



# Propuesta para la inclusión de la variable del riesgo de desastres en el análisis de proyectos de inversión pública en México

México, Octubre 2018



Se agradecen las contribuciones a este documento de:  
Marco Rivera, Diana Manuel y Javier Hernández de la SHCP  
Eduardo Morín y Ma. Lizbeth Alvarado de CEPEP  
Katharina Schaaff y Sandra Camacho Otero del proyecto IGGRD, GIZ  
Alonso Brenes, Salvador Pérez y Matías Miranda consultores de IGGRD.

1

## CONTENIDO

Abreviaciones .....	4
Presentación.....	5
Introducción .....	6
La Gestión de Riesgos de Desastre (GRD) en la Inversión Pública.....	7
Incorporación de criterios de GRD en la Pre-Inversión.....	13
Análisis probabilístico detallado (APD) del riesgo de desastre en proyectos de inversión.....	20
Conclusiones .....	26
Anexo. Análisis de los peligros naturales más frecuentes en México .....	27
BIBLIOGRAFÍA.....	44

## TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.- Objetivos de las agendas globales relacionados al riesgo de desastres e inversión pública. ....	6
Ilustración 2.- Ciclo de vida de los proyectos de inversión pública en México. ....	9
Ilustración 3.- Fórmula del riesgo de desastres. ....	10
Ilustración 4.- Esquema de análisis de la GRD para su incorporación en la formulación y evaluación de proyectos de Inversión.....	13
Ilustración 5.- Beneficios y costos de las medidas de mitigación.....	24
Ilustración 6.- Beneficios y costos netos del proyecto al incorporar las medidas de mitigación del riesgo de desastres.....	25

## TABLA DE CUADROS

Cuadro 1.- Componentes del riesgo de desastres.....	10
Cuadro 2.- Umbrales propuestos para clasificar cualitativamente el riesgo de desastres a través de la información arrojada por los Atlas de Riesgos.....	17
Cuadro 3.- Umbrales propuestos para clasificar cualitativamente el índice de riesgo de desastres con información obtenida del R-FONDEN.....	18

## Abreviaciones

<b>ACB</b>	Análisis Costo Beneficio
<b>ACE</b>	Análisis Costo Eficiencia
<b>APD</b>	Análisis Probabilístico Detallado
<b>APF</b>	Administración Pública Federal
<b>CAE</b>	Costo Anual Equivalente
<b>CEPEP</b>	Centro de Estudios para la Preparación y la Evaluación Socioeconómica de Proyectos
<b>Guía CEPEP</b>	Guía general para la elaboración del análisis costo y beneficio de programas y proyectos de inversión
<b>GIZ</b>	Cooperación Alemana al Desarrollo Sostenible
<b>GRD</b>	Gestión del Riesgo de Desastres
<b>IGGRD</b>	Iniciativa Global de Gestión del Riesgo de Desastres
<b>PAE</b>	Pérdida Anual Equivalente
<b>PI</b>	Proyecto de Inversión
<b>PMP</b>	Pérdida Máxima Probable
<b>PPE</b>	Pérdida Potencial Esperada
<b>Red SNIP</b>	Red de Sistemas Nacionales de Inversión Pública
<b>RRD</b>	Reducción del Riesgo de Desastres
<b>SHCP</b>	Secretaría de Hacienda y Crédito Público
<b>SNIP</b>	Sistema Nacional de Inversión Pública
<b>UF</b>	Unidad Formuladora
<b>VAC</b>	Valor Actual de los Costos
<b>VPN</b>	Valor Presente Neto

## Presentación

Sucesos naturales recientes nos han mostrado la fragilidad que la infraestructura pública puede tener ante estos. México, por su ubicación geográfica, está expuesto a peligros que, cuando se materializan en un evento relevante, como un desastre natural, ponen en riesgo no sólo a las personas y a su patrimonio, sino también a la infraestructura pública. Cuando estos eventos o desastres ocurren, por lo general tienen un impacto económico negativo para la nación tanto por la pérdida de infraestructura como por los efectos que ésta ocasiona en la generación y provisión de bienes y servicios públicos, especialmente en la región que ocurre.

La atención a los riesgos de desastre ha venido tomando mayor relevancia en la medida en que dichos sucesos han incrementado su frecuencia e intensidad, algunos de ellos producto del cambio climático. En el caso de la inversión pública, la atención al riesgo de desastre no debería ser la excepción, porque a ella se destinan una gran cantidad de recursos públicos y es necesario desarrollar infraestructuras cada vez más resistentes y resilientes a los desastres.

En el plano internacional y en las agendas globales, la relevancia de la infraestructura está plasmada en la Agenda 2030, que en el Noveno Objetivo del Desarrollo Sostenible sobre Industria, Innovación e Infraestructura incluye entre sus metas la construcción de infraestructuras resilientes, la promoción de la industrialización inclusiva y sostenible y el fomento de la innovación.

En este mismo sentido, el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 plantea como una prioridad que la inversión en infraestructura considere medidas para la reducción del riesgo de desastres y, como una de sus siete metas mundiales “reducir considerablemente los daños causados por los desastres en las infraestructuras vitales y la interrupción de los servicios básicos, como las instalaciones de salud y educativas, incluso desarrollando su resiliencia para 2030”.

En América Latina y el Caribe, la Red de Sistemas Nacionales de Inversión Pública (Red SNIP), de la que México forma parte, promueve una gestión coherente de la inversión pública, que permita a los países miembros de la Red alcanzar los objetivos del desarrollo sostenible y de adaptación al cambio climático.

Considerando la relevancia del tema, en México se ha desarrollado un convenio de cooperación técnica entre la Unidad de Inversiones de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) y el proyecto de la Iniciativa Global de Gestión del Riesgo de Desastres (IGGRD) de la Cooperación Alemana al Desarrollo Sostenible (GIZ por sus siglas en alemán) con el fin de promover el desarrollo de infraestructuras más resilientes ante desastres de origen natural o derivados del cambio climático. De esta manera el presente documento es una propuesta para la inserción de la variable del riesgo de desastres en el análisis de los proyectos de inversión pública, en particular su incorporación al proceso de evaluación socioeconómica de las inversiones.

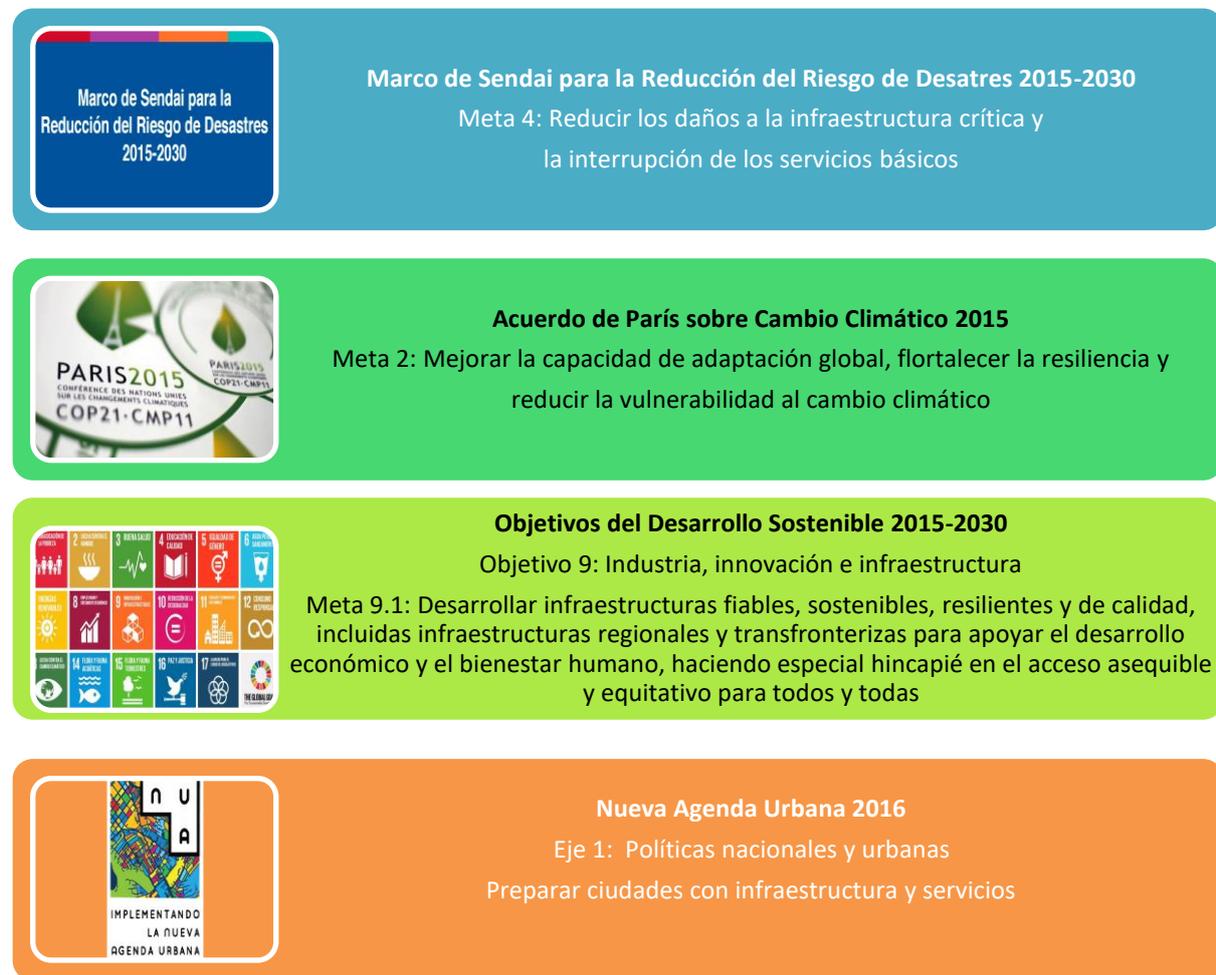
ING. MARCO ANTONIO RIVERA GUZMÁN  
Titular de la Unidad de Inversiones  
Secretaría de Hacienda y Crédito Público, México

5

## Introducción

En 2015, en el mundo se acordaron agendas globales en diferentes temáticas, donde cada una refleja su propia problemática respecto a la sostenibilidad, al desarrollo, el cambio climático, la urbanización, entre otros. Sin embargo, comparten objetivos comunes en torno a la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD), temática reconocida por todas las agendas internacionales, cuya implementación es un requerimiento globalmente aceptado por todas las naciones. La GRD es el núcleo del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, también se refleja en el Acuerdo de París sobre cambio climático, en la Nueva Agenda Urbana (Hábitat III) y en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Ilustración 1).

### Ilustración 1.- Objetivos de las agendas globales relacionados al riesgo de desastres e inversión pública.



Fuente: Elaboración del equipo IGGRD con base en documentos oficiales de las agendas post 2015.

El logro de los objetivos transversales de las agendas globales requiere diferentes acciones y compromisos de distintos actores a nivel nacional y local para desarrollar estrategias adecuadas para alcanzar las metas compartidas. La convergencia con las

grandes agendas internacionales soslaya la importancia de articular esfuerzos y mejorar la complementariedad entre procesos de desarrollo. Experiencias alrededor del mundo muestran cómo una adecuada coherencia en la inversión puede reducir las brechas y mejorar sustancial y duraderamente la calidad de vida de la ciudadanía, así como asegurar la provisión de servicios a través de infraestructura más resistente.

En los últimos años, los países latinoamericanos han incrementado el gasto de inversión, con el fin de potenciar procesos de dinamización económica y mejorar la dotación de servicios públicos (Ocampo et al, 2012). Sin embargo, un porcentaje significativo se pierde ante la prevalencia y persistencia del riesgo de desastre en sectores y territorios estratégicos. Los daños y pérdidas que sufre la infraestructura pública por el impacto de fenómenos naturales han sido considerados como imprevistos, en donde el mecanismo de recuperación de la infraestructura y el restablecimiento del servicio, al ser un enfoque reactivo, se basa en erogaciones extraordinarias, generalmente no contempladas dentro de la estructura de costos del proyecto al momento de su formulación y evaluación. En México, este tipo de gastos se financian a través de seguros y de fondos especiales de reconstrucción o recuperación.

Según el sector, la robustez financiera de las instituciones y las condiciones territoriales, estas contingencias pueden afectar las condiciones de vida de la ciudadanía y el desempeño económico de los países, llegando a representar una importante erogación de recursos, comprometiendo, en algunos casos, las condiciones macroeconómicas en el mediano plazo (EIRD, 2009).

Existen ventajas y oportunidades significativas al cambiar de un enfoque centrado en la reacción a otro de prevención de daños potenciales, incorporando medidas preventivas de fortalecimiento en la estructura para los proyectos de inversión, lo cual genera una mayor rentabilidad al mitigar los daños y mantener la provisión del servicio. Por tal motivo, en este documento se propone la inclusión de la variable de riesgo de desastre en proyectos de inversión pública para fortalecer las actividades de Gestión de Riesgos de Desastre (GRD), considerando un enfoque preventivo, de manera que los formuladores y ejecutores del proyecto tengan mayores y mejores alternativas de reducción de los potenciales impactos a los que estaría expuesto un proyecto.

## **La Gestión de Riesgos de Desastre (GRD) en la Inversión Pública**

La inversión pública se ha constituido en un vehículo de gran utilidad para potenciar el desarrollo sostenible, así como para la provisión de servicios y la ampliación de oportunidades de crecimiento económico, que dependen directamente las estrategias eficaces de inversión pública adoptadas por los países (FMI, 2018).

No obstante, existen diferentes eventos que pueden afectar significativamente a la inversión pública, siendo los más frecuentes aquellos de origen natural, que impactan directamente infraestructura interrumpiendo la provisión del servicio para el que fue diseñada.

Se estima que el impacto que tienen los desastres en la economía equivale a una pérdida global de 520 billones de dólares en el consumo anual y obliga a unos 26 millones de personas a vivir en condiciones de pobreza (Banco Mundial, 2016). Los impactos asociados con dinámicas naturales afectan significativamente al desarrollo de los países.

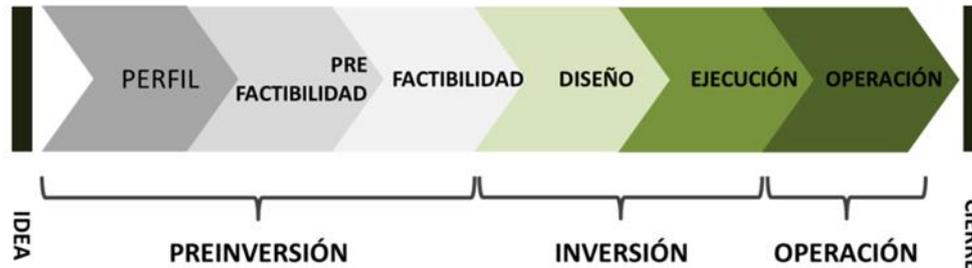
En el caso mexicano se han mejorado significativamente los mecanismos institucionales de respuesta y atención a emergencias y desastres, disminuyendo la cantidad de personas que mueren durante desastres a pesar del incremento general de eventos desastrosos. No obstante, queda un amplio espacio de mejora en lo concerniente a la protección de activos sociales y económicos, ajustando los esquemas de inversión en infraestructura al incluir la Gestión de Riesgos de Desastre (GRD).

Cuando se habla de GRD en la inversión pública se habla de considerar el daño potencial que puede tener un proyecto de inversión ante la ocurrencia de un fenómeno peligroso. La posibilidad de que una infraestructura se destruya o resulte dañada antes de la conclusión de su vida útil es un aspecto que, pese a ser común para la mayoría de los proyectos, pocas veces se considera en la evaluación de los proyectos de inversión debido a la complejidad que implica.

En México, un proyecto de inversión (PI) se define como el conjunto de obras y acciones que llevan a cabo las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal (APF) para la construcción o ampliación de activos fijos, con el propósito de solucionar una problemática o atender una necesidad específica y que generan beneficios y costos a lo largo del tiempo. El ciclo de vida de un proyecto de inversión está conformado por 3 etapas (CEPEP, 2018):

- **Preinversión:** considera todos aquellos estudios y acciones previas a la inversión que son necesarias para reducir la incertidumbre en los resultados que se esperan del proyecto en las subetapas de diseño, ejecución y operación. Para el caso de los estudios, se consideran generalmente 3 niveles de profundidad para su desarrollo: perfil, prefactibilidad y factibilidad.
- **Inversión:** corresponde a la etapa en donde se llevan a cabo las obras, los componentes, el equipamiento, el diseño de procesos y procedimientos, la liberación de afectaciones y la gestión de los recursos humanos, es decir, es la etapa en donde se desarrollan todas aquellas acciones necesarias previas a la operación del proyecto.
- **Operación:** es la etapa en la que el proyecto atiende el problema, satisface la necesidad o permite aprovechar la oportunidad por la que surgió, es decir, es la etapa en la que el proyecto genera beneficios. En esta etapa el proyecto también incurre en costos de operación, mantenimiento y reinversiones de activos que van concluyendo con su vida útil.

## Ilustración 2.- Ciclo de vida de los proyectos de inversión pública en México.



Fuente: Guía Conceptual para la Presentación de Evaluaciones Costo y Beneficio de Programas y Proyectos de Inversión (SHCP, 2018)

Teniendo en cuenta que la GRD se ha centrado en el enfoque reactivo, este tipo de medidas de GRD pueden ubicarse en la fase de operación del ciclo de vida del proyecto. Sin embargo, un enfoque reactivo que no siempre es el que tiene mayor sentido en términos financieros y de rentabilidad socioeconómica, ya que se realiza posterior al evento catastrófico. Por ello la etapa de pre-inversión es crítica, ya que es donde se deben precisar potenciales interacciones entre el funcionamiento de la infraestructura y las dinámicas naturales, para determinar los riesgos a los que se enfrentará la obra de inversión pública.

El análisis de riesgos de desastre con enfoque preventivo fortalece la formulación integral de proyectos ya que permite incorporar medidas prospectivas y estratégicas. Así como mejorar las capacidades para afrontar impactos que son de menor magnitud, pero más recurrentes y que generan efectos a escalas locales que pueden representar grandes pérdidas acumuladas. Es en este sentido, la GRD juega un papel relevante para la implementación de medidas encaminadas a la protección de la infraestructura. Entre mayor sea posible reducir el impacto de los desastres, se estará haciendo mejor uso de los recursos públicos.

### Elementos conceptuales de la GRD

El riesgo de desastres es una expresión matemática de certidumbre: es una probabilidad. Lavell (2008) lo define como la probabilidad de daños y pérdidas futuras asociadas y explicadas por la interacción entre factores de peligros físicos, de vulnerabilidad humana y ubicación geográfica. Por su naturaleza multifactorial, son pocas las ocasiones en que existen opciones de previsión totales ante los peligros. Por el contrario, su comportamiento tiende a ser altamente dinámico: cambian simultáneamente en el tiempo y en el espacio con variaciones difíciles de modelar. En momentos en que esta probabilidad se materializa se convierte en impactos que pueden llegar a catalogarse como desastres.

Por otra parte, Oliver-Smith (1999) enfatizan la definición del riesgo de desastre como una construcción social, niega cualquier aproximación que lo considere como un episodio natural porque es el producto de fallas adaptativas de los sistemas sociales con su entorno natural.

La terminología internacional sobre temas relacionados con la reducción del riesgo de desastres (Naciones Unidas, 2016) define al desastre como una “disrupción grave del funcionamiento de una comunidad o sociedad en cualquier escala debida a fenómenos peligrosos que interactúan con las condiciones de exposición, vulnerabilidad y capacidad, ocasionando pérdidas e impactos humanos, materiales, económicos y/o ambientales”. Además de los tipos de peligros que desencadenan el evento, las pérdidas son factores que modifican la percepción general del impacto.

El riesgo y el desastre se consideran producto de procesos previos, que para entenderlos, reducirlos o mitigarlos, es indispensable comprender los factores que los determinan. El análisis y determinación de la interacción de los componentes de riesgo es el primer paso para luego diseñar las estrategias de gestión adecuadas.

### Ilustración 3.- Fórmula del riesgo de desastres.



Fuente: Elaboración equipo IGGRD con base en terminología de Riesgo de Desastres de Naciones Unidas, 2009.

### Cuadro 1.- Componentes del riesgo de desastres.

Componente del riesgo de desastres	Descripción
Amenaza o peligro	<p>Hace referencia al fenómeno natural que, en condiciones de fragilidad y exposición pueden generar daños a una unidad o sistema dado. En ocasiones se habla de amenaza en lugar de peligro, estas palabras son sinónimo dentro del glosario de GRD, sin embargo, para efectos de este trabajo se usa peligros dado que es el término utilizado por el Atlas Nacional de Riesgos.</p> <p>Tradicionalmente se ha hecho una asociación directa entre el desastre y el peligro; se considera que el huracán o el terremoto son sinónimos de desastre. No obstante, como se ha demostrado en América Latina y el Caribe, existen casos en los que la infraestructura resiste los embates de este tipo de fenómenos, no por su débil intensidad, sino por las condiciones de construcción o ubicación. De tal modo, cualquier fenómeno natural puede convertirse en un factor de peligro, pero el daño final solo podrá interpretarse en conjunto con las condiciones de vulnerabilidad y exposición. Conocer los peligros implica entender las dinámicas del mundo natural y las formas en que se retroalimentan.</p> <p>Existen categorías dentro de las que se clasifican los peligros naturales; la Ley General de Protección Civil de México las clasifica como Geológicos,</p>

Componente del riesgo de desastres	Descripción
	<p>Hidrometeorológicos y Sanitario-Ecológicos. Las últimas comprenden todo el rango de relaciones océano – tierra – atmósfera que inciden en excesos o déficits extraordinarios de precipitación; a este grupo pertenecen las inundaciones, las sequías, los huracanes y algunos tipos de deslizamientos. Por su parte, las de tipo geológico tienen que ver con los procesos derivados del movimiento de las placas tectónicas, principalmente sismos, erupciones volcánicas y otras variedades de deslizamientos.</p> <p>Un evento natural puede ser caracterizado en función de su intensidad, su localización y su recurrencia:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Intensidad.</b> Se refiere a la cantidad de energía que libera el fenómeno natural que se considera como peligro. Según el tipo de fenómeno, será la unidad que se utilice para su correspondiente medición. Por ejemplo, en el caso de huracanes y otros sistemas de baja presión, la intensidad se puede medir a partir de la velocidad de las ráfagas de viento.</li> <li>• <b>Localización.</b> Cualquier tipo de peligro ocurrirá en un espacio que puede ser objetivamente delimitado. En el caso de un sismo, la localización del evento se referirá a la influencia espacial que tuvo en términos del movimiento de terreno, aunque no toda el área de influencia recibirá la misma cantidad de energía liberada; conforme un punto se encuentre más lejos del epicentro, menor será el movimiento que reciba o se perciba.</li> </ul> <p>En otros casos, como las erupciones volcánicas, es preciso subdividir los subprocesos que ocurren a partir de la erupción. Por ejemplo, una misma erupción puede generar liberación de cenizas, liberación de flujos piroclásticos de densidad y coladas de lava. Cada uno de estos procesos tendrá patrones de localización diferentes; inclusive en su interior, los patrones de dispersión varían: en el caso de la dispersión de una pluma de ceniza, existirá una dispersión variable en función del grosor de la ceniza en la columna, en donde la ceniza más fina, localizada en la parte más alta de la columna se desplazará más distancia que las partículas más gruesas.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Recurrencia.</b> Este parámetro describe la frecuencia con la que es probable que un evento dado o de características similares se repita en el futuro. Cada tipo de peligro está sujeto a procesos que determinan sus periodos de recurrencia. Algunos tienden a ser más fáciles de predecir; mientras que otros escapan de una modelación más exacta, por lo que su incertidumbre es mayor, tal es el caso de los sismos o las erupciones volcánicas. Los fenómenos hidrometeorológicos, por otra parte, suelen tener periodos de recurrencia más fáciles de identificar, pues están sujetos a dinámicas atmosféricas bien conocidas y determinadas por ciclos anuales producto del movimiento de traslación del planeta</li> </ul> <p>Estos tres parámetros son centrales para el análisis de cualquier peligro. Tradicionalmente, el análisis de los peligros se hace a partir de información histórica y registros de extensión de los eventos pasados; sin embargo, este abordaje tiene la limitación de que no logra abarcar cambios en las dinámicas</p>

Componente del riesgo de desastres	Descripción
	<p>futuras, lo que es particularmente importante en el caso del riesgo hidrometeorológico, que podría variar significativamente en el futuro próximo por efectos del calentamiento global.</p> <p>En México, las afectaciones más severas y que resultan en un daño mayor a la infraestructura y específicamente a las carreteras son las de origen hidrometeorológico.</p>
Vulnerabilidad	<p>Es una característica de un sistema dado que determina qué tan afectado puede verse por un peligro natural cuando ambos entran en contacto. En términos más genéricos, la vulnerabilidad se define como el conjunto de condiciones que aumentan la susceptibilidad de un sistema a sufrir impactos derivados de los peligros.</p> <p>Por ejemplo, dos viviendas contiguas se ven expuestas, simultáneamente, al mismo movimiento sísmico. Una de las viviendas es de concreto mientras que la otra es de adobe. El nivel de daño que reciban será distinto, y estará determinado -en el entendido que ambas tienen la misma exposición- por los rasgos constructivos de las viviendas. La de concreto tendrá menos daños mientras que la segunda probablemente colapse; y aunque no fuera a colapsar, los daños que tendría una vez que pase el sismo serían mayores que los de la casa de concreto. Dichos factores son puramente estructurales, pero en la vida real también entran en juego elementos económicos, sociales, ambientales y políticos.</p> <p>En el caso de la inversión pública, lo que puede definirse como una vulnerabilidad estructural puede ser, en el fondo, una expresión de una susceptibilidad más estructural en materia tecnológica o financiera: se construye un proyecto relativamente frágil porque los recursos no permitían invertir en mejores materiales o aplicar mejores parámetros constructivos.</p>
Exposición	<p>Determina los niveles de proximidad de una persona, inmueble o sistema respecto a la ocurrencia de un peligro natural. En términos generales se asume que mientras más cerca se está del peligro, más susceptibilidad a sufrir daños o pérdidas, dependiendo de las condiciones de vulnerabilidad.</p> <p>El análisis de exposición es uno de los métodos para estimar a priori los posibles niveles de riesgo de desastre. México cuenta con una herramienta importante para determinar el peligro dependiendo de la exposición, el Atlas Nacional de Riesgos que permite planear prospectivamente.</p> <p>Sin embargo, en ausencia de información de calidad, cuando existe un registro de eventos históricos, pueden establecerse áreas que con cierta frecuencia en el pasado han sido ocupadas, por poner un ejemplo, por el desbordamiento de un río. En consecuencia, se asume que mientras más cerca se encuentre el inmueble del área de inundación, mayor será su riesgo.</p>

Fuente: Elaboración equipo IGGRD con base en "Sobre la gestión del riesgo: apuntes hacia una definición", Lavell, 2008.

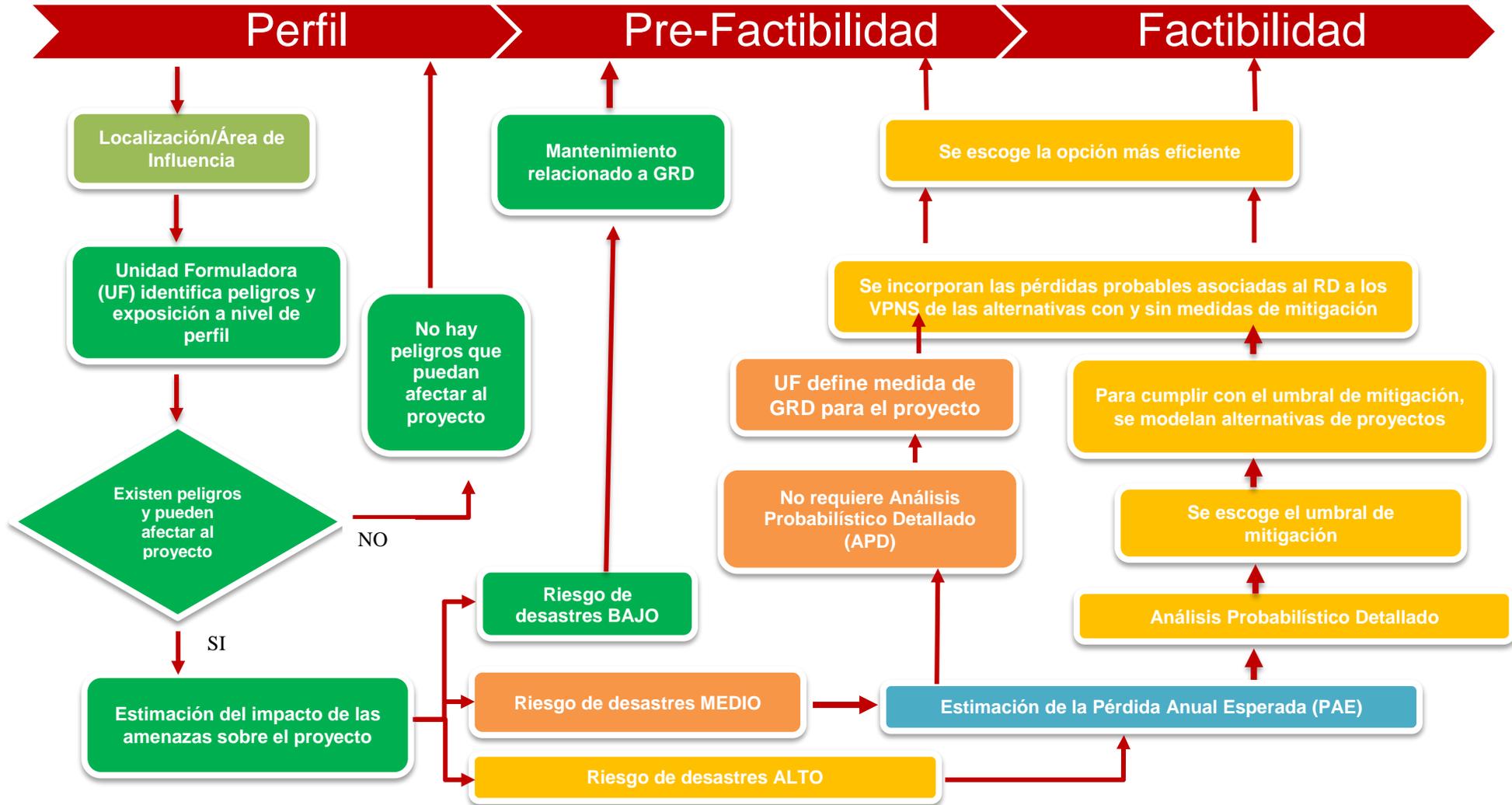
## Incorporación de criterios de GRD en la Pre-Inversión

El proceso de pre-inversión de proyectos es iterativo (Ortegon, 2005), esta característica también debe ser aplicada en la inclusión de la GRD en el proyecto de inversión. Esto significa que, si bien el proceso de inversión puede ser expresado de forma lineal, en la realidad es necesario analizar los elementos y criterios que configuran el proyecto con diferente profundidad según su complejidad y avance en la formulación del proyecto. Así la unidad formuladora (UF) debe volver sobre el análisis realizado en algunas dimensiones del proyecto y desarrollarlas con mayor profundidad o corregirlas.

Los proyectos de infraestructura pública interactúan con el entramado social a través de sus roles institucionales, funciones, servicios que proveen y su emplazamiento. Esta última dimensión determina el proyecto de infraestructura, por lo cual, aunque parezca evidente, realizar un análisis profundo de la localización de la inversión es esencial, y sin embargo muchas veces es condicionado a la disponibilidad o propiedad legal del terreno. De igual forma los peligros que pueden afectar el proyecto se relacionan a la localización de este.

El siguiente esquema, corresponde a una expresión conceptual de la inclusión de la GRD en la formulación y evaluación de proyectos, la cual pretende guiar a la UF a adaptar el proceso general para incluir medidas de GRD en el proyecto correspondiente. El esquema permite realizar el proceso establecido para la formulación y evaluación del proyecto, para que de forma paralela se integren medidas de GRD, a través de los indicadores económicos correspondientes. Por lo tanto, no se trata de un diagrama de flujo del proceso de formulación de un proyecto sino de la profundidad del análisis de la GRD.

Ilustración 4.- Esquema de incorporación GRD en la formulación y evaluación de proyectos de inversión.



Fuente: Elaboración propia con base en CEPEP, e Ortegón; Pacheco- Roura, 2005.

\*Para guiar la opinion de experto, consulte anexo 1.

El esquema anterior presenta el análisis de GRD a nivel de perfil partiendo de la localización, tomando en consideración el siguiente orden:<sup>1</sup>

- Al identificar el problema que origina el proyecto dentro del análisis de la “Situación actual” es posible obtener información contextual básica relacionada a la ubicación, que permita la identificación de peligros.
- Una vez identificados los peligros existentes en el territorio, en la UF debe profundizar el análisis de los peligros detectados en el territorio del proyecto. De esta forma se profundiza la identificación de peligros, determinando la exposición del proyecto de inversión al peligro natural, lo cual significa detallar la posición de la iniciativa de inversión a las fuentes de peligro. Tal como se menciona en el apartado de “Elementos Conceptuales de la GRD”, la exposición tiene relación directa con los niveles de proximidad de la infraestructura ante el peligro.
- La exposición del proyecto a los peligros puede ser determinada a través de mapas de riesgo. México cuenta con el “Atlas Nacional de Riesgos” del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), que se ha convertido en una herramienta confiable y recomendable para realizar la identificación certera de los peligros que pueden afectar el proyecto.
- En este momento del proceso, si se determina que la exposición del proyecto ante el peligro natural es baja, también lo será el “índice de riesgo”, ante lo cual no se toman medidas de GRD, o se establecen medidas de mantenimiento del proyecto relacionadas a la GRD (por ejemplo, la limpieza de los viaductos que permiten el flujo del agua de un río bajo un camino).
- Si se determina que la exposición puede afectar al proyecto (por ejemplo, inhabilitando la infraestructura, dañándola gravemente, o afectando la continuidad del servicio provisto) se procede al siguiente paso, en el cual la UF del proyecto define la magnitud del riesgo e identifica la pérdida anual esperada (PAE). La cual está determinada por:
  - o La georreferenciación del proyecto.
  - o Características estructurales, la cual se refiere principalmente a materiales y tecnología de construcción.
  - o Valor de reposición, relacionado exclusivamente al valor de reposición de la infraestructura.
- A través de la identificación de la PAE, se determina si el “Riesgo de Desastres”, es “bajo” o “medio” o “alto”. A continuación, se proponen algunos

<sup>1</sup> El orden propuesto es conceptual y puede variar según se adapte a proyectos específicos.

métodos para determinar el umbral que permita clasificar cualitativamente el riesgo de desastres:

- a) Determinando la probabilidad de ocurrencia de la amenaza dada la exposición con base en el radio de influencia de la amenaza y la ubicación del proyecto.

**Cuadro 2.- Umbrales propuestos para clasificar cualitativamente el riesgo de desastres a través de la información arrojada por los Atlas de Riesgos**

Probabilidad de Amenaza	Nivel de Exposición	Tipo de Riesgo	Acción
Baja	Baja	Bajo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>• No se incluyen medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul>
	Media		
	Alta		
Medio	Baja	Bajo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>• No se incluyen medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul>
	Media	Medio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>• Inclusión de medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul>
	Alta	Medio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>• Inclusión de medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul>
Alto	Baja	Medio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>• Inclusión de medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul>
	Media	Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>• Inclusión de medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul>
	Alta	Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>• Inclusión de medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

La probabilidad de ocurrencia de la amenaza (peligro) podrá ser obtenida a través del Atlas Nacional de Riesgos. Esta herramienta contiene información sobre la susceptibilidad a las principales amenazas naturales, regionalizada para todo el territorio mexicano, así como, información sobre los sistemas expuestos, índices de vulnerabilidad social, grado de rezago y marginación, vulnerabilidad ante cambio climático, grado de resiliencia, etc. De igual forma se cuenta con Atlas estatales y municipales que arrojan información detallada y localizada.

El Atlas Nacional de Riesgos presenta una clasificación de la amenaza en 5 rangos (“Muy bajo”, “Bajo”, “Moderado”, “Alto”, “Muy alto”), sin embargo, para la integración del análisis en la evaluación socioeconómica se agruparán los rangos “muy alto” y “alto” en alto y “muy bajo” y “bajo” en bajo.

Como se mencionó con anterioridad, la exposición considerará los niveles de proximidad con respecto a la ocurrencia de la amenaza o peligro y es información que de igual forma podrá ser obtenida a través del Atlas Nacional de Riesgos.

La información arrojada permitirá realizar una combinación entre la amenaza y la exposición para identificar el tipo de riesgo y las acciones que serán desarrolladas.

b) Utilizando el Sistema de Estimación de Pérdidas para el Riesgo Federal (R-FONDEN)

El R-FONDEN es una herramienta con la que cuenta la Unidad de Seguros, Pensiones y Seguridad Social (USPSS) de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) que, si bien es utilizada con fines de diseño de las coberturas financieras de transferencia de riesgos del FONDEN, la herramienta provee resultados sobre estimación de pérdidas.

El análisis de riesgo probabilístico que realiza el R-FONDEN, se basa principalmente en la evaluación de la exposición, la amenaza y la vulnerabilidad, lo que permite definir el nivel de riesgo y consecuentemente el nivel de pérdidas por fenómenos naturales. Esta herramienta arroja la pérdida esperada de acuerdo al periodo de retorno del fenómeno, información con la que se puede estimar un índice de riesgo de la siguiente forma:

$$\theta_{riesgo} = \frac{\sum_i \text{Monto de la pérdida estimada para la amenaza } i}{\text{Costo del proyecto}}$$

Con base en el resultado obtenido se podrá clasificar el riesgo conforme la Ilustración 7.

**Cuadro 3.- Umbrales propuestos para clasificar cualitativamente el índice de riesgo de desastres con información obtenida del R-FONDEN**

Rango	Valor del Índice	Tipo	Acción
1	$\theta_{riesgo} \leq 0.3$	Riesgo bajo	<ul style="list-style-type: none"> <li>No se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>No se incluyen medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul>

Rango	Valor del Índice	Tipo	Acción				
2	$0.3 < \theta_{riesgo} \leq 0.6$	Riesgo medio	<table border="1"> <tr> <td>Proyecto a nivel perfil o prefactibilidad</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>• Inclusión de medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul> </td> </tr> <tr> <td>Proyecto a nivel factibilidad</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>• Inclusión de medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul> </td> </tr> </table>	Proyecto a nivel perfil o prefactibilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>• Inclusión de medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul>	Proyecto a nivel factibilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>• Inclusión de medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul>
			Proyecto a nivel perfil o prefactibilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>• Inclusión de medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul>			
Proyecto a nivel factibilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>• Inclusión de medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul>						
3	$0.6 < \theta_{riesgo} \leq 1.0$	Riesgo alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aplica Análisis Probabilístico Detallado</li> <li>• Inclusión de medidas de mitigación del riesgo de desastres</li> </ul>				

Fuente: elaboración propia

Se recomienda la utilización de estas herramientas por las ventajas comparativas que presentan respecto a otras alternativas pues arrojan información confiable, disminuyen los costos de la preparación de la inversión y facilitan su integración. No obstante, la UF podrá utilizar información que ha generado a través del desarrollo de sistemas y herramientas propias que arrojen la información requerida para la integración del análisis de riesgos en la evaluación socioeconómica.

Independientemente del método utilizado tendremos las siguientes conclusiones:

**Riesgo de Desastres Bajo:**

En el caso de que el “Riesgo de Desastres” sea bajo (lo cual debería haberse evidenciado en los pasos anteriores de “identificación de peligros” e “identificación de la exposición a peligros”) no se toma ninguna medida de GRD o se toman medidas de mantenimiento relacionado con GRD de la infraestructura.

**Riesgo de Desastres Medio:**

En este caso no es necesario realizar un Análisis Probabilístico Detallado (APD), sin embargo, debe contener los mismos elementos que el APD en cuanto al análisis de la amenaza, exposición, vulnerabilidad e indicadores de

rentabilidad. La UF debe definir una medida de gestión del riesgo de desastres para el proyecto de inversión pública.

Para cada una de las medidas de GRD propuesta deben calcularse sus costos y beneficios, dependiendo del tipo de evaluación socioeconómica utilizado en el proyecto (ACB o ACE).

De esta forma al realizarse un **Análisis Costo-Eficiencia** (ACE) sólo deben identificarse los costos de la medida de GRD (inversión, operación y mantenimiento) y luego incluir estos costos al flujo del indicador económico (por ejemplo, VAC o CAE), seleccionando la alternativa que presente el indicador más bajo.

Por otra parte, si se realiza un **Análisis Costo-Beneficio**, para calcular la PAE, se podrá considerar el porcentaje del valor de reposición como beneficio (costo evitado), de la medida de gestión para integrarlo al flujo de efectivo y pueden establecerse diferentes criterios, por ejemplo:

- Que no sea superior al costo de operación y/o mantención del proyecto.
- Que no sea superior al valor promedio de sobrecosto estimado de esa tipología o sector de proyectos.
- Que no sea mayor al porcentaje del costo de la inversión inicial que es utilizado para las optimizaciones del proyecto.
- Que no sea mayor al valor de reposición del servicio (por ejemplo, hospitales de campaña, puentes mecánicos).

Se calculará el indicador económico correspondiente (VPN), seleccionando la alternativa que presente el indicador más alto.

#### Riesgo de Desastres Alto:

En caso de que el riesgo de desastres sea alto, y que la PAE sea alta, el paso a seguir en el análisis de GRD es la ejecución del Análisis Probabilístico Detallado (APD). El proceso de APD deberá enfocarse a estimar los daños y pérdidas derivadas del riesgo.

Al obtener la expresión monetaria del APD, se incluirá dentro de la evaluación socioeconómica (ACB o ACE) de las alternativas con y sin medidas de mitigación respectivamente. Se integrarán como costos directos el costo de las medidas de mitigación, así como los beneficios derivados de las pérdidas evitadas, para poder comparar las alternativas a través del indicador económico del proyecto (VPN/CAE).

En esta sección se presentaron y analizaron los distintos niveles de análisis de riesgos (a nivel perfil, prefactibilidad o factibilidad) que pueden aplicarse dependiendo de las características de cada proyecto. En suma, la profundidad del análisis de GRD depende de los riesgos identificados, el nivel de exposición y la probabilidad de ocurrencia. Por lo que resulta imprescindible contar con datos estadísticos que permitan llevar a cabo las estimaciones probabilísticas correspondientes. El proceso completo del APD se describe con mayor detalle en la siguiente sección.

### **Análisis probabilístico detallado (APD) del riesgo de desastre en proyectos de inversión**

En esta sección se aborda con mayor detalle el análisis probabilístico detallado (APD) que se debe realizar para aquellos proyectos para los cuales se identifique un nivel alto de riesgo de desastre. Se propone que el análisis del riesgo y la integración dentro de la valoración socioeconómica del proyecto se realice en siete pasos consecutivos:

1. Análisis de peligros de conformidad con aquellos identificados como relevantes a nivel de perfil. La evaluación de los peligros se hará en función de su modelación a través de variables, que a continuación se enuncian, considerando su carácter aleatorio y sus funciones de probabilidad asociadas:
  - Frecuencia
  - Intensidad o magnitud
  - Duración
  - Ubicación espacial

Este primer paso sirve para conocer el ámbito de interacción, entre el proyecto y el sitio del emplazamiento en función de la interacción que vaya a tener con los peligros previamente identificados. Los criterios generales son la recurrencia y la intensidad de un peligro en la ubicación dada. <sup>2</sup>

2. Análisis de exposición según características de la ubicación en cuanto a un peligro.

Este paso sirve para determinar la fuerza con la cual impacta el peligro sobre la infraestructura del proyecto. Se determinan las descargas de energía probables que los peligros identificados pueden enviar a la zona de emplazamiento del proyecto, ya sea a través de ondas sísmicas, vientos, corrientes torrenciales, etc. Para determinar esto se realizan mediciones de intensidad probable de los peligros identificados a través de simulación de

<sup>2</sup> Para detalles relacionados al análisis de peligros, exposición y vulnerabilidades, consulte anexo 1.

eventos. Por ejemplo, se pueden establecer rangos de intensidad y aceleración del suelo en un punto determinado para saber: 1. Cuáles son las magnitudes máximas que podría experimentar un sitio dado; o identificar cómo esa energía sísmica se comporta, se atenúa o amplifica según condiciones de geología y dinámica de suelos. 2. Igualmente, se pueden simular huracanes o flujos de lava para conocer el comportamiento probable de vientos, lluvias de tormenta, deslizamientos o flujos de material volcánico en el sitio de emplazamiento del proyecto.

Con base en los análisis de los peligros y la exposición del proyecto a ellos, se define **umbral de mitigación**. El umbral de mitigación representa el punto hasta el cual se decide mitigar el riesgo relacionado a un peligro. Este umbral se determina considerando el comportamiento del peligro (probabilidad de un evento, etc.) y factores sectoriales (criticidad de la infraestructura, etc.). Por ejemplo, en el caso de un hospital, el umbral de mitigación para sismos puede ser más alto que el umbral para una carretera en la misma zona. En el caso de una carretera, una recurrencia de 500 años de un sismo de 8 no tiene mayor impacto sobre la vida útil de la carretera, y se puede gestionar de manera distinta, como puede ser a través de una transferencia del riesgo. Por el otro lado, se puede considerar que un hospital en la misma zona debe aguantar cualquier posible sismo, siendo una infraestructura social y crítica en casos de emergencias. Es por ello que se deben seleccionar los umbrales de cada proyecto considerando tanto la infraestructura y su relevancia, como los análisis del peligro y exposición.

3. Análisis de la vulnerabilidad del proyecto ante el peligro y con la exposición dada.

En este paso se analizarán las vulnerabilidades según modelos computacionales<sup>3</sup> con criterios de diseño de la infraestructura (ej. taludes, materiales etc.), en la ubicación dada, modelando dichos criterios para lograr una gestión adecuada para el umbral de mitigación anteriormente definido.

4. Identificación de las medidas de mitigación

Una medida de mitigación relacionada al diseño, se refiere a cambios en el diseño de un proyecto que, reducen la vulnerabilidad del proyecto al peligro

---

<sup>3</sup> Los modelos computacionales se generan con software contemplados para el modelaje. Esos programas contienen códigos predefinidos con curvas de vulnerabilidad (ej. de materiales), que permiten la programación a través de datos propios del terreno y del proyecto para modelar éste de manera relativamente sencilla. México, con el R-FONDEN tiene su propio programa con información específica del país. Además, hay un programa libre, disponible y programable, CAPRA, que se puede utilizar para el modelaje sin costo.

identificado. Eso es particularmente relevante cuando el proyecto se encuentra en un contexto multi-peligro y se pretende gestionar el conjunto de riesgos.

Cabe mencionar que la caracterización de las medidas de reducción de riesgo, permiten disminuir el nivel de riesgo del proyecto a un nivel máximo tolerable.

Si no se logra mitigar el riesgo con criterios de diseño para los umbrales de mitigación establecidos, se pueden considerar dos opciones de mitigación adicionales:

- Cambiar la ubicación del proyecto: si bien ya se hizo esa consideración a nivel de perfil, cuando no hay opciones de mitigar el riesgo adecuadamente a través de cambios del diseño, se debe considerar una reubicación con base en un análisis del terreno.
- Acortar vida útil y redimensionar el tamaño óptimo del proyecto: reduciendo así el costo de inversión y permitiendo una adaptación de la infraestructura a la situación de riesgo a mediano plazo. Esta forma de mitigación es particularmente adecuada en casos de infraestructura redundante en zonas con alta incertidumbre relacionada al riesgo (ej. a causa del cambio climático o de cambios esperables en el número de beneficiarios o de la intensidad de uso del proyecto).

Estas opciones de mitigación implican un rediseño de la obra más profundo, por lo cual es importante considerarlas en los análisis 1 y 2 para poder modelar las diferentes opciones.

## 5. Cuantificación de los costos y beneficios de la medida de mitigación

Una vez que se cuenta con los diseños alternativos de las medidas de mitigación, se cuantifican sus costos y beneficios generados por cada una de las alternativas de mitigación de riesgos.

Costos:<sup>4</sup>

- i. Costos de inversión de las medidas de mitigación de reducción del riesgo, estructurales y no estructurales.
- ii. Costos de operación y mantenimiento de medidas de reducción de riesgo, estructurales y no estructurales

Beneficios:

- i. Costos indirectos evitados por rehabilitación y reconstrucción

---

<sup>4</sup> Estos costos y beneficios son enunciativos más no limitativos.

- ii. Costos indirectos evitados para atender la emergencia (atención de damnificados, atención médica, entre otros).
- iii. Beneficios directos por no interrumpir la prestación de servicios o la provisión de bienes del proyecto
- iv. Otros beneficios indirectos asociados con mercados afectados por la ocurrencia de un evento.

Para cada uno de estos beneficios, se requiere contar con estudios de prospectiva que identifiquen los daños probables considerando su naturaleza aleatoria (PAE). De ser el caso, esta información se utilizará de manera directa modelando los mismos a través de sus funciones de probabilidad o mediante simulaciones Monte Carlo, entre otros.

Ahora bien, para valorar de manera adecuada los beneficios derivados de las medidas de mitigación, es necesario incluir la probabilidad de ocurrencia de la situación de riesgo y el periodo dentro del horizonte de evaluación en el que se presentará. Al igual que la estimación de daños, es necesario contar con estudios que proporcionen esta información.

Para el cálculo del beneficio anual esperado, se podrá considerar la siguiente fórmula:

$$\text{Beneficio anual esperado} = p_i \times \sum \text{Beneficios}$$

Donde

$p_i$  = Probabilidad de ocurrencia del riesgo  $i$

Beneficios = beneficio total esperado, relacionado a los riesgos. Se obtiene de la suma del producto de beneficios para cada uno de los eventos que probabilísticamente podrían impactar al activo por su frecuencia anual. Derivado de la complejidad de su estimación, este documento recomienda calcular únicamente los beneficios conceptualmente como los costos evitados por rehabilitación y reconstrucción.<sup>5</sup>

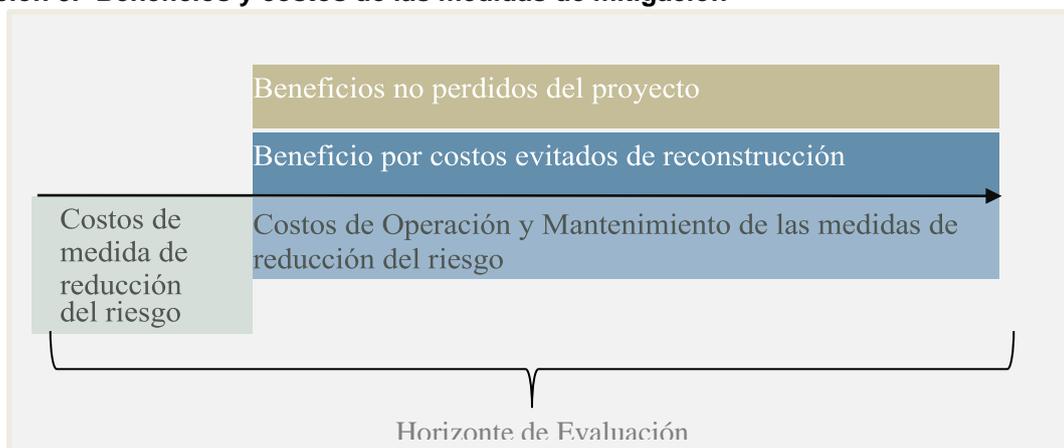
## 6. Selección de la alternativa de medida de mitigación.

En este apartado se busca comparar las alternativas para escoger aquella que socioeconómicamente sea más eficiente, incorporando el riesgo de desastres. Para cada medida de GRD propuesta deben compararse los

<sup>5</sup> Los modelos computacionales se generan con programas que contienen códigos predefinidos con curvas de excedencia permiten la programación a través de datos propios para modelar. En México, existen herramientas como el R-FONDEN, que es un programa con información específica que estima la Máxima Pérdida Probable de una infraestructura con la cual se puede estimar el costo evitado.

costos y beneficios incrementales de cada medida, dependiendo del tipo de evaluación socioeconómica utilizada en el proyecto (ACB o ACE).

**Ilustración 5.- Beneficios y costos de las medidas de mitigación**



Fuente: elaboración propia

7. Inclusión de la alternativa seleccionada al flujo de efectivo del proyecto.

Por último, dentro de la evaluación socioeconómica se deberá integrar la alternativa seleccionada para el cálculo de los indicadores de rentabilidad. De esta forma, una vez que se llevó a cabo el análisis de peligros, el análisis de exposición y se determinó la PAE, se cuantifican, valoran e incorporan los costos y beneficios a los indicadores de rentabilidad de cada alternativa para su comparación a fin de escoger la alternativa socioeconómica más eficiente.

$$VANS = -I + \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t + BI_t - CI_t + e}{(1 + d)^t}$$

Donde:

$I$  = Inversión

$B_t$  = Beneficios

$C_t$  = Costos

$BI_t$  = Beneficios indirectos

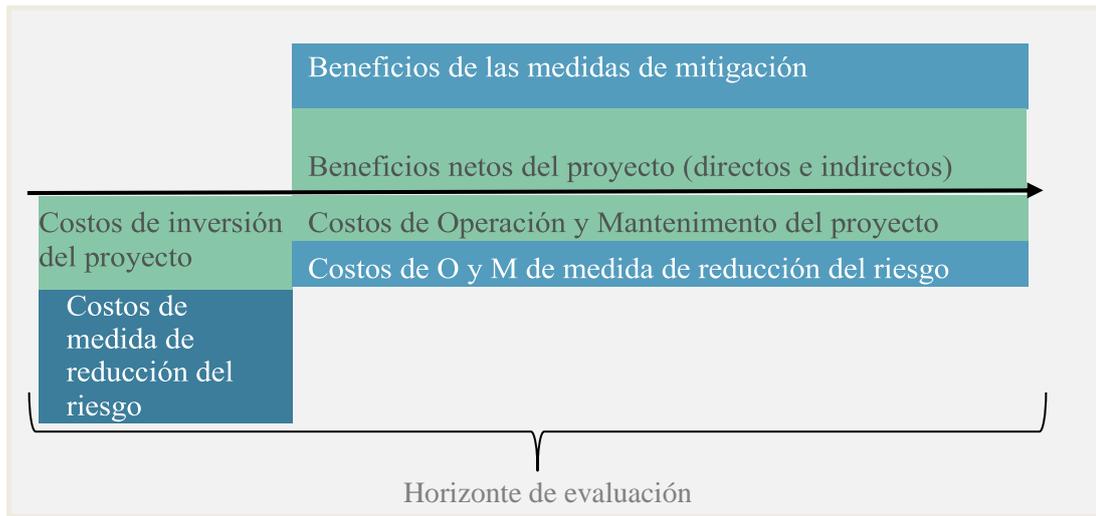
$CI_t$  = Costos indirectos

$e$  = Externalidades

$d$  = Tasa Social de Descuento

Tanto I como Bt, Ct, BIt, Clt y e incorporan los beneficios y costos generados por las medidas de mitigación.

**Ilustración 6.- Beneficios y costos netos del proyecto al incorporar las medidas de mitigación del riesgo de desastres**



Fuente: elaboración propia

## Conclusiones

La incorporación de criterios de gestión del riesgo de desastres dentro de la evaluación socioeconómica de los proyectos de inversión pública es una de las visiones más prospectivas que se han impulsado en América Latina.

México, es el séptimo país con más pérdidas económicas derivadas de catástrofes de origen hidrometeorológico entre 1997 y 2016. De acuerdo al Índice de Riesgo 2018 publicado por Germanwatch, México tiene pérdidas económicas de 2 mil 957 millones de dólares. Además, según los informes de Impacto Socioeconómico de los Desastres Naturales en México 2000-2016, del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), en los últimos 16 años los daños y pérdidas para México han ascendido a 424 mil 923 millones de pesos; más de 33 millones de habitantes han sido afectados, y 8 mil 164 han fallecido.

Esta propuesta, presentan una opción para que los proyectos que se presentan ante la Unidad de Inversiones para su evaluación socioeconómica y posterior implementación incorporen medidas de mitigación del riesgo de desastres en congruencia con su índice de riesgo.

Construir infraestructura resiliente, así como mantener y operar infraestructura con medidas incorporadas no sólo reduce la vulnerabilidad de los bienes; sino que también abona al cumplimiento de las agendas internacionales suscritas por México, estableciendo la coherencia como eje entre ellas.

## **Anexo. Análisis de los peligros naturales más frecuentes en México**

Se considera que el primer paso para realizar la estimación del riesgo de desastres consiste en conocer la dinámica de los peligros que potencialmente podrían impactar al proyecto. El análisis de los peligros depende fundamentalmente de tres factores: la intensidad, la localización y la recurrencia. La combinación de estos tres parámetros da como resultado un número infinito de episodios que teóricamente podrían impactar al proyecto. La forma de discriminar la ventana temporal de análisis será considerar el periodo de retorno establecido para el diseño de cada tipo de proyecto. Por ejemplo, para una carretera deberán establecerse los periodos de retorno para los peligros naturales que puedan impactarla en todo el trazo o secciones particulares.

El análisis del peligro o amenaza es el primero que se realiza en los estudios de riesgo de desastre, pues es el factor que ante las condiciones propicias detona la afectación. El criterio de priorización para determinar la magnitud de un peligro tiene que ver con una valoración espacio-temporal: qué tan cerca está la obra de la manifestación natural y, posteriormente, qué tan vulnerable es el activo ante la dinámica conocida o probable.

Como regla general, es necesario contar con un análisis histórico, lo más exhaustivo posible y que considere magnitudes y recurrencias de todos los eventos ocurridos asociados a los peligros de interés. Esta información se deberá complementar con los cálculos derivados de escenarios probabilísticos, en donde, con base en parámetros definidos, se simulan todos los eventos posibles de ocurrir dentro del marco temporal de interés, que se define por dependiendo del tipo de infraestructura y que, en caso de no haberse definido, deberán establecerse a través de la consulta a un grupo seleccionado de expertos en la materia.

Considerando el emplazamiento de la obra, se definen las posibles efectos de fenómenos que estén impacten esa ubicación. Por ejemplo, en el caso de una carretera, si el peligro identificado es la dinámica de socavamiento de las bases de un puente, entonces la consideración espacial para dicho peligro deberá ser la totalidad de la cuenca.

Aunque el territorio mexicano presenta una notable diversidad de peligros naturales, se presenta a continuación una selección de los cinco que más daños generan a la infraestructura carretera y los correspondientes pasos para analizar sus dinámicas.

### Peligro sísmico

Dada la diversidad de procesos que se desencadenan en torno a un sismo, su estimación probabilística se apoya en parámetros que, aunque con limitaciones para

describir totalmente el episodio, permiten llegar a niveles de utilidad para guiar el diseño de infraestructura resistente a las condiciones geodinámicas del sitio de emplazamiento. Los parámetros de más utilidad son:

- **Aceleración máxima o pico.** La aceleración representa los cambios en velocidad en una unidad de tiempo. La aceleración en un sismo se refiere al movimiento del suelo, se mide con un acelerómetro y es importante para la ingeniería sísmica, los códigos sísmicos y mapas de riesgo sísmico. La aceleración máxima (*peak ground acceleration*, PGA, por sus siglas en inglés) es el pico de velocidad registrado en un acelerógramo para una ubicación específica durante un sismo. Existe una correlación directa entre la aceleración máxima y la distancia del epicentro.
- **Velocidad máxima.** La velocidad a la que tiembla un punto en la tierra producto de un terremoto; la velocidad máxima es el valor máximo absoluto registrado.
- **Desplazamiento máximo.** Es la diferencia entre la posición inicial de un punto de referencia con respecto a cualquier posición posterior; en este caso como consecuencia de un sismo.
- **Espectro de Fourier.** La transformación de una señal al espectro de Fourier consiste en descomponer la señal en funciones sinusoidales de duración infinita y amplitud constante. En la frecuencia de los acelerógramos se identifica la amplitud máxima para cada periodo de aceleración, con lo que se identifican los periodos más importantes de un sismo, así como la periodicidad del registro.
- **Espectro de respuesta.** Los espectros de respuesta son la respuesta máxima de un oscilador, esta información se representa en curvas y se extrae de los acelerógramos; por lo que se calculan espectros de respuesta para el desplazamiento, velocidad y aceleración. Los espectros de respuesta permiten al ingeniero calcular la fuerza sísmica a la que se somete un edificio y la respuesta de las medidas de amortiguamiento.
- **Duración.** Se refiere a la duración del movimiento fuerte para una aceleración de interés. Entre más se prolongue el movimiento fuerte del suelo mayor es la posibilidad de que las estructuras se dañen o que suceda licuefacción en el suelo.

### *Efectos derivados de los sismos*

De acuerdo a la clasificación de ERN-AL (2010a), el movimiento sísmico puede detonar una serie de efectos que pueden darse simultáneamente o de manera individual, según las condiciones territoriales circundantes:

- **Movimiento del terreno.** Como regla general, el sismo producirá un movimiento de la superficie que variará dependiendo de la cantidad de energía liberada versus los factores de atenuación. Variables geotectónicas, geológicas, geomorfológicas y topográficas definen la atenuación de la intensidad de la onda sísmica, así como su duración.
- **Daño estructural.** En el cálculo del potencial daño estructural se consideran tres criterios principales: la magnitud del evento, la distancia de ocurrencia y los efectos de sitio. La respuesta de los materiales utilizados en una obra dada varía según criterios mencionados: una edificación relativamente frágil puede resistir un sismo si se encuentra lejos del epicentro; sin embargo, una estructura mucho más resistente que la primera podría verse dañada si se expone a una magnitud dada por un periodo de tiempo superior al que fue considerado en su diseño original.
- **Licuefacción.** Este proceso suele darse en condiciones de suelo granular, especialmente en arenas saturadas con tamaño de grano homogéneo hasta una profundidad menor a 20 metros, en condiciones de saturación y nivel freático somero. Esta combinación de factores hace que el suelo se comporte como una sustancia líquida cuando interactúa con la onda sísmica. Cuando ocurre un sismo en tales condiciones, se elimina la resistencia del suelo ante la separación de los granos, por lo que las estructuras pierden cimentación y colapsan o se vuelcan.
- **Deslizamientos.** En muchas ocasiones la onda sísmica detona movimientos masivos de tierra. En condiciones de pendiente pronunciada, en donde además existen rasgos geotectónicos propicios, el material se desprende por efecto de la gravedad. Muchas veces se da una combinación entre dinámicas meteorológicas, hidrológicas y tectónicas; ya que por acción de las precipitaciones o cursos superficiales de agua se saturan los suelos y al momento de un movimiento sísmico ocurre el deslizamiento.

El peligro sísmico se cuantifica a partir de los periodos de recurrencia de las intensidades sísmicas que requieren ser consideradas para ciertos tipos de diseño. Aunque esto se determinaba usando métodos determinísticos, actualmente se recomienda el uso de análisis probabilísticos pues incorporan las incertidumbres asociadas a los parámetros de un sismo, como la frecuencia de ocurrencia o las probabilidades de excedencia de intensidad.

### *La curva de peligro sísmico*

El objetivo final del cálculo es encontrar la curva de peligro, que indica la probabilidad de que una intensidad dada sea igualada o excedida en un determinado periodo de tiempo. En el caso de la infraestructura, dicho periodo de tiempo suele ser mayor a la

29

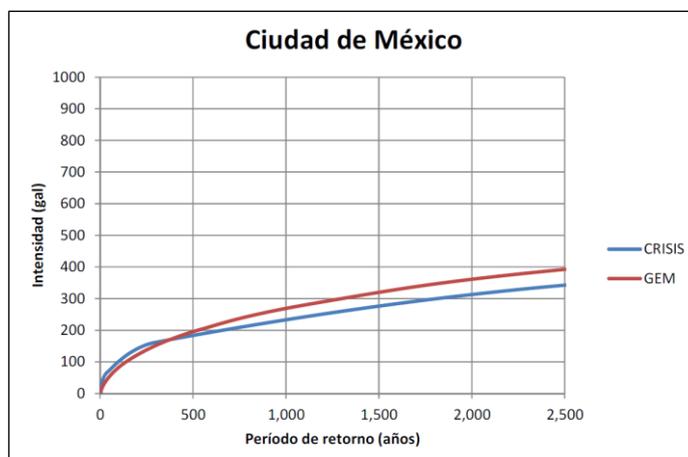
vida útil que utiliza de referencia el diseño. Según sea el tipo de infraestructura, así será la determinación del periodo de retorno que se considera para el diseño.

El abordaje propuesto por CIMNE (2013) recomienda los siguientes pasos para realizar el análisis del peligro sísmico

- 1. Identificación y definición de regiones tectónicas.** Se obtiene a partir de la información geológica y neotectónica disponible. El producto de la fase es la definición geométrica de las principales regiones y fuentes sísmicas identificadas.
- 2. Cálculo de parámetros de sismicidad a las diferentes mallas.** Sobre la base del catálogo sísmico histórico se asignan los parámetros de sismicidad a cada uno de los nodos de las mallas definidas en las diferentes profundidades seleccionadas en el análisis.
- 3. Generación de un conjunto de eventos estocásticos compatible con la distribución de ubicación, profundidad, frecuencias y magnitudes.** En este punto se simula un conjunto de eventos sísmicos posibles en los nodos de las mallas. En cada nodo se generan diferentes escenarios de diversas magnitudes, cuya probabilidad de ocurrencia se determina por la curva de recurrencia de magnitudes de cada fuente sismogénica que resulta del paso anterior.
- 4. Modelo de atenuación de parámetros de movimiento del terreno.** Con la información de las funciones de atenuación espectral, se definen funciones de atenuación para cada una de las provincias sismotectónicas.
- 5. Generación de mapas de peligro de eventos representativos.** Los mapas se generan de acuerdo a los valores máximos y espectrales.
- 6. Aplicación del modelo probabilístico de peligro sísmico.** El resultado de la modelación es un mapa para cada uno de los parámetros de intensidad, de modo que exista un mapa para cada periodo de retorno considerado.

La figura 1 muestra un ejemplo de curvas de peligro sísmico considerando intensidades máximas para distintas tasas de excedencia anual y la localización de la Ciudad de México. La curva relaciona las intensidades con periodos de retorno según la información de los catálogos sísmicos. Las curvas que se presentan se generaron utilizando dos modelos probabilísticos: el GEM y el CRISIS 2012.

**Figura 1. Curva de peligro sísmico para la Ciudad de México**



Fuente: CIMNE (2013).

### Peligro por inundación

La categoría de inundación comprende una serie de fenómenos que, aunque similares, tienen orígenes distintos, lo que consecuentemente requiere de los modelos adecuados para la estimación de su riesgo asociado. En este apartado se analizan las inundaciones por desbordamiento de cauces, que están estrechamente ligados a patrones de precipitación o, en el caso de influencia antropogénica, debido a alteraciones significativas en los caudales de una cuenca. La estimación de los patrones de comportamiento espacio-temporales de los desbordamientos se obtiene a partir de la relación entre los niveles de precipitación y las condiciones de relieve de la cuenca. Ambos criterios permiten conocer el comportamiento probable de las avenidas, niveles medios de caudales durante el año y distintos periodos de retorno para avenidas extraordinarias.

Cuando el formulador de proyecto se vea en necesidad de generar o contratar un análisis de riesgo de desastre por inundación, deberá recibir tres estudios centrales:

- **El análisis hidrológico**, que establece la relación entre la precipitación en la cuenca y el volumen de agua que escurre hacia los cauces.
- **El análisis hidráulico**, que describe las características del flujo entre dos puntos del cauce.
- **El análisis de inundación de llanura**, que utiliza modelos matemáticos para describir el comportamiento del desbordamiento fuera del cauce. Este análisis estima la velocidad del movimiento de volúmenes determinados de agua sobre los datos existentes de relieve cercano al cauce.

Cualquiera de los tres análisis requiere información específica según las características y escalas del proyecto. En muchas ocasiones los gobiernos o sus instituciones cuentan con esta información; en otros casos por los niveles de detalle que requiere el análisis se necesita generar la información. Esta situación debe ser clarificada antes de solicitar los estudios y estar claramente establecida en las especificaciones de los documentos de contratación en los casos en los que las unidades ejecutoras requieran contratar el estudio a terceros. Genéricamente, las especificaciones del análisis deben determinar:

- La escala de detalle del modelo de terreno y el área comprendida (en ocasiones se utiliza toda la cuenca, pero en otras oportunidades el análisis puede realizarse en subcuencas o secciones específicas del cauce).
- Los requerimientos de información histórica de precipitación deben especificar la ventana temporal de los registros, la densidad espacial deseada de los puntos de muestreo (que correspondería a la localización de las estaciones), el porcentaje de tolerancia a vacíos en el registro y los métodos para inferir los datos faltantes.
- Una valoración argumentada acerca de la necesidad de incorporar modelos de calentamiento global que permita complementar el registro histórico con tendencias posibles de cambio en los promedios observados.

El modelo recomendado por ERN (2010b) se basa en la identificación de las intensidades<sup>6</sup> de precipitación distribuidas en un área determinada. Dichas intensidades se ubican temporalmente a partir del cálculo de sus respectivos periodos de retorno. Además, el modelo hace una distinción entre las inundaciones detonadas por precipitaciones no vinculadas a huracanes respecto a aquellas sí lo están. Esto es particularmente relevante en el caso mexicano, en donde experimenta el impacto de sistemas de baja presión en ambas costas.

La modelación debe arrojar una serie de mapas en donde se aprecia, para cada tipo de avenida considerada, su periodo de retorno y extensión geográfica. La literatura ofrece un amplio catálogo de métodos de modelaje, por lo que debe prestarse atención de seleccionar uno que responda a las necesidades y características del proyecto de inversión. Muchos modelos paramétricos son de una probada robustez científica, pero funcionan para realizar análisis macro regionales y no para estudios que requieren mayores niveles de detalle, como los proyectos de infraestructura carretera. Así, esta propuesta de modelo

---

<sup>6</sup> La intensidad se define a partir de la profundidad, velocidad y duración del desbordamiento.

permite determinar los rasgos de la inundación en las vecindades de un cauce a partir de la precipitación de tormentas que se simulan aleatoriamente.

### *Pasos analíticos mínimos*

El análisis de la inundación busca modelar la intensidad del peligro distribuido espacialmente. Para ello debe generarse un conjunto hipotético de lluvias con sus respectivos valores de distribución espacial, intensidad y duración para cada evento. Estos eventos se ubican dentro del área de interés (en este caso donde el bien inmueble estará ubicado). Esto se realiza en cinco pasos que se describen a continuación:

1. Generación de eventos estocásticos. Debe generarse un conjunto de escenarios de lluvia que estén ajustados con las características conocidas del sitio del proyecto. Los escenarios deben estimar las condiciones promedio de caudales para las cuencas que podrían afectar al proyecto.
2. Determinación de los parámetros de lluvia. Los escenarios deben establecer los rasgos de intensidad y duración de las lluvias simuladas para que posteriormente se pueda determinar el volumen que puede alcanzar los cauces y eventualmente llegar a zonas inundables.
3. Modelaje de las inundaciones. Las lluvias deben modelarse según los métodos validados en el país o, en ausencia de una norma técnica oficial, la recomendación de cuerpos profesionales especializados. Es importante verificar que, adicionalmente, la información disponible para alimentar el modelo cumpla con los estándares necesarios para generar un escenario robusto y confiable. Caso contrario, deberá recopilarse la información en campo.
4. Consolidación de los escenarios generados. Una vez que el modelo se corrió para cada uno de los eventos simulados, deben generarse una serie de escenarios estocásticos de inundación, con su respectiva frecuencia anual de ocurrencia. La totalidad de eventos debería describir la variedad de lluvias que pueden ocurrir en el área de estudio. Cada escenario tendrá una tasa de excedencia particular, las cuales podrán representarse en un mapa que muestre los niveles de inundación posible para cada periodo de retorno.

### Peligro por deslizamiento

Los deslizamientos corresponden a movimientos de la corteza que pueden variar de velocidad y que se dan por efecto de la gravedad, la que provoca un desplazamiento pendiente abajo de materiales de diversa naturaleza, junto con su cobertura. Cuando una ladera se desestabiliza ocurre un deslizamiento. Tal proceso puede darse por una alteración de la formación, como cuando se erosiona la sección de apoyo del talud;

en otras ocasiones se incrementa el peso en la parte superior más allá de la resistencia de la pendiente, lo que genera que se deslice el material; o también puede darse el caso de cambios en la constitución física de la ladera, como cuando se da una saturación extraordinaria de agua u otro fluido.

Los deslizamientos ocurren cuando existe la presencia de uno o más de los factores que se enuncian a continuación:

- **Topografía.** En términos generales, las zonas de alta pendiente y escasa cobertura vegetal son propensas a deslizarse. En momentos de alta precipitación, la concentración del agua absorbida puede incrementar el peso de la ladera de manera importante, lo que rompe la resistencia ante la gravedad. No obstante, existen casos en donde el movimiento de reptación puede darse aún y cuando existan condiciones de relieve suave.
- **Precipitaciones.** Las excesivas precipitaciones pueden saturar el suelo a niveles que incrementan su peso más allá de la capacidad de resistencia a la gravedad; pero también pueden erosionar las bases de los taludes, dejando sin soporte las partes altas de la pendiente y produciendo el movimiento. Es importante aclarar que la lluvia difícilmente actúa como un factor aislado: en muchos casos se da una combinación de factores de alteración de la ladera que, ante la presencia de las lluvias, favorece la aparición de movimientos rápidos o paulatinos de tierra.
- **Sismicidad.** En zonas expuestas a sismicidad, las pendientes pueden verse desestabilizadas. Este proceso de desestabilización puede ser repentino o de larga gestación.

**Intervención humana.** La desestabilización de laderas ocurre con mucha frecuencia por acción humana. Existen múltiples dinámicas que se derivan de actividades socioeconómicas que incrementan la predisposición de una pendiente a deslizarse. Entre los principales puede mencionarse:

**Cambio de cobertura vegetal.** En ciertas formaciones, la cobertura vegetal reduce la velocidad de infiltración en el suelo. Cuando esta condición se altera por cambios en la cobertura, por ejemplo, por la instalación de actividades agropecuarias o deforestación, la capacidad de infiltración puede aumentar, lo que incrementa el peso de la pendiente a niveles que pueden superar la capacidad del talud para mantenerse.

**Erosión.** Similarmente, a través de procesos erosivos provocados por acción humana puede incrementarse la susceptibilidad de una pendiente a deslizarse. La construcción de obras de drenaje sin el adecuado diseño suele contribuir a erosionar las laderas, especialmente es sus bases, con

lo que pueden darse un deslizamiento repentino o gradual, según la velocidad del flujo y el volumen de agua que entra en contacto con la ladera.

### *Tipos de deslizamientos*

Generalmente los deslizamientos se clasifican a partir de la combinación de dos criterios: el comportamiento mecánico del movimiento y su velocidad. Para el primer criterio se han establecido las siguientes categorías:

- **Caída.** Desprendimiento de material, generalmente rocas de gran tamaño que caen de forma rápida. Suelen darse con frecuencia en las orillas de las carreteras, cuando los taludes se han desestabilizado o no se construyeron con el ángulo adecuado.
- **Volcamiento.** Corresponde a una especie de giro hacia adelante, generalmente detonado por excesos de agua.
- **Deslizamiento.** Cuando secciones del suelo se mueven por efectos de la gravedad, generalmente en zonas de fallas pueden tomar la forma de hundimientos, cuando el sustrato es blando y la gravedad facilita su movimiento ladera abajo; en otros casos se dan movimientos de capas delgadas en superficies poco inclinadas.
- **Flujos.** Pueden ser de tierra, cuando se transportan materiales blandos y capas de cobertura vegetal o de lodo cuando la saturación del suelo licúa las capas superficiales y transporta mezclas considerables de materiales con importantes cantidades de energía.

**Reptación.** En estos casos se da una deformación lenta del terreno por acción de la gravedad. Los principales indicadores visuales son la inclinación de árboles, la deformación de las carreteras o el agrietamiento del suelo.

Respecto a la velocidad, la siguiente tabla muestra la forma en que se clasifican los deslizamientos y el poder destructivo que, en términos generales, se le asocia a cada categoría.

**Tabla 1. Categorías de deslizamientos según su velocidad.**

Clase	Descripción	Rango de velocidad
7	Extremadamente rápido	$5 \times 10^3$ mm/s a 5m/s
6	Muy rápido	$5 \times 10^1$ mm/s a 3m/min
5	Rápido	$5 \times 10^{-1}$ mm/s a 1.8m/h
4	Moderado	$5 \times 10^{-3}$ mm/s a 13m/mes
3	Lento	$5 \times 10^{-5}$ mm/s a 1.6m/año

2	Muy lento	$5 \times 10^{-7}$ mm/s a 16 mm/año
1	Extremadamente lento	$< 5 \times 10^{-7}$ mm/s a $< 6$ mm/año

Fuente: ERN (2010b).

### *Pasos analíticos mínimos*

Dado que el deslizamiento puede ser detonado tanto por movimientos sísmicos como por saturación del suelo por lluvias, su modelación requiere considerar ambos factores de causalidad. Para ello deben simularse todos los eventos aleatorios que puedan desestabilizar el deslizamiento. Adicionalmente, se deben generar escenarios de humedad del suelo con diferentes niveles de saturación. El fin de la modelación es contar con una frecuencia de ocurrencia particular que dependerá de las condiciones, combinadas o separadas de sismicidad y saturación.

Para la selección del modelo deben considerarse y justificarse aspectos como estilos de falla, disponibilidad de información y conocimiento histórico de las dinámicas geomorfológicas de la zona. ERN (2010b) recomienda la consideración de modelos que son ampliamente utilizados y validados en la región para estos fines. Independientemente del modelo a utilizar, los pasos mínimos que debe contener el análisis son:

1. Consolidación de toda la información. Idealmente en un modelo de elevación digital, deberá recopilarse información geológica, geomorfológica, de uso y cobertura del suelo y aguas superficiales y subterráneas, así como niveles conocidos de precipitación.
2. Identificación de áreas críticas. Debe considerar la proximidad de evidencias de movimiento de material en las cercanías del proyecto. Información cartográfica y la interpretación de imágenes aéreas permite identificar evidencias que podrían estar cubiertas por vegetación; también se requerirían estudios de campo para identificar señales de meteorización, ruptura o presencia de depósitos coluviales. Los efectos de la actividad humana también deben inventariarse en este paso como factor de peligro: erosión, cortes artificiales o deforestación podrían modificar el comportamiento de la ladera en su conjunto.
3. Evaluación de la susceptibilidad. Para dicha evaluación ERN recomienda la selección de alguno de los modelos más utilizados en la región: Mora-Vahrson, Newmark, Método de Falla Plana o el Detallado de Falla Rotacional. Cuando en el país exista ausencia de determinación oficial para el análisis, la selección de uno de estos cuatro métodos es recomendable a partir de una discusión consensuada entre especialistas en el ramo.

4. Creación de la biblioteca de eventos. Posterior a la aplicación del modelo, todos los escenarios posibles se compilan en mapas de factores de inseguridad, los cuales tienen asignado un nivel de probabilidad determinado según el evento detonante considerado.

### Peligro por ciclones tropicales

Huracán es uno de los diversos términos que existen para referirse a los ciclones tropicales, que son fenómenos meteorológicos en los que se da una tormenta en torno a un centro de baja presión en donde existe un importante diferencial de energía entre masas de aire frío y aire caliente. Ello genera movimientos circulatorios en la atmósfera que se caracterizan por altos niveles de distribución de lluvias y vientos. Según la velocidad de sus vientos, estos fenómenos ciclónicos pueden categorizarse desde *depresiones tropicales* hasta huracanes de distintas categorías.

En términos de peligrosidad, los ciclones pueden representar un peligro para proyectos a través de tres expresiones físicas en el territorio: sus vientos, las mareas de tormenta y las lluvias derivadas del huracán.

- Los vientos pueden llegar a superar los 250 km/h, lo que puede generar daños importantes tanto directos, por efecto de las ráfagas en los inmuebles, como también indirectos, por la alteración estructural del entorno o el transporte de proyectiles.
- Las mareas de tormenta, por su parte, pueden generar inundaciones extraordinarias del mar en zonas de litoral, con un potencial apreciable de daño en infraestructura.
- Las lluvias pueden disparar inundaciones en zonas en donde no es frecuente que se registren bajo condiciones de precipitación ordinarias.

Dadas estas condiciones de peligrosidad, es posible que el ciclón tenga implicaciones diferenciadas para distintos portafolios según sea su exposición a los diferentes componentes del fenómeno. Por ejemplo, la afectación en un camino puede darse por el efecto de lavado que produce una marea de tormenta en la superficie de rodamiento, pero al mismo tiempo la obra no es susceptible a los vientos. En otros casos, la influencia del ciclón puede estar dada por sus lluvias, las que pueden representar una carga adicional para el suelo en términos de captación de agua, lo que puede llegar a detonar deslizamientos en algunos tramos de las carreteras expuestas. Por ello es importante establecer cuáles son los procesos de relación de cada proyecto con la incidencia de ciclones y determinar las cadenas de activación concatenada de otros peligros vinculados, como deslizamientos e inundaciones.

El estudio de los ciclones tropicales ha generado decenas de modelos analíticos tanto estadísticos como dinámicos. Al igual que el caso de otros peligros, la recomendación

a la hora de seleccionar el modelo debería estar guiada por la verificación de la existencia de una norma técnica oficial en el país, idealmente, una que haya sido seleccionada para estos tipos de infraestructura carretera. De no ser así, la determinación del modelo debería hacerse a partir del criterio de un grupo experto. Cualquiera que sea el caso, es importante que la modelación incorpore una serie de pasos mínimos.

### *Pasos analíticos mínimos*

La modelación de ciclones permite generar una serie de tormentas aleatorias que se correspondan con las trayectorias y características registradas en el área de interés.

1. Biblioteca de eventos estocásticos. A través de técnicas estadísticas pueden simularse bibliotecas con miles de escenarios de tormenta, cada uno con características particulares, como trayectoria, velocidades y frecuencias de ocurrencia.
2. Generación de mapas de peligro. En estos mapas se fusionan tanto los registros históricos como los resultados de las simulaciones. Para la zona de interés debe entonces generarse un mapa que muestre para cada punto de la grilla las velocidades pico de las ráfagas, que además contenga por lo menos cinco eventos probabilísticos con intensidades de velocidad de viento para periodos de retorno que se encuentren entre los 10 y 1000 años.
3. Conversión de velocidades de viento continental. Para ello el análisis deberá calcular el campo de gradientes de viento y basarse en la rugosidad superficial y topografía para el cálculo de la velocidad de viento de ráfaga pico para cinco segundos en el sitio de interés.
4. Cálculo de la marea de tormenta. Para ello se utiliza el modelo digital de elevación de la sección litoral, al igual que la batimetría. Debe considerarse además la presión y los campos de viento de tormenta para cada intervalo de tiempo, ya que con estos datos puede estimarse el aumento del nivel del mar y qué tanto puede inundar zonas costeras.
5. Cálculo de lluvias. Para ello se replica el modelaje de las lluvias no derivadas del huracán pero utilizando los nuevos parámetros resultantes de la generación de las tormentas estocásticas.
6. Finalmente, el resultado del modelo debe ser calibrado contra los catálogos de trayectoria del Pacífico y el Atlántico.

### Peligro volcánico

Similar a los ciclones tropicales, el peligro volcánico presenta diferentes niveles de peligrosidad según los subproductos que son posibles derivar de una erupción

volcánica. Estos dependen del tipo de volcán y sus niveles de explosividad. Los rasgos propios de cada volcán y la relación de proximidad con el inmueble serán los dos criterios que determinen el tiempo de subcomponente del peligro en donde deberá enfatizar el análisis: por ejemplo, para cenizas, flujos piroclásticos, flujos de lava o proyecciones balísticas.

### *Pasos analíticos mínimos*

La modelación de peligro se realiza a partir de escenarios con una frecuencia de ocurrencia asignada y con rasgos particulares de los diferentes productos volcánicos.

1. Definición de volcanes activos. Se considera que un volcán está activo cuando existe evidencia de actividad durante los últimos 10 mil años. A partir de este primer filtro, los volcanes deben estar caracterizados según su tipo, productos que genera e índice de explosividad máximo registrado.
2. Definición de recurrencia. A partir de la información de los catálogos históricos se definen tasas de excedencia para cada uno de los volcanes que podrían afectar el proyecto.
3. Determinación de expansión espacial de los productos. Cada tipo de producto volcánico debe localizarse alrededor de los conos de emisión identificados para cada volcán.
4. Modelación de la distribución de los productos. Cada escenario que se ha generado a partir de los valores del índice de explosividad volcánica se ubican en un mapa para estimar el alcance espacial de los productos prioritarios.

### Aproximaciones históricas al peligro

Existirán casos en los que la información sobre la exposición no es suficientemente actual, detallada o compleja para hacer los análisis probabilísticos. En dichos casos, una medida alternativa que puede ayudar a indicar qué tan relevante es considerar un tipo de peligro sobre otro, es recurrir a información histórica identificables en distintas fuentes. Este es un primer paso de priorización de peligro, lo que podrá ser complementado con el criterio de especialistas.

Existen procedimientos simples de estimación del peligro, que permiten tener una primera aproximación a las frecuencias e intensidades del peligro de interés. La guía presentada en la tabla 4 tiene la ventaja de ser lo suficientemente genérica para utilizarse en cualquier tipo de peligro, particularmente en casos en donde los costos de la obra permiten asimilar mayores niveles de incertidumbre.

En el caso de México, el Atlas de Riesgos provee información relacionada a los peligros naturales en tiempo real, integrando información histórica con modelajes al futuro.

**Tabla 2: Guía para la estimación de peligrosidad de peligros naturales.**

Categoría de ocurrencia	Descripción de intensidad	Número de eventos conocidos en un periodo de 100 años	Probabilidad anual de ocurrencia	Periodo de recurrencia aproximado*
Frecuente	Baja intensidad, pocos efectos	Menos de 10	>0.10	2 a 5 años
Probable	Intensidad media-baja, algunos efectos y daños asociados	Alrededor de 10	~0.10	Alrededor de 10 años
Ocasional	Intensidad media, daños y efectos considerables	Alrededor de 5	~0.05	Alrededor de 20 años
Remota	Intensidad alta, daños y efectos graves	Alrededor de 1	~0.01	Alrededor de 100 años
Improbable	Intensidad muy alta, evento con características catastróficas	Ninguno	<0.01	200 a 500 años

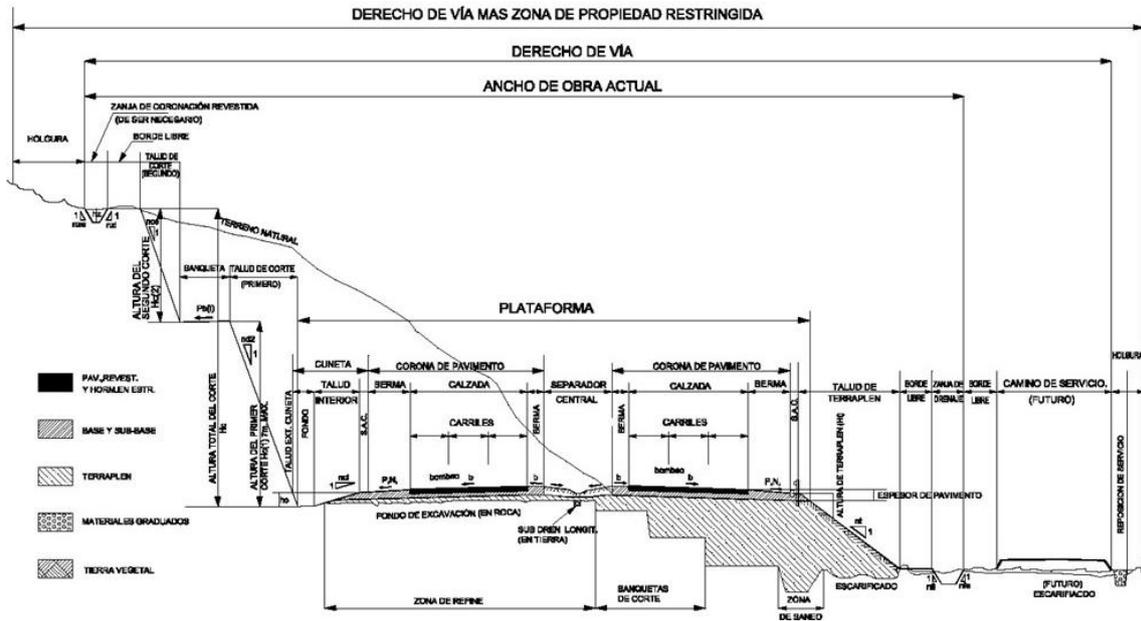
\* El periodo de recurrencia significa que estadísticamente, la probabilidad de experimentar un evento de tales características podría ubicarse en el periodo establecido. Sin embargo, es importante aclarar que esto no implica que una vez registrado un evento, se tenga que esperar a que ocurra el mismo evento hasta dentro de 20 años, si ese fuera el periodo de recurrencia estimado: es posible que un evento similar ocurra antes, incluso al día siguiente, solo que la probabilidad para que ello ocurra es muy baja.

## El análisis de la exposición

La exposición describe el grado de cercanía que, en este caso, el inmueble tiene con la manifestación del peligro. Determina la relación espacial que existe entre los componentes de una obra y la manifestación del fenómeno. Genéricamente se asume que, entre más lejos esté un bien del área de influencia del peligro, menor será el posible impacto si además existen condiciones de fragilidad en alguno de los componentes de la estructura.

El procedimiento general inicia por la identificación de los distintos componentes de la obra. La figura 2 muestra los componentes que en general tienen las carreteras. Según el tipo de obra, algunos de estos podrán variar o tendrán otros; cualquiera que sea el caso, el análisis deberá hacer el listado y caracterización de sus componentes como un primer paso.

**Figura 2. Componentes Típicos de una Sección Transversal Típica a Media Ladera.**



Esta caracterización debe incluir al menos la siguiente información para aplicar los modelos:

- Ubicación geográfica, preferiblemente establecida en coordenadas.
- Principales rasgos geométricos, físicos e ingenieriles.
- Su valoración económica.
- Su nivel de ocupación humana. En el caso de las carreteras, esto se refiere a la estimación del tránsito promedio para un determinado periodo.

Cuando la información no está disponible dentro del diseño del proyecto, la alternativa que se utiliza son datos recolectados en bases de datos secundarias, información macroeconómica o tablas de referencia internacional para determinados tipos de obra. El nivel de detalle no tiene que ser necesariamente el más fino, lo que se requiere en este paso es conocer qué tipo de materiales van a estar sometidos a la acción de los peligros posibles. La información recolectada deberá incorporarse en una base de datos georreferenciada, la que servirá como insumo para su modelación en un sistema de información geográfica.

En general los planos de las carreteras y sus componentes secundarios contienen la información requerida para una modelación detallada sobre la exposición y también sobre vulnerabilidad. Es importante además considerar otros elementos que, aunque

en sentido estricto no forman parte de la carretera, podrían afectar la prestación del servicio del inmueble también ante un eventual impacto de los peligros. Entre los que típicamente se incluyen en estos inventarios están:

- Tuberías, oleoductos o gasoductos.
- Entronques de vías.
- Puentes.
- Túneles.
- Redes eléctricas.

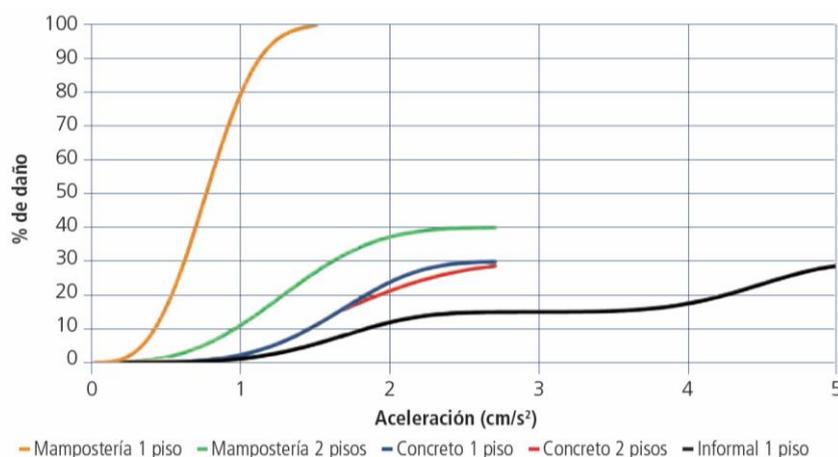
De existir alguno de estos ítems dentro del ámbito de afectación potencial de los peligros, deberá ser igualmente considerado dentro del inventario de exposición.

### Análisis de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad refleja los niveles de fragilidad que los distintos componentes de la obra presentan bajo la influencia de los peligros a los que están expuestos. Esto se determina a partir de la base de datos de elementos expuestos que se habrá levantado en el paso anterior. Los materiales juegan un rol importante.

Para cada tipo de material existen funciones de vulnerabilidad que determinan esta susceptibilidad a sufrir daños ante el peligro considerado. De acuerdo a Yamin et al. (2013) la función de vulnerabilidad establece la relación entre los parámetros de intensidad del peligro y la respuesta potencial del material expresado como el daño probable (Figura 3).

**Figura 3. Ejemplo del cálculo de funciones de vulnerabilidad para diferentes tipos de material en edificaciones expuestas.**



Fuente: Yamin et al. (2013)

Generalmente, los países y las instituciones especializadas cuentan con bibliotecas de funciones que pueden ser utilizadas para el análisis de los componentes de la obra. Para cada tipo de material se puede generar una función. Cuando no existe registro de la función de vulnerabilidad requerida, puede recurrirse a mecanismos alternativos. ERN (2010e) propone los siguientes, que son los de uso más común:

- Ensayos de laboratorio y modelación estructural.
- Aplicación de modelos analíticos o numéricos.
- Evaluación del comportamiento de materiales y componentes similares durante eventos análogos.
- Opinión de expertos acreditados.

Cualquiera que sea el caso, las valoraciones deben ser realizadas y respaldadas por ingenieros estructurales que estén en capacidad de corroborar que los análisis cuenten con el mayor rigor y precisión posible, especialmente cuando la obra no contempla pruebas de materiales en laboratorio. Los colegios profesionales de ingeniería en los países, así como las instituciones rectoras y las compañías constructoras deberían estar en la capacidad de realizar alguno de estos análisis pormenorizados.

Identificada la vulnerabilidad para cada uno de los componentes de la carretera, deben ser unificadas en una sola cifra en un modelo computacional. Para ello, el método más común es simular los impactos probables y, sobre estos resultados, calcular los costos de reposición o reconstrucción. En este ejercicio se contemplan los costos de estabilizar los taludes, reponer la superficie de rodamiento o reforzar columnas en el caso de los puentes. Esto permite tener una idea global del costo del riesgo total al que está expuesta la obra, pero a la vez discernir cuáles componentes son los que tienen mayor contribución a la vulnerabilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

Banco Mundial. 2016. *Comunicado de prensa 2017/100/GCC*. Recuperado de: <http://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2016/11/14/natural-disasters-force-26-million-people-into-poverty-and-cost-520bn-in-losses-every-year-new-world-bank-analysis-finds>

CEPEP (Centro de Estudios para la Preparación y Evaluación Socioeconómica de Proyectos). 2018. *Guía General para la presentación de evaluaciones costo y beneficio de programas y proyectos de inversión*. Secretaría de Hacienda y Crédito Público. México.

CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería). 2013. *Modelación Probabilista de Riesgos Naturales en el Nivel Global: El Modelo Global de Riesgo*. UNISDR: Ginebra.

Cruz, V. 2013. *Los Sismos. Una Amenaza Cotidiana*. UNAM: CDMX

EIRD. 2009. *Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres 2009. Riesgo y Pobreza en un Clima Cambiante*. Naciones Unidas: Ginebra.

ERN (Consortio Evaluación de Riesgos Naturales –América Latina–). 2010a. Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-1. *Componentes Principales del Análisis de Riesgo*. Washington: Banco Mundial, Banco Interamericano de Desarrollo, ISDR y CEPREDENAC.

ERN (Consortio Evaluación de Riesgos Naturales –América Latina–). 2010b. Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-2. *Descripción General de Amenazas Naturales*. Washington: Banco Mundial, Banco Interamericano de Desarrollo, ISDR y CEPREDENAC.

ERN (Consortio Evaluación de Riesgos Naturales –América Latina–). 2010c. Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-3. *Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección*. Washington: Banco Mundial, Banco Interamericano de Desarrollo, ISDR y CEPREDENAC.

ERN (Consortio Evaluación de Riesgos Naturales –América Latina–). 2010d. Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-4. *Metodología para la Definición del Inventario de Activos Expuestos*. Washington: Banco Mundial, Banco Interamericano de Desarrollo, ISDR y CEPREDENAC.

ERN (Consortio Evaluación de Riesgos Naturales –América Latina–). 2010e. Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-5. *Vulnerabilidad de Edificaciones e Infraestructura*. Washington: Banco Mundial, Banco Interamericano de Desarrollo, ISDR y CEPREDENAC.

ERN (Consortio Evaluación de Riesgos Naturales –América Latina–). 2010f. Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-6. *Metodología de Análisis Probabilista del Riesgo*. Washington: Banco Mundial, Banco Interamericano de Desarrollo, ISDR y CEPREDENAC.

García, V. 2005. *El riesgo como construcción social y la construcción social de riesgos*. Desacatos 19.

Ghesquiere, F.; Mahul O. 2010. *Financial Protection of the State against Natural Disasters: A Primer*. World Bank Research Working Paper 5429. Washington, D. C.: Banco Mundial.

IMF (International Monetary Fund). 2014. *World Economic Outlook: Legacies, Clouds, Uncertainties*. Washington D.C.: IMF.

IMF (International Monetary Fund). 2018. *Public Investment Management Assessment: Review and Update*. Washington D.C.: IMF.

Lavell, A. 2008. *Sobre la gestión del riesgo: Apuntes hacia una definición*. Recuperado de [http://www.huila.gov.co/documentos/G/gestion\\_riesgo.pdf](http://www.huila.gov.co/documentos/G/gestion_riesgo.pdf)

Lavell, A. 2013. *La Adaptación al Cambio Climático y la Gestión del Riesgo: Reflexiones e Implicancias*. Lima: GIZ.

Maskrey, A. 1993. *Los desastres no son naturales*. LA RED: Lima

Narváez, L., Lavell, A. y Pérez, G. 2009. *La Gestión del Riesgo de Desastres: Un Enfoque Basado en Procesos*. Lima: Comunidad Andina.

Oliver-Smith, A. (1999). *What is a disaster?: Anthropological perspectives on a persistent question*. Oliver-Smith, A. y Hoffman, S. (eds). *The angry earth: Disaster in anthropological perspective*. Londres: Routledge.

UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction). 2011. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Geneva: United Nations International Strategy for Disaster Reduction.

Yamin. L. E.; Ghesquiere, F.; Cardona, O. D.; Ordaz, M. G. 2013. *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre: el caso de Bogotá, Colombia*. Banco Mundial, Universidad de los Andes.

Dirección General de Programación Multianual del Sector Público, Ministerio de Economía y Finanzas (DGPM-MEF) (2007). *Pautas metodológicas para la incorporación del análisis del riesgo de desastres en los Proyectos de Inversión Pública*. 1ª Edición., Lima - Perú, 97 pp.

Dirección General de Programación Multianual del Sector Público, Ministerio de Economía y Finanzas (DGPM-MEF) (2010). *Evaluación de la rentabilidad social de las medidas de reducción del riesgo de desastres en los proyectos de inversión pública*. 1ª Edición, Lima - Perú.

Dirección General de Programación Multianual del Sector Público, Ministerio de Economía y Finanzas (DGPM-MEF) (2010). *Sistema Nacional de Inversión Pública y cambio climático. Una estimación de los costos y los beneficios de implementar medidas de reducción de riesgos*. 1ª Edición, Lima - Perú.

William G. Sullivan, Elin M. Wicks y James T. Luxhoj. (2004). *Ingeniería económica de DeGarmo*, 12ª edición- México

Luciano Machain (2015). *Simulación de modelos financieros*, 1ª edición- Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Evaristo Díz Cruz (2015). *Teoría de riesgo*., 4ª edición- México