos de viento, para cada ciclón histórico se calcula cien inundaciones por marea de tormenta, cada una correspondiente a una simulación del trayecto histórico. De el conjunto de inundaciones, se calcula el valor esperado y la varianza de la altura de inundación, que representan, respectivamente, el primer momento natural y el segundo momento central de una distribución de probabilidad Gamma que define la naturaleza aleatoria de h .

AI.1.2.4 MODELACIÓN DE LLUVIAS (PARA INUNDACIONES, SEQUÍAS, DESLIZAMIENTOS)

El componente de amenaza para la evaluación probabilista de riesgo por inundaciones se define como una serie de escenarios estocásticos de lluvia, colectivamente exhaustivos y mutuamente excluyentes, acoplados a la respuesta de la cuenca para obtener escenarios de intensidad de la inundación (en términos de la profundidad y velocidad del agua) en el área de interés. Los escenarios de lluvia describen la distribución espacial, la frecuencia de ocurrencia, la duración y la aleatoriedad de la intensidad de la precipitación en la cuenca. En esta sección se presenta una metodología de generación sintética de series de lluvia e identificación de escenarios de lluvia intensa para evaluar la amenaza por inundación (Bernal et al., 2017).

Iniciando a partir de la base de datos de registros históricos de precipitación diaria dentro de la cuenca, se generan series estocásticas de precipitación al estimar los parámetros de distribuciones de probabilidad que se ajustan a los registros para cada día del año para cada estación dentro del área de estudio. Las series aleatorias resultantes son luego ajustadas por un procedimiento de correlación temporal y espacial. Después, eventos de lluvias intensas se seleccionan de la serie estocástica haciendo uso de umbrales definidos por el criterio del modelador.

Información requerida

El insumo principal del modelo de lluvias intensas es una base de datos de precipitación diaria, a partir de la cual se obtiene la caracterización del régimen de

lluvias de la cuenca y se establecen las relaciones de precipitación vs. área para la construcción de escenarios estocásticos de lluvia en la región de análisis. Así como también se usa para la derivación de las curvas de distribución horaria de la lluvia total diaria, con el fin de implementar el modelo hidrológico seleccionado Clark modificado.

La metodología propuesta utiliza datos climáticos históricos de la región de interés, principalmente la acumulación diaria de precipitación. Se prefiere el uso de datos observados en estaciones dado que son mediciones directas y tienen periodos de registro largos (en comparación con los registros de radar o de satélite). Sin embargo, la metodología propuesta permite también el uso de datos recopilados por teledetección, los cuales son útiles principalmente en caso de que no se puedan obtener registros históricos de las estaciones, para complementar valores faltantes, ante la existencia de datos de baja calidad o la ausencia de estaciones operativas.

Generación estocástica de eventos de lluvia intensa

El objetivo del modelo es establecer las características de los aguaceros fuertes que se pueden presentar en la cuenca, a partir de los registros históricos de precipitación medidos en estaciones pluviométricas. Entre las características que se desean conocer de los aguaceros fuertes se encuentra la intensidad de la lluvia (que se asocia con la profundidad máxima de precipitación promedio), su distribución espacial, su frecuencia y su duración.

La generación de series estocásticas de precipitación hace uso de distribuciones paramétricas de probabilidad para estimar,

a partir de conjuntos de datos históricos, la probabilidad de ocurrencia de un determinado valor de precipitación en un determinado momento del régimen pluvial de la zona (día, semana, mes). Para el caso de la amenaza por lluvias, la metodología toma cada día del año hidrológico y determina la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los registros históricos, para finalmente obtener distribuciones de probabilidad de lluvia específicos para los 365 días del año. Luego, usando los parámetros de las distribuciones seleccionadas se generan números aleatorios para un determinado número de años de simulación de precipitación total diaria (del orden de 1,000 años). Las series aleatorias luego son correlacionadas en el tiempo y en el espacio para representar las condiciones climáticas de la región de análisis.

El primer paso es seleccionar las funciones de distribución de probabilidad que pueden ser aplicadas a la modelación de cada variable. Se consideran distribuciones normalmente empleadas en ciencias atmosféricas como son Gamma, Lognormal, Normal, Weibull o Gumbel, entre otras. Posteriormente, para cada día del año, los parámetros de las distribuciones seleccionadas se estiman mediante el método de los momentos o de máxima verosimilitud.

El ajuste de las distribuciones de probabilidad se evalúa usando métodos cualitativos y cuantitativos. Los métodos cualitativos incluyen herramientas gráficas para discernir subjetivamente la bondad del ajuste. Se utiliza la superposición de la distribución paramétrica ajustada y el histograma de datos, gráficos cuantil-cuantil, gráficos de distribución acumulativa empírica y teórica (CDF), y gráficos de probabilidad-probabilidad o comparaciones

de probabilidad acumulativa. La selección cualitativa se realiza con el Criterio de Información de Akaike (AIC) o el Criterio Bayesiano de Información (BIC), que miden la calidad relativa de los modelos de distribución para un conjunto dado de datos. Está claro que los criterios AIC y BIC no dan ninguna indicación sobre la calidad del modelo, sino que es una comparación entre la bondad de ajuste de cada modelo y su complejidad en términos de un valor de penalización que aumenta con el número creciente de parámetros ajustados (Banimahd y Khalili, 2013). Numerosas alternativas de distribuciones de probabilidad se ponen a prueba para cada día del año hidrológico y cada variable

climática.

Para el caso de la precipitación, se debe hacer una consideración especial para los días de no lluvia, ya que estos valores pueden afectar el ajuste de las distribuciones de probabilidad y el ajuste estadístico final que permite comparar los resultados con la serie histórica. Entonces, para series de precipitación se divide la función de densidad de probabilidad en dos partes 1) cuando la precipitación es igual a cero (P_0) 2) cuando la precipitación es mayor a cero ($1-P_0$). La probabilidad de que ocurra un día seco se define como:

$$P_0 = \frac{n}{N} = \frac{\# \text{ días secos}}{\# \text{ días en la muestra}} \quad (29)$$

Al seguir este procedimiento, se obtienen series de precipitación que mantienen la relación histórica de días de no lluvia con respecto al total de días, según la temporada del régimen de lluvias. Si se utiliza la función de densidad de probabilidad sin hacer este ajuste, no se obtienen días secos en las series aleatorias.

Luego de definir la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los valores diarios históricos, para cada uno de los 365 días del año, se generan números aleatorios para n años de simulación. Como resultado, se obtienen series aleatorias de datos de precipitación total diaria para cada una de las estaciones en el área de estudio.

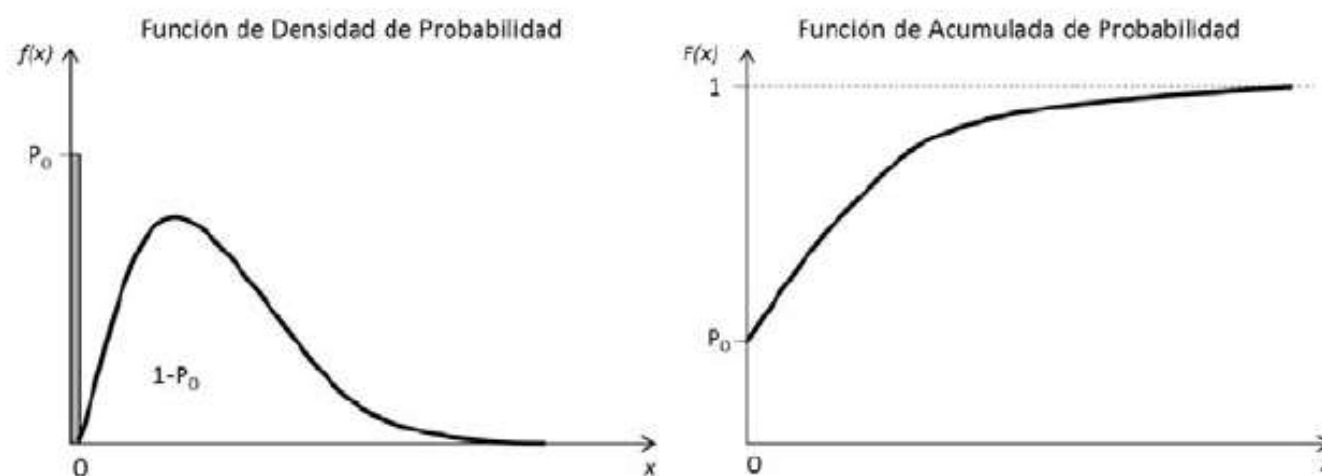


Figura A1-19. Funciones de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada teniendo en cuenta días de no lluvia

Las series aleatorias generadas se truncan a cero en el límite inferior, y no se define un límite superior dado que el objetivo de la simulación es generar escenarios extremos de precipitación que no han ocurrido aún.

En seguida, con el fin de incluir la correlación existente entre valores de precipitación y temperatura en periodos de tiempo sucesivos, se calcula la matriz de autocorrelación para cada una de las series aleatorias generadas. La autocorrelación

temporal indica la correlación de una variable con sus valores pasados y futuros (Wilks, 2006). Además, se incluyen los efectos de la correlación espacial, que representan la aparición de datos simultáneos en múltiples estaciones del área de estudio, utilizando la matriz de autocorrelación espacial entre valores de las diferentes estaciones de registro. Las series de números aleatorios correlacionados son más suaves, ya que los valores adyacentes (en escalas temporales y espaciales) tienden a ser más parecidos que

en series independientes. De esta manera, se evitan cambios abruptos en los valores de precipitación y temperatura.

Estas simulaciones no se pueden considerar como un pronóstico, pero si como una serie de datos que representan estadísticamente las condiciones históricas del régimen de precipitación del área. En estas series se pueden encontrar mayor número de eventos de precipitación y de intensidades más altas a las que se pueden encontrar en las series

históricas. Incluso, las series simuladas pueden incluir valores atípicos extremos de precipitación que corresponden a eventos de lluvias fuertes cuya intensidad no se ha presentado aún.

Los resultados globales de la simulación de series de precipitación se presentan en la siguiente figura. En estos mapas se puede ver el ajuste tanto en magnitud de la precipitación como en la distribución espacial de la misma, en una cuenca de

referencia. Esto indica que la metodología es apta para la generación de series de precipitación que se ajustan al comportamiento histórico de la zona de estudio.

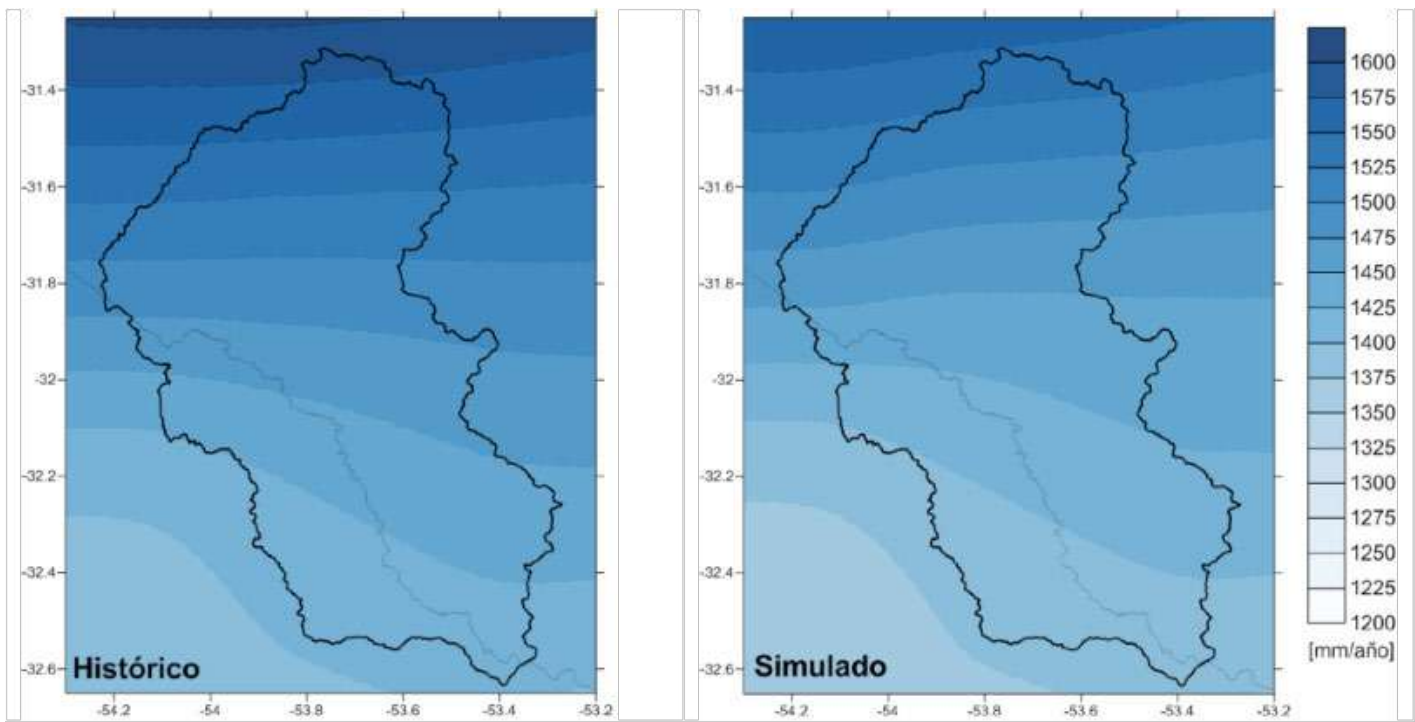


Figura A1-20. Mapas de valores medio multianuales para precipitación en una cuenca de referencia. (Tomado de Cardona et al., 2017).

En la siguiente figura se muestra el ajuste del promedio diario multianual de los parámetros de precipitación de las series históricas del periodo 1981 al 2010 y de la serie sintética simulada aleatoriamente,

para el mismo punto de análisis. Se puede ver cómo la metodología propuesta resulta en series sintéticas con un ajuste preciso a los datos históricos, lo que indica que la serie aleatoria conserva adecuadamente

las características promedio del clima de la zona pero incluye escenarios que no han ocurrido aún.

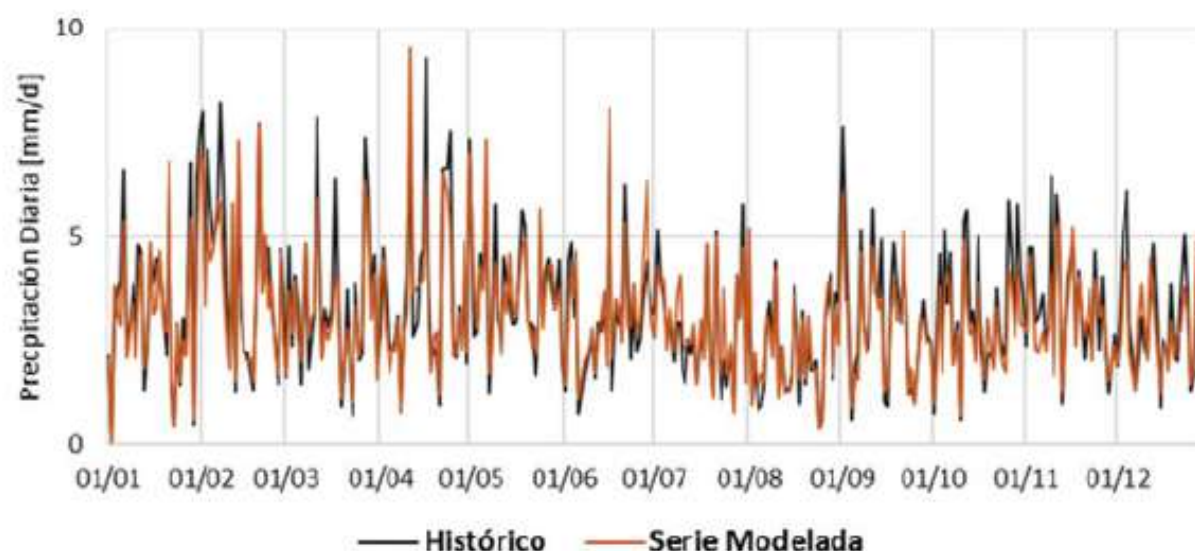


Figura A1-21. Promedio diario multianual de precipitación para serie histórica (1981-2010) y serie sintética (Tomado de Cardona et al., 2017).

Selección de eventos de lluvias fuertes

Un evento de lluvia fuerte se determina a partir de los siguientes criterios:

- Número mínimo de estaciones que registren un determinado aguacero para la generación de los mapas de isoyetas correspondientes, de tal manera que éstos sean confiables para la descripción espacial del evento. El número de estaciones depende de la localización y densidad de las estaciones en el área de estudio.
- Valor umbral mínimo para la selección de un evento considerado como significativo, es decir que, además que el evento esté registrado en el número mínimo de estaciones definido, la precipitación registrada en cada una

de estas estaciones supere ese valor umbral (p.e. mayor que 10 mm en 24 horas).

- Valor umbral medio que considera un valor mínimo para el promedio de precipitación en el número de estaciones que superan el umbral mínimo. Este criterio se utiliza para asegurar que se presenta una lluvia de intensidad considerable en un área extensa y no se limita a lluvias fuertes en sitios particulares.

Distribución espacial de la precipitación

Una de las ventajas de utilizar la generación estocástica de series de precipitación en varios puntos del área de análisis es que la distribución espacial de

la lluvia se deriva directamente de los datos simulados, sin tener que entrar a establecer patrones geométricos representativos de los eventos o localizaciones preferenciales de los centros de tormenta. La interpolación espacial se hace a partir del método de Kriging, ajustando el variograma de los datos de entrada a series tipo Gaussiana. En la siguiente figura se muestran los mapas para nueve eventos de lluvias fuertes en la cuenca de referencia. Como se puede ver en los mapas, la distribución de la lluvia fuerte en la cuenca cambia considerablemente en magnitud y distribución espacial. En el conjunto de eventos encontrados no hay dos eventos iguales. Entonces, estos eventos representan la precipitación total diaria en un escenario de lluvia fuerte.

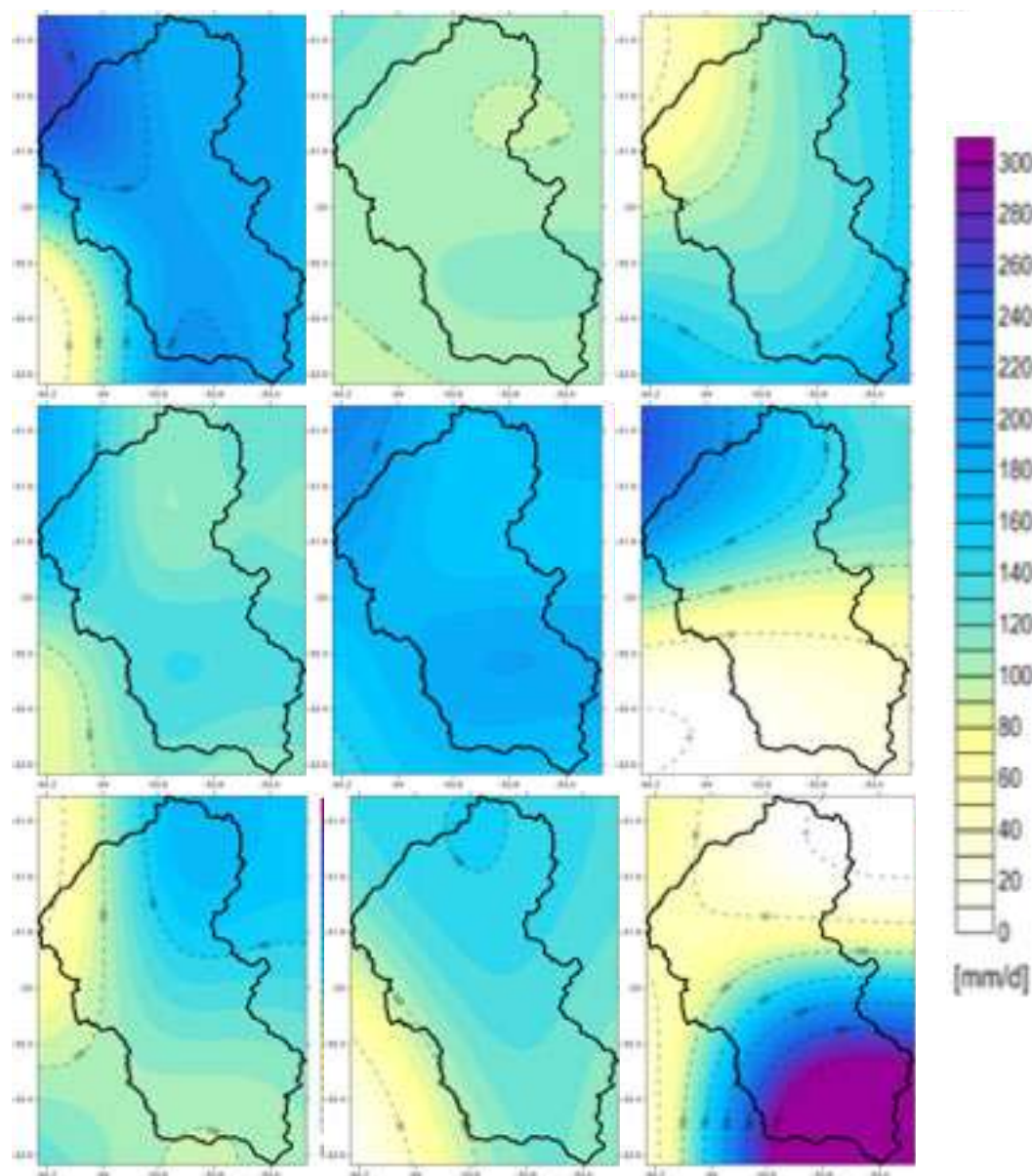


Figura A1-22. Mapas de distribución espacial de tormentas en la Cuenca de referencia (Tomado de Cardona et al., 2017).

Distribución temporal de precipitación

Los modelos hidrológicos de precipitación - escorrentía para la modelación y gestión de cuencas hídricas requieren una caracterización y distribución espacial y temporal de la precipitación. La generación de series estocásticas de lluvia constituyen una aproximación a la caracterización de la distribución espacial de la lluvia sobre una cuenca en términos de la intensidad que se espera en un área determinada para unos períodos de retorno (o frecuencia) considerados, teniendo en cuenta la

precipitación histórica sobre el área de estudio.

Por otro lado, las curvas Huff corresponden a una metodología de “tormentas de diseño” propuesta en 1967 con el fin de describir la distribución temporal de la precipitación de una zona en términos probabilistas (Chow et al., 1994). Por medio del análisis, Huff identificó que la mayor cantidad de precipitación ocurre en una porción pequeña del total de la duración de cada evento, confirmando el concepto de las curvas IDF en las que se

establece que las mayores intensidades de precipitación se registran en lapsos cortos. Así, los eventos de precipitación para un área determinada se clasifican en cuatro grupos: primer, segundo, tercer y cuarto cuartil, definidos como el 25% del segmento temporal en el que ocurre la mayor cantidad de precipitación.

De manera general y como se establece en el análisis estadístico de la precipitación (Rao y Kao, 2006), el primer cuartil de la distribución Huff es usado para tormentas con una duración menor o igual a seis horas.

Mientras que el segundo cuartil de duración de tormenta es usado para eventos con una duración mayor a seis horas y menor a doce horas. Para el tercer cuartil se usan eventos entre 12 y 24 horas de duración. Y para

eventos mayores a 24 horas se hace uso de la distribución Huff del cuarto cuartil.

en el mayor número de estaciones y para el mayor periodo de registro posible.

El cálculo de las curvas Huff se debe hacer a partir de registros horarios de precipitación

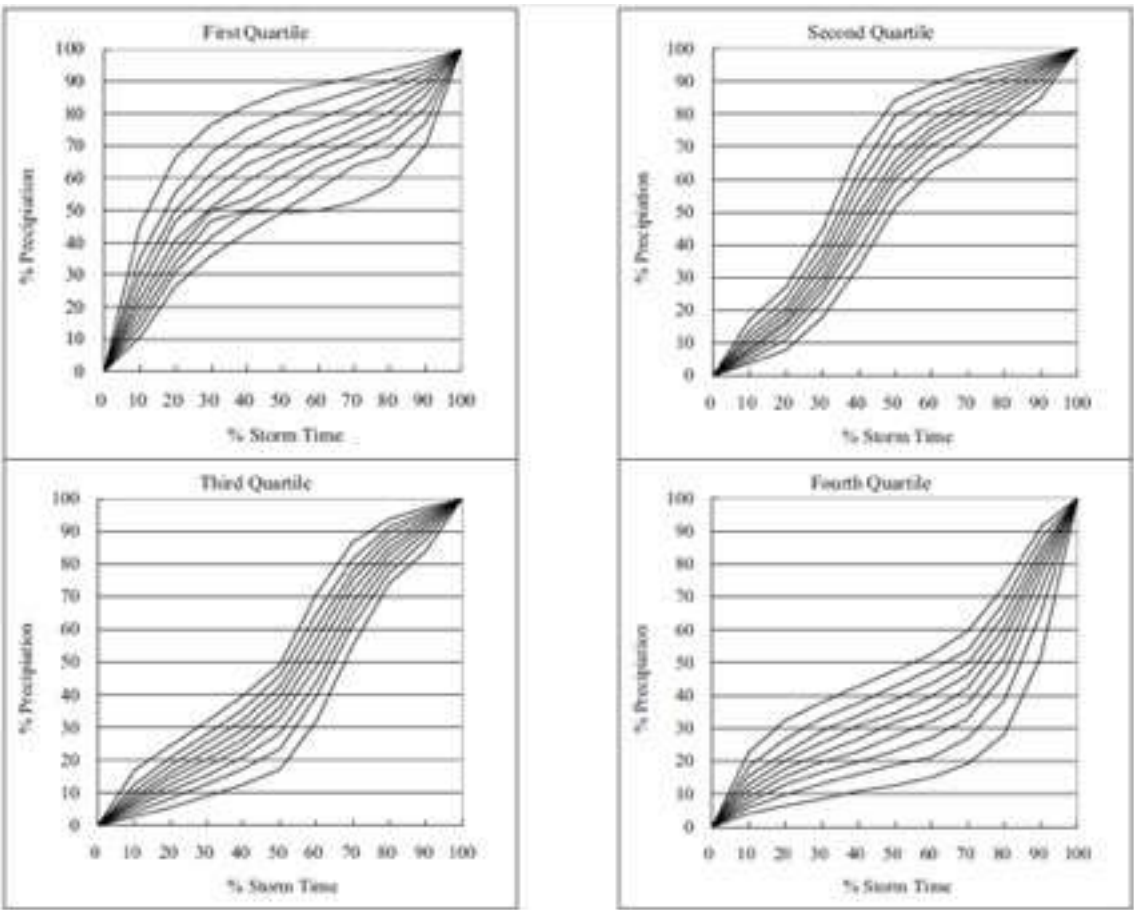


Figura A1-23. Ejemplo de curvas Huff calculadas para Indiana (EEUU) (Rao & Kao, 2006).

Proceso de cálculo de curvas Huff

El proceso de cálculo de las curvas Huff a partir de una base de datos de precipitación completa se describe a continuación:

1. Selección de eventos de precipitación horaria a partir de tres criterios:
 - a. Separación mínima entre eventos de precipitación de seis horas.
 - b. Eventos seleccionados deben tener una duración mayor o igual a tres horas.
 - c. El umbral mínimo de precipitación horaria escogido es de un milímetro.
2. Una vez seleccionados los eventos de análisis se deben ordenar por fecha de ocurrencia y se procede a normalizar la duración y la precipitación total acumulada de cada evento. Esto es, para cada evento seleccionado se divide cada paso horario entre el número total de horas que duró dicho evento. A su vez, para cada valor de precipitación en cada paso horario se divide entre la precipitación total acumulada de todo el evento.
3. Se grafica el total de eventos normalizados.
4. Se determinan los cuartiles 25, 50, 75 y 100 de duración normalizada para cada evento y se clasifica cada uno de ellos según la ocurrencia de la mayor cantidad de precipitación en alguno de los cuartiles mencionados.
5. Una vez clasificado cada evento dentro de un cuartil de duración específico, se determinan sus correspondientes estadísticas. Esto es, para todos los cuartiles, se grafican la totalidad de eventos clasificados dentro de cada grupo intercuartil.
6. Para cada cuartil, para cada paso de duración adimensional (p.e. cada 0.1) se leen los valores de precipitación adimensional de cada evento y se

ordenan de menor a mayor.

7. Para cada grupo ordenado se determina su valor de probabilidad por medio de la expresión

$$P = \frac{(100 - i)}{n + 1} \quad (30)$$

donde i es el contador para cada evento ordenado y n el número total de eventos dentro del rango intercuartil.

8. Se interpolan los valores obtenidos para cada paso de duración adimensional, para cada valor de probabilidad de interés (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100%).

A partir de la aplicación del algoritmo descrito se obtienen las curvas Huff para una estación pluviométrica determinada y su correspondiente área aferente.

Al aplicar la metodología de generación estocástica de eventos de lluvia intensa con la distribución temporal a partir de las curvas Huff, es posible generar hietogramas sintéticos para cualquier ubicación dentro de la extensión de las lluvias simuladas. Este procedimiento se repite para toda la colección de escenarios de lluvia intensa, para obtener una representación espacial y temporal integral del régimen de precipitación en la cuenca.

AMENAZA POR INUNDACIÓN

La intensidad de la precipitación se debe convertir en profundidad de lluvia efectiva, que corresponde a la porción de la lluvia total que puede convertirse en escurrentía

y alcanzar los cuerpos de agua naturales o las áreas inundables en la cuenca. El porcentaje total de lluvia que se convierte en escurrentía depende de las características de saturación y permeabilidad de la superficie, su cobertura de vegetación y uso del suelo.

La profundidad de la inundación se calcula a partir de la precipitación efectiva, haciendo uso de factores de inundación que describen el territorio en términos de su potencial de inundación, como una función de la topografía.

Cálculo de la precipitación efectiva y volúmenes de escurrentía

Como método para determinar los volúmenes de escurrentía se emplea el número de curva o factor de escurrimiento dado por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos. Al definir los factores de escurrimiento, es posible determinar la precipitación efectiva.

La precipitación efectiva corresponde a la intensidad de lluvia remanente, luego que, de la profundidad total de precipitación aportada por la tormenta, se ha gastado una porción en procesos hidrológicos de infiltración, interceptación y evapotranspiración. Ésta escurrentía se calcula en función del valor total de precipitación y del factor de escurrimiento en determinado punto, de la siguiente manera:

$$P_e = \frac{\left[P_m - \frac{508}{CN} + 5.08 \right]^2}{P_m - \frac{2032}{CN} - 20.32} \quad (31)$$

en donde P_e es la precipitación efectiva en cm, P_m es la precipitación de la tormenta en cm, y CN es el factor de escurrimiento.

El factor de escurrimiento es un indicador global de la cantidad de agua que será absorbida o transpirada por los suelos superficiales. Se obtiene como función del uso de la tierra, la cobertura vegetal y las condiciones de infiltración y transpiración del suelo superficial. En la siguiente tabla se presentan los valores de CN usados para las diferentes coberturas y grupo hidrológico del suelo existentes en la cuenca (Brunner y Bonner, 1994). El rango de aplicación de la ecuación anterior (32), es para valores de:

$$P_m > \frac{508}{CN} + 5.08 \quad (32)$$

Fuera de este intervalo se considera que la precipitación efectiva es igual a cero. También se debe garantizar que la precipitación efectiva no sea mayor que la precipitación de la tormenta.

Teniendo en cuenta la información consignada en la siguiente tabla y la información contenida en los mapas presentados que describen el tipo de suelo, cobertura vegetal y la condición del suelo para la cuenca, se obtienen los mapas de número de curva de escurrimiento teniendo en cuenta tres condiciones de humedad de suelo antecedentes: seca, intermedia y húmeda que se presentan a continuación.

USO DE LA TIERRA O CUBIERTA	CONDICIÓN DE LA SUPERFICIE	TIPO DE SUELO			
		A	B	C	D
Bosques (sembrados y cultivados)	Ralo, baja transpiración	45	66	77	83
	Normal, transpiración media	36	60	73	79
	Espeso o alta transpiración	25	55	70	77
Camino	De tierra	72	82	87	89
	Superficie dura	74	84	90	92
Bosques Naturales	Muy ralo o baja transpiración	56	75	86	91
	Ralo, baja transpiración	46	68	78	84
	Normal, transpiración media	36	60	70	76
	Espeso, alta transpiración	26	52	62	69
	Muy espeso, alta transpiración	15	44	54	61
Descanso (sin cultivo)	Surcos rectos	77	86	91	94
Cultivo de surco	Surcos rectos	70	80	87	90
	Surcos en curvas de nivel	67	77	83	87
	Terrazas	64	73	79	82
Cereales	Surcos rectos	64	76	84	88
	Surcos en curvas de nivel	62	74	82	85
	Terrazas	60	71	79	82
Leguminosas (sembrada con maquinaria o al voleo) o potrero de rotación.	Surcos rectos	62	75	83	87
	Surcos en curvas de nivel	60	72	81	84
	Terrazas	57	70	78	82
Pastizal	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
	Curvas de nivel, pobre	47	67	81	88
	Curvas de nivel, normal	25	59	75	83
	Curvas de nivel, bueno	6	35	70	79
Potrero (permanente)	Normal	30	58	71	78
Superficie impermeable		100	100	100	100
CLASIFICACIÓN DE SUELOS (según afectan las características del material en el escurrimiento)					
Tipo A: (Esgurrimiento mínimo). Incluye gravas y arenas de tamaño medio, limpias, y mezclas de ambas.					
Tipo B: Incluye arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena y limo.					
Tipo C: Comprende arena muy fina, arcillas de baja plasticidad, mezclas de arena, limo y arcilla.					
Tipo D: (Esgurrimiento máximo). Incluyendo principalmente arcillas de alta plasticidad, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables cerca de la superficie					

Modelo de precipitación-escorrentía: Clark Modificado

Los modelos de precipitación escorrentía son aproximaciones de cálculo, a nivel de

cuenca, de la cantidad de precipitación efectiva que debe ser transitada por un cauce específico en un punto de concentración determinado en función del tiempo. Dentro de los modelos existentes se

identifican modelos materiales y simbólicos, de acuerdo con la clasificación propuesta por Singh (1988).

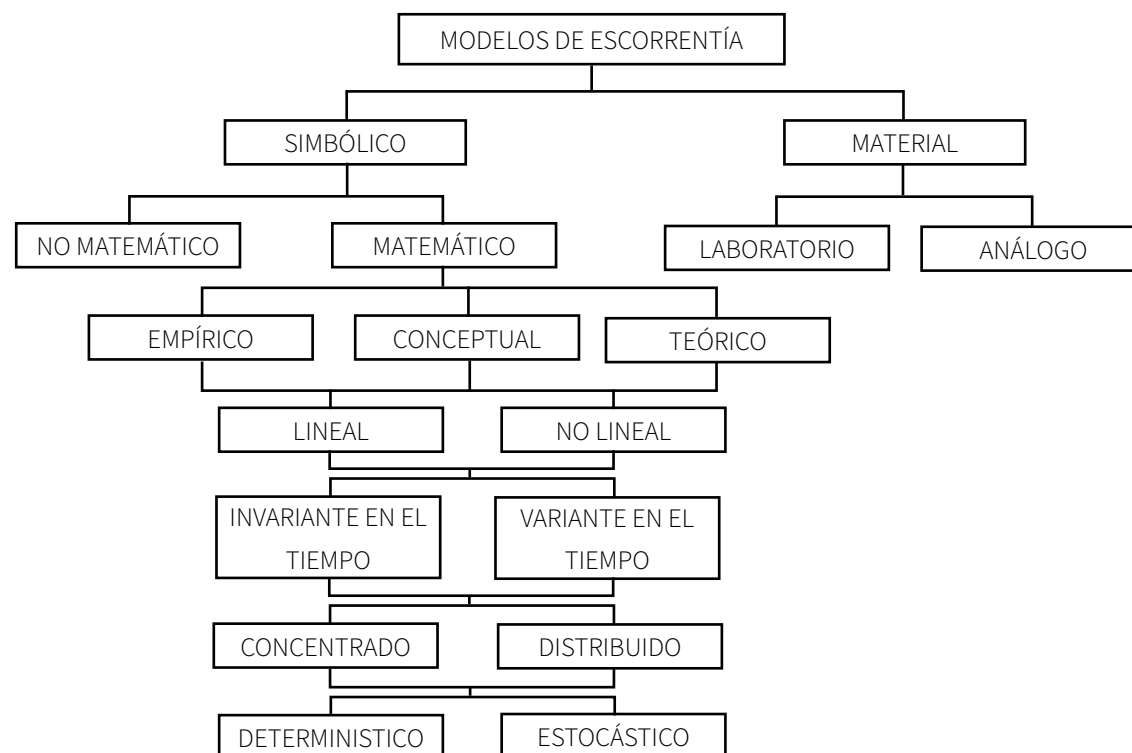


Figura A1-24. Clasificación de modelos hidrológicos, propuesta por Singh (Adaptado de Singh, 1988).

Los modelos de tipo simbólico se clasifican de acuerdo a su base matemática. Dentro de los modelos matemáticos físicamente basados, se encuentran los modelos distribuidos y agrupados. El modelo seleccionado para el análisis de escorrentía en la cuenca es el método Clark modificado, o ModClark. Este modelo es paramétrico distribuido, es decir, las variaciones espaciales de las características y procesos hidrológicos son consideradas de manera explícita (Brunner y Bonner, 1994). Esto se traduce en que se tienen en cuenta las variaciones en el tiempo de viaje hacia el punto de concentración, desde todos los puntos de la cuenca de análisis.

El modelo Clark modificado define dos procesos fundamentales en el proceso de transformación de un volumen de lluvia en escorrentía directa:

- La traslación o movimiento del exceso de precipitación a lo largo de los

drenajes de la cuenca.

- La atenuación, o disminución de la magnitud de descarga a medida que el exceso de precipitación es almacenado en la cuenca (en el suelo, superficie y canales).

Proceso de traslación

El tiempo que le toma a una partícula de agua llegar a la salida de la cuenca se modela mediante una malla de tiempos de viaje. Para cada celda del territorio, se determina el tiempo hasta la salida de la siguiente manera:

$$t_{celda} = t_c \frac{d_{celda}}{d_{m\acute{a}x}} \quad (33)$$

en donde t_{celda} es el tiempo de viaje del agua desde la celda en consideración, t_c es el tiempo de concentración de la cuenca, d_{celda} es la distancia de la celda en consideración

a la salida de la cuenca, y $d_{m\acute{a}x}$ es la máxima distancia de alguna celda a la salida de la cuenca.

El tiempo de concentración puede calcularse aplicando la ecuación de Kirpich (1940), la cual se expresa como:

$$t_c = 0.0003245 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (34)$$

en donde t_c es el tiempo de concentración en horas, L es la longitud del cauce principal en m y S es la pendiente media del cauce principal.

Con la información del cauce y la topografía general se obtiene la pendiente media del cauce empleado el método de Taylor-Schwarz (Springall, 1970) la cual está dada por:

$$S = \frac{L}{\frac{L_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{L_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{L_n}{\sqrt{S_n}}} \quad (35)$$

en donde la longitud del cauce principal L se divide en n número de segmentos de longitud l y para cada uno de ellos se calcula su pendiente S .

Del área de cada celda se determina el volumen de escurrimiento en cada momento del tiempo. Estos volúmenes son enrutados usando el modelo de reservorio lineal dentro del proceso de atenuación.

Proceso de atenuación

El almacenamiento de corto plazo juega un papel muy importante en la transformación del exceso de precipitación en escorrenría. En el método de Clark, este almacenamiento se modela como un reservorio lineal. En un reservorio lineal aplica la ecuación de continuidad de la forma:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad (36)$$

en donde dS/dt es la tasa de cambio del almacenamiento en la cuenca, en el tiempo t , I_t es el caudal de entrada, y O_t es el caudal de salida. En el modelo de reservorio lineal, el caudal de salida está relacionado con el volumen almacenado de manera proporcional:

$$S_t = RO_t \quad (37)$$

en donde R es el parámetro de reservorio lineal. Al combinar y solucionar las ecuaciones anteriores mediante un enfoque sencillo de diferencias finitas, se obtiene que

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad (38)$$

en donde C_A y C_B son coeficientes de enrutamiento, que se calculan como:

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t} \quad (39)$$

$$C_B = 1 - C_A \quad (40)$$

El caudal de salida promedio para el tiempo t es entonces:

$$\bar{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \quad (41)$$

Para cada celda de la malla de cálculo, se calcula un caudal de salida promedio, para cada momento del tiempo. Al final, la suma de los caudales promedio, en cada paso de

tiempo, da el hidrograma de salida final (Q_t)

$$Q_t = \sum_{i=1}^{N_{celdas}} \bar{O}_{i,t} \quad (42)$$

De esta manera, el modelo Clark modificado puede verse esquemáticamente de la siguiente manera:

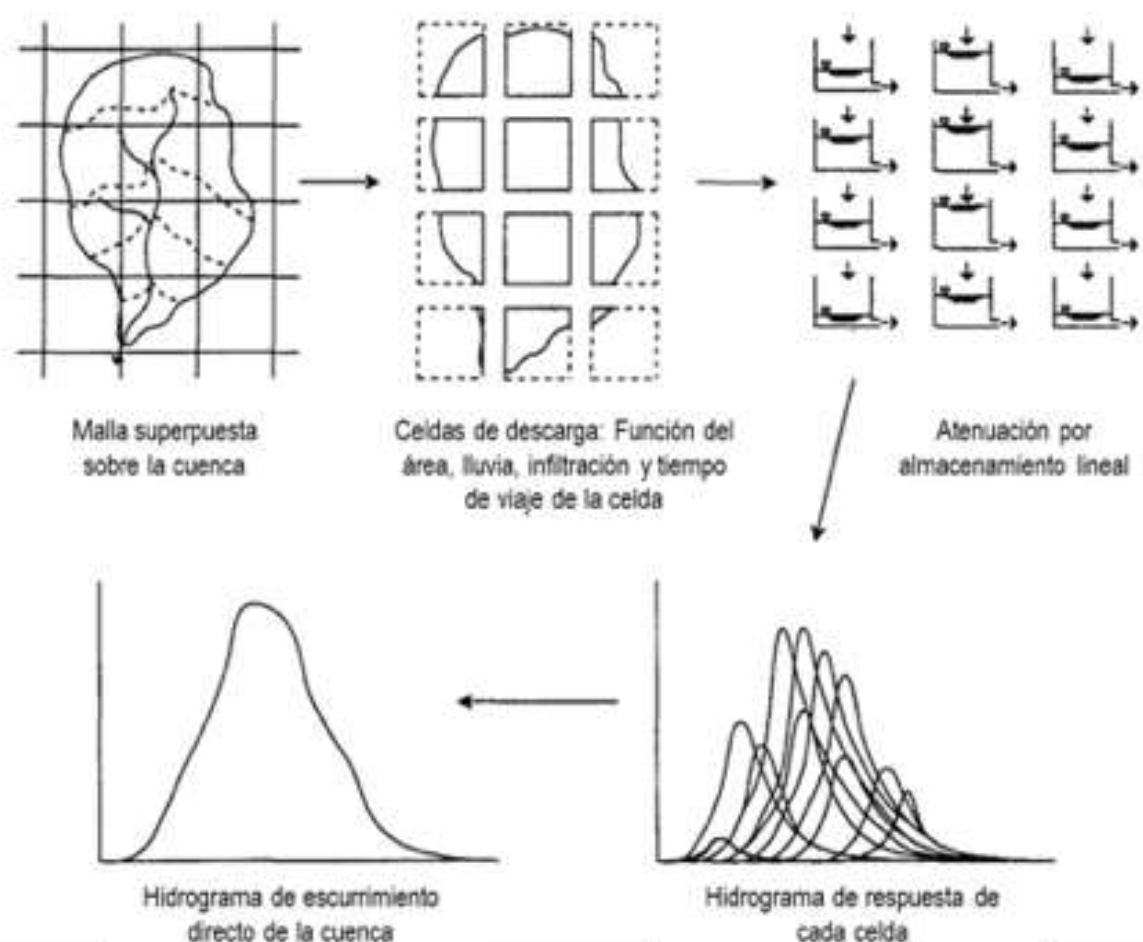


Figura A1-25. Modelo de escorrenría directa ModClark. Modelo conceptual (Adaptado de Kull & Feldman, 1998)

A diferencia del método de Clark (1945), que es un modelo agrupado, el modelo ModClark (Peters y Easton, 1996) presenta el cálculo y caracterización de los procesos de traslación y atenuación antes descritos de manera distribuida en la cuenca de análisis por medio de una malla previamente definida. De cada una de las celdas de la

malla de análisis se obtienen tiempos de concentración y relaciones de atenuación que derivan en una serie de hidrogramas en la salida de cada una de las celdas. A partir de la envolvente de dichos hidrogramas se obtiene el hidrograma de salida en el punto de concentración deseado en el análisis.

Modelos hidrodinámicos

Los modelos tradicionales de inundación se componen de tres partes esenciales: modelo de precipitación, modelo de precipitación-escorrentía y modelos hidrodinámicos, que son modelos físicamente basados que se encargan de transitar el caudal de escorrentía teniendo en cuenta la topografía, condiciones de rugosidad y regímenes de flujo de un río o tramo de río en particular.

La manera de abordar los modelos hidrodinámicos se divide a su vez en tres componentes principales. Dichos componentes se caracterizan en términos del número de dimensiones en las cuales se plantea el análisis hidrodinámico, por lo tanto se componen de modelos 1D, 2D y 3D. Adicional a estos modelos existen variaciones derivadas de ellos, como por ejemplo los modelos acoplados 1D/2D que como su nombre lo indica nacen de la unión de modelos uni y bidimensionales. Los modelos unidimensionales son modelos relativamente sencillos que solucionan las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento en una dirección y su aplicación se centra en ríos no meandrinosos y con un cauce bien definido en el cual las variaciones de flujo en sentidos horizontales no sean predominantes. En el caso de los modelos bidimensionales se solucionan las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento (Saint Venant) para las dos direcciones de flujo, por lo que su aplicación se centra en ríos meandrinosos, con un cauce definido y zonas anegables con pendientes reducidas.

Inundación aluvial – modelo 1D

El objetivo del análisis unidimensional es la solución de los perfiles de profundidad de agua en secciones transversales a lo

largo del cauce de un río. Se asume un flujo no permanente, gradualmente variado y unidimensional.

Para el cálculo del eje hidráulico o tirante en el modelo, se hace uso del “Método estándar por etapas en cauces naturales” (Chow et al., 1994), debido a que en este tipo de canal es posible conocer las propiedades de secciones localizadas a distancias relativamente fijas, y determinadas a partir de herramientas de SIG.

La ecuación de energía, para dos secciones transversales adyacentes, ST_1 y ST_2 , es

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (43)$$

en donde Y_1 y Y_2 son la profundidad del agua en las secciones ST_1 y ST_2 respectivamente, Z_1 y Z_2 son las elevaciones del canal en ST_1 y ST_2 , V_1 y V_2 son las velocidades promedio del flujo (la descarga total dividida por el área total), α_1 y α_2 son coeficientes de ponderación, g es la aceleración de la gravedad y h_e es la cabeza de pérdida de energía. El término de la cabeza de pérdida de energía se define como:

$$h_e = LS_f + C \left[\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right] \quad (44)$$

en donde L es la distancia ponderada entre secciones transversales, S_f es la pendiente representativa de fricción entre las secciones transversales y C es un coeficiente de expansión o contracción. La distancia ponderada y la pendiente representativa de fricción se determinan como:

$$L = \frac{L_{lob} Q_{lob} + L_{ch} Q_{ch} + L_{rob} Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad (45)$$

$$S_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (46)$$

en donde L_{lob} , L_{ch} y L_{rob} son las distancias en la margen izquierda, canal principal y margen

derecha, disponibles para el flujo entre las secciones, respectivamente. Q_{lob} , Q_{ch} y Q_{rob} son los caudales promedio entre secciones para la margen izquierda, el canal principal y la margen derecha, respectivamente, K_1 y K_2 son las conducciones de las secciones transversales.

El cálculo de la conducción y el caudal de una sección transversal, se realiza para cada subdivisión dentro de la sección (margen izquierda, canal principal, margen derecha), como:

$$Q = K \sqrt{S_f} \quad (47)$$

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \quad (48)$$

en donde K es la conducción para la subdivisión, n es el coeficiente de rugosidad de Manning, A es el área de flujo, y R el radio hidráulico.

El método presentado está implementado en el software HEC-RAS, desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos (Brunner y Bonner, 1994). HEC-RAS es un sistema integrado de software que permite realizar cálculos hidráulicos de una dimensión para una red completa de canales naturales y/o construidos.

Inundación aluvial – modelo 2D

El carácter dinámico de las inundaciones y la influencia del desplazamiento del agua hacia las zonas bajas, hacen necesario emplear modelos matemáticos que, por lo menos, incluyan ecuaciones de flujo en dos direcciones horizontales. El método propuesto considera un modelo numérico bidimensional con base en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento

y en la ecuación de continuidad; en ellas las velocidades corresponden a su valor promedio en la vertical. Se considera el flujo sobre una región con o sin agua.

Las ecuaciones dinámicas que describen la conservación de cantidad de movimiento son:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{n^2 |u| u}{h^{4/3}} = - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \tag{49}$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} = - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y} \tag{50}$$

en donde u y v son las componentes de la velocidad en las direcciones x y y respectivamente, n es el coeficiente de rugosidad según la fórmula de Manning, h es el nivel de la superficie libre del agua con respecto al nivel del terreno natural y t es el tiempo.

El principio de la conservación de masa (ecuación de continuidad) en dos dimensiones horizontales establece que:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} uh + \frac{\partial}{\partial y} vh = 0 \tag{51}$$

El área (en proyección horizontal) de la llanura a inundarse se divide en celdas de forma rectangular de largo ∂x y ancho ∂y . Para calcular el flujo de agua en una planicie de inundación se debe resolver el sistema de ecuaciones diferenciales conformado por las ecuaciones anteriores y considerando ciertas condiciones iniciales y de frontera.



AI.2. Enfoque metodológico para la evaluación holística del riesgo

La evaluación integral del riesgo multiamenaza utilizada en este estudio se basa en las técnicas propuestas en trabajos anteriores, realizados por Cardona (2001), Carreño (2006) y IDB-IDEA-ERN (2008). La *Figura A2-1* ilustra el enfoque conceptual utilizado, donde el Riesgo Integral R_i se expresa en función del Riesgo Físico R_F y del factor de impacto $(1+F)$. El R_F se obtiene de los resultados de la Pérdida Anual Esperada (PAE) por departamento y por municipio, respectivamente, mientras que el F se obtiene mediante la suma ponderada de indicadores socioeconómicos disponibles, que dan cuenta de la fragilidad social y de la falta de resiliencia (ausencia de capacidad de respuesta y recuperación). En este trabajo se utilizaron 16 indicadores socioeconómicos relevantes, disponibles en bases de datos del país en relación con diversos aspectos políticos, institucionales, de organización de las comunidades, que usualmente reflejan debilidades económicas y sociales que contribuyen a la amplificación del riesgo y a la incapacidad de enfrentar o recuperarse de efectos adversos. En esta evaluación, los daños o pérdidas físicas potenciales son agravadas por un conjunto de condiciones socioeconómicas

que empeoran los efectos cuando un evento peligroso se materializa. Información detallada sobre esta metodología se puede

encontrar en Carreño (2006), Carreño et al. (2007) y Barbat et al. (2011).

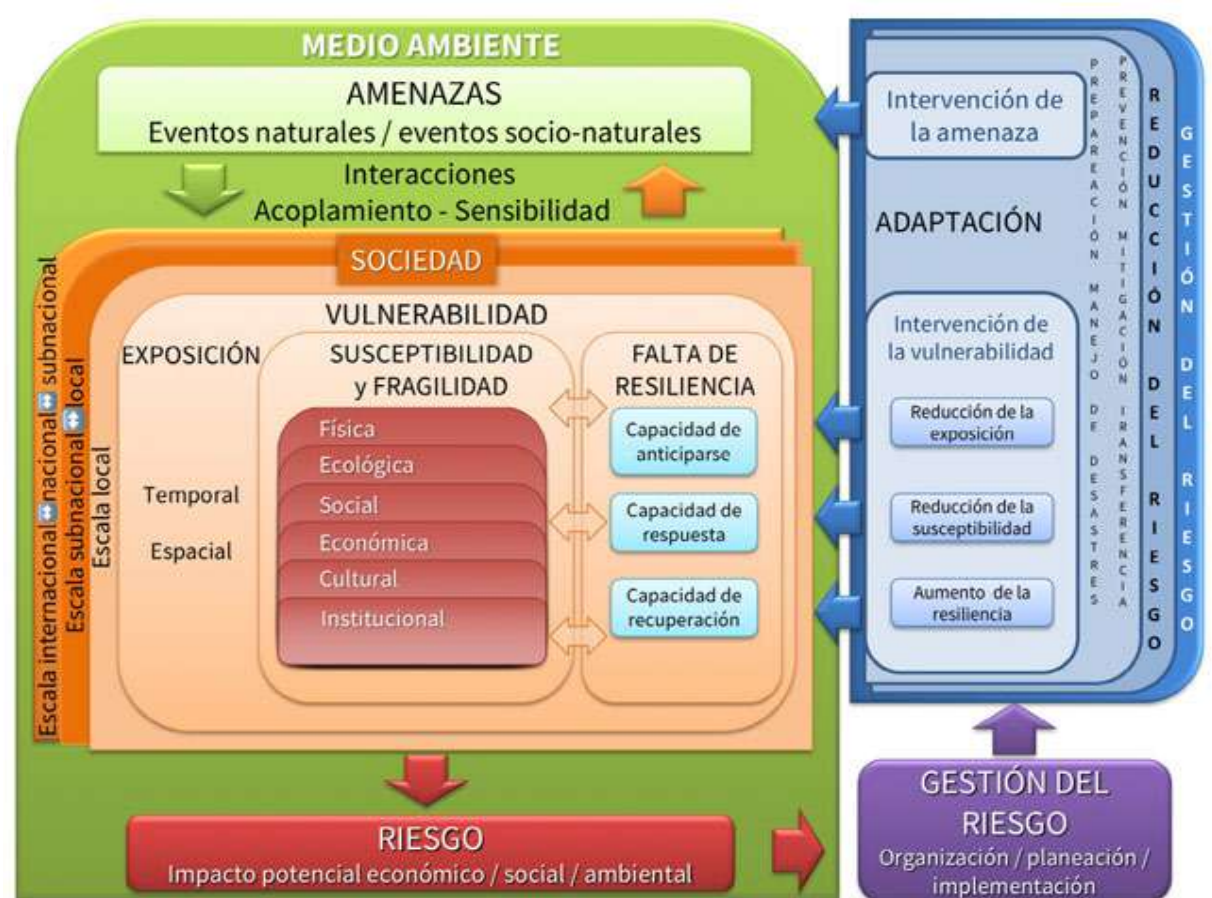


Figura A2-1- Enfoque holístico a la evaluación probabilista del riesgo (Cardona, 2001; Carreño et al., 2007; Marulanda et al., 2009)

Esta metodología para dar cuenta del riesgo en forma integral o comprensiva ha sido aplicada con diferentes niveles de resolución (Daniell et al. 2010; Burton y Silva 2014) y ha sido incluido en manuales y bases de datos para evaluación del riesgo sísmico (Khazai et al. 2014; 2015; Burton et al. 2014). Dado que no siempre se cuenta con la misma información en términos de indicadores útiles disponibles para el área de estudio, cada evaluación representa un reto en cuanto a la selección y en algunos casos al cálculo de los factores o descriptores que dan cuenta del contexto social e institucional.

La evaluación holística del riesgo (Cardona, 2001; Carreño, 2006) ha resultado ser de especial utilidad en términos prácticos para la cuantificación del riesgo en diferentes contextos urbanos (e.g. por Earthquake and Megacities Initiative EMI, United Nations International Strategy for Disasters Reduction UNISDR, el Sistema de Indicadores de Riesgo y Gestión del Riesgo del Banco Interamericano de Desarrollo). Desde esta perspectiva de análisis relativo y muticriterio, el riesgo se considera como una serie de consecuencias potenciales, causadas por factores de exposición física (daños y pérdidas debido a una amenaza determinada) y su implicaciones y la capacidad para enfrentarlas (en términos de fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia). Esta noción implica que existen vínculos causales entre acciones y efectos, y que efectos indeseables pueden ser evitados o reducidos si las acciones causales o impulsoras son evitadas o intervenidas.

Aplicando la metodología de la evaluación holística del riesgo propuesta por Cardona (2001) y Carreño et al. (2007), el índice de evaluación holística del riesgo o Riesgo Integral (R_i) se evalúa mediante la siguiente ecuación conocida como la ecuación de

Moncho (Carreño et al. 2007):

$$R_i = R_F (1+F) \quad (1)$$

donde R_F y F son indicadores compuestos (Carreño 2006; Carreño et al. 2007).

En la evaluación holística se asume que el R_i puede ser hasta dos veces el R_F . Esto quiere decir que en el caso hipotético de tener condiciones socioeconómicas ideales y por lo tanto que no existe fragilidad social ni falta de resiliencia, el factor de impacto sería cero y entonces el Riesgo Integral tendría el mismo valor del Riesgo Físico. Mientras que si las condiciones socioeconómicas son adversas, el factor de impacto tendría como valor máximo 1.0, y por lo tanto el Riesgo Integral sería dos veces el valor del Riesgo Físico. Esta presunción se hace con el objetivo de reflejar que las características socioeconómicas amplifican la magnitud de los desastres. El objetivo de la evaluación holística es hacer manifiesto que el impacto de las pérdidas se debe a la existencia de ciertas condiciones desfavorables y mostrar cómo estas condiciones realmente pueden tener influencia en el agravamiento de los efectos directos que pueden presentarse (daños físicos).

El índice de riesgo físico, R_F , para esta evaluación se calculó con base en los resultados de la evaluación probabilista multiamenaza, desarrollada para el Atlas de Riesgo de Colombia (siguiendo la metodología utilizada a nivel mundial (UNGRD, 2018). La Pérdida Anual Esperada (PAE) debido a las amenazas consideradas en el atlas (terremoto, tsunami, inundaciones y ciclones tropicales -viento y marea de tormenta-) tiene en cuenta las pérdidas económicas como indicador de riesgo físico y de la misma manera se podrían evaluar otros daños físicos como fallecidos o heridos. Para obtener el R_F , la

PAE es transformada a valores entre 0.0 y 1.0, donde 1.0 es el valor máximo que corresponde a valores de PAE mayores a 10 por mil (o 1%). El R_F se calculó mediante la ecuación:

$$R_F = \sum_{i=1}^p F_{RFi} \cdot w_{RFi} \quad (2)$$

donde F_{RFi} corresponde a valores de PAE transformados, w_{RFi} es el peso para cada factor, que para esta evaluación es convenientemente el mismo para todos los factores y p es el número total de amenazas consideradas. El coeficiente de agravamiento para obtener el factor de impacto ($1+F$) se calculó de la siguiente forma:

$$F = \sum_{i=1}^m F_{FSi} \cdot w_{FSi} + \sum_{j=1}^n F_{FRj} \cdot w_{FRj} \quad (3)$$

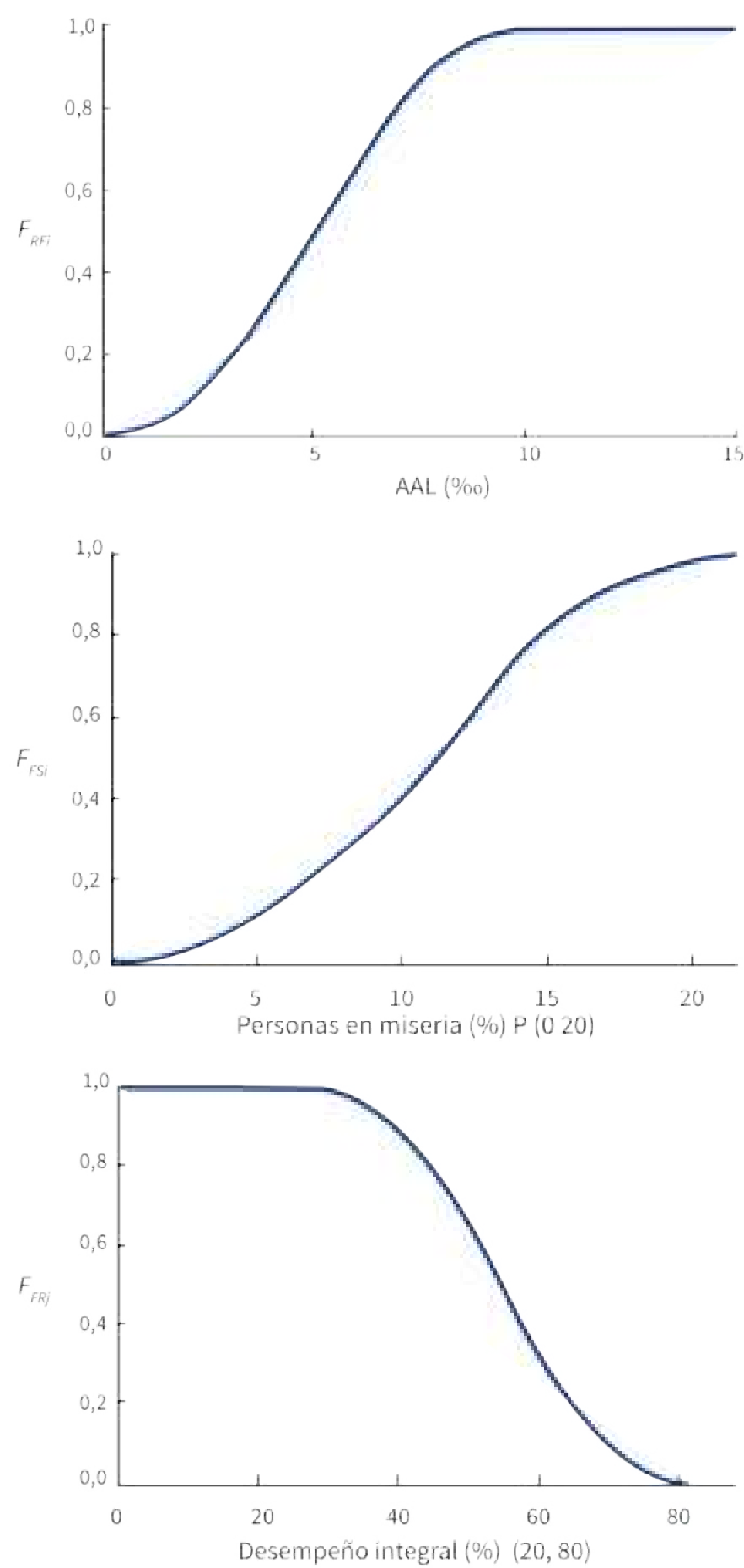
donde F_{FSi} y F_{FRj} son los factores de agravamiento por fragilidad social y falta de resiliencia, w_{FSi} y w_{FRj} son los pesos asociados a cada factor i y j . Debido al alcance nacional de esta evaluación, donde un proceso de consenso de actores e interesados es poco factible, se consideró apropiado asignar el mismo peso a todos los factores; m y n son el número total de factores para fragilidad social y falta de resiliencia, respectivamente. Para este caso, se utilizaron ocho descriptores para capturar las condiciones de fragilidad social y otros ocho para capturar la falta de resiliencia. Los descriptores se obtuvieron de bases de datos nacionales.

Cada uno de los factores utilizados para el cálculo del Riesgo Integral captura diferentes aspectos de la sociedad y está medido en unidades diferentes. Por esta razón, se requiere de un proceso de normalización que permita estandarizar los valores de los descriptores para convertirlos en factores conmensurables. En este caso, se utilizaron funciones de transformación para

estandarizar los descriptores seleccionados de fragilidad social y falta de resiliencia. Algunas de estas funciones se presentan en la *Figura A.2-2*. Los factores y sus unidades, así como los valores $[min, max]$ son presentados en las abcisas. De acuerdo con la naturaleza de cada descriptor, la forma y las características de las funciones varían. Esto significa que las funciones utilizadas para la transformación de los descriptores de fragilidad social tienen una forma creciente, mientras que las utilizadas para la resiliencia tienen una forma decreciente, lo que da cuenta en efecto del inverso o la falta de resiliencia. Por lo tanto, en el primer caso, un valor alto del indicador significa una mayor contribución al agravamiento (e.g. el indicador de personas en condiciones de miseria, que en caso de ser un valor alto contribuye a agravar o empeorar las la situación adversa). En el segundo caso, un valor alto del indicador significa una menor influencia en el agravamiento (e.g. el indicador de desempeño integral, donde un valor alto significa una mayor resiliencia, y por lo tanto, no contribuye al agravamiento de situaciones adversas).

Las funciones de transformación pueden ser entendidas como funciones de distribución de probabilidad del riesgo y del agravamiento, o como funciones de pertenencia del análisis comparativo de alto riesgo o alto agravamiento alto, desde la perspectiva de la lógica y los conjuntos difusos (fuzzy logic and sets).

Figura A2-2. Ejemplo de funciones de transformación



Los valores en las abcisas de las funciones de transformación corresponden a los valores de los descriptores o indicadores base (valores de las bases de datos) mientras que las ordenadas corresponden a los valores finales normalizados de cada factor; ya sea relacionado con el riesgo físico o con los factores de agravamiento. En todos los casos, los valores quedan entre 0.0 y 1.0. Dado que las funciones de transformación son funciones de pertenencia, para niveles de alto alto y alto factor de agravamiento, 0.0 corresponde a no pertenencia (o nula contribución al riesgo y al factor de agravamiento). Los valores límites, denotados como x_{min} y x_{max} están definidos a través de criterio experto en cada caso e información obtenida de desastres ocurridos. Los pesos relativos

w_{FSi} y w_{FRj} que están asociados con la importancia de cada uno de los factores en el cálculo del índice, como se mencionó anteriormente, para esta evaluación se definieron convenientemente como del mismo valor; es decir, se asignó la misma importancia o contribución a cada uno de los indicadores seleccionados para evitar controversias posiblemente irrelevantes para efectos de los resultados. No obstante, podrían modificarse con técnicas como el proceso analítico jerárquico, la asignación de puntajes, la aplicación de principales componentes, u otras técnicas de análisis multicriterio.

Es importante señalar que la metodología de evaluación holística del riesgo aparte de tener la finalidad de dar cuenta del riesgo

de una manera integral, considerando aspectos sociales, económicos, de resiliencia, entre otros, tiene como objetivo facilitar la identificación de los factores que contribuyen más al agravamiento del riesgo y que son impulsores de ese tipo de construcción social. Esto permite orientar los esfuerzos de intervención o reducción del riesgo desde la perspectiva del desarrollo, contribuyendo a la sostenibilidad y la transformación. El ranking que se obtiene con este enfoque metodológico permite además priorizar aquellos casos de mayor riesgo relativo y a confirmar que sólo en la medida que se intervienen las condiciones subyacentes del riesgo físico es factible una reducción integral del riesgo de desastres.

Referencias

Aguilera, M. (2004). La Mojana: riqueza natural y potencial económico. Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional, 48. <http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER-48.pdf>

Alcaldía de Manizales (2002). Microzonificación sísmica de la ciudad de Manizales. Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles – CIMOC, Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos – CEDERI. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental . Universidad de los Andes, Bogotá.

Alcántara-Ayala, I (2016). On the multi-dimensions of Integrated Research on Landslide Disaster Risk. In: Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice (Aversa, S., Cascini, L., and C. Scavia (eds,)). CRC Press, Balkema, Taylor & Francis Groups, 1, pp 155-168

Ambraseys, N. (2010). ‘A note on transparency and loss of life arising from earthquakes’, JSEE Vol. 12 No.3, 2010.

Anaya J.A. (2009). Estimación Mensual de Emisiones por Biomasa Quemada para Colombia Basado en Imágenes de Satélite. Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá. Madrid.

Anbalagan, R. (1992). Terrain evaluation and landslide hazard zonation for environmental regeneration and land use planning in mountainous terrain. Proceedings of the sixth International Symposium on Landslides, Christchurch.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS. (2010). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente, NSR-10. Bogotá, AIS, 2010

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica-AIS. (2009). Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Comité AIS-300. Bogotá D.C., Colombia.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica-AIS. (1996). Estudio general de amenaza sísmica de Colombia. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica; Colombia. Universidad de Los Andes; Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química-Ingeominas. Santafé de Bogotá, CO; oct. 1996

Auker, M. R., Sparks, R. S. J., Siebert, L., Crosweller, H. S. & Ewert, J. 2013. A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record. Journal of Applied Volcanology, 2, 1-24.

Banco Mundial (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia. Un aporte para la construcción de políticas públicas. Washington.

Barbat, A, Cardona, OD (2003). Vulnerability and disaster risk indices from engineering perspective and holistic approach to consider hard and soft variables at urban level, BID/IDEA Programa de Indicadores para la Gestión de Riesgos, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. <http://idea.unalmzl.edu.co>

Bernal, G.A. (2010). VHASt. A computer program for probabilistic volcanic hazard assessment. Bogotá, D.C., Colombia. Available at: <http://>

www.vhast.org

Bernal, G., y Cardona, O.D. (2011). Probabilistic hazard and risk analyses of the Galeras Volcano in Nariño, Colombia. Technical Note Ingeniar Ltda. Bogotá, D.C., Colombia.

Bernal, G., Cardona, O.D. (2017). Sistema Automático de Evaluación de Daños Post-Terremoto de Bogotá. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Barranquilla.

Bernal, G., Escovar, M.A., Zuloaga, D., Cardona, O.D. (2017). Chapter 13. Agricultural Drought Risk Assessment in Northern Brazil: An Innovative Fully Probabilistic Approach in: Reduction of Vulnerability to Disasters: from Knowledge to Action. ISBN: 978-85-7656-050-0 <https://preventionroutes.weebly.com>

Bernal, G., Salgado-Gálvez, M.A., Zuloaga, D., Tristanco, J., González, D., Cardona, O.D. (2017) Integration of Probabilistic and Multi-Hazard Risk Assessment Within Urban Development Planning and Emergency Preparedness and Response: Application to Manizales, Colombia. International Journal of Disaster Risk Science. 8(3): 270-283.

Bernal, G., Tristanco, J., Cardona, O.D. (2016). SISMan LISA: Seismic Information System of Manizales – Laboratory of Automatic Seismic Instrumentation. International Conference on Urban Risks, Lisbon.

Birkmann J., Cardona O.D., Carreño M.L., Barbat A.H., Pelling M., Schneiderbauer S., Kienberger S., Keiler M., Alexander D., Zeil P. and Welle T. (2013). ‘Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework’, Nat. Hazards 67:193-211

Brabb, E. E.; Pampeyan, E. H. y Bonilla, M. G. (1972). Landslide susceptibility in San Mateo County, California, U.S. Geological Survey. Miscellaneous Field Studies Map 360.

Brown, S., Loughlin, S., Sparks, R., Vye-Brown, C., Barclay, J., Calder, E., . . . Valentine, G. (2015). Global volcanic hazard and risk. In S. Loughlin, S. Sparks, S. Brown, S. Jenkins, & C. Vye-Brown (Eds.), Global Volcanic Hazards and Risk (pp. 81-172). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781316276273.004

Brunner, G., & Bonner, V. (1994). Hydrologic Engineering Center - River Analysis System HEC-RAS (TP-147). US Army Corps of Engineers.

Burton C.G. and Silva V. (2014) ‘Integrated risk modelling within the Global Earthquake Model (GEM): Test case application for Portugal’, Proceedings of the Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Istanbul,

Cadena, M.C. (2010). Amenazas Costeras. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, Subdirección de Meteorología, Bogotá, D.C.

Caicedo, J.H., B. Martinelli, Hj. Meyer, J. Reyna (1996a). Simulaciones numéricas de propagación de tsunami para La costa pacífica de Colombia. Memorias, X Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar, Comisión Colombiana de Oceanografía, 11 pp., Bogotá.

Caicedo, J.H., B. Martinelli, Hj. Meyer, R. Steer (1996b). “Efecto de tsunami del Mar Caribe en la Costa de Colombia”. Memorias, X Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar, Comisión Colombiana de Oceanografía, 11 pp., Bogotá.

Campos, A, et al. (2009). Articulando la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático en el sector agropecuario. Lima, Perú: Secretaría General de la CAN-PREDECAN.

Cardona O.D. (2001) Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

Cardona O.D. (2007). Curriculum Adaptation and Disaster Prevention in Colombia. In: Lidstone J., Dechano L.M., Stoltman J.P. (eds) International Perspectives on Natural Disasters: Occurrence, Mitigation, and Consequences. Advances in Natural and Technological Hazards Research, vol 21. Springer, Dordrecht.

Cardona, O.D. (2009). La gestión financiera del riesgo de desastres: Instrumentos financieros de retención y transferencia para la Comunidad Andina. PREDECAN, Lima, Perú.

Cardona O.D. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), eds. C.B. Field et al. (Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012) pp. 65-108.

Cardona, O.D.(2016a). Documento con la evaluación probabilista del riesgo de inundación en la Región de La Mojana con alternativas de intervención al dique marginal. Producto F de consultoría. Fondo de Adaptación.

Cardona, O.D. (2016b). Documento con el análisis costo-beneficio de las alternativas seleccionadas por el Fondo Adaptación y Documento con las recomendaciones al Fondo Adaptación sobre las alternativas de intervención para reducción de la amenaza y/o de la vulnerabilidad con su respectiva combinación de medidas estructurales y no estructurales, conforme a los lineamientos suministrados por el Fondo. Productos G y H de consultoría. Fondo de Adaptación.

Cardona O.D. (2018). Evaluación de adaptaciones cambio climático en los países RIOCC: Capítulo Deslizamientos. Proyecto RIOCCADAPT. Universidad de Castilla la Mancha, AEI, (en proceso).

Cardona, O. D., Bernal, G., Escovar, M. A., Villegas, C., Brenes, A., & Velásquez, C. (2017). Perfil de riesgo por sequía e inundación de Uruguay – Análisis retrospectivo de consecuencias y evaluación probabilista de la amenaza. Preparado para el Banco Interamericano de Desarrollo BID. Bogota: Consorcio INGENIAR – CIMNE.

Cardona, O.D., Bernal, G.A., Ordaz, M.G., Salgado-Galvez, M.A., Singh, S.K., Mora, M.G., Villegas, C.P (2015). Update on the Probabilistic Modelling of Natural Risks at Global Level: Global Risk Model – Global Earthquake and Tropical Cyclone Hazard Assessment. Disaster Risk Assessment at Country Level for Earthquakes, Tropical Cyclones (Wind and Storm Surge), Floods, Tsunami and volcanic Eruptions. CIMNE & INGENIAR Consortium. Background paper for GAR15. Barcelona-Bogotá, D.C., Colombia.

Cardona, O.D., Bernal, G.A., Ordaz, M.G., Salgado-Galvez, M.A., Singh, S.K, Mora, M.G., Yamín, L.E. y Barbat, A.H. (2013). Probabilistic Modelling of Natural Risks at Global Level: Global Risk Model. Global Earthquake and cyclone models and Disaster Risk Assessment of countries for seismic, cyclone and flood hazards. Consortium CIMNE, INGENIAR, ITEC AND EAI. Background paper for GAR13. Barcelona, España – Bogotá, D.C., Colombia .

Cardona, O.D., Carreño, M.L., Bernal, G., Salgado-Galvez, M.A., Suarez, D., Barbat, A.H. (2018). Decision-making based on Holistic Seismic Risk Assessment, including Socioeconomic, Resilience and Governance Risk Drivers. 16th European Conference on Earthquake Engineering. Thessaloniki 18-21 Junio.

Cardona, O.D., Ordaz, M.G., Mora, M.G., Salgado-Galvez, M.A , Bernal, G.A , Zuloaga-Romero D., Marulanda, M.C., Yamín, L. Y González D.(2014). Global risk assessment: a fully probabilistic seismic and tropical cyclone wind risk assessment. International Journal of Disaster Risk Reduction. 10(B): 461-476.

Cardona, O.D, Ordaz, M.G., Reinoso, E., Yamín, L.E., Barbat, A.H. (2012). CAPRA- Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment: International Initiative for Risk Management Effectiveness, in Proceedings of 15WCEE, Lisbon

Cardona, O.D., Wilches-Chaux, G. García, X., Mansilla, E., Ramírez, F. y Marulanda, M.C. (2004). Estudio sobre desastres ocurridos en Colombia: Estimación de pérdidas y cuantificación de costos. Banco Mundial, Agencia Colombiana de Cooperación Internacional, Departamento Nacional de Planeación.

Carmona, C., A. Belward, et al. (2005): Characterizing interannual variations in global fire calendar using data from Earth observing satellites. *Global Change Biology*, 11: 1537-1555.

Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. and P. Reichenbach, (1995): GIS-based Techniques for Mapping Landslide Hazard, *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards* 38. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer.

Carreño ML (2006). Innovative techniques for seismic risk assessment and management in urban centers: Ex ante and ex post actions (Técnicas innovadoras para la evaluación del riesgo sísmico y su gestión en centros urbanos: Acciones ex ante y ex post). Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Spain.

Carreño M.L., Cardona O.D. and Barbat A.H. (2007). ‘Urban seismic risk evaluation: a holistic approach’, *Nat. Hazards*. 40(1):137-172.

Carreño M.L., Cardona O.D. and Barbat A.H. (2012). New methodology for urban seismic risk assessment from a holistic perspective. *Bull. of earthq. eng.* 10(2):547-565.

Carreño ML, Cardona OD, Barbat AH, Suarez DC, Perez MP, Narvaez L (2017). Holistic Disaster Risk Evaluation for the Urban Risk Management Plan of Manizales, Colombia *International Journal of Disaster Risk Science* 8(3): 258-269.

CEPAL- BID (2007). Información para la gestión de riesgo de desastres. Estudio de caso de cinco países. Colombia. Comisión Económica para América Latina – Banco Interamericano de Desarrollo.

Cervi, F., Berti, M., Borgatti, L., Ronchetti, F., Manenti, F. and Corsini, A., 2010: Comparing predictive capability of statistical and deterministic methods for landslide susceptibility mapping: a case study in the northern Apennines (Reggio Emilia Province, Italy), *Landslides* 7, 433–444.

Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Hidrologia aplicada.

CIACUA-CEDERI (2006). Estudio para proponer la metodología para la evaluación, zonificación y reducción de riesgos por inundaciones y avenidas torrenciales y su articulación con los POT, aplicación de zonificación de amenazas en un caso piloto del Distrito de Bogotá.

Clark, C. (1945). Storage and the unit hydrograph. *American Society of Civil Engineers Transactions*, (100), 1419–1446.

Comisión Colombiana del Océano - CCO (2017). Política Nacional del Océano y de los Espacios Costeros, PNOEC, Bogotá, D.C.

Comisión Colombiana del Océano - CCO (2010). Plan Nacional para la Gestión del riesgo por Tsunami – PNGRT. Comité Técnico Nacional de Alerta por Tsunami – CTNAT de la Comisión Colombiana del Océano, Secretaría Técnica Permanente del Comité Técnico de Alerta por Tsunami.

Comité AIS-300. (2009). Estudio general de amenaza sísmica de Colombia 2009. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Corporación OSSO (2016). Diagnóstico del “estado del arte” en el conocimiento de riesgos por tsunamis. Informe Final. Convenio N96677-PPAL001-285-2015. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. Cali.

Corporación OSSO (2014). Estudio para determinar la amenaza, vulnerabilidad y riesgo generados por sismos y tsunamis- islas de San Andrés y Providencia. Informe final para Coralina.

Crozier M.J. and T. Glade, 2004: Landslide hazard and risk: Issues, concepts and approach. In: Landslide Hazard and Risk [Glade, T., Anderson, M., and M.J. Crozier (eds.)], Wiley, pp 2-40.

Cruden, D.M. (1991). A simple definition of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. N.43. Paris

DANE. (2005). Censo general de población. Bogotá: Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE.

De Bono, A. Y Chatenoux, B. (2015). A Global Exposure Model for GAR2015, UNEP-GRID. Background paper for GAR15.

Decreto No. 2811 de 1974. Presidencia de la República.

Decreto 1277 de 1994. Ministerio del Medio Ambiente.

Decreto No. 321 de 1999. Diario Oficial de la República de Colombia. 22 de Febrero de 1999.

Del Campo Parra, Álvaro (2011). Incendios de la Cobertura Vegetal en Colombia. Universidad Autónoma de Occidente, Cali.

Departamento Nacional de Planeación - DNP (2016). Documento CONPES 3868. Política De Gestión Del Riesgo Asociado Al Uso De Sustancias Químicas.

Dimar-CCCP. 2013. Estudio de la Amenaza por Tsunami y Gestión del Riesgo en el Litoral Pacífico Colombiano. Dirección General Marítima-Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico . Ed. Dimar. Serie Publicaciones Especiales Vol. 8. San Andrés de Tumaco, Colombia. 129 pp.

Espinosa A. (2003). La sismicidad histórica en Colombia. Revista Geográfica Venezolana, Vol. 44 (2), 271-283.

FAO (1986). Wildland fire management terminology. Forest Resources Development Branch. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.

Flórez, A. (2003). Colombia: Evolución de sus relieves y modelados. Universidad Nacional de Colombia. Red de Estudios de Espacio y Territorio, RET. Unibiblos. Bogotá, D.C.

Florez A., y LA ROTTA, E. (1986). “Riesgos inherentes a los fenómenos volcano-glaciares en la cordillera Central colombiana”. Rev. Cartográfica, IPCH, 49/50: 159-170.

França, S., 2010: Estudio comparativo de métodos para la evaluación de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales: Aplicación al Pirineo Oriental. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.

Getzin, S. (2002). Formation and Consequences of Fire-Induced Structures in Tropical and Sub-Tropical savannas. Germany: Institute for Biochemistry and Biology University of Potsdam.

Guzzetti, F., Modini, A., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., and K.T. Chang, 2012: Landslide inventory maps: new tools for an old problem. *Earth Sci Rev*, 112, 42–66.

Hincks, T. K., Komorowski, J.-C., Sparks, S. R. & Aspinall, W. P. 2014. Retrospective analysis of uncertain eruption precursors at La Soufrière volcano, Guadeloupe, 1975–77: volcanic hazard assessment using a Bayesian Belief Network approach. *Journal of Applied Volcanology*, 3:3, pp.26.

IDEAM, Amenazas Inundación: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>

IDEAM (1997): Estimación de la necesidad de atender el abastecimiento de agua a la población urbana en Colombia. Fenómeno El Niño 1997–1998. Santa Fe de Bogotá D.C., diciembre-1997.

IDEAM, (1997): Posibles efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno El Niño en el período 1997-1998 en Colombia. Santa Fe de Bogotá D.C., Julio-1997, 39 páginas + anexos.

IDEAM, (1997): Preparémonos para recibir el fenómeno El Niño en los municipios colombianos. Santa Fe de Bogotá D.C., Agosto-1997, 114 páginas.

IDEAM (1998): Desarrollo del actual fenómeno cálido del Pacífico 1997-98, su efecto hidroclimático sobre el país, impactos socioeconómicos y proyección. Santa Fe de Bogotá, Marzo-1998 .

IDEAM (1998): El Medio Ambiente en Colombia. 495 pp. Publicación especial de IDEAM. Ed. OP Gráficas S.A. Bogotá, Colombia.

IDEAM, (1998): Posibles efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno Frío del Pacífico (La Niña) en Colombia en el segundo semestre de 1998 y primer semestre de 1999. Santa Fe de Bogotá, Agosto-1998, 88 páginas + anexos.

IDEAM (2001). Geomorfología y susceptibilidad a la inundación del Valle fluvial del Magdalena: sector Barrancabermeja – Bocas de Ceniza. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Subdirección de Geomorfología y Suelos.

IDEAM (2005). Atlas climatológico de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales República de Colombia

IDEAM (2010). Estudio Nacional del Agua Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Bogotá: IDEAM.

IDEAM-DNP (2011). Evaluación de la capacidad del IDEAM para producir la información hidrológica, meteorológica y ambiental que necesita el país. Producto 4. Informe final y bases de datos. Econometría Consultores. Bogotá, D.C.

IDEAM (2011). Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal – Escala 1_100.000. Bogotá, D.C. 109 pag.

IDEAM (2012). Memoria técnica: Evaluación, análisis y seguimiento a las afectaciones por inundaciones asociadas al fenómeno de la niña 2010-2011. Instituto de Estudios Ambientales y Meteorológicos – IDEAM, Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC y Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE.

IDEAM (2015) Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá, D. C. 496 páginas.

IDIGER. Riesgo tecnológico. Disponible en: <http://www.idiger.gov.co/rtecnologico>

Ingeniar Risk Intellingence (2017). Revealing the latent disasters. Bogota

Ingeominas y Ideam (2010). Mapa de categorías de amenaza relativa por movimientos en masa de Colombia, escala 1:500.000. Bogotá.

IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. In: Field CB, Barros V, Stocker TF, Qin D, Dokken DJ, Ebi KL, Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner G-K, Allen SK, Tignor M, Midgley PM (eds) Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation, a special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Jaramillo N. (2014). Evaluación holística del riesgo sísmico en zonas urbanas y estrategias para su mitigación. Aplicación a la ciudad de Mérida-Venezuela. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Kirpich, Z. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. Civil Engineering, 6(362).

Kull, D., & Feldman, A. (1998). Evolution of Clark's Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff. Journal of Hydrologic Engineering, 3(1), 9–18.

Leibovich, J., Guerrero, P., Llinás, G., Morales, A., Pereira, M. (2015). Documento de diagnóstico de la problemática con el manejo del recurso hídrico de La Mojana.

Londoño, J.P., 2016: Modelización de problemas ambientales en entornos urbanos: Deslizamientos de tierra en ciudades andinas. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. Consultado el 12 de febrero de 2018, <http://www.tdx.cat/handle/10803/398245>

Loughlin, S., Vye-Brown, C., Sparks, R., Brown, S., Barclay, J., Calder, E., Valentine, G. (2015). An introduction to global volcanic hazard and risk. In S. Loughlin, S. Sparks, S. Brown, S. Jenkins, & C. Vye-Brown (Eds.), Global Volcanic Hazards and Risk (pp. 1-80). Cambridge: Cambridge University Press. DOI:10.1017/CBO9781316276273.003

Marzocchi, W. & Bebbington, M. S. 2012. Probabilistic eruption forecasting at short and long time scales. Bulletin of Volcanology, 74, 1777-1805.
Marulanda, M.C. (2013). Modelación probabilista de pérdidas económicas por sismo para la estimación de la vulnerabilidad fiscal del estado y la gestión financiera del riesgo. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

Marulanda, M.C. (2014). Evaluación del riesgo de Manizales con fines de seguros y protección financiera de inmuebles públicos y privados). Programa de Gestión Integral del Riesgo de Desastres de Manizales, Informe técnico. Gestión del Riesgo—Manizales. CORPOCALDAS.

Marulanda, M.C., Cardona O.D. (2006). Análisis del impacto de desastres menores y moderados a nivel local en Colombia. ProVention Consortium, La RED. Disponible en español e inglés en: <http://www.desinventar.org/sp/proyectos/articulos/>

Marulanda, M.C., Cardona, O.D., Barbat, A.H. (2009). Robustness of the holistic seismic risk evaluation in urban centers using the USRi. Natural Hazards 49(3): 501–516.

Marulanda, M.C., Cardona, O.D., Marulanda, P. y Carreño, M.L. (2017). Evaluating Risk from a Holistic Perspective to Improve Resilience: The United Nations Evaluation at Global Level. In: The 2nd International workshop on Modelling of Physical, Economic and Social Systems for Resilience Assessment. Ispra, Italy.

Marulanda, M.C., Cardona, O.D., Mora, M.G., and Barbat, A.H. (2014). Design and implementation of a voluntary collective earthquake insurance policy to cover low-income homeowners in a developing country. *Natural Hazards* 74(3): 2071–2088.

Marulanda, M.C. Cardona, O.D., Ordaz, M., Barbat, A.H. (2008) La gestión financiera del riesgo desde la perspectiva de los desastres: evaluación de la exposición fiscal del estado y alternativas de instrumentos financieros de retención y transferencia del riesgo. Monografía, CIMNE IS-61. Barcelona, España.

Marulanda M.C., Carreño M.L., Cardona O.D., Ordaz M., and Barbat, A.H. (2013). ‘Probabilistic earthquake risk assessment using CAPRA: application to the city of Barcelona, Spain’. *Nat. Hazards*. 69:59-84.

MAVDT (2002). Plan Nacional de Prevención control de incendios forestales y restauración de áreas afectadas. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Dirección de Ecosistemas. Preparado por la Comisión Nacional Asesora para la Prevención y Mitigación de Incendios Forestales. Bogotá, D.C.

MAVDT (2003). Desertificación y Sequía. Primera Jornada Nacional de Sensibilización. Memorias. Dirección de Ecosistemas. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación y la Sequía para America Latina y el Caribe y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

Metternich, G., Hurni, L. and R. Gogu, 2005: Remote Sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments, *Remote Sensing of Environment*, 98 (2-3), 284-303.

Ministerio del Medio Ambiente. (1999). Identificación de Prioridades de Gestión Ambiental en Ecosistemas de Páramos, Sabana, Zonas Áridas y Semiáridas y Humedales de Agua Dulce. Geoingeniería Ltda.

Ministerio del Medio Ambiente. (2002). Política Nacional para Humedales Interiores de Colombia. Encontrado en http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Políticas/polit_nal_humedales_int_colombia.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. MADS. (2014). Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de Cuencas hidrográficas.

Mo, K.C. and Lettenmaier, D.P., 2016. Precipitation Deficit Flash Droughts over the United States. *Journal of Hydrometeorology*, 17(4): 1169-1184.

Montealegre, J.E. (2014). Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico. Instituto De Hidrologia, Meteorologia Y Estudios Ambientales, IDEAM - Subdirección de Meteorología, Bogotá.

Montealegre, J.E., (2007): Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño Y La Niña en Colombia. Contrato No 063 IDEAM – Bogotá, Colombia.

Montealegre J.E., (2009): Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. Publicación especial de IDEAM. Bogotá – Colombia.

Niglio, O., Valencia, M (2013) Evolución de la ingeniería sísmica, presente y futuro: caso Colombia e Italia. Memorias del VI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, organizado por la Universidad Industrial de Santander (UIS), UPB Seccional Bucaramanga y la Asociación de Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bucaramanga , 29 al 31 de mayo de 2013.

Nilsen, T. y Wright, R. H. (1979). Relative Slope Stability and Land-Use Planning; Selected Examples form San Francisco Bay Region, California. U. S. Geol. Surv. Prof. Paper. 944.

Norwegian Geotechnical Institute and Geoscience Australia , NGI-GA (2014). Tsunami methodology and result overview. Background paper for GAR 2015.

Núñez, R. (2010). Informe de Misión a Colombia 21-22 de Septiembre de 2010 (Anexo 3). UNESCO, Intergovernmental Oceanographic Commission.

Olaya, J. C. (2015). Flood vulnerability assessment for agricultural cultivated plants – Methodology and testing in La Mojana region (Colombia). Technische Universitaet Dresden.

OPS (2005) El sector salud frente al riesgo volcánico: Guía de preparativos de salud frente a erupciones volcánicas. Organización Panamericana de la Salud. Quito, Ecuador.

Ordaz, M. (2000). Metodología para la Evaluación del Riesgo Sísmico Enfocada a la Gerencia de Seguros por Terremoto. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ortiz, J.C. (2007). Huracanes y tormentas tropicales en el Mar Caribe colombiano desde 1900. Boletín Científico CIOH N. 25, ISSN 0120-0542, 54-60.

Páramo, G.E. (1999). Manual de Métodos y Procedimientos para el Sistema de Monitoreo de Áreas Forestales del Pacífico Colombiano”. Ministerio del Medio Ambiente-CONIF, PenClips Editores. Santafé de Bogotá.

Páramo, G.E. (2000). “Criterios, variables e indicadores para el monitoreo de áreas forestales en aprovechamiento”. En: Serie de Documentación No. 42 CONIF, PenClips Editores. Santafé de Bogotá.

Páramo, G.E. (2007). Análisis, diagnóstico y elaboración del mapa de susceptibilidad a los incendios de la Cobertura Vegetal en Colombia. Bogotá: Reporte final del contrato de consultoría N.º 2062372 en el marco del convenio Ministerio de Ambiente, vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) – Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo (FONADE). 177 p.

Pesaresi, Martino, Sérgio Freire. (2014). BUREF Pesaresi, Martino, Sérgio Freire. 2014. BUREF – Producing a Global Reference Layer of Built-up by Integrating Population and Remote Sensing Data.

Peters, J., & Easton, D. (1996). Runoff Simulation Using Radar Rainfall Data. Water Resources Bulletin, 32(4), 753–760.

PNUD (1991). Vulnerabilidad y evaluación del Riesgo. Programa de Entrenamiento para el Manejo de Desastres.

Podestá, G., Silva, V., Saulo, C., Báez, J., Pulwarty, R., Stefanski, R., Heim, R. (2018). Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades Andinas (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional

Quijano, J. A., Jaimes, M. A., Torres, M. A., Reinoso, E., Castellanos, L., Escamilla, J., & Ordaz, M. (2015). Event-based approach for probabilistic agricultural drought risk assessment under rainfed conditions. Natural Hazards, 76(2), 1297–1318. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1550-4>

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2011). FAO cropwater productivity model to simulate yield response to water AquaCrop. In

Reference Manual of AQUACROP (p. 56). Retrieved from <http://www.fao.org/nr/water/docs/aquacropv31pluschapter1.pdf>

Ramírez, J.E. (1975). Historia de los terremotos en Colombia. Segunda edición, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá. 250 p.

Rao, A., & Kao, S.-C. (2006). Statistical Analysis of Indiana Rainfall Data. West Lafayette, IN.

Remondo, J., Bonachea, J., y A. Cendrero, 2005: A statistical approach to landslide risk modeling at basin scale: From landslide susceptibility to quantitative risk assessment. *Landslides*, 2, 321–328.

Rudari, R., Gabellani, S. Y Delogu F. (2014). A simple model to map áreas prone to Surface waster flooding. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 10(B):428-441.

Rudari, R., Silvestro F., Campo L., Rebora N., Boni, G. Y Herold, C. (2015). Improvement of the Global Flood Model for the GAR15 CIMA Research Foundation and uNEP-GRID. Savona – Geneva. Background paper for GAR15.

Rudolph, E., Szirtes, S. (1911). Das kolumbianische Erdbeben vom 31. Januar 1906. *Gerlands Beiträge zur Geophysik*, Vol. XI, No. 1, Leipzig. “El terremoto colombiano del 31 de enero de 1906”, traducción parcial anotada, Hj. Meyer y Alba Paulsen de Cárdenas, Publicaciones Ocasionales del OSSO, No.1, Observatorio Sismológico del Suroccidente, Universidad del Valle, Cali.

Salgado-Gálvez M.A., Barbat A.H., Cardona O.D., Carreño M.L., Velásquez C.A. and Zuloaga D. (2014c). Urban seismic risk index for Medellín: a probabilistic and holistic approach. *Proceedings of the Second IRDR Conference*. Beijing, China.

Salgado-Gálvez M.A., Bernal G.A., Barbat A.H., Carreño M.L. and Cardona O.D. (2015b). Probabilistic estimation of annual lost economic production due to premature deaths because of earthquakes. *Hum. ecol. risk assess*. DOI: 10.1080/10807039.2015.1095072.

Salgado-Gálvez, M.A., Bernal, G.A., Cardona, O.D. (2015a). Evaluación probabilista de la amenaza sísmica de Colombia con fines de actualización de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería*.

Salgado-Gálvez M.A., Bernal G.A., Yamín L.E. and Cardona O.D. (2010). Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. *Rev. de ing.* 32:28-37. Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.

Salgado-Gálvez, M.A., Bernal, G.A., Zuloaga, D., Marulanda, M.C., Cardona, O.D. y Henao, S. (2017). Probabilistic Seismic Risk Assessment in Manizales, Colombia: Quantifying Losses for Insurance Purposes. *International Journal of Disaster Risk Science* DOI 10.1007/s13753-017-0137-6

Salgado-Gálvez MA, Bernal GA, Zuloaga D, Marulanda MC, Cardona OD, Henao S (2017). Probabilistic Seismic Risk Assessment in Manizales, Colombia: Quantifying Losses for Insurance Purposes. *International Journal of Disaster Risk Science* 8(3): 296-307.

Salgado-Gálvez M.A., Zuloaga D., Bernal G.A. and Cardona O.D. (2014b). Comparación de los resultados de riesgo sísmico en dos ciudades con los mismos coeficientes de diseño sismo resistente. *Rev. de ing.* 41:8-14. Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.

Salgado-Gálvez M.A., Zuloaga D., Bernal G.A., Mora M.G. and Cardona O.D. (2014a). Fully probabilistic seismic risk assessment considering local site effects for the portfolio of buildings in Medellín, Colombia. *Bull. of earthq. eng.* 12:671-695. DOI: 10.1007/s10518-013-9550-4.

Salgado-Galvez, M.A., Zuloaga, D., Henao, S., Bernal, G.A., Cardona, O.D. (2017). Probabilistic assessment of annual repair rates in pipelines and of direct economic losses in water and sewage networks: application to Manizales, Colombia. *Nat Hazards*. DOI 10.1007/s11069-017-2987-z

Salgado, M.A., Zuloaga, D. Velásquez, C.A., Carreño, M.L., Cardona, O.D., Barbat, A.H. (2016). Urban seismic risk index for Medellín, Colombia, based on probabilistic loss and casualties estimations. *Natural Hazards*, Volume 80, Issue 3. Pp. 1995-2021.

SEGOB (2011). Lineamientos de operación específicos del fondo de desastres naturales. SEGOB. DOF 31 de Enero de 2011. Sección III.

SGC (2017). Las amenazas por movimientos en masa de Colombia. Una visión a escala 1:100.000. ISBN 978-958-99528-8-7, Bogotá.

Simon, M., S. Plummer, F. Fierens, J.J. Hoelzemann, and O. Arino. 2004. Burnt area detection at global scale using ATSR-2: e GLOBSCAR products and their qualification (online). *J. Geophys. Res.* 109(D14), S02

Singh, V. P. (1988). *Hydrologic Systems*. (U. of California, Ed.). Prentice Hall.

Sistema de Información de Movimientos en Masa - Simma (s. f.) Recuperado de <http://simma.sgc.gov.co/#/>

Sistema Municipal Para la Atención de Desastres - SIMPAD, Universidad EAFIT, Integral, INGEOMINAS and Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, (1999). Instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de Medellín.

Sparks, R. S. J. (2003). Forecasting volcanic eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 210, 1- 15.

Sparks, R. S. J. & Aspinall, W. P. (2004). Volcanic activity: frontiers and challenges in forecasting, prediction and risk assessment. *The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics*. American Geophysical Union.

Sparks, R., Biggs, J. & Neuberg, J. (2012). Monitoring volcanoes. *Science*, 335, 1310-1311.

Sparks, R. S. J., Aspinall, W. P., Crosweller, H. S. & Hincks, T. K. (2013). Risk and uncertainty assessment of volcanic hazards. In: Rougier, J., Sparks, R. S. J. & Hill, L. *Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards*. Cambridge: Cambridge University Press, 364-397.

Springall, R. (1970). *Hidrología*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería UNAM.

Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66). Rome.

Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5), 821–833. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9105-4>

Tolis, S, Rosset, P., Wyss, M. (2013) Tolis, S, Rosset, P., Wyss, M. 2013. Detailed Building Stock at Regional Scale in Three Size Categories of Settlements for 18 Countries Worldwide. WAPMERR

Uhl, C. y Kauffman, J.B. (1990). “Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon”. *Ecology*, 71, 437-449.

Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres- UNGRD (2013). Plan Nacional De Gestión Del Riesgo De Desastres 2013-2025 “Una Estrategia de Desarrollo” (http://docs.wixstatic.com/ugd/a02d6e_1eff708014424892a113344def36a25c.pdf).

Unidad Nacional de Gestión del Riesgo - UNGRD (2017). Evaluación inicial sobre el status quo de los sistemas de alerta temprana contra la sequía en Colombia.

Unidad Nacional de Gestión del Riesgo - UNGRD (2018). Lo que usted debe saber sobre riesgo tecnológico. Bogotá, D.C.

Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres – UNGRD-IEMP. (2017). Lineamientos para el análisis de la vulnerabilidad social en los estudios de la gestión municipal del riesgo de desastres. Bogotá, D.C.

UNISDR (2009). Terminology on Disaster Risk Reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

UNISDR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2015) – Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015. Geneva, Switzerland.

UNISDR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2017) GAR Atlas: Unveiling Global Disaster Risk, Geneva, Switzerland.

Varnes, D.J (1958). Landslides types and processes, in Eckel, E.B (ed.) Landslides and Engineering Practice, Highway Res, Board Special Report 29, pp. 20-47.

Varnes, D.J (1978). Slope movements, types and processes, Landslides: Analysis and control, transportation research board, Spec. Rep. 176, 11-33 National Academy of Science, Washington.

Velandia, J.C. (2014). La Gestión del Riesgo de Desastres en las Inundaciones de Colombia: Una mirada crítica. Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Recursos Hídricos Universidad Católica de Colombia. Bogotá, D.C.

Velasco, E.R. y López, G.I. (2016). Marco Conceptual para Investigaciones Tsunamigénicas: Caso Litoral Pacífico Colombiano. Boletín de Geología. Vol. 38, N.4. Universidad Industrial de Santander. ISSN: 0120-0283. DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v38n4-2016005>

Wilhite, D.A.; and M.H. Glantz. 1985. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. Water International 10(3):111–120.



Reducir el riesgo
nuestra mejor **opción**

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres

Av. Calle 26 No. 92 - 32, Edificio Gold 4 - piso 2

Línea Gratuita Atención al Ciudadano: 01 8000 11 32 00

PBX: (57 1) 5529696

Bogotá D.C. - Colombia

www.gestiondelriesgo.gov.co

 @ungrd |  GestionUNGRD |  UNGRD Gestión del Riesgo de Desastres |  @ungrd_oficial