

Bases generales para el desarrollo de estudios de reducción de riesgos hidroclimáticos en ciudades

Lecciones aprendidas de la iniciativa
“Ciudades Emergentes y Sostenibles” ante el reto
del cambio climático en Latinoamérica y el Caribe

Eduardo Garcia · Ginés Suárez · Maricarmen Esquivel
Avelina Ruiz · Daniela Zuloaga · Ophelie Chevalier

Bases generales para el desarrollo de estudios de reducción de riesgos hidroclimáticos en ciudades —

Lecciones aprendidas de la iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles ante el reto del cambio climático en Latinoamérica y el Caribe

Eduardo García
Ginés Suárez
Maricarmen Esquivel
Avelina Ruiz
Daniela Zuloaga
Ophelie Chevalier

División de Cambio Climático (CCS), División de Medio Ambiente, Desarrollo Rural y Administración de Riesgos por Desastres (RND), División de Vivienda y Desarrollo Urbano (HUD), Banco Interamericano de Desarrollo



Catalogación en la fuente proporcionada por la Biblioteca Felipe Herrera del Banco Interamericano de Desarrollo

Bases generales para el desarrollo de estudios de reducción de riesgos hidroclimáticos en ciudades: lecciones aprendidas de la iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles ante el reto del cambio climático en Latinoamérica y el Caribe / Eduardo García, Ginés Suárez, Maricarmen Esquivel, Avelina Ruiz, Daniela Zuloaga, Ophelie Chevalier. p. cm. — (Monografía del BID ; 771)
Incluye referencias bibliográficas.

1. City planning-Environmental aspects-Latin America. 2. City planning-Environmental aspects-Caribbean Area. 3. Climatic changes-Latin America. 4. Climatic changes-Caribbean Area. 5. Sustainable development-Latin America. 6. Sustainable development-Caribbean Area. I. García, Eduardo. II. Suárez, Ginés. III. Esquivel, Maricarmen. IV. Ruiz, Avelina. V. Zuloaga, Daniela. VI. Chevalier, Ophelie. VII. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. VIII. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Medio Ambiente, Desarrollo Rural y Administración de Riesgos por Desastres. IX. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Vivienda y Desarrollo Urbano. X. Serie.

IDB-MG-771

CÓDIGOS JEL

Q54, Q56, O18, R11, R14, R58, D81

PALABRAS CLAVES

cambio climático, riesgo de desastres, amenazas naturales, ciudades, modelos

ABSTRACTO

Las aglomeraciones urbanas constituyen polos de concentración de riesgos y oportunidades para más del 80% de la población de Latinoamérica y el Caribe (ALC), y representan unidades de trabajo idóneas para llevar a cabo estudios de riesgos de origen natural. Este documento presenta directrices para realizar análisis cuantitativos de riesgos asociados a fenómenos hidroclimáticos y ligados al cambio climático en ciudades: inundaciones costeras, fluviales y por lluvias extremas, huracanes, vientos, erosión de playas y sequía urbana. Buena parte de la metodología presentada ha sido aplicada en la Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES) del Banco Interamericano de Desarrollo, un programa pionero que se ha desarrollado desde 2011 hasta 2018. El documento presenta numerosos ejemplos prácticos tomados de los trabajos de dicha iniciativa. Tras varios años de experiencia en la elaboración de análisis de riesgo de desastres y vulnerabilidad al cambio climático en ciudades emergentes de la región, este documento sistematiza las lecciones aprendidas de estos estudios en un conjunto de pautas metodológicas que pueden ayudar a guiar estudios futuros, incluidas un conjunto de buenas prácticas sobre cómo incorporar información de escenarios de cambio climático.

<http://www.labd.org>

Copyright © 2019 Inter-American Development Bank.

Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.



Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

DISEÑO GRÁFICO

Lots of Architecture – publishers

DIRECTORA EDITORIAL

Florencia Rodríguez

CEO

Pablo Gerson

EDITORA

Lisa Naudin

DISEÑADOR GRÁFICO

Guido Gordillo

Todas las imágenes y textos contenidos en esta publicación y exhibición fueron compendiados y cedidos por el BID.

Lots of Architecture –publishers no se hace responsable de las opiniones, datos y uso de referencias expuestas por los autores.

Agradecimientos —

Un especial agradecimiento a Sergio Lacambra, Alfred Grunwaldt, Hori Tsuneki, Ivonne Jaimes y Diego Arcia por todo el apoyo técnico en la revisión de este documento y a todos los colegas que colaboraron en su momento para hacer posible este trabajo, entre ellos David Wilk, David Maleki, Horacio Terraza, Melissa Barandiaran, Sandra López, Jennifer Doherty, Inés Ferreira, Martin Kerres, Ana Iju, Cristina Calderón Restrepo, Andrea García Salinas, Guy Edwards, Maria Fernanda Alva, Sohany Flores y Catalina Aguiar. Agradecemos al Fondo para el programa especial del Banco sobre energía sostenible y cambio climático (**Fondo SECCI BID**) por el financiamiento a través de la cooperación técnica **RG-T2652** —fortalecimiento de la resiliencia climática en las ciudades de la Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES)— que hizo posible la elaboración de este documento.

Este documento fue desarrollado por Eduardo García y el equipo del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IH Cantabria), bajo la coordinación de un equipo multidisciplinario del Sector de Cambio Climático y Desarrollo Sostenible (CSD). Agradecemos al grupo de profesionales en el BID y a los equipos de consultores que hicieron posible la elaboración de los análisis de riesgo de desastres y vulnerabilidad al cambio climático en ciudades emergentes de la región, y muy especialmente, al grupo de técnicos y funcionarios de los países, cuyo aporte fue invaluable durante el desarrollo de todos los estudios. Agradecemos a Florencia Servente y equipo por edición y traducción y a Florencia Rodríguez Gerson y equipo por el diseño gráfico.

Resumen ejecutivo

Las aglomeraciones urbanas constituyen polos de concentración de riesgos y oportunidades para más del 80% de la población de Latinoamérica y el Caribe (ALC), y representan unidades de trabajo idóneas para llevar a cabo estudios de riesgos de origen natural.

Este documento presenta directrices para realizar análisis cuantitativos y probabilistas de riesgos asociados a fenómenos hidroclimáticos y ligados al cambio climático en ciudades.

Inundaciones costeras, fluviales y por lluvias extremas, huracanes, vientos, erosión de playas y sequía urbana.

Buena parte de la metodología presentada ha sido aplicada en la Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES) del Banco Interamericano de Desarrollo, un programa pionero que se ha desarrollado desde 2011 hasta 2018. El documento presenta numerosos ejemplos prácticos tomados de los trabajos de dicha iniciativa.

Los estudios de riesgo comienzan por recopilar la información existente en diferentes ámbitos, desde el clima y la hidrología a las principales variables socioeconómicas, a la escala más detallada que esté disponible. También es necesario investigar las características y efectos de eventos catastróficos históricos, ya que aportan información útil para calibrar y validar los cálculos posteriores. Es de gran importancia caracterizar no sólo el clima actual y pasado, sino también el clima futuro, obtenido con las mejores herramientas disponibles que aporta la ciencia del cambio climático. En este sentido, es conveniente disponer de estimaciones a escala regional o incluso local, frente a las predicciones de gran escala proporcionados por el IPCC, que presentan un bajo nivel de detalle para los estudios de ciudades. Paralelamente, además de que el clima se considera un factor cambiante en los estudios de riesgo, también es necesario plantear escenarios de crecimiento urbano, ya que el clima futuro actuará también sobre la ciudad futura. Este ejercicio de elaboración de escenarios de crecimiento urbano* no responde a leyes científicas bien establecidas, sino que es resultado del proceso histórico de cada país y región, y debe determinarse en forma de envoltentes de caminos posibles, definidos con la colaboración de especialistas en la materia.

Una vez se cuenta con la información de partida, la primera etapa de los estudios de riesgos se centra en cuantificar las amenazas, es decir, los fenómenos físicos susceptibles de pro-

ducir daños. Esta es sin duda la parte más técnica del trabajo, para la que se requiere una combinación de procedimientos estadísticos y modelos numéricos que permiten resolver las ecuaciones que rigen los flujos de materia y energía implicados: la precipitación (o ausencia de ella), los caudales fluviales, el oleaje, el viento, el transporte de sedimentos, etc. Una primera clasificación de los estudios de riesgos suele basarse en las hipótesis que se aplican para definir la incertidumbre y tasa de ocurrencia de las fuentes de amenaza (enfoque determinista, pseudoprobabilista o totalmente probabilista), así como en las características de los modelos empleados para propagar dichas amenazas (modelos agregados, distribuidos, 1D, 2D o 3D). El objetivo final del apartado de análisis de amenazas es obtener de manera espacial la probabilidad de ocurrencia de la variable susceptible de producir daños: en el caso de las inundaciones, la profundidad máxima de agua y su velocidad; en el caso del viento su velocidad punta a nivel del suelo; en la erosión costera, el máximo retroceso de la orilla.

Después de caracterizar la amenaza, deben investigarse las características de la otra gran componente del riesgo: la vulnerabilidad. En este concepto se agrupan las características de todos los elementos susceptibles de sufrir daños debidos a un evento extremo: las personas, los edificios y todos los elementos que permiten el normal funcionamiento de una ciudad, es decir, su red de transporte, infraestructuras de energía, agua y comunicaciones, escuelas, hospitales, etc. La primera característica de todos los entes potencialmente vulnerables es su localización espacial; cuando una amenaza coincide en el espacio con elementos susceptibles de recibir daño se dice que estos elementos están expuestos, aunque de facto no se vean dañados. La exposición es la condición sine qua non para el riesgo, la posibilidad de que se produzcan daños en un cierto lugar; el hecho de que se materialicen o no dependerá de las propiedades del ente expuesto, más allá de su mera localización. Los factores de vulnerabilidad son dependientes de cada mecanismo de daño. En el caso de una vivienda que es afectada por una acumulación de lluvias, la vulnerabilidad viene dada por el valor

de los bienes y equipos situados en los sótanos y en la planta baja, las zonas que puede alcanzar el agua; por el contrario, en el caso de un viento huracanado, la vulnerabilidad dependerá del material y de la tipología constructiva de los tejados y paredes de cada tipo de vivienda. En el caso particular de personas, los factores de vulnerabilidad más importantes son el tiempo de aviso, la existencia de planes de evacuación y la proporción de niños, ancianos y personas con movilidad reducida.

Tras disponer de la amenaza y los factores de vulnerabilidad relevantes para cada fenómeno, se pueden definir curvas de daño que expresan la cantidad o proporción de daños asociados a un evento extremo, con respecto al valor total de los activos en riesgo. Asimismo, combinando los daños de varios eventos con diferente probabilidad de ocurrencia, se puede calcular la pérdida media anual asociada a un determinado fenómeno. Es habitual presentar los resultados de riesgos en una ciudad diferenciando los que son de naturaleza económica, y por tanto expresables en términos monetarios como un valor de reposición (USD/ha), de los que se refieren a la población, es decir, número medio de personas que se ven afectadas o desplazadas, heridos y fallecidos. Estos parámetros de daño en términos absolutos pueden a su vez presentarse de forma adimensional para hacerlos comparables entre diferentes ciudades o instantes de tiempo: porcentaje de daños medios anuales con respecto al PIB o porcentaje de población afectada por desastres naturales.

Llegados a este punto, se dispondrá de un diagnóstico de situación en cuanto a riesgos hidroclimáticos en una ciudad concreta y de las tendencias de evolución de dichos riesgos en función de los escenarios previstos de crecimiento urbano y cambio climático. Este diagnóstico es útil por sí mismo para priorizar inversiones por ciudades y asignar recursos de adaptación al cambio climático pero no aporta criterios sobre las medidas más eficientes para reducir los riesgos. La experiencia de la ICES indica que una herramienta útil para establecer el puente entre el diagnóstico y la propuesta de medidas es investigar los mecanismos de construcción de riesgo (MCR) específicos de cada ciudad. Estos mecanismos se definen como cadenas

causa-efecto que rigen la producción de riesgos en un contexto urbano concreto e incluyen factores exógenos (es decir, de escala regional, nacional o incluso global) y bucles de retroalimentación locales. Se han identificado, para uno de los tipos de riesgo más comunes como son las inundaciones, los MCR más habituales en función del tipo de ciudad, así como el enfoque más adecuado que deben seguir los programas de reducción de riesgos en cada caso. Esta clasificación de ciudades pretende condensar, con fines prácticos, algunas de las lecciones aprendidas en los estudios de riesgos realizados en la ICES.

En general, cualquier ciudad sometida a un cierto nivel de riesgo requerirá un programa de medidas que combine infraestructuras y actuaciones de gestión como concientización, capacitación, planificación del suelo, reformas en el marco legal e institucional, etc. En el diseño de obras de reducción de riesgos deben priorizarse, siempre que sea posible, las medidas inspiradas en el funcionamiento natural del territorio en que se actúa, a ser posible empleando elementos orgánicos en configuraciones flexibles y adaptativas. En última instancia, las soluciones viables a efectos prácticos suelen ser híbridas (la combinación de infraestructuras verdes y tradicionales), ya que la escasez de suelo y la propia naturaleza de los espacios urbanos impiden un enfoque totalmente basado en la naturaleza. Es de suma importancia acompañar cualquier actuación estructural con intervenciones complementarias en el marco social, institucional y normativo, de manera que no solo se garantice la atenuación del riesgo en una zona concreta, sino la neutralización del mecanismo que lo ha generado y seguirá haciéndolo en otros lugares.

Tras llevar a cabo los estudios pertinentes, se debe disponer de varias alternativas para reducir los riesgos en un caso concreto y es preciso tener herramientas para seleccionar qué opción es la más adecuada. Existen dos grandes tipos de métodos para este fin: el análisis costo-beneficio y las técnicas multicriterio. En el primer caso los beneficios y posibles inconvenientes de cada alternativa se traducen en unidades monetarias, teniendo en cuenta su materialización en el tiempo y considerando, como en cualquier inversión financiera, una depreciación

temporal de los flujos de caja según la regla del interés compuesto. En el caso de las técnicas multicriterio, se pueden introducir varias escalas de medida de la bondad de una alternativa, que ya no serán necesariamente cuantitativas ni procederán de adoptar un precio de mercado para todos los factores. Ambos enfoques poseen fortalezas y limitaciones, que se describen en el documento, de manera que la aplicación de cada uno de ellos, o los dos conjuntamente, dependerá de los fines perseguidos en cada caso.

Después de varios años de experiencia en la elaboración de análisis de riesgo de desastres y vulnerabilidad al cambio climático en ciudades emergentes de la región, consideramos oportuno sistematizar las lecciones aprendidas de estos estudios en un conjunto de pautas metodológicas que pueden ayudar a guiar estudios futuros, incluidas las mejores prácticas sobre cómo incorporar información de escenarios de cambio climático. Al mismo tiempo, también es necesario apoyar una mejor identificación de las oportunidades de inversión en adaptación derivadas de los estudios de vulnerabilidad y de los impactos del cambio climático (incluidos los factores de estrés hídrico), ya que éste es uno de los principales desafíos en las ciudades de la región. Se requiere de metodologías robustas y aplicables en las condiciones de tiempo y recursos en que se realiza la planificación urbana en la región, que permitan la identificación de oportunidades de inversión para la resiliencia climática urbana y la gestión del riesgo de desastres en las carteras de inversión urbana. Esperamos que este documento sea de utilidad para aquellas ciudades e instituciones que se enfrentan con estos desafíos. —

*Cuando hablamos de crecimiento urbano, es importante enfatizar que las ciudades que logren internalizar una buena gestión del riesgo de desastres y cambio climático en su modelo de crecimiento pueden ayudar muchísimo a abordar este reto. Por lo tanto, el problema no es el crecimiento urbano per se, si no más bien el modelo que han seguido muchas ciudades de la región, y del mundo, que ha llevado a un incremento en el riesgo de desastres y cambio climático. Tal como lo menciona *Resumen del Informe Mundial Sobre Desastres 2010, Enfoque en Riesgo Urbano*, elaborado por la Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja, "la urbanización puede ser un baluarte poderoso contra las peores consecuencias que nos está significando el cambio climático. En las ciudades que tienen una buena gobernanza, se registran economías de escala con respecto a la reducción del riesgo y a la capacidad de respuesta".

Contenido —

Prólogo / 16

1

Marco general y datos de partida / 25

- 1.1 La ciudad como unidad de análisis de riesgos / 26**
- 1.2 Marco conceptual y metodológico para la evaluación de riesgos / 28**
 - 1.2.1 El riesgo como fenómeno probabilista / 29
 - 1.2.2 Los escenarios de ciudad en los estudios de riesgos / 42
- 1.3 Recopilación de datos de partida / 46**
 - 1.3.1 Datos topográficos y de caracterización física del suelo / 46
 - 1.3.2 Recopilación de datos hidroclimáticos y de eventos históricos / 52
 - 1.3.3 Datos socioeconómicos e información urbanística / 54

2

Cuantificación de las amenazas / 59

- 2.1 La amenaza de inundaciones fluviales y por lluvias / 60**
- 2.2 La amenaza por vientos extremos / 66**
- 2.3 La amenaza por inundación costera / 72**
- 2.4 Cuantificación de los procesos de erosión costera / 74**
- 2.5 La amenaza por huracán / 80**
- 2.6 El efecto del cambio climático en el cálculo de las amenazas / 81**

3

Vulnerabilidad y riesgos de inundación / 93

- 3.1 Cálculo de la exposición / 94**
- 3.2 Consideraciones generales sobre el cálculo de la vulnerabilidad / 98**
- 3.3 Vulnerabilidad y daños en edificaciones / 100**
- 3.4 Vulnerabilidad y daños en infraestructuras críticas / 110**
- 3.5 Vulnerabilidad y daños humanos / 114**
- 3.6 Análisis multiriesgo: el caso de los huracanes / 126**
- 3.7 Calibración y validación de los modelos de riesgo / 128**
- 3.8 La incertidumbre en los cálculos de riesgo / 130**

4

El riesgo de sequía urbana / 135

- 4.1 Cuantificación del balance hídrico / 136
- 4.2 Efecto del cambio climático en la sequía urbana / 148
- 4.3 Consideraciones sobre vulnerabilidad y daños por sequía urbana / 150

5

Causas, mecanismos e indicadores de riesgo / 153

- 5.1 El riesgo como amenaza y como oportunidad / 156
- 5.2 Mecanismos de construcción de riesgo de inundación en ciudades de ALC / 166
- 5.3 Filtros e indicadores de riesgo / 186

6

Medidas de reducción del riesgo / 191

- 6.1 Clasificación de las medidas de reducción de riesgo / 192
- 6.2 Infraestructuras para la reducción de riesgos / 194
- 6.3 Planeamiento territorial y metabolismo urbano desde el enfoque de riesgos / 202
- 6.4 Los sistemas de alerta temprana y la gestión de emergencias / 212

7

Técnicas de evaluación y selección de alternativas / 215

- 7.1 Marco general para la evaluación y selección de alternativas / 216
- 7.2 Análisis coste-beneficio de medidas de reducción de riesgos / 222
- 7.3 Métodos semicuantitativos de selección de alternativas / 232

- Conclusiones / 236
- Índice de figuras / 238
- Índice de tablas / 242
- Acrónimos / 244
- Referencias / 246

Prólogo —

Con una tasa de urbanización del 80%, la más alta en el mundo en desarrollo y previsiblemente mayor en las próximas décadas, las ciudades de la región de América Latina y el Caribe son particularmente vulnerables a los impactos del cambio climático, incluidos los desastres naturales como las inundaciones y los deslizamientos de tierra, así como los fenómenos de evolución lenta como el aumento gradual de la escasez de agua.

Para enfrentar estos desafíos, el BID ha aumentado considerablemente su compromiso con el desarrollo urbano a través de la creación del Sector de Cambio Climático y Desarrollo Sostenible (CSD), que integra tres pilares de la resiliencia urbana: desarrollo urbano, gestión ambiental y del riesgo de desastres, y resiliencia al cambio climático.

Tras varios años de experiencia en la elaboración de análisis de riesgo de desastres y vulnerabilidad al cambio climático en ciudades emergentes de la región, incluso en el marco de la Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES), consideramos oportuno sistematizar las lecciones aprendidas de estos estudios en un conjunto de pautas metodológicas que pueden ayudar a guiar estudios futuros, incluidas las mejores prácticas sobre cómo incorporar información de escenarios de cambio climático.

La ICES ha sido un programa de asistencia técnica no reembolsable desarrollado desde 2011 hasta 2018 por el Banco Interamericano de Desarrollo para brindar apoyo directo a los gobiernos centrales y locales en el desarrollo y la ejecución de planes de sostenibilidad urbana. La ICES promovió la idea de que las estrategias de desarrollo urbano bien planificadas, integrales y multisectoriales tienen la capacidad de brindar mejoras a la calidad de vida y de trazar un futuro más sostenible, resiliente e inclusivo para las ciudades emergentes de América Latina y el Caribe. Para ello, la metodología de trabajo de la iniciativa se organiza en dos etapas y cinco fases. La primera etapa comienza con la ejecución de una herramienta de diagnóstico de evaluación rápida para identificar los retos de sostenibilidad de una ciudad. Después, los temas son priorizados a

través del uso de múltiples filtros —ambiental, económico, opinión pública y experiencia de especialistas por sector— para identificar los problemas que plantean los mayores desafíos para la sostenibilidad de una ciudad. Por último, se formula un plan de acción, que contiene las intervenciones priorizadas y un conjunto de estrategias para su ejecución a través del corto, mediano y largo plazo. En la segunda etapa, la fase de ejecución se inicia con la preparación de estudios de preinversión para las intervenciones priorizadas y la implementación de un sistema de monitoreo ciudadano.

La metodología CES emplea un enfoque integral e interdisciplinario para identificar, organizar y priorizar intervenciones urbanas para hacer frente a los principales obstáculos que impiden el crecimiento sostenible de las ciudades emergentes de América Latina y el Caribe. Este enfoque transversal se basa en tres pilares: (i) sostenibilidad medioambiental y de cambio climático, (ii) sostenibilidad urbana y (iii) sostenibilidad fiscal y gobernabilidad. Dentro del primero de estos pilares, un tipo de estudios de base que ha resultado clave a la hora de planificar y orientar el crecimiento de muchas ciudades, son los estudios de riesgos debidos a fenómenos relacionados con el clima y la geología. Las inundaciones, sequías, terremotos, deslizamientos y erosión costera son procesos que afectan a numerosas ciudades de Latinoamérica y el Caribe y que provocan cuantiosos daños económicos y humanos, limitando su potencial de desarrollo.

Muchas acciones de planificación urbana, transporte o reducción de la pobreza en barrios marginales están condicionadas por factores de riesgos generalmente denominados “naturales”. Sin embargo, lo que puede considerarse “natural”, y tampoco de manera completa, son las amenazas, ya que los riesgos en las ciudades han sido claramente construidos por los seres humanos, a medida que se han ocupado zonas expuestas a las amenazas, sin adoptar las medidas de mitigación necesarias.

El cambio climático añade un elemento de complejidad y gravedad a los mecanismos de creación de riesgos que están

manifestándose en muchas ciudades de esta región. Fenómenos naturales como las lluvias extremas, el fenómeno de El Niño o los huracanes, están modificando sus pautas de presentación y la ciencia no siempre es capaz de predecir con exactitud cómo o cuánto afectarán estos cambios, a mediano y largo plazo, a una zona concreta.

Este documento tiene como objetivo plasmar un conjunto de experiencias y emitir una serie de recomendaciones para la elaboración de estudios de riesgos, derivados de fuentes hidroclimáticas en ciudades. En él se recogen reflexiones y lecciones aprendidas procedentes de algunas de las ciudades con mayor nivel de riesgos de Latinoamérica y el Caribe, en su mayoría pertenecientes al programa CES, con el fin de que se puedan integrar en futuros trabajos, dirigidos por el propio BID o por otros organismos.

Existen un sinnúmero de publicaciones sobre riesgos de origen hidroclimático, muchas de ellas en ciudades, editadas por todo tipo de instituciones nacionales e internacionales. Una buena parte son de naturaleza técnica y se centran en detallar procedimientos y métodos para llevar a cabo estudios cuantitativos otras se centran en la dimensión económica, social o institucional de la gestión de desastres. Salvo excepciones, ambos tipos de trabajos tienden a mostrar un sesgo de enfoque muy marcado. Las publicaciones técnicas emplean predominantemente un enfoque físico-matemático, con un fuerte componente numérico estadístico para cuantificar la incertidumbre de los resultados, que los aleja de un público que no posea este tipo de formación. El resto de publicaciones se concentran en temas que sólo en parte se pueden reducir a cifras y modelos numéricos: aspectos como el diseño del marco legal e institucional adecuado para abordar un tipo de problemas, la transferencia efectiva de conocimiento y tecnología a países en desarrollo, los mecanismos de financiación de la reducción de riesgos, etc.

Este documento pretende solucionar, en cierta medida, esta brecha entre disciplinas y enfoques, e intenta hibridar los aspectos técnicos con los enfoques aportados por las ciencias sociales

y positivas. Para ello, se van a presentar los aspectos básicos y más relevantes de las técnicas cuantitativas de evaluación de riesgos, sin emplear ecuaciones, con un lenguaje accesible y apoyándose en ejemplos prácticos; de esta forma, se espera atraer la atención de especialistas en las ciencias sociales y tomadores de decisiones para que logren un conocimiento básico de lo que pueden esperar de sus colegas físicos e ingenieros en el ámbito de los estudios de riesgos. Asimismo, se invitará al lector científico-técnico a indagar en la enorme complejidad de la gestión integral de riesgos y desastres, que muchas veces provoca que los resultados de sus estudios no puedan traducirse en decisiones y resultados concretos y que se difuminen en una realidad con muchas más dimensiones. En términos más ambiciosos, este documento trataría de evitar que los estudios técnicos caigan, como sucede a menudo, en el reduccionismo, incluso (o especialmente) cuanto mayor es el esfuerzo matemático-estadístico.

Por lo tanto, este documento no es una guía técnica, y no tiene por objetivo aportar metodologías y protocolos de cálculo detallados a los especialistas encargados de redactar estudios de riesgos. Bajo esta premisa, se han omitido, en la medida de lo posible, fórmulas y lenguaje técnico que dificulten el acceso a una amplia gama de lectores. Su público objetivo son los responsables de planificar, licitar o aplicar planes y programas sobre riesgos, así como todas aquellas personas cuya actividad tiene que ver con los riesgos urbanos: planificadores del territorio, gestores públicos, sociólogos y responsables de la gestión de emergencias. También se espera que sea útil para aquellos científicos e ingenieros que sientan la inquietud de ahondar en cómo su trabajo se enlaza y se vincula con el resto de las disciplinas que intervienen en el diagnóstico y reducción de riesgos.

Como cualquier propuesta alternativa, este trabajo se enfrenta a varios retos. El más evidente es el de decepcionar a una mayoría de sus potenciales lectores: el especialista en riesgos de inundación encontrará que “su parte” es demasiado breve y simplificada; el economista verá carencias e imprecisiones en el análisis costo-beneficio; el sociólogo juzgará

sesgado el tratamiento de la reflexividad y la teoría de sistemas, etc. En todo caso, es de esperar que aquellos lectores que busquen una aproximación general, sin plantearse reemplazar a los profesionales de cada tema específico, aprecien el intento de síntesis y de suavizar las fronteras entre disciplinas académicas y enfoques profesionales, como forma de avanzar en los estudios de riesgos.

El documento se divide en siete capítulos, tal y como se refleja en el diagrama de contenidos de la Figura 1. En los capítulos del 1 al 4 se describen métodos y herramientas, de carácter predominantemente técnico y cuantitativo, para evaluar los riesgos actuales y futuros en ciudades. Se trata, en definitiva, de establecer las bases para llevar a cabo un diagnóstico de riesgos en una ciudad, como paso previo para abordar el análisis de medidas de mitigación, actividad que se describe en los capítulos 5 a 7. Esta segunda parte del documento se ha enfocado de forma menos técnica y prescriptiva, ya que se considera que, si bien el diagnóstico de riesgos urbanos puede seguir un esquema hasta cierto punto predefinido, un programa viable y eficaz de reducción de riesgos debe adaptarse a las condiciones específicas de cada ciudad, que varían enormemente entre países, climas y rasgos socioculturales. Por ello, en esta segunda parte se aportarán ideas y reflexiones orientativas que deberán adaptarse al contexto de cada ciudad.

Dada la gran cantidad de materiales de toda índole relacionados con los riesgos de origen natural, este trabajo no pretende aportar métodos ni herramientas nuevas, sino seleccionar y ordenar los más útiles desde una perspectiva práctica, para ponerlos al servicio de los responsables de realizar estudios de riesgos en ciudades.

Finalmente, en el documento hay dos conceptos recurrentes que etiquetan buena parte de las lecciones aprendidas sobre gestión de riesgos: incertidumbre y transversalidad. Ambos determinan algunas de las cualidades más importantes que deberán tener los profesionales dedicados a la reducción de riesgos en el futuro: conocimiento, flexibilidad y capacidad de diálogo. —

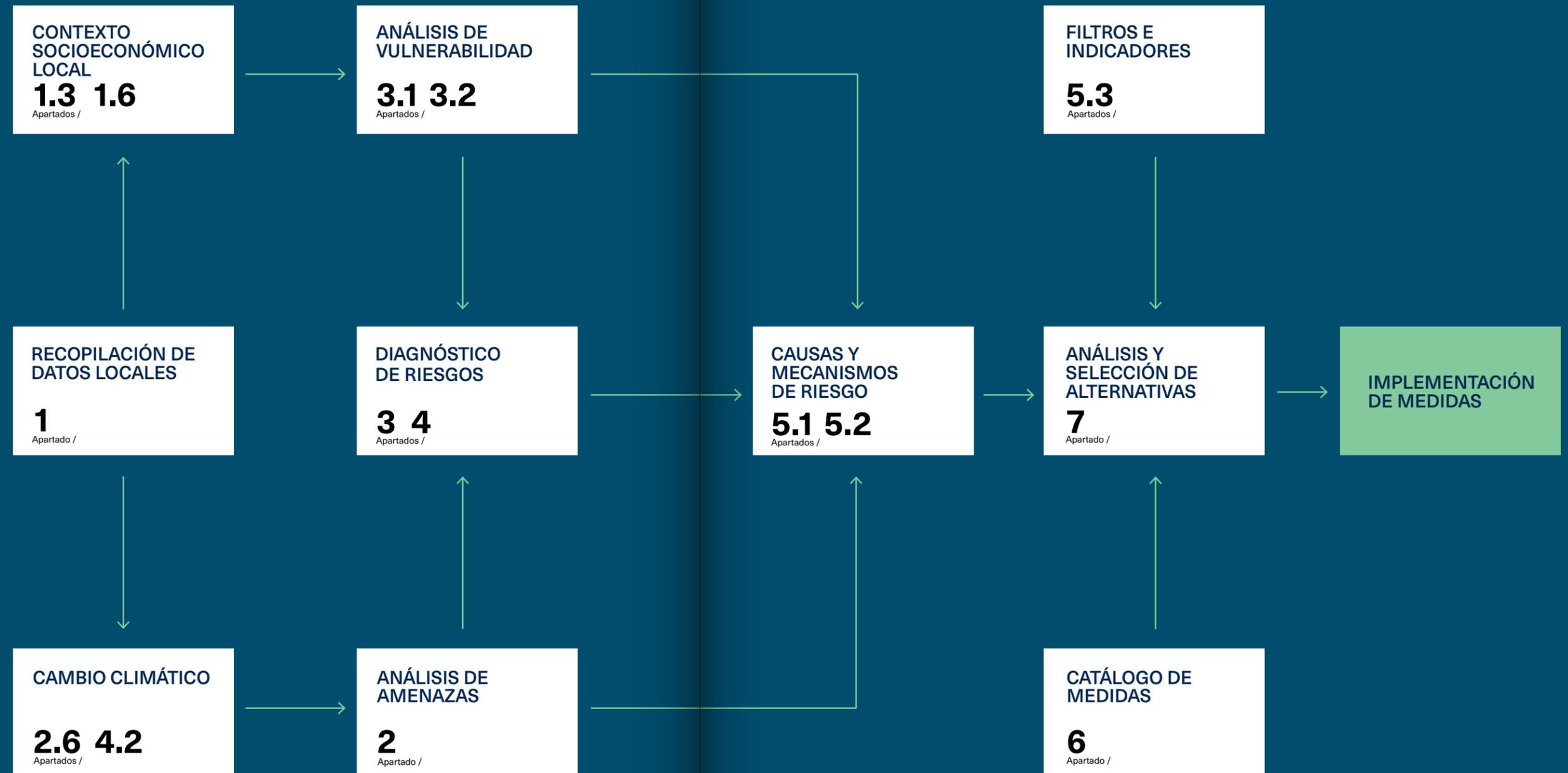


Figura 1 | Mapa-guía de contenidos del documento.

1

Marco general y datos de partida —

- 1.1** La ciudad como unidad de análisis de riesgos /26
- 1.2** Marco conceptual y metodológico para la evaluación de riesgos /28
 - 1.2.1 El riesgo como fenómeno probabilista /29
 - 1.2.2 El concepto de escenario de ciudad como elemento clave de los estudios de riesgos /42
- 1.3** Recopilación de datos de partida /46
 - 1.3.1 Datos topográficos y de caracterización física del suelo /46
 - 1.3.2 Recopilación de datos hidro-climáticos y de eventos históricos /52
 - 1.3.3 Datos socioeconómicos e información urbanística /54

1

1.1 La ciudad como unidad de análisis de riesgos

La población mundial que vive actualmente en ciudades es aproximadamente un 54% (4.000 millones) del total, mientras que en 1990 esta cifra alcanzaba solo el 43% (2.300 millones), según un informe reciente de Naciones Unidas (UN-Habitat, 2016). Todo indica, además, que esta tendencia general se va a mantener durante las próximas décadas, aunque con diferencias según regiones.

Las ciudades representan espacios geográficos relativamente compactos, donde la función y estructura de los ecosistemas originales han sido profundamente transformadas, lo que ha provocado una intensificación del consumo de materiales y energía (Forman 2008; Kulp and Strauss 2016). Desde una perspectiva estrictamente biogeográfica, los centros urbanos son, en mayor o menor medida, sumideros de recursos producidos en su área de influencia, que consiguen mantenerse en desequilibrio con el exterior gracias a la continua aportación de materia y energía.

Este documento se centrará en el análisis y cuantificación de ciertos tipos de riesgos relacionados, en mayor o menor medida, con los fenómenos atmosféricos y las masas de agua (ríos, estuarios y costas) que interactúan con ellos:

- Riesgos de inundación de origen fluvial.
- Riesgos de inundación por lluvias locales.
- Riesgos de inundación costera y aumento del nivel del mar.
- Riesgos por huracán.
- Riesgos por erosión costera.
- Riesgos por sequía urbana.

Se suele considerar que los primeros cuatro riesgos son de evolución rápida (en inglés, *fast onset*), mientras que los dos últimos son de evolución lenta (*slow onset*). El estudio de estos riesgos debe incluir tanto el espacio urbano como los territorios en su zona de influencia, en la medida en que estos últimos determinan las amenazas o aportan recursos no sustituibles. Tal es el caso de un embalse que almacena el agua necesaria para el consumo urbano, una central energética, un aeropuerto o un centro logístico situado en las afueras de una aglomeración urbana.

El objetivo principal son los estudios de riesgos dentro del ámbito urbano, pero en cada tipo de riesgo se analizará la necesidad de concebir la ciudad como un elemento vinculado a su territorio de influencia, y no como un ente autónomo. Como regla general, el estudio de los riesgos de inundación y huracán puede exigir o no, según el caso concreto, un enfoque regional, mientras que los estudios de erosión costera y sequía urbana requieren, en la mayoría de los casos, un análisis de los procesos de fondo (balance sedimentario en el primer caso, y cuantificación del ciclo del agua en el segundo), de escala espacial más amplia que la propia mancha urbana. Esta consideración sobre el ámbito espacial de trabajo en función de cada ciudad y de los riesgos de estudio seleccionados tiene repercusión en la toma de datos, en la determinación de la amenaza y en la viabilidad de las propuestas de reducción de riesgo que se propongan.

Aun con todo lo anterior, los estudios de riesgos en el ámbito espacial de una ciudad son pertinentes, ya que es dentro de ellas, y no en sus zonas circundantes, donde se producen la mayor parte de los daños económicos y humanos, si bien parte de las causas de estos daños tienen su origen fuera de ellas. Además, las ciudades suelen ser unidades no sólo geográficas sino también administrativas, jurídicas e incluso culturales, lo que permite identi-

car de manera más clara al destinatario de los estudios (la municipalidad) y el marco legal en que se inserta cualquier medida de reducción de riesgos (plan general de urbanismo, ordenanzas locales, etc.). Por lo general, en cualquier estudio de riesgos en ciudades conviene delimitar lo antes posible tres áreas diferenciadas:

1. Área priorizada: Es el área urbana actual, que generalmente incluye zonas con proyectos de urbanización en fases de desarrollo avanzadas. Representa la zona donde se van a obtener resultados detallados de daños en situación actual, y donde dichos resultados son susceptibles de calibración.

2. Áreas de expansión: Son las zonas donde se prevé un crecimiento urbano a corto o largo plazo y donde se pueden estimar riesgos futuros en función de escenarios de crecimiento, siempre con un grado de incertidumbre muy superior al de las zonas ya consolidadas.

3. Áreas de influencia: Representan todas las zonas periurbanas, en ocasiones muy distantes, donde tienen lugar procesos físicos, sociales y económicos que intervienen en la definición de la amenaza actual y/o futura. Es el caso, por ejemplo, de la cuenca vertiente de un río que atraviesa una ciudad, las cuencas tributarias de los embalses que la abastecen, o el tramo de costa que ejerce como fuente de sedimentos para otro tramo.

Para llevar a cabo esta zonificación inicial, es necesario conocer de antemano los riesgos que se van a estudiar, así como la escala de los procesos físicos asociados a los mismos. La cantidad y precisión de los datos que deben recopilarse sobre el clima, el territorio y los usos dependen del tipo de área de la cual se trate. Como ejemplo se presenta en la **Figura 2**, que muestra la delimitación de las tres áreas para el estudio del riesgo por inundación en Cusco, Perú.

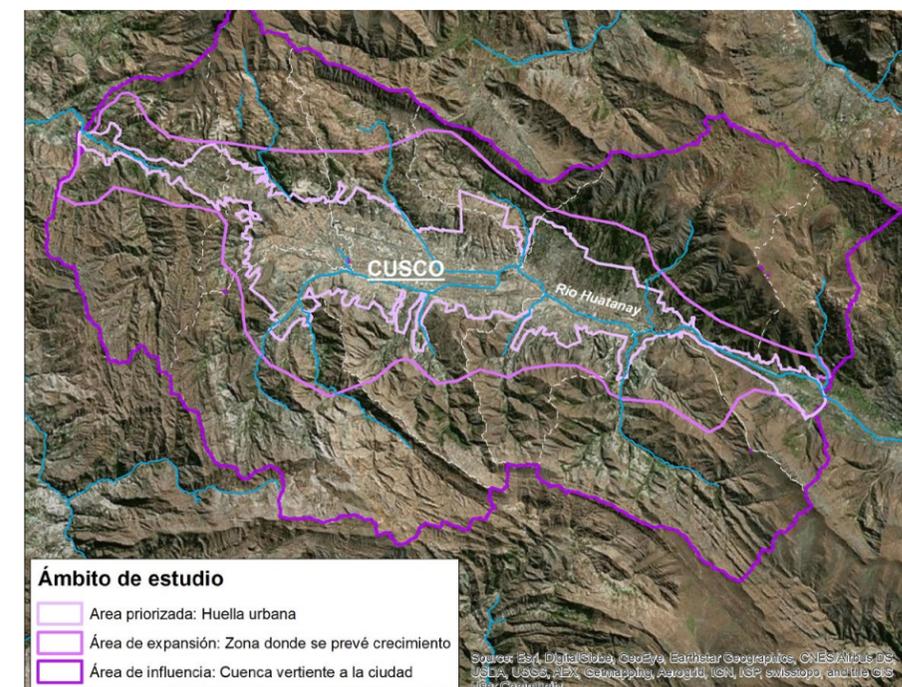


Figura 2 | Ejemplo de la determinación del ámbito de estudio para la amenaza por inundación en Cusco, Perú.

1.2 Marco conceptual y metodológico para la evaluación de riesgos

Siguiendo un marco conceptual ampliamente aceptado (Abhas et al., 2014), el riesgo resulta de la coincidencia, en el tiempo y en el espacio, de una amenaza y un ente (ser vivo o cualquier elemento físico o intangible del territorio) susceptible de experimentar una pérdida de valor, funcionalidad o bienestar, como consecuencia de esa amenaza. La exposición es la cualidad binaria que refleja esta coincidencia, mientras que la vulnerabilidad recoge todos los factores que explican la conversión de la amenaza en daños (Fritzsche et al., 2014). La vulnerabilidad es, en definitiva, la caracterización de ciertas propiedades de los elementos expuestos, desde el punto de vista de su potencial de ser afectados o destruidos, y puede tener varias dimensiones: humana (daño físico o psicológico, muerte), económica (pérdida de valor de activos), o de otro tipo (por ejemplo, daños ambientales o de patrimonio).

Este esquema se resume en la pseudoecuación Riesgo = Amenaza x Exposición x Vulnerabilidad (Figura 3), que indica que el impacto total que puede producir un evento tiene una probabilidad asociada que resulta de combinar la probabilidad de dicho evento, la probabilidad de que afecte espacialmente zonas ocupadas y, finalmente, la de que los activos y personas expuestos

sufran daños (Plate, 2002). Nótese que esta pseudoecuación debe omitir el factor de exposición en el momento en el que la amenaza y la vulnerabilidad se expresen como campos con su variación espacial (formato ráster), puesto que la información sobre la coincidencia punto a punto de la amenaza y de la vulnerabilidad estaría implícita en dichos campos.

Otro esquema conceptual, alternativo y compatible con el anterior, para representar la generación del riesgo se basa en identificar, de manera más espacial y secuencial en el tiempo, los elementos de riesgo en una cadena de componentes (Narayan et al., 2012):

FUENTE → VECTOR → RECEPTOR → CONSECUENCIA

Con este enfoque, el riesgo es la cuantificación de las consecuencias (por lo general pérdidas económicas o humanas) con su probabilidad asociada, que resulta de una configuración concreta de fuentes, vectores y receptores. En el caso de una inundación costera, las fuentes serían las olas, el viento y el nivel del mar, el vector sería la playa y/o el malecón de defensa y, finalmente, los receptores serían los edificios y las personas que se sitúan tras dicho vector.

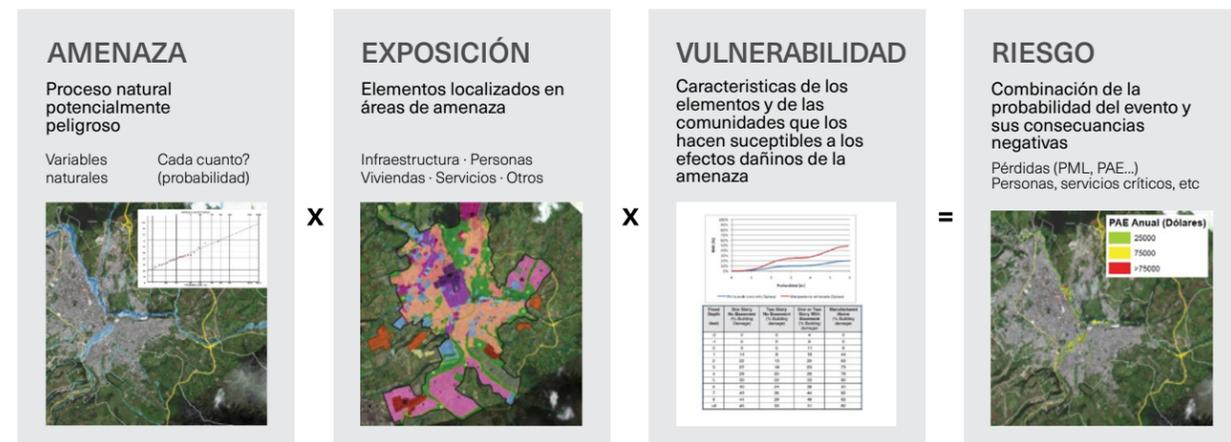


Figura 3 | Esquema amenaza-exposición-vulnerabilidad-riesgo.

1.2.1 El riesgo como fenómeno probabilista

Los riesgos hidroclimáticos dependen de la combinación de un conjunto de factores que tienen un fuerte componente aleatorio y, por tanto, no se pueden expresar como un solo valor determinista. Se suele hablar de análisis probabilista del riesgo en el momento en que se tiene en cuenta la variabilidad de alguno de los componentes del riesgo y se propaga para estimar la función de probabilidad de los efectos o daños esperados. Dentro de los estudios de riesgo probabilistas se pueden diferenciar, a efectos prácticos, dos grandes tipos de enfoques metodológicos: el análisis de eventos y los métodos de simulación continua, que en la terminología adoptada por el BID se denominan análisis pseudoprobabilista y totalmente probabilista (*fully probabilistic*).

Enfoque basado en eventos (enfoque pseudoprobabilista)

El análisis de eventos es un enfoque muy extendido para abordar los riesgos de desarrollo rápido y, en concreto, las inundaciones y los huracanes. Básicamente, consiste en calcular la probabilidad de ocurrencia de los episodios extremos de un determinado fenómeno natural caracterizado por uno o varios parámetros representativos, a los que se asigna una probabilidad de ocurrencia.

La mayor parte de los estudios de riesgos de evolución rápida, como son las inundaciones y los huracanes, se basa en la caracterización de eventos extremos (sucesos máximos anuales o que exceden un umbral predefinido). El concepto de evento varía en función del tipo de riesgo analizado, tal y como se refleja en la *Tabla 1*. Como puede observarse, los eventos se caracterizan por diversas variables hidrometeorológicas, lo que a priori requeriría aplicar funciones de probabilidad extremal multivariadas. Esto es inevitable en determinados casos:

Problema multifuente: se da cuando varios procesos físicos, parcialmente relacionados o incluso independientes, producen el mismo tipo de amenaza con una

importancia similar. Por ejemplo, en la ciudad de Belice pueden producirse inundaciones por una combinación de fuertes lluvias locales, desbordamiento del cauce del río principal por lluvias producidas en la cuenca y aumento del nivel del mar.

Problema multiriesgo: el paso de un huracán, por ejemplo, produce de forma simultánea un aumento del nivel del mar, fuertes precipitaciones y vientos extremos. El mar y la lluvia causan daños por inundación, mientras que el viento lo hace por efecto de arrastre e impacto de proyectiles. Sin embargo, los daños combinados no pueden obtenerse de manera independiente, puesto que no son aditivos (el agua puede modificar el daño asociado al viento o viceversa y ambos fenómenos no pueden dañar dos veces un mismo activo).

En general, un problema multivariado es estadísticamente más complejo y requiere más datos de eventos extremos, que normalmente no están disponibles. En la mayoría de los estudios prácticos, se suele optar por seleccionar una variable dominante, asignando al resto de variables un valor determinista. De esta forma, la probabilidad de la variable dominante es transmitida a lo largo de la cadena de cálculo del riesgo, hasta asociarse a los resultados de daño finales. En el caso de las inundaciones fluviales, la variable dominante es la lluvia total y para el resto de las variables dependientes se adoptan valores fijos basados en criterios técnicos:

- **Duración de la lluvia:** valor medio del tiempo de concentración de la cuenca.
- **Estructura temporal de la lluvia:** hietograma sintético.
- **Estructura espacial:** campo homogéneo con coeficiente de reducción por área.
- **Estado de humedad antecedente:** suelo al 90% de su humedad de saturación (o similar).

El cálculo del riesgo basado en eventos permite obtener puntos discretos de la función de probabilidad de la curva de daños, por ejemplo, el valor de los daños económicos

RIESGO	EVENTO	VARIABLES DEPENDIENTES	VARIABLE DOMINANTE
INUNDACIÓN FLUVIAL	Evento de crecida fluvial	Lluvia total Duración Estructura espacio-temporal de la lluvia Humedad antecedente de la cuenca	Lluvia total
INUNDACIÓN PLUVIAL	Tormenta de lluvia	Lluvia total Duración Forma del hietograma	Lluvia total
INUNDACIÓN COSTERA	Tormenta costera	Oleaje máximo (altura, período y dirección) Nivel del mar máximo Duración del evento	Altura de ola máxima o nivel del mar máximo
HURACÁN (SÓLO VIENTO)	Tormenta de viento	Máxima intensidad el viento Duración Evolución temporal de la intensidad del viento	Máxima intensidad de viento

Tabla 1 | Caracterización de los eventos de cálculo asociados a los riesgos analizados de evolución rápida.

Di asociado a sucesos de 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno. El periodo de retorno no es sino una forma alternativa de presentar probabilidades: un evento de T años de periodo de retorno tiene una probabilidad de superación de $1/T$, y una probabilidad de no superación de $1-1/T$.

A partir de ellos se puede interpolar la curva completa, bien empleando una función analítica conocida o de manera empírica. El valor de la pérdida anual esperada (PAE), o prima pura de riesgo, resulta de sumar los daños de los eventos individuales, ponderados con su probabilidad de ocurrencia:

$$DMA = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{T_i}$$

Donde D_i y T_i son el daño y el periodo de retorno asociado a cada evento i calculado. El daño medio anualizado es un indicador fundamental del nivel de riesgo a que está expuesto un territorio o ciudad (a menudo expresado de forma adimensional, ver apartado 5.3) y, además, es útil para el análisis costo-beneficio de las medidas de reducción de riesgo (apartado 6), puesto que permite obtener el ahorro medio recurrente que se deriva de una determinada actuación, como diferencia entre el daño medio antes y después de haberla llevado a cabo.

Enfoque basado en simulación continua

La definición del concepto de evento y su separación del resto de situaciones ordinarias no deja de ser un artificio útil para facilitar el cálculo y el postproceso de los resultados, pero obliga a numerosas hipótesis y no resulta adecuado para ciertos tipos de problemas. Los riesgos de evolución lenta como, por ejemplo, la sequía hidrológica o en parte la erosión costera, no se pueden caracterizar mediante un número reducido de sucesos extremos puntuales, sino que, en general, están ligados a procesos de más largo plazo, donde la memoria del sistema es relevante.

Con la capacidad computacional de hoy, cada vez es más factible representar la secuencia completa de un determinado fenómeno, sin tener que preseleccionar los

periodos de interés. En el caso de los riesgos de inundación de origen fluvial, si se dispone de una serie suficientemente larga de precipitaciones, no es necesario extraer ciertos eventos de tormenta, sino que se puede simular en continuo toda la serie de caudales, convertirla en una serie de niveles e, incluso, transformar dichos niveles en daños (enfoque totalmente probabilista, frente al pseudoprobabilista que consiste en analizar un número de eventos discretos con una probabilidad asociada). Nótese que este procedimiento implica adoptar un menor número de hipótesis que en un enfoque por eventos, ya que factores como la forma de los hietogramas o la humedad antecedente del suelo estarían integrados como variables internas de la simulación.

La principal limitación del enfoque en continuo es la disponibilidad de series de variables de entrada fiables largas y representativas de toda la variedad de situaciones extremas. Las series históricas de reanálisis procedentes de modelos, así como datos satelitales a escala global, están compensando progresivamente esta carencia. Además, se está avanzando en el desarrollo de modelos de generación de series sintéticas de variables físicas, calibrados con series instrumentales. En los casos de éxito, este enfoque permite producir miles de años de datos de entrada con los que caracterizar un determinado fenómeno, incluso efectos de correlación con otros factores, persistencia, variabilidad hiperanual, etc. En general, el enfoque totalmente probabilista suele aplicarse cuando existen datos para caracterizar la incertidumbre de todos los parámetros que intervienen, y para evitar obviar la selección de eventos discretos representativos en el caso de procesos multivariados, donde no existe una única variable dominante. Un ejemplo de este tipo de enfoque, en el que se generan miles de huracanes sintéticos para determinar la probabilidad conjunta de viento, lluvia y marea de tormenta en un determinado punto, se recoge en el Cuadro 1. En el apartado 3.8 se presenta además un análisis complementario a este sobre el procedimiento estadístico de los estudios de riesgo, desde el punto de vista de la cuantificación de la incertidumbre.

Cuadro 1 —

Tipos de clima y caracterización del régimen de huracanes en condiciones de cambio climático en Campeche

Problemática

El municipio de Campeche se ha visto afectado en los últimos años por numerosas depresiones tropicales de carácter ciclónico con consecuencias catastróficas. Algunos de estos eventos, como Gilberto en 1988, Opan y Roxana en 1995, Isidore en 2002 y Dean en 2007, causaron grandes pérdidas humanas y económicas. La baja probabilidad de ocurrencia de este tipo de eventos sumado a la incertidumbre existente en cuanto a su intensidad y distribución espacial en un contexto de cambio climático, hace que resulte muy complejo caracterizar adecuadamente el riesgo real que representan.

Metodología

La metodología aplicada combina técnicas estadísticas de selección y clasificación así como modelos paramétricos y numéricos para simular las diferentes dinámicas derivadas de los ciclones tropicales. Generalmente estas dinámicas son el viento, la precipitación, el oleaje y la marea de tormenta. Tiene como objetivo generar mapas espaciales de periodos de retorno para cada una de estas dinámicas, tanto para el clima presente como para diferentes escenarios de cambio climático.

En un primer paso se seleccionan los ciclones tropicales históricos que han afectado a Campeche en el pasado para después generar miles de trazas sintéticas asociados a los mismos (Nakajo, S., et al., 2014). La generación de eventos sintéticos sirve para aumentar el tamaño de la muestra inicial, explorando así situaciones distintas a las que se produjeron en el periodo histórico.

Una vez generadas las trazas sintéticas, se han aplicado técnicas de *downscaling* híbrido, estadístico y dinámico, para modelar el viento y la inundación, esta última como efecto de la acción combinada de la precipitación, el oleaje y la marea de tormenta. Mediante técnicas esta-

dísticas de selección y clasificación (*downscaling* estadístico) se han seleccionado un número de ciclones representativos de toda la muestra con el objetivo de reducir el coste computacional que resultaría de modelar numéricamente las diferentes dinámicas para todos los eventos (*downscaling* dinámico). Para cada uno de los eventos seleccionados se ha simulado el viento (*Vortex model*, Holland, G.J., 1980) y la precipitación (R-Clipper, Tuleya, R.E., et al., 2007) mediante modelos paramétricos. Los campos de vientos alimentan a su vez a los modelos numéricos hidrodinámicos, con el objetivo de simular el oleaje y la marea de tormenta asociadas a dichos eventos. La *Figura 5* muestra un ejemplo de los campos espaciales simulados de viento, precipitación, oleaje y marea de tormenta para un instante determinado durante el ciclón tropical Gilbert (1988). Los campos de oleaje, marea de tormenta y precipitación alimentarán a su vez un modelo hidrodinámico de inundación (por ej. RFSM-EDA o LISFLOOD) para reproducir la inundación máxima para cada uno de los eventos seleccionados.

Mediante técnicas estadísticas se han reconstruido los mapas inundación máxima, viento y precipitación para el resto de eventos (observados y sintéticos). Como resultado se han calculado los mapas espaciales de periodo de retorno de inundación y los valores de los periodos de retorno de las variables viento y precipitación para el clima actual.

Con el objetivo de incluir los efectos del cambio climático en la metodología se ha descompuesto el periodo histórico en una serie de patrones sinópticos de temperatura superficial del mar (SST) representativos de todos los tipos de tiempo existentes en dicho periodo; cada uno de estos tipos de tiempo tiene asociada una actividad ciclónica concreta.

A continuación se ha calculado el cambio en las pro-

habilidades de ocurrencia de cada uno de los tipos de tiempo para el clima futuro, utilizando para ello los resultados de los modelos de circulación global (en inglés, *Global Circulation Models* o GCM) del CMIP5. Finalmente, mediante técnicas de Montecarlo*, se han generado series de miles de años de ciclones tropicales para los diferentes escenarios de cambio climático.

Como resultado, para el clima futuro se han definido los mapas espaciales de periodo de retorno de inunda-

ción y los valores de los periodos de retorno de las variables viento y precipitación para los diferentes escenarios de cambio climático y periodos horizonte. Los mapas de inundación para el clima futuro tienen en cuenta el valor de subida del nivel del mar correspondiente. La descripción de la metodología completa incluyendo un análisis probabilístico del riesgo se puede encontrar en Izaguirre et al. (2017).

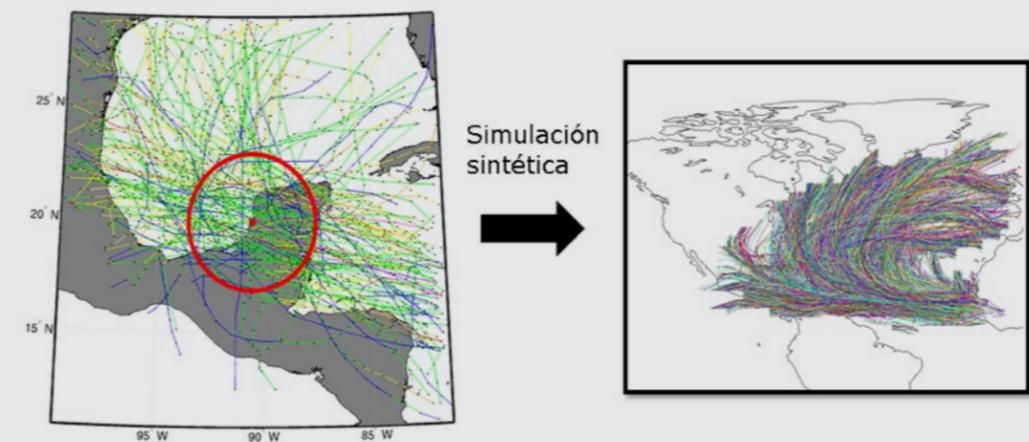


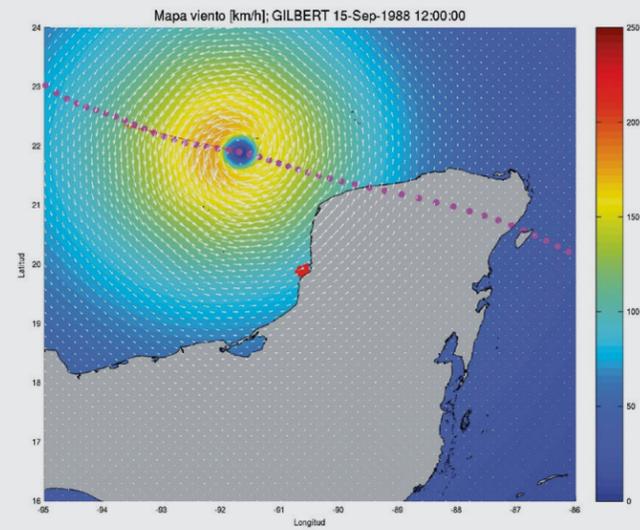
Figura 4 | El panel situado a la izquierda muestra las tormentas tropicales que pasaron a una distancia menor de 300 km de Campeche entre 1950 hasta la actualidad. El panel de la derecha muestra los miles de eventos sintéticos simulados a partir de los históricos.

Resultados

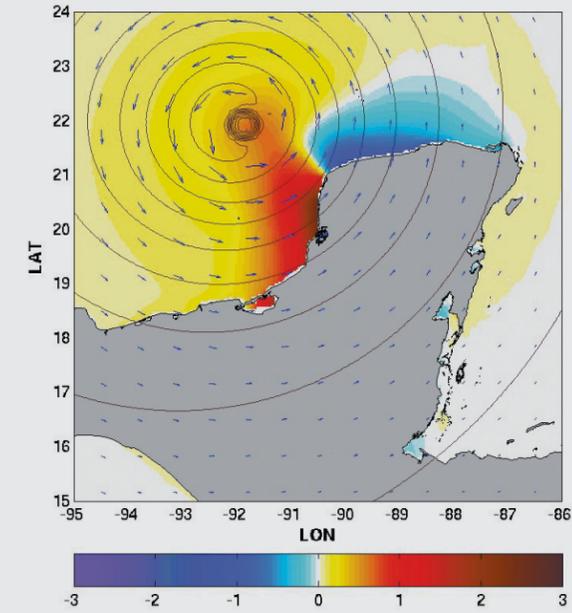
Como resultados de la metodología se han generado mapas espaciales de periodo de retorno de inundación para el clima presente y para el futuro (Figura siguiente). También se han calculado las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de precipitación y los valores de

periodos de retorno de velocidad de viento. La *Figura 8* muestra un ejemplo de los mapas espaciales de inundación para los periodos de retorno de 10 y 100 años para el escenario RCP4.5 y para un horizonte temporal centrado en el año 2050.

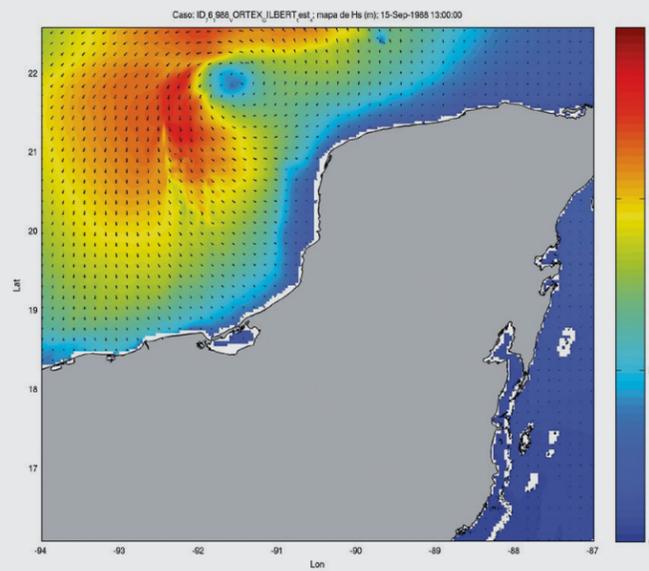
* La simulación de Montecarlo es un método estadístico utilizado para resolver problemas matemáticos complejos a través de la generación de variables aleatorias ([Economipedia](#)).



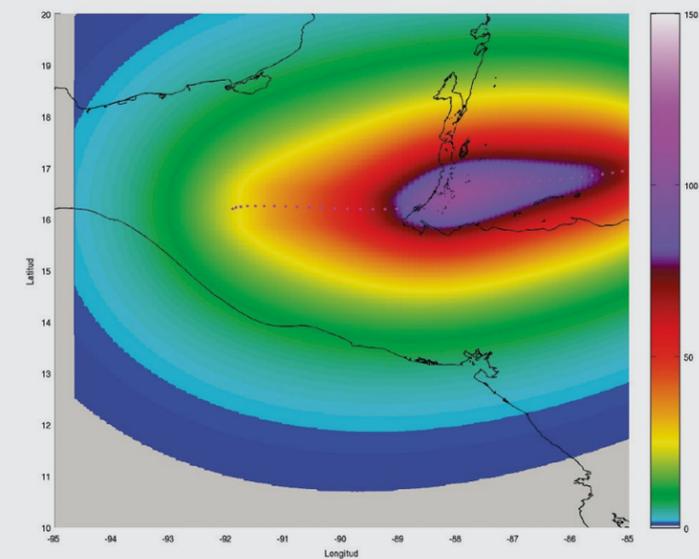
CAMPOS DE VIENTOS
Modelo Hydromet-Rankine Vortex



CAMPOS DE MAREAS DE TORMENTA
H2D



CAMPOS DE OLEAJE
Modelo SWA



CAMPOS DE PRECIPITACIONES
Modelo R-Clipper

Figura 5 | Campo especial de viento, oleaje, marea de tormenta y precipitación para un instante concreto de ciclón tropical Gilbert 1988.

TIPOS DE TIEMPO
SST

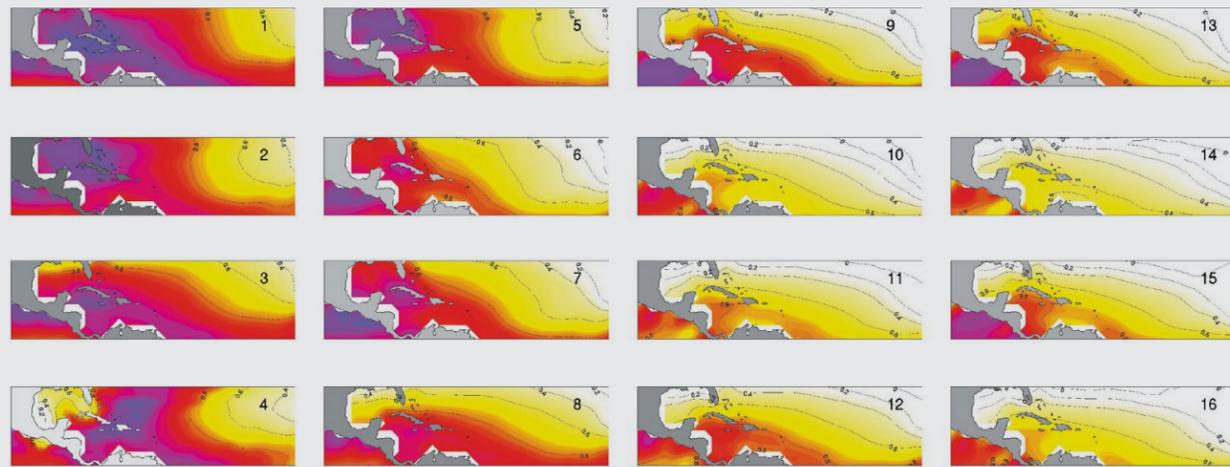
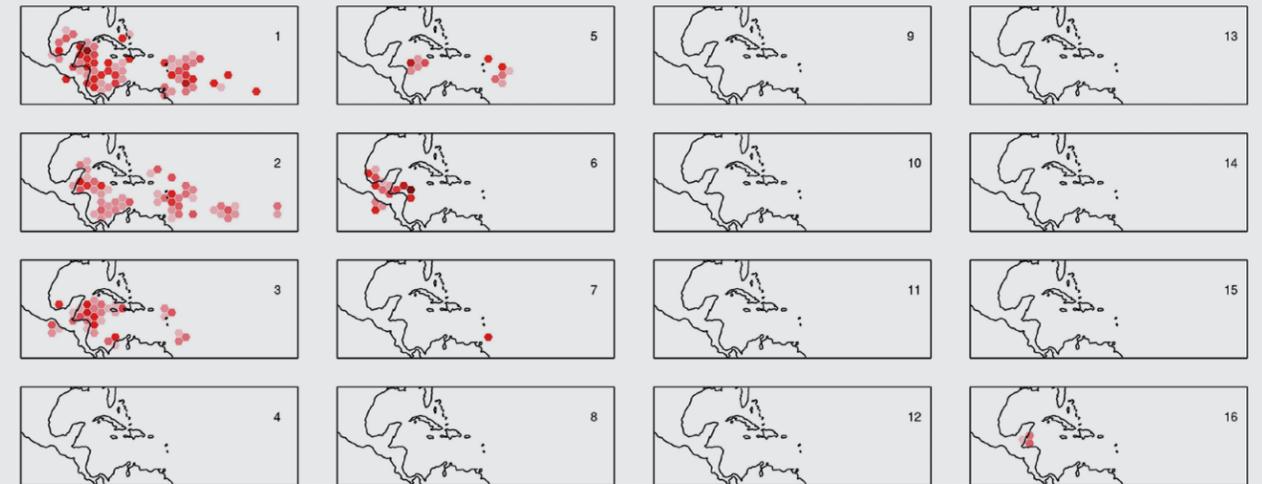


Figura 6 | Clasificación en 16 tipos de tiempo de la temperatura superficial del mar para el Atlántico Norte.

ACTIVIDAD CICLÓNICA



Actividad ciclónica asociada.

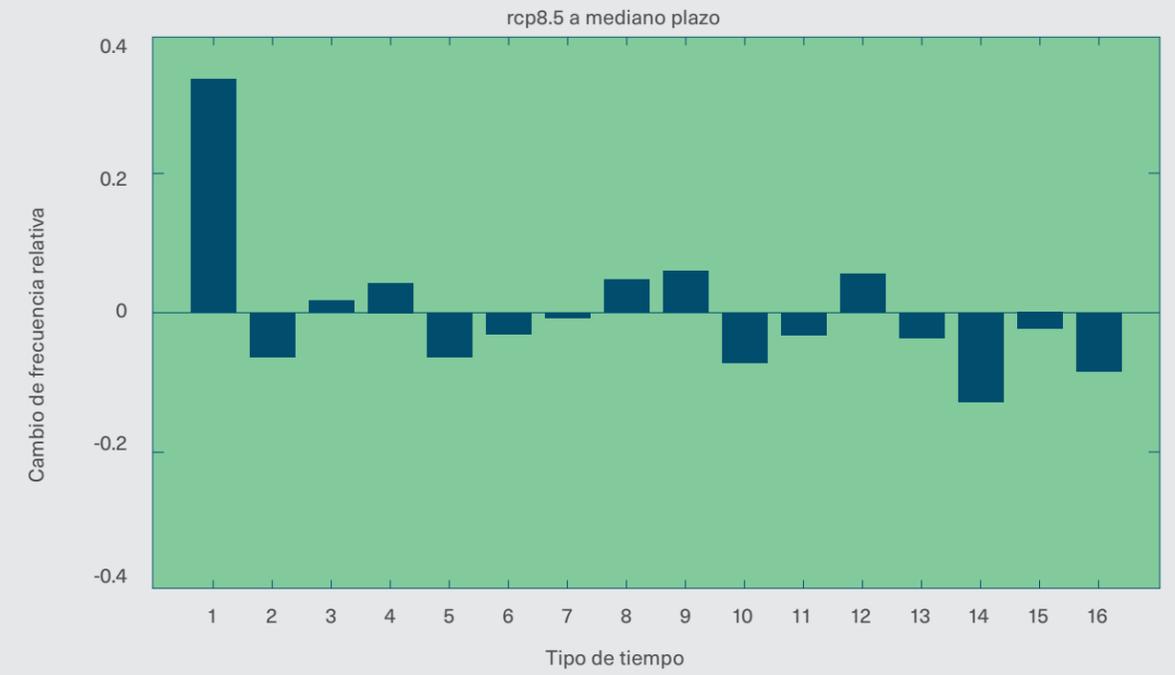
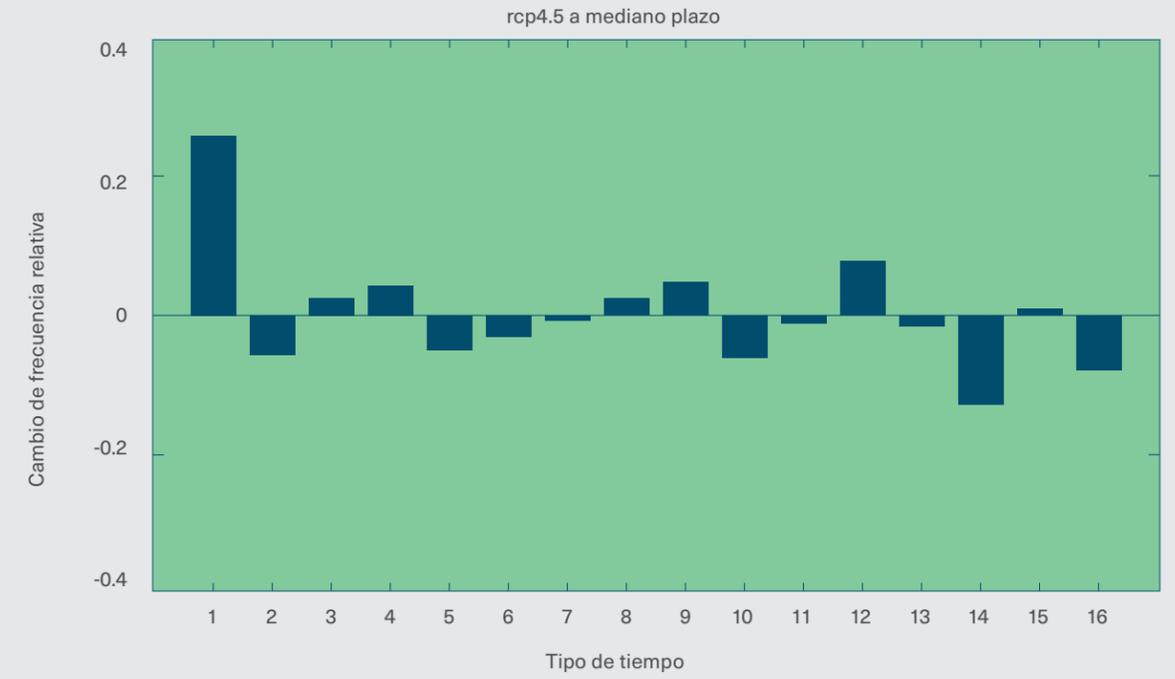
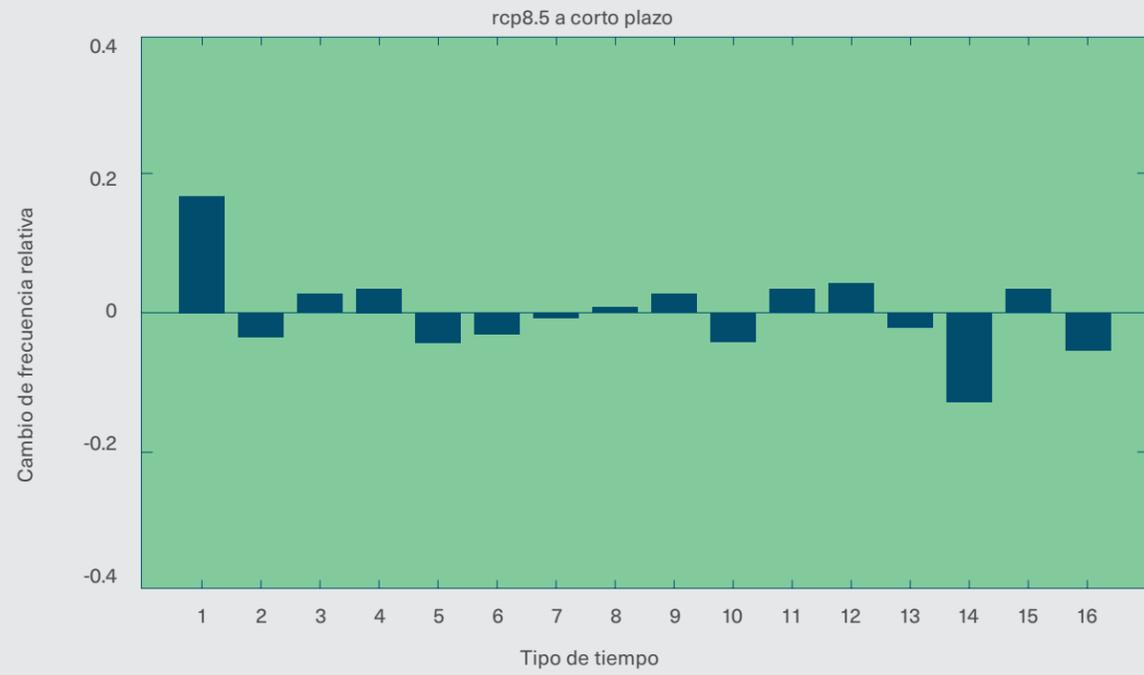
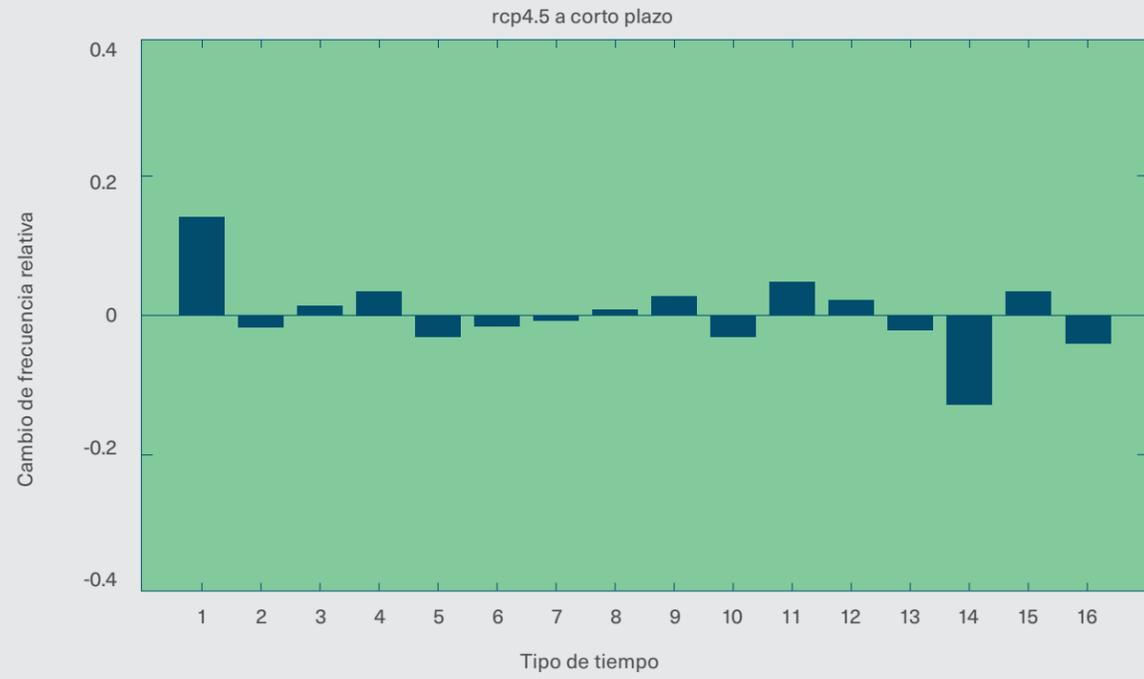


Figura 7 | Cambio en la probabilidad de ocurrencia para cada uno de los 16 tipos de tiempo y para los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. En la figura se muestran dos periodos horizonte, uno de medio plazo centrado en 2050 y otro de largo plazo centrado en 2085.

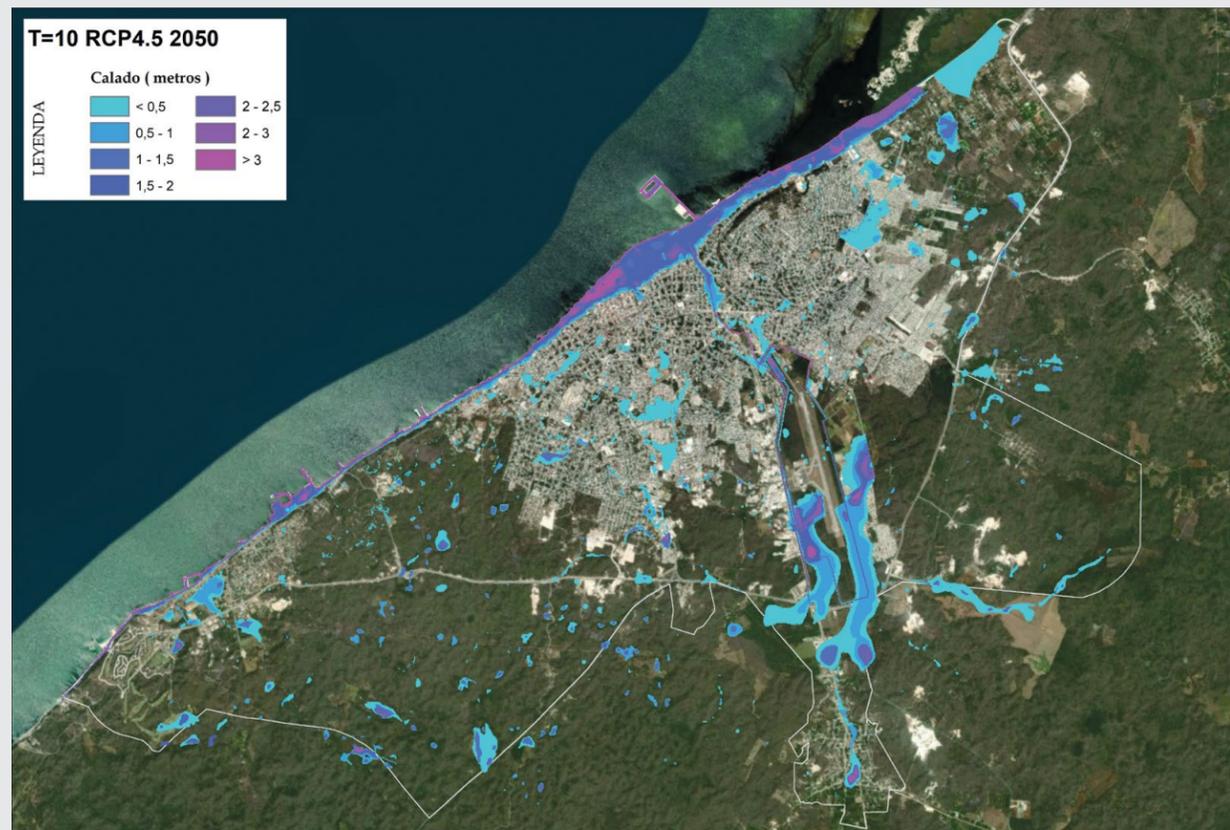
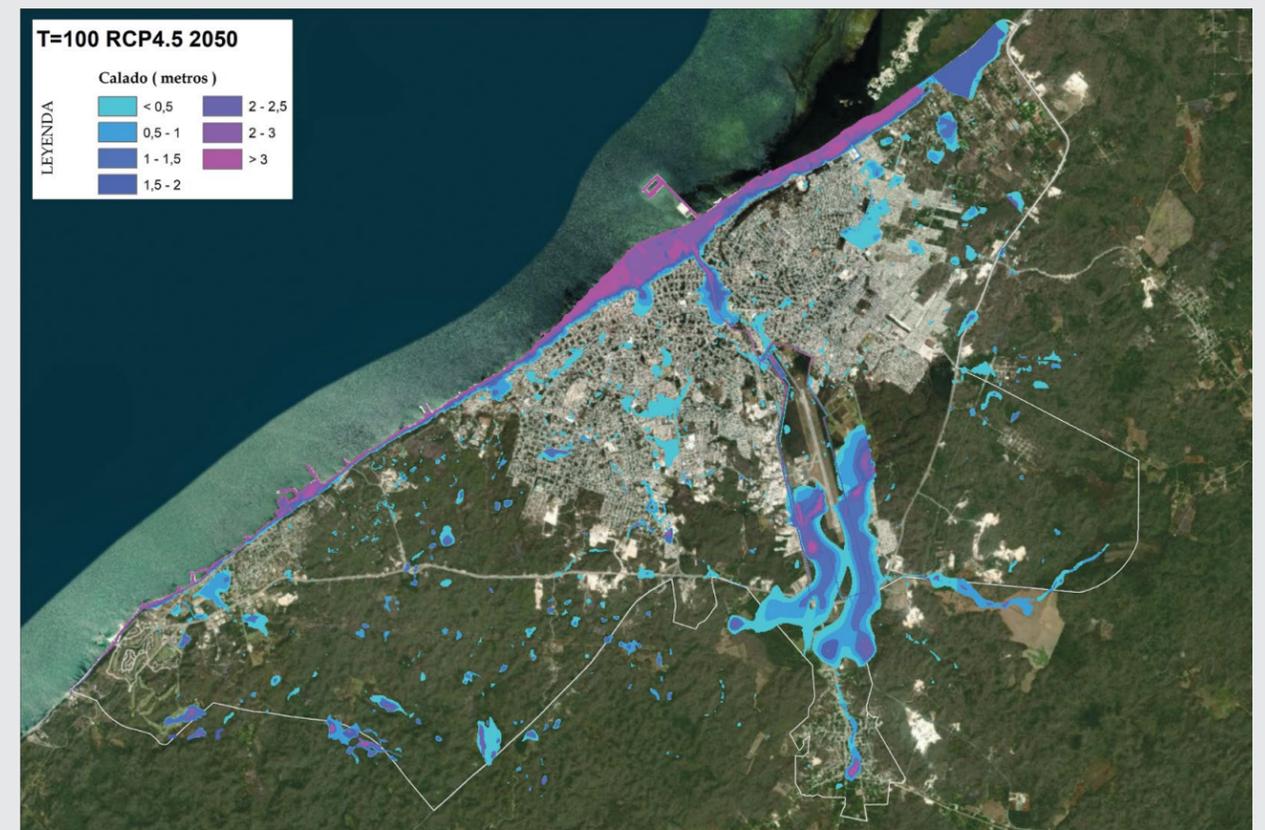


Figura 8 | Mapa espacial de inundación para los periodos de retorno de 10 años para el escenario RCP4.5 y para el periodo temporal centrado en el año 2050.



Mapa espacial de inundación para los periodos de retorno de 100 años para el escenario RCP4.5 y para el periodo temporal centrado en el año 2050.

1.2.2 Los escenarios de ciudad en los estudios de riesgos

El análisis de riesgos en ciudades, como muestran los estudios de base de la ICES del Banco Interamericano de Desarrollo, no debe centrarse solamente en la obtención de daños en la situación actual, sino que, además, deben tratar de analizar las tendencias de evolución de dichos riesgos. Desde un planteamiento mecanicista y, por tanto, inspirado en la física newtoniana, la caracterización de una ciudad desde el punto de vista de riesgos implica conocer dos variables: su posición (estado actual) y su velocidad o tasa de cambio, representada por uno o varios escenarios futuros. Únicamente con el conocimiento de la situación presente sería imposible determinar las posibles trayectorias del sistema y, por tanto, planificar cualquier tipo de intervención para tratar de modificarlas.

Los procesos reales de evolución del riesgo en ciudades, caracterizados mediante mecanismos de construcción del riesgo (ver apartado 5.1 de este documento), son muy complejos y difíciles de modelar. No obstante, en una primera aproximación y adoptando un enfoque simplificador y reduccionista, la definición de escenarios futuros para el análisis de riesgos en ciudades requiere de dos tareas básicas que se pueden abordar, bajo ciertas hipótesis, de forma relativamente desacoplada: la caracterización del clima futuro y la evolución de la mancha urbana con su área de influencia.

Caracterización del clima futuro.

La variación del clima a escala global y su manifestación a escala local es una de las cuestiones más relevantes y complejas que enfrentan en la actualidad científicos y gestores en cualquier ámbito de la realidad. Hay claras evidencias de que los cambios previsibles en variables físicas fundamentales, como son las temperaturas (del mar y del aire), el nivel del mar y las precipitaciones, tendrán a largo plazo (2070-2100) un efecto profundo en los modos de vida y en el nivel de riesgo al que estarán expuestos todos los seres vivos, incluidos los humanos.

En el contexto de este documento es del máximo interés conocer cómo se va a modificar, en un futuro más o menos cercano (2020-2040), el régimen de precipitaciones, caudales fluviales, vientos, olas y nivel del mar en un enclave determinado. Pese al esfuerzo científico realizado durante las últimas décadas en la caracterización de los procesos atmósfera-océano y sus variaciones, en los mecanismos de

impacto y en las medidas de adaptación y/o mitigación disponibles, las condiciones climáticas a las que estará expuesta una ciudad cualquiera dentro de 20 o 30 años siguen siendo, en gran medida, una incógnita. Los modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés) y su versión regional (RCM, por *Regional Climate Models*) no tienen la resolución espacial y temporal suficiente para caracterizar con precisión las amenazas en escalas de pocos kilómetros (1-10 km); además, con respecto a ciertas variables climáticas como las precipitaciones y, particularmente, en las zonas de la Tierra más dinámicas como los trópicos, los modelos presentan discrepancias significativas en sus predicciones a largo plazo. Buena parte de las ciudades de ALC están situadas en zonas tropicales y sometidas a dos tipos de fenómenos que se resisten al modelado numérico: las teleconexiones (en especial, la ENOS, más conocida como El Niño) y los ciclones tropicales. Estas limitaciones de la ciencia, que previsiblemente se irán resolviendo en las próximas décadas, no deben restar importancia al análisis del efecto del cambio climático en la planificación de todos los sectores de actividad, ni inhibir la respuesta de políticos y gestores ante una de las cuestiones que más influencia puede tener en el desarrollo económico y humano de la región. Antes bien, la incertidumbre existente, combinada con un conocimiento informado de lo que está en juego en cada caso, debe inducir a aplicar el principio de precaución y a diseñar cualquier estrategia sectorial con criterios de adaptación y flexibilidad ante un mundo cambiante.

El cambio de la escala espacial de centenares de kilómetros, aportada por los GCM, hasta la escala de una ciudad del orden de unos pocos kilómetros, es una de las tareas clave en los estudios de riesgos en ciudades. Paralelamente, muchas veces es necesario tener una estimación de los valores máximos de una variable (por ejemplo, la precipitación) en un intervalo de tiempo menor (horas) que el que proporcionan los modelos (días). Por tanto, uno de los retos más característicos de los estudios que analizan el efecto potencial del cambio climático en las ciudades es la reducción de escala (en inglés, *downscaling*), espacial y temporal, de las estimaciones existentes.

Los procedimientos específicos para llevar a cabo estas tareas de reducción de escala de las predicciones de los modelos climáticos se esbozarán en dos apartados de este documento: por un lado, la proyección de fenómenos extremos, y en particular las lluvias, se presentará en el contexto de análisis de amenazas asociadas a eventos (apartado

2.6); por otro, el cálculo del régimen medio futuro de precipitaciones, o sus caudales derivados, se presentará en el contexto de los riesgos de sequía urbana (apartado 4.2), donde tiene su aplicación más directa. Esta separación responde a diferencias sustanciales en la cantidad y calidad de la información disponible para caracterizar el comportamiento medio y extremo de las diferentes variables climáticas, que afecta a la fiabilidad de las predicciones de los GCM y, en definitiva, a los métodos disponibles para interpolarlas. Como se verá también, la elección del método más adecuado de reducción de escala depende de la finalidad del análisis, es decir, del tipo de medida de reducción del riesgo que se plantea (estructural, de gestión, financiera, etc.). De forma general, existen dos grandes tipos de métodos para esta tarea, los que se basan en la resolución de las ecuaciones fundamentales de procesos con una discretización mayor (métodos dinámicos) y los que emplean métodos estadísticos calibrados con datos locales, no basados en la física (métodos estadísticos)

Otro aspecto característico del análisis del cambio climático en ciudades es el relativamente corto horizonte temporal (habitualmente 2020-2040) para el que se requieren predicciones. En general, los GCM tienden a generar resultados coherentes y cualitativamente similares (al menos en cuanto a variaciones en las temperaturas) para un horizonte más lejano (típicamente 2070-2100), cuando se alcanzan unas concentraciones más o menos estables de gases de efecto invernadero en la atmósfera, dependientes de cada escenario de emisiones global o RCP (*Representative Concentration Pathway* o Trayectoria de Concentración Representativa). El medio plazo se encuentra a medio camino entre la variabilidad y el cambio de clima propiamente dicho; si bien se reduce la incertidumbre asociada a la elección de las RCP, aumenta la incertidumbre asociada al modelado de los procesos físicos.

Evolución de la mancha urbana y de su área de influencia

Para la definición de diferentes escenarios de evolución de la mancha urbana es importante conocer las pautas y los mecanismos que gobiernan el crecimiento, tanto los que están planificados y recogidos en los planeamientos vigentes o en tramitación, como los que realmente se han producido a lo largo de las últimas décadas. Se recomienda un enfoque dual: por un lado, estudiar el crecimiento urbano y los procesos dominantes como hechos históricos consumados; por otro, analizar la evolución en las pautas y directrices incluidas en

las diversas oleadas de planificación territorial, incluido el ciclo de planificación vigente y el que se encuentre en fase de elaboración.

Como solución práctica y operativa para el análisis de escenarios futuros, en los estudios de la ICES se ha optado por considerar un número reducido de escenarios de crecimiento, lo más diferenciados posible, caracterizados para dos horizontes temporales (por ejemplo, 15 y 30 años desde el presente). Adoptando un mínimo de tres escenarios, se puede tratar de representar, de manera aproximada, una envolvente superior e inferior, así como una evolución intermedia, de las posibles trayectorias futuras de una ciudad en relación con cada riesgo analizado:

1. Escenario de crecimiento urbano tendencial

Este escenario prefigura la ciudad del futuro asumiendo que las pautas y los mecanismos recientes de construcción del riesgo se mantienen vigentes y estables; es un escenario no intervencionista o con intervenciones moderadas basadas en pautas históricas observadas. Las premisas de este escenario suelen ser, en ciudades de ALC, un crecimiento demográfico alto, una tasa de inversión pública en infraestructuras baja pero no nula y una actitud predominantemente reactiva ante los riesgos. En este contexto, las áreas desfavorecidas tienden a ver agudizada su situación y en aquellas áreas favorables se seguiría mejorando. En muchos casos, este escenario equivale a una hipótesis de evolución desfavorable, a modo de envolvente superior (aunque casi nunca pésima) de los riesgos. No obstante, en algunas ciudades donde se han tomado medidas recientes para reducir los riesgos, es incorrecto considerar el escenario tendencial como desfavorable y, más bien, debe equipararse a un escenario intermedio o incluso inteligente (ver puntos siguientes). En ese caso, se debe sustituir esta categoría de escenario tendencial por la de uno pesimista, para cubrir de forma razonable el rango de evoluciones posibles.

2. Escenario de crecimiento urbano inteligente (en inglés, *Smart*)

En este escenario se combinan medidas de planificación urbana sostenible con actuaciones para eliminar o reducir los riesgos hasta un nivel que se considere aceptable. El concepto de sostenibilidad urbana y el criterio de riesgo aceptable no están fijados como tales, pero por lo general, se establecen en cada caso a partir de

baremos tomados de ciudades de similares características (tamaño, geografía, clima) de países desarrollados. En todo caso, el escenario inteligente cuantifica las condiciones razonablemente alcanzables, si se sigue un modelo de crecimiento urbano racional con recursos suficientes para acometer las medidas de reducción de riesgo necesarias. El grado de idealismo que se puede introducir en este escenario y, por tanto, la probabilidad real de que se materialice quedan al albur de los redactores y supervisores de cada estudio. En general, resulta más interesante plantear este escenario como una oportunidad de evolución optimista pero factible de una ciudad, teniendo en cuenta sus circunstancias particulares de partida, que como un sueño teórico e irrealizable.

3. Escenario de crecimiento urbano intermedio

Se define de forma heurística a partir de los dos escenarios extremos anteriores, combinando una serie de medidas de actuación con otros factores históricos que no se ven modificados y que pueden afectar negativamente la evolución de los riesgos. Se trata de un escenario posibilista y pragmático, a medio camino entre el tendencial-pesimista y el inteligente.

El escenario inteligente y, en menor medida, el intermedio conllevan actuaciones de reducción de riesgos y de reordenamiento urbano, que serán tratadas en profundidad en el apartado 6 de este documento. Para comparar los diferentes escenarios en términos de eficacia, se pueden aplicar diversas técnicas (ver apartado 7), entre ellas el análisis costo-beneficio. En la *Figura 4* se muestra un ejemplo del procedimiento seguido para la evaluación del riesgo humano en la ciudad de Quetzaltenango, en

Guatemala, para los escenarios considerados en la misma: actual, tendencial y *Smart* para el horizonte 2050.

Al combinar las posibles evoluciones del clima, que determinan las fuentes de amenaza, con las de la mancha urbana, es posible cuantificar los daños futuros de la misma manera que se evalúan en la situación presente, siguiendo un procedimiento como el que se describirá en los próximos apartados. Sin embargo, esta posibilidad de cuantificar el riesgo futuro, basada en analizar de forma casi independiente la evolución urbana y el clima, tiene limitaciones que conviene tener presentes a la hora de interpretar y asignar credibilidad a los resultados obtenidos. Además de la gran incertidumbre a la que están sujetos tanto el componente de predicción del clima futuro como la de la evolución de la mancha urbana (ver apartado 3.8), la evolución urbana depende en cierta medida (según cada ciudad) de la evolución de los riesgos, que, a su vez, dependen de la evolución urbana. Por lo tanto, el hecho de trabajar sobre hipótesis independientes de evolución en el clima y en el urbanismo, para luego combinarlas en un año horizonte dado, sin entrar a analizar su coevolución dinámica, es muy reduccionista (ver apartado 5 para un enfoque más transversal). Ante estas circunstancias, es legítimo considerar el cálculo de los riesgos futuros en una ciudad no tanto como un acto predictivo, sino como un ejercicio de prospección o indagación, que incite a la reflexión y al debate público.

Cabe indicar que el concepto de mitigación (equivalente a reducción) que aquí se emplea es el correspondiente al ámbito de la gestión del riesgo de desastres y no al de cambio climático, donde la mitigación representa aquellas medidas orientadas a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

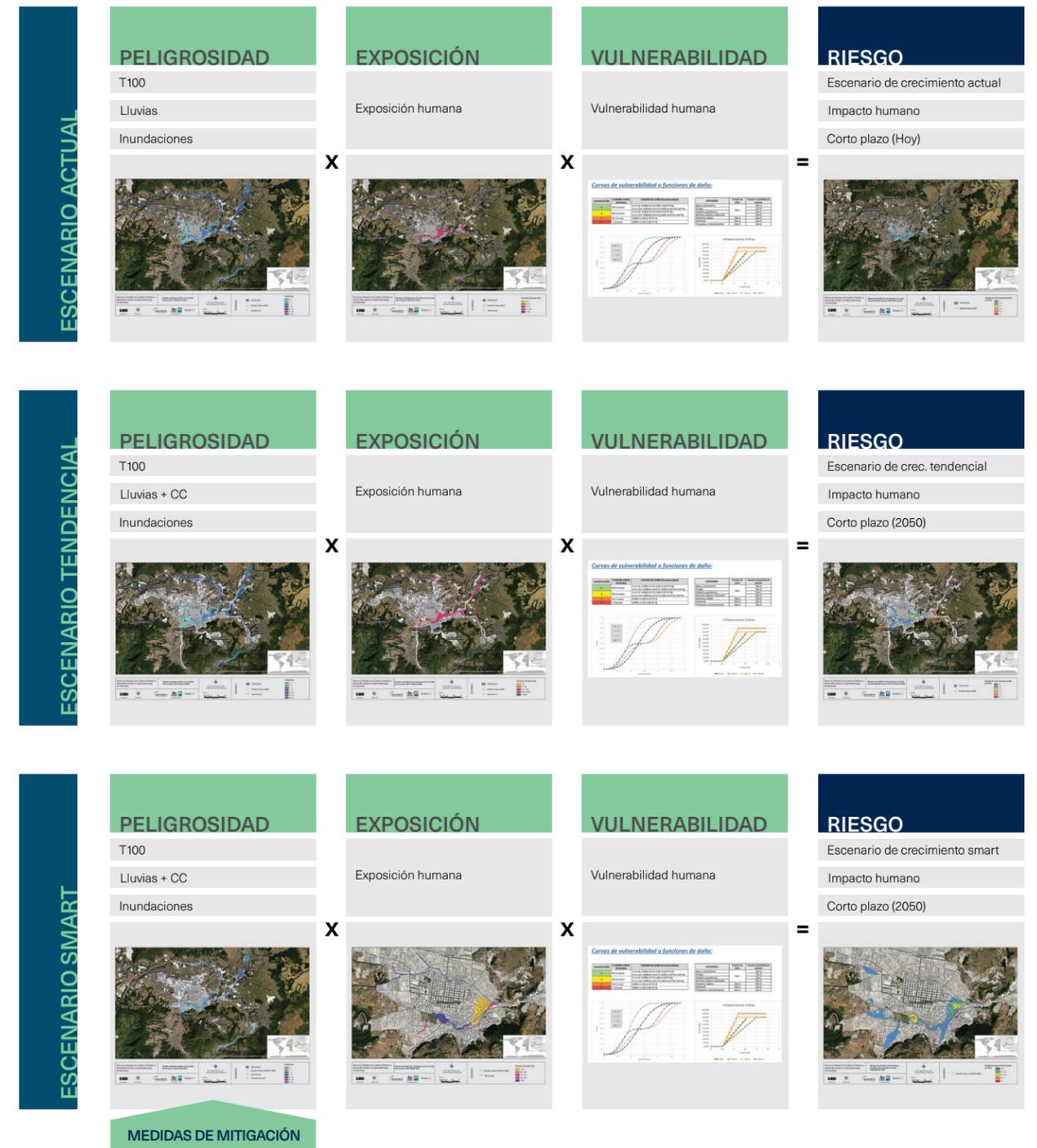


Figura 9 | Ejemplo de estructura de evaluación de riesgos humanos para el escenario actual y los dos escenarios de crecimiento considerados (tendencial y *Smart*) en Quetzaltenango, Guatemala.

1.3 Recopilación de datos de partida

1.3.1 Datos topográficos y de caracterización física del suelo

Los datos topográficos necesarios para llevar a cabo estudios de riesgos dependen de la amenaza a estudiar. En las *Tablas 2 y 3* se ha reflejado la información necesaria en cuanto a altimetría y caracterización física del suelo, según la categoría del área de trabajo, para diferentes amenazas.

Los estudios de riesgo de inundación pueden requerir, en el análisis del área de influencia definido anteriormente, unos datos topográficos de escala mayor (menor detalle) para caracterizar las cuencas hidrográficas y su comportamiento hidrológico, mientras que las áreas priorizadas y de expansión requieren topografía de alta resolución, incluidas la batimetría de las zonas fluviales, estuarinas o costeras que limitan con ellas. Generalmente, las topografías empleadas para el análisis del área de influencia tienen una resolución espacial de celda entre 10 y 30 m y suelen estar disponibles a través de los entes nacionales responsables de la cartografía (institutos geográficos o cartográficos), o bien a través de bases de datos de altimetría global. Su grado de precisión es variable según regiones y depende de cada fuente de origen. Algunas de las bases de datos globales de altimetría disponibles en la fecha de redacción de este documento son ASTER, SRTM, IFSAR y TanDEM-X (ver Sampson, Smith, Bates, Neal, & Trigg, 2016).

Las topografías de detalle proceden de levantamientos topográficos convencionales, vuelos con generación de pares estereoscópicos o vuelos con sensores LIDAR. En todos los casos, se requiere trabajo de campo para calibrar los resultados de las operaciones realizadas a partir de los datos de sensores aerotransportados. La obtención de la topografía de detalle de las áreas priorizadas y de expansión, utilizando estos procedimientos, suele ser una tarea costosa y que requiere plazos dilatados de tiempo. Una solución intermedia que está en el mercado desde hace algunos años es la generación de topografías de resolución y calidad intermedias (entre el LIDAR y las bases de datos globales) a partir de imágenes de satélite de alta resolución y apoyo de campo. Existen diversas empresas y organismos que ofrecen este servicio a un precio competitivo, aunque la precisión de los resultados debe comprobarse en cada caso. Una resolución aceptable para una topografía de detalle en este tipo

de estudios es de entre 1 y 5 metros de tamaño de píxel.

En los estudios de inundación costera es necesario conocer no sólo la topografía de las zonas emergidas, sino también la batimetría de la franja costera, ya que condiciona los oleajes y niveles en el borde costero que, en última instancia, determinarán la inundación de las zonas interiores.

Para el cálculo de riesgos por vientos extremos, en el caso de que existan accidentes orográficos (tanto en el área priorizada como en las de expansión o influencia), se requiere analizar el efecto de la topografía en las variaciones espaciales del viento, si bien para ello no es necesario, por lo general, una topografía de alta resolución. En el caso de que se trate de un terreno plano, sin accidentes orográficos cercanos, puede no ser necesario disponer de un MDT, asumiendo como hipótesis de trabajo un campo de vientos homogéneo.

Además de los datos de elevación del terreno (*Tabla 2*), los estudios de riesgo de inundación y viento requieren de

CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

Con independencia de la fuente de datos topográficos, las inundaciones en zonas urbanas están muy influidas por la presencia de elementos singulares como son muros, encauzamientos, rellenos de obras lineales, drenes, colectores, etc. Habitualmente, la posición y geometría exacta de estos elementos no están correctamente reflejadas en los modelos digitales del terreno (MDT), incluso de detalle, lo que obliga a introducirlos, al menos los más relevantes, de forma manual. La generación de MDT específicos para modelado hidráulico, combinando información aportada por empresas especializadas en topografía con datos concretos de infraestructuras locales, es una tarea clave de los estudios de riesgo de inundación en la que no se deben escatimar esfuerzos, ya que condiciona, en gran medida, la calidad de los resultados. Cabe señalar que para llevar a cabo el modelado hidráulico de un tramo de río o sector de estuario también es necesario conocer la profundidad de las zonas sumergidas, información que a menudo no se incluye en los MDT terrestres disponibles.

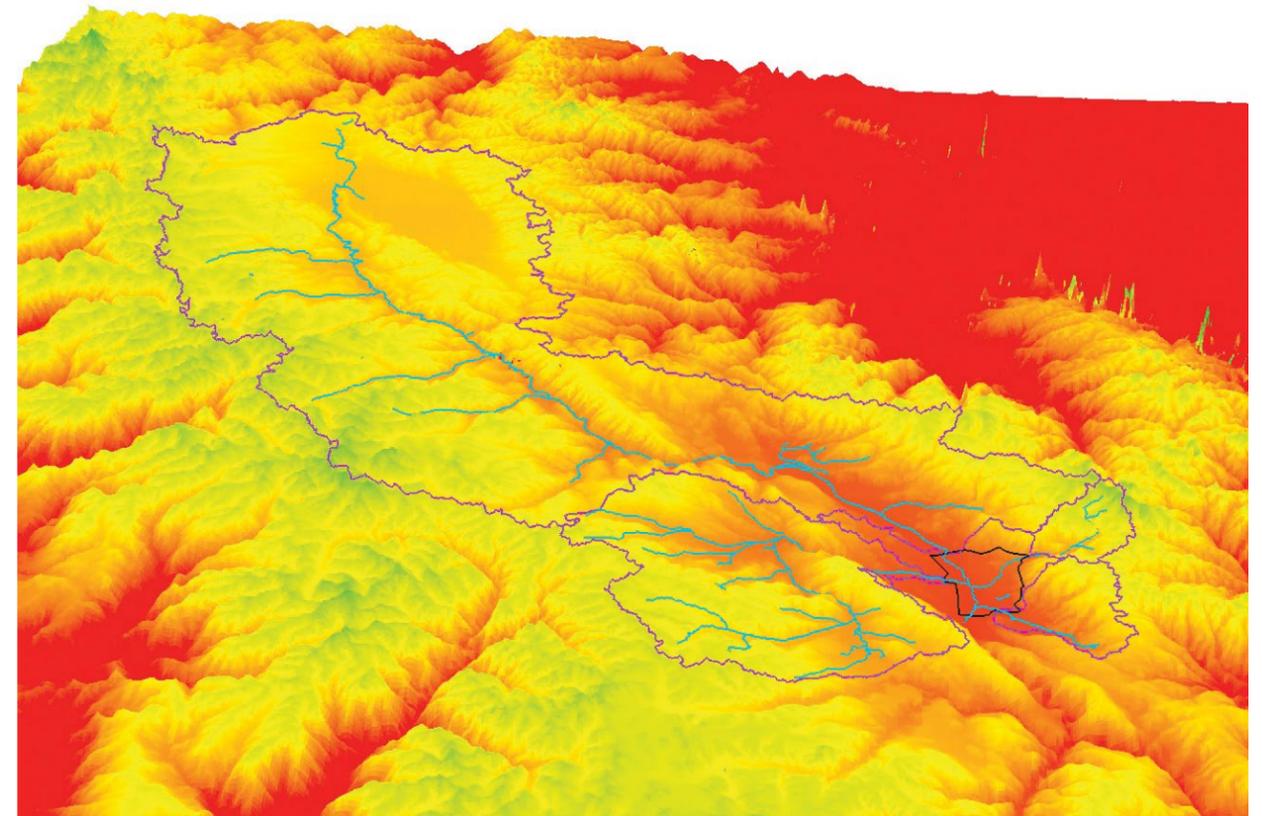


Figura 10 | Ejemplo de MDT ASTER de 30x30 m de resolución utilizado para el área de influencia en Huancayo, Perú.

una caracterización física del suelo, para lo cual es necesario contar con información sobre la rugosidad física del mismo, representada mediante algún tipo de coeficiente, por lo general Manning o Chezy. En el interior de las masas de agua dicha rugosidad está ligada al tipo de material del lecho (arcillas, arenas, gravas) y al régimen de transporte (que determina las formas de fondo como ripples, dunas, etc.), mientras que en las áreas urbanas emergidas depende no sólo de los materiales, sino también de la densidad y distribución de las manzanas de edificios.

La caracterización de los sedimentos, con su curva

granulométrica asociada, cobra especial importancia en los estudios de riesgo por erosión costera, donde los procesos morfológicos y las configuraciones de equilibrio dependen, en gran medida, del tipo de sedimentos, junto al clima marítimo. En este tipo de estudios también es particularmente relevante la recopilación de datos históricos, tanto de batimetría y posición de la línea de costa, como de las fechas de construcción de obras marítimas y de la evolución del tipo de sedimento en un sector concreto.

RIESGO	ZONA PRIORIZADA	ZONA DE CRECIMIENTO	ZONA DE INFLUENCIA
INUNDACIÓN FLUVIAL	Topografía y batimetría de detalle. Definición de obras de defensa y drenaje existente (tipología, sección tipo y cotas).	Topografía y batimetría de detalle.	Topografía de baja resolución de las cuencas hidrográficas.
INUNDACIÓN PLUVIAL	Topografía de detalle. Definición de las principales obras de drenaje urbano con sus cotas y secciones tipo.	Topografía de detalle.	No aplica.
INUNDACIÓN COSTERA	Topografía y batimetría de detalle. Definición de la sección tipo y cotas de obras de defensa y abrigo.	Topografía y batimetría de detalle.	Batimetría general. Evolución histórica de la línea de costa.
HURACÁN (SÓLO VIENTO)	Topografía de baja resolución en lugares con variaciones orográficas que puedan inducir a alteraciones espaciales significativas en los patrones de viento.	Topografía de baja resolución en lugares con variaciones orográficas que puedan inducir a alteraciones espaciales significativas en los patrones de viento.	
EROSIÓN COSTERA	Topografía y batimetría de detalle. Definición de la sección tipo y cotas de obras de defensa y abrigo.		Batimetría general. Evolución histórica de la línea de costa.

Tabla 2 | Datos topográficos necesarios para los estudios de riesgos.

RIESGO	ZONA PRIORIZADA	ZONA DE CRECIMIENTO	ZONA DE INFLUENCIA
INUNDACIÓN FLUVIAL	Caracterización de la rugosidad hidráulica del territorio. Granulometría del lecho del río.	Estimación de la rugosidad hidráulica futura del territorio.	Caracterización de las propiedades hidrológicas del suelo. Capacidad de almacenamiento, permeabilidad, número de curva o similar, etc.
INUNDACIÓN PLUVIAL	Caracterización de las propiedades de infiltración y almacenamiento del suelo. Rugosidad hidráulica equivalente.	Estimación de las propiedades futuras de infiltración y almacenamiento del suelo. Rugosidad hidráulica equivalente.	No aplica.
INUNDACIÓN COSTERA	Caracterización de la rugosidad hidráulica del territorio. Granulometría costera.	Estimación de la rugosidad hidráulica futura del territorio.	
HURACÁN (SÓLO VIENTO)	Caracterización de la rugosidad equivalente de la cobertura del terreno, incluida la densidad y altura de las edificaciones.	Caracterización de la rugosidad equivalente de la cobertura del terreno, incluida la densidad y altura de las edificaciones.	Caracterización de la rugosidad equivalente de la cobertura del terreno en macroescala.
EROSIÓN COSTERA	Caracterización granulométrica de las playas y fondos marinos por sectores.	Caracterización granulométrica de las playas y fondos marinos por sectores.	Batimetría general. Evolución histórica de la línea de costa.

Tabla 3 | Datos de caracterización física del territorio en los estudios de riesgos.

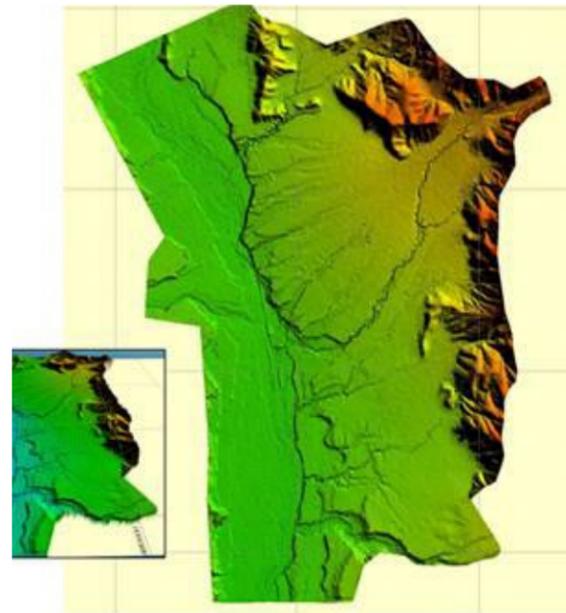


Figura 11 | Ejemplo de MDT de detalle de 2x2 m de resolución realizado a partir de pares estereoscópicos utilizado para las áreas priorizados y de expansión en Huancayo, Perú.

1.3.2 Recopilación de datos hidroclimáticos y de eventos históricos

Al igual que ocurre con los datos topográficos y de caracterización física del suelo, los datos hidroclimáticos necesarios para la realización de un estudio de riesgos dependen de la amenaza que se prevé analizar. En la *Tabla 4* se presentan las diferentes variables hidroclimáticas que es aconsejable recopilar para la caracterización de cada una de las amenazas incluidas en este documento. Entre las presentadas, hay variables dominantes que son absolutamente necesarias para el cálculo de una amenaza concreta (ver *Tabla 1*) y hay otras que sirven como apoyo para calibrar los resultados parciales de los modelos empleados en el proceso.

La práctica habitual es proceder a la recopilación de todos los datos instrumentales de las variables hidroclimáticas al inicio de un proyecto para, posteriormente, realizar un control de calidad y terminar con la selección de series temporales de diferentes variables que se van a utilizar para el cálculo de las amenazas correspondientes. Hay que tener en cuenta que estos datos son la base de partida para la caracterización de la amenaza, por lo que esta selección es de gran importancia en estudios de riesgos, sobre todo en el caso de la variable dominante. El proceso de selección requiere de juicio de experto y depende, fundamentalmente, de la duración y resolución de las series temporales, así como de la fiabilidad de la fuente o sistema de medición.

En muchos casos, las series temporales de datos son de corta duración o con un alto porcentaje de huecos. Una solución sencilla y ampliamente utilizada en estos casos es utilizar datos satelitales de bases de datos globales y regionales de variables climáticas (precipitación, temperatura, viento, etc.) y calibrarlos con los datos instrumentales disponibles. Los modelos climáticos proporcionan información de todas las variables atmosféricas a diferentes niveles de cálculo. En el caso de la precipitación, que como se ha visto es una de las variables más utilizadas en la caracterización de las diferentes amenazas, hay que tener en cuenta que no suele estar correctamente capturada por los modelos globales y regionales. En este caso, la calibración con datos instrumentales es fundamental (un ejemplo son los datos satelitales del TRMM, *Tropical Rainfall Measuring Mission*, que se han utilizado en varios estudios del BID y que sin calibración tienden a sobredimensionar los valores medidos).

La recopilación de eventos históricos tiene dos fun-

ciones principales en este tipo de estudios. En primer lugar, es de gran utilidad para conocer los riesgos más importantes a los que se encuentra sometida una ciudad, en las fases iniciales de diagnóstico y priorización de estudios. En esta prospección inicial se tienen en cuenta aspectos clave de los sucesos catastróficos registrados, tales como el periodo de recurrencia, los daños humanos y materiales inventariados, la capacidad de respuesta y los daños indirectos, etc.

En segundo lugar, las catástrofes históricas sirven para calibrar y validar los modelos cuantitativos de cálculo de riesgos, basándose en el análisis de los datos disponibles, tanto instrumentales como procedentes de testigos humanos (ver apartado 3.7). En este sentido es posible validar, dependiendo de la información disponible, tanto el procedimiento de cálculo de la amenaza (por ejemplo, zona inundada y niveles máximos alcanzados durante un evento de inundación; ver apartado 0) como los propios daños económicos (por ejemplo, valor de las viviendas destruidas y afectadas) y humanos (por ejemplo, muertos, desaparecidos, damnificados, afectados y evacuados).

CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

Es recomendable utilizar técnicas de regresión múltiple para establecer relaciones entre los patrones atmosféricos (campos de presión, altura del geopotencial, temperatura, etc.) y las medidas instrumentales de las variables climáticas (precipitación, temperatura, humedad, etc.), ya que las relaciones obtenidas mediante regresión pueden servir para transformar los valores de los modelos en valores equivalentes a medidas instrumentales. Por lo tanto, estas relaciones pueden servir para ajustar y mejorar las proyecciones de los modelos climáticos en escenarios futuros.

RIESGO	VARIABLES HIDRO-CLIMÁTICAS
INUNDACIÓN FLUVIAL	<ul style="list-style-type: none"> · Lluvia acumulada a escala diaria u horaria. · Datos históricos de caudales
INUNDACIÓN PLUVIAL	<ul style="list-style-type: none"> · Lluvia acumulada a escala horaria o inferior · Datos históricos de caudales
INUNDACIÓN COSTERA	<ul style="list-style-type: none"> · Oleaje en profundidades indefinidas (altura de ola, periodo, dirección) · Nivel del mar (Marea astronómica+ marea meteorológica) · Régimen de vientos
HURACÁN (SÓLO VIENTO)	<ul style="list-style-type: none"> · Velocidad y dirección del viento
EROSIÓN COSTERA	<ul style="list-style-type: none"> · Oleaje en profundidades indefinidas (altura de ola, periodo, dirección pico) · Nivel del mar (marea astronómica + marea meteorológica)
SEQUÍA URBANA	<ul style="list-style-type: none"> · Lluvia acumulada a escala semanal o mensual · Datos históricos de caudales · Evapotranspiración potencial media · Temperatura

Tabla 4 | Datos hidroclimáticos recomendados para el estudio de las diferentes amenazas.

1.3.3 Datos socioeconómicos e información urbanística

Hasta este punto, toda la recopilación de información ha estado orientada al cálculo de la amenaza, tal y como se describirá en el capítulo 2. Sin embargo, el riesgo resulta de la combinación de dicha amenaza con un receptor, cuyos atributos de vulnerabilidad determinan la generación de daños. Por tanto, es necesario caracterizar los rasgos fundamentales de los elementos expuestos a un determinado riesgo, con el fin de calcular su vulnerabilidad. Hay una gran variedad de aspectos que configuran la vulnerabilidad en sentido amplio, entre los cuales algunos pueden ser cuantificados y otros no tanto (por ejemplo, los relacionados con aspectos psicológicos, sociales, culturales). Este documento se centrará en un enfoque cuantitativo de los factores de vulnerabilidad, lo que permite acotar y simplificar la recopilación de información al respecto. A continuación, se resumen los aspectos principales que son necesarios para poder aplicar la metodología que se describirá en los apartados 3 y 4.

a. Inventario y caracterización de los edificios

Para calcular los daños potenciales derivados de una inundación, un huracán o un proceso de erosión se requiere conocer, a la escala disponible (individualmente o por manzanas), las características de los edificios que constituyen la trama urbana en cuanto a tipología estructural, altura, uso dominante y valor monetario de reposición. Esto es equivalente a los denominados activos individuales y activos agregados en terminología aceptada por el BID; bajo este segundo término, existe a su vez la opción de Individualización espacial y la de agregación espacial.

b. Densidad de población

Para determinar el componente humano de los daños, se requiere conocer la distribución espacial media de la población, así como cualquier tipo de información agregada relativa a las pautas de movilidad (factores de modificación de la población estática según horas del día, fines de semana, eventos señalados, etc.). La base de partida para esta información es el censo poblacional realizado por las municipalidades que, en ocasiones, se encontrará desfasado y deberá corregirse para reflejar la situación actual. Nótese que en muchas ciudades el número de personas que se encuentran en ciertos

sectores en horas punta es superior a la población censada, tanto porque el censo oficial no incluye ciertas categorías (desplazados, inmigrantes) como por los movimientos pendulares que se producen entre los centros urbanos y las zonas periurbanas, a veces a decenas de kilómetros de distancia. Por los mismos motivos, la población real en ciertas zonas residenciales en horario laboral es mucho menor que lo señalado por el censo.

c. Inventario y caracterización de infraestructuras críticas

Además de la caracterización de los edificios de uso general, incluido viviendas, es conveniente identificar, ubicar y caracterizar los edificios y centros orientados a usos específicos como son: centros educativos (guarderías, colegios, universidades), hospitales y residencias de ancianos, áreas de refugio, elementos críticos de transporte (estaciones, intercambiadores, puentes, carreteras y vías principales, etc.), centros comerciales, mercados, estaciones de bomberos, comisarías, instalaciones energéticas clave, etc. La información relativa a este tipo de instalaciones, que en este documento se denominarán críticas, servirá no sólo para evaluar los daños directos, sino los posibles efectos sistémicos y diferidos asociados a una determinada amenaza (ver apartado 3.4).

d. Planeamiento urbanístico y crecimiento urbano previsto

Dado que los estudios de riesgo se refieren no sólo a la situación actual, sino que pretenden evaluar tendencias futuras, es importante conocer las pautas de crecimiento de las ciudades, tanto las que están planificadas y recogidas en los planeamientos vigentes o en tramitación, como las que realmente se han producido a lo largo de las últimas décadas. Se recomienda, por tanto, un enfoque dual: por un lado, estudiar el crecimiento urbano y los procesos dominantes como hechos históricos consumados; por otro, analizar la evolución en las pautas y directrices incluidas en las diversas oleadas de planificación territorial, incluyendo el ciclo de planificación vigente (posiblemente, con su nuevo plan de ordenamiento en elaboración y tramitación). Las discrepancias entre la realidad y los sucesivos planes de ordenamiento

suelen aportar información valiosa para identificar y caracterizar los mecanismos de construcción de riesgo, tal y como se verá más adelante (apartado 5).

CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

Debe verificarse que los tres tipos de polígonos en que se subdivide el espacio urbano no se solapan entre sí y que las densidades de edificación se estiman de forma consistente con el criterio seguido para definir dichos polígonos. Por ejemplo, si los polígonos no recubren completamente el espacio urbano (por no incluir los viales o parques e instalaciones deportivas), los coeficientes de edificación serán más altos que si abarcan la totalidad del espacio. El solapamiento de los polígonos de sectores o manzanas con los de infraestructuras críticas es incorrecto, puesto que implica contabilizar dos veces los daños (como edificación convencional y como infraestructura crítica), si bien en el caso de instalaciones pequeñas el error es despreciable. Finalmente, un error común y de mucha trascendencia práctica es delimitar un polígono urbano de forma solapada con un cauce fluvial. En ese caso, la población equivalente de la zona superpuesta tendrá una alta tasa de fatalidad, sin que esto resulte de una circunstancia real, sino más bien de un error del SIG.

Toda la información asociada a las cuatro categorías anteriores es susceptible de introducirse en una base de datos cartográfica compuesta por los siguientes tipos de elementos:



1. Polígonos que representan unidades básicas de trabajo. Por lo general manzanas o sectores urbanos, cuyos atributos básicos son tipología estructural y materiales dominantes, altura media de los edificios, densidad edificatoria media (porcentaje de superficie construida con respecto al área total del polígono), porcentaje de usos (residencial, comercial, oficinas), valor de reposición de los inmuebles (en unidades monetarias, habitualmente USD, por m²) y población censada asociada al polígono. En caso de existir información, se puede añadir atributos complementarios como son la proporción de niños y ancianos, la renta media de la población y cualesquiera otras variables que puedan aportar información de vulnerabilidad física y humana.

2. Polígonos que representan las zonas de expansión previstas en la ciudad. Que incluyen no sólo su delimitación geográfica, sino también las características básicas de las nuevas zonas: usos principales, densidad edificatoria, altura y tipología media de los edificios, etc. Conviene diferenciar de forma clara los sectores de expansión potencial frente a aquellos ya consolidados o en construcción.

3. Polígonos que representan las denominadas infraestructuras críticas. Los atributos principales asociados a estas infraestructuras son el tipo de infraestructura y todos aquellos parámetros que sirvan para cuantificar su importancia dentro del subsistema urbano al que pertenecen (ver apartado 3.4).

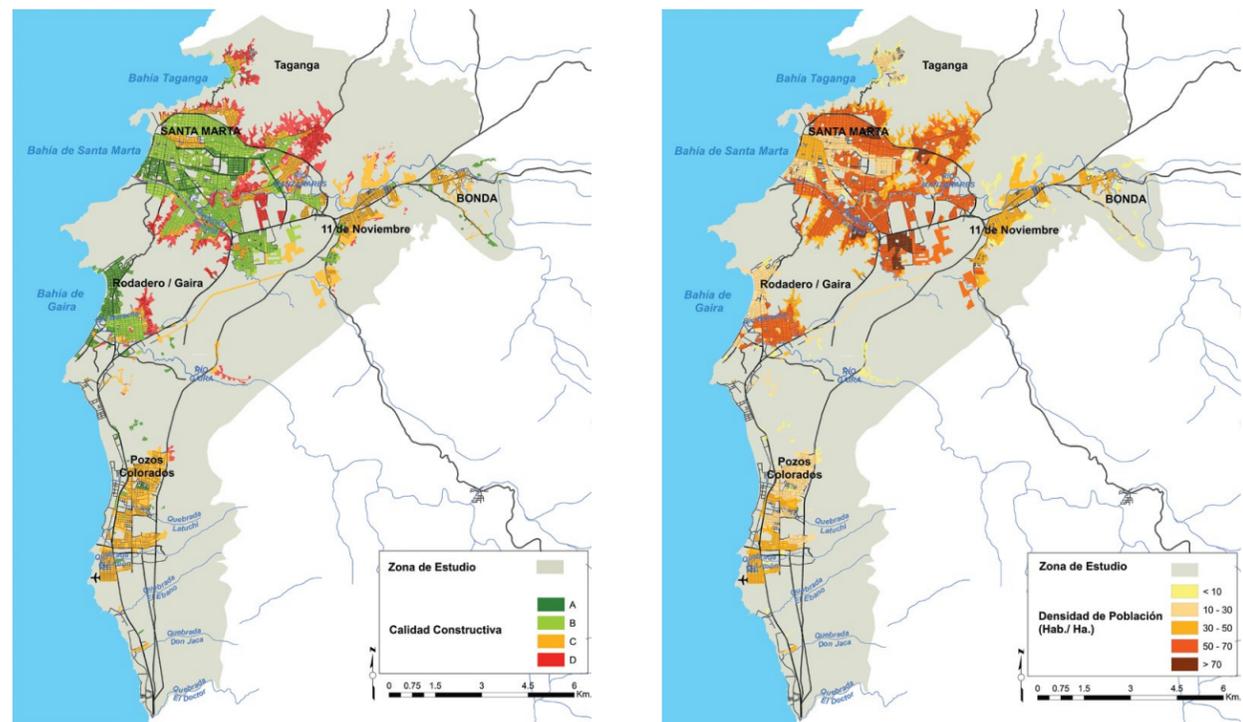


Figura 12 | Ejemplo de la distribución geográfica de las edificaciones en función de su calidad constructiva (izquierda). Ejemplo de mapa de densidad de población utilizado en Santa Marta, Colombia (derecha)

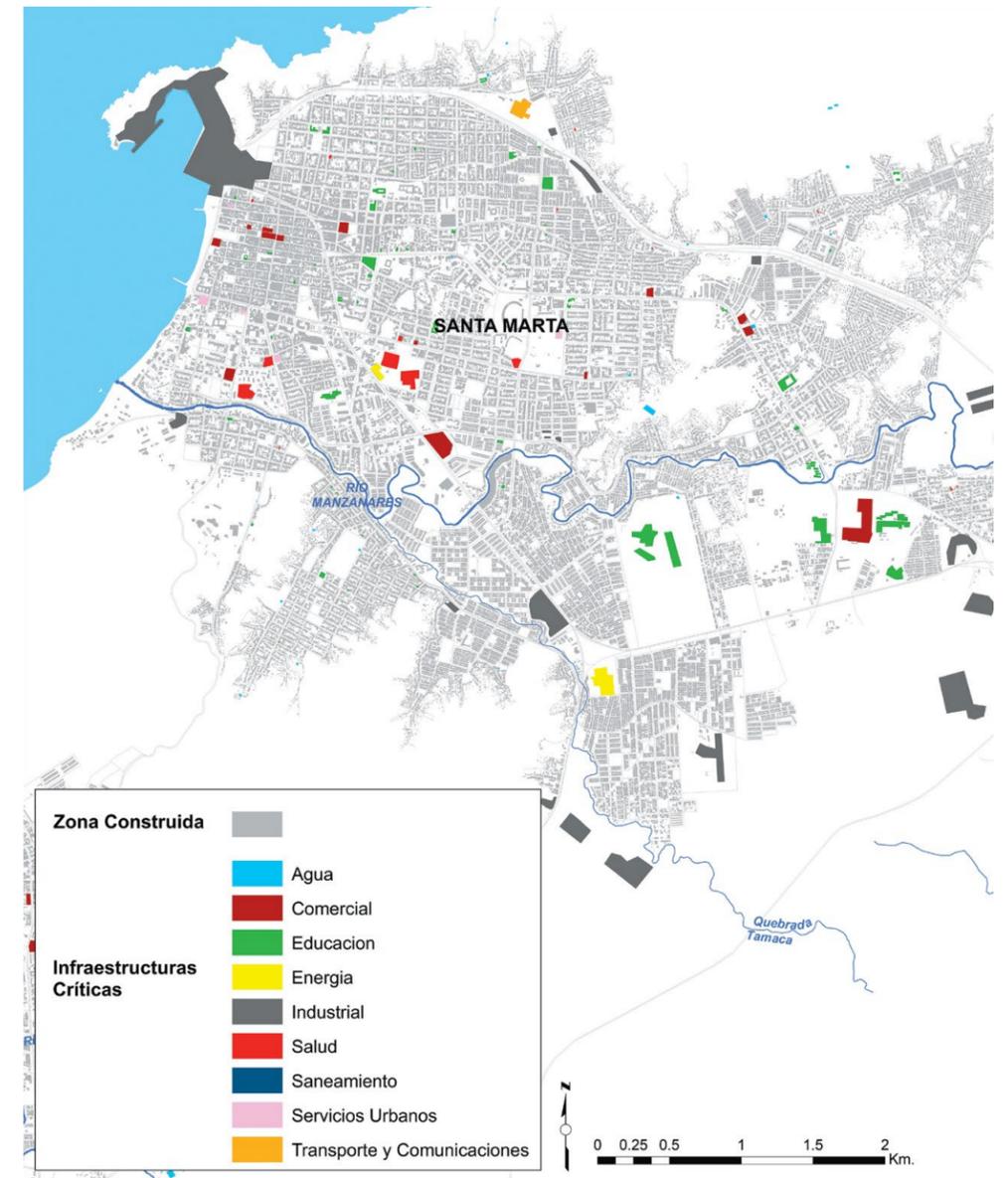


Figura 13 | Ejemplo de la distribución geográfica de las infraestructuras críticas, Santa Marta, Colombia.

2

Cuantificación de las amenazas —

- 2.1 La amenaza de inundaciones fluviales y por lluvias /59
- 2.2 La amenaza por vientos extremos /60
- 2.3 La amenaza por inundación costera /66
- 2.4 Cuantificación de los procesos de erosión costera /74
- 2.5 La amenaza por huracán /80
- 2.6 El efecto del cambio climático en el cálculo de las amenazas /81

2

Dentro de este apartado se caracterizará la amenaza asociada a cada uno de los riesgos considerados en este documento, con excepción del riesgo de sequía urbana, que al ser de desarrollo lento presenta algunas peculiaridades en el análisis de la vulnerabilidad y el riesgo, y se abordará de forma separada en un apartado independiente (capítulo 4).

2.1 La amenaza de inundaciones fluviales y por lluvias

Las ciudades interiores y algunas costeras (las que se sitúan en una zona elevada con respecto al nivel del mar, como son los casos de Lima y de Trujillo, en Perú, de la ICES) tienen como causas potenciales de inundación las lluvias locales y/o el desbordamiento de los ríos que las atraviesan. En ambos casos, la variable dominante es la precipitación (local o remota) y las variables derivadas que caracterizan la amenaza son principalmente el calado y las velocidades del agua en las zonas de afectación.

Por lo general, la mayor parte de las ciudades del mundo se ubica en las cercanías de un río de cierta entidad que, en un principio (y a veces aún en la actualidad), servía como fuente de abastecimiento y como medio receptor de residuos. A este río se incorporaban otros arroyos y quebradas más pequeños, generalmente de flujo discontinuo que, a medida que las ciudades se expandían y consolidaban, eran percibidos como barreras a la movilidad y como espacios desaprovechados desde el punto de vista de los usos urbanos.

En el caso de ciudades situadas en terrenos aluviales activos (terrazas que están dentro de la cota de inundación potencial del río), su propia ubicación induce un cierto nivel de riesgo de inundación fluvial, sin necesidad de considerar procesos antrópicos. Este riesgo de base puede considerarse natural en sentido estricto, ya que forma parte del ciclo sedimentario y, además, aporta beneficios en forma de suelos fértiles que rellenan progresivamente los valles. No obstante, la aparición y

el crecimiento de las ciudades suele traer consigo la irrupción de factores no naturales que agravan dicho riesgo de base:

- a. El crecimiento urbano modifica y generalmente minimiza el espacio fluvial, reduciéndolo a un corredor cada vez más estricto, constreñido por diques o muros en ciertos sectores y con escasas zonas de expansión. Asimismo, la construcción de puentes para salvar la discontinuidad natural del cauce lleva aparejada, en muchos casos, una obstrucción al flujo, sobre todo en situaciones de avenida.
- b. Los procesos de transformación de los usos del suelo a escala regional, que afectan a las cuencas vertientes, modifican las condiciones hidrodinámicas y morfológicas de funcionamiento del río. Por ejemplo, la deforestación de las cuencas genera un superávit temporal de carga sedimentaria, una mayor variabilidad del régimen hidrológico y, en muchos casos, un aumento de los caudales de avenida.

A estos factores locales y regionales se suma la modificación del clima a escala local por efecto del calentamiento global.

Si el destino de los ríos principales de las ciudades en crecimiento es ver reducido su espacio natural y modificada su cuenca vertiente, el de las quebradas y arroyos menores suele ser más drástico si cabe: tramos enteros

son rellenados, soterrados o, en el mejor de los casos, reducidos a una sección de hormigón, con dimensiones reducidas. Por tal motivo, multitud de ciudades, particularmente en ALC, experimentan inundaciones relativamente frecuentes por la incapacidad de las redes de drenaje urbanas para evacuar las lluvias locales o procedentes de las laderas limítrofes. Estas inundaciones, que suelen denominarse pluviales tienen, por lo general, rasgos característicos que las distinguen de los desbordamientos de grandes ríos:

- Suceden de forma habitual (en ocasiones más de una vez por año) y están ligadas a eventos de lluvia local cortos (a menudo inferiores a una hora) e intensos.
- Causan, generalmente, pocas pérdidas humanas y moderadas pérdidas materiales, al menos, en términos directos. Sin embargo, suelen conllevar la paralización o ralentización de las actividades comerciales, colapso de la movilidad urbana e incremento del absentismo laboral durante varios días al año.
- Las personas afectadas aprenden a convivir con este tipo de inundaciones, muchas veces con mecanismos de adaptación simples y rudimentarios (bancadas de elevación de las viviendas, compuertas aislantes en puertas, zonas elevadas de resguardo de muebles y electrodomésticos, etc.).
- A mediano y largo plazo, suponen un lastre para el desarrollo y mejora de los espacios urbanos y traen consigo una devaluación y depauperación progresiva de las zonas afectadas.

El cálculo de la amenaza de inundación fluvial en una ciudad consta de los siguientes pasos generales:

1. Selección del/de los tramo/s de río objeto de estudio y delimitación de sus cuencas vertientes

Se deben considerar los tramos fluviales asociados a zonas donde existe un riesgo potencial de desbordamiento y, además, existen activos físicos o actividades humanas susceptibles de ser impactadas por la inundación. La longitud de los tramos de estudio debe tomarse

con cierta holgura, al abarcar una cierta distancia aguas arriba y aguas abajo de la zona de interés estricta. Por razones hidráulicas, es conveniente situar las secciones iniciales y finales de los tramos de estudio en zonas morfológicamente estables (a ser posible en lechos no aluviales donde exista un control geológico en roca) y lejos de infraestructuras singulares como puentes, azudes, etc. La delimitación de las cuencas vertientes a los tramos seleccionados (área de influencia) se basa en una topografía no de detalle del territorio y existen numerosos programas que permiten realizar esta tarea. La topografía de detalle será necesaria para los cálculos hidráulicos.

2. Caracterización física de las cuencas vertientes (ver apartado 1.3.1)

El tipo de información necesaria para caracterizar el comportamiento hidrológico de las cuencas depende de la disponibilidad de cada país o región, así como del enfoque adoptado para el modelado hidrológico (ver punto 4 más adelante). Por lo general, se requiere conocer los usos del suelo y, en particular, la superficie de bosque y de cultivos, así como alguna información litológica y edafológica que permita caracterizar la estructura y comportamiento de los suelos.

3. Caracterización del clima, con atención especial a la caracterización espaciotemporal de las lluvias extremas

Esta tarea es una de las más importantes en cualquier estudio de inundación fluvial y, dependiendo de la cantidad y calidad de los datos instrumentales disponibles, puede requerir diversas dosis de juicio de experto. El enfoque más común, enmarcado dentro del tipo de técnicas pseudoprobabilistas según la terminología adoptada por el BID¹, es el de definir tormentas de cálculo (también denominadas hietogramas) con una duración, magnitud y estructura temporal fijas para cada periodo de retorno. De esta forma, el cálculo de la amenaza pseudoprobabilista se reduce a un problema de una sola variable (univariado) y las variables derivadas (caudales, niveles y finalmente daños) heredan directamente

¹ The Disaster and Climate Change Methodology and Guide. IADB. Draft version. July 2019.

la probabilidad asociada a la variable dominante (la precipitación, en este caso).

En cuanto a la distribución espacial de la lluvia es habitual introducir un coeficiente reductor por área que, de forma simple y sin indagar en los procesos físicos de fondo, minorra la lluvia total asociada a un punto, para extenderla a un área no homogénea. Este enfoque relativamente simple es válido para cuencas de tamaño pequeño o intermedio (menores de 10.000 km² como orden de magnitud) y relativamente homogéneas (sin grandes gradientes bioclimáticos o variaciones geológicas). Dentro de estos métodos se sitúa el del número de curva del SCS (Servicio de Conservación de Suelos, por sus siglas en inglés), ampliamente difundido en ALC.

Para cuencas más grandes o complejas, la determinación del comportamiento en avenidas requiere, por lo general, de estudios especializados y no siempre es factible o justificable la reducción a un problema con una sola variable climática dominante, que transfiere su probabilidad de ocurrencia al resto. En una cuenca de cierta extensión, por ejemplo, puede ser tan relevante la cantidad de lluvia total como la propagación de los frentes de lluvia o la sincronización de las lluvias registradas en diferentes valles, que unen sus aguas con un cierto desfase temporal. Nótese que, en estos casos más complejos, la separación a efectos operativos entre la caracterización de la lluvia y el cálculo hidrológico (ver punto siguiente) deja de ser válida y la variable dominante pasaría a ser el caudal en el inicio del tramo de estudio, cuya probabilidad procede de la forma en que se combinan la lluvia con toda su variabilidad espacio-temporal, el territorio y la topología de la red fluvial. Por lo tanto, el enfoque pseudoprobabilista sería aplicable una vez se ha determinado el régimen de caudales al inicio del tramo, como consecuencia de un análisis totalmente probabilista (fully probabilistic, según la terminología BID).

4. Aplicación de modelos hidrológicos para transformar los eventos de precipitación en caudales fluyentes a lo largo de los tramos de estudio

Para llevar a cabo la transformación lluvia-caudal existen multitud de procedimientos (ver, por ejemplo, Beven 2012) que van desde el uso de tablas o ábacos empíricos hasta modelos que requieren una discretización en 3D de la cuenca para modelar las ecuaciones de flujo completas. A medio camino se encuentran los modelos conceptuales, que pueden dividir el territorio por

subcuencas (modelos agregados) o por celdas de tamaño homogéneo (modelos distribuidos); los modelos semidistribuidos emplean un enfoque híbrido (ciertos datos a escala de celda son promediados a una escala mayor de unidades hidrológicas). Estos modelos conceptuales, en cualquiera de sus variantes son, por lo general, adecuados para llevar a cabo cálculos de hidrología en estudios de riesgo y suelen aportar un buen equilibrio entre necesidades de datos de partida, número de parámetros y facilidad de uso. La mayoría de los modelos conceptuales dividen el proceso de generación de escorrentía en dos subprocesos secuenciales: 1) cálculo de las abstracciones y determinación de la lluvia neta 2) tránsito de la lluvia neta hasta el punto de cálculo. Es también habitual en los modelos conceptuales que ambos subprocesos se representen mediante un esquema de depósitos, uno no lineal para el cálculo de las abstracciones y al menos dos con comportamiento lineal para el tránsito (los flujos subsuperficial y subterráneo se propagan por una vía lenta, mientras que los superficiales lo hacen por una rápida).

En los casos en que, al hilo de lo expuesto en el punto anterior, es viable desacoplar el cálculo de las tormentas de diseño del análisis hidrológico, la hidrología suele abordarse con un enfoque basado en eventos, de tal manera que cada hietograma (tormenta) de diseño, lleva asociada de forma biunívoca una curva de evolución de los caudales (hidrograma). En este caso, las abstracciones suelen calcularse empleando el procedimiento del número de curva (curve number), mientras que el tránsito se obtiene con el método del hidrograma unitario (Chow, 1964).

En el momento en que se introducen más grados de libertad en el sistema y la variable dominante deja de ser la lluvia total asociada a una tormenta, con su función de probabilidad univariada, cobra sentido un enfoque de simulación hidrológica en continuo o, como mínimo, basado en la simulación de un gran número de eventos. Los modelos hidrológicos de simulación en continuo se describirán a grandes rasgos en el apartado 4, dedicado al riesgo de sequía urbana.

5. Aplicación de un modelo hidráulico que, a partir de la topografía del cauce y sus zonas adyacentes, permite obtener los niveles y velocidades de agua

El último paso en el cálculo de la amenaza por inundación fluvial es la conversión de los caudales, obtenidos en el inicio de cada tramo de estudio en niveles de

agua y velocidad. Es en este punto donde cobra protagonismo la calidad y resolución de la topografía disponible, tanto dentro del cauce como fuera de él.

Existen numerosos modelos hidráulicos capaces de proporcionar los niveles y velocidades de agua en un dominio de cálculo, basados en diferentes aproximaciones de las ecuaciones de Navier-Stokes, que rigen el comportamiento universal de los fluidos. Los modelos habituales, en ingeniería fluvial, suelen adoptar simplificaciones relativas a la estructura vertical de los campos de velocidades y aceleraciones, de forma que resuelven en 1 o 2 dimensiones en planta las denominadas ecuaciones de Saint-Venant (Cunge, Holly and Verwey, 1980). Los modelos 1D son los más simples y resultan adecuados cuando existe una dirección dominante del flujo, como es el caso de la mayoría de los ríos con llanuras de inundación estrechas y bien conectadas con el cauce principal. En los últimos años se están extendiendo cada vez más los modelos que resuelven las ecuaciones de flujo en su versión 2D, algo más exigentes en términos computacionales, pero que no asumen una dirección dominante del flujo y, por tanto, permiten simular patrones de circulación del agua más complejos, típicos de estuarios y llanuras de inundación extensas. Algunos modelos emplean un enfoque mixto: 1D, en el interior de los cauces estrictos, y 2D, en los terrenos adyacentes. Existen numerosos paquetes numéricos de simulación hidráulica, tanto de libre circulación como bajo licencia, que difieren en cuanto a la interfaz de entrada y salida, herramientas de mallado, algoritmos de resolución numérica de las ecuaciones y funcionalidades complementarias (introducción de puentes y otras estructuras, transporte de sedimentos, etc.).

Para el cálculo de las inundaciones de origen pluvial se deben seguir los mismos pasos descritos anteriormente, con la particularidad de que, por lo general, no es necesario aplicar un modelo hidrológico, independiente del hidráulico, para las cuencas vertientes, ya que éstas suelen estar conformadas por la propia área urbana y los territorios adyacentes. Por lo demás, salvo el paso cuarto que puede omitirse, los estudios de riesgos de inundación de origen pluvial siguen la metodología general que se ha expuesto. No obstante, cabe señalar algunas de las principales diferencias operativas, con respecto al caso fluvial:

- La calidad del MDT de partida es un factor, si cabe más crítico, en el cálculo de las inundaciones por lluvias, que en otros tipos de inundaciones. Los procesos de

generación y acumulación de escorrentía están muy influidos por la presencia de elementos locales como muros, cunetas y rellenos asociados a carreteras y a otras obras lineales, que muchas veces no están recogidos en las topografías disponibles. Muchas de las bases de datos globales de altimetría (ver apartado 1.3.1) tienen una resolución espacial inadecuada para analizar las inundaciones en núcleos urbanos densos, que proporcionan alturas de pixel irreales, puesto que promedian el nivel de la calle con el de las azoteas de los edificios colindantes.

- Las tormentas de diseño asociadas a las inundaciones pluviales suelen ser mucho más cortas que las que generan las avenidas fluviales. Este hecho obliga a una caracterización de las rachas de lluvia con alta resolución temporal (5 o 10 minutos por lo general), lo que requiere datos que muchas veces no están disponibles o que presentan registros demasiado cortos para poder definir el régimen de extremos. En sentido estricto, las inundaciones por lluvias están asociadas no tanto a tormentas, sino a chubascos o rachas de lluvia singulares que ocurren dentro de una tormenta. Además, la duración crítica de las rachas de lluvia para una determinada zona puede depender de la capacidad de almacenamiento y desagüe de la red de drenaje existente, y no sólo de la geometría de las cuencas vertientes, por lo que debe calcularse por procedimientos de ensayo-error (ver punto siguiente).
- La hidrología en cuencas urbanas o altamente urbanizadas tiene métodos y herramientas específicos, que difieren de los que se emplean en cuencas rurales o escasamente edificadas. En primer lugar, el tiempo de respuesta no depende únicamente de la geometría (generalmente caracterizada por una longitud característica y una pendiente media), sino también de la proporción de área impermeable y de la estructura de la red de drenaje existente. Por otra parte, el uso del método del número de curva combinado con el hidrograma unitario puede resultar inadecuado. La mayor parte de los modelos hidráulicos disponibles permite diversas aproximaciones de cálculo para predecir la escorrentía generada por una lluvia local.
- Como ya se ha apuntado, las inundaciones locales están muy influidas por las infraestructuras de drenaje urbano existentes, tanto soterradas como las que se encuentran a cielo abierto (zanjas, cunetas, medianas, etc.). Los modelos hidráulicos deben incorporar, al menos de forma simplificada, los sistemas de drenaje urbano existentes, para que los resultados de riesgos sean fiables.

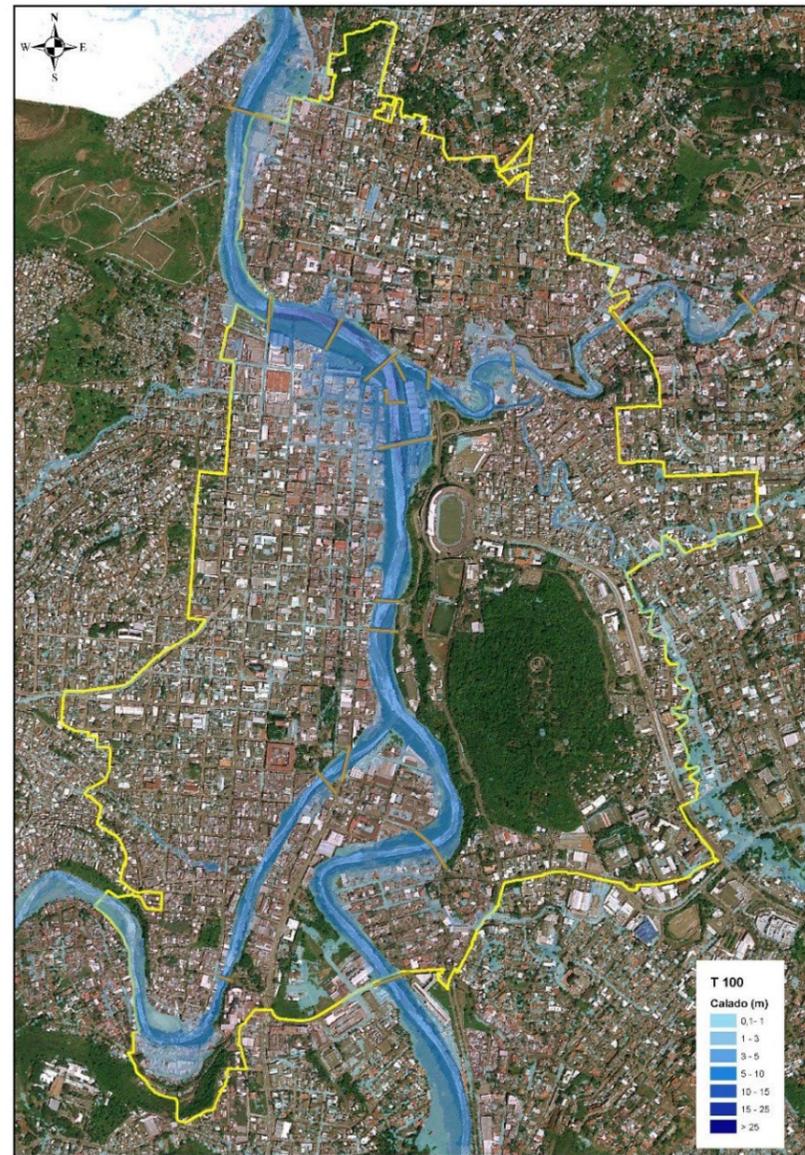
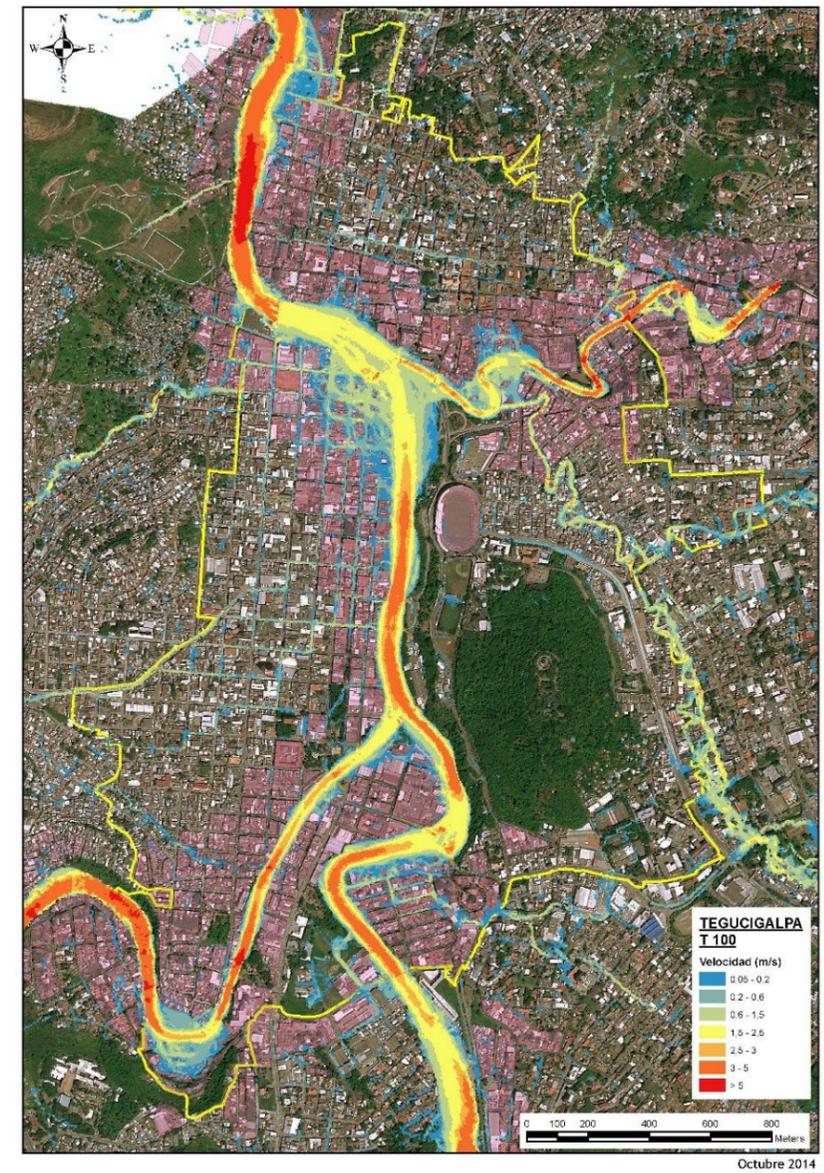


Figura 14 | Ejemplo de mapa de cotas máximas para un evento de inundación de T=100 años, en el área priorizada de Tegucigalpa, Honduras.



Ejemplo de mapa de velocidad máxima para un evento de inundación de T=100 años, en el área priorizada de Tegucigalpa, Honduras.

2.2 La amenaza por vientos extremos

Los eventos de vientos extremos en zonas tropicales se producen, principalmente, por el paso de ciclones tropicales como es el caso de las ciudades de Belice (Belice), Campeche (México), Bridgetown (Barbados) y Santiago de Los Caballeros (República Dominicana), entre otras, de la ICES. Algunos de estos ciclones se clasifican en la categoría de huracanes, que provocan consecuencias devastadoras, siendo la mayoría tormentas tropicales con consecuencias mucho menores, pero que igualmente se deben considerar para una apropiada caracterización estadística de la amenaza por vientos extremos. Por otro lado, hay que tener en cuenta que existen ciudades de ALC donde también se producen daños importantes, tanto económicos como humanos, y que no se encuentran dentro de la zona de afectación de huracanes, como es el caso de la ciudad de Panamá. Por lo tanto, para la cuantificación de esta amenaza se presentan dos metodologías diferentes: una, para los vientos extremos provocados por ciclones tropicales y otra, para vientos extremos sin relación directa con este tipo de eventos. En ambos casos, la variable principal a cuantificar es la velocidad máxima del viento a 10 metros sobre el nivel del mar y, para ello, se hace uso de diferentes técnicas estadísticas de selección, simulación, clasificación y modelado numérico. De esta manera, es posible reproducir y caracterizar estadísticamente la distribución espacial y magnitud de esta variable, con el objetivo de cuantificar su valor para diferentes periodos de retorno.

Vientos extremos asociados a ciclones tropicales

Para el cálculo de la amenaza por vientos extremos por efecto de un ciclón tropical se recomienda el uso de un método probabilista completo, debido a la dificultad de identificar una única variable fuente dominante (no existe un único huracán al que se le pueda asociar un cierto periodo de retorno en términos de los vientos generados). De forma general, la metodología consta de los siguientes pasos:

1. Selección de los ciclones históricos observados en el área de interés

Es importante partir de una base de datos lo más completa posible de ciclones tropicales y seleccionar aquellos eventos cuya traza haya pasado por la ciudad que se esté estudiando o por su área de influencia, al producir vientos importantes en la misma. Normalmente, se escoge un área circular o segmento de la costa alrededor de la ciudad y se seleccionan todos los ciclones cuya traza atravesase esa área.

Existen diferentes bases de datos donde están caracterizados los ciclones históricos (que incluyen huracanes y tormentas tropicales), como la denominada HURDAT, que recoge todas las tormentas tropicales y ciclones, desde 1851 hasta la actualidad, en el Atlántico Norte (Jarvinen, Neuman and Davis, 1988; Landsea et al., 2004) y la global IBTrACS de la NOAA (Knapp et al., 2010), entre otras.

2. Generación de ciclones sintéticos para complementar el elenco de los observados

El número de eventos incluidos en una base de datos histórica que toman tierra en un área local son muy limitados y, en general, insuficientes para la caracterización estadística de la velocidad del viento en régimen extremal. Por lo tanto, se hace necesario el incremento del número de eventos siendo la práctica habitual el uso de métodos estocásticos. El uso de este tipo de métodos de simulación matemática fue implementado por (Russell, 1969, 1971) para la costa de Texas y muchos otros autores los han utilizado desde entonces (Batts, Simiu, and Russell 1980; Vickery and Twisdale 1995a, 1995b; Nakajo et al. 2014; etc.).

Estos métodos están basados en simulaciones de Montecarlo donde una secuencia de ciclones sintéticos se obtiene a partir de la estadística específica (funciones de probabilidad conjunta y correlación temporal) de cada uno de los parámetros principales de los eventos históricos. Algunos de los más utilizados son: intensidad del evento (déficit de presión), trayectoria, veloci-

dad de traslación, presión mínima del nivel del mar y radio ciclostrofico. La generación de trazas sintéticas permite generar ciclones tropicales o huracanes que no han sido observados, pero cuya trayectoria e intensidad son totalmente plausibles y compatibles con las observaciones disponibles.

3. Simulación del viento asociado a los ciclones (modelo del campo de vientos)

Una vez que se dispone de las trayectorias de todos los ciclones sintéticos, el siguiente paso es la obtención del campo de vientos (velocidad y dirección) asociado a cada instante de la trayectoria de cada ciclón.

Los ciclones tropicales son uno de los fenómenos más difíciles de describir y predecir en la atmósfera, incluso con modelos altamente sofisticados. Las mediciones de viento (desde plataformas de superficie, satélites y reconocimiento de aeronaves) pueden estar disponibles durante y antes de la toma de tierra, pero rara vez son suficientes para describir las estructuras de viento tridimensionales y en constante cambio durante todo el proceso.

Ante esta realidad, la práctica habitual es recurrir al uso de diferentes tipos de modelos, que van desde los semiempíricos sencillos, pasando por modelos paramétricos (Holland, 1980; Bretschneider, 1990; Silva et al., 2003), para llegar a aquellos más complejos y que simulan todo el proceso, desde que el ciclón se forma en el océano hasta que se disipa. Estos últimos utilizan la solución completa no lineal a las ecuaciones de movimiento de un ciclón y la intensidad se mantiene constante hasta que el ciclón toca tierra, tras lo cual se descompone, usando modelos de tasa de llenado (Peter J Vickery et al. 2000a; P J Vickery, Skerlj, and Twisdale 2000b).

Todos estos modelos proporcionan el campo de vientos ligado a un ciclón, en función de diferentes variables, entre las que destacan la intensidad del ciclón (déficit de presión), la velocidad de traslación, la temperatura de la superficie del mar y el radio ciclostrofico.

Todos estos modelos proporcionan el campo de vientos ligado a un ciclón, en función de diferentes variables. Las más habituales son la intensidad del ciclón

(déficit de presión), la velocidad de traslación, la temperatura de la superficie del mar y el radio ciclostrofico.

CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

El costo computacional de la simulación de todos los ciclones sintéticos obtenidos es alto y para limitarlo es posible seleccionar un número representativo de ciclones tipo, utilizando técnicas de minería de datos y clasificación. El viento producido por aquellos ciclones no simulados específicamente puede interpolarse a partir de los datos de los ciclones simulados, reconstruyendo la serie completa.

4. Obtención del régimen extremal de velocidad del viento

El siguiente paso es la evaluación del régimen extremal de vientos, a partir de los resultados obtenidos de todos los ciclones analizados. Como resultado se obtiene la velocidad máxima del viento, a 10 metros sobre el nivel del mar, para diferentes periodos de retorno mediante técnicas estadísticas. Nótese que es común que un mismo ciclón genere vientos extremos con direcciones diferentes a medida que su ruta evoluciona por el territorio.

5. Efecto de la rugosidad del terreno

A partir de la interacción del campo de viento con el terreno se produce una variación espacial del mismo, por lo que la evaluación de la rugosidad del terreno es un componente crítico en el modelado del viento. A medida que la superficie del suelo se vuelve más rugosa, la velocidad del viento disminuye cerca del suelo, aunque a un nivel superior permanezca invariable. Esto hace que las fuerzas de viento experimentadas por las estructuras ubicadas en un ambiente típico urbano sean mucho más bajas que las experimentadas por edificios ubicados en regiones relativamente despejadas como, por ejemplo, en zonas costeras.

Tener en cuenta el efecto de la rugosidad del terreno

sobre el campo de vientos implica la aplicación de modelos complejos, que caractericen el comportamiento no lineal del mismo. Este tipo de modelos no se suelen utilizar, a no ser que existan accidentes topográficos importantes que modifiquen sustancialmente el campo de vientos, debido a su alto costo computacional (por ejemplo en zona urbana con rascacielos).

Una aproximación sencilla, que se suele adoptar en códigos de construcción, es la aplicación de un factor de corrección a la velocidad del viento en campo abierto, que depende de la categoría de exposición del terreno local. Este factor, denominado longitud de rugosidad característica del terreno, es función de la altura y espaciamiento de los edificios, árboles y otras obstrucciones existentes en la superficie. A este respecto, se han realizado numerosos estudios que han intentado categorizar la rugosidad del terreno durante las últimas décadas. Sin embargo, hasta la fecha no se ha alcanzado un consenso entre los investigadores en cuanto a su valor para los diferentes tipos de terreno, por lo que existe un gran rango de valores (ver Wieringa 1992; Wieringa 1993; Simiu and Scanlan 1996). Por otro lado, hay también algunas expresiones analíticas sencillas (vease Lettau 1969) que calculan el factor en función de la altura, la superficie de los obstáculos y la superficie de la zona de estudio.

Actualmente, no existen bases de datos con este tipo de información, por lo cual se suele asignar un valor de la longitud de rugosidad característica a cada uso del suelo, a partir de la información sobre usos del suelo de que se disponga.

Vientos extremos no asociados a ciclones tropicales

Para el cálculo de la amenaza por vientos extremos no producidos por efecto de un ciclón tropical el procedimiento es mucho más sencillo, ya que solo se es necesario realizar los últimos dos pasos anteriores, lo que equivale a adoptar un enfoque pseudoprobabilista:

1. Obtención régimen extremal de velocidad del viento

Se parte directamente de los valores de velocidad y dirección del viento (de estaciones meteorológicas existentes en la zona) y, con esos datos, se caracteriza el régimen extremal y así se obtienen las velocidades máximas del viento para diferentes periodos de retorno. En el caso de que no existan estaciones meteorológicas en la zona de estudio o de que los datos sean insuficientes, se pueden utilizar datos de satélite de bases de datos existentes (ver apartado 1.3.2).

2. Efecto de la rugosidad del terreno

Si la ciudad presenta una orografía compleja o si se considera que la rugosidad del suelo va a afectar en gran medida al valor de la velocidad de viento, se modifica la velocidad del viento a 10 msnm, aplicando la longitud de la rugosidad característica como factor de corrección. Un ejemplo de cálculo de la amenaza de viento en ciudad de Panamá se muestra en el *Cuadro 2*.



El objetivo final del apartado de análisis de amenazas es obtener de manera espacial la probabilidad de ocurrencia de la variable susceptible de producir daños: en el caso de las inundaciones, la profundidad máxima de agua y su velocidad; en el caso del viento, su velocidad punta a nivel del suelo; en la erosión costera, el máximo retroceso de la orilla.

Cuadro 2 —

Cálculo de la amenaza por viento en ciudad de Panamá, Panamá

Problemática

En Ciudad de Panamá los vientos extremos son actualmente la segunda amenaza más dañina después de las inundaciones. Los perjuicios son habituales en zonas de la ciudad con viviendas construidas con tejados y cerramientos ligeros, que tienen una alta vulnerabilidad ante este fenómeno.

Metodología

Ciudad de Panamá presenta una orografía compleja para la cuantificación de la amenaza por vientos extremos, por lo que se ha utilizado un modelo numérico de mecánica de fluidos computacional (CFD), que permite el estudio de los procesos aerodinámicos del viento en condiciones de topografías complejas. El uso del modelo permite la obtención de una variación espacial del campo de viento a partir de la interacción de este con la orografía, caracterizando el comportamiento no lineal del mismo. Se aplica un enfoque pseudoprobabilista basado en eventos de cálculo, empleando la terminología adoptada por el BID.

Para la aplicación del modelo, se ha diseñado una malla numérica tridimensional para vientos de procedencia norte, predominantes en la zona de estudio, que recoge los elementos más significativos de la orografía. El mallado se realiza con un tamaño de celda variable, más grosera en la zona superior de la malla y más fina en la zona inferior.

Para la representación de la transformación del perfil por el efecto de la rugosidad del suelo, se han introducido diferentes coeficientes de rugosidad en función del tipo de suelo. Esta variación espacial del coeficiente permite obtener valores del comportamiento del viento más cercanos a la realidad.

El modelo requiere además, como condición de contorno, un viento inalterado de dirección perpendicular a

la malla de cálculo, en este caso a 1000 metros de altura, para incorporar el efecto de las montañas que se sitúan al norte de la Ciudad de Panamá. Dado que no se conoce el régimen de vientos en dicha zona y a la mencionada altitud, se ha introducido un viento tal que genere, en las zonas más expuestas de la malla (representadas por el 5% de las celdas con mayor intensidad de viento) y a 10 metros de altitud, las velocidades obtenidas de las estaciones meteorológicas para los diferentes periodos de retorno.

Resultados

Como resultados de la amenaza por viento, se han obtenido los valores de la velocidad media de vientos estacionarios en todos los puntos de la malla tridimensional. El módulo de las velocidades obtenidas se presenta en la *Figura 1*, donde se muestran diferentes mapas correspondientes a diferentes alturas, con el objetivo de ilustrar el efecto que la orografía tiene en el campo espacial de viento.

En la figura se observa, por un lado, el efecto de sombra que genera la orografía tras las montañas (patrones representados por colores azules), generando áreas de terreno menos expuestas al efecto del viento y, por otro, las áreas donde la incidencia del viento es mayor, donde se aprecian valores con mayores velocidades (representadas en tonos rojos). Adicionalmente, se puede apreciar, cómo el efecto de la orografía disminuye con la altura, las figuras correspondientes a los planos más elevados del suelo muestran campos de viento más uniformes espacialmente que los situados en las zonas cercanas al suelo.

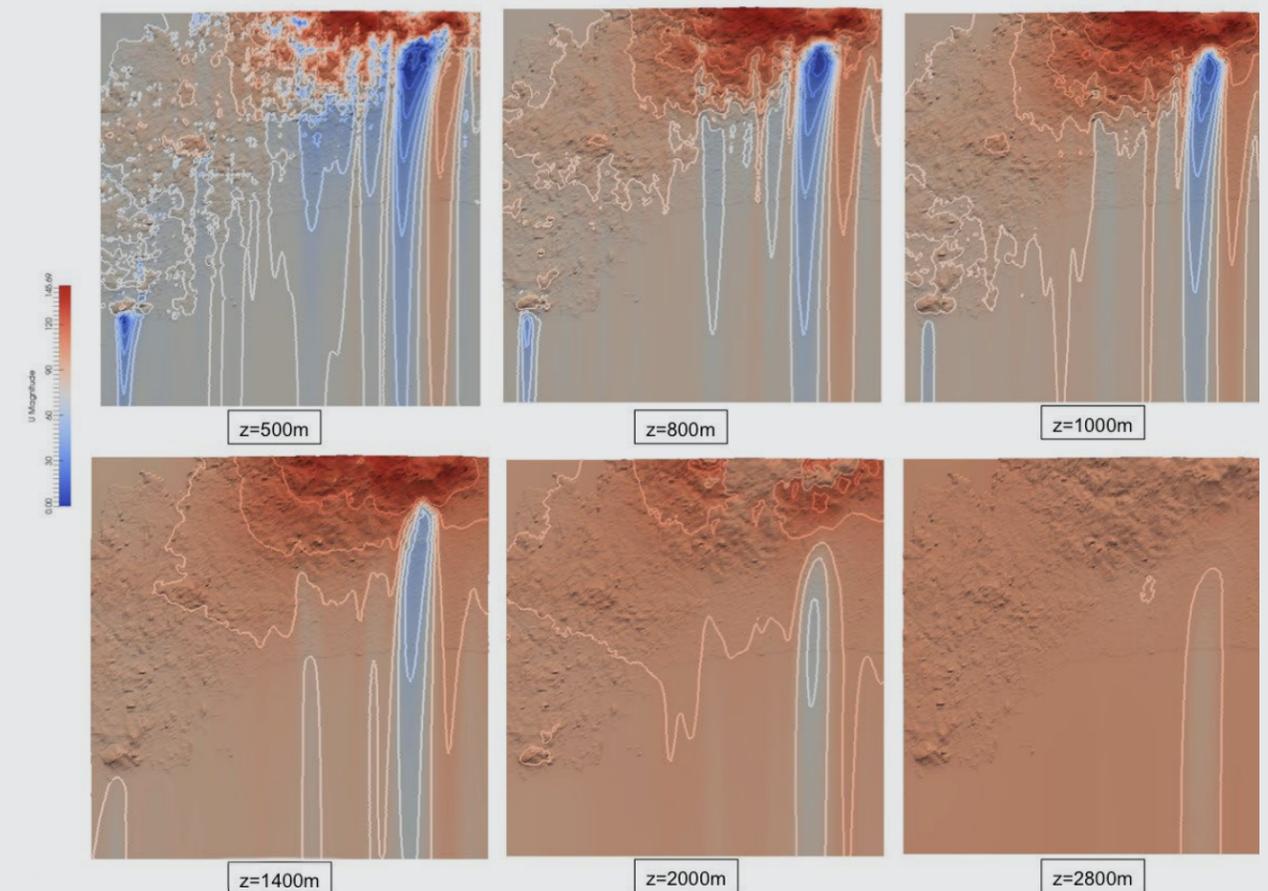


Figura 15 | Resultados de los campos de viento a diferente altura para un viento norte de 150 Km/h. Los colores corresponden al valor del módulo de la velocidad del viento.

2.3 La amenaza por inundación costera

Las inundaciones costeras se producen por un aumento transitorio del nivel del mar, posiblemente acompañado de oleaje, en las inmediaciones de la línea de costa. Pese a su aparente sencillez, los fenómenos físicos que se producen en la interfaz entre el mar y la tierra son muy complejos y difíciles de predecir. En primer lugar, el nivel medio del mar resulta de la combinación de dos tipos de fenómenos independientes: por un lado, la marea astronómica, asociada al movimiento relativo de la tierra, la luna y otros planetas; por otro, la marea meteorológica, definida como el efecto de variación del nivel del mar generado por el viento y las anomalías de presión atmosférica locales. En cuanto a la posible presencia del oleaje, éste a su vez puede conllevar, además del propio movimiento oscilatorio de las olas, una oscilación más lenta de la lámina de agua, generada por la propagación de los trenes de ondas, la denominada onda larga. Como complemento a esta superposición de procesos, en el caso de las playas o zonas de baja pendiente, la rotura del oleaje genera, además, una sobreelevación momentánea del nivel (*run-up*) y una amplificación de la citada onda larga, que a su vez tiene una componente estática (*set-up*) y otra cuasiperiódica (*surf-beat*). En definitiva, si bien la línea de costa está relativamente bien definida en zonas de acantilado, tramos rocosos o frentes marítimos rígidos donde existe un muro de separación tierra-mar, en tramos bajos arenosos se convierte en un ente dinámico, que depende de los procesos morfológicos que transforman el perfil y la forma en planta de la playa, como resultado de la interacción del sedimento con las dinámicas actuantes, en un contexto de alta disipación de energía (Dean y Dalrymple, 2004).

A la vista de esta compleja superposición de procesos, queda patente que el modelado en detalle de todos los fenómenos físicos que pueden estar presentes en un evento de inundación costera resulta inviable a efectos prácticos y, por tanto, se hace necesario adoptar algunas simplificaciones e hipótesis de trabajo. Nuevamente, como en el caso de las inundaciones fluviales, es conveniente reducir el fenómeno de inundación costera a un número mínimo de variables dominantes y, a partir de ellas, obtener el resto de las variables secundarias y derivadas.

Los pasos generales para llevar a cabo una evaluación de la amenaza de inundación en un tramo de costa se describen de forma breve en los siguientes epígrafes, siguiendo un método pseudoprobabilista que podría convertirse en probabilista si fuera conveniente:

1. Análisis del clima marítimo en mar abierto y caracterización de eventos de tormenta

En primer lugar, deben estudiarse las dinámicas marinas fuera de la influencia de los accidentes geográficos costeros y de la batimetría local. Esto implica caracterizar los oleajes extremos en profundidades indefinidas mediante su espectro direccional o, a efectos prácticos, cuantificando sus tres parámetros más relevantes: altura de ola (significante o media cuadrática), periodo (medio o de pico) y dirección de pico (posiblemente acompañado de algún parámetro de dispersión angular). También debe obtenerse el régimen de niveles (que incluyen la marea astronómica y las variaciones de presión atmosférica; en mar abierto la sobreelevación por viento es despreciable). A partir de estos análisis, se seleccionarán un número de tormentas representativas, a las que se puede asignar una probabilidad de ocurrencia.

2. Propagación de oleajes hasta la línea de costa

Los estados de mar caracterizados en profundidades indefinidas se transformarán a medida que el oleaje se acerca a la costa, al experimentar procesos de refracción, difracción, asomeramiento y rotura, entre otros. Para llevar a cabo la propagación del oleaje hasta los límites del ámbito marino, donde comienza la zona terrestre, existen diversos modelos numéricos que, a partir de la batimetría y de las condiciones de contorno, resuelven las ecuaciones de flujo oscilatorio correspondientes. En muchos casos, la altura de ola máxima que alcanza a un muro o paseo costero está limitada por la profundidad disponible en las inmediaciones de la estructura, y no por las olas incidentes.

3. Determinación de las condiciones de contorno hidráulicas en el perímetro del dominio de cálculo terrestre

El flujo de agua susceptible de inundar la tierra firme durante una tormenta costera depende de la interacción entre la hidrodinámica local y el elemento que define la línea de costa (por lo general una playa, un acantilado o una estructura artificial de protección). Comenzando por el caso más simple de una estructura de forma conocida y estable, como puede ser el muro de un paseo marítimo o un acantilado, el caudal de rebase será una función más o menos compleja del nivel del mar, el nivel de agua interior, el oleaje incidente y la geometría de la estructura (particularmente, su cota de coronación, el material que la conforma y la pendiente de su cara expuesta). Mientras el nivel del mar se sitúe claramente por debajo de la cota de coronación del elemento de borde, el fenómeno dominante será el rebase del oleaje, de naturaleza pulsante; en el momento en que el nivel del mar supere la cota de la estructura, las condiciones de flujo pasan a ser las de un vertedero, produciendo un caudal de entrada más intenso y continuo. En ciertos casos, y para sim-



plificar los cálculos, es este último mecanismo de inundación de flujo sobre vertedero el único que se tiene en cuenta y se desprecian los caudales asociados al rebase del oleaje. En caso de asumir esta hipótesis simplificada, también pueden omitirse o minimizarse los cálculos de propagación de oleajes descritos en el punto anterior.

Cuando el elemento de borde o algunos de los elementos limítrofes son de geometría variable, como es el caso de un playa, las condiciones de inundación deben tener en cuenta la geometría causada por las dinámicas actuantes, y no la geometría antecedente o media. Para ello, se pueden emplear modelos empíricos o basados en procesos que predicen la variación en la forma del perfil de playa, incluyendo una posible berma y la playa emergida, como consecuencia de la acción de las dinámicas marinas. En el caso de playas separadas de la tierra firme por un muro, la variación de la forma del perfil implica alteraciones de la profundidad al pie del muro, lo que a su vez modifica las características del oleaje que produce el potencial rebase.

Nótese que las condiciones de flujo deben evaluarse por tramos de frente costero, tras una caracterización lo más detallada posible de la tipología de elementos que constituyen el límite tierra-mar. Un solo tramo vulnerable, o donde se produzca un posible colapso de la estructura de defensa, puede bastar para inundar un sector de la ciudad que se encuentra bien abrigado en el resto de su perímetro.

4. Aplicación de un modelo hidráulico para determinar los niveles y las velocidades de flujo

Llegados a este punto, son válidas muchas de las consideraciones presentadas en el punto 5 de la metodología incluida en el apartado anterior, para el cálculo de la amenaza por inundación fluvial y pluvial. La inundación costera requiere la aplicación de un modelo hidráulico 2D, con las mismas ecuaciones que en el caso fluvial y con una buena topografía de base; la diferencia fundamental es la naturaleza de las condiciones de contorno, que en el caso de la costa se derivan de los pasos metodológicos precedentes.

2.4 Cuantificación de los procesos de erosión costera

La erosión costera es el proceso por el cual un tramo litoral experimenta un retroceso progresivo de la línea de costa con el transcurso del tiempo; las variaciones puntuales y estacionales de la forma en planta y perfil de una playa, sin que exista una ganancia o pérdida neta de material a largo plazo, pueden resultar de interés para el estudio de riesgos de inundación costera, pero no se consideran en este contexto como amenaza de erosión. Si bien puede existir erosión en diversos tipos de costa, el presente documento se centra en las playas como unidades fisiográficas representativas de este fenómeno. Para comprender y cuantificar los procesos de erosión costera es preciso estimar el balance sedimentario en los distintos tramos o sectores de la zona de estudio con el paso del tiempo y proyectar dicho balance para caracterizar situaciones futuras. Los pasos principales para llevar a cabo un estudio de amenaza de erosión costera se describen a continuación.

1. Delimitación del área de estudio y división en sectores y tramos

Para los estudios de erosión costera a menudo es conveniente analizar no sólo el tramo de estudio estricto (en general, el frente costero urbano), sino otras unidades litorales adyacentes, que en conjunto constituyen una unidad fisiográfica. Como norma general, una vez definida el área de trabajo conviene identificar sectores de costa y, dentro de ellos, tramos de estudio. Los sectores suelen ser grandes playas o grupos de ellas con una orientación o configuración similares (escala de km), mientras que los tramos aportan una subdivisión más fina, normalmente de centenas de metros. La subdivisión en sectores y tramos es relativamente arbitraria, pero es conveniente que los límites que los separan estén asociados a factores geográficos (cabos, desembocaduras de ríos, cambios de orientación o tipo de costa, etc.), o bien a elementos artificiales (puertos, espigones, zonas de relleno, tramos de paseo marítimo, etc.).

2. Recopilación de información y análisis de la evolución histórica

Al igual que en el caso de la inundación costera, debe caracterizarse el oleaje en profundidades indefinidas, así

como el régimen de niveles (ver apartado 2.3.1). En paralelo, debe disponerse de una batimetría lo más reciente posible, con suficiente resolución en las inmediaciones de la costa. En los estudios de amenaza de erosión es particularmente útil disponer tanto de batimetrías históricas como de fotos (dentro de lo posible aéreas y rectificadas, pero también son de utilidad fotos oblicuas que atestigüen la situación de las playas, con su fecha asociada), cartas náuticas antiguas, planos históricos de ciudades, dibujos, etc. En general, se debe recopilar cualquier tipo de información que pueda ser de ayuda a la hora de reconstruir la evolución histórica de la costa. También es conveniente recopilar información sobre la fecha de construcción y características (secciones tipo, materiales, aspectos geotécnicos) de las obras marítimas que se ha construido dentro de la zona de estudio, especialmente puertos, embalses en las cuencas de los ríos, dragados, rellenos, espigones, paseos marítimos, etc.

3. Caracterización del oleaje propagado en la zona de estudio y estimación del transporte litoral

Esta actividad está estrechamente relacionada con la que se incluyó en el apartado 2.3.2) para la amenaza por inundación costera, si bien en este caso no sólo se requiere caracterizar los grandes temporales, sino también las condiciones medias de oleaje. Asimismo, mientras que en el caso de la inundación costera el objetivo se centra en obtener el oleaje en la línea de costa, para los estudios de erosión resulta útil disponer de una estimación de las corrientes longitudinales derivadas de la propagación del oleaje, e incluso del transporte sólido asociado. La mayor parte de los paquetes numéricos de propagación de olas permiten también obtener este tipo de resultados.

4. Caracterización de otros flujos sedimentarios

Además del transporte litoral, un sector costero puede estar expuesto a los siguientes procesos de aporte o pérdida de sedimentos:

- Aportes de ríos, debidos a su carga de fondo y en suspensión derivada del lavado de las cuencas.
- Aportes de acantilados, por erosión debida al oleaje.
- Otros flujos (aportes o pérdidas) entre el litoral y las zonas de tierra adyacentes, por ejemplo por transporte eólico.
- Pérdidas hacia zonas litorales profundas, fuera del perfil de playa activo.
- Flujos de origen humano: rellenos de playa, operaciones de dragado, extracciones de áridos de estuarios y cauces de ríos ligados al sistema, etc.

De todos estos flujos, los más comunes son los aportes fluviales y los rellenos o dragados de origen humano, si bien en cada caso concreto es preciso indagar sobre la importancia de otros procesos. Siempre que sea posible, se recomienda caracterizar los flujos no sólo mediante su valor medio, sino también mediante su serie temporal completa, con la discretización temporal disponible.

5. Balance sedimentario por tramos y determinación de tasas de erosión potenciales

El balance sedimentario sería una mera resta de las entradas y salidas de sedimentos para cada tramo de estudio, tal y como se han obtenido en los pasos previos, si no fuera por el hecho de que cada tramo depende de lo que sucede en los tramos contiguos (salvo en playas encajadas que puedan considerarse unidades independientes a efectos prácticos), y, por tanto, su comportamiento y modo de interacción vienen dados por la secuencia de oleajes considerada. Por ello, en términos estrictos, sería necesario introducir todos los flujos en un entorno numérico capaz de modelar el comportamiento global del sistema por tramos, teniendo en cuenta la escala temporal de los procesos, sus correlaciones y las restricciones morfológicas locales (por ejemplo, la anchura máxima de playa en función de la topografía local o de la longitud de los espigones de apoyo).

En muchos casos, este acercamiento no es viable y basta con adoptar un enfoque simplificado, en el que se establece cuál ha sido y será la variación neta del balance sedimentario en un sector de costa, con respecto a unas condiciones de funcionamiento de equilibrio que, normalmente, se corresponden con una situación histórica sin obras marítimas (puertos y espigones) y sin alteraciones en las aportaciones fluviales. Con ello se obtiene un déficit medio potencial de arena, por tramos o en conjunto, expresado como un flujo (toneladas o m³ de arena por año). Nótese que con este enfoque simplificado el déficit se denomina potencial, puesto que no está afectado por restricciones en el volumen de arena erosionable o por la presencia de elementos rígidos, como paseos marítimos y obras de defensa; además, es un valor medio que no representa situaciones extremas asociadas a un evento concreto y, por tanto, no sirve para estimar el máximo avance del mar en una tormenta.

El último paso consiste en transformar el déficit, expresado como un flujo de volumen (m³/año), en una tasa de retroceso potencial de la línea de costa (m/año), que es el indicador por antonomasia de la amenaza de erosión costera. Para ello debe trasladarse el perfil activo hacia tierra adentro, hasta que el volumen comprendido entre sus posiciones inicial y final, en una rebanada de playa de 1 metro de anchura, equivalga al déficit volumétrico calculado. Bajo ciertas hipótesis resulta la siguiente expresión para el retroceso (x) de la línea de costa:

$$x = \frac{V}{h_* + B}$$

Donde V es el déficit en volumen (m³/año), h* (m) la profundidad de corte del perfil y B (m) la altura de la berma de la playa (ver consideraciones de cálculo).

La determinación de la tasa de retroceso potencial de la línea de costa por efecto de modificaciones en el balance sedimentario no debe confundirse con el retroceso potencial asociado al aumento del nivel del mar, tal y como se recoge en los escenarios de cambio climático. Ambos procesos, aunque se manifestarían de forma similar y

tendrían resultados equivalentes, se derivan de causas distintas, requieren enfoques de reducción del riesgo diferentes y pueden coexistir de manera independiente.

Para calcular el retroceso de una playa debido a un aumento del nivel del mar, el método más directo es la aplicación de la denominada Regla de Bruun que, tras consideraciones geométricas simples, llega a la conclusión de que, con independencia de la forma del perfil de playa, el retroceso medio de la línea de costa (x) asociado a un incremento de nivel del mar S (m), viene dado por:

Para calcular el retroceso de una playa debido a un aumento del nivel del mar, el método más directo es la aplicación de la denominada Regla de Bruun que, tras consideraciones geométricas simples, llega a la conclusión de que, con independencia de la forma del perfil de playa, el retroceso medio de la línea de costa (x) asociado a un incremento de nivel del mar S (m), viene dado por:

$$x = s \cdot \frac{W}{h_* + B}$$

Donde W (m) es la longitud del perfil activo, h^* (m) la profundidad de corte del perfil y B (m) la altura de la berma de la playa.

CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

La profundidad de corte o profundidad activa h^* de un perfil de playa es aproximadamente 1,6 veces la altura de ola significativa superada durante 12 horas al año (Hs_{12}). La longitud del perfil activo W depende, fundamentalmente, del tamaño medio de la arena que lo compone y de la profundidad de corte: $W = (h^*/A)^{3/2}$ donde A es del orden del tamaño medio de la arena (D_{50}) en mm; puede variar entre unas decenas de metros en playas reflejantes de baja energía hasta varios centenares en playas disipativas con oleajes intensos. La altura de la berma B depende de las condiciones locales de cada playa. En caso de no haber datos, se puede adoptar un valor en torno a 1-1,5 m.

Para determinar la tasa de retroceso total de un sector de playa bajo condiciones de erosión y cambio climático, se debe sumar la tasa media de erosión con la tasa equivalente de retroceso por aumento del nivel del mar (retroceso total esperado dividido entre el número de años). En el *Cuadro 3* se muestra cómo fueron aplicadas estas expresiones en el caso de la ciudad de Cumaná en Venezuela.



En general, cualquier ciudad sometida a un cierto nivel de riesgo requerirá un programa de medidas que combine infraestructuras y actuaciones de gestión como concientización, capacitación, planificación del suelo, reformas en el marco legal e institucional, etc. En el diseño de obras de reducción de riesgos deben priorizarse, siempre que sea posible, las medidas inspiradas en el funcionamiento natural del territorio en que se actúa.

Cuadro 3 —

Evaluación de la amenaza por erosión costera en Cumaná, Venezuela

Problemática

La erosión costera en el entorno metropolitano de la ciudad de Cumaná constituye uno de los riesgos naturales que afecta de forma más directa al futuro sostenible de la ciudad, en gran medida debido a la variabilidad de la dinámica marina y el ascenso del nivel medio del mar a causa del cambio climático.

El crecimiento demográfico y la densificación urbana han dado lugar al desarrollo desordenado en plena línea de costa, sin dejar en ocasiones ninguna zona de reserva o amortiguación, lo cual expone las viviendas y las edificaciones a la acción del mar, lo que incrementa su vulnerabilidad. Adicionalmente, en el año 1972 se construyó un canal de desvío del río Manzanares (río principal que atraviesa la ciudad), con la finalidad de proteger los espacios urbanos frente a eventos de avenida del río. Sin embargo, este desvío produjo un efecto indeseado: la reducción de aporte de arena del río al mar (colmatación de sus últimos 8 km y sedimentación en la zona adyacente a la desembocadura) y, como consecuencia, la erosión en la Playa de San Luis.

Metodología

La evaluación de la amenaza por erosión costera en la ciudad de Cumaná se ha planteado mediante el estudio de dos impactos:

- **Erosión de origen antrópico:** Para calcular la erosión de origen antrópico es necesario determinar la dinámica marina a pie de playa. Para ello se han identificado las fuentes de oleaje que llegan a la playa San Luis y, mediante evaluación de puntos de interés en costa y perfiles transversales a la misma, se ha estimado el transporte medio anual causado por la dinámica marina. Este cálculo de transporte ha sido validado con el retroceso de posición de la línea de costa, obtenido a

partir de imágenes satelitales LANDSAT para diversos periodos de tiempo (Figura 16). Se ha analizado por separado el transporte longitudinal de sedimentos causado por el oleaje proveniente de mar exterior, del transporte que provoca el oleaje generado en el Golfo de Cariaco para finalmente integrar el cálculo y determinar el transporte medio anual en playa San Luis.

- **Erosión a causa del aumento del nivel del mar debido al cambio climático:** Se ha calculado el retroceso de la playa debido al aumento del nivel del mar causado por el cambio climático. Para cuantificar la respuesta de las playas frente al aumento del nivel medio inducido por el cambio climático, se emplea la Regla de Bruun. Para conocer la tendencia en la variación del nivel medio del mar debido al cambio climático, se han obtenido los valores del aumento del nivel del mar para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 y para los horizontes 2030 y 2050 a partir de las estimaciones del IPCC publicadas en su último informe (2013) y Slangen et al. 2014.

La línea de costa final se ha definido como una superposición lineal de los dos impactos en el área de costa. Finalmente, de acuerdo a los estudios desarrollados, se proponen líneas de actuación que permitan afrontar ambos impactos de forma sostenible.

Resultados

En cuanto a la erosión de origen antrópico, se ha obtenido que en promedio se está perdiendo arena en la playa a razón de 8000 m³/año. De no realizarse ninguna actuación sobre la Playa San Luis, se estima un retroceso medio de la posición de la línea de costa en función al transporte medio anual calculado y aplicando este retroceso medio a los horizontes 2030 y 2050 se han obtenido

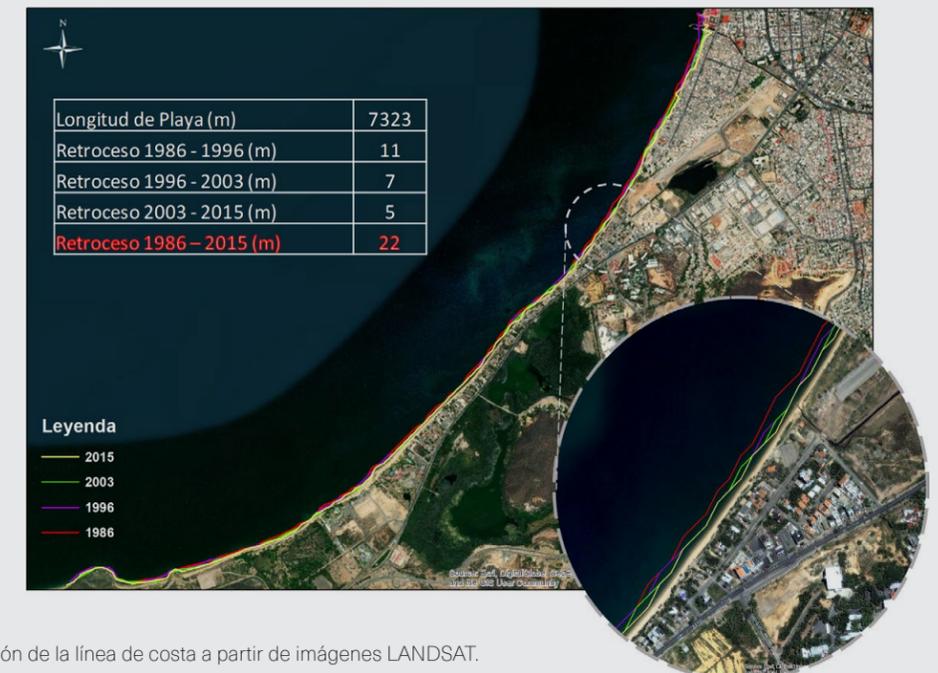


Figura 16 | Evolución de la posición de la línea de costa a partir de imágenes LANDSAT.



Figura 17 | Retroceso total de la posición de la línea de costa en la zona de estudio, para los años 2030 y 2050 según escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 y transporte antrópico.

valores de 9,4 m y 22 m, respecto a la posición en 2015.

En la Figura 17 se presenta el retroceso total como la suma del retroceso inducido por el ascenso del nivel medio del mar debido al cambio climático, junto con el

retroceso provocado por el transporte litoral de sedimentos correspondiente en el caso de no efectuar ninguna actuación que controle el transporte de sedimentos (transporte por impacto antrópico).

2.5 La amenaza por huracán

El paso de un huracán por una ciudad puede llevar asociada una combinación de todas las amenazas descritas anteriormente: inundación (de los tres tipos considerados, es decir, fluvial, pluvial y costera), vientos extremos y erosión costera (en caso de que existan playas). La caracterización de la amenaza por huracán deberá, por tanto, tener en cuenta la probabilidad de ocurrencia de estos sucesos, incluida su evolución en el tiempo ya que, por lo general, los instantes más críticos de cada fenómeno particular no se producirán de forma simultánea.

Debido a la complejidad del problema, los procedimientos de cálculo de la amenaza suelen adoptar una serie de hipótesis simplificadoras, que pueden variar en función del caso de estudio. Como enfoque más holístico se pueden calibrar modelos de evolución de la traza de huracanes (ver apartado 2.2), de manera que sirvan para generar, por simulación numérica a escala regional, campos de viento, de precipitación y de niveles del mar. Los campos de viento que se derivan, además de proporcionar una amenaza en sí mismos, pueden servir como dato de entrada a modelos de generación de niveles y oleaje, susceptibles de propagarse hasta la zona de estudio. Igualmente, los campos de precipitación regional pueden servir para obtener los caudales máximos en cuencas grandes, que servirán para calcular la amenaza por inundación fluvial. Este acercamiento al problema es laborioso, requiere de abundantes datos e implica numerosas hipótesis internas de los diferentes modelos implicados, que hacen que no siempre se obtengan resultados coherentes, especialmente si no se realiza calibración.

Un enfoque algo más sencillo es seleccionar ciertas variables climáticas dominantes (a menudo, el viento y la sobreelevación del nivel del mar en ciudades costeras, y el viento con la precipitación local en las ciudades situadas tierra adentro) y ajustar una función de distribución extremal conjunta, empleando distribuciones multivariadas (por ejemplo, cópulas) o cualquier otro procedimiento estadístico. De esta forma, resultan diversas familias de valores de las variables dominantes que son equiprobables, y la amenaza queda caracterizada por todas ellas, para una cierta probabilidad de ocurrencia.

En el caso de que se desee simplificar aún más el cálculo (adoptando un enfoque pseudoprobabilista),

pueden asumirse de antemano patrones de correlación temporal de los fenómenos implicados y, a partir de ellos, obtener conjuntos de valores que caractericen a los eventos de diseño, entrando directamente en los regímenes extremos univariados de las variables representativas. Así, la amenaza asociada a un huracán de 100 años de retorno en una cierta ciudad puede caracterizarse mediante un conjunto de eventos combinados de lluvia, viento, caudal fluvial y nivel del mar, que se consideren equiprobables. Este procedimiento requiere de juicio de expertos y datos históricos, a la hora de seleccionar los eventos de cálculo y las probabilidades de las variables secundarias asociadas a la variable principal de cada evento que, en definitiva, refleja la correlación interna de los fenómenos físicos implicados.

Cuando una ciudad está expuesta a inundaciones fluviales de un gran río, el paso de un huracán puede producir caudales extremos derivados de las grandes lluvias, pero normalmente desfasados del instante de mayor viento y lluvia local (es el caso de las grandes inundaciones del río Choluteca, en Tegucigalpa, o del río Belice, en la ciudad homónima). En ese caso, se recomienda abordar este fenómeno dentro del apartado de riesgos de inundación fluvial. Asimismo, los huracanes pueden causar deterioros de mayor o menor magnitud en infraestructuras críticas que sustentan algunos servicios urbanos fundamentales como el abastecimiento, la depuración de aguas y las redes energéticas. Estos efectos tienen mucha importancia en la gestión postdesastre y se abordarán en el apartado 3.4.

2.6 El efecto del cambio climático en el cálculo de las amenazas

Las previsiones aportadas por los diferentes modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés) permiten caracterizar la variabilidad climática media y extremal para un horizonte y escenario de emisiones dados y, por tanto, obtener el régimen futuro así como series temporales representativas de las principales variables hidroclimáticas más importantes, entre ellas, las temperaturas y las precipitaciones. Por el contrario, los datos de sucesos extremos son más escasos, conllevan más error instrumental en las mediciones (lo que afecta a cualquier ejercicio de calibración y validación) y suelen estar asociados a procesos físicos más difíciles de reproducir, muchas veces de carácter local. Por ello, en líneas generales, los modelos climáticos no son especialmente aptos a la hora de predecir las distribuciones extremas de las variables implicadas, especialmente aquellas que muestran más variabilidad espacio-temporal, como las lluvias, en las que se centrarán las recomendaciones que siguen.

La mayor parte de los modelos climáticos operan con una resolución espacial horizontal de decenas a centenares de kilómetros, lo que hace que muchas ciudades no lleguen a representar ni una celda completa. Además, muchas ciudades de ALC se encuentran situadas al pie de montañas o en accidentes costeros que inducen fenómenos climáticos de carácter local, que no están contemplados en los modelos o que lo están de forma simplificada. Algunos países u organismos han desarrollado modelos de mesoescala, que en principio son más adecuados, pero aun así los efectos orográficos y convectivos son difíciles de reproducir. Siempre que se plantea la necesidad de aplicar resultados de un modelo climático a una ciudad concreta, es conveniente validar que las series históricas aportadas por dicho modelo (lo que se denomina reanálisis de datos) son coherentes con los registros históricos locales disponibles y, si no lo son, tratar de encontrar un método para que se adecúen.

El problema de la resolución de los modelos no solo es espacial, sino también temporal. En muchos casos, el análisis de la amenaza por lluvias o desbordamientos fluviales de cuencas pequeñas y urbanas requiere información de la precipitación a escala diez-minutal o, como mucho, horaria. En muchas ciudades hay disponibles

algunos pluviógrafos o estaciones meteorológicas que aportan este tipo de datos, con los que se elaboran las expresiones que permiten obtener cuánta lluvia puede darse en un tiempo dado, para una situación extrema de cierto periodo de recurrencia, que se denominan curvas intensidad-duración frecuencia (IDF).

En los estudios de riesgo en ciudades surge la necesidad de estimar las curvas IDF para diversos escenarios de clima futuro. Para ello, se parte de las curvas IDF actuales, obtenidas a partir de registros instrumentales con una duración suficiente, para luego aplicar algunos de los métodos de proyección disponibles. Este documento se centrará en comentar algunos métodos de naturaleza estadística para llevar a cabo esta tarea, que en general resultan adecuados para este tipo de estudios. No obstante, en caso de que se disponga de los recursos necesarios, también pueden emplearse métodos dinámicos, basados en la aplicación de modelos climáticos regionales. A efectos prácticos, el problema de caracterizar las lluvias extremas futuras en una ciudad pasa por definir el clima actual, para luego analizar sus pautas esperables de evolución.

1. Determinación de curvas IDF para el clima actual

El procedimiento para llevar a cabo esta tarea, cuando se dispone de suficientes datos instrumentales procedentes del lugar de estudio con la resolución temporal adecuada, está descrito en los manuales especializados (Chow, 1964). Sin embargo, en muchas ciudades de ALC únicamente existen series largas de datos de precipitación a escala diaria, lo que impide calcular directamente las curvas IDF. Un método indirecto consiste en adoptar curvas de otro lugar donde existe este tipo de información, que además se pueda considerar análogo a efectos de clima del lugar de estudio, bien por su cercanía geográfica o por ciertos rasgos climáticos. En el caso de lluvias extremas en una ciudad del Caribe donde el clima extremo esté dominado por las tormentas tropicales, se pueden adoptar las curvas IDF de un lugar de EE.UU. donde la tasa histórica de ocurrencia de huracanes (posiblemente ponderados por su magnitud) sea similar. Otro enfoque

alternativo, y que puede emplearse de manera complementaria, es hacer uso de la base de datos TRMM (*Tropical Rainfall Measurement Mission*), que aporta datos históricos de sensores remotos activos y pasivos cada tres horas en una malla de 0,25°, calibrándola con pluviómetros locales. Para la calibración de los datos TRMM originales a partir de los datos instrumentales diarios, pueden emplearse modelos de regresión ajustados por meses (ver el ejemplo de Ciudad de Belice en el [Cuadro 4](#)). Una vez obtenidas las series corregidas, se pueden utilizar como aproximaciones de un registro instrumental con resolución temporal de tres horas, para obtener las curvas IDF por encima de esta duración. El proyecto TRMM, actualmente transformado en un proyecto más ambicioso denominado *Global Precipitation Measurement* (GPM), aporta datos desde 1997, lo que en la actualidad representa 20 años de datos disponibles. Por lo tanto, no es recomendable emplear estas series, incluso corregidas, para calcular lluvias asociadas a periodos de retorno superiores a 5 o 10 años. Para lluvias de duración inferior a tres horas, se puede recurrir al método de los análogos o bien ajustar expresiones analíticas a los puntos disponibles y extrapolarlas hasta duraciones menores.

CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

Las curvas IDF se presentan por lo general como expresiones derivables (suaves) y monótono-decrecientes, que a menudo muestran un buen ajuste mediante funciones hiperbólicas u otras similares. Si bien un ajuste de este tipo puede ser válido para llevar a cabo interpolaciones entre datos disponibles, debe comprobarse su validez a la hora de extrapolar y, especialmente, para predecir el comportamiento de las rachas cortas de lluvia (menores de 2-3 horas), donde puede darse un cambio de tendencia. La extrapolación de la rama inferior de las curvas IDF a partir de su tramo medio debe realizarse con cautela, ya que en las escalas temporales más bajas los procesos físicos de base pueden ser diferentes.

2. Análisis del efecto del cambio climático en las curvas IDF actuales

El análisis de la amenaza por inundación fluvial y pluvial en condiciones de cambio climático en ciudades requiere caracterizar las curvas IDF asociadas a las lluvias futuras. Para ello, se suele recurrir a diversos métodos, más o menos intensivos en datos y recursos. La aproxi-

mación más básica, que en general resulta poco adecuada, consiste en multiplicar las curvas actuales por una serie de factores (potencialmente diferentes para cada periodo de retorno, RCP y horizonte temporal), que se derivan de analizar el cambio entre el régimen extremo de lluvia diaria actual y el régimen que se deriva de las predicciones de los GCM. En caso de que se obtenga una reducción, es común mantener las IDF de la situación actual, aplicando el principio de precaución.

Una mejora a este procedimiento consiste en determinar los factores de cambio a escala mensual y, a partir de ellos, evaluar el efecto en las curvas IDF. Si es posible, se puede pasar de estos factores lineales a modelos de regresión más complejos, posiblemente incluyendo covariables con predictores a escala sinóptica que sean relevantes a efectos del fenómeno de interés (por ejemplo, en el Caribe la temperatura del mar en superficie es un buen predictor de la generación de tormentas tropicales, que explican la ocurrencia de lluvias extremas). Si además se realiza una clasificación de los tipos de tiempo y se determinan los patrones climáticos representativos a escala regional, es posible determinar un cambio en la tasa de ocurrencia y en sus probabilidades de transición en diferentes escenarios de cambio climático y trasladarlo a la escala local, en términos de la variable de interés. Un ejemplo práctico de este último procedimiento ha sido aplicado a la ciudad de Tegucigalpa (Honduras) dentro del correspondiente estudio de la ICES ([Cuadro 5](#)). Nótese que estas técnicas sólo permiten determinar el comportamiento de las curvas IDF futuras para duraciones iguales o superiores a la resolución temporal disponible de los modelos en que se basan. Para extrapolar esta información a lluvias de menor duración, o bien se mantienen las formas de las curvas del clima actual, o bien se emplean modelos climáticos regionales con mayor resolución (ver, por ejemplo, Switzman et al. 2017).

Estos métodos, junto con otros (ver Fowler, Blenkinsop, and Tebaldi 2007 para acceder a una clasificación general de métodos y Gutmann et al. 2014 para ver una comparación del desempeño de algunos de ellos en EE.UU.), se agrupan dentro de la categoría de técnicas de reducción de escala por procedimientos estadísticos (*statistical downscaling*). También cabe la posibilidad de aplicar a escala regional o incluso local modelos de simulación del clima (a veces acoplados con modelos oceánicos), tomando como condiciones de contorno los resultados de los GCM, lo que se denomina reducción de escala dinámica (*dynamical downscaling*). Las técni-

cas dinámicas requieren más recursos técnicos y computacionales que las basadas en procedimientos estadísticos y aportan en teoría algunas ventajas que no siempre redundan en una mayor fiabilidad de los resultados (ver Wilby et al. 2009 para acceder a una visión general de los criterios que deben adoptarse para seleccionar un método, en función del tipo de adaptación que se esté considerando).

En todo caso, la proyección a futuro de los efectos hidrológicos derivados del cambio climático es una tarea con gran incertidumbre asociada a múltiples fuentes (Clark et al. 2016), algunas de ellas con un error no acotado, por lo que las medidas que se deriven de estos análisis deben ser adaptables a un abanico amplio de escenarios de evolución posibles y estar basadas en el principio de precaución.



Cuadro 4 —

Caracterización de lluvias extremas de corta duración en ciudad de Belice en condiciones de cambio climático

Problemática

La Ciudad de Belice está expuesta a frecuentes inundaciones derivadas de la combinación de lluvias locales, crecidas fluviales y aumento del nivel del mar. Si bien la protección frente al río y el aumento del nivel del mar requiere de obras de defensa en el perímetro de la ciudad, el efecto de las lluvias locales puede reducirse mediante obras de drenaje urbano. Para el diseño de redes de colectores como así también de sistemas de bombeo, se requiere conocer el comportamiento de las lluvias locales para periodos de tiempo relativamente cortos, en este caso entre una y tres horas. En la Ciudad de Belice existen cinco pluviómetros que aportan datos históricos de lluvia a escala diaria, pero se desconoce la estructura interna de las tormentas, ya que no hay datos de menor resolución temporal. Este desconocimiento se traslada, con mayor incertidumbre, a las lluvias futuras en condiciones de cambio climático.

Metodología

Para estimar el efecto del cambio climático en las lluvias extremas de la Ciudad de Belice, en primer lugar se determinaron las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) para el clima actual. Para ello, se utilizaron los datos aportados por la base de datos TRMM 3B42 del proyecto *Tropical Rainfall Measuring Mission* (Figura 18), calibrados a partir de los datos del pluviómetro de St. John's College, que contiene una serie más larga. Los datos procedentes del TRMM tiene una resolución temporal de 3 horas, pero corresponden a una malla global con celdas de 0,25° (unos 26 km), de allí la importancia de la calibración local.

Se comprobó que, al introducir factores correctores mensuales, las lluvias diarias del proyecto TRMM reproducen correctamente el clima de precipitación de la

Ciudad de Belice. A partir de esta reducción de escala por procedimientos estadísticos, y del análisis extremal de las lluvias de 24 horas de duración tomadas del pluviómetro (ajuste GEV con bandas de confianza), se obtuvieron las curvas IDF para duraciones iguales o superiores a tres horas. Para obtener la cola inferior de las curvas (duraciones de 1 y 2 horas), se extrapolaron ajustes polinómicos de los puntos disponibles, asumiendo un comportamiento similar al de las IDF proporcionadas por la NOAA para la ciudad de Miami (Miami Beach Station, ID: 08-5658), considerada como un análogo de la Ciudad de Belice a efectos de lluvias extremas.

Para proyectar estas IDF presentes a futuro, en condiciones de cambio climático, se empleó la base de datos globales NEX-GDDP (*Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections*), que contiene varios escenarios de clima a escala reducida, proporcionados por 21 modelos de circulación general; en este caso, se seleccionaron las RCP 4.5 y 8.5. Una vez más, los resultados de los modelos en un periodo de control (1986-2005) se ajustaron a las condiciones locales mediante factores de cambio (change factors) mensuales, para asegurar que representan correctamente el clima local registrado.

Resultados

Las IDF actuales obtenidas para la Ciudad de Belice se presentan en la Figura 18, mientras que los factores de cambio medios anuales para distintos horizontes temporales y dos RCP se incluyen en la Tabla 5. Se observa que los resultados de los factores de cambio muestran gran dispersión y no son consistentes a medida que aumentan en periodo de retorno, en gran parte debido a las discrepancias entre los modelos de circulación general empleados y a las limitaciones de éstos para reproducir

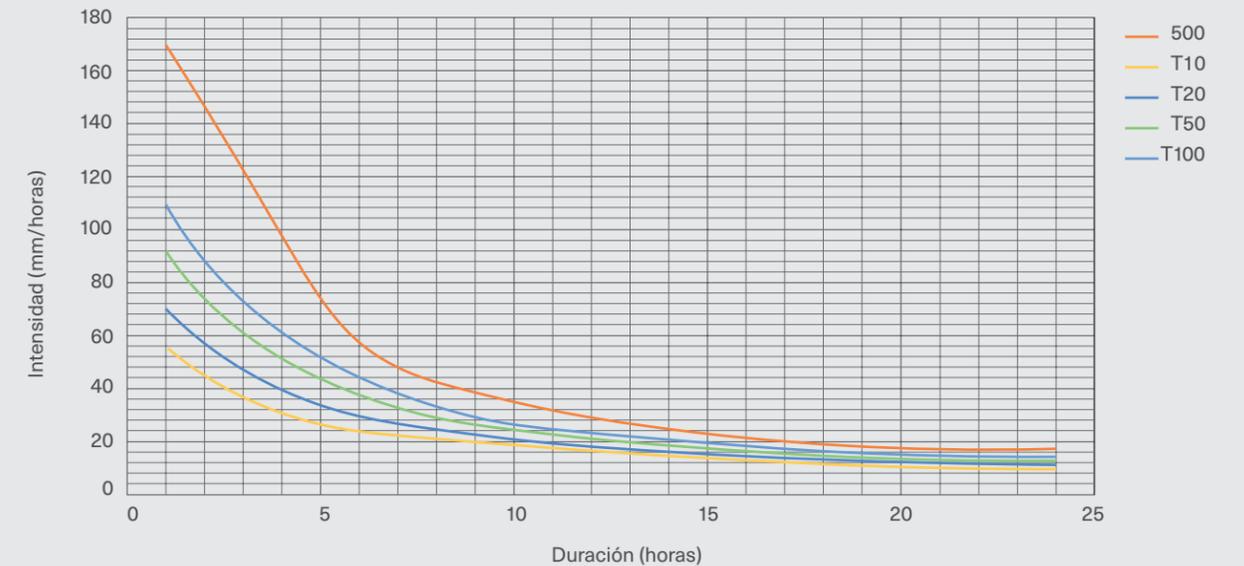


Figura 18 | Curvas IDF obtenidas para la Ciudad de Belice en situación actual.

eventos extremos, muchos de ellos ligados a la génesis y evolución de las tormentas tropicales en la región. Como criterio práctico, se optó por adoptar los coeficientes resultantes para el periodo de 10 años y la RCP 8.5, promediando el horizonte intermedio (2046-2065) y el de largo plazo (2081-2100). El resultado es un aumento estimado del 10,3% en las precipitaciones extremas en Ciudad de Belice en condiciones de cambio climático.

De manera complementaria, debido a la incertidumbre asociada, los resultados se validaron con las predicciones basadas en métodos dinámicos (modelos de clima regionales) realizadas por Knutson et al. 2013, que proporcionan estimaciones de un aumento en las precipitaciones asociadas a huracanes de la misma magnitud (9-12%) en las zonas situadas a más de 100 km del centro del huracán.

PERÍODO	T (años)						
	5	10	20	50	100	500	
RCP 4.5	2016-2035	0,997	0,993	0,988	0,980	0,972	0,932
	2046-2065	1,022	0,999	0,971	0,923	0,877	0,715
	2081-2100	1,040	1,026	1,008	0,976	0,943	0,821
RCP 8.5	2016-2035	1,160	1,138	1,108	1,055	1,003	0,822
	2046-2065	1,145	1,162	1,184	1,221	1,258	1,374
	2081-2100	1,066	1,043	1,013	0,965	0,921	0,774

Tabla 5 | Factores de cambio en la ciudad de Belice para distintos horizontes, escenarios de emisiones y periodos de retorno, obtenidos a partir de ajuste local de la base de datos NEX-GDDP.

Cuadro 5 —

Clasificación de tipos de tiempo y análisis del efecto del cambio climático en Tegucigalpa, Honduras

Problemática

Tegucigalpa está situada en la cabecera del río Choluteca, y presentaba en 2017 un déficit hídrico para abastecimiento urbano de unos 45 millones de m³ al año, lo que equivale a una demanda media insatisfecha de unos 100 litros por persona y día, en una población de 1,2 millones de habitantes. Es probable que estas cifras aumenten considerablemente en las próximas décadas, por el incremento de la población como por la disminución de las precipitaciones, sin mencionar el progresivo deterioro en la calidad del recurso. Resulta de gran interés acotar con la mayor precisión posible el efecto potencial del cambio climático en el régimen de precipitaciones de las cuencas que abastecen a la ciudad, con el fin de establecer las estrategias de desarrollo más adecuadas y realistas, que incluyen la viabilidad de nuevas infraestructuras de regulación. Por otra parte, la ciudad aún conserva el trágico recuerdo del huracán Mitch, ocurrido en 1998, y es consciente de que el exceso de lluvias en un corto periodo supone, paradójicamente, otra gran amenaza para la ciudad.

Metodología

Para estimar el efecto potencial del cambio climático en el régimen de precipitaciones en el área de influencia de la ciudad, en como parte del estudio de CES se llevó a cabo una clasificación de los tipos de clima en la región, en función de la temperatura media superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés), que es una de las variables que mejor explican la generación de los ciclones tropicales. Al relacionar la SST con un índice de cero a uno (SSTI), que indica cuándo la actividad ciclónica (o la probabilidad de formación de un ciclón) es más elevada, se puede convertir la secuencia de patrones de tiempo identificados en series aleatorias de tormentas tropicales, susceptibles de

generarse de forma numérica, para así disponer de la cantidad de datos suficiente para caracterizar el régimen de cualquier variable asociada (presión, viento, oleaje, precipitación, etc.). En el caso de las precipitaciones, el modelo R-Clipper (Tuleya, DeMaria y Kuligowski, 2007) ha sido la herramienta utilizada para obtener el campo de lluvias asociado al paso de un ciclón tropical.

Una vez seleccionados los tipos de tiempo más característicos, su probabilidad asociada y las reglas de transición de unos a otros, es posible aplicar el mismo tipo de análisis a las secuencias de tiempo generadas por los diversos modelos de circulación general en condiciones de cambio climático para las próximas décadas, y analizar la variación en la probabilidad de ocurrencia de cada patrón sinóptico en función del periodo de cálculo y las distintas RCP. Dicha variación en las probabilidades de los distintos tipos de tiempo puede a su vez traducirse en cambios en el régimen de las variables de interés.

Resultados

La *Figura 19* muestra los 16 tipos de tiempo obtenidos en el área de influencia de Tegucigalpa, expresados como patrones representativos de distribución espacial del SSTI. Los valores más oscuros representan la mayor probabilidad de generación de tormentas tropicales; en el caso de Tegucigalpa, la mayor parte de las tormentas que afectan a la ciudad se producen dentro de los patrones 1, 2 y 3. Los patrones sinópticos que se derivan de analizar las simulaciones de varios modelos de circulación general para el clima futuro determinan la probabilidad de ocurrencia de huracanes, tal y como se muestra en la *Figura 20*. Se observa que el efecto más claro del cambio climático en la zona es el incremento de la probabilidad del tipo de tiempo 1, sin que se produzca una dis-

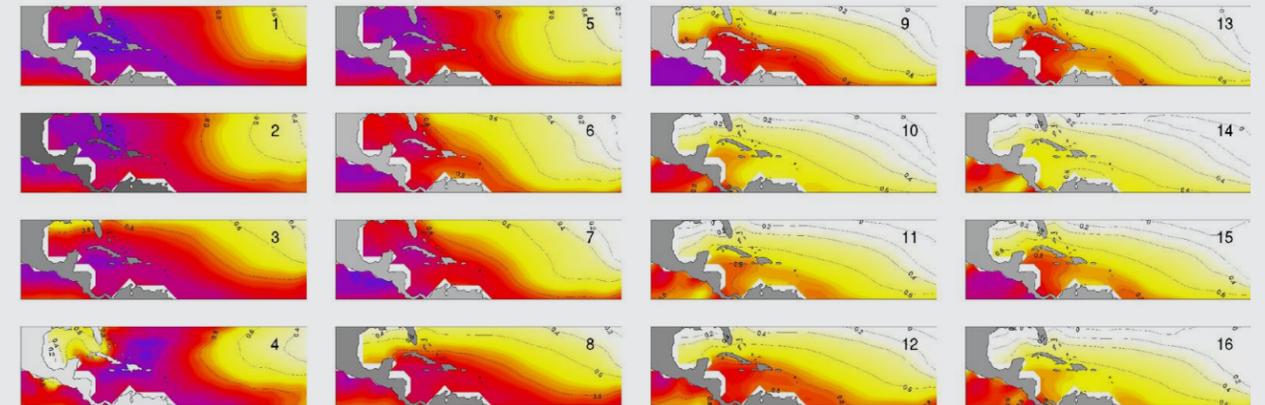


Figura 19 | Patrones representativos de SSTI (índice de temperatura superficial del mar) ordenados según su semejanza. El morado corresponde a las zonas donde el SSTI se acerca a 1 y por lo tanto existe mayor probabilidad de que se generen ciclones.

minución significativa en las probabilidades de los tipos de tiempo 2 y 3; el tipo de tiempo 1 es el característico del mes de septiembre y, además, uno de los que genera más huracanes con influencia en Tegucigalpa. Este re-

sultado indica, por tanto, que es de esperar una mayor incidencia de huracanes en la ciudad para las próximas décadas, lo cual recrudescerá previsiblemente el régimen de lluvias extremas.

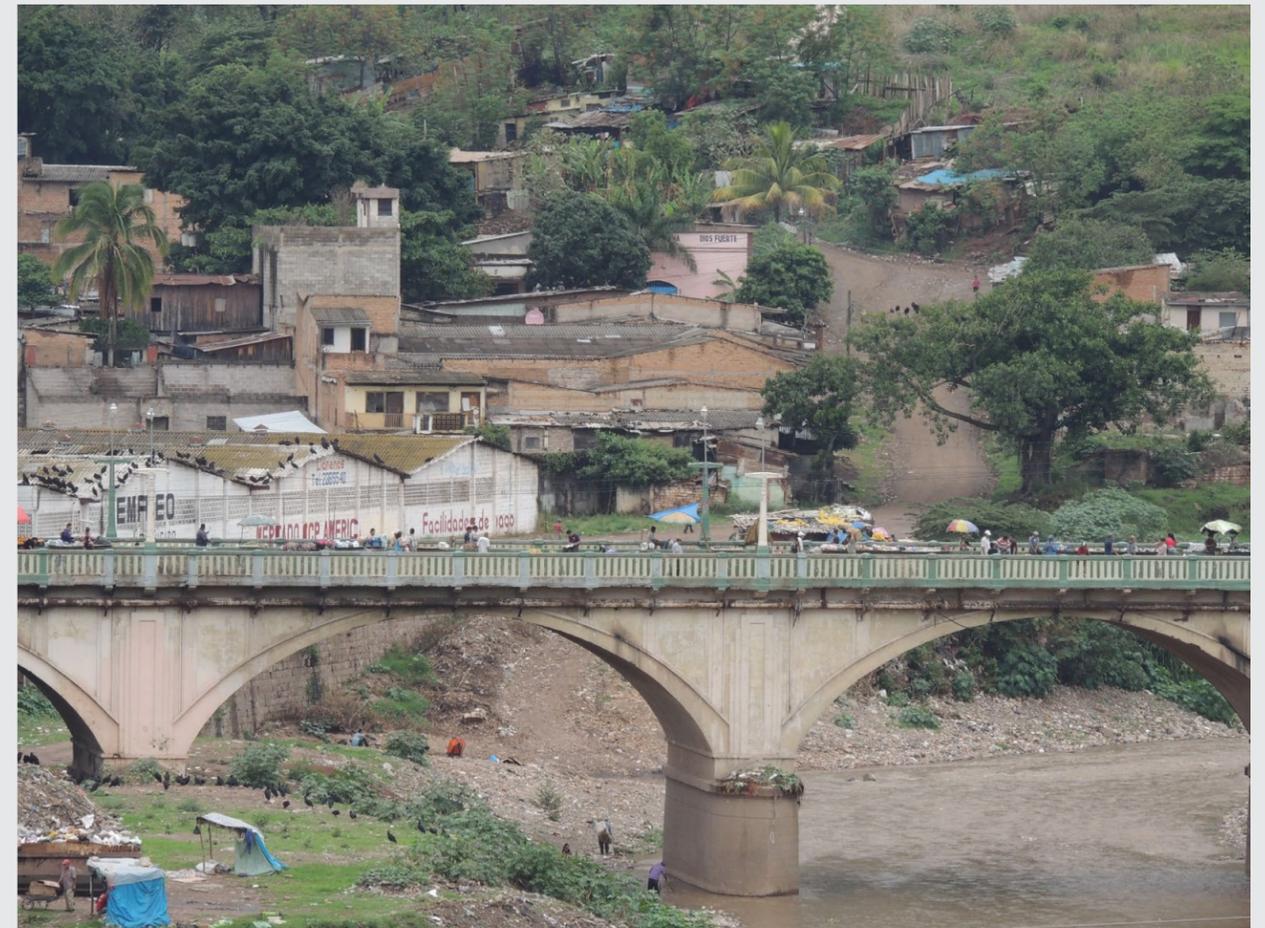
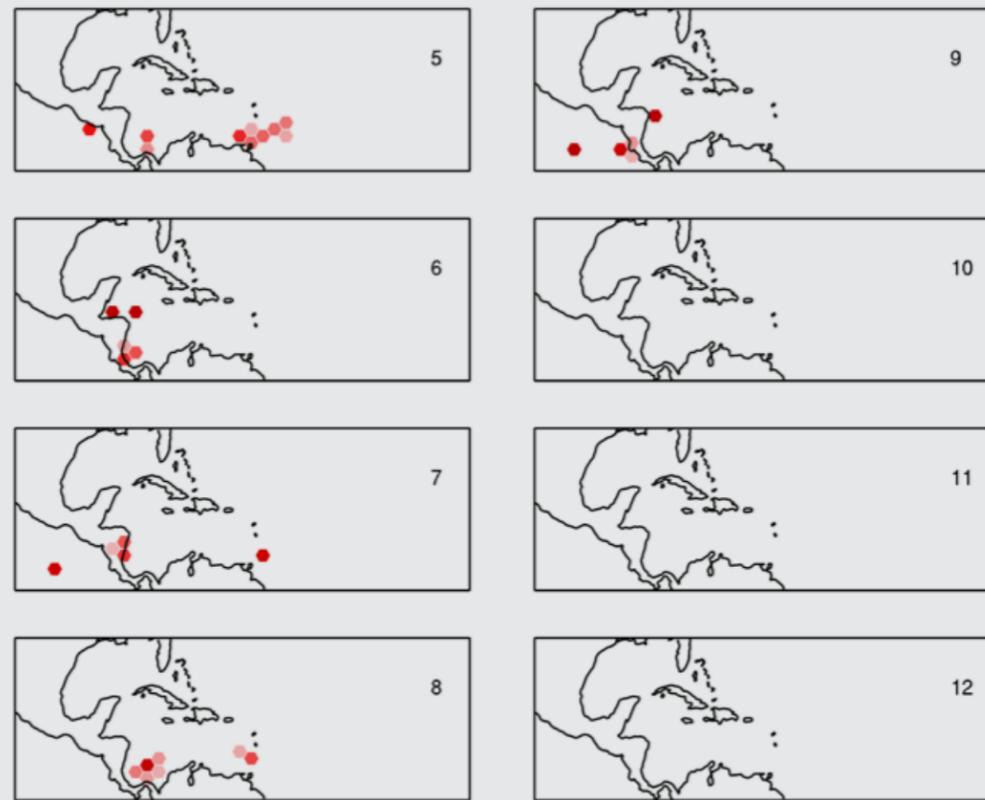


Figura 20 | Génesis de los ciclones tropicales seleccionados en cada patrón sinóptico de ISST.

Los huracanes y el fenómeno de El Niño en las predicciones de cambio climático en ALC

La ciencia del clima y los modelos climáticos asociados son un área de investigación muy activa y aún existen muchas cuestiones sobre las que no hay consenso entre los expertos. Dos factores que condicionan los fenómenos extremos en numerosas ciudades de ALC son los huracanes y la Oscilación del Sur o ENOS (El Niño Oscilación Sur); en ambos casos (aunque por diferentes motivos), los modelos de circulación general muestran discrepancias a la hora de predecir las tendencias futuras. El fenómeno de El Niño, probablemente la teleconexión atmosférica más conocida, está dominado por complejas interacciones océano-atmósfera a gran escala y presenta una cuasiperiodicidad relativamente larga (8-12 años), motivo por el cual todavía no hay series suficientemente extensas de registros instrumentales disponibles. Se considera que el calentamiento global tendrá un efecto intensificador de los eventos extremos asociados a este fenómeno (Cai et al. 2014), pero es muy difícil cuantificar su magnitud y traducirlo a las variables relevantes a efectos de riesgos (precipitaciones, viento, oleaje, etc.). Este desconocimiento, con la incertidumbre asociada, se traslada directamente a las variables de amenaza que intervienen en los estudios de riesgo en ciudades, no sólo en la vertiente pacífica de Colombia, Ecuador y Perú, sino también en cuencas andinas.

Por otra parte, se suele aceptar que el calentamiento global también irá acompañado de una mayor frecuencia de generación de huracanes de gran magnitud, tanto en el Atlántico como en el Pacífico, con una temporada de huracanes más larga; además, sus trayectorias podrán modificarse y alcanzar latitudes más altas (Walsh et al. 2016). También se ha detectado una relación entre la intensificación del fenómeno de El Niño y la frecuencia de generación de huracanes en el Pacífico Este. Nuevamente, la cuantificación de estos efectos para la determinación de los riesgos futuros requiere más trabajo de investigación y series de datos instrumentales más largas, por lo que cualquier predicción debe tomarse con cautela y presentar con claridad las bases científicas que la sustentan.

Selección del escenario global de emisiones

El efecto del cambio climático que predicen los expertos para las diversas variables meteorológicas depende, en gran medida, de los esfuerzos de la humanidad por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero durante todo el siglo XXI, al igual que de otros factores como la gestión de los usos del suelo y la conservación de los bosques. En el quinto informe del IPCC (IPCC, 2014), este conjunto de factores aparece representado bajo el término trayectorias de concentración representativas. Se definen cuatro trayectorias representativas, cada una de ellas asociada a un nivel de concentración de CO₂ equivalente en el aire para el año 2100. La RCP 2.6 es el escenario más optimista, la RCP 8.5 el más pesimista y la RCP 4.5 y RCP 6.0 son los escenarios intermedios (ver *Figura 21*).

En los estudios de riesgos en ciudades, la RCP que se seleccione afectará de manera determinante las amenazas futuras y, en consecuencia, el dimensionamiento de las actuaciones necesarias para reducir los riesgos. Adoptar de forma sistemática, como medida conservadora, la RCP 8.5 puede resultar muy oneroso desde el punto de vista de las inversiones necesarias. Una alternativa consiste en adoptar una RCP intermedia (4.5 o 6) para aquellos riesgos cuyas medidas de reducción asociadas admiten un planteamiento incremental (por ejemplo, la construcción de un dique que se pueda ampliar, en caso de que se materialice un escenario de emisiones más desfavorable).

Cabe señalar que, en algunos lugares, el cambio climático lleva asociado un mejoramiento de las variables de amenaza (por ejemplo, menor cantidad de lluvias extremas). En ese caso, el escenario de concentración que habría que adoptar de forma conservadora es la RCP 2.6, que es el que lleva asociado un menor descenso de la amenaza.

En definitiva, teniendo en cuenta los aspectos mencionados, el procedimiento aplicado en CES para estimar el efecto del cambio climático sobre el régimen extremal de una variable de amenaza, se puede resumir en los siguientes pasos generales:

1. Identificación de la variable objetivo y análisis de los registros instrumentales disponibles. En función de la duración, ubicación y calidad de las series disponibles, se dará un mayor peso o credibilidad a esta información. Si se dispone de series largas y fiables,

resulta de gran interés analizar las tendencias o pausas no estacionarias que puedan contener.

2. Identificación de las bases de datos climáticas disponibles, con proyecciones de clima para la zona de estudio y diversos modelos de simulación de clima. Como mínimo, se contará con bases de datos globales, y en algunos casos con modelos regionales. En ciertas regiones, conviene seleccionar los modelos de circulación general o regional (GCM o RCM) que mejor comportamiento han mostrado. Cada modelo aporta resultados para distintas trayectorias de emisiones (RCP), por lo que se podrán considerar al menos dos escenarios de evolución (más favorable y más restrictivo, sin que necesariamente representen los dos extremos).
3. Reducción de escala de las proyecciones anteriores para ajustarlas a la zona de estudio basada en diver-

sos métodos, en función de los recursos disponibles. Por lo general, en la ICES y otros estudios similares, se considera adecuado un procedimiento estadístico. Este tipo de reducción de escala (*statistical downscaling*) conlleva calibrar los resultados generales de los modelos con los datos locales disponibles, siempre que éstos sean suficientemente fiables.

4. Análisis de tendencias de las series a escala local. Este es el paso final, que permite obtener coeficientes de transformación de las variables de interés a causa del cambio climático, para diversos horizontes temporales, RCP y modelos de evolución considerados. Tal y como se ha comentado anteriormente, la resolución temporal de los modelos no permitirá resolver algunas incógnitas sobre el comportamiento de ciertas variables como, por ejemplo, la lluvia en periodos cortos de tiempo, por lo que se requerirán hipótesis complementarias.

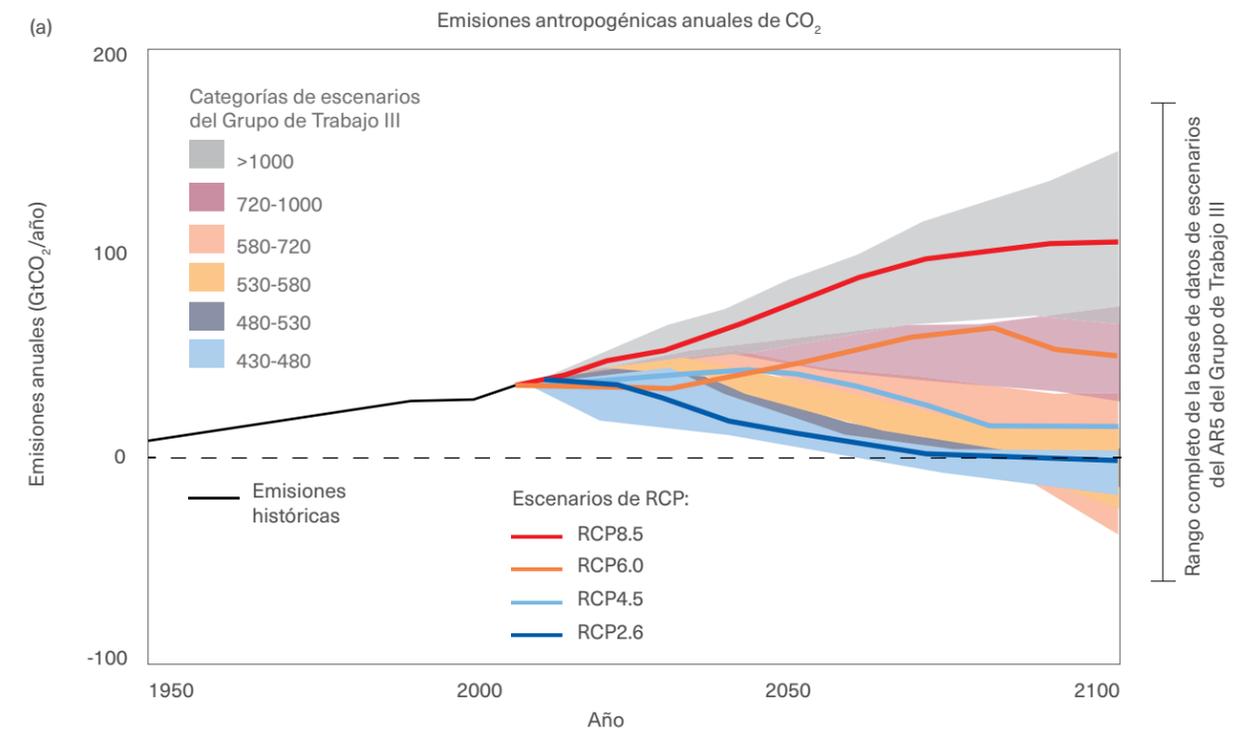


Figura 21 | Calentamiento vs. emisiones acumuladas de CO₂-eq. Se observan las cuatro trayectorias de concentración representativas (RCP). Tomado de IPCC 2014.

3

Vulnerabilidad y riesgo de inundación —

- 3.1. Cálculo de la exposición /93
- 3.2. Consideraciones generales sobre el cálculo de la vulnerabilidad /94
- 3.3. Vulnerabilidad y daños en edificaciones /100
- 3.4. Vulnerabilidad y daños en infraestructuras críticas /110
- 3.5. Vulnerabilidad y daños humanos /114
- 3.6. Análisis multiriesgo: el caso de los huracanes /126
- 3.7. Calibración y validación de los modelos de riesgo /128
- 3.8. La incertidumbre en los cálculos de riesgo /130

3

3.1 Cálculo de la exposición

La exposición se define como la coincidencia, en tiempo y espacio, de una amenaza y un receptor susceptible de sufrir daños debido a ella. Por lo tanto, se trata de una condición binaria (el receptor está expuesto o no lo está), necesaria, pero no suficiente, para que se produzcan riesgos; los parámetros de exposición reflejan un máximo potencial de los daños, que puede estar más o menos alejado de las pérdidas probables, es decir, del riesgo. En el caso de que los receptores sean edificios, infraestructuras, instalaciones, equipamientos, etc., se habla de exposición física (*Figura 22*), mientras que cuando se refieren a personas, se habla de exposición humana (*Figura 23*). El concepto de exposición cobra sentido cuando se aplica a fenómenos que afectan a zonas específicas del territorio, como es el caso de las inundaciones, los vientos extremos (en zonas con variaciones en la intensidad) o incluso la erosión costera; en el caso de la sequía urbana o del viento en grandes llanuras o deltas, la exposición equivale a la totalidad de los activos y de la población existentes.

En términos generales, la exposición física se refiere a activos inmovilizados, que no tienen capacidad de

desplazarse, si bien por motivos prácticos se suelen incluir en ella los vehículos, animales domésticos y artículos de menor tamaño que pueden ser móviles. Por ello, es posible calcularlas combinando los mapas de amenaza, para diferentes probabilidades de ocurrencia, con los mapas estáticos que definen la ubicación y las características de los activos físicos, actuales y proyectados para los escenarios futuros. Por el contrario, dada la naturaleza móvil de los receptores, el cálculo de la exposición humana puede resultar erróneo si se basa en la imagen estática que proporcionan los censos demográficos, ya que ciertas zonas de las ciudades sufren grandes variaciones de ocupación temporales en función de los usos (residencial, comercial, industrial, etc.). Dichas variaciones pueden ser: diurnas (movimientos pendulares), semanales (días laborables versus fin de semana) y anuales (festividades, eventos singulares, actividades que dependen de la estación, como la pesca, los deportes de invierno, la playa, etc.). Si bien se deben establecer hipótesis simplificadoras y niveles de aproximación razonables, es conveniente tener en cuenta en cada caso el carácter dinámico de la exposición humana y no

EXPOSICIÓN FÍSICA DE EDIFICACIONES	<p>Superficie urbana expuesta (ha)</p> <p>Superficie edificada expuesta (ha)</p> <p>Valor total expuesto (MUSD)</p> <p>Superficie o valor expuestos por tipología de edificación</p>
EXPOSICIÓN FÍSICA DE INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS	<p>Número de elementos expuestos por categoría</p> <p>Superficie expuesta por categoría (ha)</p> <p>Capacidad expuesta por categoría (las unidades varían según la categoría, ver apartado 3.4)</p>
EXPOSICIÓN HUMANA	<p>Número de personas totales expuestas</p> <p>Número de ancianos, niños y enfermos expuestos</p> <p>Número de personas expuestas en riesgo de exclusión social</p>

Tabla 6 | Parámetros de exposición más habituales.

adoptar de forma indiscriminada los datos censales para estimarla. El hecho de que las personas respondan ante una amenaza con determinadas conductas, que llevan asociadas unas pautas de desplazamiento, no se considera en este documento como un factor de exposición, sino que se introducirá más adelante en los cálculos del riesgo, como un factor de vulnerabilidad.

Algunos de los parámetros de exposición más habituales se presentan en la *Tabla 5*, y pueden existir otros en función de los datos de partida y los objetivos específicos de cada estudio.

Nótese que algunos de los parámetros de exposición indicados requieren información no sólo relativa a la ubicación de los activos y personas, sino de carácter socioeconómico; si bien esta información no resulta imprescindible para calcular la exposición, será fundamental, como se verá en los apartados siguientes, para determinar la vulnerabilidad. Todos los parámetros reflejados en la *Tabla 5* pueden

expresarse de forma adimensional como índices, entre los que se destacan por su uso generalizado:

- Porcentaje de población expuesta.
- Porcentaje expuesto de la superficie urbana total.
- Porcentaje expuesto del valor total del stock de edificios.

CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

En ocasiones los parámetros de exposición, sin más cálculos posteriores, son empleados como estimadores o incluso sustitutos de los parámetros de riesgo. Sin embargo las relaciones intensidad de la amenaza son muy variables y pueden conducir a error, ya que un alto nivel de exposición no conlleva necesariamente el equivalente a un alto nivel de daños, como se intentará mostrar en los apartados que siguen, dedicados a describir el otro gran componente del riesgo: la vulnerabilidad.



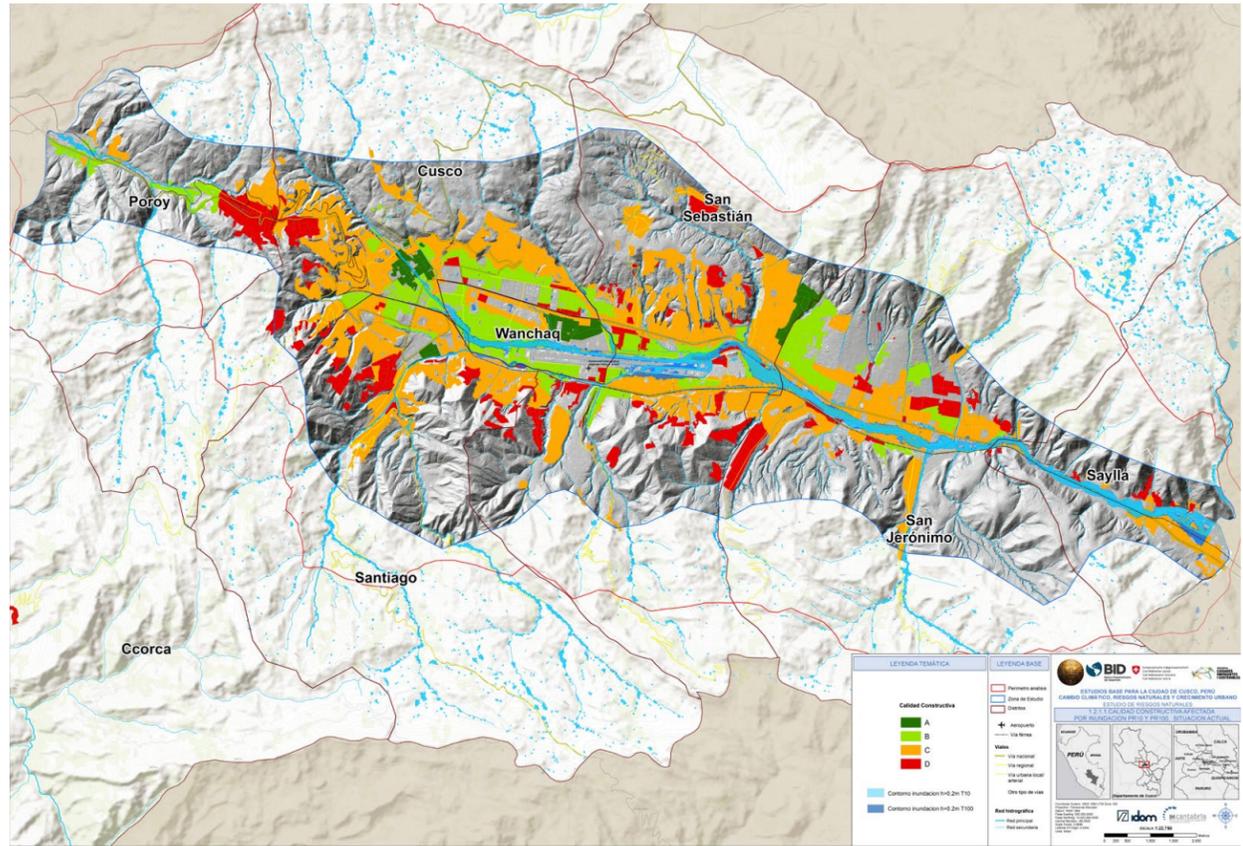


Figura 22 | Ejemplo de mapa de exposición física de las edificaciones según su calidad constructiva frente a inundaciones en Cusco, Perú.

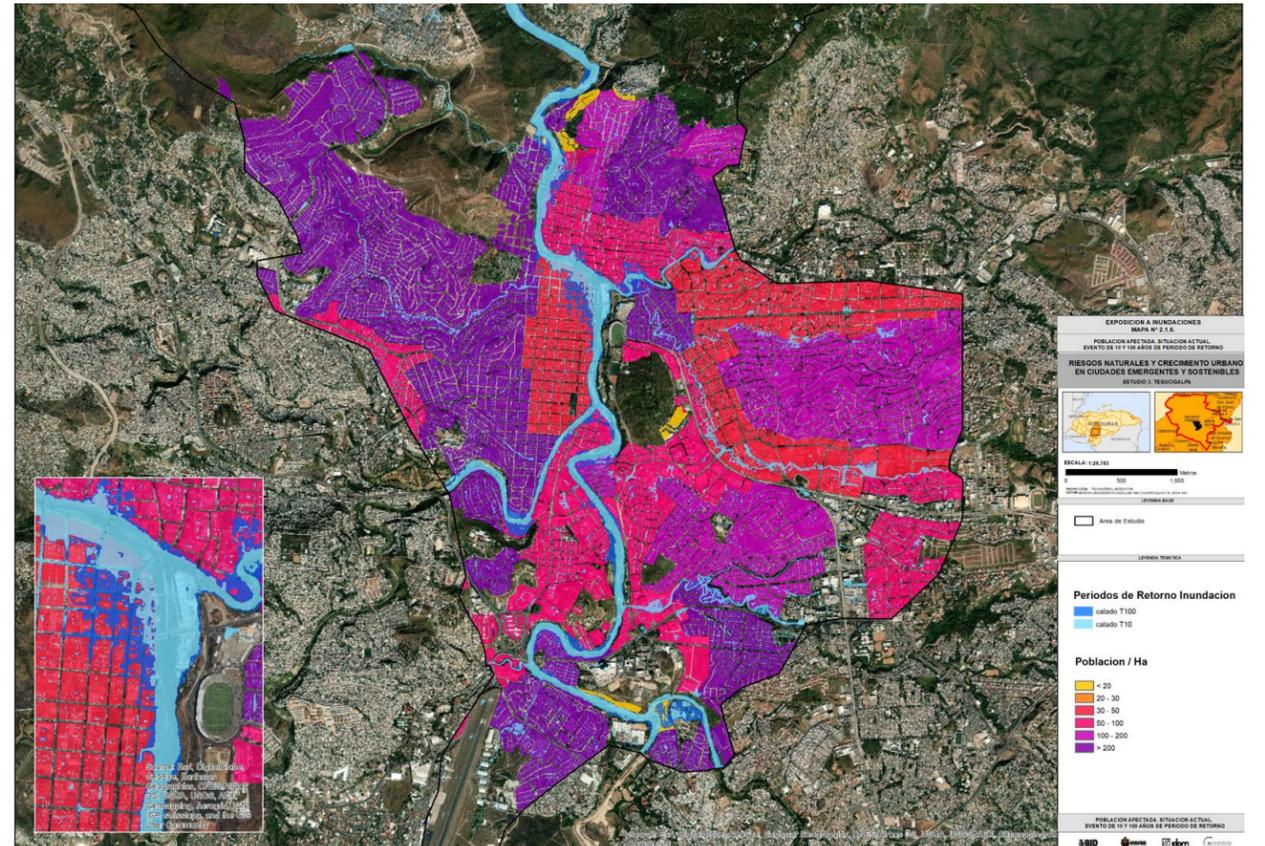


Figura 23 | Ejemplo de mapa de exposición humana frente a inundaciones en Tegucigalpa, Honduras.

3.2 Consideraciones generales sobre el cálculo de la vulnerabilidad

Vulnerabilidad es un término que se utiliza en múltiples contextos y con diversos significados. En los análisis cuantitativos del riesgo, la vulnerabilidad se refiere a la falta de resistencia o capacidad de un edificio, una infraestructura o una persona, para soportar una amenaza. A efectos de cálculos del riesgo, la vulnerabilidad representa el elemento que permite la transformación de la amenaza en daños mediante expresiones que dependen tanto de los parámetros que caracterizan la amenaza, como de ciertos atributos de los entes receptores. A estas relaciones se las suele denominar funciones de vulnerabilidad o funciones de daño, y pueden dar como resultado valores absolutos de daño o valores relativos (porcentajes de daño sobre el valor total expuesto). Este documento se centrará en el uso de funciones de daño del último tipo, es decir, adimensionales, ya que requieren datos menos detallados de cada ciudad y son más sencillas de extrapolar entre distintos lugares. No obstante, la metodología general de cálculo de los daños es independiente de esta elección y, siempre que se disponga de información local del valor de los activos, así como experiencia sobre daños reales contabilizados, se recomienda adoptar el enfoque de funciones en unidades monetarias.

Para llegar a la expresión concreta de una función de daño adimensional para un determinado riesgo, es preciso determinar cuál o cuáles son los mecanismos de daño dominantes en la zona de estudio, asociados a dicho riesgo. Se entiende por mecanismos de daño una secuencia de procesos físicos específicos que hacen que una amenaza se transforme en pérdidas efectivas, materiales o humanas.

En el caso de las inundaciones, se pueden identificar diversos mecanismos de daño potenciales, de los cuales solo algunos estarán presentes en cada caso de estudio concreto. Entre los mecanismos de daño económico en edificaciones más comunes para este riesgo están:

- Deterioro de activos derivado de aumento del nivel de agua en edificaciones, sin fallo estructural.
- Destrucción de edificios por arrastre del agua, incluyendo impactos de elementos flotantes.
- Derrumbe de muros por carga hidráulica.

Análogamente, se pueden identificar diversos mecanismos comunes de daño humano:

- Ahogamiento de personas por estar sometidas a condiciones de flujo extremas.
- Arrastre, caídas e impactos de personas, derivados de las condiciones de flujo.
- Arrastre de vehículos con personas dentro.
- Congelamiento por efecto de permanecer periodos de tiempo prolongados dentro o fuera del agua a bajas temperaturas.

La elección de un mecanismo de daño concreto, representativo de un determinado riesgo en una ciudad o un lugar de estudio, lleva implícitas las siguientes decisiones que, por lo tanto, pasan a depender de dicha elección:

- **Los parámetros relevantes de caracterización de la amenaza:** así, en una inundación lenta del interior de una vivienda, el calado de agua es el parámetro que más se relaciona con el daño causado. Sin embargo, cuando el agua fluye rápidamente, la capacidad de arrastre dependerá de una combinación de la velocidad y la cota de inundación, siendo la primera al menos tan importante como el segundo.
- **La clasificación de los activos cuyo riesgo se analiza:** de acuerdo al mecanismo de daño seleccionado, será relevante diferenciar los activos expuestos en función de unas características u otras. En inundaciones lentas sin velocidad, no tiene mayor importancia conocer la calidad estructural de las edificaciones, y es prioritario conocer el número de pisos y si tienen sótano; por el contrario, frente al fenómeno de arrastre serán menos vulnerables las viviendas de buena calidad bien cimentadas y con buenos materiales estructurales, frente a las de peor calidad.
- **El conjunto de activos susceptibles de ser dañados, cuyo valor deberá multiplicar al resultado de la función de daño adimensional:** retomando los ejemplos anteriores, en el caso de inundación lenta de una vivienda, el agua podrá deteriorar una parte

del valor total (instalaciones y equipamiento), pero su estructura es reutilizable; si hay riesgo de arrastre e impacto, corre peligro la totalidad del activo, es decir, el continente y el contenido.

Las funciones de daño adimensional suelen incorporar los parámetros de caracterización de la amenaza como variables independientes de la expresión que las define, ya que por lo general se trata de variables continuas positivas (cota, velocidad del agua, velocidad del viento, etc.). Sin embargo, el tipo de activo sobre el que se calcula el daño, al tratarse de categorías discretas y no escalables (edificios de hormigón, viviendas precarias, etc.) se incorporan a menudo modificando la forma de la función de daño, es decir, acuñando una expresión por cada categoría de receptor.

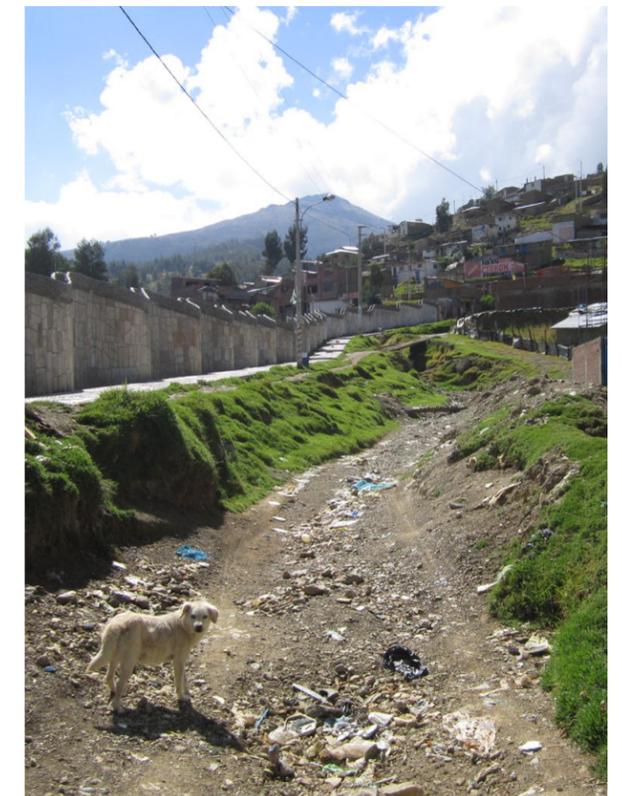
CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

Resulta práctico disponer de las funciones de daño asociadas a un determinado mecanismo en forma de una familia de funciones, posiblemente por tramos, con expresión analítica explícita. Dicha familia tendrá dos tipos de parámetros de entrada: los que caracterizan la amenaza y los que definen el tipo de activo al que se aplica la función. Estos últimos parámetros estarán tabulados para cada categoría de activo considerada.

Finalmente, el valor total de los activos en riesgo, que también depende del mecanismo de daño, se incorpora como un factor que multiplica a la función de daño adimensional, por lo que se abordará en el apartado de estimación de daños. En el caso de que se identifiquen varios de estos mecanismos, los daños asociados a cada uno de ellos podrán tratarse de forma aditiva, siempre y cuando afecten a activos diferenciados (por ejemplo, un viento extremo daña la cubierta de una vivienda, al tiempo que el nivel del agua en su interior deteriora las instalaciones). Cuando no sea así, y diferentes mecanismos compitan por depreciar un mismo activo, se deberán asumir hipóte-

sis complementarias, como se mostrará más adelante.

Muy habitualmente, el concepto de mecanismo de daño es asimilado directamente con el de tipo de riesgo, asumiendo que existe una relación biunívoca entre ellos, y, por tanto, son términos redundantes. Aunque a efectos prácticos esto pueda ser cierto en muchos casos, la consideración de que dentro de un tipo de riesgos existen varios mecanismos posibles de daño que a priori deben ser considerados, aporta riqueza al análisis de la vulnerabilidad. A partir del marco conceptual descrito, se pueden establecer criterios para cualquier tipo de daño ante cualquier amenaza, una vez que se definen los mecanismos de daño dominantes. La descripción de las funciones de daño disponibles para los diversos tipos de activos y mecanismos de daño, con sus propiedades asociadas y posible forma de calibración, se comentan en los apartados siguientes.



3.3 Vulnerabilidad y daños en edificaciones

En este apartado se describirá un procedimiento para cuantificar los daños directos en edificaciones debidos a inundaciones, vientos extremos y erosión costera, en el marco de un proyecto de tipo ICES. Dada la necesidad de realizar proyecciones de daño a futuro, considerando tanto el efecto de cambio climático como las posibles evoluciones de la mancha urbana, resulta conveniente plantear una clasificación de los tipos de edificios en una ciudad con un número reducido de categorías, sin renunciar a caracterizar los rasgos diferenciadores más importantes de los elementos expuestos.

Partiendo de la mancha urbana actual, con la información catastral y censal más reciente, y tras llevar a cabo inspecciones de campo con fines de verificación, se debe realizar una clasificación, generalmente a escala de manzanas, del tipo de edificación dominante en cada unidad. Por lo general, basta con definir un cierto número (habitualmente entre tres y cinco) de tipologías de edificación, que suelen tener alta correlación con el nivel socioeconómico de sus habitantes, aunque también influyen otros procesos; si se adoptan cuatro tipos, por convención se denominarán A, B, C y D, en orden de mayor a menor calidad. Esta clasificación servirá de base para designar las funciones de daño correspondientes a cada categoría y mecanismo de daño, así como para proyectar los escenarios de crecimiento urbano. Nótese que, si bien en situación actual es posible plantear una desagregación mucho más detallada de las tipologías edificatorias, tal nivel de precisión pierde sentido a la hora de analizar situaciones futuras, en las que sólo es posible predecir, y esto con cautela, pautas generales de crecimiento.

Cada tipo de riesgo analizado, con sus mecanismos de daño, llevará asociada una reclasificación de las tipologías edificatorias base (A, B, C y D), de tal forma que se pueda establecer una relación biunívoca entre dichas categorías reclasificadas y las funciones de daño adecuadas.

Daños relativos por inundación

En el caso del riesgo de inundación, es común considerar dos mecanismos de daño, que se denominarán inundación lenta (sin colapso estructural) e inundación rápida (con posible colapso estructural).

En una inundación lenta, la forma de la función de daño depende fundamentalmente de la distribución vertical de los activos en riesgo, por lo que las cuatro categorías básicas pueden traducirse en una estructura en pisos característica, por ejemplo:

- **Categoría A:** Vivienda de más de dos plantas con sótano.
- **Categoría B:** Vivienda de dos plantas sin sótano.
- **Categoría C:** Vivienda de una planta con cubierta resistente y sin sótano.
- **Categoría D:** Vivienda de una planta sin cubierta resistente y sin sótano.

Con estas hipótesis, ya es posible acudir a una base de datos locales o genéricas (como la aportada por la metodología CAPRA, o HAZUS), para seleccionar las funciones de daño correspondientes (ver ejemplo en el *Cuadro 6*).

En el caso de la inundación rápida, el fenómeno que se considera es la destrucción total de un edificio por acción del agua en movimiento y el material arrastrado (debris), y las variables de caracterización de la amenaza son la cota de inundación y la velocidad del agua. En este caso, resulta muy difícil establecer funciones de daño para cada categoría básica, ya que habría que tener en consideración los materiales y las tipologías estructurales de cimentaciones, muros, cubiertas, etc. Sin embargo, se puede establecer un criterio de colapso sencillo para las viviendas de tipo D, que son las más precarias (en general se corresponden con los asentamientos informales) y suelen estar situadas en los lugares más conflictivos.

Cuando se cumple el criterio de colapso, se considera que las viviendas afectadas pierden la totalidad de su valor, mientras que, por debajo de él, aplica el mecanismo de inundación lenta. Debe prestarse atención a no contabilizar dos veces los daños ya que: cuando hay colapso, el valor expuesto a los efectos de la inundación lenta pasa a ser nulo.

De esta forma, se responde de manera aproximada a una cuestión de gran interés en ciudades con áreas deprimidas, comunes en ALC: cuántas personas pueden quedar sin hogar y necesitadas de asistencia social, en el caso de que se produzca una catástrofe de cierta magnitud.

Daños relativos por viento

Para calcular los daños por viento, se puede seguir un procedimiento aproximado similar al anterior, con dos mecanismos de daño fundamentales:

- Destrucción parcial progresiva de una edificación, partiendo de su cubierta y propagándose desde ella hacia las plantas superiores.
- Arranque y destrucción total de la edificación, por efecto de vientos extremos.

En el primer mecanismo, se deben reclasificar las categorías básicas en función de la tipología y modo de anclaje de las cubiertas asociadas:

- **Categorías A y B:** cubierta de concreto, muros de ladrillo, dos o más alturas.
- **Categoría C:** cubierta ligera, muros de mampostería, un piso.
- **Categoría D:** cubierta ligera, muros no portantes, un piso.

Nuevamente, las bases de datos CAPRA o HAZUS ofrecen expresiones numéricas para cuantificar el daño relativo correspondiente a cada una de estas configuraciones, en función de la velocidad máxima del viento, cuando no exista información local de desastres históricos. El criterio de colapso, nuevamente muy difícil de establecer de forma rigurosa para todas las tipologías, puede definirse de forma simple mediante un umbral de viento (por ejemplo, 200 o 250 km/h) para las viviendas de categoría D.

Daños relativos por erosión costera

La erosión costera es un proceso relativamente lento, en comparación con las inundaciones y los vientos extremos, que puede producir el deterioro y colapso de las edificaciones situadas junto a la línea de costa. Sin embargo, dada la gran cantidad de factores (hidrodinámicos, geotécnicos, estructurales) que intervienen en este fenómeno, no existen funciones de daño simples y aceptadas que permitan cuantificarlo. A menudo, las tasas de erosión potencial, como cuantificadores de la amenaza, no se traducen en riesgos efectivos debido a la presen-

cia de estructuras de protección como son muros, espigones y rellenos, lo que hace que los daños reales producidos sean, por lo general, menores a los que se podría esperar. Una gran parte de las franjas litorales urbanas expuestas a procesos erosivos han sido rigidizadas mediante elementos estructurales (tal es el caso de ciudades que hicieron parte de la ICES como Georgetown, Campeche, Belice, Cumaná y otras), lo que no evita la inundación y otros problemas como la desaparición de playas, pero sí el daño estructural por retroceso del frente marítimo. Sin embargo, la erosión costera no limitada por obras de protección del litoral puede ser un proceso con importantes consecuencias económicas y, sobre todo, humanas en zonas rurales desfavorecidas.

En términos prácticos, siempre que existen estructuras de protección del litoral, el daño por erosión en las propiedades colindantes es despreciable (salvo que dichas estructuras tengan riesgo evidente de colapso), y el riesgo se reduce al de inundación por rebase del mar y de las olas. En el caso de tramos de costa no protegidos, la erosión implica la pérdida total del valor de la propiedad, incluido el del propio suelo que desaparece.

Activos en riesgo y cálculo del daño absoluto

Los daños debidos a un evento extremo en cada unidad de cálculo, habitualmente una manzana de edificios o un sector urbano, se obtienen multiplicando el resultado de la función de daño adimensional por el valor en riesgo correspondiente; los daños totales resultan de aplicar este procedimiento a la totalidad del espacio urbano. Llegados a este paso final del cálculo, queda por definir cuál es el valor del riesgo correspondiente a cada tipo de riesgo y mecanismo de daño, y cómo se puede estimar ese valor a partir de los datos disponibles. En la *Tabla 7* se muestra un esquema donde aparecen, en la fila superior sombreada, las cuatro grandes categorías de activos que conjuntamente determinan el valor total de una edificación:

1. **Valor del suelo (VS):** el espacio urbano donde se ubica un edificio es un activo económico de naturaleza singular, puesto que es único (cada parcela es dife-



Tabla 7 | Esquema de tipos de valor, a efectos de aplicar las diferentes funciones de daño adimensionales, en función del tipo de activos que agrupan.

rente), indestructible (el suelo, no su valor de mercado) y tiene vida útil infinita, por lo que no lleva implícita una depreciación por el transcurso del tiempo (lo cual no le impide experimentar grandes fluctuaciones de precio).

2. Valor de construcción (VC): es el valor del edificio en sí mismo, que incluye los elementos estructurales como cimentaciones, pilares, vigas, muros, forjados, cubiertas, etc. El valor de construcción depende fundamentalmente de la disponibilidad de materiales de construcción y del precio de la mano de obra.

3. Valor de instalaciones (VI): incluye las tuberías, cables y otros equipamientos relativos a los servicios de agua potable, saneamiento, electricidad, gas, telefonía, calefacción y otros servicios dentro de un edificio.

4. Valor de equipamiento (VE): incluye el resto de los elementos de una vivienda o edificio no incluidos en las categorías anteriores y que, por lo general, suelen ser de carácter móvil: muebles, electrodomésticos, equipos electrónicos, joyas, cuadros, etc. Por conveniencia, pueden incluirse los vehículos asociados a viviendas particulares dentro de esta categoría.

Esta clasificación no resulta útil para aplicar las funciones de daño, por lo que conviene definir otros cuatro tipos de valores, que agrupan una cierta combinación de las categorías de activos anteriores:

1. Valor del stock de viviendas (VV): es el valor de reposición de los edificios y las instalaciones asociadas, pero sin incluir el valor del suelo y el de los equi-

pamientos. Es equivalente al precio de construcción en el mercado de la construcción, considerado de forma independiente del mercado del suelo, al que suele estar ligado.

2. Valor de mercado inmobiliario (VM): es el valor de mercado de un determinado inmueble, en el que está incluido, de forma difícil de separar, el valor del suelo en el que se asienta.

3. Valor en riesgo frente a colapso (VRC): es el valor de reposición del conjunto de activos susceptibles de deteriorarse cuando se producen daños estructurales en un edificio, es decir, su continente (elementos estructurales e instalaciones) y su contenido (equipamiento). No hay necesariamente pérdida del valor del suelo, y si la hubiera se trataría como un daño indirecto, no reflejado por las funciones de daño.

4. Valor en riesgo frente a inundación lenta o viento sin colapso (VRSC): es el valor de reposición de los activos susceptibles de deteriorarse cuando el agua o el viento penetran en un edificio, sin alterar sus elementos estructurales.

Para los mecanismos de daño por inundación lenta y vientos moderados sin colapso estructural, las funciones de daño adimensionales deben ir multiplicadas por el VRSC, mientras que en el caso de que se cumplan la condición de daño estructural (parcial o total), la variable que se destruye es el VRC. Los valores del stock de viviendas y los precios de mercado resultan útiles como posibles vías de estimación del VRC y VRL, ya que estos valores no están disponibles en la mayoría de los casos.

El valor del stock de viviendas es útil por su correlación con el PIB de una ciudad, y posteriormente se puede desagregar en categorías socioeconómicas adoptando una distribución de renta conocida (por ejemplo, una distribución de Pareto) cuya desviación típica es función directa del índice de Gini u otro parámetro de desigualdad. Este enfoque macroeconómico es relativamente sencillo y rápido de aplicar (una vez que se dispone de la clasificación en categorías socioeconómicas), y su margen de error suele estar acotado. Una vez que se conoce el VV, se debe adoptar dos hipótesis adicionales, respecto de las cuales se suele contar con cierta base empírica:

- El valor de las instalaciones con respecto al valor total de un edificio (coeficiente $c1$).
- El valor total medio del equipamiento con respecto al valor total de un edificio (coeficiente $c2$).

En general, pueden especificarse valores diferentes para los coeficientes $c1$ y $c2$ para cada categoría socioeconómica (A, B, C, D) de las edificaciones.

Otro procedimiento para estimar el VRC y el VRSC es averiguar los valores del suelo en el mercado inmobiliario y desglosar, siguiendo algún criterio empírico o los propios mercados de suelo, la parte correspondiente al valor del terreno del valor de los edificios propiamente dicho. La diferencia entre el valor de mercado y el valor del suelo es, nuevamente, el valor VV antes referido, por lo que el desarrollo ulterior para obtener los valores en riesgo es el mismo. Este enfoque es más laborioso puesto que requiere trabajo de campo; al proceder de

abajo hacia arriba, es más susceptible de producir valores poco realistas, sobre todo si no se dispone de una buena representación del mercado inmobiliario en todos los estratos sociales. En la medida de lo posible, se recomienda combinar ambos métodos, tratando de entender y aproximar sus diferencias.

Como resumen de lo anterior, las siguientes expresiones sencillas recogen el flujo de trabajo propuesto, hasta llegar a la obtención de los valores expuestos a daños directos en edificaciones VRSC (sin daño estructural) y VRC (con daño estructural), por los que deben ir multiplicadas las funciones de daño adimensional:

• **Método 1:**

1. Hipótesis y datos de campo para calcular VS y VM
2. Obtención de $VV=VM-VS$

• **Método 2:**

1. Datos macroeconómicos y de distribución de renta para obtener VV

• **Ambos métodos**

1. Hipótesis o datos de campo para calcular los factores $c1$ y $c2$
2. Cálculo de $VI = c1 \cdot VV$
3. Cálculo de $VE = c2 \cdot VV$
4. Cálculo de $VRSC = VI + VE = VV \cdot (c1 + c2)$
5. Cálculo de $VRC = VV + VE = VV \cdot (1 + c2)$



Cuadro 6 —

Estimación de daños económicos por inundaciones en Xalapa, México

Problemática

Las inundaciones leves o moderadas son habituales en el área metropolitana de Xalapa, al menos desde la segunda mitad del siglo XX. Estos eventos afectan vías de comunicación, locales comerciales y viviendas de Xalapa, Banderilla y otros municipios limítrofes. La frecuencia de inundaciones urbanas ha aumentado durante los últimos años, sin que tal aumento esté motivado por un incremento en el régimen de precipitaciones; es probable que sean los procesos de urbanización y la acción humana los que han agudizado este tipo de problemas.

Metodología

Para cuantificar los daños económicos por inundaciones en la ciudad de Xalapa se ha caracterizado la vulnerabilidad física urbana (grado de afectación que puede generar la amenaza en los elementos expuestos) y se la representa mediante una función que establece una relación entre alguno de los parámetros de intensidad de la amenaza y el daño potencial.

Las funciones de vulnerabilidad física se han basado en la biblioteca de funciones de vulnerabilidad propuesta en la herramienta de software ERN-Vulnerabilidad (www.capra.org) y se dividen en las siguientes categorías:

Funciones de daño para edificaciones

La asignación de funciones viene definida para cada tipología constructiva: precaria, popular media y residencial. En este caso, se han agrupado en dos tipos, puesto que en las inundaciones de Xalapa las velocidades del agua son reducidas (salvo dentro de los cauces) y, por tanto, no se produce colapso de edificaciones.

La proporción de daños viene dada por la existencia de uno o más niveles funcionales en las viviendas. En las viviendas más frágiles, se ha asumido que el segundo

piso es inexistente, o que es la propia cubierta del inmueble, por lo que no tiene capacidad portante (tipo 2); en cambio, en las viviendas de fragilidad media o mejores, se ha considerado que la existencia de pisos superiores permite poner a salvo una mayor proporción de los activos en riesgo (tipo 1).

Funciones de daño para infraestructuras críticas

La asignación de funciones de daño a infraestructuras críticas (IC) viene definida por la categoría a analizar (administración pública, agua y saneamiento, energía, industria, transporte, educación, asistencia médica y comercial) y se distinguen cinco grupos de funciones (A, B, C, D y E). Además, se ha procedido a cuantificar los servicios afectados a causa de la no funcionalidad de los elementos infraestructurales afectados. Las curvas de daño y de pérdida de funcionalidad, definidas mediante criterio experto, han buscado captar los fenómenos básicos que caracterizan el problema de la inundación.

Evaluación de los daños económicos

- Daños económicos directos en edificaciones:** Se han obtenido aplicando las curvas de vulnerabilidad antes descritas a las tipologías de viviendas de la zona, teniendo en cuenta la cota de inundación alcanzada por los eventos de distinto periodo de retorno.
- Daños económicos directos en IC:** Se obtienen de igual manera que los daños económicos en edificaciones, esto es, mediante la aplicación de las curvas de vulnerabilidad.
- Daños económicos indirectos en IC:** Su objetivo es recoger, mediante precios sombra, el daño económi-

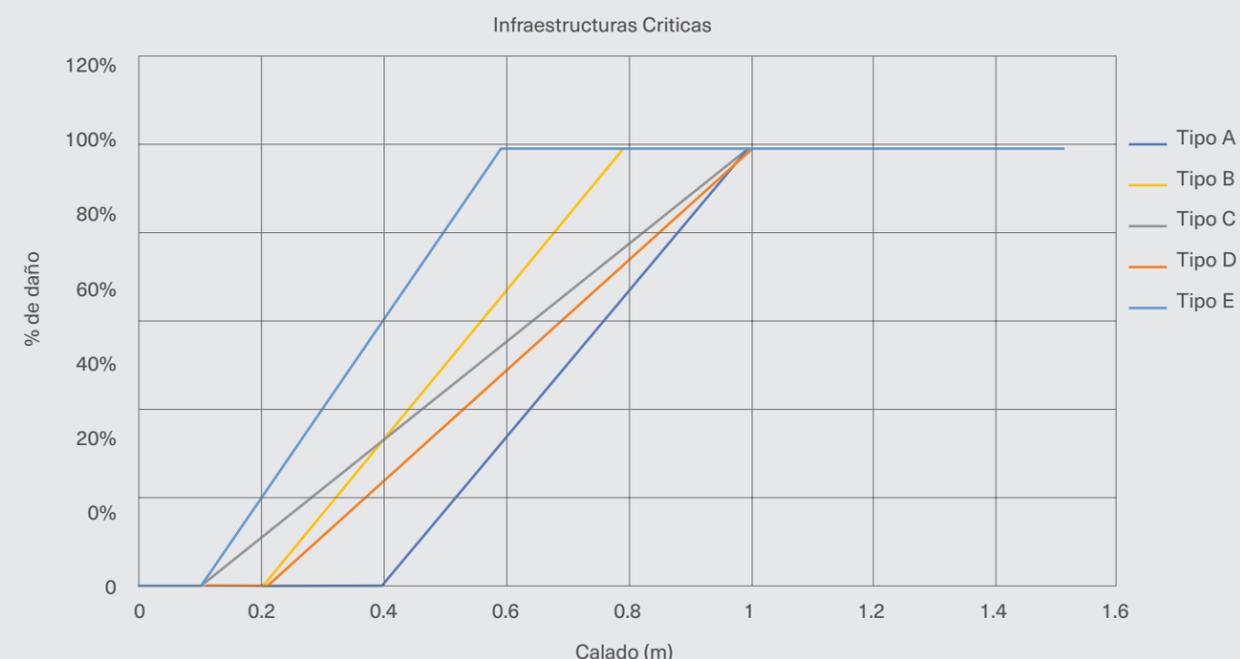


Figura 24 | Funciones de pérdida de servicio.

co derivado de la interrupción de un servicio al que cada infraestructura crítica está ligado. Se han empleado para ello las de curvas de funcionalidad, que relacionan las cotas de agua con la pérdida de servicio que conllevan.

Resultados

La mayor parte de los daños económicos cuantificados son los daños directos relacionados con el ingreso de 0,5-1 metro de agua en viviendas y locales comerciales, durante un periodo de tiempo breve (algunas horas), siendo los daños indirectos prácticamente despreciables, al menos en la actualidad.

Los daños directos a edificaciones se distribuyen de manera dispersa en el territorio, por lo que no se puede afirmar que estén asociados a un problema localizado.

Las inundaciones que se producen son, en ocasiones, recuperaciones súbitas de antiguos cauces que han sido borrados por la huella urbana, sin que exista una red de colectores subterránea que permita recoger al menos una parte de la escorrentía superficial en los instantes en que la intensidad es mayor. La urbanización de zonas periféricas de la ciudad ha incrementado también los riesgos de zonas más céntricas, que tradicionalmente no se inundaban o lo hacían de forma menos aguda.

En cuanto a los daños obtenidos para las infraestructuras críticas, algunos de los subsistemas fundamentales que sostienen el metabolismo urbano se ven parcialmente afectados por efecto de una inundación. Los daños económicos indirectos son menores debido a que no se produce una pérdida prolongada de funcionalidad en edificios o infraestructuras críticas que, en su mayoría, se encuentran fuera de las zonas expuestas a este fenómeno.

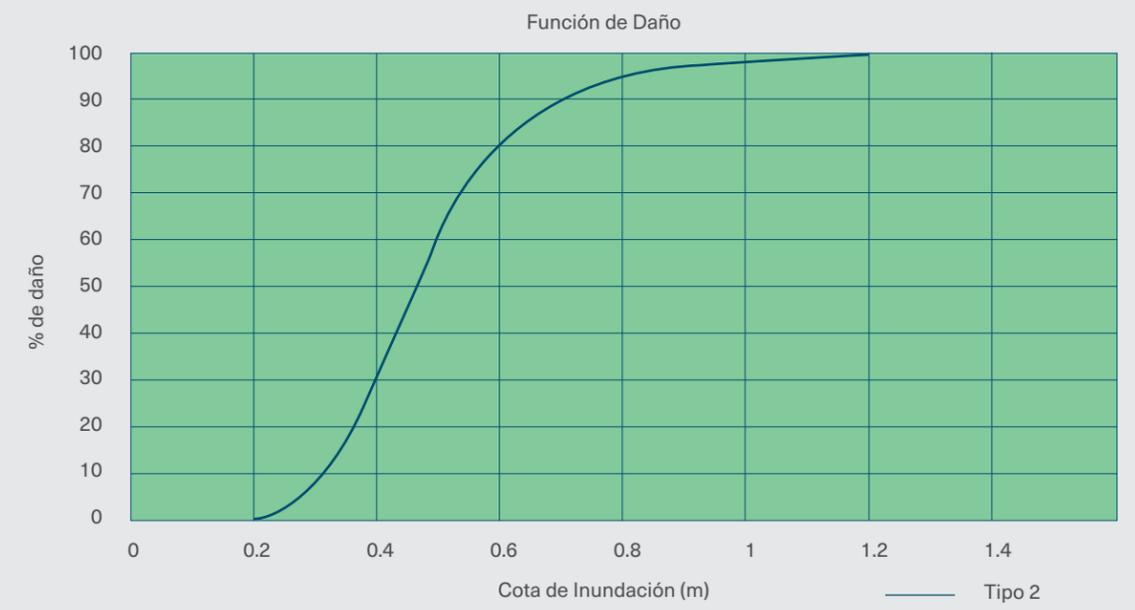
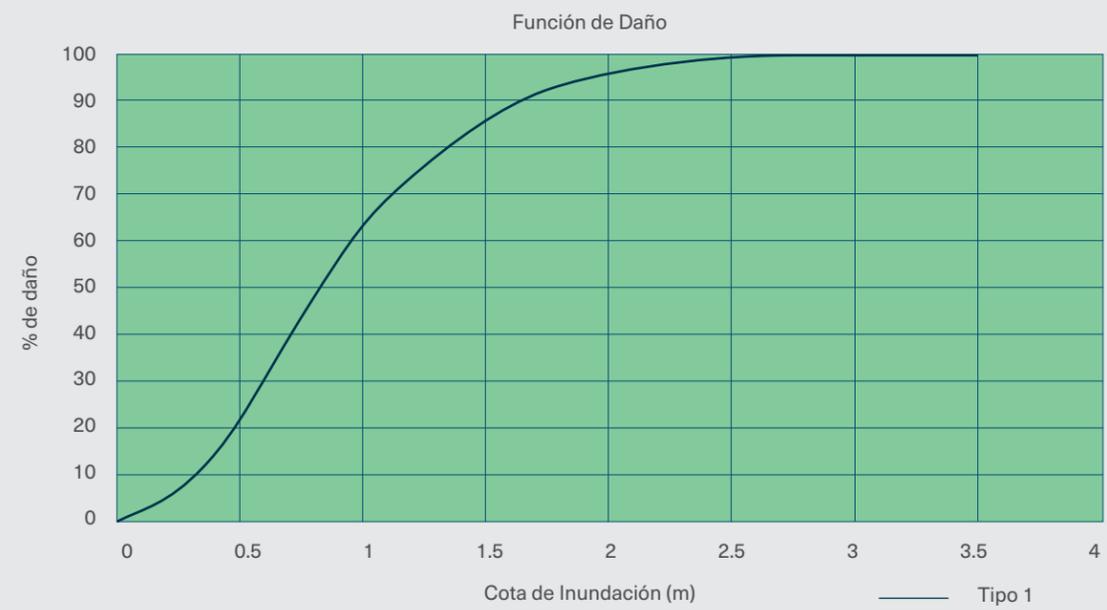


Figura 25 | Funciones de daño para calcular los riesgos de inundación.

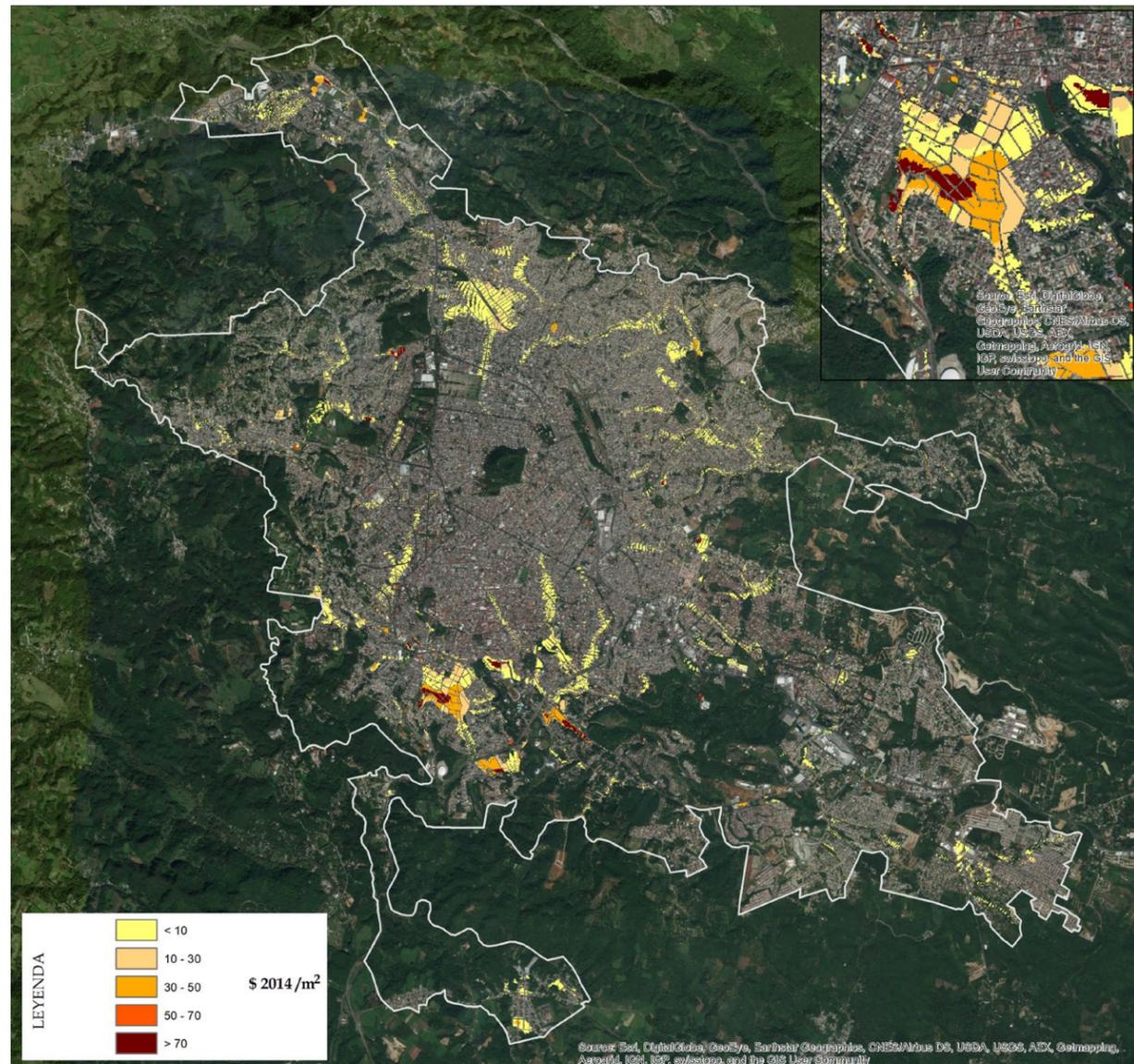


Figura 26 | Daños económicos por inundaciones en Xalapa (México) para un periodo de retorno de 10 años.

La exposición se define como la coincidencia, en tiempo y espacio, de una amenaza y un receptor susceptible de sufrir daños debido a ella. Por lo tanto, se trata de una condición binaria (el receptor está expuesto o no lo está), necesaria, pero no suficiente, para que se produzcan riesgos; los parámetros de exposición reflejan un máximo potencial de los daños, que puede estar más o menos alejado de las pérdidas probables, es decir, del riesgo.

3.4 Vulnerabilidad y daños en infraestructuras críticas

Las infraestructuras críticas, en el contexto de este documento, son elementos físicos que, además de tener un valor económico intrínseco (valor de reposición) que puede ser dañado, cumplen una función clave en uno o varios subsistemas del metabolismo urbano (Kennedy, Pincetl and Bunje, 2011) y, por tanto, su pérdida de funcionalidad implica una alteración más o menos duradera del funcionamiento normal de la ciudad, que se traduce en daños indirectos.

El problema general de estimar los daños indirectos asociados a un determinado riesgo natural es muy complejo y requiere un acercamiento ad hoc en cada caso de estudio, basado en una información detallada de los flujos de personas, materia y energía que tienen lugar en cada ciudad, incluidas sus interrelaciones. Como primera aproximación al problema, se esbozará un método simplificado, válido para estudios con un alcance similar a los de ICES, para analizar la vulnerabilidad sistémica de una ciudad frente a un determinado riesgo de evolución rápida (fast onset), como pueden ser las inundaciones o los huracanes.

Las principales hipótesis del método propuesto, que lo hacen aplicable de manera general con una cantidad reducida (aunque no despreciable) de información, son las siguientes:

1. Se define un número acotado de subsistemas representativos del metabolismo urbano, relevantes a efectos del riesgo que se desea analizar. Para cada subsistema se determina una unidad de flujo característica. Cada subsistema se analiza de forma independiente del resto, descartando las interacciones entre ellos.
2. Aunque cada subsistema se caracteriza por un conjunto de nodos y uniones, a modo de grafo, el análisis se centra en los nodos, dando menor importancia a los flujos que los conectan. De este modo, se evita el análisis de redes, asumiendo que su funcionamiento depende de la integridad de los elementos nodales que las conforman.
3. Se asigna un precio sombra medio a cada unidad de flujo representativa de cada subsistema. Estos pre-

cios, combinados con una estimación de la duración de la interrupción a causa de la catástrofe (tiempo de retorno a la normalidad), permiten obtener un valor económico del daño indirecto en cada subsistema, y del conjunto de ellos.

En la *Tabla 8* se presentan los subsistemas genéricos que se han empleado para caracterizar el metabolismo de diversas ciudades que hicieron parte de la ICES, con sus unidades de flujo representativas asociadas.

Los pasos principales que se deben seguir para la aplicación del método propuesto a una ciudad concreta son los siguientes:

1. Identificación, delimitación y clasificación de las infraestructuras críticas según las categorías reflejadas en la *Tabla 7* u otras que se consideren convenientes. Toda la información se agrupará en una misma base de datos cartográfica.
2. Cruce de la información anterior con las manchas de inundación asociadas a diversos periodos de retorno (habitualmente 10 y 100 años, como eventos representativos), para determinar el área inundada y la cota de inundación media en cada infraestructura crítica. El procedimiento se realiza en un SIG y consiste en superponer las capas de infraestructuras críticas y la cota de inundación para el periodo de retorno considerado y, a partir de ellas, operar con los rásteres, empleando las funciones de daño seleccionadas.
3. Asignación de un valor económico de reposición y de una funcionalidad a cada infraestructura crítica. Esto puede hacerse de manera particularizada, a partir de información específica de cada ciudad, o bien calculando una capacidad total de cada subsistema (por ejemplo, la población escolar conjunta, en el subsistema educación) y asignando a cada elemento (escuela/guardería/academia) una funcionalidad que depende de su tamaño, representado por su superficie en planta. Es preferible conocer la capacidad de cada escuela, en lugar de estimarla a partir del tamaño del edificio y lo mismo ocurre con el resto de los

SUBSISTEMAS	UNIDADES DE FLUJO
SANEAMIENTO	Consumo de agua potable (m ³ /día)
ABASTECIMIENTO	Producción de agua residual (m ³ /día)
ASISTENCIA MÉDICA	Pacientes atendidos por día
COMERCIAL	Gasto comercial (MUSD/día)
ENERGÍA	Consumo de energía (MWh/día)
INDUSTRIA	Valor de la producción industrial (MUSD/día)
SERVICIOS URBANOS	Usuarios promedio diarios
EDUCACIÓN	Alumnos promedio diarios
TRANSPORTE	Viajantes por día

Tabla 8 | Subsistemas más comunes para caracterizar el metabolismo urbano y su flujo representativo asociado.

subsistemas, pero a menudo el esfuerzo requerido no compensa el aumento de precisión aparente, en el contexto de un método simplificado.

4. Adopción de una familia de funciones de vulnerabilidad física y funcional (pérdida de servicio) para cada subsistema. Las funciones de vulnerabilidad física, de manera muy similar a las funciones de daño en edificaciones (apartado 3.3), indican de manera adimensional los daños directos que se derivan de una determinada amenaza (por ejemplo, la destrucción de las instalaciones y del equipamiento en una escuela a causa de una inundación). Las funciones de vulnerabilidad funcional representan el mismo concepto, pero en términos de afectación a la capacidad de la infraestructura para proveer el servicio previsto dentro del subsistema al que pertenece. En un marco simplificado como este, dichas funciones pueden asimilarse a una forma de escalón o rampa, con una funcionalidad del 100% por debajo de un umbral de la amenaza y nula por encima de otro valor (ver ejemplo en la *Figura 22*).
5. Aplicando las funciones de daño anteriores a todos los elementos críticos, una vez se les ha asignado un valor económico y una capacidad, se llega a una pérdida directa (en unidades monetarias) y de funcionalidad (en unidades de flujo) para cada elemento, por subsistemas y conjunta para la totalidad de la ciudad.
6. Finalmente, al adoptar un precio sombra representativo para la unidad de flujo de cada subsistema y una duración característica de la interrupción del servicio (habitualmente semanas), que puede ser en función de la intensidad del evento, es posible traducir a unidades monetarias el efecto de pérdida de funcionalidad, lo que representa en definitiva una aproximación a los daños indirectos.

En el desarrollo de los pasos anteriores, las dos variables que suelen ser más difíciles de obtener o de estimar son las capacidades de cada subsistema y los precios sombra de las unidades de flujo asociadas. En el caso de que no se disponga de datos locales, específicos de cada ciudad, son de utilidad las estadísticas, generalmente a escala de país, aportadas por organismos internacionales como el Banco Mundial, PNUD, UNICEF, OCDE, OMS, OMC, etc.

Para algunos de los subsistemas indicados, como el

transporte urbano, la hipótesis de considerar únicamente los nodos (en este caso las terminales de transporte y posiblemente puentes) es muy restrictiva, ya que las principales afectaciones al tráfico suelen estar ligadas a la inundación o pérdida de funcionalidad de vías principales, con su consiguiente reordenamiento de las pautas de circulación. Siempre que sea posible, se recomienda abordar este problema con enfoque de red. Por otra parte, la interrelación entre los diferentes subsistemas es a menudo un factor clave en la gestión de emergencias y, dentro del método propuesto, debe analizarse de forma cualitativa, a partir de los resultados obtenidos para cada subsistema individual. Por ejemplo, el colapso de la red de transporte puede impedir el acceso de policías y bomberos a las zonas de emergencia, a pesar de encontrarse operativos; de manera similar, la falta de suministro eléctrico paralizará las industrias de la zona, aun cuando sus instalaciones no se hayan visto afectadas directamente.

En definitiva, el método descrito representa una aproximación sumamente simplificadora al problema de la determinación de los daños indirectos derivados de una catástrofe, y en ningún caso puede sustituir a un análisis más exhaustivo, que también implicará más tiempo y recursos. No obstante, se ha comprobado que la información aportada por este método prospectivo, entendida de forma semicuantitativa, es útil para explorar los riesgos sistémicos de una ciudad, así como para comparar la gravedad de estos riesgos entre diversas ciudades.

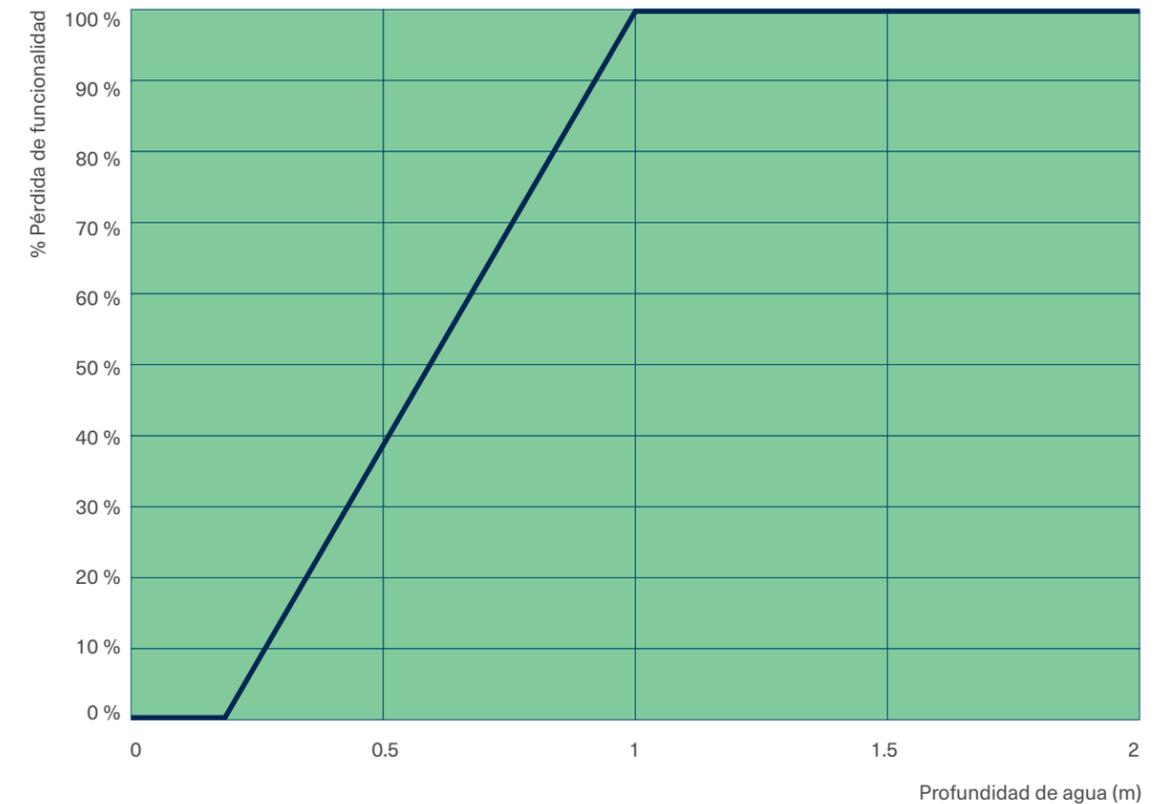


Figura 27 | Ejemplo de función de vulnerabilidad funcional para un edificio público.

3.5 Vulnerabilidad y daños humanos

Más allá de las pérdidas materiales, las catástrofes naturales pueden producir daños físicos y mentales severos y de larga duración en las personas que habitan las ciudades, limitando en el sentido más básico las opciones de desarrollo, especialmente para los ciudadanos más desfavorecidos. Uno de los indicadores de daño humano más utilizados es la fatalidad asociada a un determinado tipo de riesgo, entendida como el número promedio de fallecidos por año. También es útil conocer el número promedio de personas que, como consecuencia de una catástrofe, se verán privadas de vivienda de forma permanente o durante cierto periodo de tiempo y, por lo tanto, necesitarán un lugar para refugiarse. Finalmente, la población afectada por un determinado tipo de riesgo, incluyendo en esta categoría a todas las personas que viven o desarrollan su actividad cotidiana en zonas expuestas (por ejemplo, a inundaciones con más de 0,3 m de profundidad de agua), aunque en sentido estricto no es un parámetro de amenaza sino de exposición, puede ser añadida a los indicadores de riesgo porque aporta información sobre la población susceptible de sufrir daños diferidos de salud física y mental.

A continuación, se presentan métodos de aplicación rápida para estimar estos parámetros en los diversos tipos de riesgo, nuevamente con la excepción, por sus características singulares, de la sequía urbana, que se trata de manera independiente.

Daños relativos por inundación

Para estimar el número medio de fallecimientos asociado a un cierto evento de inundación, sea de la naturaleza que sea, es necesario determinar los mecanismos de daño dominantes que, como primera aproximación y a efectos de cálculo, son dos:

1. Fallecimiento por ahogamiento o infarto en aguas profundas con velocidad de flujo baja o moderada.
2. Fallecimiento por ahogamiento, contusión o arrastre en zonas de flujo preferente o con oleaje.

La separación entre ambos mecanismos (que incluye también otros posibles mecanismos intermedios) viene dada por criterios binarios en los que intervienen la velocidad y el nivel del agua. Una vez determinado el mecanismo de daño dominante, se determinan las variables de caracterización de la amenaza: la cota, en el caso de inundación lenta, y una cierta combinación del calado y la velocidad, para flujo rápido. Finalmente, se han ajustado fórmulas a partir de datos de catástrofes históricas (particularmente el huracán Katrina en 2005), que permiten obtener, incluso con bandas de confianza, las tasas medias de fallecimiento correspondientes a cada nivel de amenaza (Jonkman, Vrijling, and Vrouwenvelder 2008).

Estas fórmulas de fatalidad por inundación no deben aplicarse sobre la totalidad de la población expuesta en el sentido estático que se describió en el apartado 1.3.3.c), sino sobre la población en riesgo (PER), entendida como la fracción de la población total que no ha podido ser evacuada, tanto en sentido horizontal (hacia terreno no inundable) como vertical (acceso a pisos no inundados en edificios altos). La eficiencia del proceso de evacuación depende de diversos factores, entre otros:

- Percepción y conciencia del riesgo.
- Existencia de un plan de evacuación.
- Eficacia del sistema de aviso dentro del plan de evacuación.
- Congestión del tráfico.
- Tiempo de aviso.

En definitiva, si se busca una aproximación sencilla a los daños humanos, debe determinarse un factor de exposición al flujo (FEF) para cada unidad de trabajo, de forma que se pueda determinar la población en riesgo asociada, sobre la que son de aplicación las fórmulas de fatalidad. Los FEF dependen de la estructura vertical de las edificaciones correspondientes al área de estudio (lo que determina las opciones de evacuación vertical), así como de los factores antes mencionados. Las zonas de casas de cate-

goría D, con baja calidad y un solo piso, cuando no hay zonas altas cercanas que brinden protección, suelen presentar factores del orden del 10%, mientras que en barrios donde hay mayor poder adquisitivo, con edificios de mejor calidad y además de edificios de una planta existen edificios altos, la población realmente expuesta al flujo suele ser inferior al 1%. Estos valores aproximados se han obtenido a partir de la calibración de eventos concretos en ciudades que hicieron parte de la ICES, pero deben revisarse en cada caso.

En cuanto a la estimación de personas con necesidades de refugio, se propone como aproximación inicial contabilizar el número de personas censadas en zonas donde se cumple el criterio de colapso de edificaciones, tal y como se describió en el apartado 3.3. Un ejemplo de aplicación de esta metodología en la ciudad Dominicana de Santiago de los Caballeros se presenta en el *Cuadro 7*.

Daños humanos debidos a vientos extremos

Los vientos extremos, al igual que las inundaciones, pueden producir importantes daños humanos, que de forma simplificada se pueden expresar como pérdida de vidas y generación de personas con necesidades de refugio. Como aproximación a la fatalidad por vientos, un enfoque posible es considerar una tasa media de fatalidad, del orden del 10% según algunos análisis empíricos, sobre las personas censadas en edificaciones que experimentan un grado de daño estructural avanzado, como consecuencia de este fenómeno. Para calcular el número esperado de fallecidos, habría que determinar previamente las edificaciones con daño estructural grave y, a partir de ellas, cuantificar la población en riesgo. Como resultado intermedio de los cálculos, se obtiene también la cantidad de personas que pierden su vivienda y, por tanto, serían susceptibles de necesitar un refugio de forma temporal.

Daños humanos por erosión costera

Al tratarse de un proceso de evolución relativamente lenta y condicionado por las estructuras de protección de la costa existentes, la erosión costera en zonas urba-

nas no suele generar, al menos de forma generalizada, daños humanos en forma de fallecidos o heridos. Sin embargo, en zonas recién ocupadas, generalmente de nivel socioeconómico bajo, puede producirse deterioro y colapso de las edificaciones situadas junto a una línea de costa en retroceso, si no ha habido tiempo y recursos para construir muros o espigones de protección. Para cuantificar este riesgo en términos humanos debe llevarse a cabo un análisis particularizado de cada caso, pero como primera aproximación puede asumirse que existe tiempo suficiente para evacuar a las personas, aunque sus viviendas pasarán a ser irrecuperables y todos los afectados por esta circunstancia tendrán necesidades de refugio.

Consideraciones sobre vulnerabilidad y daños humanos diferidos

Los daños debidos a un evento catastrófico pueden producirse durante o después de que suceda el evento, con desarrollos diferidos en el tiempo muy variados y complejos. Si bien los daños en las edificaciones suceden en su mayor parte durante el periodo crítico de la amenaza, los daños en infraestructuras públicas perduran a menudo meses o años, a través de sus efectos sistémicos (ver apartados 3.3 y 3.4). En mayor medida aún, los daños humanos no se limitan a las muertes por ahogamiento o por impacto durante los momentos más críticos, sino que pueden prolongarse durante mucho tiempo en forma de enfermedades ligadas al agua (ver *Cuadro 8*), desnutrición y todo tipo de daños psicológicos derivados de la incapacidad de sobreponerse a la tragedia.

Los atributos que determinan la vulnerabilidad humana en sentido amplio son difíciles de cuantificar y están a menudo relacionados con los índices de pobreza. Aspectos como la preparación y la resiliencia frente a desastres acaparan cada vez más la atención de los expertos, dentro de un paradigma más proactivo, sistemático y continuo de la gestión de riesgos, en contraposición al ciclo clásico catástrofe-reacción-olvido. El ciclo de gestión del riesgo que caracteriza al nuevo enfoque redefine los tiempos y reequilibra las acciones asociadas a

cada uno de ellos, que en ciclo tradicional estarían concentradas en los periodos postdesastre:

1. **Periodo de preparación:** representa la mayor parte del tiempo, durante el cual se debe trabajar de forma ordenada y eficiente para planificar los protocolos y acciones asociados al resto de las fases, tanto desde las instituciones como a nivel de comunidades de vecinos e incluso hogares individuales. Se debe invertir en informar a la población sobre los riesgos a los que está expuesta y promover un acercamiento. Este periodo también incluye la realización de estudios y actuaciones de reducción de riesgos de manera preventiva.
2. **Periodo de alerta:** este periodo existe gracias a que se ha planificado y organizado previamente su existencia y a que se han implementado sistemas de alerta temprana capaces de llegar a la mayor parte de la población en un plazo adecuado. Se puede activar diversos protocolos, entre ellos los de evacuación.

3. **Catástrofe y respuesta inmediata:** los esfuerzos realizados no pueden evitar las catástrofes, pero sí permiten establecer los protocolos de respuesta rápida durante los momentos más críticos, y las tareas inmediatas de salvamento pueden realizarse ni bien se reduce la amenaza. Asimismo, se debe prever una asistencia básica a los evacuados y damnificados durante un cierto periodo de tiempo. Los servicios públicos esenciales (agua, energía, comunicaciones) deben reponerse lo antes posible.

4. **Respuesta diferida:** determinadas acciones de reconstrucción física y psicológica no pueden llevarse a cabo de manera inmediata, sino que requieren un enfoque extendido en el tiempo, a menudo durante varios años, dependiendo de la magnitud de la tragedia. Esta fase se puede solapar o incluso confundirse con el reinicio del ciclo y comienzo del nuevo periodo de preparación.

Un desarrollo más en profundidad de estos aspectos se puede encontrar en el capítulo 6 de esta Guía.



El problema general de estimar los daños indirectos asociados a un determinado riesgo natural es muy complejo y requiere un acercamiento ad hoc en cada caso de estudio, basado en una información detallada de los flujos de personas, materia y energía que tienen lugar en cada ciudad, incluidas sus interrelaciones.

Cuadro 7 —

Estimación de daños humanos por huracanes en Santiago de los Caballeros, República Dominicana

Problemática

En la ciudad de Santiago de los Caballeros, los huracanes y las tormentas tropicales suponen una de las fuentes principales de riesgo, que alcanzan el 18,75% de los eventos históricos registrados en la ciudad, con una frecuencia de alrededor de 2 veces al año. En un caso extremo reciente, la ciudad se vio sometida a la tormenta tropical Olga (12 de diciembre de 2007), donde se registraron diversas muertes y daños materiales tanto en viviendas como en mobiliario urbano y medios de movilización.

Metodología

La vulnerabilidad humana con respecto a huracanes y tormentas tropicales procede de la ocurrencia conjunta de inundaciones y fuertes vientos.

Inundaciones

En el caso de las inundaciones la densidad de población es uno de los factores clave de la vulnerabilidad, ya que determina la cantidad de personas que potencialmente pueden encontrarse en un lugar alcanzado por las aguas de una avenida.

Se han obtenido tres indicadores de daños humanos debidos a inundaciones:

- Número de fallecidos y heridos graves:** Probabilidad de muerte que depende del calado, la velocidad y la tasa de aumento del calado, (Jonkman et al. 2008).
- Número de afectados:** Aquellas personas censadas en zonas cuyo calado asociado a un evento dado es superior a 0,3 metros.

- Número de personas con necesidad de refugio prolongado:** Se calcula a partir del número de personas censadas en viviendas que sufren colapso por efecto de las inundaciones.

Se ha asumido que en toda la zona de estudio la tasa de ascenso del nivel del agua es superior a 0,5 metros por hora, un coeficiente de exposición de la población censada del 1%. Este factor indica que únicamente una pequeña parte de la población se ve expuesta a condiciones de riesgo, sin poder acceder a sitios elevados o a algún tipo de refugio.

Vientos

A diferencia de la inundación, que afecta áreas muy concretas del espacio urbano, el viento tiene un ámbito espacial que abarca toda la zona de estudio, por lo que el número de personas que sufriría algún problema debido a este fenómeno, y en consecuencia una alteración de su vida cotidiana, es alto, especialmente para un gran huracán.

Resultados

Los resultados de pérdidas humanas indican que la fatalidad de los desastres naturales en Santiago no es particularmente elevada. Los fallecimientos estimados no se deben al colapso de edificios o infraestructuras, sino al ahogamiento de personas aisladas, probablemente ancianos, enfermos o niños.

En cuanto al número de afectados, las cifras sí son más altas, ya que las grandes lluvias y desbordamientos fluviales cubren, aunque con calados bajos, una gran proporción del área urbana. Otro indicador interesante

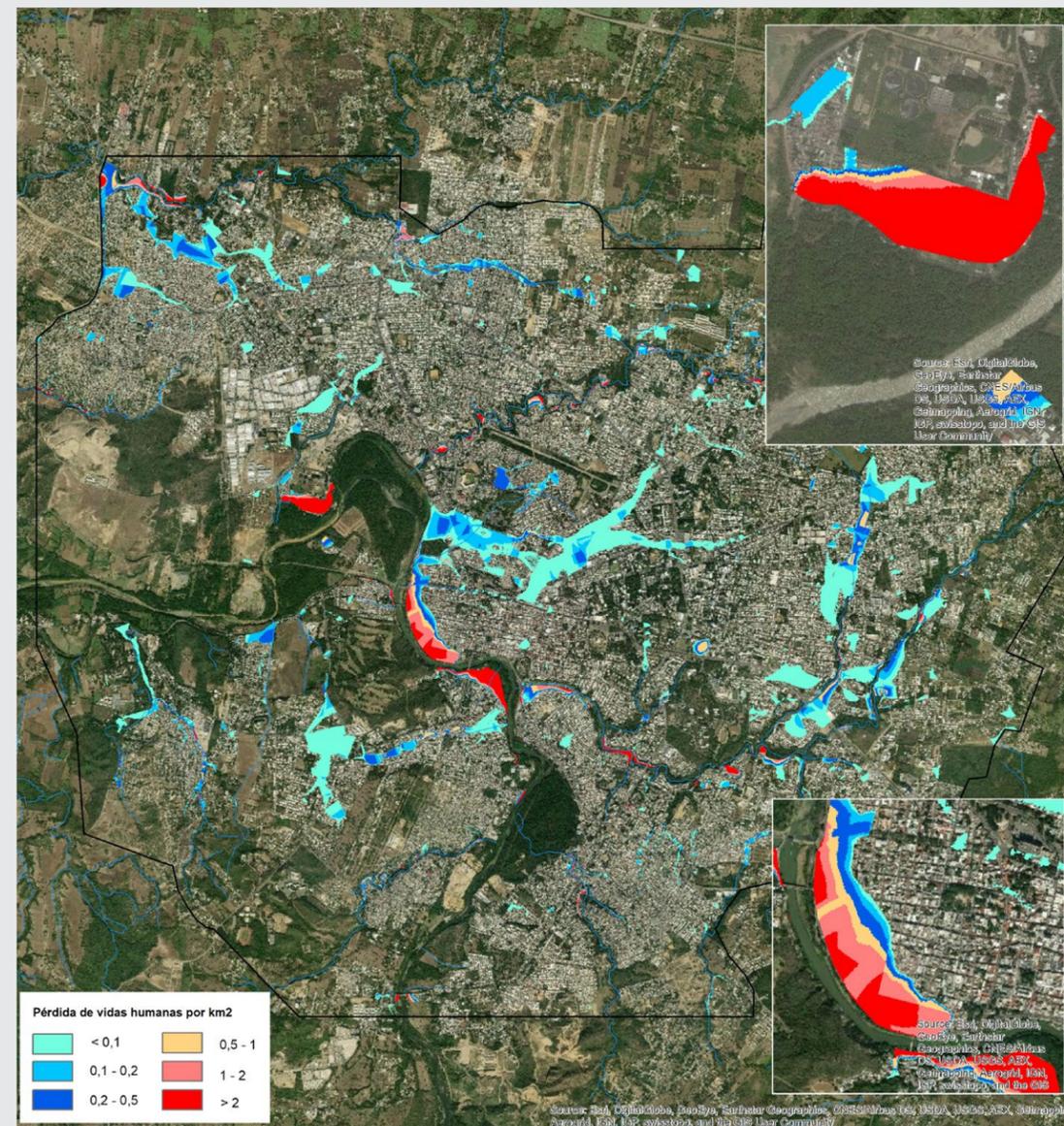


Figura 28 | Pérdida de vidas humanas T100 años.

es el número de personas que se quedan sin hogar; en este caso, dicho indicador arroja valores relativamente altos, que apuntan a que Santiago presenta más riesgo humano frente a grandes inundaciones, que lo que las cifras de fatalidad sugieren.

Además, con respecto a los potenciales damnifica-

dos por viento, se observa que la mayoría vive en las edificaciones más precarias con techos de desecho y láminas de zinc, mientras que en las clases medias el número de damnificados es muy bajo, ya que los daños que se producen en las edificaciones son bajos, incluso para eventos extremos.

Cuadro 8 —

Incidencia de enfermedades en la comunidad de viviendas situadas dentro de la Laguna de los Patos en Cumaná, Venezuela

Problemática

Dentro del sistema lagunar “Laguna de Los Patos”, localizado en la ciudad de Cumaná y declarado como Zona de interés Turístico, Parque Litoral desde diciembre de 1978 debido a su gran importancia medioambiental (por ser lugar de paso habitual de varias especies de aves y crustáceos), se encuentran actualmente tres asentamientos informales en situación irregular: La Malagueña, El Chispero (La Lagunita) y La Encantada (marcadas con círculos en la Figura 23), que ocupan aproximadamente el 3% del área decretada como parque.

Debido a la continua acción antrópica sobre el sistema: (i) vertidos de residuos sólidos urbanos y (ii) de aguas residuales de las urbanizaciones colindantes y de la propia depuradora de la ciudad que, actualmente no se encuentra en funcionamiento, se han originado problemas en la calidad del agua (que se manifiestan principalmente en episodios de fuerte eutrofización) y de los fondos de las lagunas (donde se acumulan fangos contaminados), lo que afecta la salud de la población residente.

A esto hay que sumar que prácticamente todas las viviendas que forman parte de estas comunidades vierten sus residuos en pozos sépticos o directamente al ambiente y no cuentan con servicio de recolección de basura, por lo que ésta es arrojada al ambiente o quemada. Aunque las familias son pobres y producen menos desechos que cualquier comunidad urbana, el hecho de no proceder a ningún tipo de separación o tratamiento impacta negativamente en el lugar.

Metodología

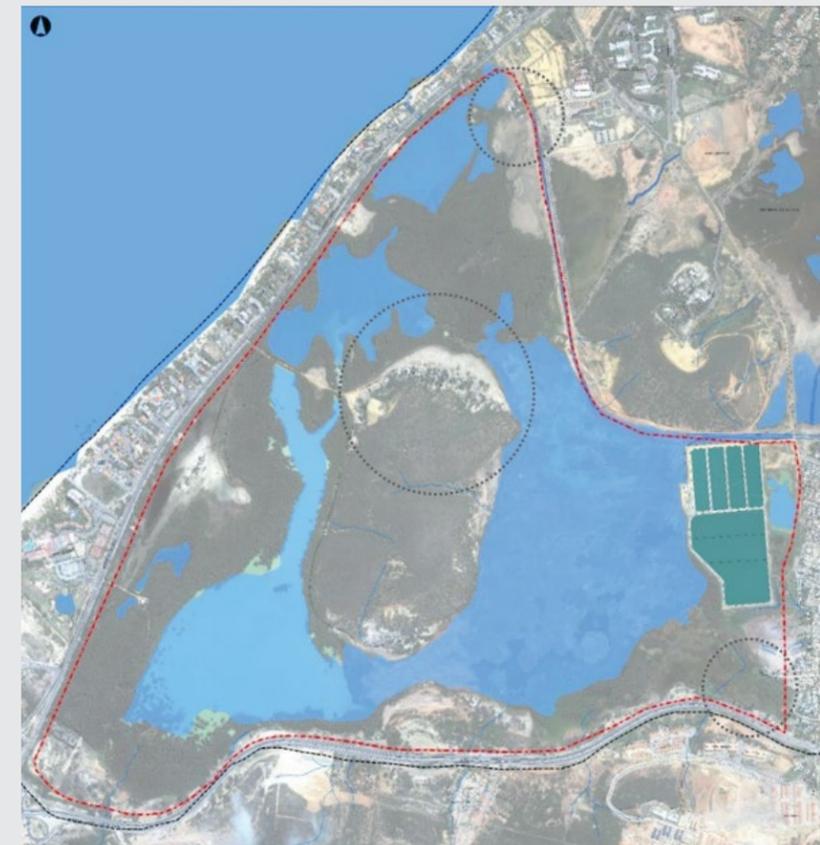
Para determinar el estado actual de estas comunidades se realizó un censo con el objetivo de diagnosticar los aspectos sociales, económicos y ambientales de las mismas, que incluyó un análisis de las condiciones de salud de la población residente en el parque litoral.

Resultados

Como resultado del censo en cuanto a las condiciones de salud de la población, se encontró que el 8% de los pobladores tiene algún tipo de discapacidad y el 21% alguna enfermedad. El porcentaje de discapacidad es similar al que se presenta a nivel nacional, obtenido del último censo de 2011, donde se reflejó que alrededor del 6 % de la población venezolana presenta alguna discapacidad.

Entre las discapacidades se destacan la ceguera y la falta de extremidades inferiores, entre otras.

Con respecto a las enfermedades llama la atención la presencia de cáncer en el 36% de las personas enfermas, seguida de la hipertensión. La Malagueña fue el lugar donde se detectaron más enfermos. En La Encantada el número de personas con enfermedades respiratorias resulta notable.



LA LAGUNITA

	1,2 Hectáreas
	23 Viviendas
	26 Hogares
	100 Personas

LA MALAGUEÑA

	6,65 Hectáreas
	57 Viviendas
	63 Hogares
	191 Personas

LA ENCANTADA

	2,1 Hectáreas
	65 Viviendas (12 con ocupantes ausentes)
	56 Hogares
	214 Personas

Figura 29 | Ubicación de las comunidades en la Laguna Los Patos.

TIPO DE DISCAPACIDAD	LA MALAGUEÑA		LA LAGUNITA	
	Nº PERSONAS	%	Nº PERSONAS	%
CEGUERA	3	21,43%	3	20%
RETRASO MENTAL	1	7,14%	2	13,33%
SIN EXTREMIDADES INFERIORES	3	21,43%	3	20%
SIN EXTREMIDADES SUPERIORES	2	14,29%	2	13,33%
OTRA DISCAPACIDAD	5	35,71%	5	33,33%
TOTAL	14	100%	15	100%

LA ENCANTADA		TOTAL	
Nº PERSONAS	%	Nº PERSONAS	%
0	0%	6	19,35%
0	0%	3	9,68%
0	0%	6	19,35%
1	50%	5	16,13%
1	50%	11	35,48%
2	100%	31	100%

Tabla 9 | Comunidades de la Laguna de Los Patos. Tipo de discapacidad. Fuente: Censo en La Malagueña, febrero 2017.

TIPO DE DISCAPACIDAD	LA MALAGUEÑA		LA LAGUNITA	
	Nº PERSONAS	%	Nº PERSONAS	%
CÁNCER	27	50,94%	1	11,11%
EPILEPSIA	1	1,89%	1	11,11%
HIPERTENSIÓN	12	22,64%	0	0,00%
RESPIRATORIAS	5	9,43%	3	33,33%
DIABETES	1	1,89%	4	44,44%
CARDÍACAS	5	9,43%	0	0,00%
MENTALES	2	3,77%	0	0,00%
TOTAL	53	100%	9	100%

LA ENCANTADA		TOTAL	
Nº PERSONAS	%	Nº PERSONAS	%
1	5,26%	29	35,80%
0	0,00%	2	2,47%
0	0,00%	12	14,81%
15	78,95%	23	28,40%
3	15,79%	8	9,88%
0	0,00%	5	6,17%
0	0,00%	2	2,47%
19	100%	81	100%

Tabla 10 | Comunidades de la Laguna de Los Patos. Tipo de enfermedad. Fuente: Censo en La Malagueña, febrero 2017.

3.6 Análisis multirriesgo: — el caso de los huracanes

En el apartado 2.5 se abordó el cálculo de la amenaza asociada al paso de un huracán como ejemplo característico de análisis multirriesgo. Se propusieron varias alternativas, algunas intensivas en términos computacionales y otras más simples, basadas en el juicio de expertos, para resolver un problema que en términos formales es complejo y, además, requiere mucha información (a menudo no disponible) para poder abordarse de manera rigurosa.

La determinación de los daños en un entorno multirriesgo añade una dimensión de complejidad suplementaria a la expuesta en el cálculo de la amenaza y, en general, debe resolverse con hipótesis basadas en la experiencia y una buena dosis de conocimiento específico de los mecanismos de daño asociados a eventos históricos en cada lugar de estudio. Una vez que se han caracterizado los eventos de riesgo de naturaleza multivariada, se constata que no es posible sumar los daños que se derivan de aplicar las funciones de vulnerabilidad descritas en los apartados previos, aplicándolas de forma individual e independiente, para cada tipo de riesgo individual. En el caso de un huracán que, por ejemplo, lleva asociados vientos de 200 km/h y niveles de agua de 2 m en un cierto sector urbano, los daños de ambos fenómenos, al actuar conjuntamente, no son la superposición de los daños de viento y de inundación, derivados de sus funciones de vulnerabilidad específicas.

En estos casos, la opción más evidente es construir, basándose en la experiencia y en las bases de datos de HAZUS y CAPRA, funciones de vulnerabilidad multivariadas. En el caso de los huracanes, se trataría de expresiones que arrojan el porcentaje del valor expuesto que se daña en un determinado tipo de vivienda, para cualquier combinación de nivel de agua y velocidad de viento. Esto resolvería de forma satisfactoria el problema, si no fuera por el hecho de que tales funciones de vulnerabilidad no están disponibles en la literatura y deben ser formuladas ad hoc por los técnicos responsables.

Un procedimiento viable para construir estas funciones multivariadas (bivariadas, en el ejemplo del huracán), que se ha empleado con resultados satisfactorios en algunas ciudades de la ICES, es el de considerar de forma íntegra el daño asociado a uno de los fenómenos

implicados (por ejemplo, el viento) e introducir un factor de solapamiento de daño (FSD), en las pérdidas debidas a cada uno de los otros fenómenos (en el ejemplo del huracán, el nivel del agua). Así, los daños totales (DT) producidos por un huracán de intensidad de viento V y niveles de agua H serían: $DT = D(v) + (1-FSD) \cdot D(H)$, donde $D(v)$ y $D(H)$ son los daños por viento y agua individuales.

El FSD representa la intersección de los conjuntos de componentes expuestos a una y otra amenaza de un determinado activo (por ejemplo, siguiendo la clasificación propuesta en el apartado 3.3), para cada nivel de amenaza. El FSD será igual a cero si los daños que producen el viento y el agua afectan elementos independientes, es decir, estructuralmente desacoplados, por ejemplo, cuando un viento inferior a 150 km/h destruye el tejado y algunas ventanas altas de una vivienda, mientras que una inundación simultánea con cotas inferiores a 1 metro solo afecta los equipamientos e instalaciones de los sótanos y la primera planta. Existirá una cierta velocidad de viento, así como un nivel del agua, para los cuales los mecanismos de daño de cada fenómeno comienzan a competir por los mismos elementos expuestos, motivo por el que los daños por amenazas individuales no son aditivos; es entonces cuando el factor de solapamiento se vuelve mayor a cero, para aminorar los daños de uno de los fenómenos y evitar la doble contabilidad. En última instancia, habrá un viento que destruya la totalidad de los activos (por ejemplo, a partir de 300 km/h para una vivienda de buena calidad), momento en que el FSD tomará un valor unitario (solapamiento total, daños por agua nulos), puesto que a la inundación no le queda nada por destruir, con independencia de su magnitud. Se puede argumentar que este procedimiento convierte la dificultad de encontrar una función de vulnerabilidad bivariada en la no menos difícil tarea de encontrar la expresión del factor de solapamiento que, en definitiva, también es una expresión intermedia de esta naturaleza. Sin embargo, la estimación del valor del FSD puede abordarse con razonamientos de teoría de conjuntos (intersección de los elementos expuestos a varias amenazas dentro de un mismo activo), a partir de un conocimiento más detallado de la for-



ma en que operan los mecanismos de daño, mientras que la tarea de definir una función de vulnerabilidad de dos entradas es más especulativa.

Este planteamiento sugiere un enfoque sencillo y lógico para construir funciones de vulnerabilidad multivariadas a partir de las funciones aportadas por CAPRA o

HAZUS, y con ellas realizar una estimación de los daños asociados a eventos multirriesgo. No obstante, el problema real es muy complejo y ningún procedimiento simple es capaz de representar todos los procesos implicados, cuyo análisis en profundidad es materia de investigación y queda fuera del alcance de este documento.

3.7 Calibración y validación de los modelos de riesgos

Todos los modelos, incluidos los descritos anteriormente para cuantificar riesgos de origen hidroclimático, son simplificaciones de la realidad y contienen parámetros susceptibles de particularizarse para cada caso de estudio, mediante un proceso de calibración. Además, en algunos tipos de modelos se debe garantizar que dicha calibración no conduzca a resultados erróneos o incluso incoherentes en ciertas condiciones extremas, mediante un procedimiento complementario de validación.

Para calibrar y validar los modelos se requieren datos relativos a las diferentes etapas de cálculo, y la cantidad y calidad de ellos condicionan el procedimiento de trabajo y los resultados esperables. A efectos metodológicos, los modelos presentados en este documento pueden encuadrarse en tres grandes categorías:

- 1. Modelos hidroclimáticos:** son aquellos que se emplean para obtener las series de cálculo de las variables que representan las fuentes de la amenaza, como son el oleaje en profundidades indefinidas, las lluvias y los caudales máximos. También incluyen las técnicas de estadística espacial para rellenar especialmente datos puntuales. Por lo general, se trata de modelos cuyo dominio de cálculo es global o regional, y los más complejos son operados por centros meteorológicos u organismos especializados.
- 2. Modelos de propagación de amenazas:** se emplean para transformar las variables fuente de la amenaza en las variables significativas a efectos de daño, ya dentro del área de trabajo, y por tanto a escala regional o local. En esta categoría están los modelos hidrológicos (transformación de lluvias en caudales), hidráulicos (conversión de caudales en niveles de agua), de propagación de ondas (para convertir el oleaje en mar abierto en oleaje en la costa), de evolución de la línea de costa, etc.
- 3. Modelos socioeconómicos:** son aquellos que sirven para combinar la amenaza con los factores de vulnerabilidad para determinar los riesgos. Desde el enfoque empleado en este documento, son modelos sencillos, basados en caracterizar unas funciones adimensionales y unos activos o personas en riesgo, sobre las que se aplican.

Potencialmente, en una ciudad existirán datos para calibrar los tres tipos de modelos utilizados, comenzando por las fuentes climáticas de la amenaza, para seguir con los modelos de propagación y, finalmente, los socioeconómicos. Los datos de partida y parámetros de ajuste más habituales en cada etapa se resumen en la *Tabla 11*.

Desde una perspectiva estrictamente práctica, el procedimiento de calibración en los cálculos de riesgos en ciudades en el marco de los estudios de la ICES puede simplificarse en tres pasos fundamentales:

1. Seleccionar catástrofes históricas conocidas de diferente magnitud (a ser posible, en número no inferior a dos: una con periodo de retorno inferior a 10 años y otra de carácter más extraordinario) y establecer, a partir de fuentes documentales, los parámetros básicos que las caracterizan, tales como la magnitud alcanzada por las variables de amenaza (lluvias, niveles, caudales, velocidad del viento, retroceso de la costa, etc.) y la magnitud de los daños sufridos, tanto en términos económicos como humanos.
2. Calibrar los modelos de amenaza (hidroclimáticos y de propagación) para dichos eventos, de forma que se satisfagan las condiciones observadas. Es particularmente importante el comportamiento asintótico del ajuste extremal de las variables fuente de la amenaza, ya que transfieren directamente su probabilidad de ocurrencia de los daños.
3. Calibrar los modelos socioeconómicos, de forma que se obtengan, de manera aproximada, los parámetros de daño que han sido observados. Habitualmente no hay información suficientemente desagregada como para calibrar ad hoc las funciones de daño adimensionales, pero sí es posible afinar el valor de los activos en riesgo por categorías.

La mayor parte de los modelos no requieren obligatoriamente un procedimiento de validación, bien porque se trata de modelos de procesos donde los parámetros tienen un significado físico y tienen valores por defecto predefinidos, o bien por tratarse de procedimientos sim-

ples (como las funciones de daño) con resultados acotados. No obstante, se recomienda realizar un procedimiento combinado de calibración-validación siempre que se utilicen modelos de tipo heurístico-conceptual

(p. ej. basados en teoría de sistemas), puramente estadísticos o que no han sido validados por la comunidad científico-técnica.

	DATOS	PARÁMETROS
MODELOS HIDROCLIMÁTICOS	Series instrumentales de lluvias y caudales. Series de oleaje en mar abierto. Series de nivel del mar.	<ul style="list-style-type: none"> · Parámetros de los modelos de <i>downscaling</i> climático. · Parámetros de las distribuciones de extremos ajustadas. · Parámetros hidrológicos a gran escala.
MODELOS DE PROPAGACIÓN DE AMENAZAS	Niveles de agua alcanzados en diferentes puntos del área de estudio. Máximo retroceso de la línea de costa en sectores específicos.	<ul style="list-style-type: none"> · Factores de rugosidad del flujo (Manning, Chezy o similares). · Parámetros hidrológicos locales (NC, tiempo al pico). · Parámetros de propagación de oleaje.
MODELOS SOCIOECONÓMICOS	Estimación de daños económicos en catástrofes históricas. Número de fallecimientos y refugiados en eventos históricos.	<ul style="list-style-type: none"> · Parámetros de forma de funciones de daño. · Parámetros econométricos (stock de viviendas, precios unitarios, etc.) · Parámetros de exposición humana.

Tabla 11 | Resumen de los datos y parámetros de calibración más comunes en los cálculos de riesgo.rápida.

3.8 La incertidumbre en los cálculos de riesgo

Como actividad complementaria y vinculada al proceso de calibración y validación, se encuentra el análisis de la incertidumbre, que en este contexto es equivalente a la estimación de las bandas de confianza de los resultados de riesgo obtenidos, considerándolos ya no como valores únicos, sino como variables aleatorias con su función de probabilidad. Para el cálculo de cada uno de los indicadores de riesgo descritos se han introducido una serie de pasos metodológicos, en los que se van incorporando diversas fuentes de error, que aportan sucesivas componentes de incertidumbre a los resultados:

- **Incertidumbre en las fuentes de la amenaza:** existe tanto en los datos brutos instrumentales como en los modelos empleados para determinar las variables dominantes que sirven de datos de entrada a los modelos de procesos (los modelos hidroclimáticos del apartado anterior). En el caso de las precipitaciones, por ejemplo, existen al menos las siguientes fuentes de incertidumbre: 1) el error instrumental asociado a los datos de los pluviómetros proporcionados por las agencias u organismos meteorológicos; 2) el error de interpolación espacial de dichos datos puntuales, para extenderlos al ámbito de las cuencas de estudio, y 3) el error de ajustar una distribución de extremos para obtener las lluvias máximas con distintos periodos de retorno. Mención especial merece la incertidumbre asociada a la amenaza en escenarios futuros, donde se debe incluir el efecto potencial del cambio climático, bajo los diferentes caminos de emisión de gases de efecto invernadero.
- **Incertidumbre en la propagación de la amenaza:** la variable fuente de amenaza debe transformarse en las variables representativas a efectos de los mecanismos de daño seleccionados (en el caso de las inundaciones, el campo de calados y velocidades máximas). Los modelos de propagación de amenazas (hidrológicos, hidráulicos, de viento, de evolución morfológica, etc.) empleados para tal fin contienen parámetros de ejecución cuyos valores conllevan un grado de incertidumbre que se propaga, de forma muchas veces no lineal, hasta los resultados; en caso de que se haya llevado a cabo un proceso de calibración y validación, la incer-

tidumbre será menor, pero siempre estará presente. Además, no se puede conocer con exactitud el comportamiento (geotécnico, estructural e hidráulico) de las infraestructuras que transforman la amenaza, como son los puentes, diques, encauzamientos, etc. En el momento en que se considera su probabilidad de fallo, posiblemente asociada a diversos mecanismos, aparece una nueva fuente de incertidumbre.

- **Incertidumbre en la exposición y vulnerabilidad:** no se conoce con exactitud la distribución espacial y temporal (en el caso de receptores móviles como personas, vehículos, animales, etc.) de los elementos susceptibles de recibir daño, ni tampoco las pautas de conducta de los seres vivos potencialmente afectados. Tampoco es posible predecir, de manera exacta, aquellos rasgos que determinan la vulnerabilidad frente a un determinado mecanismo de daño (por ejemplo, la estructura de edades de la población afectada o el valor total de los activos en riesgo).
- **Incertidumbre en las funciones de daño:** no se pueden establecer, a ciencia cierta, las relaciones adimensionales entre la amenaza y la proporción de daño, debido al desconocimiento de los rasgos específicos de cada edificio o persona, como a otros factores aleatorios. Las funciones de daño son instrumentos útiles de naturaleza empírica, pero deberían aplicarse con sus bandas de incertidumbre y no como simples relaciones biunívocas entre la amenaza y su efecto.

En la mayor parte de los estudios de riesgos en ciudades, incluidos los de la ICES, la incertidumbre es obviada y únicamente los valores medios de las variables clave se van propagando a lo largo del proceso de cálculo del riesgo (enfoque pseudoprobabilista, según la terminología aceptada por el BID). Un procedimiento válido y relativamente simple para cuantificar la incertidumbre, que ha sido empleado frecuentemente en estudios de riesgos sísmicos (Molina, Lang, and Lindholm 2010) y de tsunamis (Annaka et al. 2007), es el uso de árboles lógicos. Este procedimiento consiste básicamente en plantear, para cada subproceso implicado en la cadena de cálculo del riesgo, varios sucesos posibles, con su probabilidad asociada; esto es equivalente a convertir las

funciones de densidad continuas de las variables de cálculo que se consideren más relevantes en funciones discretas. En la *Figura 30* se presenta un posible árbol lógico sencillo (cuatro niveles con tres alternativas en cada uno) para determinar las pérdidas económicas por inundación fluvial en una ciudad, con incertidumbre; el árbol debe recalcularse para cada periodo de retorno de trabajo. En este caso, se requieren 81 (3⁴) ejecuciones de la secuencia completa de modelos para recomponer de forma discreta la función de densidad del daño para este periodo de retorno. A partir de dicha función, se pueden obtener los intervalos de confianza.

Este enfoque probabilista del riesgo requiere aumentar notablemente el número de ejecuciones necesarias, con respecto al procedimiento pseudoprobabilista, por lo que sólo es viable a efectos prácticos si se cumplen dos requisitos: 1) toda la secuencia de cálculo, con los modelos en cascada, está automatizada, y 2) dicha secuencia es robusta computacionalmente y tiene un tiempo de ejecución razonable. Muchos de los modelos hidráulicos bidimensionales, empleados para el cálculo de riesgos de inundación (y posiblemente otros modelos), son paquetes externos que no cumplen estas condiciones, lo que conduce, entre otras razones, a que no se emplee este procedimiento u otros similares de manera generalizada. No obstante, los estudios que emplean técnicas probabilistas avanzadas son cada vez más comunes en el ámbito académico, por lo general con objetivos y condicionantes diferentes de los de la consultoría.

Una versión blanda del análisis de incertidumbre, que no debe descartarse cuando no se puede llevar a cabo un análisis totalmente probabilista, es el análisis de sensibilidad. En este caso, los técnicos responsables seleccionan con criterio de experto algunas variables del proceso de cálculo, y se preguntan cuál es la influencia que tienen en los resultados. El análisis de sensibilidad, en su versión más accesible, responde a preguntas del tipo:

- ¿Cuánto varían los caudales de diseño en un tramo de río si se modifican los valores del número de curva adoptados para la cuenca?

- ¿Cuánto varían los calados en una zona inundable si varían, dentro de un rango de valores plausibles, los coeficientes de rugosidad del flujo?

Se recomienda que todos los estudios de riesgos hidroclimáticos incluyan un apartado de análisis de sensibilidad básica, que cuantifique la dependencia de los resultados finales de los valores adoptados para ciertos parámetros clave.

El cálculo de la incertidumbre, siguiendo los procedimientos mencionados u otros, requiere datos para poder caracterizar las diferencias (residuos) entre lo calculado y lo real. Sin embargo, en los estudios de riesgos en ciudades tales datos no siempre están disponibles, por lo que el problema debe abordarse extrapolando la incertidumbre medida en otros casos de estudio. Como consecuencia de todas las circunstancias descritas, el análisis de incertidumbre suele producir unos intervalos de confianza muy amplios para las variables resultado, lo que puede convertirla en una realidad incómoda, tanto para los equipos responsables de elaborar los estudios (por la mayor exigencia de datos, a menudo no disponibles, y la mayor complejidad de los cálculos requeridos), como para los entes receptores de los mismos, que perciben una mayor indefinición en los resultados y, en consecuencia, en las conclusiones que de ellos pueden derivarse. A la hora de incorporar la incertidumbre en los estudios de riesgo, es común que los gestores perciban escasos incentivos, ya que deben asumir un aumento en el plazo y presupuesto de los trabajos (que además requieren personal más cualificado), a cambio de lograr un producto más difícil de interpretar, comunicar y, en definitiva, enarbolarse como justificación de unas posibles acciones. En el marco de un paradigma tecnocrático, el binomio formado por tecnólogos y gestores del riesgo tiende a preservar el aura de exactitud que la sociedad atribuye a la ciencia y, por extensión, a disciplinas relacionadas (pero no estrictamente científicas) como el análisis de riesgos. En definitiva, la cuestión de la incertidumbre se perfila como el “elefante en la habitación” de los estudios de riesgos y todo parece indicar que, al despertar, el animal seguirá estando allí².

² En este contexto, los responsables de los estudios de riesgos se convierten en protagonistas inusitados del famoso microrrelato de Augusto Monterroso.

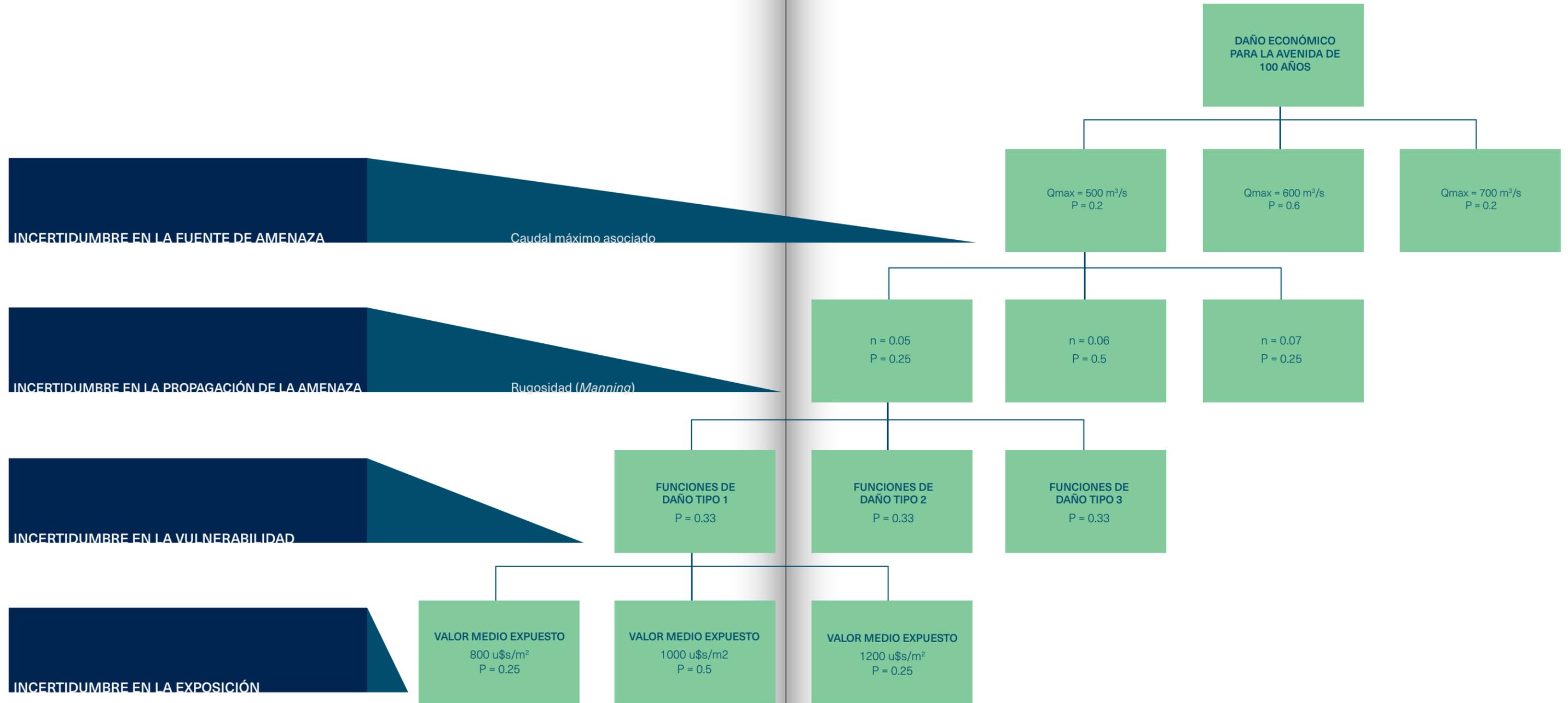


Figura 30 | Ejemplo de árbol lógico para el cálculo de los daños económicos por inundación fluvial con incertidumbre.

4

El riesgo de sequía urbana —

- 4.1. Cuantificación del balance hídrico /135
- 4.2. Efecto del cambio climático en la sequía urbana /148
- 4.3. Consideraciones sobre vulnerabilidad y daños por sequía urbana /150

4

A diferencia de las inundaciones, la escasez de recursos hídricos en entornos urbanos es un riesgo que se manifiesta de forma progresiva y cuyos periodos críticos tienen una duración de semanas o meses. Además, sus daños son generalmente de naturaleza indirecta, sin que haya destrucción de activos físicos o pérdidas humanas. Por estos y otros motivos, los riesgos de sequía urbana no se prestan a un procedimiento de análisis como el presentado en los capítulos previos.

Este apartado se centrará en definir una metodología general y aportar criterios de cálculo para los riesgos asociados a la escasez de agua urbana, que incluye el agua para abastecimiento humano, el agua para usos comerciales e industriales vinculados a la ciudad y, finalmente, el agua para usos de limpieza de calles, riego y otras actividades secundarias. No se considera en este documento la sequía agrícola o la que afectaría a los grandes usuarios industriales o del sector energético.

4.1 Cuantificación del balance hídrico

El marco general para evaluar la amenaza de sequía urbana es un balance hídrico, obtenido como la diferencia entre los recursos disponibles y los recursos necesarios, considerando la ciudad como unidad espacial de trabajo. Dicho balance debe plantearse en términos dinámicos en el tiempo, preferiblemente a escala mensual o trimestral, lo que en definitiva generará como resultado una serie de valores (positivos en caso de excedente y negativos si hay déficit) durante un periodo suficientemente largo (a ser posible 20 a 30 años como mínimo). A partir de una serie de estas características, se puede derivar la garantía de abastecimiento (porcentaje de tiempo en que se satisface íntegramente la demanda) global o por meses del año y emitir un diagnóstico de la situación. A continuación, se describirán los aspectos y metodologías básicas para llevar a cabo la estimación de los recursos disponibles y las demandas, y se señalarán algunos factores que complican lo que en una primera aproximación parece un problema simple.

Estimación de los recursos disponibles

El agua disponible en origen, o recursos brutos disponibles, se obtiene de sumar las siguientes fuentes:

1. Aguas superficiales fluyentes de ríos, arroyos y surgencias

La cantidad de agua bruta disponible viene dada por el mínimo de dos valores: la capacidad de extracción (que incluye posiblemente la capacidad de tratamiento y aducción a la red) y el caudal fluyente disponible. Este último viene dado, a su vez, por la diferencia entre el caudal fluyente total (el que se deriva del modelado hidrológico en régimen natural) y los caudales comprometidos para usos no de abastecimiento (concesiones aguas abajo y caudales de mantenimiento del ecosistema, fundamentalmente).

2. Aguas superficiales de lagos, embalses y glaciares

En el caso de lagos y embalses, el caudal bruto disponible es el resultado de unos criterios de gestión, condicionados por la capacidad y funcionamiento hidrológico de los depósitos y limitados, obviamente, por la capacidad hidráulica de los elementos de extracción y tratamiento. De esto se deriva una de las primeras dificultades en la estimación de los recursos disponibles para

una ciudad: dependen de las normas de explotación de los lagos y embalses conectados a la red y, por lo tanto, varían con el grado de optimización de dichas normas. Los glaciares representan una fuente de recursos hídricos singular, muy importante en algunas zonas andinas (el **Cuadro 9** presenta un ejemplo de evaluación de recursos incluyendo los de origen glaciar en la ciudad de Huancayo en Perú).

3. Aguas de origen subterráneo

El agua bruta disponible procedente de un acuífero depende nuevamente de la capacidad de las bombas de extracción y de la capacidad del acuífero. Aunque es menos evidente, el acuífero funciona como un embalse subterráneo (con capacidad y flujos de entrada/salida más difíciles de evaluar), por lo que los recursos disponibles también están afectados por los criterios de explotación.

4. Aguas procedentes de plantas desaladoras o de reutilización

Este es el caso más sencillo de evaluar en cuanto a recursos brutos disponibles, puesto que vienen dados por la capacidad instalada de la planta o plantas en cuestión. Por supuesto que existen la posibilidad de modular la producción de agua según criterios de explotación, pero a diferencia de los embalses y acuíferos, las decisiones presentes no alteran las restricciones operativas futuras.

En definitiva, los recursos brutos disponibles dependen del número de masas de agua conectadas a la red de suministro, de las características geométricas e hidrológicas de dichas masas de agua, de la capacidad de los sistemas tecnológicos que permiten extraer el agua y, en último lugar, pero no por ello menos importante, de los criterios de explotación de los recursos regulados (embalses, lagos y acuíferos). Desde el punto de vista operativo, es este último aspecto de gestión el que introduce una mayor complejidad en el cálculo de los recursos brutos disponibles, ya que aporta un factor de memoria al sistema y obliga a operar con modelos de series temporales, mientras que los recursos fluyen-

tes o procedentes de instalaciones industriales pueden calcularse para cada incremento de tiempo de forma autónoma e independiente.

Se denominan recursos netos disponibles al volumen total de agua que está accesible a los consumidores medido en los puntos de consumo, y no en los puntos de extracción, en cada periodo de tiempo. Los recursos netos disponibles resultan de aplicar las siguientes modificaciones a los recursos brutos antes señalados:

1. Pérdidas físicas de agua en los procesos de aducción, tratamiento y distribución en la red

Suponen siempre una merma sobre los recursos brutos. No obstante, conviene diferenciar las pérdidas físicas asociadas a filtraciones y roturas de tuberías, que representan agua no utilizada por nadie, de las conexiones ilegales a la red de distribución, que pese a reducir la disponibilidad de agua en los puntos de demanda oficiales, no dejan de satisfacer, con mayor o menor eficiencia, usos consuntivos de una parte de la población.

2. Recursos alternativos: pozos y fuentes comunales o particulares, sistemas de almacenamiento de agua de lluvia, reparto con camiones cisterna, uso de agua embotellada, etc.

Estos recursos representan un incremento, por lo general pequeño y de alto costo relativo (aunque a veces subvencionado), sobre los recursos netos disponibles canalizados a través de la red de distribución. Son, no obstante, la única solución que existe en los sectores urbanos donde no llega la red pública, en los que se asienta una proporción no despreciable de la población urbana de muchas ciudades de Latinoamérica y el Caribe. El hecho de que los sistemas basados en recursos alternativos funcionen, por lo general de manera desregulada y a pequeña escala, hace que resulten poco eficientes y estén más expuestos a problemas de calidad (salvo el uso de agua embotellada cuyas desventajas son de otro tipo, como el alto costo económico y las externalidades ambientales).

CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

Las pérdidas asumibles en una red de abastecimiento, por debajo de las cuales los costos marginales de mantenimiento comienzan a ser equivalentes al ahorro marginal, dependen de numerosos factores: topología y longitud de la red, presión media, disponibilidad de recursos, etc. Como regla general, la mayor parte de las ciudades deben aspirar a un porcentaje de agua no facturada inferior al 20% del caudal bruto procesado. Habitualmente, una vez que se activan de forma efectiva mecanismos de reducción de pérdidas, se consigue llegar a valores cercanos al 10%.

Estimación de las demandas

Como se ha comentado, las demandas de agua urbanas pueden subdividirse, a efectos operativos, en varias categorías:

- Usos domésticos, incluida la hotelería.
- Usos comerciales y de oficinas.
- Usos industriales.
- Otros usos (limpieza de calles, riego, etc.).

La estimación de las demandas domésticas es una de las tareas más controvertidas en la evaluación de la amenaza por sequía urbana. Las necesidades de agua por persona y día (dotación) en una ciudad dada dependen de numerosos factores, entre los que pueden destacarse:

- Nivel de vida o de ingresos de la población.
- Clima (temperaturas, precipitaciones y humedad media).
- Tipologías edificatorias dominantes y modelo de ciudad.
- Nivel cultural y educación. Capital social.
- Calidad percibida del servicio (cortes de suministro, calidad del agua, presión de servicio, etc.).
- Precio del agua y estructura tarifaria.

En el análisis de una ciudad concreta, se pueden obtener las dotaciones reales registradas a lo largo de una serie

de años, dividiendo los recursos servidos (o, como proxi, facturados) entre la población total (fija y flotante). También es útil recopilar información sobre dotaciones en ciudades con características similares, especialmente en el mismo ámbito climático y nivel de desarrollo socioeconómico.

Dado que los estudios de riesgo tratan de proyectar a futuro sus resultados, se requiere proyectar estas demandas aplicando el concepto de escenarios y definiendo al menos dos (aunque tres o cuatro puede ser más adecuado): uno tendencial, que plantee el mantenimiento de las tasas de evolución seguidas a lo largo de los últimos años, y otro inteligente, que resulte de considerar la intensificación de medidas orientadas a la reducción de consumos. Nótese que el escenario inteligente, en el sentido de reducción de consumos, no equivale necesariamente a un escenario desarrollista, en lo que se refiere a la mejora del nivel de vida, ya que un aumento de la renta per cápita, a menudo ligada a un aumento de la oferta hídrica, puede ir acompañada de una menor eficiencia en el uso del agua.

Una vez definidas las dotaciones actuales y futuras, para determinar las demandas domésticas quedaría por determinar la población (fija y flotante), que existe en la actualidad, así como la proyectada a los años horizonte de trabajo. Aquí surge nuevamente un punto de controversia, si bien la decisión sobre la evolución demográfica prevista, a diferencia del cálculo de dotaciones, no debe ser responsabilidad de los técnicos encargados de evaluar los riesgos, sino de otros organismos externos (departamentos de urbanismo, turismo, vivienda, etc.).

La estimación del resto de usos, como son los comerciales e industriales, puede abordarse igualmente mediante la asignación de dotaciones, que en estos casos vendrán expresadas en otras unidades diferentes a las de los consumos domésticos:

- Usos comerciales: dotación media por hectárea y día de una zona comercial de ciertas características.
- Usos industriales: para grandes industrias se debe considerar el consumo real basado en datos históricos y proyecciones. En el caso de polígonos o áreas industriales con múltiples empresas diversificadas, se pueden establecer nuevamente dotaciones por unidad de área (m^2 /ha-día) en función del tipo de industria predominante.
- Otros usos: en el caso de usos municipales, como limpieza de calles o riego, se debe establecer una dotación por unidad de superficie urbana.

Balance hídrico urbano

El balance hídrico resulta de sustraer de las aportaciones netas disponibles las demandas estimadas, tanto en situación actual como en las proyecciones de los escenarios futuros considerados. En el caso de que se disponga, como es recomendable, de series mensuales largas de aportaciones y demandas, el resultado del balance es una serie temporal de la misma longitud, de la que se pueden extraer, entre otros, los siguientes indicadores de amenaza de sequía urbana:

- La garantía media de abastecimiento, definida como el porcentaje del tiempo en que la serie de balances resulta igual o mayor que cero.
- Las garantías de abastecimiento por meses o estaciones.
- Volumen medio de déficit anual y por meses o estaciones.

- Régimen extremal de déficits anuales (por ejemplo, déficit superado una vez cada 10-20 años).
- Frecuencia (n° /año) y duración media (normalmente en meses) de las rachas de déficit.

CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

A pesar de que, con fines prácticos, conviene separar el cálculo de la oferta y la demanda de agua, las demandas en una ciudad dependen de las condiciones de oferta: continuidad del servicio, presión media, calidad del agua servida, estructura tarifaria, etc. Cualquiera de estos factores puede producir anomalías en las pautas de consumo registrado, de signo tanto positivo como negativo, que tienden a desaparecer a medida que se resuelven las causas subyacentes.



Cuadro 9 —

Consecuencias del cambio climático en el riesgo de sequía urbana. El caso de Huancayo, Perú

Problemática

La sequía urbana es uno de los limitantes al desarrollo más importantes de la ciudad de Huancayo. Las fuentes de agua superficiales se explotan al límite durante el periodo de estiaje y el déficit hídrico producido se logra compensar en parte con el aporte adicional de fuentes subterráneas que proporcionan un agua de baja calidad y a un alto costo. Esta situación ya ha llegado al límite en los últimos años ocasionando cortes en el servicio de abastecimiento relativamente frecuentes y de larga duración.

Los principales motivos se enumeran a continuación:

- Disminución del recurso superficial disponible debido a la baja que está sufriendo el nevado Huaytapallana, localizado en la cuenca del río Shullcas, como consecuencia del cambio climático.
- Competencia del recurso superficial para abastecimiento con otros usos, principalmente la agricultura.
- Incremento de la demanda debido a un aumento exponencial de la población en los últimos años.

Metodología

El efecto del cambio climático dentro del estudio de riesgos de sequía urbana en la ciudad, se ha incorporado a través de los cambios que induce en el recurso disponible (aportaciones) de forma totalmente probabilista (fully probabilistic, según la terminología adoptada por el BID). En este caso, la fuente de aportación principal es el río Shullcas, por lo que los cambios en el recurso disponible dependen de la evolución futura del clima y de los usos del suelo en dicha cuenca.

Para la cuantificación del recurso disponible se ha construido un modelo hidrológico a escala mensual que

permite, a partir de una serie de datos de precipitación y evapotranspiración, determinar los caudales fluyentes en la cuenca. La construcción del modelo ha sido necesaria puesto que el río Shullcas tiene la particularidad de presentar masas glaciares en su cabecera (nevado Huaytapallana), que aportan una parte no conocida de la escorrentía total que es necesario cuantificar. Para ello, se ha adoptado un enfoque eminentemente práctico que consta de los siguientes pasos:

- Calibración de un modelo hidrológico agregado convencional utilizando las cuencas vecinas, donde la presencia de glaciares es nula o despreciable, con el fin de reproducir de forma correcta las aportaciones pluviales.
- Propuesta de un modelo de carácter empírico para simular el aporte glaciar que se ha ajustado a partir de datos bibliográficos y que conlleva una prognosis sobre la evolución del área glacial (Figura 31).
- Creación de un modelo hidrológico como combinación del modelo convencional y el módulo de evolución agregada de los glaciares de la cabecera de la cuenca. Este modelo combinado se ha validado con los datos hidrometeorológicos disponibles en la cuenca y se usa para generar series sintéticas de aportaciones para los distintos escenarios de cambio climático.

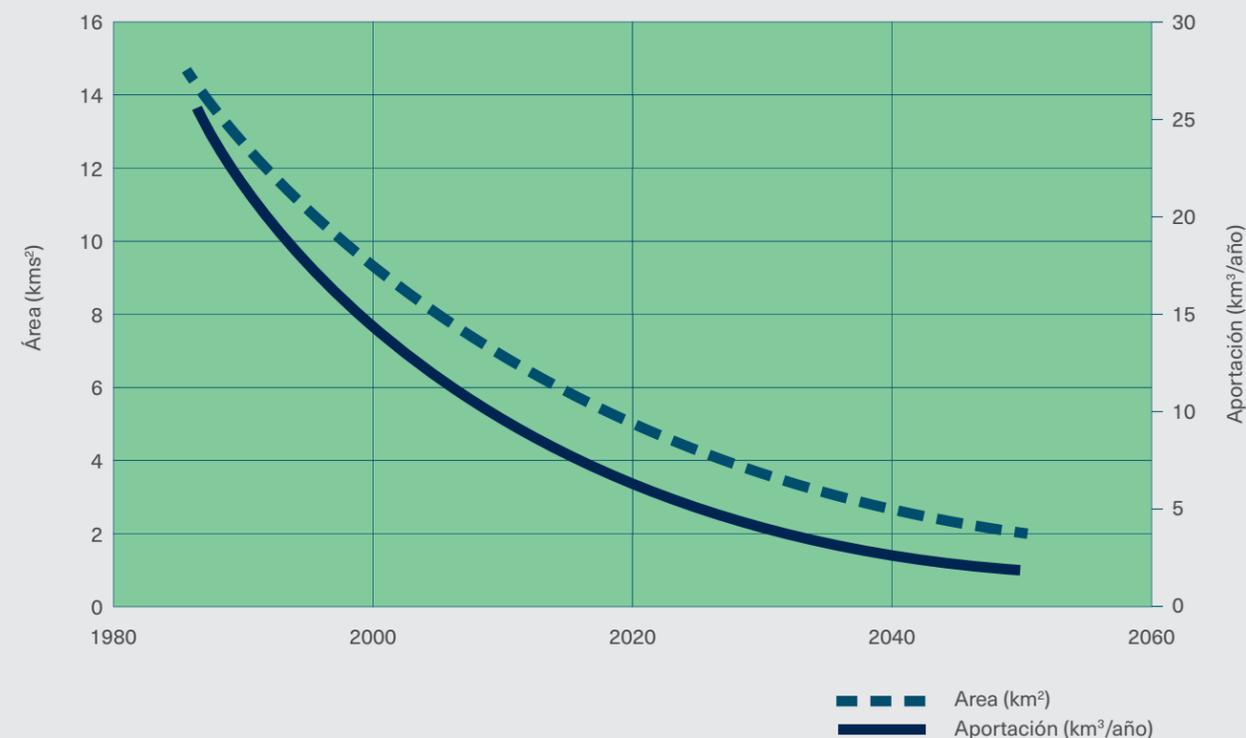


Figura 31 | Evolución del área glacial y las aportaciones medias del nevado Huaytapallana en la cuenca del Shullcas, según el modelo propuesto.

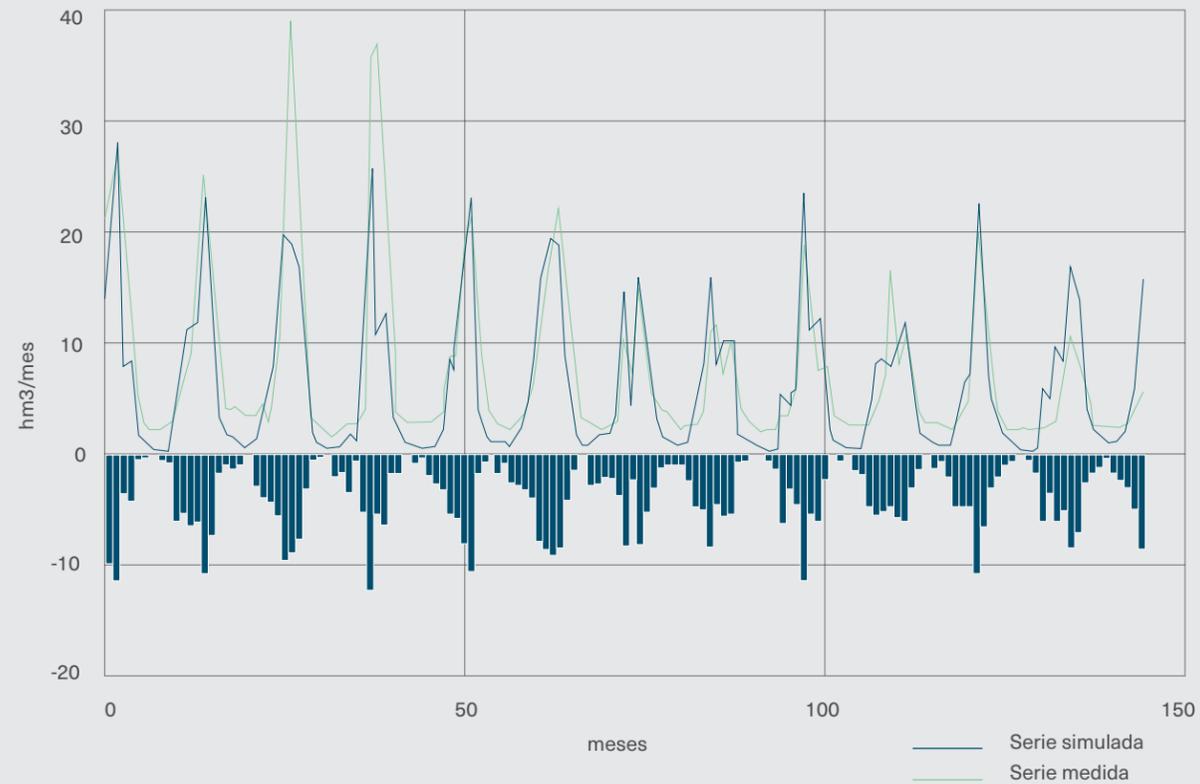
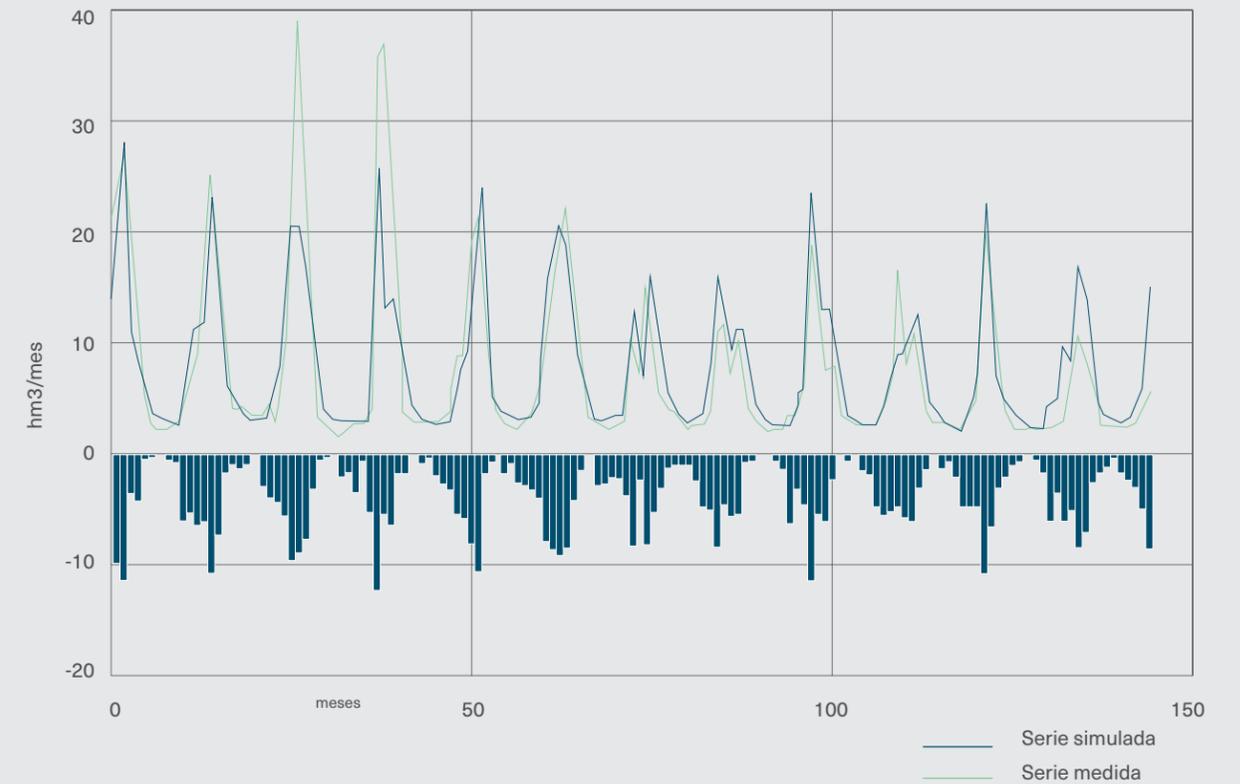


Figura 32 | Series de aportaciones medidas y simuladas durante el periodo de calibración. Modelo convencional, considerando únicamente las aportaciones pluviales.

En la *Figura 32* (izquierda), donde se representa el aporte pluvial de la cuenca, se comprueba que, aunque los caudales altos están bien ajustados, no ocurre lo mismo con el flujo base, mientras que en la *Figura 32* (derecha), donde ya se incluye el aporte glaciar, se ha obtenido un buen ajuste tanto para caudales altos como para los bajos (salvo en dos años húmedos).

El modelo ya validado se ha empleado para generar

series sintéticas de aportaciones de 30 años de duración para los distintos escenarios (actual, 2030 y 2050) a partir series de precipitación y evapotranspiración potencial de igual duración.



Modelo combinado de aportaciones pluvio-glaciares.

- **Precipitación:** Se ha dispuesto directamente de la series de lluvias tomadas de la base de datos NEX-GDDP, proporcionada por el Centro de Simulaciones Climáticas de la NASA (NCCS) para el RCP 4.5, durante el periodo 2006-2100.

- **Evapotranspiración potencial:** Se han tomado los datos utilizados para la calibración del modelo y se han modificado, de acuerdo con las previsiones de cambio climático en el régimen medio de temperaturas para el RCP 4.5, resultado de la simulación de modelos climáticos globales, recopilados como parte del Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIO5; Taylor, Stouffer, y Meehl 2012).

ESCENARIO DE CC RCP 4.5		
HORIZONTE TEMPORAL	2030	2050
VARIACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN	+3%	-3%
AUMENTO DE LA TEMPERATURA	0,5 -1°C	1,5 -2°C

Tabla 12 | Escenarios de cambio climático RCP 4.5 (2030 y 2050).

Resultados

En la *Tabla 13* y en la *Figura 33* se presentan las precipitaciones y aportaciones obtenidas:

Como se observa en la tabla anterior aunque para el año horizonte 2030 tanto la precipitación media anual como la aportación media anual aumentan ligeramente respecto al periodo actual, no ocurre lo mismo para el horizonte 2050 donde disminuyen respecto a la situación actual.

Se comprueba que la situación actual de Huancayo en materia de abastecimiento urbano es crítica y compete con la demanda agrícola en período de estiaje. En el

futuro, la situación se agravará debido a la progresiva desaparición de los glaciares de cabecera debido al cambio climático.

El déficit detectado para la situación futura no puede resolverse únicamente con medidas de gestión de la demanda (reducción voluntaria de consumos), con reducción de fugas en la red o con mejoras en la regulación de las lagunas existentes, y va a ser necesario el desarrollo de grandes inversiones y de cambios profundos en la gestión de activos.

ESCENARIO	ACTUAL	FUTURO	
HORIZONTE TEMPORAL	2015	2030	2050
PERIODO SIMULADO	2006-2036	2015-2045	2035-2065
PRECIP. MEDIA [mm/año]	861,63	893,36	835,89
APORT. MEDIA [Hm3/año]	99,25	99,66	86,42
COEF. ESCORRENTIA	0,62	0,61	0,56

Tabla 13 | Resumen resultados de las aportaciones para los diferentes escenarios.

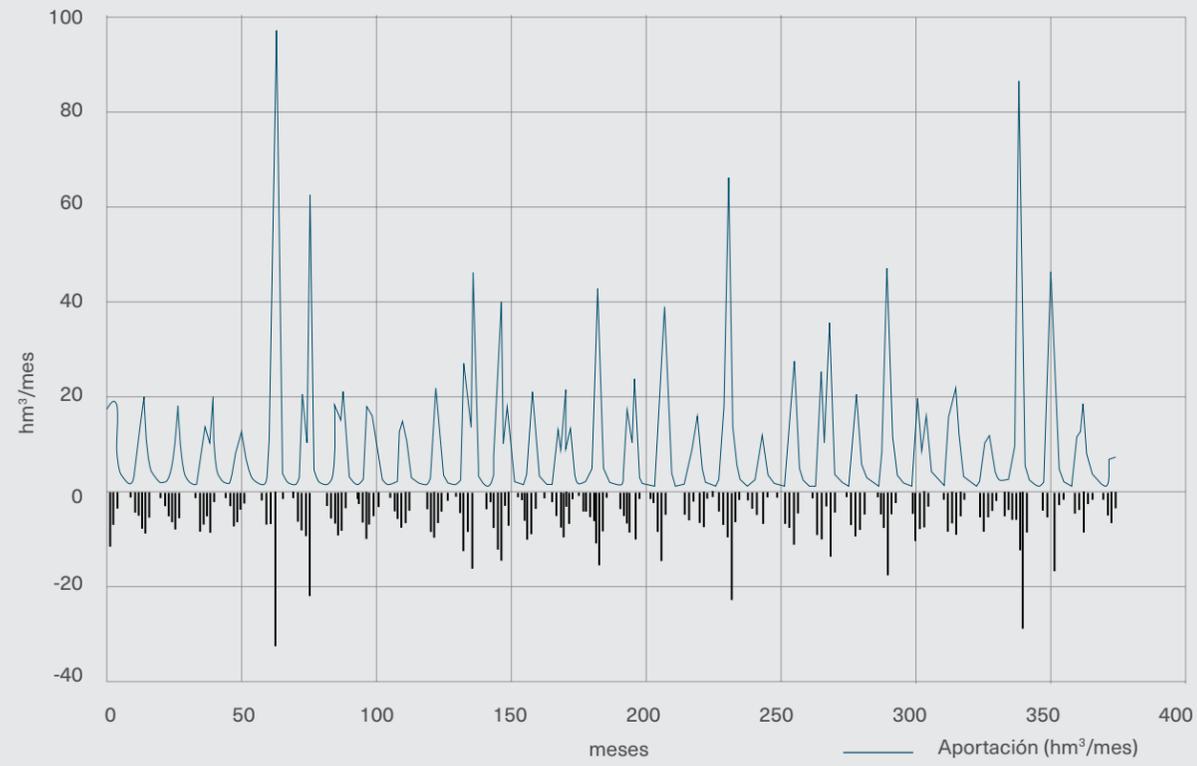
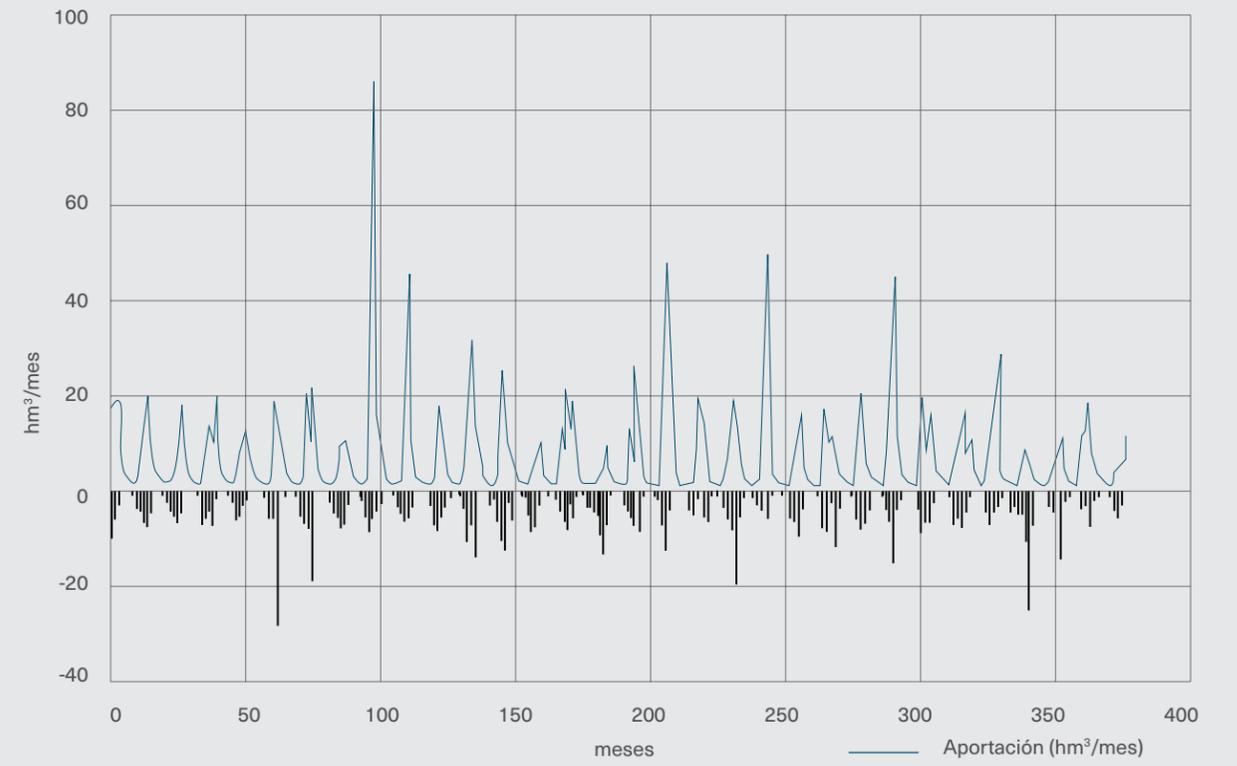


Figura 33 | Series de aportaciones obtenidas en la cuenca del río Shullcas. Año horizonte 2030.



Series de aportaciones obtenidas en la cuenca del río Shullcas. Año horizonte 2050.

4.2 Efecto del cambio climático en la sequía urbana

A diferencia de lo expuesto en el apartado correspondiente a los riesgos de evolución rápida (2.6), el cambio climático altera la disponibilidad de recursos hídricos en las ciudades a través de modificaciones en el régimen medio de precipitaciones, temperaturas y caudales en los ríos, es decir, debido a cambios en la magnitud (valor medio y desviación típica) de las variables hidroclimáticas a escala de cuenca hidrográfica, generalmente mucho más extensa que la mancha urbana. Este aumento de la escala espacial y temporal de la información necesaria, otorga a priori un mayor grado de fiabilidad a las estimaciones de cambio climático para evaluar los riesgos de sequía urbana, con relación al caso de los riesgos por eventos extremos. El procedimiento de cálculo genérico para determinar las aportaciones futuras disponibles se resume en los siguientes pasos:

- 1. Determinación del área de influencia** de la ciudad, desde el punto de vista de la disponibilidad de recursos, incluidas todas las posibles fuentes de recursos futuras, no sólo las que existen en la actualidad.
- 2. Recopilación y análisis de la información sobre cambio climático** existente a escala regional, en el área de influencia. Si no hay suficiente información o si se encuentra poco actualizada con los últimos resultados del IPCC, se recomienda llevar a cabo una reducción de escala (en inglés *downscaling*) de los modelos de circulación general. Esta puede ser dinámica (modelos de mesoescala) o estadística. Esta actividad incluye, generalmente, una calibración de los resultados con series instrumentales de datos meteorológicos disponibles.
- 3. Caracterización del clima futuro**, a efectos de las variables relevantes, para un horizonte objetivo, generalmente a 30 o 50 años (nótese que por motivos estadísticos no es correcto considerar escenarios de cambio climático para plazos de tiempo inferiores a esos). Para la estimación de recursos hídricos, las variables más importantes son las precipitaciones y las temperaturas, de las que se puede inferir la evapotranspiración media. Esta caracterización puede ba-

sarse directamente en el uso de las series sintéticas, a escala agregada de varios días, tal y como son generadas por los modelos climáticos o bien, en los casos que lo permitan, introducir un factor corrector de la lluvia y temperatura por meses. Este último procedimiento simplificado, basado en perturbar con un factor para cada mes del año las series históricas, debe aplicarse siempre y cuando se verifique que es válido estadísticamente.

- 4. Aplicación de los modelos de procesos necesarios para obtener las series de las variables derivadas** que son relevantes, a partir de las series anteriores. Por lo general, esto implica ejecutar nuevamente los modelos hidrológicos y los modelos de gestión de recursos (ver apartado 4.1).

En el último de los pasos anteriores está implícita la hipótesis de que la magnitud del cambio de clima es tal que no se producen alteraciones significativas en la cobertura y tipos de vegetación, y que los procesos de conversión lluvia-caudal se mantienen aproximadamente estables. Sin embargo, en ciertas regiones, el cambio climático puede producir alteraciones cualitativas en las cuencas (por ejemplo, la transformación de bosque en matorral o sabana) y esto tendría una repercusión en el ciclo hidrológico, más allá del cambio en las precipitaciones y las temperaturas. Se requiere la intervención de expertos en ecología para evaluar estos fenómenos en cada caso particular, siempre que haya indicios de que puedan producirse.

Finalmente, el cambio climático puede tener efecto en las demandas de agua, debido a las variaciones de temperatura que pueden inducir cambios en las pautas de consumo de la población, por lo general del mismo signo. Si bien es lógico asumir que un aumento de las temperaturas llevará asociado un aumento de las dotaciones, también es cierto que existen mecanismos, naturales o impuestos, para que, en un contexto de clima más cálido, se valoren y gestionen mejor los recursos hídricos. En conjunto, las necesidades de agua, por encima de un cierto umbral que puede situarse en torno a 100 litros por persona y día, no dependen tanto del clima como de otros factores, como el nivel de desarrollo socioeconómico, la cultura cívica imperante y la eficacia en la gestión.

El cambio climático altera la disponibilidad de recursos hídricos en las ciudades a través de modificaciones en el régimen medio de precipitaciones, temperaturas y caudales en los ríos, es decir, debido a cambios en la magnitud (valor medio y desviación típica) de las variables hidroclimáticas a escala de cuenca hidrográfica, generalmente mucho más extensa que la mancha urbana. Este aumento de la escala espacial y temporal de la información necesaria, otorga a priori un mayor grado de fiabilidad a las estimaciones de cambio climático para evaluar los riesgos de sequía urbana, con relación al caso de los riesgos por eventos extremos.

4.3 Consideraciones sobre vulnerabilidad y daños por sequía urbana

La sequía urbana es un riesgo singular dentro de los que pueden afectar a las ciudades, ya que se manifiesta de forma lenta y no genera daños económicos directos, ni daños humanos en sus formas más visibles (fallecidos y refugiados). Sin embargo, los daños indirectos derivados de la falta, esporádica o continuada, de agua de abastecimiento en una ciudad pueden ser muy importantes, hasta el punto de condicionar su desarrollo socioeconómico y convertirse en un factor limitante del crecimiento demográfico y del bienestar social.

El marco conceptual presentado en los capítulos previos para tratar la vulnerabilidad y, en última instancia, los daños, no resulta del todo adecuado para abordar el riesgo de sequía urbana, debido a la naturaleza compleja, difusa y diferida en el tiempo de sus efectos en el sistema socioeconómico. Por este motivo, no existen procedimientos de cálculo ni funciones de daño al uso comúnmente aceptadas. Los síntomas más comunes con que se manifiesta la sequía urbana, en orden de mayor a menor grado de afectación, son los siguientes:

1. Falta de acceso a la red

Debido a la falta de infraestructuras, a menudo relacionada con la incapacidad de pago de los usuarios potenciales (lo que crea inseguridad para posibles inversores), existen sectores de numerosas ciudades no conectados a una red de abastecimiento de agua. Esto, por lo general, lleva asociado mercados informales de agua, pozos particulares desregulados, conexiones ilegales a tuberías, suministro subvencionado a través de camiones cisterna y depósitos públicos, etc. Estos mecanismos suelen garantizar unas condiciones básicas de subsistencia, pero coartan cualquier opción de desarrollo socioeconómico y generan sobrecostos importantes para las familias. El indicador más directo de este problema es el porcentaje de la población total no conectada a una red de abastecimiento.

2. Restricciones de suministro estacionales

Cuando no hay agua suficiente para satisfacer todos los usos de la población durante ciertos periodos del año (generalmente durante la época seca), se producen res-

tricciones de suministro que suelen durar varios meses, dependiendo de la severidad de la sequía. Esto lleva asociado una pérdida de calidad de vida de los hogares y una limitación de las actividades económicas, sobre todo en los pequeños negocios, que no se pueden permitir pagar un precio más alto o construir infraestructuras propias. Como contrapartida, al tratarse de un hecho periódico, los afectados conocen el problema y pueden anticiparlo. En este caso, el indicador de esta problemática es la dotación media disponible durante el periodo seco (o anual, en el caso de que no exista tal periodo), medida en litros por persona y día. En el caso de que no se pueda alcanzar la dotación mínima, es previsible que las familias se vean obligadas a adquirir el agua de otras fuentes (por ejemplo, cisternas) con un sobrecosto importante.

3. Restricciones de suministro aleatorias

Debido al mal estado de conservación de la red de suministro (fugas, roturas, tuberías obstruidas o de sección insuficiente, etc.), en muchas ciudades los usuarios sufren cortes de agua, caídas de presión y episodios de alta turbidez de forma habitual pero aleatoria; esto sucede con independencia de la disponibilidad del recurso bruto. La cuantificación de esta problemática pasa por obtener la garantía media de abastecimiento, entendida como el porcentaje de tiempo en que el servicio se produce en condiciones aceptables, tanto de cantidad como de calidad del agua servida. Las condiciones de aceptabilidad deben agrupar un conjunto de parámetros de calidad del servicio: número máximo de cortes de suministro por año, presión media de servicio, porcentaje de pérdidas en la red, número medio de roturas de tubería por km y año, etc.

Los tres síntomas anteriores tienen diferentes causas raíz y requieren soluciones de distinta naturaleza. Habitualmente, los tres se dan en diferentes sectores de la misma ciudad: algunas zonas no tienen acceso a una red de abastecimiento; otras tienen acceso a la red, pero no tienen garantizada la disponibilidad del recurso; finalmente, puede haber zonas conectadas y con abundancia de agua, donde las infraestructuras hidráulicas existentes no pueden transportar los caudales necesarios.

El problema de la sequía urbana, puesto de manifiesto a través de los problemas citados, tiene consecuencias importantes en el potencial de crecimiento económico y de desarrollo humano, si bien la conversión de un conjunto de indicadores específicos de sequía en cifras de daños resulta una tarea compleja. Esto es así porque la carencia de recursos hídricos actúa como limitante al desarrollo en contextos donde, por lo general, existen muchos otros, como son la estabilidad política e institucional, la educación, la sanidad, el sistema legal, etc. En sentido estricto, la sequía urbana a la que están expuestas numerosas ciudades en ALC no es el problema raíz, sino un resultado de otros problemas de fondo, por lo que resolverla requiere intervenir en muchos aspectos de la realidad, más allá de las infraestructuras hidráulicas. En definitiva, el costo de un sistema deficiente de abastecimiento urbano está implícito, aunque de forma indiferenciable de otros aspectos, en la brecha económica y social que separa a los países desarrollados de los que se encuentran en vías de desarrollo.

Desde esta perspectiva, el objetivo de cuantificar el impacto en el PIB o en el índice de desarrollo humano, que se deriva de los problemas de sequía urbana en una ciudad sería, además de complicado, poco relevante a efectos prácticos. El tránsito de un país desde niveles de desarrollo medios o bajos hacia niveles altos, con independencia del parámetro con que se cuantifique dicho desarrollo, pasa indefectiblemente por resolver los problemas de abastecimiento urbano en sus principales ciudades, siendo ésta una acción necesaria pero no suficiente. Por lo tanto, no hay un costo aislado de la sequía urbana como tal, sino una importancia relativa de este factor frente a otros limitantes del crecimiento, con los que el problema del agua interactúa y se retroalimenta.

Desde este enfoque es necesario cuantificar, aunque sea de forma aproximada, el nivel de importancia relativa de los problemas de abastecimiento frente a otros problemas, para decidir sobre la prioridad y la cuantía de las inversiones adecuadas en esta materia, frente a otras inversiones básicas en transporte, sanidad o vivienda. El objetivo último es asignar los recursos disponibles, de forma que se fomente un crecimiento armonizado en los diferentes aspectos de la realidad que, de forma conjun-

ta, conducen al desarrollo, entre ellos el ciclo del agua urbano. No sería sensato, por ejemplo, plantear actuaciones en la red de abastecimiento de Tegucigalpa para reducir las pérdidas a los niveles de Estocolmo o Singapur, debido a la imposibilidad de alcanzar tal objetivo sin modificar de manera simultánea el contexto social, económico e institucional de Honduras; otras consideraciones sobre el alto costo de las actuaciones necesarias no hacen sino ocultar la verdadera naturaleza del problema. El enfoque incremental y basado en indicadores medibles será la base de los métodos propuestos para priorizar actuaciones de abastecimiento en los capítulos siguientes.



5

Causas, mecanismos e indicadores de riesgo —

- 5.1. El riesgo como amenaza y como oportunidad /156
- 5.2. Mecanismos de construcción de riesgo de inundación en ciudades de ALC /166
- 5.3. Filtros e indicadores de riesgo /186

5

A lo largo de los apartados previos de este documento se han presentado procedimientos estructurados de carácter cuantitativo para la determinación de los riesgos asociados a ciertos fenómenos naturales en entornos urbanos.

Dichos métodos de cálculo se basan en la hipótesis de que la evolución futura de los factores de amenaza y vulnerabilidad, los dos componentes del riesgo, se producen de forma fundamentalmente desacoplada.

Así, un cierto número de escenarios climáticos futuros, que gobiernan la amenaza, se combinan con varios escenarios de desarrollo urbano, habitualmente proyecciones de tendencias históricas (escenarios tendenciales) o diseños idealizados (escenarios inteligentes o Smart), y de las posibles combinaciones de ambos se obtienen las predicciones de daños futuros.

La primera parte de este manual (capítulos 1 a 4) se ha apoyado, principalmente, en el paradigma tecnocrático. En esta segunda parte, centrada en la definición de medidas para reducir los riesgos, se tratará de aportar una visión holística del riesgo, entendida como una realidad que se crea y se destruye a través de procesos históricos, a menudo complejos, con diversas escalas espaciales y temporales. —

5.1 El riesgo como amenaza y como oportunidad

Si bien la definición de medidas para la reducción del riesgo es el objetivo último de la presente metodología, es conveniente introducir previamente un marco conceptual que permita entender las relaciones básicas de los seres humanos con su entorno, y, en definitiva, la génesis de los riesgos. Esta discusión inicial tratará de presentar las medidas de reducción del riesgo no como recetas o remedios tecnológicos, sino como intervenciones que operan, de forma deliberada o no, en las múltiples dimensiones (física, económica, legal, institucional, cultural, etc.) de un sistema cuyas pautas de evolución se desea modificar.

El objetivo primario es dar respuesta a una pregunta que se puede enunciar de forma muy simple, incluso obvia a primera vista: ¿qué ha llevado a las personas que se encuentran bajo condiciones de riesgo a estar en esa situación? Se propone un modelo dual para responder a esta cuestión, basado en dos sub-modelos o planos superpuestos, que operan de forma complementaria y no excluyente. Ambos planos reflejan las dos vertientes del riesgo, como limitación y como oportunidad al desarrollo, que, en definitiva, configuran dos opciones de posicionamiento frente a la realidad. Por un lado, el modelo del equilibrio alterado presenta a las personas como entes pasivos que soportan o experimentan riesgos; bajo este prisma, el riesgo es una circunstancia sobrevenida, una realidad impuesta. Por otro lado, el modelo del sujeto racional se fundamenta, como su nombre apunta, en la capacidad de los seres humanos para 1) analizar información, y 2) decidir sobre su destino, apoyados en el resultado de dichos análisis. En este plano alternativo, las personas escogen ciertos riesgos porque resulta ser, desde su juicio subjetivo, la mejor opción relativa que tienen a su alcance para desarrollar sus vidas.

A pesar de que se tiende a dar más protagonismo al primer modelo, considerando el del sujeto racional como una excepción o anomalía, cada uno de estos dos modelos es adecuado para explicar ciertos procesos de generación de riesgos. Con la perspectiva dominante en la ingeniería y en las ciencias naturales, resulta poco relevante indagar en estas cuestiones, ya que el paradigma tecnocrático tiende a otorgar un papel secundario a la componente social, dentro del sistema que pre-

tende corregir. Sin embargo, en la medida en que se considere necesario equilibrar esta componente de la realidad en que se insertan las medidas de reducción de riesgos, el sujeto racional pasa a primer plano, y sus actos tienen dimensión ética y jurídica. Por ejemplo, en cierta zona residencial inundable, los técnicos pueden plantear que un encauzamiento es la solución más adecuada; sin embargo, el hecho de que esa zona haya sido ocupada por personas conscientes de esta realidad (descontando, en muchos casos, que el sector público acudiría en su ayuda) debe influir en el tipo de acciones necesarias, incluso poniendo en duda la prioridad de dicho encauzamiento (ver *Cuadro 10*).

Por lo general, dada la complejidad de la realidad en los entornos urbanos, ambos esquemas no son antagonistas y pueden complementarse a la hora de ofrecer explicaciones para la existencia de riesgos en cada caso concreto.

Modelo del equilibrio alterado

El modelo del equilibrio alterado se inspira en una concepción de la realidad basada en la teoría general de sistemas (Von Bertalanffy 1972). Según este modelo, los usos del territorio, que incluyen los entornos urbanos y periurbanos, evolucionan en el tiempo y siguen mecanismos de adaptación dinámica a las condiciones externas, especialmente el clima, el tamaño de la población, el nivel de riqueza económica y el contexto tecnológico. En la medida en que los cambios de estas variables se produzcan de forma lenta y progresiva (decenas a centenas de años), el proceso de adaptación también tendrá estas propiedades, y será apenas perceptible. Estos periodos de evolución lenta y sin cambios de fase se pueden asimilar a un estado de cuasiequilibrio, con oportunidades para explorar nuevas formas de adaptación a los procesos subyacentes, sin apenas eventos traumáticos (o, al menos, con estos eventos incorporados a los modos de vida tradicionales). No obstante, dicho equilibrio aparente puede verse alterado por dos tipos de efectos, que se denominarán efecto impacto y efecto umbral:

A. El efecto impacto está asociado a un cambio brusco en algunas de las variables externas implicadas. Es el caso de una rápida transformación en las condiciones climáticas, o de la aparición de nuevas tecnologías o bienes de consumo, capaces de desplazar a los usos del suelo o los modos de vida tradicionales. Esto genera un impacto que desequilibra de forma súbita el sistema, dejando poco margen de maniobra y exponiendo a la población a ciertos riesgos, de los que no era previamente consciente y para los que no está preparada.

B. El efecto umbral se produce cuando una variable interna del sistema, tras una evolución que puede ser lenta o rápida, alcanza un valor crítico, a partir del cual no se puede mantener la pauta de evolución general que se venía experimentando, sin que se modifiquen algunos rasgos cualitativos del sistema. Este es el caso cuando una variable de tipo almacén (stock), como puede ser la población o el área deforestada de una cuenca, se vacía completamente o alcanza su nivel de saturación. También pueden existir procesos internos de un sistema que generan cambios de fase, sin que estén ligados a un umbral concreto de uno de los parámetros.

Al trasladar este modelo genérico a los riesgos de origen natural en las ciudades de ALCLAC, resulta sencillo identificar ejemplos en los que se ha producido una alteración del equilibrio por variaciones bruscas (efecto impacto) en las variables exógenas que afectan a la evolución urbana:

- Impacto demográfico debido a movimientos migratorios derivados de procesos activos, como conflictos bélicos o la emigración forzada desde el mundo rural, a menudo ligada a la globalización y tecnificación de los mercados agroalimentarios.
- Impacto en el aumento de la escorrentía (y, por tanto, pérdida de la capacidad de almacenamiento del suelo) derivado de procesos de deforestación o por la implantación de monocultivos, acaecidos en las últimas décadas.

- Impacto en la pérdida de calidad de agua, y, por tanto en la disponibilidad para el consumo, procedente del uso generalizado de detergentes, productos químicos y residuos sólidos no biodegradables.

- Impacto del aumento de la capacidad de regulación hidráulica (embalses) y de trasvase entre cuencas, con fines de abastecimiento o producción de energía. Estas infraestructuras, que a priori son beneficiosas para el desarrollo urbano, pueden llevar asociados, a largo plazo, efectos negativos.

Igualmente, el efecto umbral, ligado al concepto de capacidad de carga, se puede identificar como causa raíz de muchos de los problemas de riesgos detectados en los estudios de la ICES. La capacidad de carga de las ciudades, y sus límites asociados, pueden definirse a partir de diversos parámetros, entre los que pueden señalarse los siguientes (para riesgos de origen hidrometeorológico):

- Porcentaje de superficie alterada en las cuencas vertientes, correspondientes a cada ciudad. El concepto de alteración incluye tanto la zona deforestada para uso agrícola, como la zona edificada.
- Porcentaje de longitud de cauces alterados. En este caso la alteración se refiere a tramos con encauzamiento estricto (que reduce la anchura natural del cauce) o soterrados.
- Porcentaje de ocupación del área de llanuras inundables de los cauces, tanto en la zona urbana como en las cuencas tributarias.

Los valores específicos de estos parámetros que ejercen como umbrales capaces de desencadenar cambios de fase en los sistemas implicados dependen de cada contexto específico y no pueden, en general, establecerse a priori. No obstante, se profundizará algo más en este tema al abordar la clasificación de ciudades en el apartado 5.2.

Modelo del sujeto racional

Según la economía neoclásica, los seres humanos son entes racionales que toman decisiones para maximizar su bienestar. Bajo esta premisa, las personas asumirían riesgos para que la suerte o su perspicacia (a falta de otras ventajas competitivas) les permita obtener una recompensa a la que no tendrían acceso de otra manera. Dentro este marco, la asunción de riesgos geoclimáticos es la forma natural de emprendimiento de aquellos que no poseen otro capital para invertir que sus propias vidas, y los pocos enseres que han ido acumulando. Mientras los más ricos invierten en activos financieros con diversas categorías crediticias, conscientes a priori de su nivel de riesgo y capaces de cuantificarlo, los más desfavorecidos hacen este mismo cálculo exponiendo literalmente su existencia. Este es el caso de una familia que se instala en una zona que se inunda, con la idea de permanecer allí durante un periodo transitorio, pagando una renta baja o nula, hasta hipotéticamente ahorrar para poder permitirse un sitio más seguro. Se trata, en definitiva, de una apuesta, en la que entran en juego no fichas de casino, sino las vidas y las necesidades básicas de los participantes. El modelo del sujeto racional explica perfectamente el nexo entre la pobreza y los riesgos de todo tipo, como ya han destacado numerosos autores (Krantz 2001; ADB 2012; Renos Vakis y Jamele Rigolini 2015; Hallegatte et al. 2014; Winsemius et al. 2015).

Pese a estar respaldada por una larga tradición de pensamiento, el modelo del sujeto racional sólo explica parcialmente las causas últimas de los riesgos en ciudades, y, en particular, de los riesgos observados en las ciudades emergentes de ALC. Existen varios factores que pueden poner a prueba el modelo de la economía neoclásica y que complican la definición de un marco conceptual genérico y universal para el problema; de ahí, el enfoque alternativo del equilibrio alterado:

- En materia de riesgos, como en muchos otros temas, las personas no siempre disponen de los datos necesarios para tomar decisiones informadas. En el ejemplo anterior, de la familia que se establece en una zona que se inunda de media cada 50 años, este dato no suele ser conocido y, si lo es, no es accesible para las personas que más uso pueden hacer de él. A menudo, también el analfabetismo y las carencias culturales intervienen, razón por la que se suelen incluir como factores de vulnerabilidad. En los mercados privados de suelo y vivienda, se añade el factor de la

asimetría intrínseca de información entre compradores y vendedores. En estas condiciones de escasa información, es poco realista esperar que los sujetos racionales actúen como tales.

- Las personas, pobres o ricas, rara vez tienen un comportamiento racional cuando toman decisiones, especialmente en lo que se refiere a cuestiones importantes y, en particular, en materia de riesgos. Los científicos han encontrado al menos tres categorías de pensamiento que llevan asociadas conductas sesgadas (Kahneman 2003): pensamiento automático, pensamiento social y pensamiento basado en modelos mentales. El pensamiento automático consiste en recurrir a intuiciones y asociaciones rápidas, en lugar de reflexionar y razonar en un marco amplio; el pensamiento social imita la conducta de otras personas, por afinidad emocional o simple gregarismo, sin evaluarla a fondo; finalmente, los modelos mentales son esquemas rígidos que operan de manera automática, a menudo con raíces socioculturales profundas (por ejemplo, la población indígena o femenina de una determinada zona puede experimentar una barrera de raza o género, que modifica su conducta, habitualmente en sentido negativo). Cada vez se están teniendo más en cuenta estos aspectos psicosociales a la hora de diseñar e implementar políticas, entre ellas las de reducción de riesgos (ver, por ejemplo, Banco Mundial 2015).
- Aun bajo la premisa de plena racionalidad y disponiendo de toda la información, los eventos extremos de origen hidroclimático tienen un cierto grado de incertidumbre epistemológica, que no se puede calcular (ver apartado 3.8). En determinados casos, el azar o los denominados cisnes negros (Taleb 2011) seguirán siendo las causas más plausibles de ciertas catástrofes.

El modelo dual esbozado guarda relación y está inspirado en otros modelos clásicos de producción de riesgos, como son el modelo de acción y alivio (*Pressure and Release Model-PAR*) y el modelo de acceso (*Access Model*) (Blaikie et al. 2014). También tiene elementos en común con el marco conceptual de la subsistencia sostenible (Sustainable Livelihood Framework) como método de reducción de la pobreza, tanto en áreas rurales como urbanas; este método analiza la capacidad de las personas para ganarse la vida en un sentido amplio, que abarca lo económico, lo ecológico y lo social (Krantz 2001).

Como se puede observar, la respuesta general al problema de por qué las personas se exponen (modelo del sujeto racional) o están expuestas (modelo del equilibrio alterado) al riesgo, abre un debate profundo y complejo, con pocos resultados prácticos. Afortunadamente, el problema se vuelve más tratable a medida que se concentran los esfuerzos en un tipo de fenómeno concreto, dentro de

un contexto geográfico e histórico específico. Para tender un puente conceptual entre el modelo dual descrito y la selección de medidas específicas de reducción de riesgos, es útil definir un marco más analítico de trabajo, basado en los mecanismos de construcción de riesgo.



³ Desde esta perspectiva, la historia de *El mercader de Venecia* (Shakespeare, 1600), cuando el comerciante Antonio acepta un préstamo del usurero Shylock a condición de que, si no lo devuelve en la fecha estipulada, deberá pagar con una libra de carne de su propio cuerpo, se convierte en una parábola de la relación riesgo-pobreza a escala global.

Cuadro 10 —

Evolución histórica de la cuenca baja del río Juan Díaz en la ciudad de Panamá, Panamá

Problemática

La cuenca del río Juan Díaz constituye en la actualidad una de las zonas de la ciudad de Panamá que sufren mayores problemas de inundación. El desarrollo urbano de la ciudad ha dado lugar en esta cuenca a considerables cambios en los usos del suelo y a la ocupación de las llanuras de inundación con rellenos, urbanizaciones y vías de comunicación.

Todo ello ha originado un aumento en la escorrentía y una reducción drástica de la capacidad hidráulica y de laminación del río. Estos hechos, unidos a la insuficiencia de redes de drenaje en las zonas urbanas y a la influencia de las mareas en las áreas más bajas, tienen como consecuencia que los sucesos de inundación sean cada vez más frecuentes y graves.

Metodología

Para ver el efecto de este desarrollo urbano en el riesgo de inundación se ha llevado a cabo el análisis hidráulico de los niveles de crecida de cuatro situaciones coincidentes con otros tantos estadios de evolución urbana de la cuenca (Figura 34):

- Situación inicial (Situación 1) de un río mínimamente intervenido.
- Situación 2 que coincide con la entrada en funcionamiento del Corredor Sur.
- Situación 3 en que, a la anterior, se suman los rellenos de Los Pueblos.
- Situación 4, correspondiente a la situación actual, en la que a los anteriores se suma el relleno de Metro Park y la entrada en funcionamiento del canal existente.

Resultados

De los resultados del modelado hidráulico de estas situaciones (Figura 35) se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1. Los niveles de inundación han ido aumentando en la zona de estudio a medida que se han ido produciendo las distintas obras de desarrollo urbano.
2. En conjunto, entre la Situación 1 y la actualidad, el incremento de niveles en la zona de estudio alcanza los 31 cm para T=10 años, 32 cm para T=20 años, 56 cm para T=100 y 70 cm para T=500.
3. Si se comparan los niveles de la Situación 1 y 4, se comprueba además que la frecuencia de inundación también ha aumentado. Los niveles que en la Situación 1 se alcanzaban con inundaciones de periodos de retorno de 20 años, hoy se superan con las de T=10 años.

En la *Tabla 14* se resumen la secuencia de incrementos de niveles que se han producido en las diferentes actuaciones realizadas en la zona baja, respecto a la situación inicial considerada.

ESCENARIO	INCREMENTO DE NIVELES (cm)			
	T= 10 AÑOS	T= 20 AÑOS	T= 100 AÑOS	T= 500 AÑOS
CONSTRUCCIÓN CORREDOR SUR	+22	+30	+32	+37
RELLENO CC LOS PUEBLOS	+3	+4	+4	+2
RELLENO METRO PARK	+27	+27	+29	+30
TOTAL	+52	+61	+65	+69

Tabla 14 | Secuencia de incremento de niveles entre la situación 1 y 4.

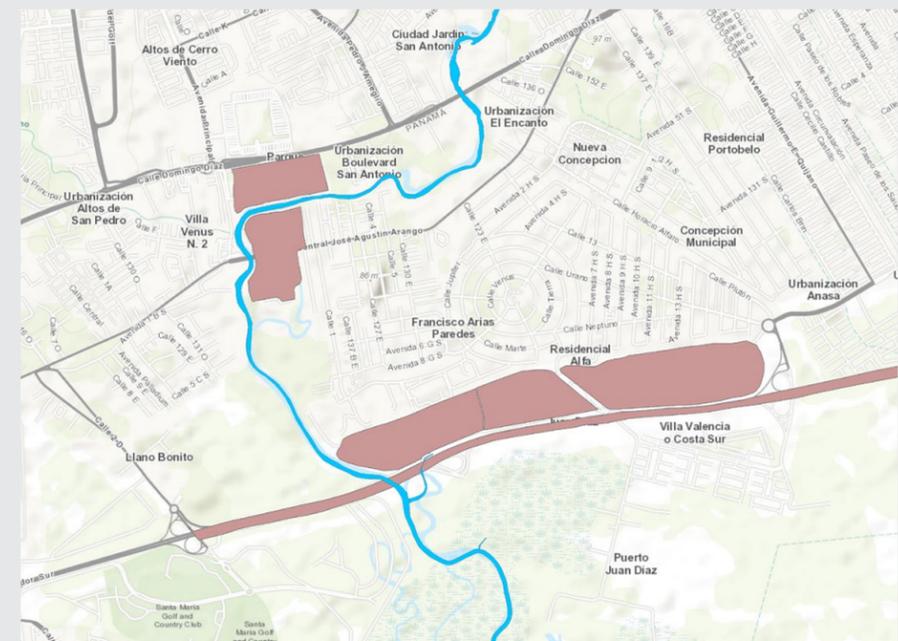
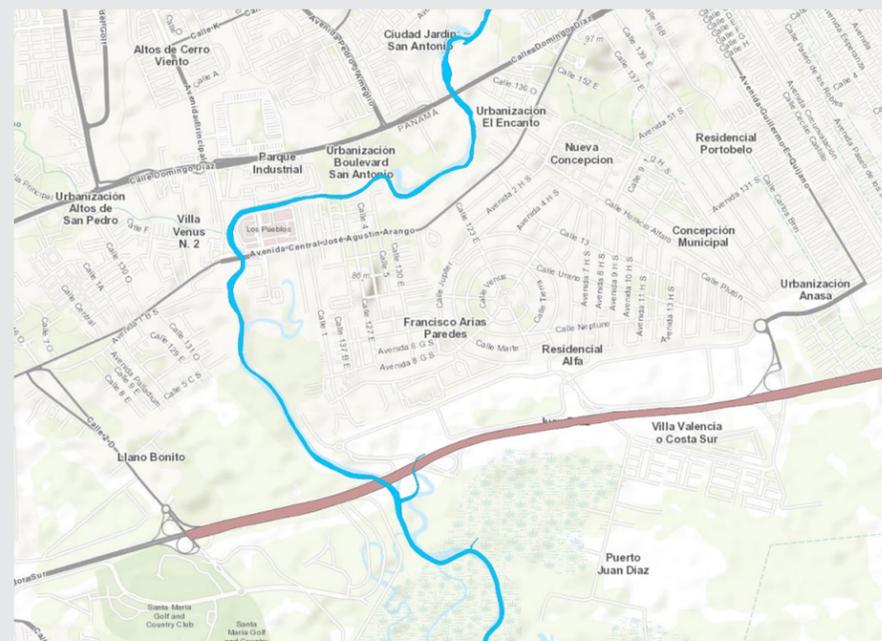
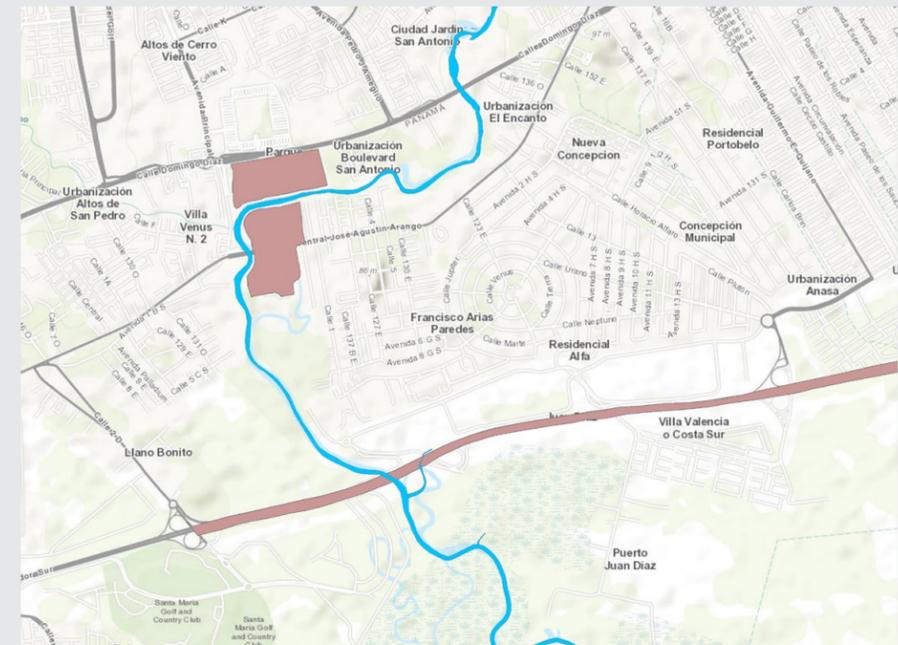
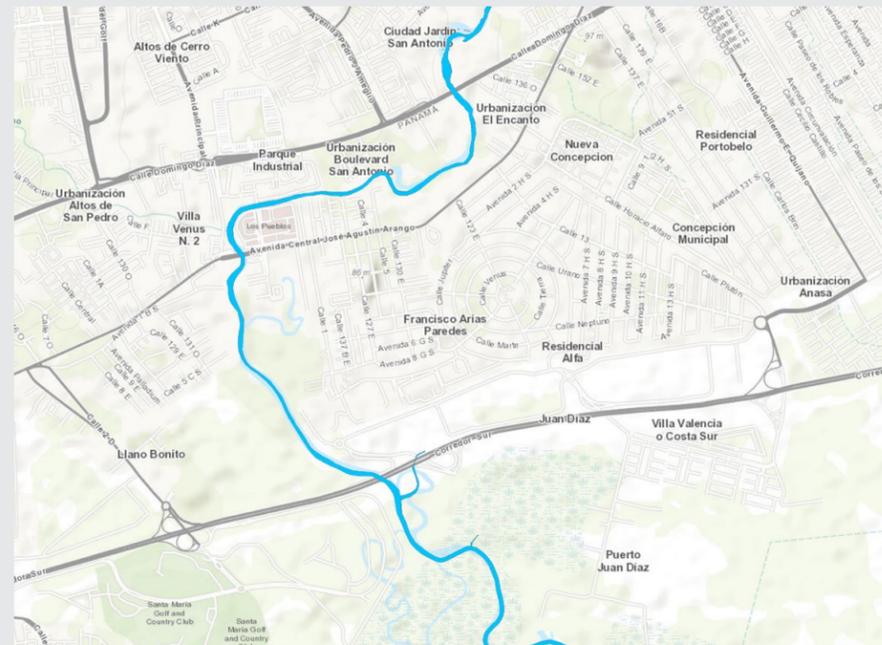


Figura 34 | Diferentes escenarios de cálculo (Situaciones 1-4).

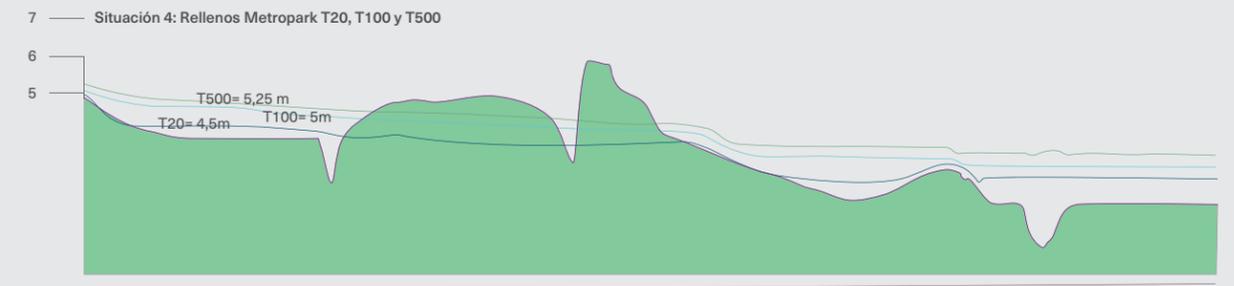
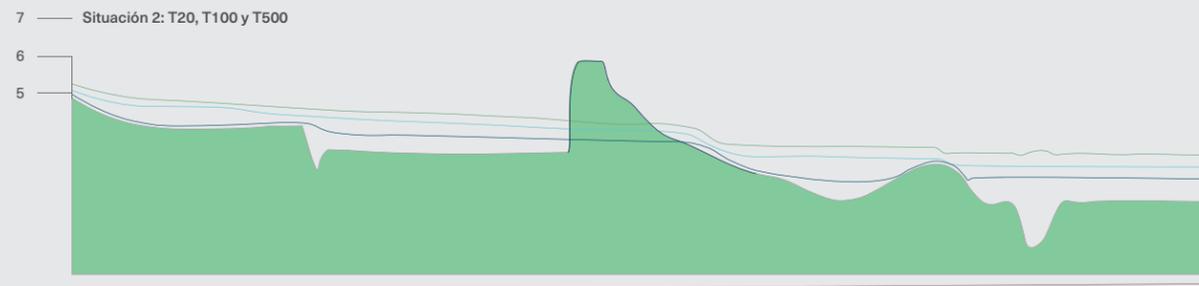
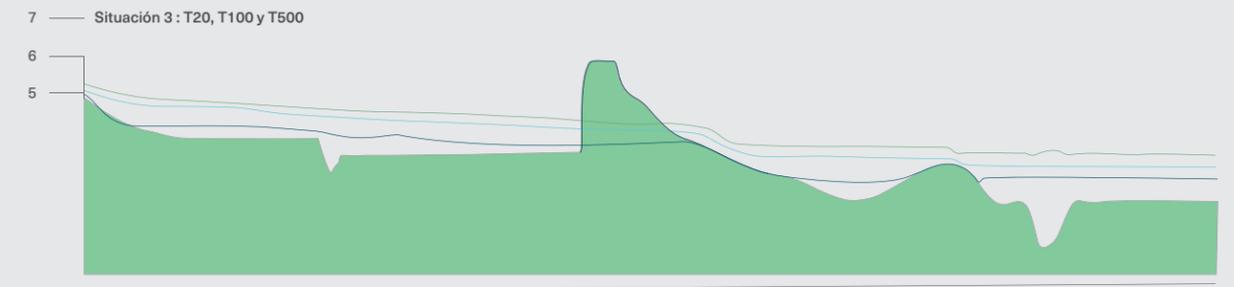
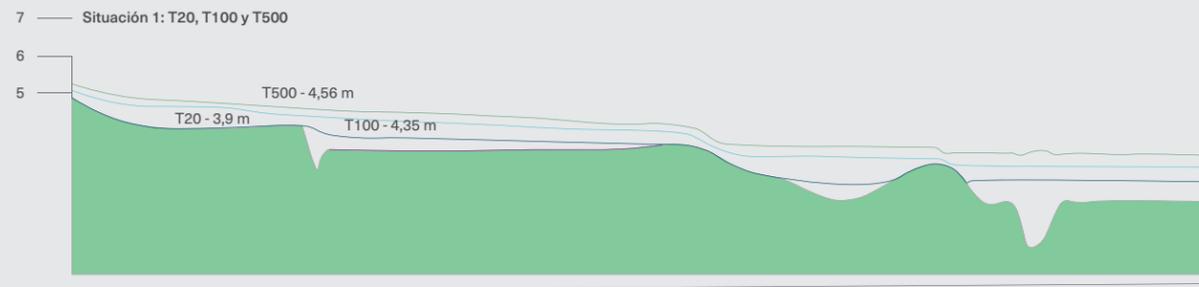


Figura 35 | Perfil longitudinal que muestra los niveles de inundación en las Situaciones 1-4.

5.2 Mecanismos de construcción de riesgo de inundación en ciudades de ALC

El modelo dual anterior permite abordar el problema de los riesgos hidroclimáticos desde el punto de vista ontológico, pero no permite acotarlos espacial y temporalmente, y por tanto establecer lo que se denominarán, en este contexto, Mecanismos de Construcción de Riesgo (MCR). En este apartado se identificarán y caracterizarán algunos de los MCR más relevantes para distintos tipos de ciudades, tratando de aportar información que sirva de puente para establecer las estrategias y medidas de reducción más idóneas en cada caso.

Los MCR se definen como cadenas causa-efecto concretas, que parten de causas exógenas a escala regional o global y las trasladan a la escala de ciudad, identificando los procesos físicos y socioeconómicos dominantes capaces de modificar las condiciones locales de riesgo. Los MCR pueden ser meros transmisores de una perturbación de escala espacial o temporal más amplia, a la esfera de los riesgos en un entorno local (MCR como mecanismo de reducción de escala), o bien incluir bucles de realimentación más complejos a escala local, como consecuencia de las reacciones que tienen lugar en respuesta al aumento del riesgo, bien percibido o ya materializado por un suceso catastrófico.

Para caracterizar los MCR se requiere un marco conceptual analítico, donde encajen de forma natural las principales cadenas causa-efecto que conllevan producción de riesgo en cualquier ciudad. En la *Figura 36* se presenta un diagrama de flujo genérico que presenta y relaciona las componentes abstractas que intervienen en el riesgo, tal y como se introdujeron en el Capítulo 1, a modo de grafo similar a los empleados en teoría de sistemas. Desde este enfoque, los dos grandes componentes del riesgo (amenaza y vulnerabilidad), así como el propio riesgo, son variables de estado, potencialmente cuantificables, que se relacionan entre sí a través de ciertos procesos físicos y socioeconómicos, que son específicos de cada MCR. En este gráfico, los MCR se identifican más claramente con secuencias concretas y tipificadas de interacción entre factores de amenaza y vulnerabilidad, que deben particularizarse para cada ciudad y tipo de riesgo.

El esquema general de definición de MCR de la *Figura 36* está concebido para analizar e interpretar los riesgos a escala de ciudad, de ahí que diferencie con claridad las variables exógenas (tanto en la amenaza como en la vulnerabilidad) de los procesos locales, si bien esta diferenciación puede ser igualmente útil para investigar los MCR a escala de región o país. El hecho de identificar los factores de riesgo de escala superior como variables exógenas impuestas, que no tratan de explicarse dentro de cada MCR, permite concentrar la atención en cómo se trasladan esas condiciones de contorno globales a cada contexto urbano, obviando el análisis de la dinámica de los procesos a escala superior. También se ha omitido la influencia, y, por tanto, el posible efecto de retroalimentación, de los procesos urbanos en el marco regional o global, aunque es evidente que cualquier estrategia global de mitigación del cambio climático (en el sentido adoptado por el IPCC, de reducción de emisiones de GEI) se basa en la suma de las partes.

Desde el punto de vista de las inundaciones, como riesgo más característico de los abordados en este documento, las principales fuentes de amenaza hidroclimática a escala regional o global están dominadas por las consecuencias de un cambio más o menos brusco en el clima, inducido por el ser humano:

- Aumento del nivel del mar.
- Alteraciones en los regímenes de precipitación y temperatura.
- Modificaciones en la frecuencia y trayectorias típicas de los huracanes.
- Cambios en el tipo de vegetación y grado de cobertura vegetal en las cuencas.
- Cambios en los usos del suelo en las cuencas fluviales, con modificaciones del régimen hidrológico, también por efecto de las actividades humanas, sin que sea necesario el cambio climático.

Asimismo, los procesos socioeconómicos exógenos más importantes, que producen de manera directa o indi-



Figura 36 | Esquema general para definir mecanismos de construcción de riesgo.

recta un aumento de la vulnerabilidad y exposición en las ciudades, son los siguientes:

- Procesos de migración del medio rural a las ciudades, motivados por diversas causas: crisis agroalimentarias (de origen local o bien derivadas de procesos globales), conflictos armados, cambios en el modelo productivo, etc.
- Aumento de la tasa de pobreza y deterioro macroeconómico a escala nacional o regional, como consecuencia de las dinámicas competitivas a distintas escalas.
- Crisis políticas, institucionales y de gobernanza en el país al que pertenece la ciudad, o en países cercanos.
- Aumento de la desigualdad social, incluso en un contexto de crecimiento macroeconómico, por fallo o ausencia de políticas redistributivas.

Estos factores de amenaza y vulnerabilidad, que ejercen como condiciones de contorno, repercuten en cada ciudad de manera específica y diferenciada, en función de sus características fisiográficas, sus rasgos climáticos y socioculturales, así como de las decisiones concretas de personas e instituciones. Por lo tanto, cada ciudad, como sistema dinámico, responderá a las perturbaciones anteriores con modificaciones en la realidad física y también en la realidad cognitiva o noosfera: marco institucional y legal, planeamiento, modelos mentales, etc. Es precisamente en esta traducción de las condiciones globales a lo local y particular de una ciudad, donde los MCR deben mostrar su utilidad para identificar bucles de retroalimentación favorables para la reducción de riesgos. Dentro de este marco, las medidas de reducción de riesgo son respuestas racionales y programadas que tratan de inducir mecanismos de retroalimentación negativa (es decir, de reducción) en aquellos procesos que están generando riesgo.

Es importante recalcar que estas acciones planificadas, junto con las respuestas automáticas y espontáneas ante los riesgos, retroalimentan un sistema complejo, ya que la reducción de riesgos/daños debe pasar necesariamente por una modificación del entorno físico y socioeconómico, que a su vez pueden modificar los factores de vulnerabilidad y los vectores de propagación de las amenazas.

Para caracterizar los principales MCR que tienen lugar en las ciudades de ALC, a partir de la experiencia en la ICES, resulta útil adoptar una clasificación de ciudades basada en criterios fisiográficos y geomorfológicos. Esta clasificación permitirá, más allá de un análisis caso por caso, extrapolar la experiencia y resultados obtenidos en la ICES a otras ciudades de ALC.

Aunque cualquier clasificación de ciudades resulta necesariamente subjetiva y, en cierto modo, arbitraria, se considera que las ventajas prácticas de establecer estas categorías superan a sus deficiencias y limitaciones. Para los fines de este documento se han identificado cuatro grandes tipos de ciudades, a efectos de riesgos de inundación y erosión en ALC:

1. Ciudad costera de baja pendiente.
2. Ciudad costera con pendientes moderadas o altas.
3. Ciudad interior en cabecera de cuenca.
4. Ciudad interior de tramo medio de cuenca.

La razón por la que el único criterio de clasificación es fisiográfico, y no se introducen otros criterios socioeconómicos y culturales, es meramente estadística: la muestra de ciudades disponible no cubre un rango suficientemente amplio de niveles socioeconómicos y de desarrollo, como para introducir otro tipo de criterios. Finalmente, cabe señalar que, cuando se plantea esta clasificación desde el punto de vista de riesgos hidroclimáticos, es inevitable generalizar y, por lo tanto, simplificar la realidad fisiográfica: la mayor parte de las ciudades incluidas en la ICES, salvo quizás las de menor tamaño, presentan varios sectores o núcleos con características diferenciadas. En ese caso, la clasificación propuesta debería aplicarse a cada uno de ellos, no a la ciudad en su conjunto, y aun así siempre existirán barrios que ejerzan como excepciones a la regla.

Se ha comprobado que la mayor parte de las ciudades estudiadas son asimilables a alguna de las categorías anteriores, lo cual sugiere que las ciudades que no encajan en dicha clasificación son, en términos generales, menos proclives a presentar riesgos de origen hidroclimático. Entre las categorías ausentes podrían citarse, sin ser exhaustivos, las ciudades situadas sobre macizos rocosos (costeros o interiores) o las ubicadas en cuencas endorreicas, con predominio del flujo subterráneo.

Se ha elaborado una ficha descriptiva para cada una de las cuatro categorías de ciudad o núcleo urbano, con información relevante para cada tipo, estructurada en los siguientes apartados:

Tipo de ciudad/núcleo: es la clasificación principal de la ciudad, en los cuatro tipos mencionados. Existe una ficha por cada categoría (cuatro en total).

Procesos físicos dominantes: aporta información sobre la importancia de los mecanismos hidrológicos dominantes, puntuados del uno al tres (de menor a mayor importancia); esto es relevante a la hora de plantear las estrategias generales de reducción de riesgos. Por simplicidad, se consideran únicamente tres mecanismos básicos:

1. Transporte. Se refiere a la conducción de agua en superficie y por gravedad, tanto a través de redes fluviales como de canalizaciones de drenaje urbano. Es un mecanismo rápido para evacuar la escorrentía, pero requiere pendiente topográfica y un punto adecuado de vertido.

2. Almacenamiento. Consiste en compensar la capacidad de transportar el agua con la capacidad de almacenarla en ciertas zonas destinadas para tal uso. Explorar este mecanismo equivale a permitir una inundación planificada.

3. Infiltración. Cuando el terreno tiene suficiente conductividad y no está saturado, el mecanismo de infiltración permite trasladar el agua superficial hacia el acuífero inferior, evitando la inundación en superficie. A menudo este mecanismo está ligado a un flujo lento (baja capacidad de transporte) y al mecanismo de almacenamiento.

Subtipos: es una clasificación en subtipos, sobre los cuatro tipos de ciudades consideradas. Se utiliza para particularizar ciertos rasgos en los apartados siguientes. No pretende ser exhaustiva y podría ampliarse con la incorporación de nuevos casos de estudio.

Caracterización general: es la descripción detallada de los rasgos específicos de cada tipo de ciudad, y que permiten diferenciarla del resto.

Ejemplos CES: se enumeran, con el subtipo asociado, las ciudades de la ICES representativas de cada tipo de ciudad.

MCR dominantes: de acuerdo con el marco conceptual presentado anteriormente, se describen algunos de los mecanismos principales y característicos de cons-

trucción del riesgo en cada tipo de ciudad. La lista de mecanismos presentada no trata de ser exhaustiva, pero sí representativa.

Índices de riesgo potencial: a partir de los MCR principales en cada tipo de ciudad, se pueden definir sistemas de indicadores de riesgo potencial basados, por lo general, en el grado de alteración de la componente del medio físico que alberga o soporta los procesos dominantes. Estos indicadores permiten tener una aproximación de la gravedad de los problemas en una ciudad, sin mediación de cálculos. Los índices de riesgo potencial ejercen como una aproximación inicial al riesgo, y dan una idea del buen o mal condicionamiento de una ciudad o núcleo urbano para reducirlo. Están muy ligados al concepto de capacidad de carga y efecto umbral, tal y como se describió en el apartado anterior, dentro del modelo de equilibrio alterado.

Recomendaciones generales de intervención: se emiten para diseñar medidas de reducción del riesgo en cada tipo de ciudad, y, en ocasiones, para cada subtipo.

Lecciones aprendidas en ciudades emergentes y sostenibles: se recogen otros consejos y advertencias derivadas de la experiencia de la ICES, en relación a aspectos críticos de diseño o errores comunes que se han identificado.

Esta clasificación incluye varios criterios de discriminación subjetivos, lo que puede implicar que, en algunos casos, una cierta ciudad se encuentre a medio camino entre dos de las categorías propuestas. Tal circunstancia no invalida la información presentada, sino que simplemente invita a combinar las recomendaciones y criterios que resulten más pertinentes de cada tipología posible. En las ciudades costeras, cuando se habla de pendiente baja se hace referencia a unas condiciones geomorfológicas del territorio que, en general, se corresponde con pendientes inferiores a 1:200 V:H (0.5%) o, de forma más estricta, 1:500 V:H (0.2%). En cuanto a las ciudades interiores, las fronteras entre cuenca alta y cuenca media o baja, pese a ser terminología comúnmente aceptada, son difusas, sin que ello reste validez a lo expuesto. También se hace referencia a ciudades con un río principal, frente a otras por las que discurre una multiplicidad de cauces más pequeños sin relación jerárquica clara. Se ha comprobado que esta separación es generalmente válida a efectos prácticos, sin reivindicar otros méritos.

Tipo de Ciudad/Núcleo

Ciudad Costera de Baja Pendiente (CBP)

PROCESOS FÍSICOS DOMINANTES:



Ciudad de Belice (Fuente: Google Earth)

Subtipo

- Ciudad en zona de delta con un río principal (CBP-R).
- Ciudad en terreno bajo sin río (CBP-SR).

Caracterización general

En las ciudades CBP el terreno natural se sitúa muy cerca del nivel del mar, y por lo general presenta pendientes inferiores al 0,2%. Desde el punto de vista geológico, suelen tratarse de depósitos aluviales recientes, bien conformados directamente por la acción de un río y sus aportes sólidos (deltas), o bien indirectamente por acumulación de sedimentos costeros transportados desde una fuente remota (barras, puntales, etc.). Se trata de espacios naturales con fuerte interacción tierra-mar, sometidos a una combinación de procesos físicos que inducen geometrías variables en el territorio. Las fuentes de amenaza de inundación en estos entornos son, a priori, tres: el nivel del mar, el nivel del río (en el subtipo CBP-R) y la lluvia local. Los tres procesos no son, por lo general, estadísticamente independientes y presentan cierta correlación, por lo que formalmente el riesgo de

bería analizarse mediante técnicas de análisis multivariado, con distribuciones conjuntas no Gaussianas. En ciertas ciudades, o para ciertos sectores urbanos, se pueden adoptar hipótesis simplificadoras.

Los tipos de asentamientos tradicionales propios de estos entornos son dispersos, móviles (grupos nómadas y trashumantes) o bien fijos basados en el uso de tipologías edificatorias elevadas (palafitos), sistemas de canales con rellenos, y agricultura basada en camellones. Los daños por inundación en este tipo de ciudades suelen estar asociados a los niveles de agua, ya que las velocidades son reducidas, salvo en puntos concretos. Debido a esto, los daños económicos e indirectos (incluidos los de salud pública y segregación social en las zonas más afectadas) dominan sobre los daños humanos directos.

Ejemplos de la ICES

- Campeche (México). Subtipo: CBP-SR.
- Cumaná (Venezuela). Subtipo: CBP-R.
- Ciudad de Belice City (Belice). Subtipo: CBP-R.

MCR dominantes

MCR-1: Tanto el aumento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático, como las alteraciones en el régimen de niveles y precipitaciones, incrementan la frecuencia y magnitud de las inundaciones en estas ciudades. A la entrada directa del agua de mar, se le añaden los problemas de desagüe de los drenes y cauces, que suelen desbordarse. Esto produce deterioro y segregación de las zonas urbanas que no se han edificado sobre una banqueta de relleno, a menudo población con nivel de riqueza medio-bajo o asentamientos informales. Por

los mismos motivos, las zonas más bajas de la zona litoral tienen de despoblarse o a ser ocupadas por asentamientos informales.

MCR-2: Cuando ciudades de este tipo quedan expuestas a un incremento rápido de la población, debido a procesos regionales, su capacidad de carga es relativamente baja, en términos de tasa de edificación u otros indicadores similares (ver los índices de riesgo potencial), por lo que tienden a colapsar. Esto es así no tanto

por la impermeabilización del suelo, como por la reducción de la capacidad de almacenamiento de agua. El aumento de la población en general obliga a densificar las redes de transporte y aumentar los espacios de aparcamiento, lo que suele conllevar reducción o soterramiento de canales, espacios verdes, marismas, manglares y cualquier espacio capaz de almacenar agua. El progresivo relleno de nuevas áreas edificables empeora las condiciones de otras zonas ya consolidadas, reduciendo su valor y promoviendo aún más rellenos.

Índices de riesgo potencial

- Coeficiente de área edificada (área edificada/área total).
- Coeficiente de áreas verdes y de espejo de agua (área verde y azul/área total).
- Índice de capacidad de retención (volumen libre total/volumen asociado a la escorrentía producida por una racha de lluvia de 1 hora de duración con periodo de retorno de 10 años o similar.).

Recomendaciones generales de intervención

Las ciudades CBP son elementos que, por condicionantes geográficos, tienen un déficit natural de capacidad para evacuar de forma rápida el agua procedente de la lluvia y del desbordamiento de su red interna de drenaje (ríos, arroyos y drenes artificiales). El único mecanismo para reducir la inundación transitoria es el almacenamiento, es decir, inundar territorio de manera temporal, de forma que el excedente de volumen, repartido adecuadamente, genere niveles tolerables; los mecanismos alternativos de infiltración y aducción son generalmente insuficientes. Las estrategias básicas de mitigación de riesgos en estos entornos son dos:

1. Soluciones basadas en imitar y potenciar el mecanismo natural de acumulación selectiva de agua. Para ello se pueden utilizar tanto zonas naturales dentro o alrededor de la ciudad (humedales, lagunas) como espacios habilitados para tal fin (parques, rotondas, áreas de aparcamiento). Esto suele requerir reasignar usos dentro de la trama urbana, así como recuperar,

MCR-3: En ciertas ciudades de este tipo, la extracción de agua, gas o petróleo del subsuelo (en ocasiones desde puntos de extracción alejados), produce subsidencia del terreno, con un efecto equivalente a un aumento permanente del nivel del mar. En otros casos, la creación de infraestructuras lineales de transporte que requieren grandes rellenos y soportan cargas de tráfico, como por ejemplo una autopista, produce consolidación del suelo circundante, generando riesgos de inundación en zonas limítrofes.

proteger y conectar los espacios naturales que mejor sirven para este fin.

2. Soluciones tecnológicas para incrementar la capacidad de evacuación de agua. Cuando la capacidad de generar almacenamiento en el espacio urbano está limitada, no hay otra opción que potenciar por medios artificiales (tecnológicos) los mecanismos naturales, y en particular el almacenamiento y la aducción. Esto conlleva la instalación de balsas o depósitos de laminación equipados con instalaciones de bombeo. En el caso extremo de aplicar este principio a un terreno situado permanentemente por debajo del nivel del mar, se llega a una solución tipo pólder, aunque en general ésta es una situación excepcional y transitoria.

Lecciones aprendidas en ciudades emergentes y sostenibles

El principal rasgo de este tipo de ciudades es su alto grado de vulnerabilidad ante una subida del nivel del mar. Asimismo, las ciudades CBP suelen mostrar cierta confusión en cuanto al modelo de drenaje urbano más adecuado. A menudo, las ciudades de este tipo tienden a desarrollar sistemas de drenaje urbano convencional que imitan al resto de ciudades, basados en redes de tuberías que fluyen por gravedad. Si bien este esquema puede ser válido en algunos sectores con pendiente suficiente, no responde al modo natural de funcionamiento de este tipo de territorio y suele colapsar en episodios de cierta magnitud, o a medida que se incrementa la población.

Como corolario de lo anterior, algunas ciudades presentan redes de canales históricos, cuya funcionalidad básica desde el punto de vista de inundaciones (además de otras funciones como la navegación o la eliminación de residuos), no es la evacuación de agua sino el almacenamiento y la conexión entre zonas de laminación. Sin embargo, en tiempos recientes, se han asimilado estos elementos a colectores y drenes de una red de drenaje urbano convencional. Como consecuencia, se ha procedido a reducir su sección, a menudo recubriéndolos de hormigón, soterrando tramos y entubándolos, para generar espacio urbano útil. Con estas medidas se ha reducido su capacidad de almacenamiento y su interac-

ción directa con las zonas limítrofes.

Uno de los problemas que resultan de aplicar sistemas de drenaje convencional en ciudades CBP es que, incluso aunque exista una cierta pendiente hidráulica en teoría apta para mover el agua, las bajas velocidades de flujo inducen decantación de sedimentos y residuos, que acaban obstruyendo los conductos. La limpieza, especialmente en los tramos soterrados, es costosa y difícil, por lo que tiene a no realizarse correctamente. Las ciudades CBP, por su propia naturaleza, están mal condicionadas para la gestión de sedimentos naturales y residuos sólidos urbanos en general, pero el hecho de orientarse hacia un modelo de drenaje basado en elementos estrechos o inaccesibles, es un error añadido que dificulta aún más las tareas de mantenimiento.

Las zonas verdes húmedas (manglares, marismas, humedales, etc.) con capacidad de almacenar agua tienen un papel fundamental en este tipo de ciudades, por lo que deben recuperarse y preservarse, por encima de intereses particulares. Se debe fomentar la creación de parques y espacios públicos extensos de carácter inundable para eventos extremos y aprovechar, si es posible, áreas bajas y cóncavas donde en algún momento haya existido esta función natural del territorio.



Tipo de Ciudad/Núcleo

Ciudad Costera con Pendiente Moderada o Alta (CPMA)

PROCESOS FÍSICOS DOMINANTES:



Trujillo (Perú). Fuente: Google Earth

Subtipos

- Ciudad de alta pendiente con un cauce principal dominante (CPMA-R).
- Ciudad de alta pendiente con varios arroyos costeros (CPMA-SR).

Caracterización general

Se trata de ciudades costeras en terreno firme, con pendiente moderada o alta en dirección al mar. En esta configuración, el aumento (transitorio o permanente) del nivel del mar afecta únicamente a las calles cercanas a la costa, pero no a las que se sitúan más hacia el interior, a cotas superiores. Este tipo de ciudades permite asentamientos urbanos consolidados de gran tamaño, ya que el agua de escorrentía, tanto en los cauces como la procedente de las lluvias locales, fluye de forma natural hacia el mar. El mecanismo hidrológico dominante suele ser la escorrentía superficial, si bien suele coexistir con cierto grado de infiltración y almacenamiento. Los factores de amenaza dominantes son las lluvias locales y los caudales en los ríos y arroyos, que en las ciudades del subtipo

CPMA-SR pueden analizarse como procesos coincidentes o, al menos, altamente correlacionados. En el caso CPMA-R con un río de gran tamaño, conviene diferenciar las crecidas fluviales de los eventos de inundación por lluvias localizadas. El sector costero en estas ciudades puede, por lo general, analizarse desde el punto de vista de riesgos de origen marino (rebase de oleaje, erosión costera), de forma independiente del resto de la ciudad. En este tipo de ciudades, y en particular las que presentan cauces de cierta entidad (CPMA-R), las aguas desbordadas pueden tener velocidades significativas, lo que suele incrementar las pérdidas económicas y, sobre todo, los daños humanos.

Ejemplos de la ICES

- Port of Spain (Trinidad y Tobago). Subtipo: CPMA-SR.
- Trujillo (Perú). Subtipo: CPMA-SR.
- Bridgetown (Barbados). Subtipo: CPMA-R.
- Ciudad de Panamá (Panamá). Subtipo: CPMA-SR.
- Santa Marta (Colombia). Subtipo: CPMA-R.

MCR dominantes

MCR-1: El crecimiento de la población genera un incremento directo en la superficie de la mancha urbana. Cuando una ciudad tiene limitada su área de expansión en la dirección de la costa, hecho que puede ocurrir debido a la presencia de accidentes geográficos como montañas o ríos importantes, no hay otra opción que el crecimiento hacia el interior, en un eje perpendicular al litoral. La impermeabilización del suelo induce un au-

mento de los caudales pico y acumulación de escorrentía en los sectores más bajos que, cuando no se compensa con redes de colectores, lleva a generar inundaciones frecuentes y deterioro del espacio urbano en estos sectores, a menudo barrios tradicionales en el frente de costa. Esto produce pérdida de valor de estas zonas, y aumenta la preferencia por los terrenos periurbanos, en un bucle de retroalimentación que debilita las

opciones de un modelo de ciudad denso y con un centro bien definido. Asimismo, este mecanismo de construcción de riesgo puede impedir la consolidación de un frente costero de calidad que saque partido (tanto para usos públicos como privados) de la presencia del mar, tanto por las inundaciones frecuentes como por la mala calidad de las aguas.

MCR-2: Cuando la migración de población a una ciudad se debe a procesos agudos como conflictos bélicos o crisis de alimentos, una proporción importante de los nuevos habitantes suele ser personas sin recursos económicos para afrontar el pago de una vivienda que, sin embargo, optan por estar cerca de los centros de activi-

Índices de riesgo potencial

- Capacidad relativa de la red de drenaje urbano: caudal de diseño de la red de drenaje relativo al caudal generado por lluvia asociada a cierto periodo de retorno (por ejemplo 10 años).
- Capacidad de almacenamiento y retención de agua: área de zonas verdes y elementos de retención con respecto a la superficie total urbana.
- Grado de ocupación de las llanuras inundables de los cauces naturales dentro del entorno urbano.

Recomendaciones generales de intervención

Los problemas de inundación en este tipo de ciudades suelen resolverse de forma satisfactoria con una combinación de los siguientes tipos de actuaciones:

1. Implementación de redes de drenaje urbano convencionales, a menudo integradas en un sistema de saneamiento unitario, que también sirva para la evacuación de las aguas residuales.
2. Desvío o retención de arroyos y cauces de agua menores, en sus tramos altos antes de penetrar en la zona urbana. Pueden crearse espacios de laminación, o bien desviar los cauces hacia un río principal o a zonas con menor vulnerabilidad.

dad, para poder desarrollar su medio de vida, generalmente dentro de la economía informal. En las ciudades CPMA, estos intersticios del espacio urbano ya consolidado que se encuentran disponibles son, a menudo, las riberas inundables de ríos y las laderas inestables en sectores cercanos a los centros neurálgicos. La ocupación de estos espacios por viviendas informales, a menudo facilitada por un planeamiento urbano restrictivo (alta protección de zonas con una ubicación estratégica), genera riesgos en ellas, y a menudo los exporta a zonas más alejadas. Una vez se han producido asentamientos informales, se crean un sistema paralegal de organización y gestión de la propiedad inmobiliaria, que resultan muy difícil de revertir.

3. Rehabilitación y mejora de la capacidad hidráulica de los corredores fluviales en tramos urbanos. Estas actuaciones suelen combinar la mejora urbanística con el ensanchamiento del espacio fluvial en general y la resolución de tramos críticos (puentes, estrechamientos, meandros, etc.)
4. Actuaciones de estabilización del frente costero. Suelen incluir la consolidación de un paseo marítimo o malecón, que en general va acompañado de un colector-interceptor costero que recoja y evacúe las aguas de escorrentía pluvial.

Lecciones aprendidas

Las ciudades CAP están relativamente bien preparadas para mejorar sus condiciones de inundación, si bien se requieren inversiones de capital significativas, que además conllevan gastos de mantenimiento y explotación no despreciables. Estas circunstancias hacen necesarias empresas de gestión del ciclo urbano del agua con capacidades y recursos financieros suficientes, lo cual no es posible sin implantar un canon finalista (para saneamiento y drenaje) que debe ser recaudado de forma eficiente, atendiendo a la realidad social y económica de cada ciudad. En definitiva, la solución a los problemas en este tipo de ciudades, tanto de inundaciones como de saneamiento, pasa por resolver aspectos de gobernanza y de fiscalidad, que a menudo resultan mu-

cho más complejos que los de carácter técnico.

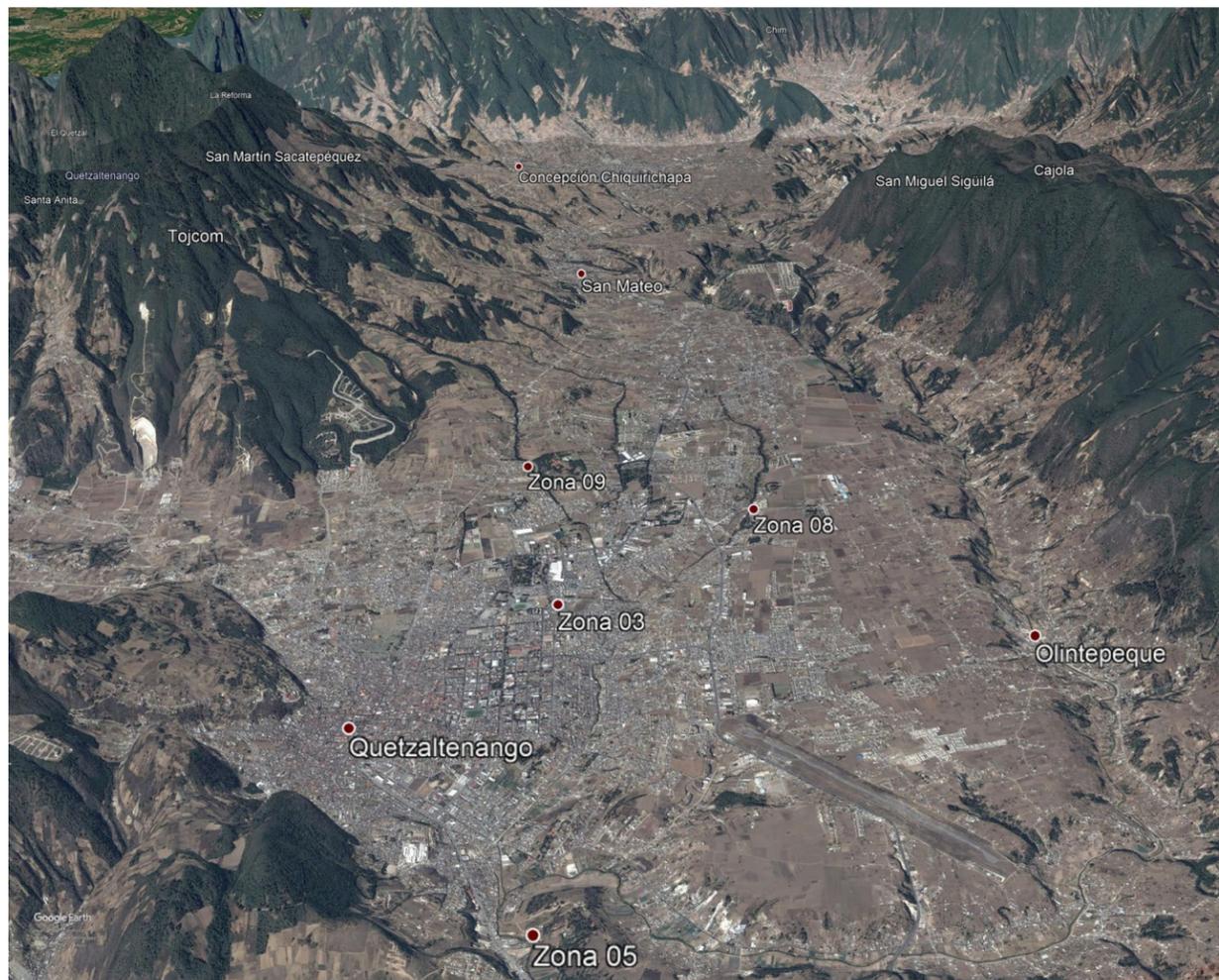
Por otra parte, en ciudades con gran afluencia de emigrantes con pocos recursos, el planeamiento urbano debe tener en cuenta la oferta de suelo no edificable que queda disponible para el mercado inmobiliario informal, y establecer criterios claros y realistas sobre cómo gestionar este problema, antes de que su escala lo convierta en inabordable.



Tipo de Ciudad/Núcleo

Ciudad Interior en Cabecera de Cuenca (ICC)

PROCESOS FÍSICOS DOMINANTES:



Quetzaltenango (Guatemala). Fuente: Google Earth

Subtipos

- Ciudad en zona de confluencia de numerosos arroyos secundarios (ICC-SR).
- Ciudad en zona de confluencia de uno o más cauces principales con varios arroyos secundarios (ICC-R).

Caracterización general

Este tipo de ciudad se sitúa en el territorio perteneciente a la cuenca alta de un río, generalmente en un valle aluvial donde tiene lugar la confluencia de varios arroyos y cauces menores que bajan de las laderas limítrofes, y habitualmente dan lugar, en algún punto aguas abajo, a un cauce de mayor entidad. En ocasiones (subtipo ICC-R) ya existe un río principal al que se une otro río principal o una red de arroyos más pequeños. Si bien las pendientes de los ríos y arroyos en sus tramos iniciales suelen ser significativas, en la zona de confluencia se produce detención del flujo con acumulación de sedimentos y se crean espacios más llanos con pendiente variable según los sectores.

El mecanismo hidrológico dominante en las laderas que circundan a estas ciudades es el escurrimiento superficial, modulado por la presencia de vegetación y de una capa de suelo más o menos profunda. En la zona central del valle, todos los mecanismos se pueden combinar: los cauces transportan una parte del agua, pero tienden a desbordarse debido a las menores pendientes, por lo que crean zonas de acumulación e infiltración (ambos fenómenos suelen estar ligados en estos casos) en las llanuras de inundación de las márgenes. En ciertos sectores colindantes con laderas de cierta pendiente, los riesgos de inundación y de deslizamiento se funden en un continuo de fenómenos (flujos hiperconcentrados, huaicos, corrimientos, desprendimientos, etc.).

Los factores de amenaza dominantes son las lluvias locales y los caudales en los ríos y arroyos, que en las ciudades del subtipo ICC-SR pueden analizarse como procesos coincidentes o muy relacionados. En el caso ICC-R donde existe ya un río de cierta entidad, puede ser necesario diferenciar las crecidas fluviales de las inundaciones de origen pluvial.

Al igual que en la categoría anterior, en estas ciudades las aguas desbordadas pueden tener velocidades muy altas, en los sectores cercanos a las laderas con graves daños económicos y humanos. Ya en la superficie de valle con menor pendiente, los daños humanos tienden a ser menos significativos, pero las superficies afectadas se suelen incrementar notablemente.

Ejemplos de la ICES

- Santa Ana (El Salvador). Subtipo: ICC-SR.
- Quetzaltenango (Guatemala). Subtipo: ICC-R.
- Xalapa (México). Subtipo: ICC-SR.
- Cusco (Perú). Subtipo: ICC-R.

MCR dominantes

MCR-1: El crecimiento de la población, y especialmente la afluencia de emigrantes sin recursos económicos, induce a la ocupación de terrazas fluviales inundables, que históricamente se han respetado como zonas de reserva con usos del suelo no consolidados. En ocasiones, estas zonas son protegidas mediante estructuras de contención (muros, motas, gaviones) que inducen a una aceleración del flujo con procesos de erosión local, trasladando el problema hacia tramos inferiores.

MCR-2: Con el objetivo de reducir el espacio ocupado por el río principal dentro de la trama urbana, se construye un encauzamiento de anchura reducida, que produce un aumento de los niveles del agua para caudales extremos. Esto afecta a las condiciones de funcionamiento hidráulico y geomorfológico del río principal y de los arroyos tributarios. Estos últimos, en particular, experimentan mayores niveles y pérdidas de carga en su desembocadura, así como detención del flujo con acumulación de sedimentos que incrementan el nivel del

lecho. Estos procesos en cadena trasladan el riesgo de inundación en el cauce principal a las márgenes de dichos arroyos o ríos secundarios, a menudo zonas urbanas consolidadas.

MCR-3: La construcción de un embalse en la cuenca del río principal genera una reducción en el régimen de caudales (líquidos y sólidos) y crea una sensación de seguridad, al convertir en terreno virtualmente seguro zonas tradicionalmente inundables. Sin embargo, una explotación inadecuada del embalse, en la que los usos de laminación de avenidas son secundarios frente a la producción energética o los consuntivos, puede llegar a inducir avenidas fluviales catastróficas. Los riesgos tecnológicos asociados a la gestión del embalse pueden ser más altos que los riesgos hidrológicos en régimen natural, con el agravante de que la percepción de riesgo de la población se ha reducido, al tiempo que ha aumentado la exposición y vulnerabilidad.

Índices de riesgo potencial

- Grado de alteración de la cuenca del río principal.
- Porcentaje de suelo urbano situado en terrazas fluviales activas.
- Grado de alteración del cauce principal en las inmediaciones de la ciudad y dentro de ella.

Recomendaciones generales de intervención

1. En la medida en que sea posible, se debe buscar la rehabilitación total o parcial de la red de cauces y arroyos naturales, con su trazado más reciente y sus perímetros de protección asociados. Muchas veces, la presencia de edificios o infraestructuras hace difícil mantener el trazado original de los cauces, pero en general la red natural debe inspirar los posibles trazados de nuevos colectores-interceptores de las aguas de escorrentía urbana, que deben dimensionarse de manera generosa, considerando los efectos potenciales de la urbanización de las zonas periurbanas.
2. En sectores donde la geomorfología aluvial ha generado una topografía cóncava con puntos bajos sin salida, se debe potenciar la capacidad de almacenar agua sin producir riesgos, habilitando zonas verdes o incluso depósitos de tormenta.
3. Si la geometría del valle lo permite, debe analizarse la posibilidad de interceptar y agrupar el mayor número de arroyos, antes de entrar en la zona urbana, y trasladar sus aguas hacia un río principal con suficiente capacidad o a un punto aguas abajo con menores riesgos.

4. Finalmente, debe controlarse el grado de edificación en las laderas y potenciar la conservación del terreno natural vegetado. Se debe garantizar que las nuevas zonas de expansión, especialmente las correspondientes a clases acomodadas, incluyan mecanismos de almacenamiento y gestión de la escorrentía, de tal

manera que no se empeoren las condiciones en los sectores inferiores. En las zonas de nueva construcción, sobre todo en las que de clase media y superiores, debe fomentarse el uso de infraestructuras verdes para la gestión de la escorrentía.

Lecciones aprendidas

Las ciudades de este tipo pueden presentar una topografía compleja, fruto de una dinámica sedimentaria activa y la coevolución de varios conos de deyección procedentes de diversas laderas, lo que, en ocasiones, impide visualizar un esquema simple de drenaje convencional, basado en redes de colectores con una alineación fija. Además, si existen laderas en conos volcánicos activos, la red fluvial asociada puede ser difusa y sin cauces bien definidos, lo cual complica la recogida del agua en cabecera. Por estos y otros motivos, en estas ciudades el diseño de redes de drenaje convencionales puede ser menos intuitivo que en otras ciudades con una dirección de flujo dominante.

En estos entornos no existen reglas únicas, pero en general se deben aprovechar las pendientes disponibles, a ser posible imitando los cauces naturales, para

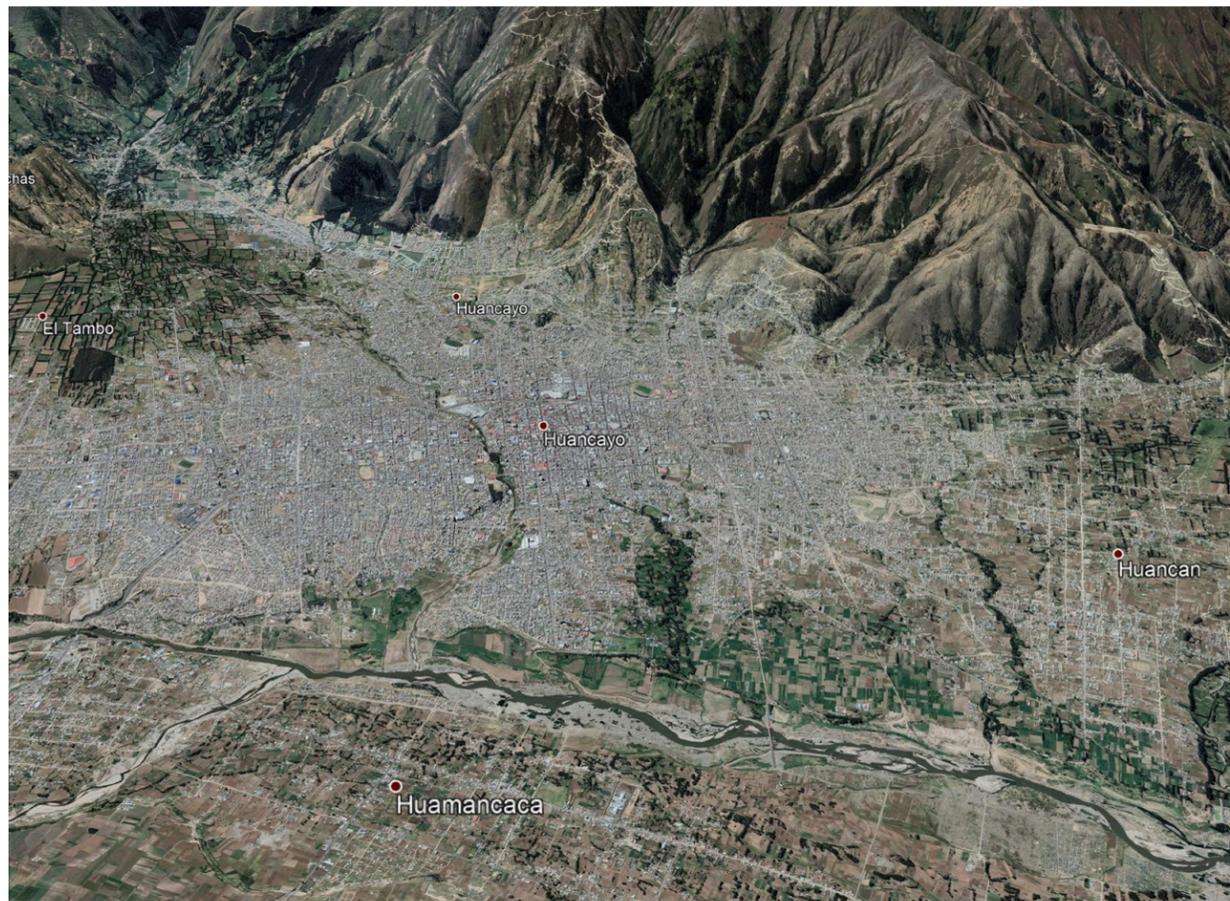
evacuar el agua por gravedad. Siempre existirán sectores donde este modelo no es viable y se debe recurrir a soluciones de drenaje no convencionales, potenciando la capacidad de retener y filtrar el agua, pero no debe olvidarse que el flujo por gravedad es siempre la mejor opción, cuando está disponible. En este tipo de ciudades, los sedimentos ligados a la escorrentía pueden tener una importancia considerable, por lo que cualquier solución debe diseñarse a prueba de colmatación, lo que implica tener en cuenta la carga sólida en el diseño (creando balsas de decantación, instalando rejillas, garantizando unas velocidades de flujo mínimas, etc.) y en el mantenimiento (colectores visitables o con sección abierta). En ciudades de este tipo con riesgos sísmicos elevados, deben considerarse soluciones de drenaje no rígidas y, a ser posible, a cielo abierto.



Tipo de Ciudad/Núcleo

Interior en Tramo Medio de cuenca con río principal y afluentes (ITM)

PROCESOS FÍSICOS DOMINANTES:



Huancayo (Perú). Fuente: Google Earth

Subtipos

- Ciudad en terraza fluvial activa (ITM-TA).
- Ciudad en terraza inactiva o desacoplada del río principal (ITM-TI).

Caracterización general

Este tipo de ciudad se sitúa en el tramo medio de un río de cierta entidad, al que se unen diversos afluentes de menor tamaño. En estas ciudades, el río principal es un elemento estructurante del territorio, capaz de condicionar la conectividad y segregar el espacio urbano. La naturaleza geomorfológica de las márgenes en cada sector determina en gran medida el tipo de relación río-ciudad y sus riesgos asociados. Los sectores asentados en terrazas activas suelen ser potencialmente inundables, pero también ofrecen oportunidades más claras de integración urbana; en cambio, las márgenes elevadas (bien por tratarse de terrazas abandonadas o por situarse sobre afloramientos rocosos) generan un efecto barrera más marcado, pero no suelen presentar riesgos hidrológicos (aunque sí, en algunos casos, de tipo geológico: deslizamientos, erosión, desprendimientos, etc.).

El mecanismo hidrológico dominante es la escorrentía superficial, si bien pueden existir sectores de las riberas ligados a procesos deposicionales (meandros abandonados, antiguos cauces en valles extensos) donde se produce almacenamiento e infiltración. Uno de los aspectos característicos de estos entornos es el funcionamiento de los pequeños afluentes que vierten al río principal, cuya capacidad hidráulica suele venir impuesta

por el caudal de la corriente en que se incorporan, más que por su propia pendiente y caudal.

En las ciudades ITM el factor de riesgo dominante es el caudal en el río principal que, generalmente, está asociado a campos de precipitación y procesos hidrológicos regionales, por lo que su estudio excede el ámbito urbano. Como factor de amenaza secundario, quizás dominante en algunos sectores específicos, están las lluvias locales, bien aplicadas directamente sobre la ciudad o propagadas a través de arroyos y cauces secundarios.

Las ciudades de este tipo pueden experimentar eventos catastróficos de gran magnitud, en el caso de que el río principal desborde o se desvíe de su cauce. Dado que suelen tratarse de grandes caudales, con pendientes moderadas o altas, los daños económicos y humanos pueden ser muy cuantiosos.

Ejemplos de la ICES

- Huancayo (Perú). Subtipo: ITM-TA (margen izquierda) y ITM-TI (margen derecha).
- Tegucigalpa (Honduras). Subtipo: ITM-TA (predominante) y ITM-TI (casco histórico).
- Santiago de los Caballeros (Rep. Dominicana). Subtipo: ITM-TA (sector meandro norte) y ITM-TI (sector Mirador del Yaque y campo de golf).

MCR dominantes

MCR-1: El crecimiento de la población, y especialmente la afluencia de emigrantes sin recursos económicos, induce a la ocupación de terrazas fluviales inundables, que históricamente se han respetado como zonas de reserva con usos del suelo no consolidados. En ocasiones, estas zonas son protegidas mediante estructuras de contención (muros, motas, gaviones) que inducen a una aceleración del flujo con procesos de erosión local, trasladando el problema hacia tramos inferiores.

MCR-2: Con el objetivo de reducir el espacio ocupado por el río principal dentro de la trama urbana, se construye un encauzamiento de anchura reducida, que produce un aumento de los niveles del agua para caudales extremos. Esto afecta a las condiciones de funcionamiento hidráulico y geomorfológico del río principal y de los arroyos tributarios. Estos últimos, en particular, experimentan mayores niveles y pérdidas de carga en su desembocadura, así como detención del flujo con acumulación de sedimentos que incrementan el nivel del

lecho. Estos procesos en cadena trasladan el riesgo de inundación en el cauce principal a las márgenes de dichos arroyos o ríos secundarios, a menudo zonas urbanas consolidadas.

MCR-3: La construcción de un embalse en la cuenca del río principal genera una reducción en el régimen de caudales (líquidos y sólidos) y crea una sensación de seguridad, al convertir en terreno virtualmente seguro zonas tradicionalmente inundables. Sin embargo, una explotación inadecuada del embalse, en la que los usos de laminación de avenidas son secundarios frente a la producción energética o los consuntivos, puede llegar a inducir avenidas fluviales catastróficas. Los riesgos tecnológicos asociados a la gestión del embalse pueden ser más altos que los riesgos hidrológicos en régimen natural, con el agravante de que la percepción de riesgo de la población se ha reducido, al tiempo que ha aumentado la exposición y vulnerabilidad.

Índices de riesgo potencial

- Grado de alteración de la cuenca del río principal.
- Porcentaje de suelo urbano situado en terrazas fluviales activas.
- Grado de alteración del cauce principal en las inmediaciones de la ciudad y dentro de ella.

Recomendaciones generales de intervención

En este tipo de ciudades es conveniente definir y consensuar un modelo viable y coherente de relación río-ciudad, que tenga en cuenta de forma integrada las características naturales del territorio, los factores de riesgo, el urbanismo y la segregación socioeconómica; dicho modelo debe como mínimo condicionar y, en ciertos casos, vertebrar, el plan maestro de ordenamiento territorial. En muchos casos, es conveniente acotar el corredor fluvial, pero sin reducir en exceso su espacio

disponible, incluyendo áreas de expansión para avenidas y partiendo del análisis de los procesos geomorfológicos de fondo, considerando el río como un continuo no sólo de agua, sino también de sedimentos. Las obras en el cauce, ya sean transversales o longitudinales, deben diseñarse teniendo en cuenta las posibles variaciones en planta y perfil, tanto en el tramo intervenido como en otras zonas relacionadas.

Lecciones aprendidas

Un rasgo común de muchas ciudades de tipo ITM en ALC, entre ellas las incluidas en la ICES, es la baja interacción río-ciudad y la tendencia de sus habitantes a vivir de espaldas a sus ríos. Este hecho contrasta con la realidad en Europa y algunas zonas de Asia, donde los corredores fluviales urbanos se están consolidando como ejes estructurantes y de revitalización del espacio público, con un valor diferencial. Los terrenos situados en las márgenes de los ríos de muchas ciudades de ALC ofrecen grandes oportunidades de liberar plusvalías,

tanto públicas como privadas, pero el proceso es lento y requiere detonantes, normalmente ligados a inversiones públicas. No obstante, la reducción de riesgos es sólo una de las facetas que deben abordarse en un proyecto de este tipo, para que tenga éxito. Otros aspectos necesarios son el saneamiento de las aguas residuales, la gestión de los residuos sólidos, la seguridad ciudadana, la capacidad institucional y los mecanismos de recaudación para poder sufragar los costos de explotación.



5.3 Filtros e indicadores de riesgo

A lo largo de los capítulos 1 a 4 se han esbozado métodos cuantitativos para calcular riesgos de diversa naturaleza, cuyo resultado final puede expresarse en forma de índices adimensionales (pérdida media anual como porcentaje del PIB, tasa media de fatalidad por millón de personas y año, etc.). Estos índices de riesgo sirven para realizar varios tipos de comparaciones:

1. Comparación de diferentes riesgos en una misma ciudad, con el fin de determinar cuál debe ser abordado con mayor prioridad.
2. Comparación de diferentes ciudades en cuanto a un tipo concreto o conjunto de riesgos, para determinar cuál está más afectada.
3. Comparación de los riesgos hidroclimáticos de una ciudad, frente a otros riesgos cuyas características o consecuencias sean asimilables (riesgos geológicos, tecnológicos, biológicos, etc.).

Sin embargo, desde una perspectiva global y multisectorial, los riesgos que afectan a un territorio son sólo uno de los posibles tipos de intervención disponibles para los gestores del sector público y organismos multilaterales, dentro del objetivo general de reducir la pobreza y promover el desarrollo económico y social. Ante la pregunta sobre si es más prioritario, en una ciudad concreta, invertir un millón de dólares en educación, o hacerlo en reducción de los riesgos de inundación, los índices planteados son de poca ayuda, puesto que no tienen contrapartida clara en otros ejes de inversión. Existen técnicas genéricas, la mayor parte economicistas, para comparar proyectos de diversa naturaleza (ver capítulo 7) pero, en todo caso, para aplicarlas se requiere formular de manera detallada la solución a cada problema y, en todo caso, se basan en comparar la eficiencia relativa de un conjunto limitado de soluciones disponibles, no la magnitud de los problemas que las motivan.

Sin pretender dar respuesta definitiva a esta cuestión, muchos estudios de riesgos, y en particular los estudios de la ICES, incluyen algún tipo de aproximación práctica que permite, de forma sencilla y cualitativa, poner en con-

texto el diagnóstico de riesgos, permitiendo relacionarlos con otros ejes temáticos. El procedimiento básico y general que se ha aplicado para elaborar lo que se denominan “filtros de riesgo” consiste en establecer una escala de valoración cualitativa, universal y absoluta de diagnóstico, basada en categorías abstractas definidas en términos genéricos, válidas para cualquier tema, eje o sector de interés. Un ejemplo de escala de este tipo en cinco niveles es el siguiente:

Nivel 1: diagnóstico muy favorable con tendencia positiva. No se detectan problemas significativos en el sector, que requieran de medidas de intervención. El estado del sector no supone un limitante al crecimiento, sino que representa una fortaleza en la que apoyarse.

Nivel 2: diagnóstico favorable con tendencia neutra. Se detectan problemas incipientes, con posible tendencia al alza. El estado del sector es aceptable y no limita el progreso en otras áreas, a corto y medio plazo.

Nivel 3: diagnóstico intermedio. Existen algunos problemas de intensidad moderada que requieren de medidas a medio plazo. Los problemas detectados no representan aún limitantes al crecimiento, ni tienen efectos sistémicos evidentes, pero sí tienen potencial de agravarse con el tiempo.

Nivel 4: diagnóstico desfavorable con tendencia neutra. Existen algunos problemas graves que requieren intervención prioritaria. El estado del sector comienza a ser un limitante al crecimiento, y a tener efectos sistémicos. Su tendencia de evolución es previsiblemente negativa.

Nivel 5: diagnóstico muy desfavorable con tendencia negativa. Existen graves problemas que requieren medidas urgentes. Los problemas detectados representan un claro limitante al crecimiento y tienen efectos sistémicos, por lo que deben ser abordados con prioridad para conseguir mejoras en otras áreas.

En términos de riesgos, los niveles anteriores equivalen a las categorías típicas, con su habitual código de colores:

NIVEL 1	RIESGO MUY BAJO
NIVEL 2	RIESGO BAJO
NIVEL 3	RIESGO MODERADO
NIVEL 4	RIESGO ALTO
NIVEL 5	RIESGO MUY ALTO

Tabla 15 | Escala genérica de niveles de riesgo cualitativo.

Una vez que la situación de una ciudad se refleja en esta escala para diferentes sectores, entre ellos el nivel de riesgos, es factible determinar de manera aproximada cuáles son los temas prioritarios de intervención. Si bien es evidente que reducir el diagnóstico de los problemas a una escala de este tipo implica una pérdida de información sobre los estudios de base disponibles, tal simplificación puede ser necesaria e incluso conveniente para llevar a cabo análisis estratégicos y estudios de preinversión en entornos de actividad complejos como el de los organismos multilaterales, donde miles de lu-

gares y decenas de ejes temáticos compiten por unos recursos financieros y humanos limitados.

Para aplicar un filtro similar al propuesto a partir de los resultados cuantitativos de riesgos, es necesario determinar las expresiones que transforman los índices, que son variables continuas normalmente definidas entre cero e infinito, en una variable discreta acotada del 1 al 5, en este caso. Los principales índices de riesgo presentados en el capítulo 3 se pueden ordenar de la siguiente forma:

ÍNDICES DE PÉRDIDAS ECONÓMICAS AGREGADAS		
IE1	Índice de pérdidas totales	Pérdida anual esperada total relativa al producto interior bruto de la ciudad.
IE2	Índice de pérdidas en edificaciones	Pérdida anual esperada por daños directos en edificaciones, relativa al valor total del stock de viviendas de la ciudad.
ÍNDICES DE DAÑOS HUMANOS		
IH1	Índice de fatalidad	Número medio de fallecimientos anuales, relativo a la población total.
IH2	Índice de damnificados	Número medio de damnificados anuales, relativo a la población total.
IH3	Índice de afectados	Número medio de afectados anuales, relativo a la población total.
ÍNDICES DE DAÑOS POR SECTORES CRÍTICOS		
ISC1	Proporción de elementos críticos dañados	Número de elementos críticos dañados por año, relativo al número de elementos críticos total, para cada sector analizado.
ISC2	Pérdida de funcionalidad del sector	Pérdida de funcionalidad media anual de cada sector, con respecto a su capacidad total.

Tabla 16 | Resumen de los principales índices de riesgo empleados en esta Guía.

La definición de los umbrales que determinan el nivel de riesgo de cada índice se basa en la experiencia y puede variar en función del tipo de ciudad. En la ICES se han utilizado de forma tentativa diversos valores umbral con base en el conocimiento práctico de la región. Los valores propuestos de manera tentativa para los índices de pérdidas económicas (IE1 e IE2) y de daños en sectores críticos (ISC1 e ISC2) se recogen en la [Tabla 16](#). En el caso de los índices humanos, se proponen umbrales diferentes según cada índice, tal y como se recoge en la [Tabla 17](#). Dado el amplio rango de valores de frontera

que se manejan, se ha optado por presentarlos en partes por millón (ppm), de tal forma que un 1% equivale a 10.000 ppm.

Ambas tablas se han rellenado a partir del juicio experto, con la hipótesis de que cada índice varía de forma exponencial con el nivel de riesgo o, a la inversa, que los niveles son proporcionales al logaritmo de los índices.

A partir de los valores de los índices y la aplicación de las tablas anteriores, se llega a un conjunto de niveles de riesgo, al que generalmente conviene agregar un nivel superior, asumiendo que el criterio más restrictivo es

ESCENARIO	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	NIVEL 4	NIVEL 5
IE1					
IE2	<1 ppm*	1-20 ppm	20-50 ppm	50-100 ppm	>100 ppm
ISC1					
ISC2					

*ppm=partes por millón (1% = 10.000 ppm; 1‰=1.000 ppm)

Tabla 17 | Valores umbral de los índices de pérdidas económicas y daños en sectores críticos, para obtener los niveles de riesgo.

ESCENARIO	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	NIVEL 4	NIVEL 5
IH1	<1 ppm*	1-20 ppm	20-50 ppm	50-100 ppm	>100 ppm
IH2	<10 ppm	10-200 ppm	200-500 ppm	500-1.000 ppm	>1.000 ppm
IH3	<100 ppm	100-2.000 ppm	2.000-5.000 ppm	5.000-10.000 ppm	>10.000 ppm

*ppm=partes por millón (1% = 10.000 ppm; 1‰=1.000 ppm)

Tabla 18 | Valores umbral de los índices de daños humanos para obtener los niveles de riesgo.

el que define el nivel del riesgo general. Así, en una ciudad concreta se puede llegar a definir un nivel de riesgo económico (NRE) y otro humano (NRH) que, combinados, dan un nivel de riesgo total (NRT):

$$\text{NRE} = \text{máximo de } N(\text{IE1}) \text{ y } N(\text{IE2})$$

$$\text{NRH} = \text{máximo de } N(\text{IH1}), N(\text{IH2}) \text{ y } N(\text{IH3})$$

$$\text{NR} = \text{máximo de } \text{NRE} \text{ y } \text{NRH}$$

Para cada sector analizado, el nivel de riesgo agregado sería también el máximo de N (ISC1) y N (ISC2). Otra ventaja de esta clasificación del riesgo en niveles semi-cuantitativos es que tiene una correlación directa con los niveles de riesgo percibidos, tal y como se pueden extraer de encuestas o cuestionarios al público. No obstante, el hecho de compartir escala no garantiza la consistencia y coherencia de ambos tipos de resultados, procedentes de fuentes tan dispares.

6

Medidas de reducción de riesgo —

- 6.1. Clasificación de las medidas de reducción de riesgo /192
- 6.2. Infraestructuras para la reducción de riesgos /194
- 6.3. Planeamiento territorial y metabolismo urbano desde el enfoque de riesgos /202
- 6.4. Los sistemas de alerta temprana y la gestión de emergencias /212

6

6.1 Clasificación de las medidas de reducción de riesgo

Tras el marco general presentado en el capítulo anterior, se describirán de manera general las alternativas de intervención disponibles para reducir los riesgos en ciudades. Antes de particularizar y seleccionar medidas en función de las condiciones específicas en cada caso, es ilustrativo presentar un catálogo general y descriptivo de todos los tipos de actuaciones disponibles o, al menos, un amplio número de ellas. Dicho catálogo no pretende ser exhaustivo ni sustituir la abundante documentación sobre cualquiera de los temas tratados, sino que pretende ofrecer un panorama general y no restrictivo de las numerosas facetas que la reducción de riesgos presenta. Se ha optado por prestar menos atención de la habitual a las medidas estructurales, pese a que siguen siendo las de uso más extendido y con mayor presupuesto para este tipo de problemas, ya que existen manuales técnicos muy completos que cubren con creces esa necesidad. En compensación, se ha tratado de resaltar la gran transversalidad que deben tener los programas de reducción de riesgo, en lugares tan complejos y dinámicos como las ciudades actuales y, en particular, en aquellas con un crecimiento más acusado. Por ello, además de una breve reseña sobre las medidas estructurales, se dedicarán apartados monográficos a las medidas de naturaleza económica y normativa, los sistemas de previsión de emergencias y a la relación entre riesgos y planificación urbana.

Al margen de las acciones orientadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (mitigación del cambio climático, según la terminología del IPCC), se puede plantear diversas clasificaciones de las medidas disponibles para la reducción de riesgos, basadas en el criterio dominante que se seleccione:

Criterio de materialidad:

- Medidas estructurales o duras: infraestructuras grises (diques, tuberías, canalizaciones, embalses, etc.) o verdes (zonas de retención, filtros verdes, pavimentos filtrantes, cubiertas vegetadas, etc.).
- Medidas no estructurales o blandas: normativas, de planificación, gestión, comunicación y concienciación.

Criterio basado en las fases del ciclo de gestión del riesgo:

- Medidas informativas y preventivas (previas al desastre y a la posibilidad de que se produzca).
- Medidas asociadas a la ocurrencia de un desastre (en los instantes previos, durante el mismo y durante los días sucesivos).
- Medidas para fortalecer la resiliencia y la recuperación a largo plazo tras un desastre.

Criterio competencial o basado en el mapa institucional:

- Actuaciones municipales, clasificadas a su vez por áreas de gobierno local: planeamiento urbano, saneamiento y drenaje, movilidad, residuos, parques y jardines, etc.
- Actuaciones de competencia regional o nacional, a menudo ligadas a sectores ministeriales: planes de gestión de cuencas, legislación de aguas y suelo, planificación de energía, transporte y comunicaciones, etc.
- Actuaciones de ámbito supranacional: control de fronteras, gestión de cuencas internacionales, sistemas supranacionales de predicción meteorológica y de desastres, cooperación y préstamos internacionales, etc.

La mera existencia de estos sistemas de clasificación pone en evidencia la complejidad del problema de reducción de riesgos, los múltiples acercamientos posibles y la importancia de abrir un debate amplio e integrador para llegar a soluciones eficientes y duraderas. El criterio de materialidad (obras vs. medidas de gestión) es el más simple y encaja de forma natural en un paradigma de acción-reacción (problema-remedio), que se inserta con naturalidad en el discurso y en el ciclo político; sin embargo, no es un criterio de filtro de las causas raíces, sino de los elementos más superficiales del problema.

El criterio basado en el ciclo del riesgo es quizás el más equilibrado y de visión más amplia, pero resulta más difícil de comunicar, especialmente tras una tragedia; su naturaleza circular (la gestión del riesgo como proceso continuo) no enfatiza el simbolismo de la lucha contra la naturaleza. Por este motivo, es un criterio que se emplea con frecuencia en el ámbito de la planificación a gran escala, pero puede resultar poco atractivo a escala municipal.

Finalmente, el criterio competencial, que identifica a los agentes con sus carencias y fortalezas, antes que la acción misma, es tal vez el más realista pero pone en evidencia, desde el primer momento, las grandes dificultades a que se enfrenta un programa de reducción de riesgos, ya sólo desde el punto de vista de la coordinación y de la capacidad institucional. Problemas como la falta de conocimiento y recursos de las instituciones, la falta de productividad, la corrupción o el solapamiento de competencias son a menudo factores generadores y/o potenciadores del riesgo, que son muy difíciles de modificar.

Los próximos apartados se estructuran principalmente a partir del criterio de materialidad y les dedican más atención a las medidas de naturaleza no estructural, sin olvidar el ciclo de gestión del riesgo y los factores competenciales, dentro de cada tipo de medidas. Como objetivo secundario, se ha tratado de resaltar aquellos temas que han demostrado ser más relevantes o críticos para identificar y definir actuaciones de reducción de riesgos, dentro de la ICES.



6.2 Infraestructuras para la reducción de riesgos

Desde que se tiene memoria, los seres humanos han construido grandes obras hidráulicas para controlar los efectos de la naturaleza y es de prever que lo sigan haciendo en los siglos venideros. La mayor parte de los países, y en especial los más desarrollados, poseen decenas de miles de kilómetros de diques de protección (en ríos, estuarios y costas) y numerosos embalses, que tienen entre otros usos la reducción de inundaciones. Todas las ciudades desarrolladas, y muchas en vías de serlo, disponen de una red de tuberías y sistemas de bombeo para evacuar las aguas de lluvia y residuales que complementan o incluso reemplazan los elementos que conforman el ciclo natural del agua.

Los criterios de diseño y construcción de los diversos tipos de obras hidráulicas están, en sus aspectos fundamentales, consolidados desde finales del siglo XX, cuando se produce la generalización del uso de ordenadores y modelos numéricos, el establecimiento de las bases teóricas de todas las disciplinas implicadas (mecánica de fluidos, geotecnia, ingeniería de costas, transporte de sedimentos, etc.) y la síntesis de la experiencia derivada de intensos periodos desarrollistas en varios países a lo largo de distintas épocas (Reino Unido, Francia, EE.UU., China, España, Corea del Sur, Israel, etc.).

Esta consolidación y convergencia de las herramientas de diseño no impide que los técnicos y gestores deban tomar ciertas decisiones, para las que no existen soluciones únicas y que, por tanto, son aún objeto de debate. Algunos de los temas que siguen planteando retos y dificultades en el diseño de obras de defensa frente a inundaciones, y especialmente en los núcleos urbanos de ALC, se esbozan brevemente en los epígrafes siguientes.

Diseño con incertidumbre en un contexto no estacionario

Uno de los primeros y principales problemas que hay que afrontar a la hora de diseñar una actuación o programa de mitigación de riesgos es la selección de su nivel de diseño, que lleva implícita la definición de un nivel de riesgo admisible. Tal y como se ha visto en el apartado 0 de esta documento, el procedimiento más simple y extendido es el de analizar la probabilidad de ocurrencia

de uno o varios factores de riesgo dominantes, generalmente las variables de amenazas hidroclimáticas que más influyen o de las que se tienen más o mejores datos históricos (lluvia, altura de ola, intensidad de viento, etc.). De este análisis se deriva una función de densidad de extremos (uni o multivariada), que permite establecer la probabilidad de ocurrencia de un determinado evento (a menudo expresada como periodo de retorno en años); esta probabilidad es transmitida directamente a los riesgos/daños asociados a dicho evento y se asumen valores constantes (sin probabilidad asociada) para otras variables hidroclimáticas secundarias y para los factores de vulnerabilidad implicados.

Dejando a un lado las fuentes de incertidumbre susceptibles de incorporarse en este marco conceptual (ver apartado 3.8), un aspecto relevante es la hipótesis implícita de que las variables de diseño se mantendrán fieles a su función de probabilidad con el transcurso del tiempo, cuyas colas (valores máximos o mínimos) reflejan un comportamiento extremo aleatorio pero estable. Sin embargo, esta estabilidad (o estacionariedad, en argot estadístico) se ve violada en un contexto de cambio climático, donde los procesos atmosféricos de base están sufriendo una mutación continua, lo que se traduce en que las funciones de densidad de las variables hidroclimáticas se modifiquen con el transcurso del tiempo. El estudio y la cuantificación de estas variaciones son áreas de investigación muy activas en la actualidad, pero aún no existen criterios concluyentes a la hora de decidir el procedimiento adecuado para un proyecto concreto. Como medida práctica, con base en los estudios regionales y locales disponibles en cada ciudad, se puede incorporar una perturbación de los parámetros de la función de densidad histórica de la variable dominante, en concreto su media y su desviación típica, asumiendo que su forma (tipo de distribución) permanece invariante. Otro enfoque posible es el ajuste de los resultados obtenidos al desagregar espacialmente (*downscaling*) los modelos de circulación general disponibles en la zona de estudio. En cualquier caso, todo estudio moderno de dimensionamiento de una obra hidráulica debe mencionar y adoptar un posicionamiento claro en relación con el problema de la no estacionariedad de las variables climáticas de diseño.

Gestión de sistemas optimizada y basada en datos

Se puede considerar que la historia de la humanidad ya ha entrado de forma irreversible en la era de la inteligencia artificial y los datos masivos (*big data*). Las repercusiones de este hecho en las personas y, por tanto, en su principal lugar de residencia, las ciudades, son enormes y a menudo difíciles de imaginar (ver una aproximación cualificada en Harari, 2016). Sin entrar en la posibilidad, más o menos cercana, de que un sistema hidráulico (por ejemplo, una presa con su correspondiente embalse) se gestione de forma autónoma basándose en la información que aportan en tiempo real una red de usuarios y de sensores (internet de las cosas), es evidente que existe un amplio espacio para la optimización y mejora de la explotación de este tipo de infraestructuras, con tecnologías ya consolidadas. Llama la atención, en la mayor parte del mundo, el retraso de las administraciones hidráulicas en la incorporación de las nuevas tecnologías y lo primitivo que resultan los métodos y criterios de explotación (más allá de los sistemas de comunicación y control remoto o SCADA, que sí están más o menos extendidos). En la región de ALC, se ha comprobado que existen claras oportunidades, con un costo asequible, de reducir los riesgos de origen hidroclimático en ciudades empleando sistemas de predicción en tiempo real y protocolos de operación optimizados en presas, diques y otras infraestructuras (ver epígrafe 6.4).

No obstante, existen experiencias notables, especialmente en países de Centroamérica, de uso de las nuevas tecnologías para emitir avisos de catástrofes a la población en tiempo real, que a menudo combinan diversos medios de comunicación (radio, TV, móvil, etc.) con redes de voluntarios encargados de difundir los mensajes a toda la población. El uso de tecnologías más avanzadas y precisas, combinado con el enorme capital social que supone disponer de esas redes ciudadanas de enlace con las comunidades y barrios, abre las puertas al optimismo en países que se enfrentan a grandes retos en mitigación de riesgo como El Salvador, Honduras, Guatemala o Nicaragua.

Análisis del ciclo de vida de las infraestructuras

Toda instalación lleva asociados, además de sus costos de ejecución y puesta en marcha, costos de mantenimiento (necesarios para garantizar su funcionalidad a lo largo de su vida útil) y costos de amortización, reflejo económico de su caducidad. Estos costos son frecuentemente obviados en el ámbito de ALC y otros lugares, lo que genera una pérdida de funcionalidad y, en definitiva, un aumento de los riesgos, incluso en zonas que deberían estar protegidas. Se recomienda informar con claridad a los entes responsables, antes de acometer cualquier infraestructura de reducción de riesgos, sobre la necesidad de provisionar un presupuesto para las tareas de inspección y mantenimiento, y de habilitar los recursos necesarios, no sólo económicos sino también organizativos, para llevar a cabo dichas tareas. Esto es especialmente necesario en diques de protección costeros o fluviales, cuyo deterioro en sectores específicos pone en peligro la funcionalidad del conjunto de la infraestructura. Asimismo, algunos embalses de ALC construidos en la primera mitad del siglo XX están dando muestras de deterioro, lo que crea riesgos importantes en las poblaciones situadas aguas abajo, que deben evaluarse y reducirse en la medida que sea posible. Finalmente, no debe acometerse ninguna obra que no tenga asegurada una cobertura mínima (que dependerá de cada actuación) de los costes de mantenimiento y explotación, a pesar de que existan recursos disponibles para las inversiones de capital iniciales. Un rasgo específico de las tareas de mantenimiento y explotación es que no sólo dependen de disponibilidad presupuestaria, sino que requieren un marco institucional y procedimientos operativos que muchas veces no están a la altura de las circunstancias.

Infraestructuras verdes y adaptables

Una de las lecciones aprendidas a lo largo de siglos de esfuerzo por reducir los riesgos derivados de fenómenos naturales es la importancia de conservar, o en su defecto imitar, los mecanismos naturales en el diseño de actuaciones. Las cuencas fluviales y los sistemas

costeros son unidades fisiográficas que han evolucionado con el clima durante siglos y que han desarrollado mecanismos autoorganizados y eficientes de disipación de los flujos de materia y energía, en los que es posible inspirarse para diseñar sistemas tecnológicos. Este principio abstracto se traduce en reglas de diseño básicas, que muchas ciudades de ALC han dejado de lado en el proceso rápido y desordenado de crecimiento acaecido durante las últimas décadas:

- Las zonas con baja pendiente topográfica son aptas para almacenar agua (en lagos, parques, zonas recreativas, etc.), pero no permiten redes de drenaje urbano eficientes, a menos que se construyan y mantengan costosos sistemas de bombeo.
- De igual forma, no suele ser práctico ni conveniente almacenar agua en zonas con pronunciada pendiente, ya que la energía potencial acumulada genera riesgos añadidos.
- En zonas con riesgo sísmico y de deslizamiento, son preferibles las soluciones con materiales deformables y a cielo abierto, frente a muros rígidos o tuberías subterráneas.
- Las ciudades con sus puntos neurálgicos (infraestructuras críticas) más repartidos y conectados resistirán mejor las catástrofes que aquellas que tienen sus activos estratégicos concentrados e independientes entre sí.

Otra forma de imitar a la naturaleza es la multifuncionalidad: aceptar que cualquier elemento que se introduzca en un sistema complejo en continua evolución, incluidas las ciudades, deberá operar en múltiples situaciones con diferentes objetivos, en muchos casos diferentes de aquellos para los que fue diseñado. En ocasiones, el éxito de un elemento u órgano radica en su capacidad de adaptarse y servir como ventaja competitiva en condiciones no previstas, más que en cumplir el cometido concreto para el que fue diseñado (en el caso de los seres vivos, el que configuró la selección natural). Los biólogos evolutivos denominan exaptación a este fenómeno (Gould y Vrba, 1982) y es posible que los ingenieros y urbanistas deban acostumbrarse a diseñar sistemas de reducción de riesgos que maximicen esta propiedad, antes que acertar con el diseño que mejor satisfaga unos cuantos objetivos predefinidos, en

un contexto conocido. Así, las infraestructuras multifuncionales, que incluyen entre las posibles funciones los servicios ecosistémicos y los usos lúdico-paisajísticos, deben tener cabida en el diseño de las nuevas ciudades, de manera que un parque, un aparcamiento subterráneo o una cancha deportiva permitan satisfacer otras funciones, además de las que su propio nombre denota (ver *Cuadro 11*).

Un rasgo general de muchas infraestructuras verdes o de las soluciones inspiradas en la naturaleza es que requieren escalas espaciales y temporales de planificación que no son compatibles con el dinamismo de algunos procesos socioeconómicos. Un bosque o una marisma necesitan tiempo y espacio para regenerarse, y además pueden producir efectos diferidos en ambas dimensiones: el bosque mejora el comportamiento hidrológico de las cuencas aguas abajo cuando se vuelve un bosque maduro (tras decenas de años de crecimiento y de sucesiones ecológicas), y las marismas deben aportar servicios ecosistémicos que se extiende mucho más allá de la huella física directa. Esto hace que la valoración y asignación de costos / beneficios sea más compleja que en los intercambios directos entre sujetos (físicos o incorporados) que el capitalismo de consumo promueve y a los que el propio ciclo político de las democracias liberales responde. El modelo de la máquina expendedora no es adecuado para representar la realidad de los servicios ecosistémicos, ni representa un enfoque prometedor para el diseño de actuaciones resilientes de reducción de riesgos.

Las infraestructuras multifuncionales, que incluyen entre las posibles funciones los servicios ecosistémicos y los usos lúdico-paisajísticos, deben tener cabida en el diseño de las nuevas ciudades, de manera que un parque, un aparcamiento subterráneo o una cancha deportiva permitan satisfacer otras funciones, además de las que su propio nombre denota.

Cuadro 11 —

Sistemas de drenaje sostenible propuestos en Tegucigalpa, Honduras

Problemática

En la ciudad de Tegucigalpa, dentro de las actuaciones propuestas para reducir los riesgos de inundación, se optó por plantear a modo de proyecto piloto algunos sistemas de drenaje sostenible (en inglés SUDS). Se denominan SUDS a un conjunto no acotado de técnicas y dispositivos que amplían el esquema de un drenaje tradicional (basado en el diseño principalmente hidráulico de redes de tuberías) hasta una concepción más holística de la gestión del agua urbana, basada muchas veces en imitar a la naturaleza, y cuyos objetivos no son sólo evacuar el agua sobrante (agua como residuo), sino entre otros: mejora de la calidad del agua, objetivos paisajísticos y de mejora urbana, mejora ambiental, producción de agua para abastecimiento, etc.

Metodología

Se propusieron tres actuaciones de carácter multiobjetivo cuyos objetivos principales son dos:

- Reducir los riesgos de inundación por lluvias extremas en Comayagüela y el Centro Histórico de Tegucigalpa.
- Crear equipamientos deportivos y espacios públicos de encuentro e interrelación en la zona urbana.

Como objetivos secundarios se planteaban la mejora de la calidad del agua de escorrentía (tanto si se vierte a un cauce como si se transporta a una planta de tratamiento) y, en el caso de que se optara por soterrar una parte del volumen de almacenamiento (depósito de laminación), proporcionar agua para usos no consuntivos.

El diseño básico de los tres sistemas propuestos se centró en satisfacer de forma simultánea los dos objetivos principales, mientras que la verificación del grado de cumplimiento de los objetivos secundarios queda para una fase más avanzada de definición de las obras.

En consecuencia, los dos criterios de diseño que se incorporaron en esa fase de trabajo fueron:

- Garantizar que los sistemas propuestos recogen la totalidad de la escorrentía producida en las zonas tributarias, para un evento de 10 años de periodo de recurrencia.
- Crear una zona deportiva o de uso público de una superficie de al menos 30 x 40 metros, con gradas con capacidad para unas 100 personas, que a la vez sirviera como balsa de retención en avenidas.

Resultados

Se seleccionaron dos áreas dentro de la zona de Comayagüela (ver *Figura 37*) donde se plantearon sendos sistemas de drenaje sostenible con características y componentes similares:

1. Zanja drenante: Un colector-interceptor que funciona en lámina libre y recoja las aguas de escorrentía del al cuenca vertiente, las filtra y las transporte (de ser posible ya filtradas) hacia un depósito (cancha deportiva) (*Figura 38* izquierda).

2. Instalación deportiva con una función alternativa de almacenamiento a cielo abierto: Un depósito a cielo abierto que sirva a su vez como cancha deportiva, que almacene el agua procedente del colector y que está dotado de un desagüe profundo y de un aliviadero en superficie (*Figura 38* derecha).

3. Tubería a presión: Una conducción a presión de acero que parte del desagüe profundo del depósito y vierte en un punto más bajo, bien en el río Choluteca o en un colector de la red unitaria de saneamiento.

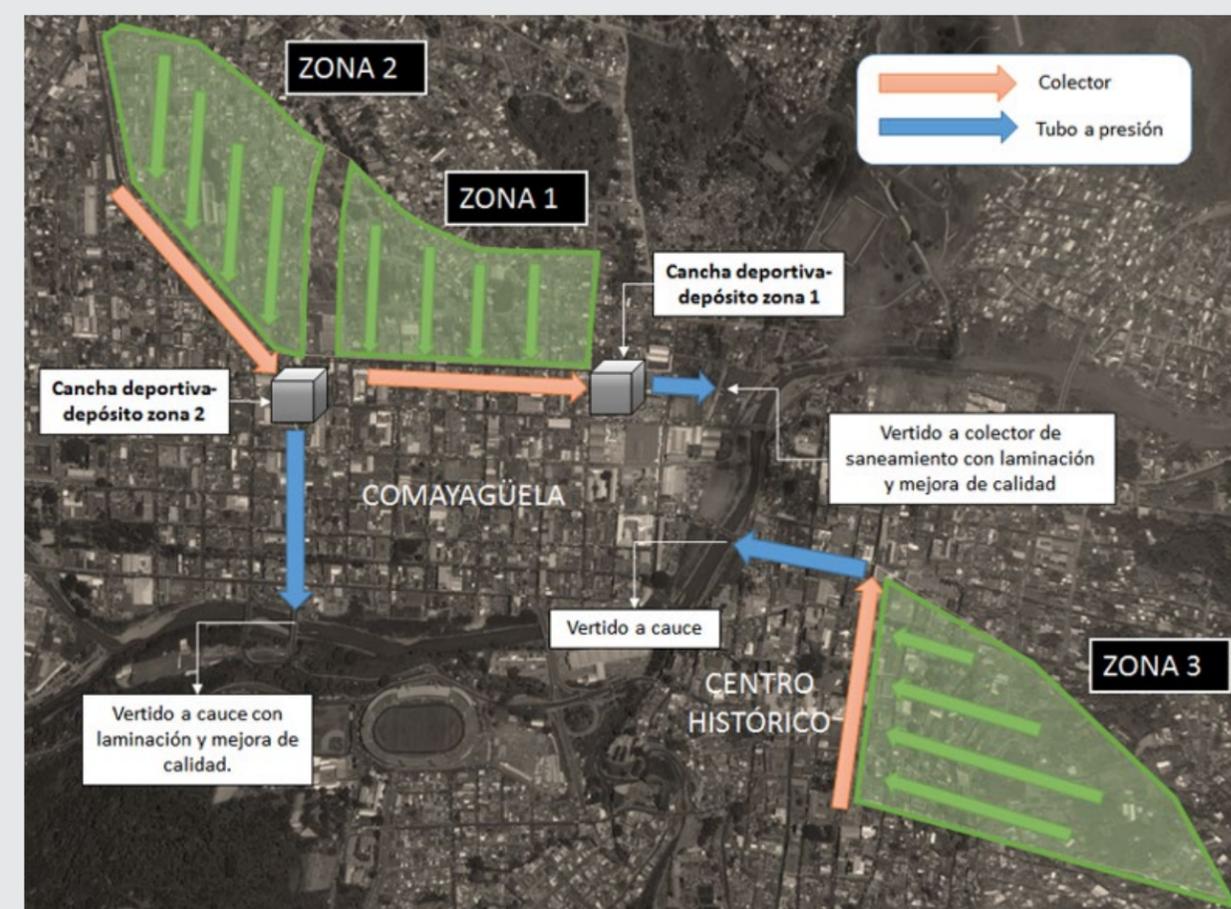


Figura 37 | Localización y esquema de las tres zonas de actuación.

Finalmente, se planteó una tercera zona de intervención en el Centro Histórico de Tegucigalpa, donde el esquema

de funcionamiento era similar (colector y tubería a presión), pero sin depósito de almacenamiento.

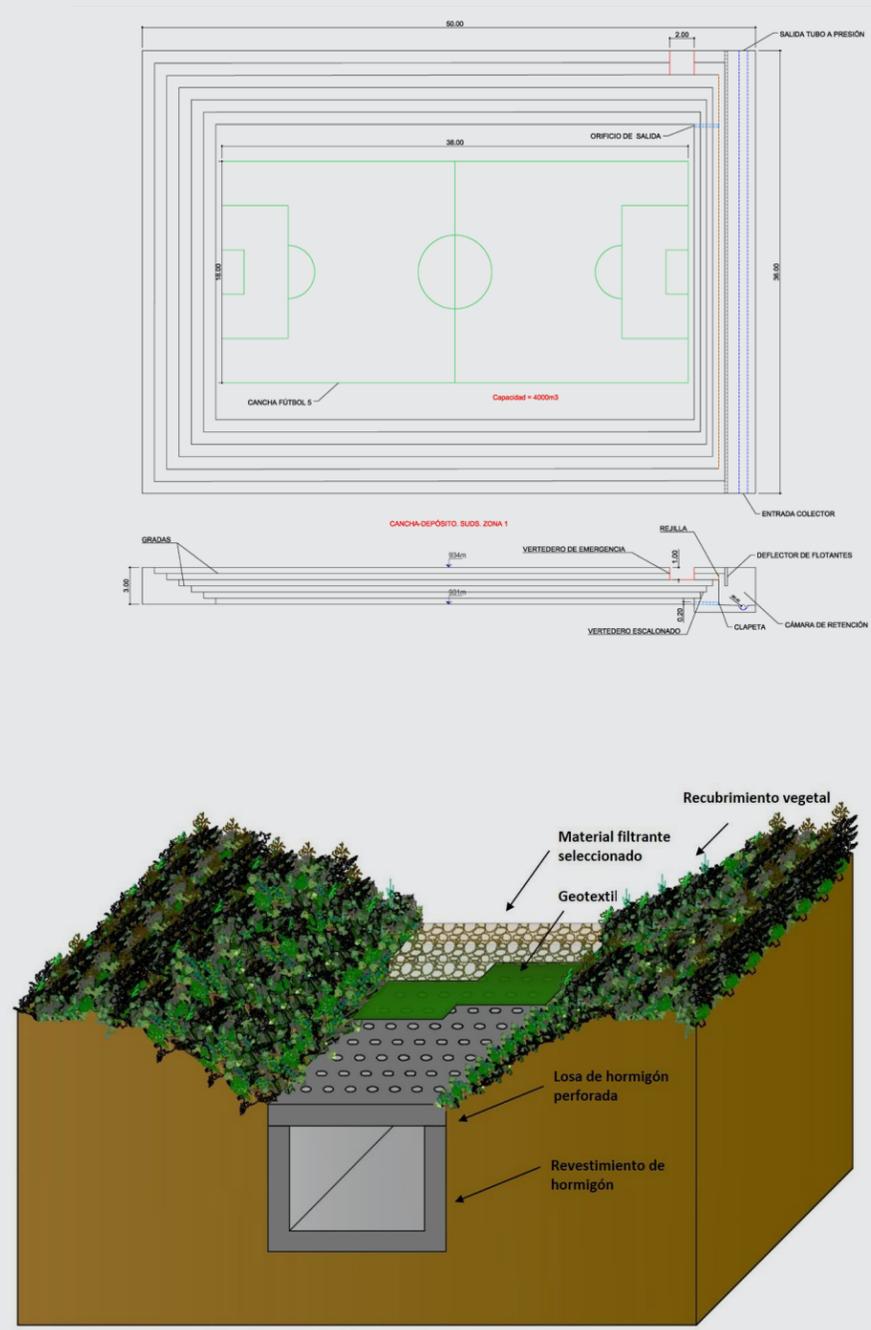


Figura 38 | Detalle cancha deportiva- deposito. Zona 1 (arriba). Sección tipo para la zanja drenante (abajo).

6.3 — Planeamiento territorial y metabolismo urbano desde el enfoque de riesgos

Una parte significativa de los riesgos en ciudades está asociada a la ubicación inadecuada de usos y personas en el espacio. A menudo, el crecimiento de las manchas urbanas, especialmente en las ciudades de ALC que han experimentado periodos de fuerte expansión en las últimas décadas, no ha seguido una lógica urbanística ni de planificación del territorio. Incluso en los casos en que sí se ha seguido un esquema ordenado, los planeadores no siempre han tenido acceso a diagnósticos de riesgos y, por lo tanto, no han podido incorporar esta información en los planes maestros de desarrollo.

La experiencia en la ICES confirma que el territorio donde se ubican las ciudades no es un ente homogéneo, sino que cada sector posee unas propiedades de idoneidad para determinados usos, en función de sus propiedades físicas (suelos, pendientes, factores climáticos), así como unos mecanismos de relación con los territorios colindantes. En consecuencia, cada vez que se asigna un uso a una zona dada, no sólo se pone a prueba la idoneidad de la misma para dicho uso, sino que se modifican las condiciones de idoneidad de otros territorios relacionados. Cuando se construye un nuevo sector en una ciudad, no sólo se deben comprobar sus características desde un punto de vista local, sino que debe tenerse en cuenta en qué medida se están exportando (o importando) riesgos hacia (o desde) otras zonas limítrofes.

El planeamiento urbano tradicional, con su enfoque normativo y predominantemente estático, está en disposición de conocer los riesgos asociados a cada sector, y en consecuencia limitar los usos, pero tiene dificultades a la hora de considerar los efectos sistémicos y dinámicos. Así, la edificación de las laderas periurbanas de algunas ciudades situadas en valles cóncavos de cabecera de cuenca, ha producido en épocas recientes riesgos de inundación en centros históricos con varios siglos de antigüedad, que a lo largo de su historia no habían experimentado este fenómeno. Las nuevas zonas ocupadas no son a priori inadecuadas en sí mismas, salvo en algunos casos de altas pendientes con riesgo de deslizamiento, sino que lo son por los riesgos que inducen en

otras zonas, en ocasiones distantes.

Este ejemplo sirve para motivar una reflexión general: los planes de ordenamiento territorial de las ciudades, especialmente en ALC, son instrumentos útiles y adecuados, pero no suficientes, para garantizar un crecimiento sostenible y que gestione correctamente los riesgos urbanos.

A continuación, se describen brevemente algunos aspectos en los que se debería trabajar para complementar y mejorar los métodos de planificación urbana tradicionales.

Potenciar el enfoque dinámico y la planificación como proceso

En muchas ciudades, la aprobación de los planes de ordenamiento territorial, nuevos o revisados, sigue un camino largo y tortuoso, con luchas de poder e intereses contrapuestos. Mientras esto sucede, las ciudades siguen expandiéndose de forma orgánica a su ritmo natural, de tal manera que, en el momento en que se aprueba un nuevo plan, las condiciones de partida han variado y ya no es estrictamente válido. En el mejor de los casos, la planificación urbana va desfasada con respecto al desarrollo urbano, en las ciudades de mayor crecimiento; en el peor, la planificación urbana legítima, con su pátina de racionalidad, una realidad que discurre ajena a cualquier lógica que no sea el enriquecimiento de unos pocos. Ante estas circunstancias, se requieren modelos de toma de decisiones sobre el espacio urbano con plazos más cortos y de naturaleza más flexible, que sacrifiquen parte del supuesto rigor y exactitud de los planes de tradicionales, a cambio de una mayor dosis de pragmatismo y posibilismo.

Incorporación de información de base sobre riesgos en la planificación urbana

Muchas ciudades no poseen información detallada y fiable de los riesgos de territorio, y mucho menos del potencial de exportación de riesgos que tiene cada zona. En otros casos, la información está disponible, pero de



Figura 39 | Asentamientos informales dentro del parque litoral de la Laguna de los Patos, Cumaná, Venezuela.

manera sectorial y desconectada de los órganos de planificación. Es conveniente construir vínculos entre los departamentos de riesgos y los de ordenación territorial, así como fomentar una cultura de riesgos en estos últimos, especialmente en las ciudades con más problemas.

Escalas de planificación y coordinación con municipios colindantes

En ocasiones, la planificación urbana no emana de una ley del suelo a nivel nacional, de forma que no se garantiza la coordinación entre municipios colindantes y entre las diversas escalas de planificación del territorio (nacional, regional y local). Como consecuencia, la agregación de los planes de cada municipio particular muestra inconsistencias o incluso contradicciones a escala regional o nacional (es común, por ejemplo, que las proyecciones de crecimiento demográfico a escala local sean incoherentes a escala nacional). También es común que los planes de crecimiento de un municipio trasladan los riesgos hacia otros lugares limítrofes. La separación arbitraria entre municipios, a menudo dentro de una misma área metropolitana, con fronteras que no tienen ninguna lógica fisiográfica, también puede y suele fomentar un uso inadecuado del territorio.

Reforzar el sistema de administración del suelo

Asimismo, y complementario a una ley del suelo, es necesario que el sistema catastral y el registro de la propiedad de los bienes inmuebles a nivel nacional estén bien desarrollados, y debe dotarse a los organismos responsables de la capacidad (a escala de ciudad) y recursos suficientes para ejercer su función. El papel de estos organismos es también clave para el buen funcionamiento de los mercados del suelo y de los bienes inmuebles. Un tema capital es la regularización de las zonas de asentamientos informales, que en muchos casos coinciden con las zonas más expuestas a riesgos hidrometeorológicos.

Fomentar que los mercados del suelo reflejen e incorporen los aspectos de riesgos

Los mercados del suelo son complejos, pero a menudo son los propios gobiernos y administraciones locales los que intervienen en ellos, a través de normativas y subsi-

dios, haciéndolos aún más imperfectos e impidiendo que los precios reflejen la realidad, incluida la de los riesgos latentes. Esto desincentiva el gasto de empresas y particulares en la reducción de riesgos, seleccionando terrenos más adecuados o construyendo con normas más estrictas. Es importante que el precio de las parcelas e inmuebles sea acorde con los riesgos a que están expuestos y que esta variable no funcione como una externalidad.

Capacitación del personal técnico

Es necesario invertir más en la capacitación del personal técnico de municipios y otros organismos en materia de urbanismo sostenible y riesgos. A menudo, los estudios de base para los planes de ordenamiento territorial, así como los estudios de riesgo, son redactados por empresas consultoras internacionales, con escasa participación real de los técnicos locales. Esta externalización de los servicios es en cierta medida necesaria, dada la escasez de recursos con que suelen contar los municipios, pero no debería desaprovecharse la ocasión de aportar capacidades y herramientas a los técnicos locales cada vez que se subcontrata un trabajo de este tipo.

Además de los aspectos de planeamiento urbano, existen otros aspectos de la gestión municipal que guardan una relación directa con los riesgos, y que se comentan en los siguientes epígrafes.

Movilidad urbana y catástrofes naturales

La red vial, de carreteras, de puentes y de infraestructura de transporte de una ciudad condicionan en gran medida los daños y la respuesta frente a catástrofes. En primer lugar, una ciudad cuyas arterias de comunicación principales se ven afectadas con cierta regularidad experimenta costos económicos indirectos, debidos a los retrasos en los tiempos de traslado, que en ocasiones son muy cuantiosos (ver *Cuadro 12*). Asimismo, la eficiencia de las tareas de evacuación y rescate en caso de emergencias está ligada a la resiliencia de la red de transporte; en los casos en que ésta se ve muy afectada, los tiempos de rescate y la tasa de fatalidad aumentan.

La gestión de los residuos sólidos urbanos y su relación con los riesgos

Numerosas ciudades de ALC tienen un servicio de recolección y gestión de residuos urbanos deficiente, especialmente en ciertos barrios marginales, que a me-

nudo se encuentran en zonas críticas como riberas fluviales y laderas inestables (*Figura 40*). Esta situación genera graves riesgos de salud para los habitantes de estos sectores, pero además suele producir colmatación y obstrucción de las vías de desagüe, especialmente de los colectores de aguas pluviales y residuales, que no están preparadas para recibir residuos sólidos en grandes cantidades. Muchas ciudades de ALC tienen obstruido el ingreso a colectores de drenaje urbano, debido a la acumulación de desechos y residuos que son vertidos al cauce o a vertederos irregulares. Además, estos materiales, al ser lavados por las aguas de escorrentía, aportan una carga contaminante significativa al agua, que en última instancia va a parar a los acuíferos, ríos y costas, con posibles impactos en la pesca, acuicultura, aguas de baño, sistemas de abastecimiento, etc.

En consecuencia, la gestión de los residuos sólidos tiene una clara incidencia en los riesgos a la salud y en los riesgos de inundación de muchas ciudades, y cualquier intento de construir redes de drenaje urbano será infructuoso, a menos que se aborde con prioridad este problema. La construcción de rejillas de entrada en los colectores y tubos de drenaje resuelve parte del problema, pero si no se llevan a cabo tareas de limpieza periódica, también acabarán saturadas.

Las redes urbanas de agua, energía y comunicaciones como factores de resiliencia

El metabolismo de las ciudades se basa en densas redes que transportan agua, energía e información. Si bien estas redes son poco visibles, su resistencia y capacidad de recuperación en caso de desastres son una de las claves para minimizar los daños totales. El mantenimiento del servicio de agua potable tras una catástrofe es uno de los factores que permite minimizar los daños indirectos y la supervivencia de la población, a corto y mediano plazo. Asimismo, si la red eléctrica se vuelve operativa con rapidez, se facilitan enormemente las tareas de evacuación y rescate en horas nocturnas y se reduce el vandalismo que pueda derivarse de la falta de iluminación y los fallos de los sistemas de alarmas. Finalmente, las redes de comunicación, principalmente a través de teléfonos móviles, aportan posibilidades de alerta y asistencia rápida en emergencias, inconcebibles hasta hace poco.

Todos estos hechos son ejemplos que resaltan la importancia, desde el punto de vista de la gestión de riesgos,

de una planificación urbana integral, que incluya no sólo a los departamentos de planeamiento y riesgos, sino a otros muchos que a menudo pasan desapercibidos al tratarse estos temas.

Los responsables de parques y jardines como nuevos protagonistas en la gestión de riesgos

La mayoría de los municipios de cierta entidad suelen tener un departamento de parques y jardines, cuya misión principal es diseñar y mantener estos espacios urbanos, para el disfrute de la población. Con las nuevas tendencias de gestión de la escorrentía urbana, la función lúdica y ornamental de los parques e instalaciones deportivas debe estar complementada por la reducción de riesgos y la mejora ambiental. Los espacios urbanos verdes (y a veces grises) son la gran oportunidad de las ciudades de promover una gestión del agua sostenible y resiliente.

Para incorporar de forma efectiva estas funciones en los departamentos de parques y jardines, se requiere un esfuerzo de capacitación de las personas, de dotación presupuestaria y de coordinación con otros departamentos. En ocasiones, sencillas modificaciones en el diseño de parques y glorietas pueden aportar beneficios urbanos visibles (por ejemplo, si se evita que expulsen el agua hacia el exterior, en lugar de recogerla). Si no se escatima el espacio destinado a las zonas verdes y éstas son diseñadas para cumplir funciones que trasciendan lo meramente ornamental, los jardineros tendrán un papel cada vez más importante en las ciudades del futuro.



Figura 40 | Arrastre de sedimentos y residuos en el Hoyo de Puchula en Santiago de los Caballeros, República Dominicana.



Arrastre de sedimentos y residuos en el Hoyo de Bartola en Santiago de los Caballeros, República Dominicana.



Figura 41 | Acumulación de residuos en el canal Los Molinos en Cumaná, Venezuela.



Acumulación de residuos de la Llanada en Cumaná, Venezuela.

Cuadro 12 —

Costo de las interrupciones de tráfico asociadas a eventos de inundación en Tegucigalpa, Honduras

Problemática

Dentro del análisis costo-beneficio realizado en la ciudad de Tegucigalpa (ver *Cuadro 14*), un resultado potencialmente importante de las nuevas obras de encauzamiento que se están diseñando sería el evitar la congestión de tráfico derivada de la interrupción del funcionamiento de los numerosos puentes que atraviesan tanto el río Choluteca como sus principales afluentes en la zona central de Tegucigalpa.

Metodología

Como información de partida, se cuenta con el Estudio de Apoyo al Plan de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) para el Distrito Central de Tegucigalpa y Comayagüela (Informe Final, BID, diciembre de 2012). Se ha considerado que existen 9 puentes representativos de la totalidad del tráfico, cuya intensidad máxima de tráfico (sumando ambos sentidos) es de 5000 vehículos/hora; se asumirá que, en esa ventana de tiempo, la intensidad media es del orden de la mitad que la máxima, es decir, 2500 vehículos/hora.

Suponiendo que una crecida fluvial de más de 10 años de periodo de retorno genera una interrupción de tráfico de 8 horas, resulta que tal crecida afectaría a unos 22500 vehículos (si se considera que sucede en horas diurnas en día laborable). Esta cifra representa, según el citado Plan de Movilidad, aproximadamente un tercio de todos los desplazamientos que se realizan por término medio en un día en la ciudad y casi la mitad de los que se realizan mediante vehículo de cuatro ruedas.

Con base en información brindada por personas locales, se ha estimado asimismo que el hecho de disponer de los puentes implica por término medio un retraso de dos horas, para circunvalar la ciudad y llegar al punto de destino por otras vías. Si consideramos que el costo me-

dio por hora empleada en circunvalar es equivalente a un costo medio salarial, y consideramos un salario medio de dos veces el salario mínimo aprobado por ley en Honduras (USD 400 al mes en 2015), resulta un costo horario por demora de 5 USD.

Resultado:

Al combinar todas estas cifras, se llega a un costo medio anual por afectación al tráfico de USD 180.000.

COSTE	5	USD/hora
HORARIO DE INTERRUPCIÓN*	8	horas
TIEMPO DE INTERRUPCIÓN	2 500	Vehíc./hora
INTENSIDAD MEDIA DE TRÁFICO POR PUENTE	9	-
NÚMERO DE PUENTES	22 500	Vehíc./hora
INTENSIDAD TOTAL EN LOS PUENTES	2	horas
TIEMPO ADICIONAL DE VIAJE	1 800 000	USD
COSTE TOTAL DEMORA POR EVENTO	10	años
PERIODO DE RECURRENCIA MEDIO DE LAS INTERRUPCIONES	180 000	USD/año
DAÑOS ANUALIZADOS	180 000	USD/año

Tabla 19 | Costos de afectación al tráfico.

6.4 Los sistemas de alerta temprana y la gestión de emergencias

El conocimiento de los procesos naturales disponible en la actualidad, combinado con las tecnologías de la información y la comunicación, permiten predecir con cierta antelación numerosos fenómenos hidroclimáticos, geológicos, epidemiológicos, etc. La información que proveen los sistemas de alerta temprana puede integrarse con sistemas de comunicación a la población, que a su vez pueden personalizarse en función de la ubicación y las características específicas del evento de riesgo. Finalmente, un comportamiento predecible y coordinado de la población puede facilitar las tareas de evacuación y puesta a salvo, tanto de bienes materiales como de personas, lo que en definitiva reducirá drásticamente los daños.

A diferencia de las medidas descritas en los apartados previos, esta secuencia de procesos requiere integrar elementos tecnológicos, institucionales y de comportamiento humano en un marco temporal muy estricto, en el que deben tomarse decisiones importantes, de forma rápida y bajo condiciones de presión. A continuación, se describen los aspectos principales que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar las distintas componentes de un sistema de alerta temprana.

Predicción de riesgos y emisión de alertas a las autoridades

Esta es la componente más técnica de los sistemas de alerta temprana, aunque cada vez se aplican tecnologías más avanzadas para el resto de las tareas (por ejemplo, el envío masivo de mensajes personalizados a la población expuesta). La predicción de riesgos consiste básicamente en seguir, de manera continua en el tiempo con una frecuencia fija, un procedimiento similar al descrito en el capítulo 3, dependiente de cada tipo de riesgo:

1. Recepción de información en tiempo real de las variables que controlan la amenaza, lo que en el caso de los riesgos de origen hidroclimático implica combinar modelos meteorológicos sinópticos o de meso-escala, con sensores locales como boyas costeras, pluviómetros, limnímetros, etc.
2. Conversión de la predicción de la variable fuente de la amenaza en la variable derivada que determina el riesgo

(por ejemplo, la transformación de la lluvia en niveles del río en un determinado sector o la transformación de un tsunami desde el punto donde se genera hasta la costa). Esta conversión suele requerir modelos numéricos que deben ser previamente calibrados y validados.

3. Pronóstico de riesgos y emisión de alertas a las autoridades. Finalmente, la previsión de amenaza se puede transformar, con procedimientos como los descritos en el capítulo 3, en daños previstos. En función de la previsión de daños, incluida de ser posible la incertidumbre asociada, pueden establecerse niveles de alerta para notificar la situación a las autoridades.

Activación de protocolos de emergencia

Las tareas anteriores no implican aún decisiones que afectan a la sociedad, que deberán ser tomadas por los entes públicos responsables, en ocasiones agrupados en comités intersectoriales de gestión de emergencias. En función del nivel de alerta generado por los sistemas tecnológicos de previsión, debe disponerse de protocolos de emergencia que especifiquen la naturaleza de las medidas adoptadas, desde acciones de comunicación hasta evacuaciones en masa y preparación de lugares de acogida de refugiados, pasando por el cierre de vías de comunicación, puesta a salvo de elementos críticos, petición de ayuda nacional o internacional, etc.

Cabe resaltar que el costo económico (sin olvidar los costos humanos, políticos y de otros tipos) de emitir una alerta pública es alto y, además, está soportado en gran medida por la propia población. Esto pone una presión importante en los responsables de activar los protocolos, que desearán conocer la incertidumbre asociada al sistema tecnológico en que basan sus decisiones, caracterizada por dos tipos de fallo:

- Probabilidad de avisos de riesgos que luego no se materializan (falsos positivos). Es un error que produce costos económicos bajos (en relación con los de una catástrofe), pero el hecho de ser soportados en gran medida por la población y de tener repercusión mediática implica que los costos políticos resulten a menudo elevados. Además,

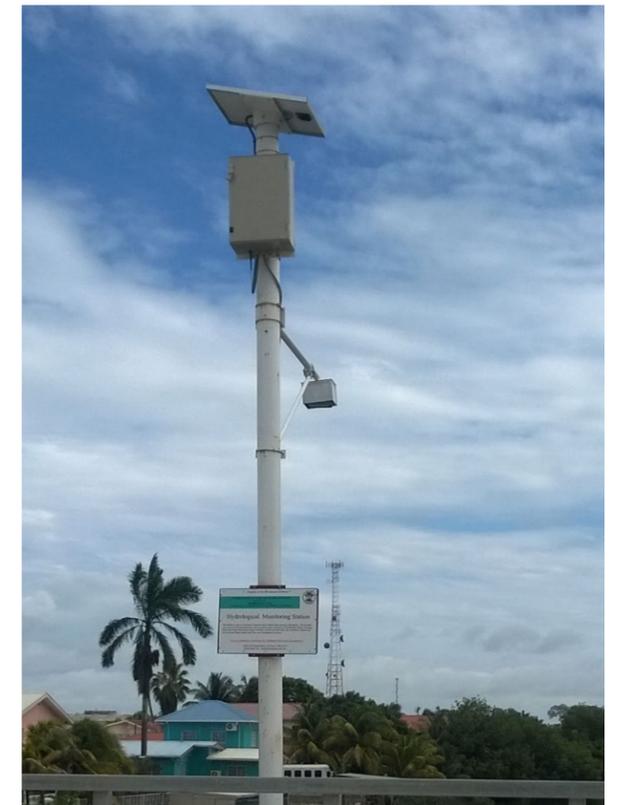
se produce un deterioro de la credibilidad del sistema que afecta la respuesta de la población en sucesos futuros (ver epígrafe siguiente, sobre la componente social de los sistemas de alerta).

- Probabilidad de subestimar o no detectar eventos extremos (falsos negativos). Este fallo es, sin duda, el que más costos económicos conlleva, pero paradójicamente puede implicar menores costos políticos. Asimismo, genera menos desgaste de la credibilidad de los usuarios con respecto al sistema de alertas.

En definitiva, la cuantificación y reducción de la incertidumbre asociada a las predicciones, en los sistemas de alerta temprana, es clave para la toma de decisiones. Para reducir la incertidumbre de las predicciones se debe considerar una combinación de medidas, que incluyen el despliegue de una red de sensores más densa o con mayor resolución, la calibración ad hoc y, de ser posible, con autoaprendizaje continuo de los modelos de procesos que operan de fondo, además de la actualización frecuente de los factores de vulnerabilidad que determinan los riesgos (capas de usos y población).

Preparación y respuesta de la población

Los dos pasos previos, que constituyen las componentes tecnológica e institucional de un sistema de alerta, no podrán alcanzar plenamente sus objetivos de reducción de riesgos si no están apoyados por una tercera componente de carácter social. Una vez emitidos los mensajes de alerta y decididas las acciones pertinentes, la última palabra en materia de riesgos la tienen las personas y su comportamiento en circunstancias extraordinarias, para las que a menudo no han sido preparadas ni física ni mentalmente. La confianza en las instituciones, la idiosincrasia local y el historial de aciertos o falsas alarmas en el sistema de aviso, son algunos de los factores que condicionan que la población obedezca instrucciones en caso de emergencia, o bien decida actuar según criterios propios (individuales o de grupo). En todo caso, la respuesta adecuada de la población ante situaciones de emergencia es un factor importante, que no puede darse por sentado y, en definitiva, un tema en el que se debe



trabajar en el largo plazo como medida preventiva, por medio del empleo de herramientas de formación y preparación frente a desastres.

En los últimos años, aprovechando el acceso generalizado de la población a dispositivos móviles y el auge de las redes sociales, se está avanzando notablemente en lanzar mensajes de riesgo personalizados, según el tipo de desastre, la localización y el perfil de los usuarios, etc. Es indudable que la tecnología y la capacidad de procesar e interpretar grandes cantidades de datos espaciales en tiempo real permitirán avances en la reducción de riesgos por catástrofes. Sin embargo, como ocurre siempre que intervienen factores psicológicos y sociológicos, la complejidad y la impredecibilidad seguirán siendo ingredientes consustanciales a cualquier sistema de gestión de emergencias.

7

Técnicas de evaluación y selección de alternativas—

- 7.1. Marco general para la evaluación y selección de alternativas /216
- 7.2. Análisis coste-beneficio de medidas de reducción de riesgos /222
- 7.3. Métodos semicuantitativos de selección de alternativas /232

7.1 Marco general para la evaluación y selección de alternativas

En la sección 6 se ha presentado y caracterizado un conjunto de medidas de distinta naturaleza para reducir los riesgos hidroclimáticos en ciudades, a modo de catálogo general orientativo. Esta sección se centrará en presentar y describir diversos procedimientos para seleccionar la alternativa más adecuada atendiendo a varios criterios e indicadores. Las técnicas y procedimientos propuestos servirán, a priori, tanto para comparar actuaciones individuales como conjuntos de medidas e incluso planes o programas sectoriales completos. El método general para seleccionar un programa de medidas para la reducción de un tipo de riesgo determinado se puede esquematizar en tres grandes fases de trabajo:

- 1. Identificación de estrategias básicas viables y programas de medidas asociados.** Dada una ciudad con su problemática específica, no es recomendable ni operativo considerar la totalidad de las alternativas descritas en la sección anterior como opciones viables que deban compararse, sino que existe un paso intermedio en el que se descartan una serie de acciones basadas en las condiciones y la experiencia a nivel local. Este filtrado inicial y definición básica de las opciones candidatas para el proceso de selección no sigue un método predefinido, sino que resulta de una valoración holística de la información disponible.
- 2. Análisis, dimensionamiento básico y valoración preliminar de las medidas** asociadas a cada una de las estrategias consideradas. No es posible realizar una comparación y una evaluación de las opciones preseleccionadas sin caracterizar, con cierto detalle, sus rasgos fundamentales: dimensiones principales (en el caso de estructuras o equipamientos), relaciones críticas entre medidas, efectos esperados (grado de mitigación del riesgo y riesgo residual), presupuesto orientativo, plazo, etc.
- 3. Evaluación y comparación sistemática de los programas de medidas seleccionados.** Con la información obtenida en el punto previo se pueden abordar diversos procedimientos formales de análisis y selección de alternativas. Previamente, se debe decidir el

método de selección, teniendo en cuenta las ventajas y limitaciones de cada uno, como se describirá con mayor detalle en los apartados siguientes.

A menudo se tiende a obviar o minimizar el esfuerzo relativo a las dos primeras fases, centrando la atención en las técnicas, en general más regladas, de comparación de alternativas. Sin embargo, la validez y calidad de los resultados de la última fase de trabajo dependen de las anteriores, por lo que se recomienda abordarlas con el mismo rigor, como partes de un único proceso.

El primer paso para establecer un plan de actuación orientado a reducir los riesgos en una ciudad consiste en definir la estrategia o las estrategias de acción posibles, a la vista del diagnóstico que refleja la realidad de la ciudad de estudio, en todas sus facetas (ver sección 5) y, en particular, los mecanismos de construcción de riesgos que han operado históricamente. La estrategia de acción debe ir por delante de cualquier programa de medidas, y, por supuesto, de cualquier actuación específica de reducción de riesgos incluida en un determinado programa. Las estrategias deben definir supuestos y objetivos básicos generales que delimiten el espacio de lo que es factible hacer y de lo que se puede esperar, en materia de reducción de riesgos hidroclimáticos en una ciudad. En la estrategia debe quedar formulado el objetivo de reducción de riesgos, que en ningún caso podrá ser su eliminación completa, y la relación de fuerzas entre los enfoques posibles para conseguirlo: tecnología versus naturalidad, obras versus medidas de planeamiento y gestión, adaptación versus mitigación, etc. Como resultado de un debate con participación de los principales agentes sociales, se debe llegar a un consenso sobre la estrategia de reducción de riesgos adecuada para cada caso concreto; en algunas ciudades, es posible que no se logre un acuerdo y resulten varias estrategias candidatas, que posteriormente serán comparadas.

Cada estrategia definida llevará asociado uno o varios programas de medidas, compuestos por un conjunto de acciones concretas coordinadas orientadas a materializarla (ver *Cuadro 13*). En ocasiones, una estrategia lleva asociado de forma unívoca un paquete de actuaciones, mientras que otras veces existirán varias alternativas para lograr los objetivos, dentro de un marco prefijado. En todo caso,

los programas de medidas asociados a una o varias estrategias deben desglosarse en acciones específicas, que de forma individual deben ser caracterizadas en términos materiales (dimensiones, instalaciones necesarias), de impactos (resultados positivos y negativos esperados), costos, plazos, etc. Los paquetes de medidas preseleccionados y caracterizados, bien correspondientes a una única estrategia o a varias, son los que pasarán al procedimiento final de análisis de alternativas.

La evaluación y comparación sistemática de alternativas puede abordarse desde una perspectiva esencialmente cuantitativa, cualitativa, o una combinación de las dos. Los métodos cuantitativos y semicuantitativos se basan en la maximización (o minimización) de una función objetivo, cuya naturaleza y características específicas forman parte del proceso de decisión. Los tipos de funciones objetivo más comunes son las siguientes:

- **Funciones basadas en parámetros de rentabilidad financiera:** las propiedades (factores positivos y negativos) de cada alternativa se traducen en flujos monetarios distribuidos en el tiempo, de los que se pueden extraer parámetros de rentabilidad, como por ejemplo el valor actualizado neto. De esta forma, todas las alternativas se traducen a una escala unidimensional, que permite ordenarlas según su eficiencia. Este es el enfoque del análisis costo-beneficio o costo-eficacia clásico, que se describe con mayor detalle en el apartado 7.2.
- **Funciones de ponderación de índices de valoración semicuantitativos:** se basan en construir una función que combina, asignando diferentes pesos, diversos aspectos de una alternativa, expresados mediante escalas semicuantitativas (del 1 al 5, por ejemplo). Las valoraciones de los diferentes aspectos de cada alternativa suelen ser resultado de agregar juicios emitidos por un grupo de expertos. Este enfoque suele denominarse de forma genérica como análisis multicriterio y, en la medida en que se produce una interacción y retroalimentación entre los expertos participantes, se aproxima a los métodos Delphi (apartado 7.3).

Finalmente, los métodos cualitativos asumen y preservan la naturaleza multidimensional, y a menudo inconmensurable, de los factores que determinan la bondad de un paquete de medidas de reducción de riesgos. La herramienta básica pasa a ser la comunicación y el debate orientados a acercar las posiciones de los agentes, hasta llegar a un consenso que satisfaga a una mayoría.

En general, el enfoque cualitativo, muchas veces encuadrado en procesos de participación pública, es utilizado durante la primera fase de planificación, en la que se define la estrategia general de resolución del problema. En las fases siguientes, donde se abordan las medidas de manera más concreta, suelen preferirse las técnicas cuantitativas de análisis costo-beneficio y multicriterio. Los paneles de expertos y métodos Delphi son herramientas flexibles y más costosas de implementar, por lo que resultan a priori válidas para todas las fases de decisión, en función de cómo se diseñen en cada caso concreto.

En contra de la percepción general, los métodos cuantitativos y semicuantitativos no resuelven el problema de la subjetividad de manera más satisfactoria que otras técnicas más blandas basadas en la acción comunicativa, sino que tratan de ponerlo en segundo plano. Así, cuando en un análisis costo-beneficio se otorga un valor económico a la vida humana o a un ecosistema, o en los métodos multicriterio se asignan pesos relativos de los factores ambientales frente a los económicos, lo que se hace es simplificar el problema de fondo, desde el paradigma tecnocrático.

En los próximos apartados se describirán con cierto detalle dos técnicas específicas de selección de alternativas, poniendo énfasis en cómo deben ser aplicadas a la reducción de riesgos en ciudades. La exposición se centrará en los métodos más cuantitativos (análisis costo-beneficio y técnicas multicriterio), que implícitamente apuntalan una noción de la planificación como proceso lineal, reglado y de naturaleza predominantemente determinista.

Cuadro 13—

Alternativas para la reducción del riesgo de inundaciones en la ciudad de Belice, Belice

Problemática

Belice es una ciudad costera ubicada en la desembocadura del río del mismo nombre que se encuentra expuesta a tres tipos de inundaciones:

- **Pluvial:** Eventos de lluvia de alta intensidad y corta duración, que resultan en una rápida saturación del sistema de drenaje y que producen inundaciones de unos 30 cm varias veces al año en muchos sectores de la ciudad, causando disturbios graves a los residentes.
- **Fluvial:** Desbordamiento por lluvias prolongadas en la cuenca del río Belice y/o lluvias extremas frecuentemente asociadas con huracanes o tormentas tropicales.
- **Costera:** Sobreelevaciones del nivel del mar causadas por tormentas tropicales, vientos huracanados y bajas presiones que llegan a la costa. La ciudad se encuentra dentro del cinturón de huracanes del Caribe y, en promedio, se ve afectada por un huracán cada 3 años de media.

Como consecuencia de lo anterior, la ciudad ha sufrido serios daños tanto económicos como humanos y se prevé que la situación empeore debido al aumento del nivel del mar por el cambio climático y al proceso de crecimiento demográfico que está sufriendo la ciudad.

Metodología

En cuanto a las medidas de reducción del riesgo, hay dos estrategias diferentes de defensa contra inundaciones en ciudades de este tipo (localizadas en áreas bajas y planas y expuestas a la costa): dragar grandes canales para aumentar la capacidad de drenaje y la cantidad de agua que se puede almacenar o bien construir un pólder (aislar la ciudad mediante diques perimetrales y compuertas para separar el régimen de agua de adentro del de afuera).

Durante mucho tiempo la defensa contra inundaciones en la ciudad de Belice fue confiada a varios canales de grandes dimensiones. La mayoría de las áreas existentes sobre el nivel del mar se han construido en gran parte por el dragado de los canales y el relleno de manglares durante años. Cabe destacar que el área urbanizada ha aumentado en gran medida en las últimas décadas y algunos antiguos canales se han transformado de un canal de pendiente suave a uno de hormigón recto para generar estacionamientos para vehículos y muchos otros han sido enterrados o cubiertos.

La imposibilidad de generar la capacidad necesaria en canales por falta de espacio, junto con el aumento del nivel del mar, hacen que la estrategia de defensa contra inundaciones basada en grandes canales ya no sea adecuada para la ciudad. Por lo tanto, la única manera de reducir los riesgos de inundación en un futuro próximo es pasar de una estrategia de defensa contra inundaciones basada en canales a una basada en sistemas de bombeo. Se trata de un cambio de paradigma con respecto a la situación actual, que requerirá una serie de medidas estructurales y no estructurales de reducción de riesgos y una nueva filosofía de gestión del riesgo de desastres.

Resultados

Para lograr este nuevo paradigma se han propuesto 4 programas de gestión de riesgos. Los tres primeros están relacionados con los tres tipos de riesgos de inundación (fluvial, pluvial y costera) y el cuarto es un programa transversal relacionado con la capacidad de gestionar los riesgos de inundación de acuerdo con este nuevo paradigma.

1. Programa de gestión de riesgo de inundación fluvial

El programa se enfoca en controlar y mitigar los efectos de la inundación fluvial mediante el desvío del río Belice antes de su llegada a la ciudad y consiste en dos acciones:

- **El desvío del río Belice:** Esta obra comprende tres intervenciones diferenciadas, la obra de desvío, que incluye un aliviadero que para controlar el caudal de entrada a la ciudad, y el dragado y la estabilización de dos zonas que constituirán un curso alternativo del río hasta su desembocadura por el sector de manglares.
- **Mota perimetral interior:** Obra fundamental para impedir que el agua desviada vuelva a entrar en la ciudad. Este muro interior es el primer paso para la construcción de un pólder en la ciudad (en situaciones extremas).

2. Programa de gestión de riesgo de inundación pluvial

El programa se centra en controlar y mitigar los efectos de la inundación pluvial en el centro urbano de la ciudad. Para ello se han seleccionado las tres zonas más afectadas por inundaciones de este tipo, y se plantea la instalación de estaciones de bombeo que drenen el agua acumulada en cada evento de inundación por lluvia hasta el mar. Se trata de conectar las zonas bajas mediante una red de canales y extraer el agua de esas zonas.

3. Programa de gestión del riesgo de inundación costera

Este programa se centra en controlar y mitigar el riesgo asociado a la inundación costera y se enfoca en pre-

venir el ingreso de agua de mar y poder soportar una sobreelevación del nivel del mar de entre 10 y 20 años de periodo de retorno (1,5 metros sobre el nivel medio del mar actual). Si la sobreelevación sobrepasa este umbral, en el caso de que ocurra un gran huracán, las medidas propuestas no serán eficaces y se deberán adoptar medidas no estructurales (planes de evacuación). Este programa consiste en dos acciones:

- **Mota perimetral costera:** Este muro, junto con el muro interior, protegerá el área urbana de la sobreelevación del nivel del mar asociada a ciclones tropicales y huracanes.
- **Compuertas:** Se instalarán en todas las salidas de los canales existentes para impedir la entrada de agua durante los eventos de inundación.

4. Programa de desarrollo de capacidades y medidas no estructurales

Este programa tiene como objetivo fortalecer la capacidad de gestión del riesgo en esta nueva estrategia de defensa contra las inundaciones basada en el pólder. Las acciones incluyen:

- Fortalecimiento institucional, incluida la provisión del equipo requerido en una emergencia.
- Revisión y mejora del plan de emergencia local.
- Capacitación en implementación y coordinación para actores clave como el alcalde, bomberos, hospitales, policía y escuelas.
- Fortalecimiento de la comunidad para la preparación y gestión de riesgos.
- Ejercicios anuales con participación ciudadana.



Figura 42 | Localización de las acciones propuestas para cada programa.

El primer paso para establecer un plan de actuación orientado a reducir los riesgos en una ciudad consiste en definir la estrategia o las estrategias de acción posibles, a la vista del diagnóstico que refleja la realidad de la ciudad de estudio, en todas sus facetas (ver sección 5) y, en particular, los mecanismos de construcción de riesgos que han operado históricamente.

7.2 Análisis costo-beneficio de medidas de reducción de riesgos

El análisis costo-beneficio (ACB) es un método cuantitativo de análisis y selección de alternativas en general, y de programas de medidas para la reducción de riesgos en particular, basado en evaluar su eficiencia económica, representada por algún parámetro de rentabilidad financiera; esencialmente, consiste en un balance de beneficios y costos agregados que introduce un factor de preferencia temporal y que otorga más peso a los flujos de caja presentes frente a los futuros. Las técnicas de ACB son herramientas adecuadas para priorizar un conjunto de opciones ante un problema o disyuntiva, en la medida que sus ventajas e inconvenientes sean monetizables, es decir, se les pueda asignar un precio en unidades monetarias para convertirlos en beneficios o costos. En los casos donde las alternativas analizadas incluyen únicamente bienes de mercado convencionales, los precios vigentes se incorporan directamente y es ahí donde el ACB se sitúa en un terreno más firme, a pesar de que siempre existirán fuentes de incertidumbre (por ejemplo, la evolución oferta-demanda, en el marco de la dinámica competitiva en los mercados). Este es el caso de las decisiones empresariales en un contexto microeconómico, donde todo análisis de negocio es, en definitiva, un análisis costo-beneficio; aquí, las tasas de descuento equivalen al costo del capital en los mercados financieros.

La aplicación del ACB para la evaluación de políticas públicas es una práctica extendida, si bien presenta algunas características específicas, que conviene reseñar:

- La determinación de las tasas de descuento aplicables en proyectos ligados a políticas públicas es una tarea más controvertida que en el caso de una empresa o particular.
- Muchos de los efectos, positivos o negativos, de la implementación de una política pública son de naturaleza social, ambiental o incluso cultural, por lo que resultan difíciles de valorar en términos monetarios.
- Incluso los costos y beneficios de naturaleza estrictamente económica derivados de aplicar una determinada política pública, son difíciles de valorar en todas sus dimensiones (costos y beneficios ocultos e indi-

rectos, las denominadas externalidades) bien por falta de información o por la impredecibilidad del sistema del que dependen.

- Las tasas de descuento constantes, basadas en la fórmula del interés compuesto, muestran un descenso exponencial en el tiempo, que hace que los flujos de caja a largo plazo apenas tengan importancia. En términos de políticas públicas, esto implica un sesgo intergeneracional y hace que los proyectos con beneficios o costos alejados del instante presente estén mal representados.
- El análisis costo-beneficio no tiene en cuenta la forma en que se distribuyen los flujos de caja entre los receptores y, por tanto, los aspectos de equidad e igualdad social. Esta omisión tiene particular relevancia al analizar inversiones en países en vías de desarrollo, donde los aspectos distributivos suelen considerarse prioritarios.

Dentro de la evaluación de políticas e inversiones públicas, la aplicación de técnicas de ACB a la evaluación de medidas de reducción de riesgos plantea algunos retos y limitaciones aún más específicas, que se suman a los anteriores. En general, un ACB aplicado a una actuación de reducción de riesgos deberá considerar los siguientes flujos de caja:

- Costos fijos de infraestructuras y sistemas tecnológicos.
- Costos de reubicación y de compensación (pueden incluirse en el presupuesto de las obras).
- Costos variables de mantenimiento y explotación de infraestructuras y sistemas.
- Daños económicos directos sobre edificaciones.
- Daños económicos directos sobre infraestructuras críticas.
- Daños humanos monetizables (por ejemplo, costos de albergue para refugiados).

- Daños indirectos debidos a alteraciones del tráfico.
- Daños indirectos debidos a la interrupción de negocios (lucro cesante).
- Beneficios por generación de plusvalías del suelo, derivadas de las actuaciones previstas.
- Beneficios sociales por generación de empleo y consumo local (normalmente asociados a actividades de construcción).
- Otros beneficios o daños indirectos (turismo, seguridad ciudadana, salud pública, etc.).
- Tasa interna de retorno estándar (TIR) y modificada (TIRM). Es la tasa de descuento que iguala los costos y beneficios descontados ($VAN=0$) y da idea de la rentabilidad interna de la inversión.
- Periodo de recuperación de la inversión. Tiempo necesario para llegar al equilibrio financiero (momento en que la suma de gastos descontados es igual a la suma de ingresos descontados).
- Razón beneficio/costo. Es el cociente entre la suma de ambos conceptos, una vez descontados.

Para acceder a una descripción detallada de estos conceptos y de otros aspectos de la aplicación de las técnicas ACB, el lector puede consultar alguno de los numerosos manuales disponibles (de Rus Mendoza 2004; Sullivan, Wicks, and Luxhoj 2004; Bierman Jr and Smidt 2012). En los siguientes epígrafes se comentarán brevemente ciertos rasgos particulares del ACB aplicado a medidas de reducción de riesgos, con el objetivo de presentar algunas recomendaciones y lecciones aprendidas, derivadas de la experiencia en la ICES. Un ejemplo de aplicación de técnicas ACB en una actuación de reducción de riesgos se presenta en el [Cuadro 14](#).

Como se puede observar, la mayor parte de los flujos de caja son negativos (costos o gastos), debido al hecho de que las actuaciones de reducción de riesgos son, en esencia, medidas defensivas, que tratan de reducir los daños frente a la alternativa nula (no actuar), por lo general sin aspirar a generar beneficios netos (para ello, las plusvalías del suelo y el resto de beneficios indirectos deberían superar la suma de todas las inversiones y gastos de operación). No obstante, es una práctica habitual en los ACB aplicados a proyectos de este tipo considerar la alternativa nula como referencia, y tratar como beneficios (con signo positivo) la reducción de daños que cada alternativa de actuación induce con respecto a ella. Con esta convención, la alternativa nula no genera flujos de caja y su valor actualizado neto (VAN, ver definición más adelante) es cero, lo que evita tener que analizarla y facilita la interpretación de los resultados del resto de alternativas (cualquier alternativa con VAN mayor a cero es superior a la alternativa nula).

Por lo demás, los parámetros de rentabilidad empleados en proyectos de reducción de riesgos, y que sirven para comparar alternativas, son los mismos que se emplean en otros ámbitos:

- Valor actualizado neto. Es la suma de todos los flujos de caja descontados (es decir, expresados en unidades monetarias constantes de un determinado año, que puede ser el de inicio o final de proyecto).

Cuadro 14—

Análisis costo-beneficio de las alternativas de encauzamiento del río Choluteca en Tegucigalpa, Honduras

Problemática

La inundación del centro urbano y del entorno metropolitano de la ciudad de Tegucigalpa constituye uno de los riesgos naturales que afecta de forma más significativa el futuro desarrollo sostenible de esta ciudad. La causa fundamental de dichos problemas debe buscarse en su propio crecimiento desordenado, que ha ido limitando la capacidad hidráulica de los ríos y arroyos que la atraviesan, hasta límites que, actualmente, hacen peligrosa la ocupación de algunas zonas urbanas próximas a ellos. Entre estos cauces cabe destacar el río Choluteca, principal eje fluvial, y un conjunto de barrancos y arroyos de menor entidad.

Metodología

Se ha llevado a cabo un análisis costo-beneficio de las actuaciones estructurales propuestas para el río Choluteca, que incluyen una serie de obras de adecuación del cauce diseñadas para 50 años de periodo de retorno, con el fin de determinar la viabilidad económica de la inversión.

Se ha determinado una zona de influencia de dichas obras para poder estimar de forma adecuada los efectos de las mismas. Este aspecto es especialmente relevante para atribuir a cada actuación los efectos esperados por su implementación.

Se ha calculado el costo de la inversión asociada a las obras para lo cual se han realizado las siguientes consideraciones:

- Las obras relativas al encauzamiento, descontando las partidas del proyecto que están destinadas a la mejora urbana (revegetación de zonas anexas, paseo peatonal, etc.).

- Costos de mantenimiento y explotación: el 1% del importe de la inversión.
- Todas las obras tienen un periodo de construcción de 3 años y una vida útil de al menos 50 años.

Estos costos se ven contrarrestados por los siguientes tipos de beneficio, entendidos en los tres primeros casos como reducción de costos con respecto al escenario sin actuaciones:

- Ahorro en costos de reparación de daños:** Se obtiene al restar los daños medios anuales correspondientes al escenario sin intervención a los daños medios anuales correspondientes al escenario con intervención.
- Reducción de afectaciones al tráfico en días de crecida:** Se obtiene al evitar la congestión de tráfico derivada de la interrupción del funcionamiento de los numerosos puentes que atraviesan tanto el río Choluteca como sus principales afluentes.
- Reducción de los daños directos e indirectos en los mercados cercanos al río:** Se calculan los daños medios anuales que las obras de encauzamiento permitirían evitar, tanto los daños directos como el lucro cesante.
- Reversión a la sociedad local del presupuesto de inversión:** Con base en la experiencia adquirida por el BID en otros proyectos similares, se ha considerado que un 15% del presupuesto de las obras es asimilable a beneficio social, canalizado a la población local a través de creación de empleo directo e indirecto.

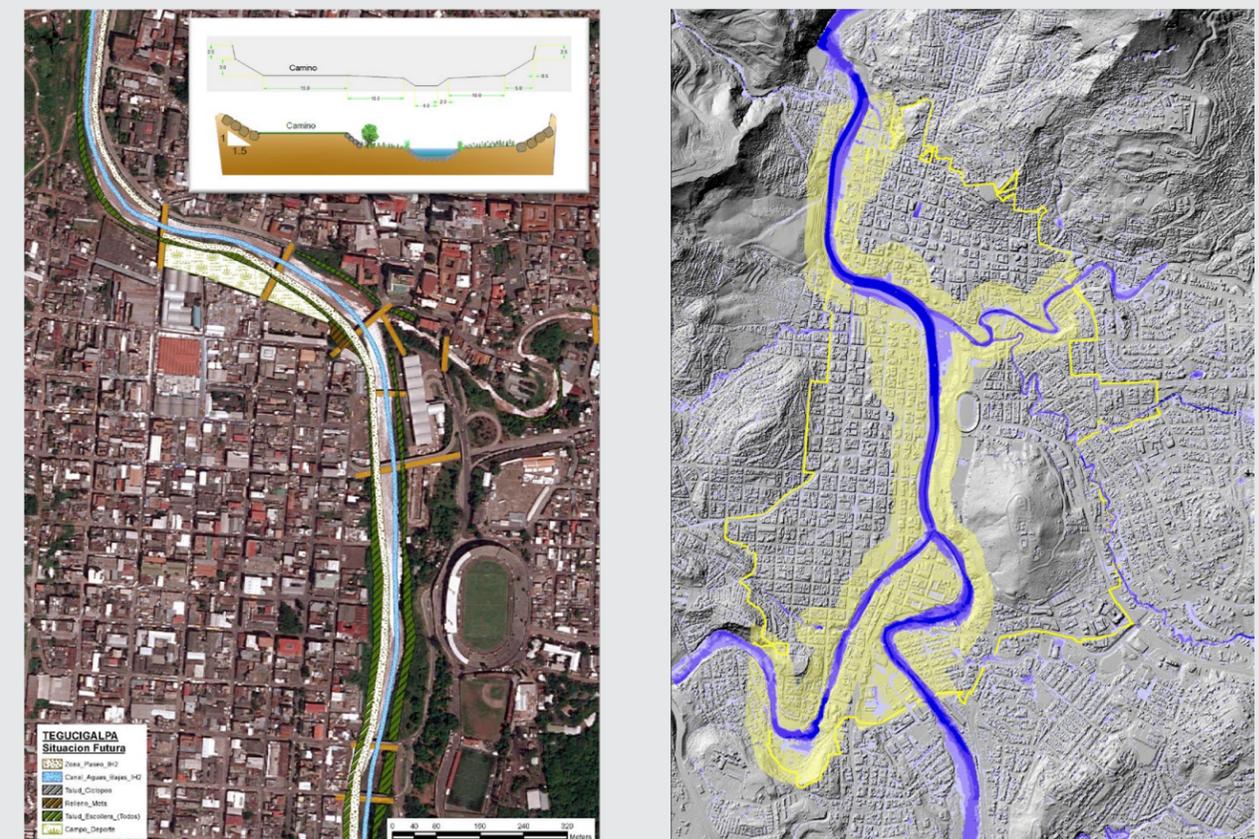


Figura 43 | Esquema de la planta y sección tipo propuesta para el cauce del río Choluteca (izquierda). Área de influencia de las actuaciones (sombreado amarillo), con indicación de los calados máximos para T=50 años en el escenario con intervención 2050 (derecha).

INVERSIONES	INV. CAP.	COSTO EXPLOT.	DURACIÓN	VIDA ÚTIL
DESCRIPCIÓN	(MUSD)	(MUSD /año)	(Años)	(Años)
ENCAUZAMIENTO (OBRA HIDRÁULICA)	12,05	0,12	3	100
ACONDICIONAMIENTO URBANO (BÁSICO)	5,67	0,06	3	50
SEGURIDAD, LIMPIEZA Y PROMOCIÓN	0,10	0,10		
TOTAL	17,82	0,28	3	

Tabla 20 | Valoración de las inversiones asociadas a las obras.

Resultados

La estimación económica de la inversión de las obras de conformación de la nueva sección del río Choluteca se ha valorado de la siguiente manera.

INVERSIONES		
AHORRO EN COSTOS DE REPARACIÓN DE DAÑOS	2,69	MUSD/año
REDUCCIÓN DE DAÑOS POR INTERRUPCIÓN DEL TRÁFICO	0,18	MUSD /año
REDUCCIÓN DE DAÑOS EN LOS MERCADOS	0,0722	MUSD /año
TOTAL BENEFICIOS ANUALES	3,12	MUSD /año
FACTOR BENEFICIO SOCIAL SOBRE INVERSIONES	15%	

Tabla 21 | Beneficios en los diferentes conceptos.

La siguiente tabla resume los beneficios obtenidos para los diversos conceptos considerados.

TASA DE DESCUENTO	12%
TOTAL INVERSIONES DESCONTADAS (INV)	17,8 MUSD
TOTAL BENEFICIOS DESCONTADOS (BEN)	22,5 MUSD
VAN	4,7 MUSD
TIR	15,62%
RETORNO SOBRE LA INVERSIÓN (BEN/INV)	1,26
PERIODO DE EQUILIBRIO	15 años

Tabla 22 | Parámetros de rentabilidad.

Combinando los valores de costos y beneficios anteriores, y aplicando una tasa de descuento del 12%, tal como recomienda el BID para evaluar inversiones, se obtienen los resultados del análisis en forma de parámetros de rentabilidad (VAN, TIR, retorno sobre la inversión

y periodo de equilibrio). Los parámetros de rentabilidad obtenidos son los siguientes.

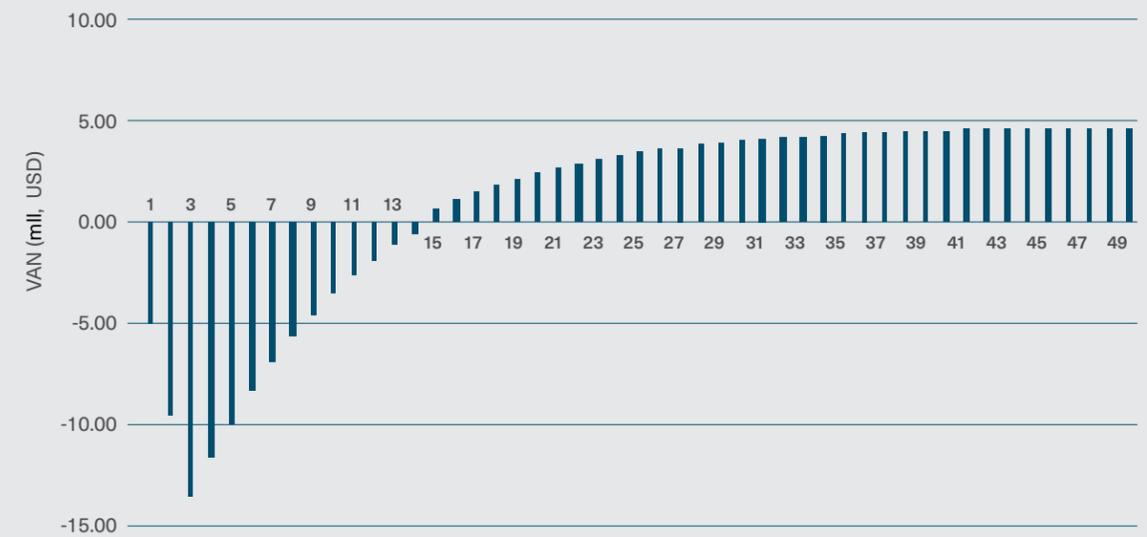


Figura 44 | Evolución del valor actualizado neto de la inversión desde el instante de inicio de las obras.

La actuación de encauzamiento del río Choluteca a su paso por el centro de Tegucigalpa arroja un beneficio neto de 4,7 MUSD, tiene una tasa interna de retorno del 15,6%, por tanto superior a la estipulada por el BID, y un cociente de retorno sobre la inversión de 1,26; el tiempo

necesario para que los beneficios superen los costos acumulados es de 15 años. En la siguiente figura se presentan los flujos de caja acumulados, donde se puede apreciar claramente el instante de equilibrio.

Selección de la tasa de descuento social

La mayoría de los Organismos de Financiación Multilaterales, incluido el BID, así como organismos de diversos países en vías de desarrollo, aconsejan el uso de tasas de descuento social, para la evaluación económica de proyectos, que van entre el 8 y el 15%; en el caso del BID, la tasa adoptada es del 12%, basada en una estimación del costo de oportunidad del capital.

Estas cifras pueden ser válidas para proyectos de escala intrageneracional, con resultados a corto y medio plazo, pero resultan por lo general inadecuadas para los proyectos de reducción de riesgos. El problema del descenso abrupto del factor de descuento basado en el interés compuesto se hace especialmente notorio en los proyectos de este tipo, ya que suelen incluir grandes infraestructuras con vida útil y efectos esperados superiores a un siglo. Por ello, algunos países, sobre todo en el mundo desarrollado, han ido adoptando, para proyectos de larga vida útil, entre ellos los relacionados con cambio climático y agua, tasas de descuento entre el 1 y el 4% (ver un amplio análisis de las prácticas vigentes en Asian Development Bank, 2013). Asimismo, un amplio grupo de expertos en economía ambiental ha recomendado el uso de una tasa de descuento decreciente en el tiempo, para proyectos que afectan a varias generaciones, como ya es de aplicación en algunos países como Reino Unido y Francia (Arrow et al. 2013).

La experiencia acumulada en la ICES invita a adoptar, para proyectos de reducción de riesgos con efectos multidimensionales y de largo plazo, tasas de descuento reducidas (como cifra orientativa, inferiores al 4%) o bien una tasa de descuento decreciente en el tiempo (por ejemplo, de tipo hiperbólico). De lo contrario, cualquier beneficio que no se produzca en la primera década tras la culminación de las obras apenas tendrá reflejo en los indicadores de eficiencia.

Incorporación de los daños humanos y factores de equidad

En los desastres ligados a fenómenos naturales, los daños humanos pueden ser tan importantes como los económicos, especialmente en lugares con altas tasas de pobreza, donde el valor de los activos materiales en riesgo suele ser bajo. Cuantificar este tipo de daños en términos monetarios es controvertido y plantea dilemas morales, pero no tenerlos en cuenta a la hora de discriminar entre diversas alternativas, tampoco resulta satisfactorio.

Existen varias vías metodológicas para resolver esta cuestión, todas ellas válidas a priori, siempre y cuando se expongan con transparencia, como hipótesis de trabajo:

1. Evaluación monetaria del valor de la vida humana. Los muertos y heridos pueden convertirse en dinero siguiendo, al menos, dos vías de razonamiento: 1) como pérdida de productividad económica potencial asociada a la muerte prematura (método del capital humano), y 2) como valor asignado por las empresas aseguradoras a la vida o al daño humano. De esta manera, se incorporan directamente en los flujos de caja del ACB.
2. Cuantificación de los daños humanos mediante una medida no monetaria, como puede ser los años de vida ajustados por discapacidad (en inglés, *disability adjusted life years* o DALY) y el planteamiento de un análisis costo-eficiencia de las diversas alternativas basado en este parámetro, como complemento al análisis costo-beneficio de naturaleza estrictamente monetaria. Así, el ACB se presenta con dos componentes separadas, que no se integran en una única magnitud agregada.
3. No cuantificar directamente los daños humanos, pero introducir un factor de ponderación de los daños económicos (en particular, de los daños sobre edificaciones) que tenga en cuenta el valor perdido en relación con el poder adquisitivo de los afectados. Así, una pérdida de USD 1000 en una vivienda donde la renta media es de USD 2000/año puede ser equivalente a una pérdida 10 veces mayor en una vivienda de personas con elevado poder adquisitivo, y el ACB podría reflejar esta realidad. Con este procedimiento no se está evaluando realmente en daño humano, pero se introduce un factor de equidad en el efecto de las medidas, que corrige parcialmente la invisibilidad de las clases más desfavorecidas en una cuantificación convencional de los daños materiales. Como contrapartida, las cifras de daño ponderadas dejan de reflejar el valor de reposición real de los activos (se trata más bien de un daño equivalente, ajustado por paridad de poder adquisitivo).

Incertidumbre asociada a la secuencia de eventos extremos

Los beneficios más importantes de un conjunto de medidas de reducción de riesgos suelen ser los daños evitados a causa de las acciones propuestas, que se distribuirán en el tiempo de acuerdo con la serie aleatoria, desconocida a priori, de sucesos extremos que tendrá lugar una vez que finalicen las obras (o durante las mismas). El hecho de que la secuencia de sucesos catastróficos sea impredecible tiene gran influencia en los resultados del análisis, debido a la tasa de descuento social, que otorga más importancia a los eventos cercanos. Así, una actuación para neutralizar una inundación de 50 años de periodo de retorno será muy rentable desde la perspectiva del ACB si dicho evento sucede nada más finalizadas las obras, y ruinosa si tarda varias décadas en suceder. El hecho de emplear valores medios anualizados de los daños no resuelve el problema: los indicadores de rentabilidad que resultan de considerar las pérdidas medias anualizadas (o prima pura de riesgo) no son buenos estimadores de la rentabilidad media obtenida por métodos probabilistas.

Como conclusión, un ACB riguroso de un programa de medidas de reducción de riesgos debería tratar de caracterizar la función de densidad de cada alternativa, considerando de manera consistente todas las incertidumbres implicadas, y en particular la secuencia de eventos que se van a mitigar. Cuando se trata con funciones de probabilidad en lugar de valores únicos de rentabilidad, la comparación para elegir la más favorable no es inmediata; un criterio válido en este marco probabilista es el uso del valor en riesgo condicionado como parámetro de rentabilidad (García Alonso et al., 2016).

Evolución conjunta del daño y de los escenarios socioeconómicos

Las técnicas de ACB requieren evaluar a largo plazo tanto la amenaza, incluyendo el efecto del cambio climático, como los factores de vulnerabilidad. Habitualmente, las incertidumbres asociadas a ambas componentes del riesgo se consideran de forma independiente y se definen, por un lado, escenarios de evolución de las variables climáticas y, por otro, escenarios de evolución socioeconómica.

Sin embargo, un examen más minucioso (ver apartado 5.2) pone en evidencia dos bucles de retroalimentación en el tiempo, que relacionan los factores del riesgo:

1. Los daños causados por eventos extremos generan respuestas en el medio físico y socioeconómico, que alteran los factores de vulnerabilidad y, por tanto, las condiciones de riesgo/daños subsiguientes.
2. Los daños derivados de eventos extremos generan respuestas que alteran el medio físico, lo que a su vez modifica los mecanismos físicos de propagación de la amenaza (en inglés, los *pathways*) y, por ende, los factores de amenaza que determinan los riesgos.

Estos mecanismos de coevolución de la amenaza y la vulnerabilidad con el transcurso del tiempo son muy difíciles de modelar e introducen otra fuente de incertidumbre en las predicciones de daño futuro, que es transferida a los flujos de caja en que se basa el ACB. Un ejemplo de estos mecanismos particularmente complejo, al tiempo que relevante a efectos de cuantificación de daños, es el ritmo y el modo de recuperación de las zonas que han sido asoladas por un desastre natural, en ausencia de actuaciones significativas de reducción de riesgos.

Ante el reto de la retroalimentación del sistema socio-urbano y la generación de riesgos, se puede actuar de dos formas antagónicas: 1) redoblar el esfuerzo tecnológico y plantear modelos de ACB que operen de manera dinámica sobre los resultados de modelos de evolución conjunta (y, de ser posible, probabilista) urbanismo-riesgo. Este enfoque es objeto de investigación y comienza a dar resultados interesantes, si bien requiere de muchos datos y es laborioso de aplicar, y 2) poner en segundo plano, al menos para estos fines, el paradigma tecnocrático, tras reconocer sus limitaciones, y abordar el problema como lo que en definitiva es: un debate sobre la naturaleza del proceso histórico, en este caso particularizado a la evolución de las ciudades bajo condiciones de riesgo.

7.3 Métodos semicuantitativos de selección de alternativas

Como alternativa a las técnicas de ACB descritas, que en esencia se basan en reducir el problema a una única dimensión económica, existen un conjunto de métodos que tratan de mantener hasta el último momento la esencia multidimensional del proceso de decisión. Las técnicas de análisis multicriterio (TAM) parten generalmente de conceptualizar un problema en los siguientes elementos:

1. Un conjunto de alternativas A_i , entre las que se quiere seleccionar la más adecuada.
2. Un conjunto de criterios de selección C_i , cada uno con su escala de valoración. Estas escalas pueden ser cuantitativas o cualitativas.
3. Una evaluación de cada alternativa con relación a cada criterio, lo que da como resultado una matriz de evaluación.
4. Unos pesos W_i asociados a dichos criterios, que expresan cuál es la importancia relativa de cada uno en la toma de decisión final. Su suma debe ser la unidad.

Si centramos la discusión en la aplicación de las TAM a medidas de reducción de riesgos, los dos primeros puntos anteriores (alternativas y criterios de selección) suelen venir fijados por los responsables o coordinadores del análisis, mientras que la evaluación de las alternativas y los pesos deben, a priori, ser obtenidos de forma participativa, como resultados intermedios del proceso de decisión.

A continuación, se describen los pasos principales en el desarrollo de un análisis multicriterio, y cómo se relacionan para llegar al objetivo último de seleccionar la alternativa más adecuada.

1. Definición de alternativas

Si bien este tema se ha tratado a lo largo de los capítulos previos, es importante resaltar que para definir unas alternativas desde la perspectiva de las TAM es preciso determinar y diferenciar sus características en relación con los criterios sobre los que se va a basar la

selección (ver punto siguiente). Por tanto, debe haber coherencia y homogeneidad en cuanto a la información aportada en todos los temas que resultan de interés. Esto puede llevar a recabar datos de las alternativas que no estaban incluidos en su caracterización inicial o a completar los estudios disponibles para cubrir aspectos no analizados.

2. Definición de criterios de selección

Se deben abordar dos problemas relacionados, la selección de los criterios y la definición de las unidades de medida de dichos criterios. En cuanto al primero, en los estudios de riesgo es habitual identificar como los más relevantes algunos de los siguientes criterios:

Criterios de funcionalidad:

- Eficiencia en la reducción de riesgos económicos.
- Eficiencia en la reducción de riesgos humanos.
- Vulnerabilidad del diseño frente al cambio climático.
- Tiempo de implementación necesario.
- Riesgos de implementación (construcción en el caso de obras).
- Riesgos tecnológicos y probabilidad de fallo en fase de operación.
- Vida útil.
- Posibilidad de usos alternativos.

Criterios económicos:

- Retorno de la inversión.
- Periodo de equilibrio de la inversión.
- Efecto redistributivo de la inversión.

Otros criterios:

- Impacto ambiental.
- Valoración y percepción social.
- Afectación al entorno urbano y grado de integración con el planeamiento.

Sinergias con otras actuaciones en marcha.

Los criterios seleccionados deben ir acompañados de escalas de valoración cualitativa o cuantitativa que, en última instancia, deben ser comparables entre sí. Esto equivale, en definitiva, al problema de la conversión de índices en niveles de riesgo, tal y como se recoge en el apartado 5.3. Puesto que en este caso no se parte, por lo general, de información de partida en forma de índices para todos los criterios seleccionados, y teniendo en cuenta que algunos de los criterios pueden no ser cuantificables, lo habitual, en este contexto, es definir una escala cualitativa común para todos los criterios (por ejemplo, del 1 al 5, como en el apartado 5.3, o del 1 al 10). Finalmente, cabe apuntar que, al introducir un alto número de criterios en el proceso de decisión, se incrementa de manera proporcional la información requerida para evaluarlos.

3. Evaluación de las alternativas y pesos

Esta es la actividad clave del proceso de decisión, en la que se pueden introducir numerosas variantes, según la cantidad y el perfil de los agentes implicados. En primer lugar, debe garantizarse que el grupo de participantes tenga un nivel homogéneo y suficiente de conocimiento de la información de partida, en la que se apoyarán sus juicios. Esta condición básica no se cumple de manera automática en muchos casos, en especial cuando se organizan procesos participativos abiertos, con numerosos agentes sociales implicados. Además, se debe intentar conformar un grupo de evaluación en el que estén representados de manera aproximadamente homogénea todos los sectores de actividad, si se trata de participación pública general, y de todas las áreas de especialidad relacionadas con el problema, en el caso de un panel de expertos. Se deben evitar los sesgos en la evaluación de alternativas, derivados de la existencia de mayorías de un determinado perfil de agentes sociales o de especialistas. Las técnicas disponibles para obtener las evaluaciones son muy variadas, ya sólo en cuanto a formato:

- Encuestas personales.
- Llamadas telefónicas.

- Cuestionarios en línea o en papel.
- Reuniones presenciales en las que se completen cuestionarios o se utilicen otras técnicas.

Más allá del formato de la participación, las técnicas para recabar las evaluaciones pueden ser simples (unidireccionales) o bien tener cierto grado de retroalimentación; por ejemplo, en dos vueltas, una primera para emitir un primer juicio, y una segunda para validarlo, a la vista de otras evaluaciones. Estos procedimientos son más complejos y conducen a los denominados métodos Delphi (Linstone and Turoff 1975), que pueden incluir debates y otros instrumentos de interacción.

Habitualmente, la evaluación de las distintas alternativas se realiza de forma secuencial e independiente, según los criterios seleccionados y la asignación de los pesos relativos a dichos criterios. En lo que se refiere a los pesos, se suele buscar un consenso entre los agentes que participan en el proceso, con el fin de fijar unos valores, que en caso de controversia tienden a ser similares, para equilibrar las diferentes facetas del problema. En cuanto a las valoraciones según cada criterio, también es deseable alcanzar consensos, pero suele resultar más problemático y requiere de más tiempo. Por ello, frecuentemente se recogen todas las opiniones, asociadas a individuos o colectivos, y se hace un análisis estadístico de los resultados.

Algunas aplicaciones de TAM introducen los pesos relativos de los criterios de decisión como factores impuestos técnicamente, dejando sólo como parámetros libres la valoración de las alternativas con relación a ellos. Esto introduce un sesgo muy marcado en los resultados, y resta capacidad a los agentes participantes para aportar su visión de la realidad, con su correspondiente jerarquía de valores no predefinible.

4. Análisis de resultados y presentación de la alternativa seleccionada

Tras las tareas anteriores, se pueden combinar los pesos y las puntuaciones medias de cada factor para llegar a una valoración final de cada alternativa en una escala única y acotada, de tal manera que la opción con

mayor puntuación es la que, en teoría, satisface mejor los requisitos buscados. Es importante analizar y valorar los resultados obtenidos, realizando algunas comprobaciones para evitar inconsistencias o efectos indeseados:

- Sensibilidad del resultado óptimo a los pesos relativos asignados a los criterios. Se recomienda aplicar un sencillo análisis de sensibilidad, empleando otras familias de pesos aceptables, para comprobar que la solución obtenida no es demasiado sensible a ellos y, por tanto, inestable.
- Polarización de las posiciones. Si los resultados de evaluación por criterios se han obtenido promediando las aportaciones de diversos agentes, es posible que una conclusión determinada (por ejemplo, que el impacto ambiental de una alternativa es intermedio) no refleje una opinión dominante (nadie cree que dicho impacto es intermedio), sino que resulte de combinar dos grandes grupos opuestos (un grupo considera el impacto muy alto, y el otro, muy bajo) que se neutralizan al calcular la media. Esta circunstancia requiere consenso, antes de seguir adelante. En general, siempre que la desviación típica de las posiciones respecto a un aspecto de alguna alternativa sea alta, deberá revisarse el resultado, y, si es preciso, reabrir el debate.

En los estudios de la ICES se han combinado las técnicas de análisis costo-beneficio y multicriterio para identificar la alternativa más adecuada. Generalmente, el ACB es una herramienta más técnica y, como tal, se suele incluir en los estudios base, como prolongación natural de los resultados de riesgo cuantitativo. Sin embargo, en el ACB no resulta sencillo incorporar elementos de participación pública, aunque sí permite incluir resultados de encuestas o datos de campo para mejorar la estimación del valor monetario de ciertos activos. Las TAM tienen la ventaja, frente al ACB, de permitir integrarse de forma natural en los procesos de participación pública y talleres de dinamización social. El hecho de homogeneizar y combinar escalas de valoración de alternativas frente a diversos criterios, tal y como operan las TAM, permite tender un puente de apariencia sólida entre los resultados técnicos y el lenguaje coloquial de cualquier tipo de personas (por ejemplo: la actuación X sería muy favorable, o poco favorable, para resolver la inundación del barrio Y). No obstante, bajo esta aparente confluencia de elementos técnicos y de participación pública, subyace el problema de la representatividad y comparabilidad de opiniones que proceden de fuentes tan diversas, con niveles de conocimiento muy dispares.

Las técnicas de ACB requieren evaluar a largo plazo tanto la amenaza, incluyendo el efecto del cambio climático, como los factores de vulnerabilidad.



Conclusiones —

Las aglomeraciones urbanas de América Latina y el Caribe, con su amplia variedad de climas, paisajes y condiciones socioeconómicas, presentan una creciente tendencia a experimentar desastres naturales. Inundaciones y huracanes producen anualmente cuantiosos daños en la región, agudizando las diferencias sociales y, en definitiva, limitando o impidiendo el desarrollo económico y social de los países. La problemática se agudiza con el cambio climático.

Este documento ha intentado presentar de manera sistemática un procedimiento metodológico para abordar estudios de riesgo de fuentes hidroclimáticas en ciudades, con especial énfasis en el cambio climático y lo que éste representa desde una perspectiva de reducción de riesgos. Las técnicas y herramientas propuestas han sido utilizadas en los estudios de numerosas ciudades pertenecientes a la red de Ciudades Emergentes y Sostenibles (2011-2018), una iniciativa innovadora del Banco Interamericano de Desarrollo para fortalecer la gobernanza y la capacidad de adaptación de algunas de las ciudades más dinámicas de ALC, que se propuso abordar los problemas asociados al desarrollo antes de que su escala los vuelva incontrolables.

Mediante cuadros de ejemplos de aplicación de los métodos de trabajo presentados, el documento hace un recorrido por esta diversa región del mundo, desde ciudades andinas que se abastecen de glaciares en vías de desaparición, a zonas edificadas sobre antiguos manglares y expuestas a la acción de los huracanes, pasando por asentamientos ribereños vertebrados por grandes ríos capaces de cambiar su curso y recuperar el espacio que les pertenece. Tras un periplo por tan variados lugares y territorios, al viajero le quedan impresiones y sentimientos contrapuestos a la hora de pasar en limpio su cuaderno de viaje. Por un lado, quedan patentes las grandes oportunidades de este subcontinente para superar la trampa de los ingresos intermedios que lo han caracterizado durante las últimas décadas. Esas oportu-

nidades radican principalmente en la correcta administración de los recursos naturales, incluido el manejo de las catástrofes, y en la canalización del capital humano sustentado por una población relativamente joven, diversa y cada vez mejor educada. No obstante, cabe reconocer también que la visión de conjunto es abrumadora por la variedad y abundancia de los ecosistemas físicos e ideológicos que se encuentran en esta región, hasta tal punto que parecería pretencioso clasificar u ordenar esta realidad, así como proponer modelos y recetas generales que sean válidos para todos los lugares visitados. Esta dicotomía se ha trasladado a la metodología descrita combinando dos enfoques que habitualmente se presentan de forma aislada pero que comparten cada vez más espacio de debate: el técnico y el humanista, entendiéndose por este último término todo lo que puedan aportar las ciencias positivas.

La hibridación del enfoque técnico con el de las ciencias positivas no implica una mezcla indiscriminada de conceptos y no debe inducir a confusión. En efecto, los estudios de riesgos deben aprovechar el rigor que aporta la ciencia a la hora de explicar los procesos físicos, desde el clima y sus alteraciones, hasta el mecanismo de rotura de un dique o la propagación del agua en una zona urbana. Los técnicos pueden y deben aportar su conocimiento en los estudios de riesgos para diagnosticar la magnitud, la tendencia y el modo de presentación de los fenómenos naturales, y son además los responsables de definir las características de las infraestructuras más adecuadas para reducirlos, en el caso de que se requieran. Sin embargo, el enfoque técnico tiene claras limitaciones a la hora de entender los mecanismos y procesos históricos que están generando los riesgos, que a su vez aportan las claves para diseñar los programas de medidas para reducirlos. También existen limitaciones en la capacidad para llevar a cabo aquellas tareas fundamentales que se encuentran fuera del ámbito de la ingeniería: modificaciones del marco normativo, reformas del

mapa institucional o la revisión del tipo de mensajes que las administraciones públicas envían a la sociedad, con vistas a reducir los riesgos.

Cada vez hay más vías de acercamiento entre disciplinas y enfoques para mejorar los estudios de riesgo y la propuesta de intervenciones. Las infraestructuras verdes, o soluciones basadas en ecosistemas, se están popularizando progresivamente y han obligado a los ingenieros tradicionales a salir de su zona de confort, para dialogar con biólogos, ecólogos y arquitectos-paisajistas. Los sociólogos y economistas están avanzando en identificar los patrones que rigen la toma de decisiones (económicas o de otro tipo) de las personas, que incluyen una alta componente de irracionalidad, y cómo se puede fomentar la coherencia en la conducta de los ciudadanos a través de acciones y mensajes oportunos. Las tecnologías de la información y la comunicación permiten, al día de hoy, transmitir mensajes en tiempo real a grupos de personas definidos de forma dinámica según criterios de ubicación, lugar de residencia, edad, tipo de vivienda, etc. Gran parte del potencial de las nuevas tecnologías todavía no ha sido plenamente aplicado a la reducción de riesgos, y es de esperar que en las próximas décadas se produzcan avances significativos en este sentido, tanto en sistemas de alerta temprana como en aplicaciones para facilitar las operaciones de evacuación y asistencia post-desastre.

Para atender a las demandas de las sociedades modernas en un contexto de clima cambiante, los técnicos formados en el paradigma determinista de la gestión de riesgos tendrán que actualizarse con técnicas estadísticas cada vez más complejas para incorporar la incertidumbre en sus cálculos, sin renunciar a la cuantificación de los fenómenos. Por ello, otro tema recurrente en este documento es el tratamiento de la aleatoriedad de los fenómenos naturales y la forma de suplir el conocimiento incompleto sobre algunos de los factores que determinan los riesgos y condicionan la eficacia de las medidas para reducirlos. En última instancia, aunque se adopten enfoques probabilistas siempre existirá una incertidumbre no acotable en los datos y en los modelos numéricos, que hará que la validez de los resultados esté condicionada a unas hipótesis de partida.

Una conclusión implícita de lo expuesto en estas páginas es que las causas, así como las posibles soluciones, de los riesgos urbanos se encuentran casi siempre fuera de los lugares afectados, y a menudo fuera incluso de las propias ciudades. Por tanto, debe adoptarse un enfoque de sistemas, en lugar de tratar de resolver los problemas interviniendo directamente en las zonas expuestas.

En la región de ALC, como en otros lugares, los daños por desastres naturales y la pobreza suelen ir de la mano. La reducción de la pobreza y del riesgo están intrínsecamente ligados y, a su vez, es práctico pensar en la reducción de riesgos como una herramienta sectorial, cuyo fin es evitar que la penuria económica se vea agravada por otras calamidades. La pobreza sitúa a las personas en condiciones de desventaja para luchar contra las catástrofes naturales. Asimismo, es importante indagar en los procesos de toma de decisiones y el rango de acción que pueda tener la población. Decisiones como las de asentarse en una ladera inestable o en la ribera de un río resultan ser críticas desde el punto de vista de los riesgos urbanos y responden a una racionalidad circunscrita a un contexto sobre el que es necesario indagar.

Los fenómenos naturales han moldeado la mentalidad de las distintas civilizaciones con el correr del tiempo, sus sistemas de gobierno, sus religiones y sus costumbres; cataclismos o procesos hidrogeológicos de desarrollo lento han determinado el ascenso y la decadencia de grandes imperios. Hoy en día, sociedades cada vez más globalizadas, tecnificadas y mayoritariamente urbanas, se enfrentan por primera vez en la historia de la humanidad al desafío de un cambio acelerado del clima a escala planetaria, con consecuencias en parte impredecibles. Esperamos este documento sea de utilidad para resaltar la urgencia de la situación y aportar a los gobiernos nacionales, municipales y demás instituciones y agentes involucrados una serie de criterios y directrices básicos para afrontar sus responsabilidades en esta nueva era y avanzar hacia ciudades y comunidades más sostenibles y resilientes. —

Índice de figuras —

Figura 1 |

Mapa-guía de contenidos del documento / 22

Figura 2 |

Ejemplo de la determinación del ámbito de estudio para la amenaza por inundación en Cusco, Perú / 27

Figura 3 |

Esquema amenaza-exposición-vulnerabilidad-riesgo / 28

Figura 4 |

El panel situado a la izquierda muestra las tormentas tropicales que pasaron a una distancia menor de 300 km de Campeche entre 1950 hasta la actualidad. El panel de la derecha muestra los miles de eventos sintéticos simulados a partir de los históricos / 33

Figura 5 |

Campo especial de viento, oleaje, marea de tormenta y precipitación para un instante concreto de ciclón tropical Gilbert 1988 / 34

Figura 6 |

El panel situado a la izquierda muestra la clasificación en 16 tipos de tiempo de la temperatura superficial del mar para el Atlántico Norte. El panel de la derecha muestra su actividad ciclónica asociada / 36

Figura 7 |

Cambio en la probabilidad de ocurrencia para cada uno de los 16 tipos de tiempo y para los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. En la figura se muestran dos periodos horizonte, uno de medio plazo centrado en 2050 y otro de largo plazo centrado en 2085 / 38

Figura 8 |

Mapas espaciales de inundación para los periodos de retorno de 10 y 100 años para el escenario RCP4.5 y para el periodo temporal centrado en el año 2050 / 40

Figura 9 |

Ejemplo de estructura de evaluación de riesgos humanos para el escenario actual y los dos escenarios de crecimiento considerados (tendencial y Smart) en Quetzaltenango, Guatemala / 45

Figura 10 |

Ejemplo de MDT ASTER de 30x30 m de resolución utilizado para el área de influencia en Huancayo, Perú / 47

Figura 11 |

Ejemplo de MDT de detalle de 2x2 m de resolución realizado a partir de pares estereoscópicos utilizado para las áreas priorizados y de expansión en Huancayo, Perú / 50

Figura 12 |

Ejemplo de la distribución geográfica de las edificaciones en función de su calidad constructiva (izquierda). Ejemplo de mapa de densidad de población utilizado en Santa Marta, Colombia (derecha) / 56

Figura 13 |

Ejemplo de la distribución geográfica de las infraestructuras críticas, Santa Marta, Colombia. / 57

Figura 14 |

Ejemplo de mapa de cotas máximas y velocidades para un evento de inundación de T=100 años, en el área priorizada de Tegucigalpa, Honduras / 64

Figura 15 |

Resultados de los campos de viento a diferente altura para un viento norte de 150 Km/h. Los colores corresponden al valor del módulo de la velocidad del viento / 71

Figura 16 |

Evolución de la posición de la línea de costa a partir de imágenes LANDSAT / 79

Figura 17 |

Retroceso total de la posición de la línea de costa en la zona de estudio, para los años 2030 y 2050 según escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 y transporte antrópico w / 79

Figura 18 |

Curvas IDF obtenidas para la Ciudad de Belice en situación actual / 85

Figura 19 |

Patrones representativos de SSTI (índice de temperatura superficial del mar) ordenados según su semejanza. El morado corresponde a las zonas donde el SSTI se acerca a 1 y por lo tanto existe mayor probabilidad de que se generen ciclones / 87

Figura 20 |

Génesis de los ciclones tropicales seleccionados en cada patrón sinóptico de ISST. / 88

Figura 21 |

Calentamiento vs. emisiones acumuladas de CO₂-eq. Se observan las cuatro trayectorias de concentración representativas (RCP). Tomado de IPCC 2014 / 91

Figura 22 |

Ejemplo de mapa de exposición física de las edificaciones según su calidad constructiva frente a inundaciones en Cusco, Perú / 96

Figura 23 |

Ejemplo de mapa de exposición humana frente a inundaciones en Tegucigalpa, Honduras / 97

Figura 24 |

Funciones de pérdida de servicio / 105

Figura 25 |

Funciones de daño para calcular los riesgos de inundación / 106

Figura 26 |

Daños económicos por inundaciones en Xalapa (México) para un periodo de retorno de 10 años / 108

Figura 27 |

Ejemplo de función de vulnerabilidad funcional para un edificio público / 113

Figura 28 |

Pérdida de vidas humanas T100 años / 119

Figura 29 |

Ubicación de las comunidades en la Laguna Los Patos / 121

Figura 30 |

Ejemplo de árbol lógico para el cálculo de los daños económicos por inundación fluvial con incertidumbre / 132

Figura 31 |

Evolución del área glaciar y las aportaciones medias del nevado Huaytapallana en la cuenca del Shullcas, según el modelo propuesto / 141

Figura 32 |

Serie de aportaciones medidas y simuladas durante el periodo de calibración (izquierda). Modelo convencional, considerando únicamente las aportaciones pluviales (derecha). Modelo combinado de aportaciones pluvio-glaciares / 142

Figura 33 |

Serie de aportaciones obtenidas en la cuenca del río Shullcas. Año horizonte 2030 (izquierda) y 2050 (derecha) / 146

Figura 34 |

Diferentes escenarios de cálculo (Situaciones 1-4) / 162

Figura 35 |

Perfil longitudinal que muestra los niveles de inundación en las Situaciones 1-4 / 164

Figura 36 |

Esquema general para definir mecanismos de construcción de riesgo / 167

Figura 37 |

Localización y esquema de las tres zonas de actuación / 199

Figura 38 |

Sección tipo para la zanja drenante (izquierda). Detalle cancha deportiva- deposito. Zona 1 (derecha) / 200

Figura 39 |

Asentamientos informales dentro del parque litoral de la Laguna de los Patos, Cumaná, Venezuela / 203

Figura 40 |

Arrastre de sedimentos y residuos en el Hoyo de Puchula (izquierda) y Hoyo de Bartola (derecha) en Santiago de los Caballeros, República Dominicana / 206

Figura 41 |

Acumulación de residuos en el canal Los Molinos y de la Llanada en Cumaná (Venezuela) / 208

Figura 42 |

Localización de las acciones propuestas para cada programa / 220

Figura 43 |

Esquema de la planta y sección tipo propuesta para el cauce del río Choluteca (izquierda). Área de influencia de las actuaciones (sombreado amarillo), con indicación de los calados máximos para T=50 años en el escenario con intervención 2050 (derecha) / 225

Figura 44 |

Evolución del valor actualizado neto de la inversión desde el instante de inicio de las obras / 229

Indice de tablas —

Tabla 1 |

Caracterización de los eventos de cálculo asociados a los riesgos analizados de evolución rápida / 30

Tabla 2 |

Datos topográficos necesarios para los estudios de riesgos / 48

Tabla 3 |

Datos de caracterización física del territorio en los estudios de riesgos / 49

Tabla 4 |

Datos hidroclimáticos recomendados para el estudio de las diferentes amenazas / 53

Tabla 5 |

Factores de cambio en la ciudad de Belice para distintos horizontes, escenarios de emisiones y periodos de retorno, obtenidos a partir de ajuste local de la base de datos NEX-GDDP / 85

Tabla 6 |

Parámetros de exposición más habituales / 94

Tabla 7 |

Esquema de tipos de valor, a efectos de aplicar las diferentes funciones de daño adimensional, en función del tipo de activos que agrupan / 102

Tabla 8 |

Subsistemas más comunes para caracterizar el metabolismo urbano y su flujo representativo asociado / 111

Tabla 9 |

Comunidades de la Laguna de Los Patos. Tipo de discapacidad. Fuente: Censo en La Malagueña, febrero 2017 / 122

Tabla 10 |

Comunidades de la Laguna de Los Patos. Tipo de enfermedad. Fuente: Censo en La Malagueña, febrero 2017 / 124

Tabla 11 |

Resumen de los datos y parámetros de calibración más comunes en los cálculos de riesgo / 129

Tabla 12 |

Tabla 12. Escenarios de cambio climático RCP 4.5 (2030 y 2050) / 144

Tabla 13 |

Resumen resultados de las aportaciones para los diferentes escenarios / 145

Tabla 14 |

Secuencia de incremento de niveles entre la situación 1 y 4 / 161

Tabla 15 |

Escala genérica de niveles de riesgo cualitativo / 187

Tabla 16 |

Resumen de los principales índices de riesgo empleados / 188

Tabla 17 |

Valores umbral de los índices de pérdidas económicas y daños en sectores críticos, para obtener los niveles de riesgo / 189

Tabla 18 |

Valores umbral de los índices de daños humanos para obtener los niveles de riesgo / 189

Tabla 19 |

Costos de afectación al tráfico / 211

Tabla 20 |

Valoración de las inversiones asociadas a las obras / 226

Tabla 21 |

Beneficios en los diferentes conceptos / 227

Tabla 22 |

Parámetros de rentabilidad / 228

Acrónimos —

ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CES	Ciudades Emergentes y Sostenibles
ENOS	El Niño Oscilación Sur
FEF	Factor de Exposición al Flujo
GCM	General Circulation Model
GPM	Global Precipitation Measurement
GEI	Gases de efecto invernadero
HURDAT	HURricane DATabase
IBTrACS	International Best Track Archive for Climate Stewardship
IC	Infraestructuras Críticas
ICES	Iniciativa de Ciudades Emergentes Sostenibles
IDF	Intensidad-Duración-Frecuencia
IFSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ALC	América Latina y el Caribe
LIDAR	Laser Imaging Detection and Ranging
MCR	Mecanismos de Construcción del Riesgo
MDT	Modelo Digital del Terreno
MUSD	Millones de Dólares Estadounidenses
NEX-GDDP	Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OMC	Organización Mundial del Comercio
OMS	Organización Mundial de la Salud
PER	Población en riesgo
PIB	Producto Interior Bruto
PAE	Pérdida Anual Esperada

PMP	Pérdida Máxima Probable
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
SCS	Soil Conservation Service
SIG	Sistema de Información Geográfica
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SST	Sea Surface Temperature
RCM	Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathway
TIR	Tasa Interna de Retorno
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
UNICEF	United Nations International Children's Emergency Fund
VAN	Valor Actualizado Neto
VC	Valor de Construcción
VE	Valor de Equipamientos
VI	Valor de Instalaciones
VM	Valor del Mercado inmobiliario
VRC	Valor en Riesgo frente a Colapso (inundación o vendaval)
VRSC	Valor en Riesgo para inundación lenta o viento Sin Colapso
VS	Valor del Suelo
VV	Valor del stock de Viviendas

Referencias —

Annaka, T. et al. (2007) 'Logic-tree approach for Probabilistic Tsunami Hazard Analysis and its applications to the Japanese coasts', *Pure and Applied Geophysics*, 164(2-3), pp. 577-592. doi: 10.1007/s00024-006-0174-3.

Asian Development Bank. 2012. Handbook on Poverty and Social Analysis - A Working Document.

Asian Development Bank. 2013. Cost-Benefit Analysis for Development: A Practical Guide. <https://www.adb.org/documents/cost-benefit-analysis-development-practical-guide>.

Asian Development Bank. 2014. Guidance Note: Poverty and Social Dimensions in Urban Projects.

Arrow, K., M. Cropper, C. Gollier, B. Groom, G. Heal, R. Newell, W. Nordhaus, et al. 2013. "Determining Benefits and Costs for Future Generations." *Science* 341 (6144).

Batts, M. E., Simiu, E. and Russell, L. R. (1980) 'Hurricane wind speeds in the United States', *Journal of the Structural Division. ASCE*, 106(10), pp. 2001-2016.

Banco Mundial. 2015. Informe Sobre El Desarrollo Mundial MENTE, SOCIEDAD Y CONDUCTA. <http://ibce.org.bo/images/publicaciones/Informe-Desarrollo-Mundial-2015-Banco-Mundial.pdf>.

Beven, K. J. (2012) Rainfall-runoff modelling : the primer. Wiley.

Bierman Jr, Harold, and Seymour Smidt. 2012. The Capital Budgeting Decision: Economic Analysis of Investment Projects. Routledge.

Blaikie, Piers, Terry Cannon, Ian Davis, and Ben Wisner. 2014. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. Routledge.

Bretschneider, C. L. (1990) 'Tropical cyclones', *Handbook of coastal and ocean engineering*. Gulf Publishing, 1, pp. 249-370.

Cai, W. et al. (2014) 'Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming', *Nature Climate Change. Nature Research*, 4(2), pp. 111-116. doi: 10.1038/nclimate2100.

Chow, V. Te (1964) Handbook of applied hydrology.

Clark, M. P. et al. (2016) 'Characterizing uncertainty of the hydrologic impacts of climate change', *Current Climate Change Reports*. Springer, 2(2), pp. 55-64.

Cunge, J. A., Holly, F. M. and Verwey, A. (1980) 'Practical aspects of computational river hydraulics'. Pitman publishing.

Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (2004) Coastal processes with engineering applications. Cambridge University Press.

de Rus Mendoza, Ginés. 2004. Análisis Coste-Beneficio: Evaluación Económica de Políticas Y Proyectos de Inversión. Ariel.

Forman, R. T. T. (2008) Urban Regions: Ecology and Planning Beyond the City (Cambridge Studies in Landscape Ecology), Cambridge University Press New York. doi: 10.1017/CBO9780511754982.

Fowler, H. J., Blenkinsop, S. and Tebaldi, C. (2007) 'Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling', *International journal of climatology*. Wiley Online Library, 27(12), pp. 1547-1578.

Fritzsche, Kerstin, Schneiderbauer, Stefan, Bubeck, Philip, Kienberger, Stefan, Mareike Buth, Zebisch, Marc y Kahlenborn, Walter 2014: El Libro de la Vulnerabilidad: Concepto y lineamientos para la evaluación estandarizada de la vulnerabilidad. Bonn y Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Garcia Alonso, Eduardo, Jorge Rojo, César Álvarez, Pedro Díaz, and Roberto Mínguez. 2016. "Design Criteria for Flood-Defense Structures Based on Probabilistic Cost-Benefit Optimization with Value at Risk (VaR) Methods. Application to the Choluteca River in Tegucigalpa (Honduras)." Edited by M. Lang, F. Klijn, and P. Samuels. E3S Web of Conferences 7 (October). EDP Sciences: 20001. doi:10.1051/e3sconf/20160720001.

Gould, Stephen Jay, and Elisabeth S. Vrba. 1982. "Exaptation—a Missing Term in the Science of Form." *Paleobiology* 8 (1): 4-15. doi:10.1017/S0094837300004310.

Gutmann, E. et al. (2014) 'An intercomparison of statistical downscaling methods used for water resource assessments in the United States', *Water Resources Research*. Wiley Online Library, 50(9), pp. 7167-7186.

Hallegatte, Stephane, Mook Bangalore, Laura Bonzanigo, Marianne Fay, Ulf Narloch, Julie Rozenberg, and Adrien Vogt-Schilb. 2014. "Climate Change and Poverty: An Analytical Framework." Policy Research Working Paper 7126. World Bank, no. November. http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2531160.

Harari, Yuval Noah. 2016. Homo Deus: A Brief History of Tomorrow. Random House.

Holland, G. J. (1980) 'An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes', *Monthly weather review*, 108(8), pp. 1212-1218.

IPCC (2014) 'Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers', Ippc, p. 31. doi: 10.1017/CBO9781107415324.

Izaguirre, C., Losada, I. J., Espejo, A., Diez-Sierra, J., and Díaz-Simal, P.: Coastal flooding risk associated to tropical cyclones in a changing climate. Application to Port of Spain (Trinidad and Tobago), Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-150>, 2017.

Jarvinen, B. R., Neuman, C. J. and Davis, M. A. S. (1988) 'A tropical cyclone data tape for the North Atlantic basin', NOAA Tech. Memo. NWS NHC-22.

Jha, Abhas K.; Bloch, Robin; Lamond, Jessica. 2012. Ciudades e Inundaciones : guía para la gestión integrada del riesgo de inundaciones en ciudades en el Siglo 21. World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2241> License: CC BY 3.0 IGO.

Jonkman, S., Vrijling, J. and Vrouwenvelder, A. (2008) 'Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method', Natural Hazards.

Krantz, Lasse. 2001. "The Sustainable Livelihood Approach to Poverty Reduction An Introduction." <http://www.sida.se/globalassets/publications/import/pdf/en/the-sustainable-livelihood-approach-to-poverty-reduction.pdf>.

Kennedy, C., Pincetl, S. and Bunje, P. (2011) 'The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design', Environmental Pollution, 159(8), pp. 1965–1973. doi: 10.1016/j.envpol.2010.10.022.

Knapp, K. R. et al. (2010) 'The international best track archive for climate stewardship (IBTrACS) unifying tropical cyclone data', Bulletin of the American Meteorological Society, 91(3), pp. 363–376.

Knutson, T. R. et al. (2013) 'Dynamical downscaling projections of twenty-first-century Atlantic hurricane activity: CMIP3 and CMIP5 model-based scenarios', Journal of Climate, 26(17), pp. 6591–6617.

Kulp, S. and Strauss, B. H. (2016) 'Global DEM Errors Underpredict Coastal Vulnerability to Sea Level Rise and Flooding', Frontiers in Earth Science. Frontiers, 4, p. 36. doi: 10.3389/feart.2016.00036.

Landsea, C. W. et al. (2004) 'A reanalysis of Hurricane Andrew's intensity', Bulletin of the American Meteorological Society, 85(11), pp. 1699–1712.

Lettau, H. (1969) 'Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description', Journal of applied meteorology, 8(5), pp. 828–832.

Linstone, Harold A, and Murray Turoff. 1975. The Delphi Method: Techniques and Applications. Vol. 29. Addison-Wesley Reading, MA.

Molina, S., Lang, D. H. and Lindholm, C. D. (2010) 'SELENA – An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure', Computers & Geosciences, 36(3), pp. 257–269. doi: 10.1016/j.cageo.2009.07.006.

Nakajo, S. et al. (2014) 'Global stochastic tropical cyclone model based on principal component analysis and cluster analysis', Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53(6), pp. 1547–1577.

Narayan, S. et al. (2012) 'A holistic model for coastal flooding using system diagrams and the Source–Pathway–Receptor (SPR) concept', Natural Hazards and Earth System Science, 12(5), pp. 1431–1439.

Plate, E. J. . Flood risk and flood management», Journal of Hydrology, vol. 267, n.o 1, pp. 2-11, oct. 2002, doi: 10.1016/S0022-1694(02)00135-X.

Renos Vakis, Jamele Rigolini, Leonardo Lucchetti. 2015. Left Behind. Chronic Poverty in Latin America and the Caribbean. CEUR Workshop Proceedings. Vol. 1542. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.

Russell, L. R. (1969) Probability distributions for Texas Gulf coast hurricane effects of engineering interest. Stanford University.

Russell, L. R. (1971) 'Probability distributions for hurricane effects', Journal of Waterways, Harbors & Coast Eng Div, 97(7886 Proceeding).

Saaty, Thomas L. (1988). "What Is the Analytic Hierarchy Process?" In Mathematical Models for Decision Support, 109–21. Springer.

Sampson, C. C. et al. (2016) 'Perspectives on Open Access High Resolution Digital Elevation Models to Produce Global Flood Hazard Layers', Frontiers in Earth Science, 3, p. 85. doi: 10.3389/feart.2015.00085.

Silva, R. et al. (2003) 'Oceanographic vulnerability to hurricanes on the Mexican coast', in Coastal Engineering 2002: Solving Coastal Conundrums. World Scientific, pp. 39–51.

Simiu, E. and Scanlan, R. H. (1996) Wind effects on structures. Wiley.

Slangen, A. B. A. et al. (2014) 'Projecting twenty-first century regional sea-level changes', Climatic Change. Springer, 124(1–2), pp. 317–332.

Sullivan, William G, Elin M Wicks, and James T Luxhoj. 2004. Ingeniería Económica de DeGarmo. Pearson Educación.

Switzman, H. et al. (2017) 'Variability of Future Extreme Rainfall Statistics: Comparison of Multiple IDF Projections', Journal of Hydrologic Engineering. American Society of Civil Engineers, 22(10), p. 4017046.

Taleb, Nassim Nicholas. 2011. "El Cisne Negro. Ed." Paidós. Madrid.

- Taylor, K. E., Stouffer, R. J. and Meehl, G. A. (2012)** 'An overview of CMIP5 and the experiment design', *Bulletin of the American Meteorological Society*. American Meteorological Society, 93(4), pp. 485–498.
- Tuleya, R. E., DeMaria, M. and Kuligowski, R. J. (2007)** 'Evaluation of GFDL and simple statistical model rainfall forecasts for US landfalling tropical storms', *Weather and forecasting*, 22(1), pp. 56–70.
- UN-Habitat (2016)** *Urbanization and Development: Emerging Futures*, UN Habitat World Cities Report 2016.
- Vickery, P. J. et al. (2000)** 'Hurricane wind field model for use in hurricane simulations', *Journal of Structural Engineering*. American Society of Civil Engineers, 126(10), pp. 1203–1221.
- Vickery, P. J., Skerlj, P. F. and Twisdale, L. A. (2000)** 'Simulation of hurricane risk in the US using empirical track model', *Journal of structural engineering*. American Society of Civil Engineers, 126(10), pp. 1222–1237.
- Vickery, P. J. and Twisdale, L. A. (1995a)** 'Prediction of hurricane wind speeds in the United States', *Journal of Structural Engineering*. American Society of Civil Engineers, 121(11), pp. 1691–1699.
- Vickery, P. J. and Twisdale, L. A. (1995b)** 'Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predictions', *Journal of Structural Engineering*. American Society of Civil Engineers, 121(11), pp. 1700–1709.
- Von Bertalanffy, Ludwig. 1972.** "The History and Status of General Systems Theory." *Academy of Management Journal* 15 (4). Academy of Management: 407–26.
- Von Mises, Ludwig, and Jesús. Huerta de Soto. 2011.** *La Acción Humana : Tratado de Economía*. Unión Editorial. <https://www.casadellibro.com/libro-la-accion-humana-tratado-de-economia-10-ed/9788472095403/1834423>.
- Walsh, K. J. E. et al. (2016)** 'Tropical cyclones and climate change', *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. John Wiley & Sons, Inc., 7(1), pp. 65–89. doi: 10.1002/wcc.371.
- Wieringa, J. (1992)** 'Updating the Davenport roughness classification', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Elsevier, 41(1–3), pp. 357–368.
- Wiernga, J. (1993)** 'Representative roughness parameters for homogeneous terrain', *Boundary-Layer Meteorology*. Springer, 63(4), pp. 323–363.
- Wilby, R. L. et al. (2009)** 'A review of climate risk information for adaptation and development planning', *International journal of climatology*. Wiley Online Library, 29(9), pp. 1193–1215.

- Winsemius, Hessel C., Brenden Jongman, Ted I.E. Veldkamp, Stephane Hallegatte, Mook Bangalore, and Philip J. Ward. 2015.** "Disaster Risk, Climate Change, and Poverty : Assessing the Global Exposure of Poor People to Floods and Droughts." *Background Paper*, no. November 2015: 1–35. doi:10.1596/1813-9450-7480.

