



Nota Técnica

Estrategia de Reducción del Riesgo Sísmico de Edificaciones Escolares Públicas del Perú

Febrero 2017

Proyecto dirigido por El Banco Mundial y elaborado por:



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Luis Eduardo Yamin
Dirección General del Proyecto

José Raúl Rincón
Coordinación Técnica

Juan Carlos Reyes
Asesor

Álvaro Iván Hurtado
Ingeniero Especialista

Julián Tristancho
Ingeniero Especialista

Andrés Felipe Becerra
Ingeniero

Laura Lunita López
Ingeniera

Jonathan Estrada
Asistente administrativo

BANCO MUNDIAL

Fernando Ramírez
Dirección General

Juan Carlos Atoche
Dirección Técnica

Laisa Daza Obando
Apoyo técnico y administrativo

© 2017 Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial
1818 H St. NW
Washington, DC, 20433 EE. UU.
Teléfono: 202-473-1000
Sitio web: www.worldbank.org

Esta obra ha sido realizada por el personal del Banco Mundial con contribuciones externas. Las opiniones, interpretaciones y conclusiones aquí expresadas no son necesariamente reflejo de la opinión del Banco Mundial, de su Directorio Ejecutivo ni de los países representados por este.

El Banco Mundial no garantiza la exactitud de los datos que figuran en esta publicación. Las fronteras, los colores, las denominaciones y demás datos que aparecen en los mapas de este documento no implican juicio alguno, por parte del Banco Mundial, sobre la condición jurídica de ninguno de los territorios, ni la aprobación o aceptación de tales fronteras.

Derechos y autorizaciones

El material contenido en este trabajo está registrado como propiedad intelectual. El Banco Mundial alienta la difusión de sus conocimientos y autoriza la reproducción total o parcial de este informe para fines no comerciales en tanto se cite la fuente.

Cualquier consulta sobre derechos y licencias, incluidos los derechos subsidiarios, deberá enviarse a la siguiente dirección: World Bank Publications, The World Bank Group, 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, EE. UU.; fax: 202-522-2625; correo electrónico: pubrights@worldbank.org.

Foto de la portada: "Institución educativa emblemática Alfonso Ugarte, construida en 1927, reforzada estructuralmente en 2010"
Diseño de la portada: FCI Creative

PRESENTACIÓN

En agosto de 2007 un terremoto de magnitud 7.8 (Mw) impactó el sur de Perú con un saldo de 550 personas muertas, 2,000 personas afectadas y pérdidas económicas del orden de US\$ 1 billón. A partir de este desastre el Banco Mundial inició un nuevo proceso de apoyo y asistencia técnica al gobierno del Perú para el diseño de políticas que permitan reducir el impacto de los terremotos sobre la población y la economía. En particular, se estableció como prioritaria la reducción de la vulnerabilidad sísmica de la infraestructura esencial la cual incluye entre otras, las edificaciones de los sectores salud, educación, transporte y gobierno.

Esta nota presenta una síntesis de la evaluación del riesgo sísmico de la infraestructura educativa a nivel nacional y la estrategia para la reducción de su vulnerabilidad. Este estudio hace parte de los resultados principales de un programa financiado por el gobierno de Japón y el GFDRR cuyo principal objetivo es integrar la gestión del riesgo de desastres en los sectores de infraestructura. Por primera vez el Perú cuenta con un análisis cuantitativo de daños y pérdidas potenciales en la red de infraestructura escolar en el país en caso de terremoto y su respectiva estrategia de reducción del riesgo. Considerando el reto que representa para el Perú la necesidad de intervenir decenas de miles de edificaciones escolares, bien sea para reforzamiento estructural o sustitución, el presente estudio constituye un ejemplo de enfoque, metodología y diseño de una estrategia de reducción de riesgo sísmico que puede ser útil en otros países con condiciones similares.

TABLA DE CONTENIDO

PRESENTACIÓN	i
1. INTRODUCCIÓN	1
2. SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA	2
2.1 Amenaza sísmica	2
2.2 Exposición	4
2.3 Vulnerabilidad sísmica	6
2.4 Evaluación del riesgo	8
3. ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO	11
3.1 Objetivos y prioridades generales del plan	11
3.2 Opciones de intervención por tipología constructiva	11
3.3 Estimación del costo total de las intervenciones	12
3.4 Costo de las intervenciones para un programa de reducción del riesgo sísmico a 10 años	13
3.5 Priorización específica de las intervenciones: a nivel del local escolar	14
3.6 Desagregación de intervenciones por regiones	15
4. CONCLUSIONES	18
5. REFERENCIAS	19

1. INTRODUCCIÓN

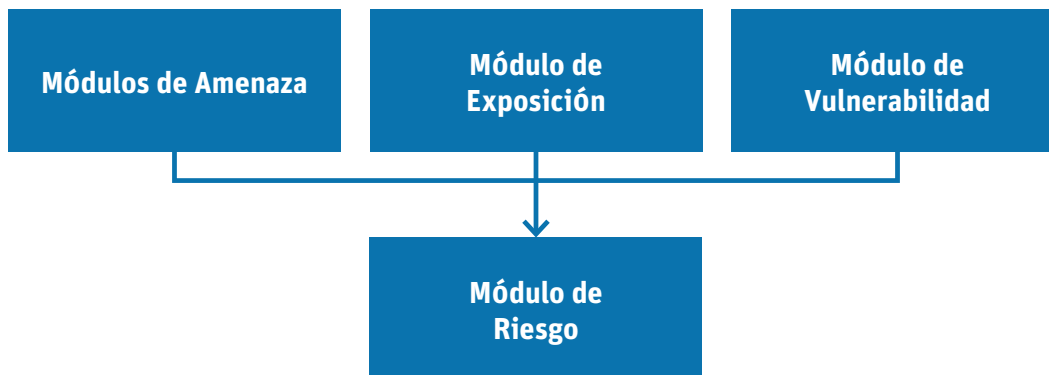
El Ministerio de Educación de Perú (MINEDU), a través la Dirección General de Infraestructura Educativa (DIGEIE) viene formulando el Plan Nacional de Infraestructura Educativa al 2025 (PNIE). En el marco de dicho esfuerzo, encargó al Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) la ejecución del Censo de Infraestructura Educativa (CIE) [1] el cual se inició en septiembre del 2013 y se entregó en el año 2014. Adicionalmente el MINEDU solicitó al Banco Mundial asistencia técnica para el análisis de los resultados del CIE, el diseño de una estrategia de reducción de vulnerabilidad sísmica y la formulación del PNIE. En el marco de este programa se desarrolló la evaluación probabilista del riesgo sísmico de la infraestructura educativa a nivel nacional, con base en la cual se definen las estrategias de reducción del riesgo y las prioridades de intervención con miras a optimizar las inversiones requeridas. La estrategia de reducción del riesgo, por su parte, tiene como objetivo fundamental reducir el riesgo de muerte y afectación a la comunidad educativa por eventos sísmicos, reducir los daños a la infraestructura y propiedad, minimizar la interrupción del servicio educativo en caso de sismo.

2. SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA

La evaluación probabilista del riesgo sísmico de la infraestructura educativa pública del Perú requiere cuantificar la amenaza sísmica en el área de estudio, conocer en detalle los componentes expuestos y su valor de reposición, y contar con información detallada sobre la vulnerabilidad sísmica de las tipologías constructivas dominantes.

La estimación del riesgo probabilista considera el conjunto de todos los posibles eventos que pueden ocurrir en el futuro. En el proceso de evaluación del riesgo, los modelos probabilistas incorporan las incertidumbres inherentes a los modelos de análisis, y a la severidad y frecuencia de ocurrencia de los eventos. El modelo se construye a partir de una secuencia de componentes tal como se ilustra en la Figura 2-1. La referencia [2] presenta la metodología detallada para el análisis del riesgo debido a eventos sísmicos.

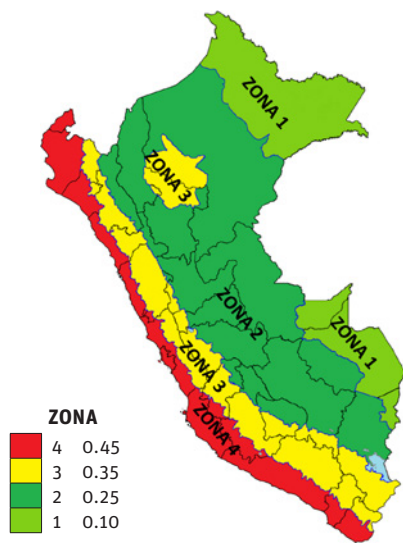
Figura 2-1 Esquema general del análisis del riesgo probabilista



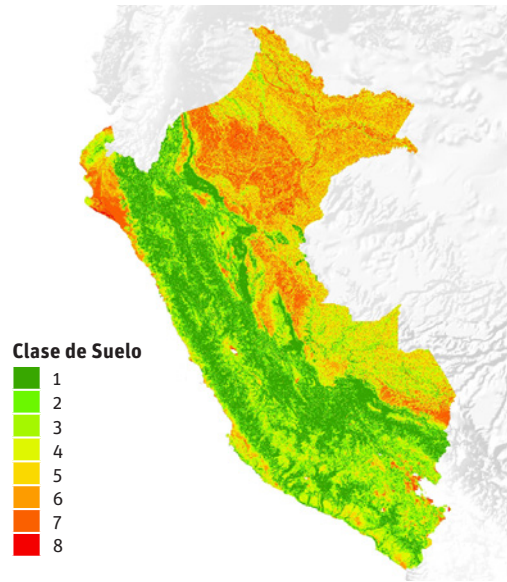
2.1 AMENAZA SÍSMICA

La amenaza sísmica se representa mediante mapas de distribución de parámetros de intensidad sísmica como la aceleración máxima del terreno o la aceleración máxima de los edificios escolares. Debido a su influencia, la amenaza sísmica debe incluir los efectos de los depósitos de suelo en cada ubicación particular. Los mapas de intensidad se evalúan para un conjunto suficientemente amplio de posibles eventos que pueden llegar a ocurrir, teniendo en cuenta los rangos de magnitudes posibles en las diferentes fuentes sísmicas y las distancias relativas entre estas y las construcciones a analizar. Para el presente caso, la intensidad sísmica para el análisis corresponde a la aceleración máxima de respuesta de cada tipología constructiva. Cada evento se caracteriza además con la frecuencia media anual de ocurrencia que se obtiene con base en el análisis de la frecuencia de eventos históricos. La Figura 2-2 presenta las zonas de amenaza sísmica definidas por el Reglamento Nacional de Edificaciones, RNE, [3] actualizado en el 2016 y la zonificación propuesta a nivel país para efectos de considerar los efectos de amplificación dinámica del suelo de acuerdo con diferentes clases de suelo (de la 1 a la 8 según la referencia [4]) en el cual el suelo definido como tipo 1 es el más duro y el tipo 8 el más blando.

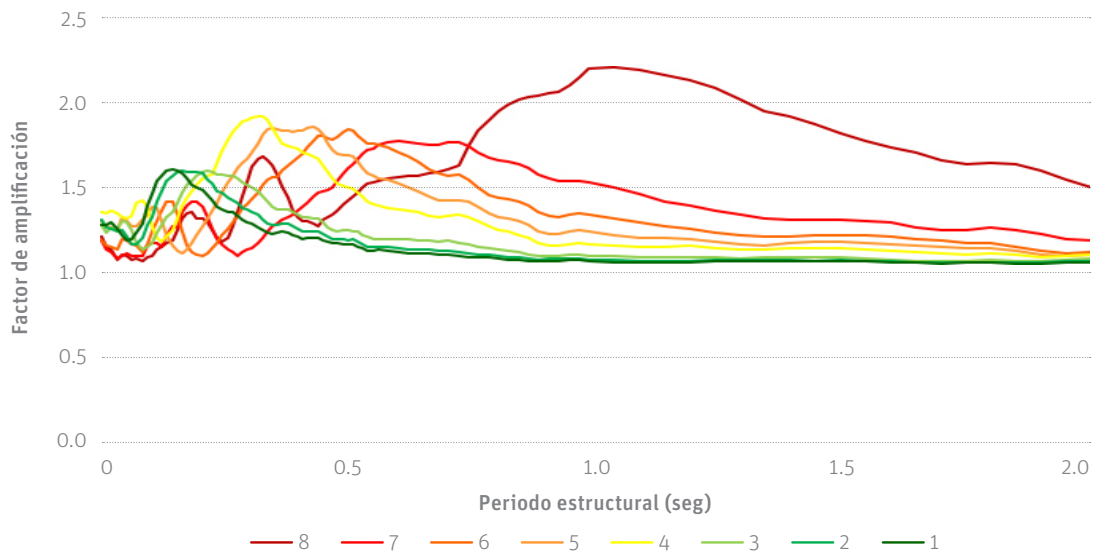
Figura 2-2 Zonificación de la amenaza sísmica y efectos de amplificación dinámica del suelo



a) Mapa de amenaza sísmica del RNE (2016): aceleraciones máximas del terreno sin amplificar.



b) Clasificación de los suelos del Perú según metodología Vs30 [4]



c) Espectros de amplificación finales para los 8 tipos de suelo definidos

2.2 EXPOSICIÓN

La exposición está conformada por una base de datos geo referenciada de las edificaciones escolares expuestas que pueden llegar a sufrir daño por la ocurrencia de los eventos sísmicos. La información recopilada incluye: identificación, localización geográfica, valor de reposición y función de vulnerabilidad sísmica asociada. Adicionalmente y para efectos de calificar la vulnerabilidad, se incluye información relacionada con el sistema estructural, la altura, el nivel de diseño sismo resistente, la calidad del diseño y de la construcción e información complementaria de cada edificación escolar. Los valores de reposición se definen en función de la ubicación geográfica y el escenario educativo¹ de cada local escolar y se basan en el análisis estadístico de información de costos directos de construcción disponible (ver referencia [5]).

La Tabla 2-1 describe cuantitativa y económicamente el portafolio de exposición de la infraestructura educativa pública del Perú.

Tabla 2-1 Resumen del portafolio de exposición de edificaciones escolares

Característica	Valor
Número de locales escolares públicos	40,475
Número total de edificaciones	187,312
Número de edificaciones de uso educativo ²	152,660
Valoración económica de las edificaciones de uso educativo	USD\$ 8.4 billones

La Figura 2-3 presenta la distribución de los valores económicos de reposición por regiones del país y por tipología constructiva para el portafolio completo de edificaciones. Las tipologías constructivas predominantes son las siguientes: P=Precario; A=Adobe; ASC= Albañilería sin confinar; EA= Estructuras de Acero; M=Madera; PROV=Provisionales; PCM=Pórticos de concreto con muros de mampostería construidos por las Asociaciones de Padres de familia (APAFAs); GUE=Grandes unidades escolares; 780-PRE= Sistema 780 previo a la norma sísmica del año 1998 y 780-POST= Sistema modular 780 posterior a la norma de 1998. De especial relevancia son las edificaciones Modulares 780 PRE que hacen referencia a todas aquellas edificaciones de pórticos de concreto reforzado resistentes a momento construidos entre 1978-1997 por el Gobierno Nacional o Regional según el CIE. Estas se caracterizan desde el punto de vista de comportamiento sísmico por presentar una alta flexibilidad y problemas de columna corta lo que genera una falla estructural anticipada en caso de eventos sísmicos.

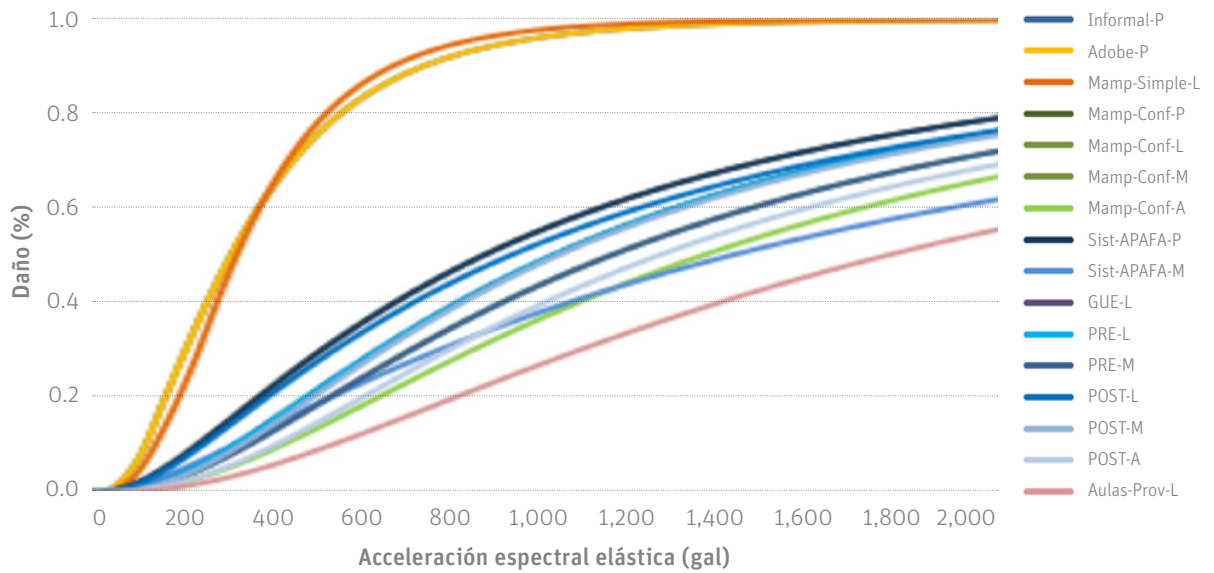
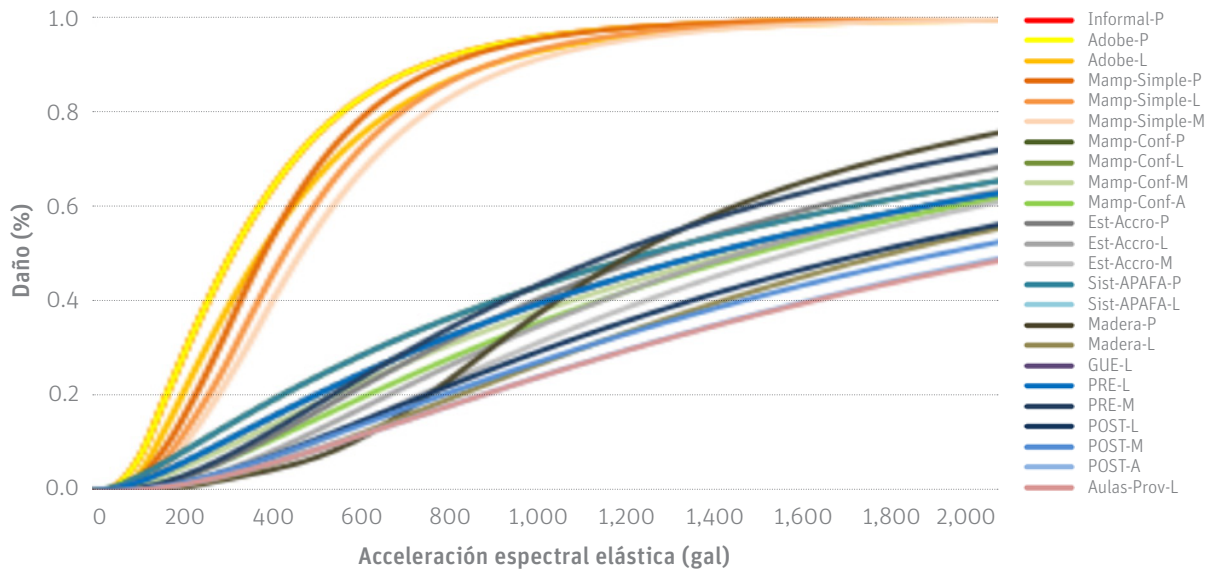
1. La metodología de costeo tuvo en cuenta un afinamiento en la distribución urbano-rural considerando cinco escenarios educativos: grandes ciudades, ciudades intermedias, centros urbanos, pueblos conectados, y comunidades dispersas
2. Del grupo de "uso educativo" se excluyen las edificaciones de menor ocupación en donde se realizan actividades relacionadas con depósitos, almacenes, restaurantes, casetas de guardiana, escaleras, entre otros.

2.3 VULNERABILIDAD SÍSMICA

La vulnerabilidad sísmica se representa por medio de funciones que relacionan el daño o pérdida esperada en porcentaje y la intensidad sísmica seleccionada. Estas representan el comportamiento esperado de las edificaciones de cada tipología constructiva particular, por lo que su uso es adecuado en términos estadísticos cuando existe un inventario amplio de activos expuestos. Cada función de vulnerabilidad está definida por un valor medio de daño y su varianza, con lo cual es posible estimar la función de probabilidad de las pérdidas respectivas para diferentes intensidades sísmicas. Para el presente estudio se utilizan las funciones de vulnerabilidad propuestas en ñas referencias [6, 7 y 13]. La Figura 2-4 a) presenta las tabla de tipologías constructivas definidas para la asignación de la vulnerabilidad sísmica mientras que la Figura 2-4 b) y c) presentan las funciones de vulnerabilidad representativas usadas para el análisis de riesgo.

Figura 2-4 Descripción de las funciones de vulnerabilidad utilizadas para el análisis

No.	Tipología constructiva	Descripción	Altura típica		Nivel de código sísmico			
			Rango	No. pisos	P	L	M	H
1	Adobe (A)	Adobe	Baja	1+	X	X	–	–
2	Albañilería sin confinar (ASC)	Muros de carga en mamposterías simple	Baja	1–2	X	X	–	–
			Media	3–5	X	X	–	–
3	Precarias (P)	Construcciones informales precarias (triplay, quincha, etc.)	Baja	1+	X	–	–	–
4	Estructuras de acero (EA)	Pórticos en acero	Baja	1–3	X	X	X	–
5	Estructuras de madera (M)	Construcciones de madera	Baja	1+	X	X	–	–
6	Pórticos de concreto reforzado (PCM)	Estructuras de concreto con pórticos de concreto; alta incertidumbre en su comportamiento sísmico	Baja	1–3	X	X	X	–
			Media	4–7	X	X	X	–
7	Gran unidad escolar (GUE)	Pórticos de concreto construidos previos a las normas de construcción peruana	Baja	1–3	–	X	X	–
			Media	4–7	–	X	–	–
8	Módulos 780 pre-código (PRE)	Módulo 780, previo a la norma de 1998; tiene problemas de columna corta	Baja	1–3	–	X	X	–
9	Módulos 780 post-código (POST)	Módulo 780, posterior a la norma de 1998	Baja	1–3	–	–	X	X
			Media	4–7	–	–	X	X
10	Aulas provisionales (PROV)	Aulas provisionales, realizadas por el gobierno posterior a la norma de 1998	Baja	1–3	–	X	X	–
			Media	4–7	–	X	X	–



Nota: el “Nivel de Código Sísmico” de acuerdo con la definición incluida en el texto se hace de acuerdo con: P: Pre código, L: código bajo, M: código medio, H: código alto.

2.4 EVALUACIÓN DEL RIESGO

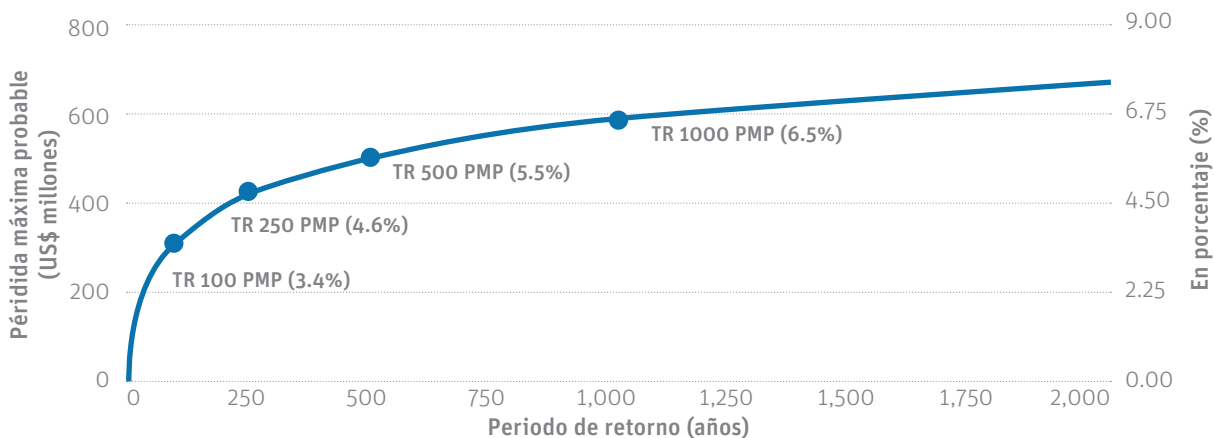
La evaluación del riesgo con técnicas probabilistas con el enfoque tipo CAPRA está ampliamente documentado. Las referencias [8], [9], [10] y [11] presentan en detalle las bases metodológicas de los procedimientos empleados en el presente estudio. Para la evaluación del riesgo se integra la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de obtener parámetros indicativos del nivel de daño, impactos físicos y afectación general a la infraestructura y a los ocupantes de la misma. Una vez estimado el daño físico esperado (valor potencial promedio y su dispersión) en porcentaje o en valor absoluto para cada una de las edificaciones expuestas, es posible realizar estimativos de diferentes métricas tales como: la pérdida anual esperada (PAE) o la pérdida máxima probable (PMP), absoluta (USD\$) o relativa (%) al valor expuesto³.

La Figura 2-5 presenta los resultados básicos de la evaluación del riesgo sísmico para el portafolio de edificaciones del sector educativo del Perú.

En la Figura 2-6 se presenta la distribución geográfica de las pérdidas anuales esperadas por Departamento en términos absolutos y relativos con respecto a los valores de reposición correspondientes. Por otro lado la Figura 2-7 presenta la distribución de las pérdidas anuales esperadas por tipología constructiva y escenario educativo.

Figura 2-5 Resultados de la evaluación del sísmico riesgo. Pérdida anual esperada y curva de pérdidas máximas probables PMP.

Resultados		
Valor expuesto	US\$ x10 ⁶	9,087
Pérdida anual esperada	US\$ x10 ⁶	190.0
	‰	20.91
PMP		
Periodo retorno (PAE)	Pérdida	
años	US\$ x10 ⁶	%
100	308	3.4
250	408	4.5
500	497	5.5
1,000	590	6.5



3. En un esquema simple de aseguramiento, la PAE representa la prima anual de seguro considerando todos los sismos (poco frecuentes y altamente frecuentes). La PMP es la pérdida que puede ocurrir debido a sismos poco frecuentes (o de alto periodo de retorno TR=100años, 250años, etc.).

Figura 2-6 Distribución geográfica de pérdidas anuales esperadas por Departamento

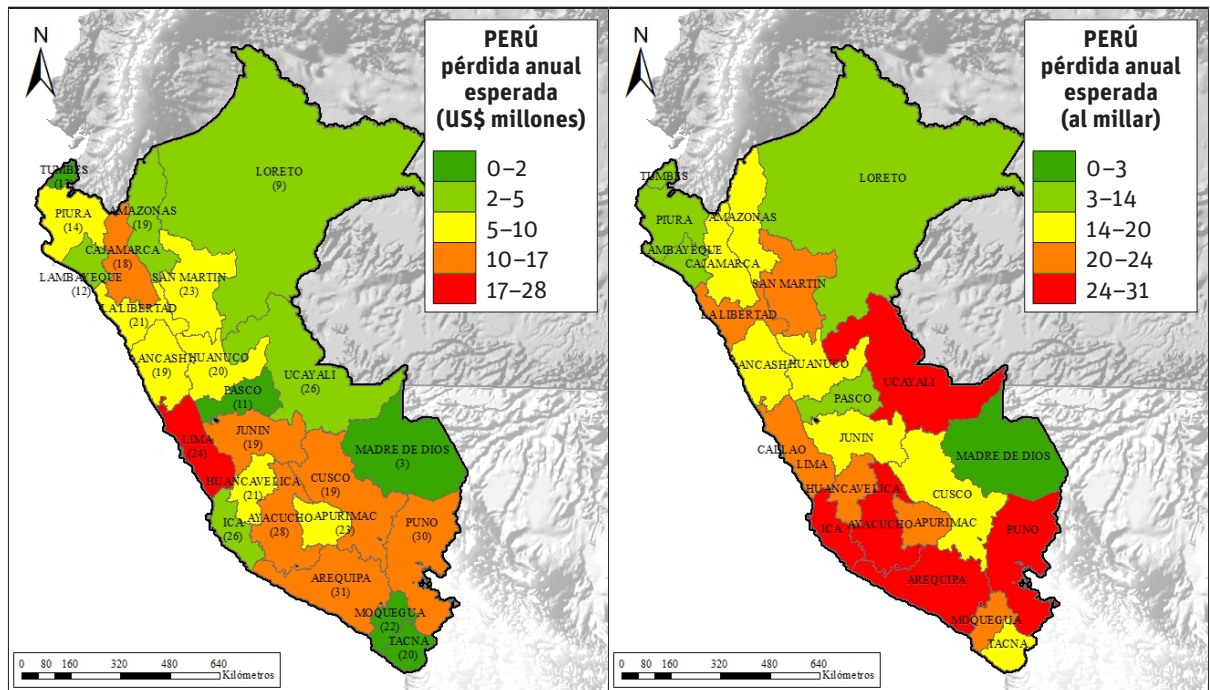
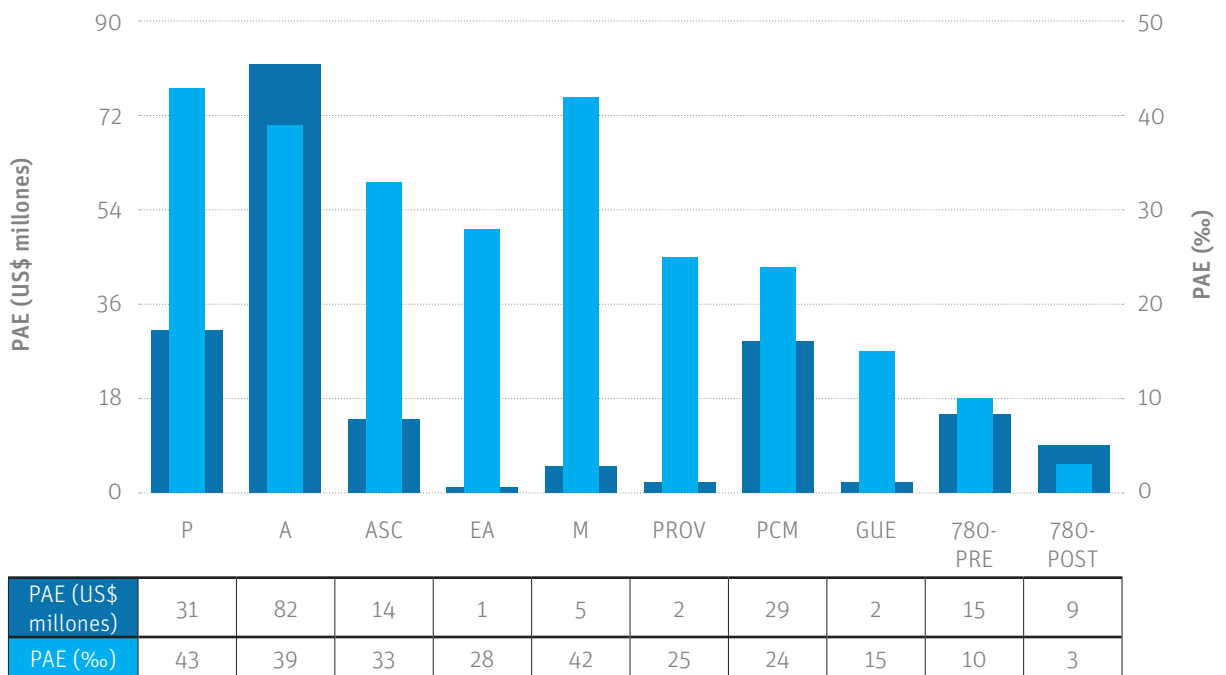
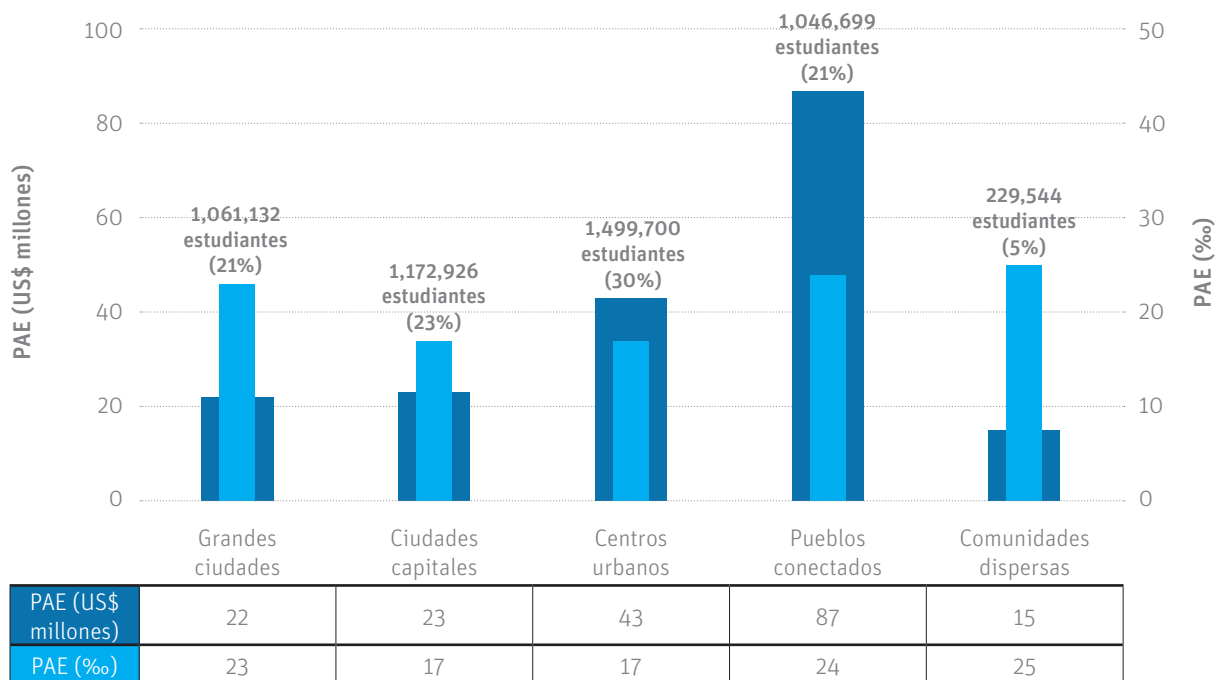


Figura 2-7 Pérdida anual esperada total y relativa por (a) tipología constructiva y por (b) escenario educativo, para el portafolio de exposición nacional



(a) Tipología estructural



(b) Escenario educativo

Nota: ver descripción de tipologías constructivas en el numeral 2.2

Como puede apreciarse de estas figuras el riesgo tiende a concentrarse geográficamente de acuerdo con el nivel de amenaza sísmica y las características constructivas dominantes de cada región del país. Por otro lado, las tipologías constructivas más vulnerables y que más se presentan tales como los Precarios, el Adobe, la Albañilería sin confinar, los Pórticos de concreto con muros de mampostería y el sistema 780 PRE son los que más acumulan el riesgo. Desde el punto de vista de los escenarios educativos, los pueblos conectados son los que más riesgo concentran en términos de la PAE.

3. ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

Para definir una estrategia óptima de reducción del riesgo sísmico se requiere llevar a cabo las siguientes actividades:

1. Establecer los objetivos y prioridades principales.
2. Identificar las opciones de intervención por tipologías constructivas según su nivel de riesgo.
3. Estimar el costo total de las intervenciones.
4. Definir los criterios de priorización de las intervenciones.
5. Llevar a cabo la optimización de la estrategia de intervención y la priorización de los subprogramas de intervención
6. Desagregar el plan de intervención por regiones para la implementación.

3.1 OBJETIVOS Y PRIORIDADES GENERALES DEL PLAN

La estrategia para la reducción del riesgo de la infraestructura educativa del Perú se diseña para cumplir con los siguientes objetivos específicos y prioridades:

1. Reducir el riesgo de muerte o heridas de la comunidad educativa por eventos sísmicos (maximizar el número de estudiantes beneficiados).
2. Reducir los daños en la infraestructura y proteger la propiedad.
3. Reducir la interrupción del servicio educativo.

3.2 OPCIONES DE INTERVENCIÓN POR TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA

La intervención de edificaciones escolares está orientada a corregir posibles defectos estructurales y dotar a la estructura de una combinación adecuada de rigidez, resistencia y ductilidad que garantice su buen comportamiento ante eventos sísmicos futuros en los términos establecidos por la norma de diseño sismo resistente E030 del Reglamento Nacional de Edificaciones de Perú [3]. Se definen cuatro principales alternativas de intervención:

- **Reforzamiento convencional:** la intervención de reforzamiento se realiza en una sola fase de tal manera que la edificación escolar alcanza el nivel de comportamiento sísmico establecido por la Norma E030 [3].
 - I **Reforzamiento incremental:** la intervención estructural se realiza en dos o más fases logrando en cada una de ellas niveles de desempeño predefinidos.

- **Sustitución** de edificaciones escolares por nuevas edificaciones sísmo resistentes: tiene lugar cuando no hay factibilidad técnica y/o financiera para el reforzamiento estructural. Supone la demolición del edificio existente, la instalación de aulas temporales y el diseño y construcción de una nueva edificación.
- **Intervención contingente** para prevenir colapso: es un tipo de reforzamiento de tipologías constructivas de alta vulnerabilidad con el objetivo único de prevenir el colapso. Se trata de intervenciones temporales que se realizarían ante la imposibilidad técnica, financiera o logística de realizar alguna de las anteriores.

La Tabla 3-1 resume las opciones de intervención recomendadas de acuerdo con el nivel de riesgo de las tipologías constructivas.

Tabla 3-1 Posibles tipos de intervención estructural

Tipos de intervención	Edificaciones con alto riesgo de colapso (ARC)	Edificaciones con alto potencial de daño (APD)	Edificaciones con buen desempeño sísmico esperado
Definición y características	Presentan un deficiente comportamiento sísmico y cuya intervención implica grandes dificultades técnicas, altos costos y pocas garantías de funcionalidad.	Presentan un comportamiento sísmico regular ante eventos sísmicos de magnitud media-alta. Presentan viabilidad técnica, funcional y económica para su intervención.	Edificaciones sísmo-resistentes
Tipología constructiva que comprende	<ul style="list-style-type: none"> • Adobe (A) • Albañilería sin confinar (ASC) • Precarias (P) • Provisionales (PROV) 	<ul style="list-style-type: none"> • Grandes unidades escolares (GUE) • Pórticos resistentes a momento (PCM) • Módulos 780 PRE 	• 780 POST
Opciones de intervención	<ul style="list-style-type: none"> a) Sustitución por edificaciones sísmo-resistentes. b) Sustitución por aulas provisionales (corto plazo) mientras se definen alternativas modulares. c) Intervención contingente para prevenir colapso. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Reforzamiento incremental con intervenciones graduales y en etapas, logrando cumplimiento de los requerimientos fundamentales de la normativa en la etapa inicial b) Reforzamiento convencional con la intervención en una sola etapa para lograr el cumplimiento total de la normativa c) Intervención contingente en las edificaciones ubicadas en zona de amenaza media y baja. 	No requieren

3.3 ESTIMACIÓN DEL COSTO TOTAL DE LAS INTERVENCIONES

A partir de los grupos de tipologías estructurales definidos anteriormente y las líneas de intervención asociadas, se definieron subprogramas de intervención y los costos asociados de implementación aproximados. La Tabla 3-2 resume la información para cada uno de los subprogramas.

Tabla 3-2 Resumen del costo total de las intervenciones

	No. de edificaciones	Costo total US\$ (millones)
Programa de reducción de vulnerabilidad sísmica de infraestructura educativa	139,732	6,032
Costo por subprogramas		
Subprograma N° 1 – Sustitución de edificaciones con ARC	97,110	4,660
Subprograma N° 2 – Reforzamiento convencional	39,933	1,353
Subprograma N° 3 – Edificaciones en zonas de amenaza sísmica baja	2,689	19

3.4. COSTO DE LAS INTERVENCIONES PARA UN PROGRAMA DE REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO A 10 AÑOS

Dado que el PNIE se formuló para un período de 10 años, se definió un programa de reducción de riesgo para el mismo período.

Con el fin de optimizar los recursos para el programa a 10 años, se incluyen únicamente las edificaciones que clasifiquen según el uso educativo en aulas comunes, los baños de niños y niñas, alumnado y personal, las bibliotecas, las salas de profesores y las oficinas de dirección, entre otros. Según esto quedan en segunda prioridad las siguientes edificaciones:

- Edificaciones con usos específicos no educativos tales como despensas, cocinas, comedores, salas de espera, depósitos de material educativo, escaleras, impresiones, guardianía y casetas de guardianía, entre otros.
- Edificaciones de buen desempeño sísmico esperado, tipo BDS
- Edificaciones ubicadas en zonas de amenaza sísmica baja.
- Intervención mediante sustitución de edificaciones con ARC.
- Intervención de edificaciones con APD.

De acuerdo con esto se tienen las estadísticas para el programa a 10 años que se presentan en la tabla 3-3.

Tabla 3-3 Resumen de la brecha financiera para el programa a 10 años de reducción del riesgo sísmico

Programa	N° de edificaciones	Valoración de la intervención (US\$ millones)
Costo del programa a 10 años		
Programa de reducción del riesgo sísmico	108,629	2,778
Brecha “programa a 10 años” discriminada por subprogramas		
Subprograma N° 1 – Sustitución	73,645	1,995
Subprograma N° 2 – Reforzamiento incremental	34,984	783

3.5 PRIORIZACION ESPECÍFICA DE LAS INTERVENCIONES: A NIVEL DEL LOCAL ESCOLAR

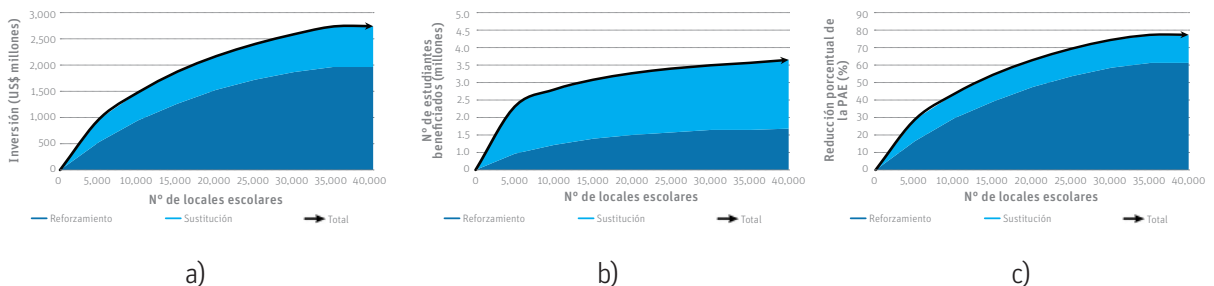
Considerando el número de edificaciones escolares a intervenir en un período de 10 años y las limitaciones en disponibilidad presupuestal, es necesario optimizar la estrategia de intervención y priorizar los locales escolares a intervenir en cada uno de los subprogramas de intervención. Se busca maximizar la relación eficiencia - costo de las intervenciones que se ejecuten con respecto a los objetivos planteados, en particular el de aumentar el número de estudiantes beneficiados por la reducción del riesgo. El análisis se lleva a cabo por local escolar ya que es la unidad mínima de intervención en la práctica. La priorización se define con base en la evaluación de la relación eficiencia - costo de las intervenciones que se define de la siguiente manera:

$$EC = \frac{N_E \cdot (PAE_i - PAE_f)}{C}$$

En la cual, EC = indicador de eficiencia-costo, NE = número de estudiantes potenciales en cada local escolar, PAE_i = pérdida anual esperada en el estado inicial (en millones), PAE_f = pérdida anual esperada en el estado final (una vez se ha realizado la intervención propuesta, en millares) y C= costo de la intervención propuesta.

Según esto se establece el orden prioritario de intervención por local escolar que permita maximizar los beneficios de reducción del riesgo según el número de estudiantes. Los criterios de priorización se aplican consistentemente a cada uno de los subprogramas de intervención propuestos. En la Figura 3 1 se presenta el impacto de las edificaciones intervenidas dentro del *Subprograma No. 1- Sustitución de edificaciones con ARC* y el *Subprograma No.2- Reforzamiento Incremental de edificaciones con APD* en términos del costo de intervención, el número de estudiantes beneficiados y la reducción porcentual de la PAE a nivel nacional. Estas figuras se han evaluado con la lista de locales organizada desde el más crítico al menos crítico y acumulando los valores indicados.

Figura 3-1 Impacto de las medidas de intervención a) Costo de intervención (b) número de estudiantes beneficiados y (c) reducción porcentual del riesgo en función del número de locales escolares intervenidos



Partiendo de una disponibilidad presupuestal dada, de la Figura 3 1 a) se puede estimar el número de locales a intervenir. Con base en esto se puede estimar el número de estudiantes beneficiados y la reducción porcentual del riesgo del portafolio, usando para el efecto la Figura 3 1 b) y c) respectivamente.

De estas figuras se puede concluir además que el Subprograma No. 2 resulta más eficiente en términos de número de estudiantes beneficiados mientras que el Subprograma No. 1 es más eficiente en términos de reducción efectiva del riesgo en términos de la PAE. Por otro lado, dada una cuantía económica determinada para efectos de optimización con los criterios anteriores, se deberá realizar una mayor inversión relativa en sustitución de edificaciones con respecto al monto requerido para el reforzamiento de edificaciones.

3.6 DESAGREGACION DE INTERVENCIONES POR REGIONES

El plan de intervenciones requiere una implementación por regiones considerando además que los recursos disponibles se ejecutan usualmente desde el nivel regional. Para cada región del país se requiere la siguiente información:

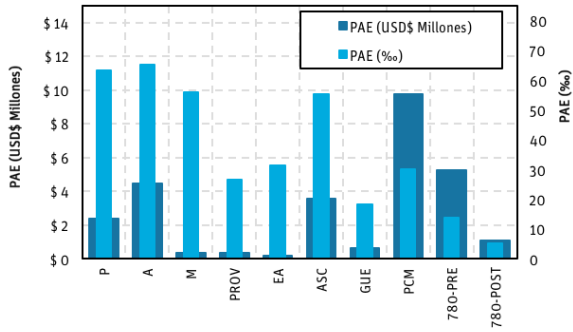
- a) El listado priorizado de locales escolares para efectos de intervenciones.
- b) Las propuestas de intervención para cada una de las edificaciones y el costo estimado
- c) El costo agregado de cada uno de los subprogramas propuestos.

Para efectos ilustrativos se presentan las gráficas comparativas entre dos regiones, Lima y Amazonas, en las cuales se hace evidente las diferencias regionales que pueden llegar a presentarse en la implementación del plan.

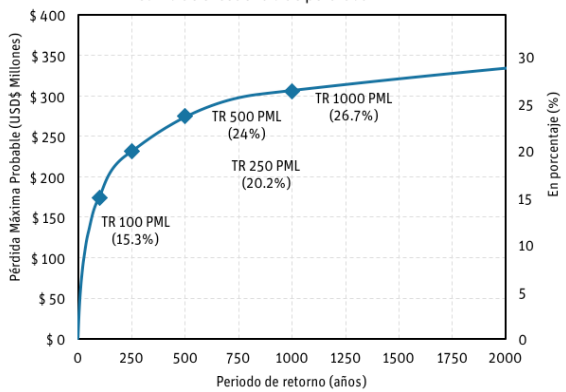
Figura 3-2 Comparación de resultados para Lima y Amazonas

LIMA

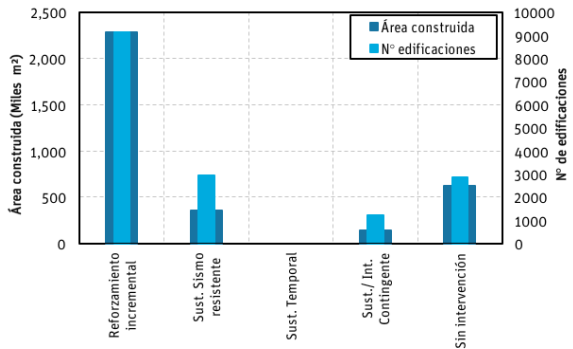
Pérdida Anual Esperada (PAE) por tipología estructural



Curva de excedencia de pérdidas

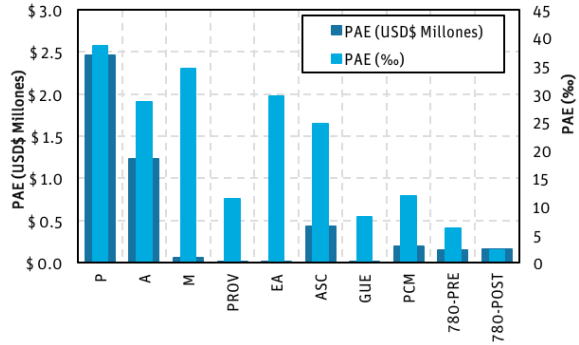


Área total construida y N° de edificaciones por tipo de intervención

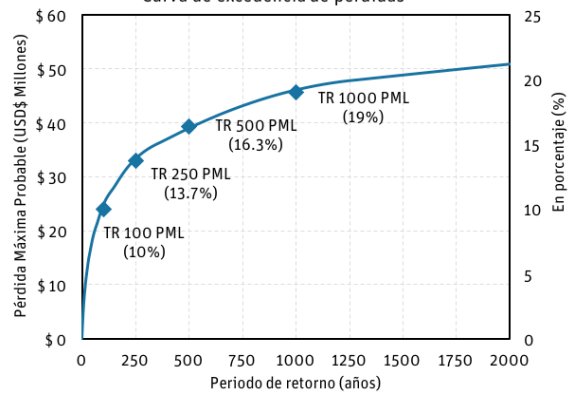


AMAZONAS

Pérdida Anual Esperada (PAE) por tipología estructural



Curva de excedencia de pérdidas



Área total construida y N° de edificaciones por tipo de intervención

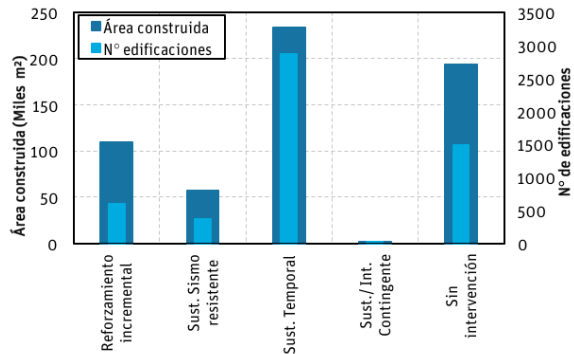
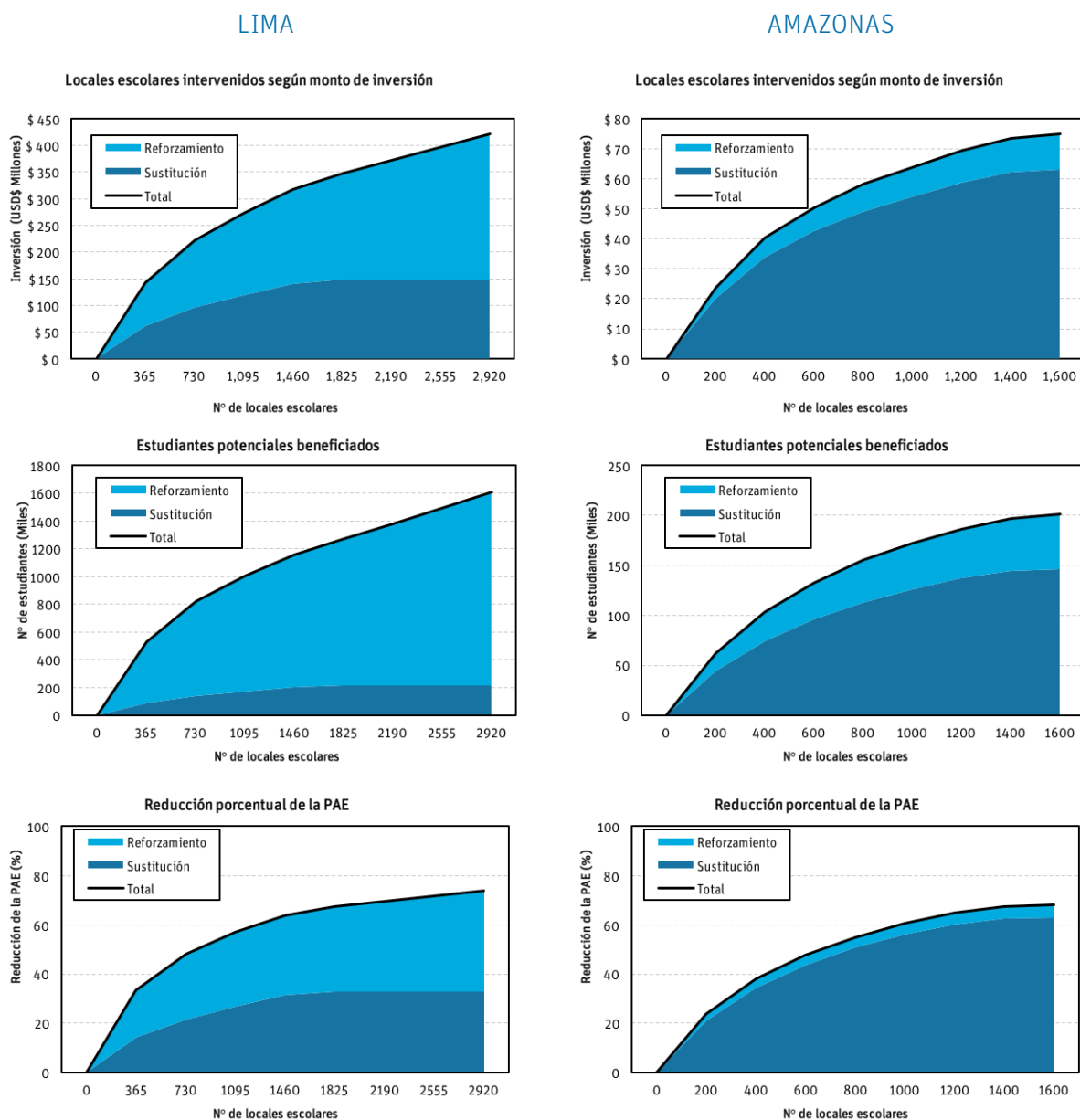


Figura 3-2 Comparación de resultados para Lima y Amazonas



A partir de esta información los gobiernos regionales pueden llevar a cabo la implementación del plan para lo cual seguirían el siguiente procedimiento:

1. Definir los montos de recursos a invertir en cada uno de los subprogramas.
2. Cuantificar los siguientes tres parámetros según la inversión deseada en cada subprograma:
 - Impacto en número de estudiantes beneficiados por las intervenciones.
 - Reducción porcentual del riesgo con respecto al riesgo inicial.
 - Número de locales escolares o edificaciones intervenidas.

3. Redistribuir los montos por programas hasta llegar a una solución de alto impacto de acuerdo con los criterios propios de la región.
4. Consultar la lista de priorización de locales escolares para identificar la ubicación geográfica y las características de los locales incluidos. En particular, la lista indica para cada edificación el tipo de intervención recomendado y el presupuesto estimado.
5. Conformar con base en esto los términos para la ejecución de proyectos de intervención específicos y proceder con la contratación de diseños definitivos y obras de intervención.
6. Fase final de implementación del plan.

4. CONCLUSIONES

Los análisis realizados en el presente estudio permiten establecer una serie de conclusiones con respecto a los elementos a considerar en el diseño e implementación de una estrategia para la reducción del riesgo sísmico de edificaciones escolares. A continuación se enumeran dichos aspectos.

- a) La pérdida anual esperada del portafolio es de US\$190 millones que en términos relativos corresponde al 2.1% de su valor de reposición. Estas pérdidas, no consideran pérdidas en contenidos ni las pérdidas indirectas como las que resultan de la interrupción del funcionamiento y lucro cesante. En comparación con el análisis de otros portafolios similares esta cifra resulta relativamente alta, lo cual se atribuye a la alta amenaza sísmica y a la alta vulnerabilidad de la mayoría de los componentes del portafolio.
- b) La pérdida anual esperada antes y después de la intervención, el número de estudiantes, y el costo de la intervención se pueden combinar en un criterio de priorización que maximiza la relación eficiencia-costo, dado el tamaño del portafolio (187,312 edificaciones) y las limitaciones presupuestales presentes.
- c) El riesgo no está distribuido uniformemente en el portafolio. Los primeros 15,000 locales escolares (38%) concentran algo más del 55% del riesgo. La distribución de la pérdida anual esperada en el país refleja que la mayoría de regiones del sur, la capital y una región en el norte tienen el riesgo sísmico más alto (entre US\$10 y 28 millones). La pérdida anual esperada es crítica en los edificios escolares de adobe, y en las zonas rurales del país clasificadas como pueblos conectados.
- D) La pérdida máxima probable, para los eventos con periodo de retorno de 1000 años es US\$600 millones que corresponden aproximadamente al 6.5% del valor de reposición del portafolio. Esta cifra es alta al compararla con portafolios equivalentes en otras regiones y países.
- e) Las métricas de riesgo estimadas para cada región, permiten definir la estrategia de intervención, la cual incluye los siguientes componentes:
 - Los criterios para la definición de las intervenciones para las diferentes tipologías constructivas identificadas.
 - Una estimación de la inversión económica para la mitigación del riesgo sísmico (brecha financiera) y la definición de un plan de inversiones acorde con la disponibilidad presupuestal.

- La definición de la estrategia de intervención óptima
 - Los criterios de priorización para cada línea de intervención propuesta que permitan maximizar los objetivos planteados de reducción del riesgo
 - La organización de la información técnica que se requiere para emprender los planes de acción por regiones.
- f) Los objetivos principales del plan de reducción del riesgo sísmico para la infraestructura escolar son los siguientes:
- Reducir el riesgo de muerte o heridas de la comunidad educativa por eventos sísmicos (maximizar el número de estudiantes beneficiados).
 - Reducir los daños en la infraestructura y proteger la propiedad.
 - Reducir la interrupción del servicio educativo.
- g) Los costos directos asignados en función del programa, de la zona climática y del escenario educativo, permiten estimar que la brecha financiera que deberá superar el Gobierno de Perú en los próximos 10 años es del orden de los US\$2778 millones.
- h) El Gobierno de Perú tiene un reto importante ya que el 51% de las edificaciones corresponden a tipologías constructivas que tienen alto potencial de colapso, y el 21% de las edificaciones con alto potencial de daño. Para el resto de edificaciones se espera un comportamiento aceptable y su intervención en el corto plazo sería prioritaria.
- i) A partir de esta agrupación, el estudio propone programas de sustitución, de reforzamiento, y de intervención contingente como estrategias para reducir el riesgo sísmico de las edificaciones escolares. Como parte del programa de reforzamiento, se propone implementar el reforzamiento incremental como una técnica innovadora y económica.

La metodología propuesta representa un aporte importante en la optimización de los programas de mitigación del riesgo sísmico en la optimización de los programas de mitigación del riesgo sísmico en edificaciones escolares del Perú y otros países con problemáticas similares.

5. REFERENCIAS

1. Instituto Nacional de Estadística Informática (INEI) y Ministerio de Educación (MINEDU), “*Censo de Infraestructura Escolar (CIE)*”. 2013, Lima: Perú.
2. Universidad de los Andes, “*Evaluación del riesgo sísmico del portafolio de edificaciones en locales escolares en Lima Metropolitana y Callao a partir de los resultados del CIE*”. Informe preparado para el Banco Mundial, 2014, Bogotá D.C: Colombia.
3. Norma E-030. 2015 “Diseño Sismorresistente”. Lima: Ministerio de Construcción, Vivienda y Saneamiento- SENCICO.
4. Allen T, and D. Wald D (2009). Short Note. “On the Use of High-Resolution Topographic Data as a Proxy for Seismic Site Conditions”, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 2009

5. Universidad de los Andes. “Asesoría técnica en la definición y establecimiento de criterios de intervención y priorización que contribuyan a un mejor planeamiento, eficiencia y sostenibilidad en materia de infraestructura educativa”. Centro de investigaciones y obras civiles (CIMOC). Informe preparado para el Banco Mundial, 2016.
6. Yamin, L., A. Hurtado, A. Barbat, G. Bernal, O. Cardona, *Earthquake Vulnerability Assessment of Buildings for Catastrophic Risk: Analysis in Urban Areas*, in 15 World Conference on Earthquake Engineering (WCEE). 2012, Lisboa, Portugal.
7. ISDR, U.N., UNISDR. GAR13: Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. 2013: Geneva, Switzerland.
8. ERN-AL. Metodología de Modelación Probabilista de Riesgos Naturales. Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-1. Consorcio Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina; 2011.
9. Cardona, O.D., M. Ordaz, L. Yamin, M. Marulanda, A. Barbat, “Earthquake Loss Assessment for Integrated Disaster Risk Management”. *Journal of Earthquake Engineering*, 2008. 12(sup2): p. 48-59.
10. Cardona, O.D. and L.E. Yamin, *Seismic Microzonation and Estimation of Earthquake Loss Scenarios: Integrated Risk Mitigation Project of Bogota´, Colombia*. *Earthquake Spectra*, 1997. 13(4): p. 795-814.
11. Yamin, L., F. Ghesquiere, O. Cardona, M. Ordaz, “Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre, El caso de Bogotá Colombia”. 2013, Bogotá, Colombia: Banco Mundial, Universidad de los Andes.
12. Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP), “Evaluación probabilista del riesgo sísmico de locales escolares en la ciudad de Lima”. Informe preparado para el Banco Mundial, 2014, Lima: Perú.
13. Yamin LE, Hurtado A, Barbat AH, Cardona OD. “Seismic and wind vulnerability assessment for the GAR-13 global risk assessment”. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2014;10:452-60.
14. Instituto Nacional de Estadística Informática (INEI) y Ministerio de Educación (MINEDU), “Manual del Evaluador Técnico” Censo de Infraestructura Escolar (CIE). 2013, Lima: Perú.
15. Building Seismic Safety Council. 2009. FEMA 420. “Engineering Guideline for Incremental Seismic Rehabilitation”. Washington D.C: Federal Emergency Management Agency.
16. Pontificia Universidad Católica del Perú, Universidad Nacional de Ingeniería “Evaluación simplificada de las tres técnicas de reforzamiento más apropiadas. Propuesta de actualización del reglamento nacional de edificaciones para incorporar el reforzamiento incremental en edificaciones escolares tipo 780 construidas antes de 1997”. Informe preparado para el Banco Mundial, 2016, Lima, Perú.

