

DEFINICIÓN DE TIEMPOS DE RECUPERACIÓN Y PÉRDIDA DE FUNCIONALIDAD ESPERADA PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESILIENCIA SÍSMICA EN ESCUELAS PÚBLICAS DE MÉXICO

Carlos González Calva⁽¹⁾, Mauro Niño Lázaro⁽²⁾ y Gustavo Ayala Milián⁽¹⁾

RESUMEN

Los prolongados tiempos de inactividad y las pérdidas de funcionalidad observadas después de eventos sísmicos recientes han sido objeto de investigación por distintos autores, evidenciando el interés por lograr enfoques de diseño sísmico orientados hacia sistemas resilientes. Sin embargo, actualmente todavía no existe un consenso claro sobre cómo cuantificar e interpretar los valores de resiliencia. En este documento se presenta un enfoque probabilístico para estimar los tiempos de recuperación y pérdida de funcionalidad en edificaciones, permitiendo estimar la resiliencia sísmica, tomando en cuenta tanto los tiempos de demora en el inicio de las reparaciones, como las consecuencias debido a daño no estructural. En este proceso se definen modelos sencillos que relacionan la respuesta estructural y los parámetros de resiliencia (tiempo de recuperación y funcionalidad). Lo anterior se aplica a estructuras escolares reales ubicadas en el estado de Puebla, con el fin de conocer su resiliencia sísmica. Adicionalmente, se realiza un análisis costo/beneficio para proponer valores objetivo viables de resiliencia sísmica, presentándose una clasificación de baja, mediana y alta resiliencia, lo cual sirve para identificar infraestructura educativa vulnerable y ayudar a la toma de decisiones. Los resultados muestran que la inclusión de los tiempos de demora y el daño no estructural al cuantificar la resiliencia es necesaria si no se desea incurrir en sobreestimaciones. Por otro lado, se encontró que una parte significativa de los edificios escolares en Puebla están poco preparados en términos de resiliencia.

Palabras clave: resiliencia sísmica; escuelas públicas; tiempos de inactividad; funcionalidad; elementos no estructurales

RECOVERY TIMES AND FUNCTIONALITY LOSS DEFINITION FOR THE RESILIENCE ASSESSMENT OF MEXICAN PUBLIC SCHOOL BUILDINGS

ABSTRACT

Recent concerns regarding prolonged downtimes and functionality losses observed after seismic events have made it clear that seismic design is heading towards a resilience-based approach.

Artículo recibido el 20 de febrero de 2023 y aprobado para su publicación el 12 de junio de 2024. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

⁽¹⁾ Instituto de Ingeniería, UNAM. Circuito Escolar 04360, C.U., Coyoacán, CDMX, 04510. CGonzalezC@iingen.unam.mx
GAyalaM@iingen.unam.mx

⁽²⁾ Facultad de Ingeniería, UNAM. Circuito Escolar 04360, C.U., Coyoacán, CDMX, 04510. mninol@ingenieria.unam.edu

However, currently there is still no clear consensus on how to quantify resilience, or the parameters that defining it (functionality and downtimes) nor there is an established criterion to interpret a given resilience value. In this document a probabilistic approach to estimate recovery times and functionality loss in buildings is presented, which allows to estimate seismic resilience, at the same time delay times and nonstructural elements are taken into consideration. To do so, simple models to associate structural response and the resilience parameters (recovery time and functionality) are defined. A database for public school buildings in Puebla City, created by an internal work group, was then used to obtain the expected times and expected functionality, allowing for resilience quantification. Additionally, a classification of resilience, recovery times and functionality is presented, based on target values obtained with a cost/benefit analysis, this helped the identification of weak elements in the educative Mexican infrastructure. The results showed that the inclusion of delay times and non-structural elements in the resilience quantification is mandatory to not incur in an overestimation of resilience, at the same time, according to the categorization proposed, it was found that a significant portion of school buildings in Puebla City are underprepared in a resilience context.

Keywords: seismic resilience; school-buildings; post-earthquake downtimes; functionality; non-structural elements

INTRODUCCIÓN

Debido al continuo crecimiento social, existe una fuerte dependencia de la infraestructura urbana, como las edificaciones, para el desarrollo de las actividades cotidianas en las comunidades. En consecuencia, la ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud que causen daños a las estructuras, tiene repercusiones en las conductas sociales habituales. Esto se ha visto en varias ocasiones en México, tal es el caso de lo ocurrido durante y después del sismo del 19 de septiembre de 1985, el cual trajo como consecuencias daños en edificaciones y más importante aún, pérdida de vidas humanas. Más recientemente, el sismo del 19 de septiembre del 2017 también provocó daños en edificios llegándose a presentar derrumbes parciales o totales, lo cual contribuyó a la clausura temporal o permanente de algunas edificaciones, causa principal de los prolongados tiempos de inactividad experimentados en diversos sectores (comercios, oficinas, escuelas, entre otros).

Actualmente, la integridad estructural ante el colapso es algo esperado e implícito cuando se habla de diseño sismo-resistente, sin embargo, esto no es suficiente para garantizar un desempeño estructural adecuado en términos de tiempos de inactividad y funcionalidad, por lo que surgen nuevas filosofías de diseño cuyo objetivo es lograr edificaciones que cumplan con objetivos mínimos de desempeño, llevando a construcciones más resilientes.

La resiliencia en la ingeniería sísmica tiene sus orígenes asociados a Bruneau *et al.* (2003) quienes definen el concepto como “la habilidad de un sistema para mitigar el peligro, controlar los efectos ocasionados por desastres, y llevar a cabo acciones de recuperación de tal modo que se minimice la interrupción de las actividades y se mitiguen los efectos de futuros sismos”. Posteriormente, se desarrolla un marco teórico, en donde estos autores definen los parámetros que caracterizan la resiliencia (tiempo y funcionalidad) así como modelos y expresiones para poder cuantificarla (Bruneau *et al.*, 2003; Bruneau y Reinhorn, 2007; Cimellaro *et al.*, 2010), como la mostrada por la Ec (1), en donde R es la resiliencia sísmica de un sistema, T_{LC} es el tiempo de control, $Q(t)$ representa la funcionalidad del sistema como un proceso estocástico no estacionario, t_0 es el tiempo de ocurrencia del evento sísmico y t_{0E} es el tiempo para el cual se alcanza la funcionalidad objetivo.

$$R = \int_{t_{0E}}^{t_{0E}+T_{LC}} \frac{Q(t)}{T_{LC}} dt \quad (1)$$

La ecuación anterior ha sido adoptada por numerosos autores, algunos de los cuales la han utilizado para cuantificar la resiliencia de infraestructura crítica (Cimellaro *et al.*, 2010; Rojah *et al.*, 2019). Por su parte, otros investigadores han resaltado la importancia de estudiar la resiliencia en sistemas no críticos y la relación que existe entre la resiliencia de las edificaciones de distintos sectores (Feng *et al.*, 2017, Fontana *et al.*, 2020). También, otros autores han presentado metodologías que involucran un estudio de amenaza sísmica, análisis de riesgo, funciones de recuperación y finalmente, estimación de la resiliencia utilizando la Ec. (1). Anwar *et al.* (2019) cuantifican la resiliencia y sostenibilidad como una función de los costos de reparación, emisión de carbono y tiempos de inactividad, usando funciones de fragilidad de elementos estructurales y no estructurales. Por otro lado, Samadian (2020) se enfoca en la estimación de la resiliencia de edificios escolares de concreto reforzado utilizando funciones de vulnerabilidad y tomando en cuenta los tiempos de demora en el inicio de las reparaciones. González *et al.* (2020) también estudian escuelas de concreto reforzado, definiendo una resiliencia anual esperada (EAR) utilizando una metodología basada en riesgo sísmico, en donde se toma en cuenta todo el ambiente sísmico que afecta las estructuras bajo estudio. Recientemente, Gutiérrez y Ayala (2022) proponen un método probabilista para estimar tiempos y costos de reparación post-sísmica, así como número de trabajadores necesarios para realizar las actividades de restauración, aplicando su metodología a edificaciones de oficinas; sin embargo, no se toman en cuenta los tiempos que retrasan el inicio de las actividades de reparación.

Otro aspecto importante en el contexto de la resiliencia sísmica y el diseño sismo-resistente en general, es la definición de objetivos de diseño apropiados. En el diseño convencional, se cumplen con criterios de comportamiento en términos de resistencia lateral y desplazamiento relativo entre niveles (estados límite último y de servicio), los cuales se encuentran definidos con el fin de garantizar la integridad estructural y controlar las deformaciones. Por otro lado, el diseño basado en desempeño considera cuatro niveles de desempeño: ocupación inmediata, seguridad de vida, prevención de colapso, y colapso, de los cuales los primeros tres se utilizan para definir los objetivos de diseño. Sin embargo, en particular las investigaciones enfocadas en resiliencia, carecen de objetivos de diseño claros o con un respaldo analítico, existiendo propuestas de objetivos de resiliencia basadas en criterios heurísticos, por ejemplo, Almufti y Willford (2013) plantean una clasificación de las edificaciones en: resiliencia platino, oro y plata, de acuerdo a los tiempos de inactividad esperados. Otro ejemplo se observa en Mieler *et al.* (2015), quienes señalan la importancia de establecer objetivos de resiliencia comunitaria, en particular para sistemas críticos, tales como hospitales y plantas de energía; sin embargo, en ambos casos se carece de un respaldo analítico de los objetivos propuestos. Hall y Giglio (2016) enfatizan la importancia de definir valores aceptables de resiliencia, sugiriendo una optimización del costo, con el fin de evitar gastos innecesarios o un desempeño estructural inadecuado. Otros autores (ej. Yang *et al.*, 2018; Tena-Colunga y Nangullasmú-Hernández, 2023) también hacen énfasis en la importancia de contar con objetivos para el diseño estructural resiliente, por lo que llevan a cabo propuestas en donde se pretende tener escenarios post-sísmicos de ocupación inmediata (IO) ante sismos de servicio, reocupación rápida (RR) para los sismos de diseño y prevención de colapso (CP) para los sismos de mayor magnitud esperada, sin embargo, no se habla explícitamente sobre valores de resiliencia, o de tiempos de inactividad relacionados a estos estados de IO, RR o CP. Dichas investigaciones resaltan la importancia de contar con objetivos claros de resiliencia, lo cual posibilitará su implementación al diseño sismo-resistente.

Las contribuciones mencionadas anteriormente han aportado valiosas reflexiones respecto al concepto de resiliencia, sin embargo, muchas de ellas aún realizan simplificaciones que pueden llevar a una sobreestimación de la resiliencia, tales como considerar que las pérdidas económicas son equivalentes a la pérdida de funcionalidad, dejar de lado la parte no estructural o los factores que demoran el inicio de las

actividades de reparación. Adicionalmente, no se han presentado justificaciones analíticas para definir si un valor de resiliencia es alto, bajo, aceptable o no aceptable. Es por esto que, en el presente trabajo se propone un procedimiento para obtener, de manera probabilista, tiempos de recuperación, pérdida de funcionalidad y tiempos de inactividad antes de iniciar el proceso de reparación, parámetros requeridos para cuantificar, de una manera más precisa la resiliencia sísmica. Así mismo, se propone obtener objetivos de resiliencia por medio de un análisis costo/beneficio. Los métodos propuestos se aplican para estimar la resiliencia en escuelas públicas en el estado de Puebla, obteniéndose resultados que potencialmente pueden ayudar a la toma de decisiones para crear comunidades mejor preparadas ante eventos sísmicos.

METODOLOGÍA

La presente investigación presenta un enfoque probabilista para estimar cada uno de los parámetros que componen el perfil de funcionalidad, $Q(t)$, post-sísmica de una edificación, mostrados en la Fig. 1, en la cual se observa la variación de la funcionalidad con el tiempo. En primera instancia, se presenta un tiempo antes de la ocurrencia del evento sísmico, T_a , en donde existe una degradación gradual de la funcionalidad debido al deterioro ambiental e intemperismo, entre otros factores. Posteriormente, ocurre una caída súbita de la funcionalidad, FL , debido a los daños tanto estructurales como no estructurales. Seguido de esto, una región plana, T_b , representa los tiempos de demora antes del inicio de las actividades de reparación. Finalmente, T_c y T_d son relativos a los tiempos de reparación estructural y no estructural, respectivamente. La estimación de los parámetros de la resiliencia (tiempos y funcionalidad) se realiza por medio de modelos empíricos que relacionan la respuesta estructural con cada componente mostrado en la Fig. 1.

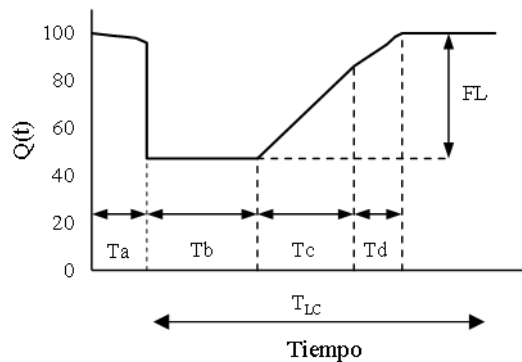


Figura 1. Variación de la funcionalidad en una estructura, posterior a la ocurrencia de un sismo

De manera adicional, se utilizan los modelos propuestos para evaluar la resiliencia sísmica en una red de estructuras. Para ello, la resiliencia es cuantificada como el área bajo el perfil de funcionalidad, $Q(t)$, normalizada a un tiempo de control, T_{LC} , aplicando la Ec. (1).

Modelo de pérdida de funcionalidad

Elementos estructurales

La funcionalidad puede entenderse como una medida del desempeño de un sistema en referencia a los servicios o productos que provee. Dada esta definición, es difícil establecer una métrica general de funcionalidad que abarque todos los sistemas estructurales, ya que cada estructura tiene una función distinta, ej. las presas contienen y regulan cierto volumen de agua mientras que las edificaciones proveen un lugar seguro para que las personas habiten. Algunos autores han representado la funcionalidad como una combinación de pérdidas económicas tanto directas como indirectas (Cimellaro *et al.*, 2010; Samadian *et al.*, 2020), mientras que en otros estudios (Anwar *et al.*, 2019) se relaciona la funcionalidad en edificaciones

con la capacidad de ocupación utilizando los cuatro estados de daño del diseño basado en desempeño: ocupación inmediata, seguridad vital, prevención de colapso y colapso.

A pesar de los estudios realizados, el concepto de funcionalidad en edificaciones no se encuentra unificado, ya que no existen metodologías claras para su estimación. En este estudio, se propone medir la funcionalidad estructural por medio de la capacidad residual, medida como la integral de la curva de capacidad estática, tomando en cuenta tanto la degradación de resistencia y de rigidez del sistema. La diferencia entre las integrales de las curvas de capacidad pre (Fig. 2a) y post (Fig. 2b) sismo, será la pérdida de funcionalidad estructural, FL . La ventaja de utilizar este enfoque es que hace posible relacionar la funcionalidad con la respuesta estructural.

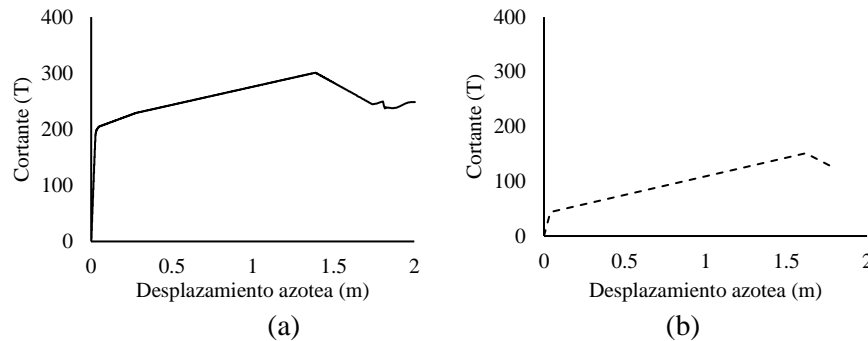


Figura 2. Curvas de capacidad a) original b) residual

Elementos no estructurales

Es importante tomar en cuenta la parte no estructural con influencia en la resiliencia sísmica de las estructuras, pues pueden tener repercusiones no solo económicas, sino también en las operaciones cotidianas de una edificación. Para ello, se propone el uso de curvas de fragilidad, en donde se relacionen niveles de pérdida de funcionalidad no estructural a ciertos estados de daño, a su vez asociados a un parámetro de respuesta estructural de entrepiso.

Modelos de tiempo de inactividad

La definición de la resiliencia sísmica involucra dos grandes parámetros, la funcionalidad y el tiempo de inactividad, el cual a su vez está compuesto por los tiempos de reparación y los tiempos de atraso o demora en el inicio de las reparaciones. Por un lado, los tiempos de reparación, como su nombre lo indica, se refieren al lapso que tomará llevar a cabo las actividades de restauración en los componentes estructurales y no estructurales dañados, mientras que, los tiempos de demora se refieren a todas las posibles interferencias con el inicio de las reparaciones, como pueden ser las actividades de inspección post sísmica, desarrollo de la ingeniería, restauración de servicios, obtención de financiamientos, permisos y movilización a obra (Comerio, 2006; Almufti y Willford, 2013).

Tiempos de demora

Entre las consecuencias negativas de los tiempos de inactividad se encuentran las pérdidas económicas debido a la dificultad para utilizar las estructuras dañadas de manera adecuada, siendo posible que dichas pérdidas representen una gran parte de las mermas económicas totales causadas por un evento sísmico, particularmente en edificaciones comerciales (Ghorawat, 2011; Ortiz y Reinoso, 2020), es por esto que los tiempos de inactividad deben de ser estimados apropiadamente. Los factores de demora tienen una gran importancia en la inactividad, siendo estudiados por distintos autores (Comerio, 2006; Almufti y Willford,

2013; Ortiz y Reinoso, 2020) entre los que destaca el trabajo realizado por Almufti y Willford (2013), quienes proponen los siguientes factores que atrasan el inicio de las reparaciones:

- Inspección post sísmica: Posterior a un sismo, es necesario llevar a cabo una evaluación de la integridad estructural con el fin de garantizar la seguridad para los habitantes de cada estructura.
- Ingeniería: Si la estructura tiene un daño por sismo moderado, severo o incierto, es necesario realizar un estudio de gabinete para garantizar la integridad de las edificaciones, así como proponer las modificaciones al diseño estructural en caso de ser requerido.
- Permisos: Es necesario que la jurisdicción correspondiente aprueba la rehabilitación o reconstrucción de la estructura dañada. Las reparaciones de ciertos elementos no estructurales pueden requerir permisos, sin embargo, estas usualmente se pueden obtener de manera rápida por lo que no se considera en los tiempos de demora (Almufti y Willford, 2013).
- Financiamiento: Es posible que ocurran retrasos significativos debido a la falta de recursos económicos para pagar las reparaciones. El financiamiento puede lograrse por medio de préstamos, aseguramientos o bien, si se trata de infraestructura crítica pública se puede considerar subvenciones de parte del gobierno.
- Movilización: Se refiere a los elementos necesarios para comenzar las reparaciones dado que se cuenta con todos los factores anteriormente mencionados. Está regido por la mano de obra disponible, la severidad del daño, el concurso de obra, la importancia de la estructura y la altura (pues en algunos casos es necesario el uso de grúas).

La Fig. 3 representa la interacción entre los factores de demora, en donde se aprecia que, mientras algunos de ellos pueden llevarse a cabo en paralelo, otros son dependientes de haber finalizado un proceso anterior (en serie). El tiempo de demora será igual al tiempo máximo que resulte de la suma de los procesos en serie que se presentan.

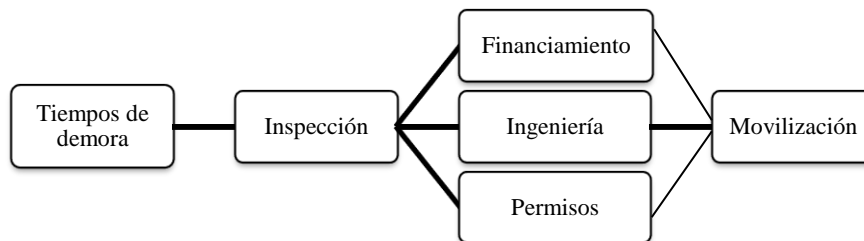


Figura 3. Actividades que retrasan el inicio de las reparaciones

Con el fin de mantener un enfoque racional y simple en la estimación de los tiempos de demora, se propone relacionar el daño estructural con algunos tiempos de demora: inspección, ingeniería y movilización a obra. Dicha relación puede obtenerse con análisis de datos sobre escenarios post- sismo reales, de las estipulaciones en códigos generales, literatura disponible o bien con la opinión de especialistas con experiencia en rehabilitación post- sísmica. Por ejemplo, Alcocer *et al.* (2020) sugieren que una inspección parcial (generalmente utilizada en estructuras con daño ligero) en escuelas de México, no debe tomar más de 30 minutos.

Tiempo de recuperación en elementos estructurales

Como se mencionó anteriormente, los tiempos de reparación, *RT*, involucran las actividades para llevar una estructura dañada a un nivel de funcionalidad adecuado. A pesar de que es posible que existan factores socio-económicos con influencia en los *RT*, tales como la disponibilidad de mano de obra en un escenario

post-sismo, se considera que es razonable estimar un programa de obra basado en el daño estructural y en las técnicas de rehabilitación comúnmente utilizadas. Por ejemplo, en México, es habitual el uso de resinas epóxicas para reparar elementos de concreto con agrietamientos menores debido a acciones sísmicas. Por otro lado, cuando el daño es moderado o severo, generalmente se emplean encamisados del concreto para incrementar la resistencia de la sección.

Tiempo de recuperación en elementos no estructurales

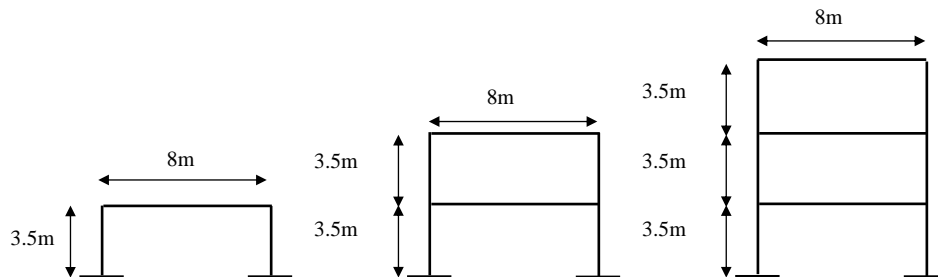
Los elementos no estructurales se definen como aquellos que, a pesar de no contribuir a la resistencia de cargas gravitacionales o sísmicas, si alteran la funcionalidad de una edificación (Wang *et al.*, 2014) y consecuentemente influyen en su resiliencia sísmica.

Para tomar en cuenta estos elementos, se propone el uso de curvas de fragilidad, encontradas en la literatura, asociadas a estados de daño en cada elemento, así como funciones de consecuencia en términos de tiempos y costos de reparación para cada estado de daño. Dicha información permite definir, a partir de un parámetro de respuesta estructural de entrepiso, el daño esperado en cada elemento no estructural, con lo cual se puede estimar su tiempo de reparación.

CASO DE ESTUDIO

Las instituciones educativas forman parte fundamental de la sociedad, pues no solo se encargan de preparar académicamente a nuevas generaciones con el fin de promover el crecimiento socioeconómico, sino que, además, es habitual que sirvan como centros de acopio y refugios durante eventos catastróficos. Esto pone en evidencia la relevancia de investigar más acerca de la resiliencia de estas estructuras (Feng *et al.*, 2017; Samadian *et al.*, 2020; Fontana *et al.*, 2020). Históricamente en México, las instituciones educativas de nivel básico han mostrado baja resiliencia, pues tanto el tiempo de inactividad como la funcionalidad se han visto afectados en temblores de gran magnitud. Por un lado, la funcionalidad se ha comprometido al presentarse daños, desde ligero hasta el colapso en un gran número de escuelas, mientras que, al mismo tiempo, se han observado largos periodos de recuperación (Comerio, 1998).

En la presente investigación se estudiaron modelos de marcos de concreto reforzado, al tratarse de un sistema de construcción ampliamente utilizado en las escuelas públicas de México. Además, el grupo de estructuras estudiadas consisten en edificaciones de 1 a 3 niveles, con altura de entrepiso de 3.5m, 8 crujías de 3m en el sentido longitudinal y una crujía de 8m en el sentido transversal (Fig. 4). Dichas estructuras se consideran ubicadas en el estado de Puebla, debido a su gran relevancia sísmica, y construidas entre 1996 y 2015, con lo cual se logra estudiar una gran parte de las escuelas actualmente funcionando en Puebla (Fig. 5).



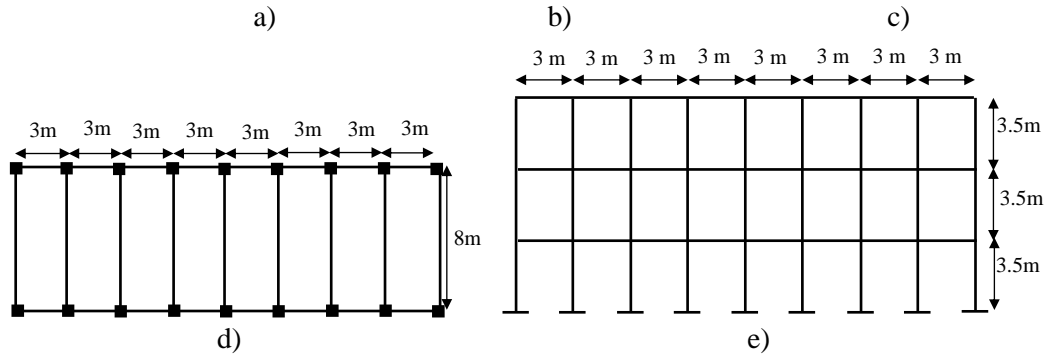


Figura 4. Geometría de estructuras. a) vista frontal escuela de 1 nivel, b) vista frontal escuela de 2 niveles, c) vista frontal escuelas de 3 niveles, d) planta, e) elevación escuela de 3 niveles

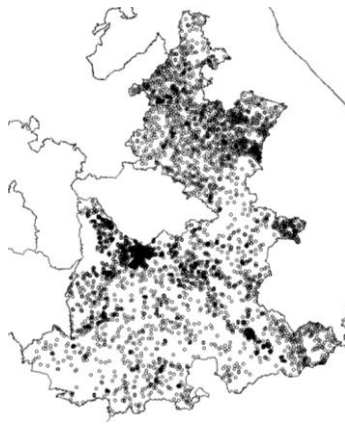


Figura 5. Mapa de escuelas públicas en el estado de Puebla

Con el fin de conocer el comportamiento de las estructuras propuestas ante acciones sísmicas, se llevaron a cabo 96 análisis no lineales (NLA) y 98 análisis dinámicos incrementales (IDA) con registros de sismos reales obtenidos en suelo firme (Tabla 1). En dichos análisis se consideró un amortiguamiento de 5% respecto al crítico, un modelo de plasticidad concentrada en los extremos, con un modelo de histéresis que obedece a la propuesta de Ibarra *et al.* (2005) pues de esta manera se representa de manera adecuada la degradación de la rigidez y resistencia de los elementos de concreto reforzado. Los efectos de interacción suelo estructura no fueron tomados en cuenta debido a que estos son menos significativos en estructuras de baja altura (Tanik *et al.*, 2021). Por otro lado, el modelado estructural para los NLA e IDA se crearon en OpenSees (Makena *et al.*, 2009).

Tabla 1. Registros sísmicos utilizados para los NLA en estructuras, obtenidos de estaciones en terreno firme

Estación	Fecha (d/m/a)	Dirección	Hipocentro		M_w	Estación	Fecha (d/m/a)	Dirección	Hipocentro		M_w
			Lat(°)	Lon(°)					Lat(°)	Lon(°)	
ARTG	14/01/91	EW-NS	17.86	101.8	5.2	COYC	19/07/97	EW-NS	15.86	98.26	6.7
ARTG	11/06/86	EW-NS	15.14	93.51	5.8	COYC	19/09/85	EW-NS	18.41	102.4	8.1
ARTG	05/01/90	EW-NS	18.71	107.0	5.8	COYC	20/09/85	EW-NS	17.82	101.6	7.6
ARTG	30/04/86	EW-NS	18.36	103.0	7.0	COYC	22/03/97	EW-NS	17.04	99.76	4.7
CALE	11/01/97	EW-NS	18.34	102.5	7.1	COYC	25/04/89	EW-NS	16.58	99.46	6.9
CALE	19/09/85	EW-NS	18.41	102.4	8.1	COYC	30/09/99	EW-NS	16.05	97.0	7.4

CALE	22/05/97	EW-NS	18.41	101.8	6.0	CSER	15/05/93	EW-NS	16.47	98.72	6.0
CALE	05/01/90	EW-NS	18.71	107.0	5.8	CSER	15/06/99	EW-NS	18.13	97.53	7.0
CALE	30/04/86	EW-NS	18.36	103.0	7.0	CSER	16/09/89	EW-NS	16.21	94.01	5.9
CENA	15/06/99	EW-NS	18.13	97.53	7.0	CSER	23/02/94	EW-NS	17.82	97.30	5.4
CENA	30/09/99	EW-NS	16.05	97.0	7.4	CSER	25/04/89	EW-NS	16.58	99.46	6.9
COPL	14/09/95	EW-NS	17.00	99.00	7.3	CSER	30/09/99	EW-NS	16.05	97.0	7.4
COPL	15/06/99	EW-NS	18.13	97.53	7.0	CUER	10/12/94	EW-NS	18.02	101.56	6.2
COPL	21/01/97	EW-NS	16.44	98.15	5.6	CUER	14/09/95	EW-NS	17.00	99.00	7.3
COPL	24/10/93	EW-NS	16.76	98.76	6.6	CUER	15/06/99	EW-NS	18.13	97.53	7.0
COPL	25/04/89	EW-NS	16.58	99.46	6.9	CUER	23/05/94	EW-NS	17.97	100.6	5.8
COPL	30/09/99	EW-NS	16.05	97.0	7.4	CUER	30/09/99	EW-NS	16.05	97.0	7.4
COYC	07/06/98	EW-NS	15.82	94.07	6.2	RIPC	14/09/95	EW-NS	17.00	99.00	7.3
COYC	05/07/98	EW-NS	16.83	100.1	5.2	RIPC	23/02/94	EW-NS	17.82	97.30	5.4
COYC	08/05/97	EW-NS	17.32	100.4	5.1	SXPU	19/09/85	EW-NS	18.41	102.4	8.1
COYC	11/01/97	EW-NS	18.34	102.5	7.1	SXPU	20/09/85	EW-NS	17.82	101.6	7.6
COYC	14/09/95	EW-NS	17.00	99.00	7.3	YAIG	15/06/99	EW-NS	18.13	97.53	7.0
COYC	15/06/99	EW-NS	18.13	97.53	7.0	YAIG	30/09/99	EW-NS	16.05	97.0	7.4

Los resultados obtenidos de los NLA se procesaron en términos de rotaciones plásticas y su relación con el desplazamiento, presentándose la Fig. 6, en donde cada columna representa el resultado de un análisis, asociado a su vez a un registro sísmico en particular. Se puede apreciar que existe una relación creciente entre el desplazamiento máximo, Δ_{max} , y la aparición de rotaciones plásticas. También se puede apreciar que, en general, las rotaciones plásticas aparecen primero en los extremos de las vigas (de acuerdo con la Tabla 2), en particular en el primer nivel, lo cual se puede atribuir al modelo de columna-fuerte viga-débil.

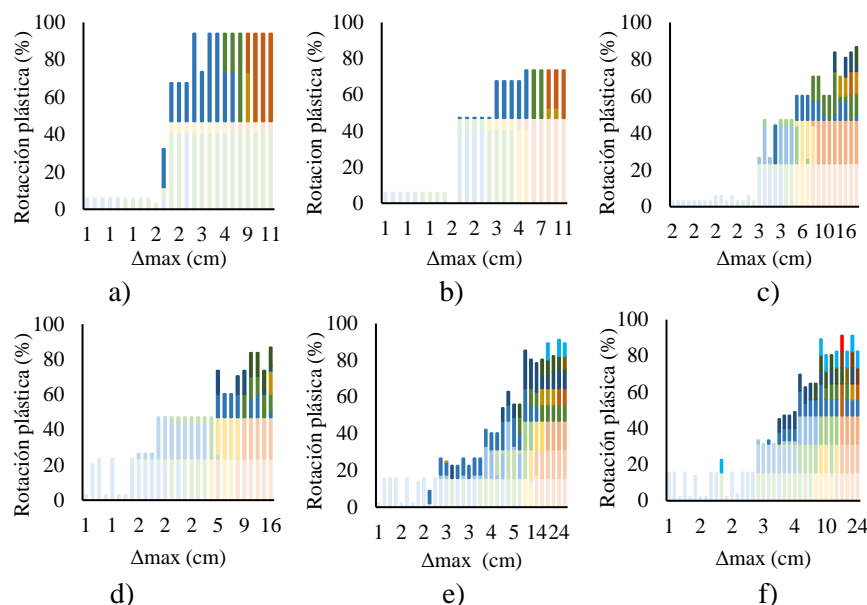


Figura 6. Porcentaje de rotaciones plásticas a) 1 nivel, año 1996, b) 1 nivel, año 2008, c) 2 niveles, año 1996, d) 2 niveles, año 2008, e) de 3 niveles, año 1996, f) de 3 niveles, año 2008

Tabla 2. Clasificación de las rotaciones plásticas de acuerdo con su intensidad y ubicación

Color	Localización vigas	Color	Localización vigas	Color	Localización vigas	Color	Localización columnas	Color	Localización columnas	Color	Localización columnas	DS
	Nivel1		Nivel2		Nivel3		Nivel1		Nivel2		Nivel3	DS1
	Nivel1		Nivel2		Nivel3		Nivel1		Nivel2		Nivel3	DS2
	Nivel1		Nivel2		Nivel3		Nivel1		Nivel2		Nivel3	DS3
	Nivel1		Nivel2		Nivel3		Nivel1		Nivel2		Nivel3	DS4

Al normalizar los resultados anteriores al desplazamiento de fluencia de cada estructura, se obtuvo el modelo general de la Fig. 7, en donde el porcentaje de rotaciones plásticas está relacionado a la demanda de ductilidad, μ .

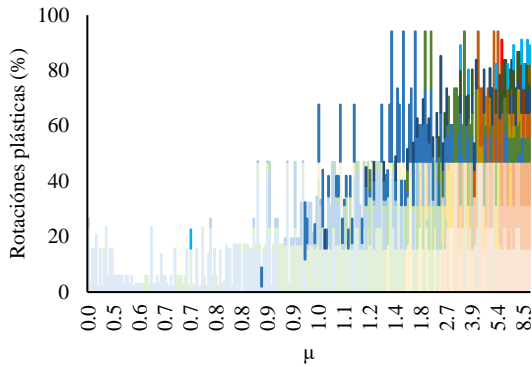
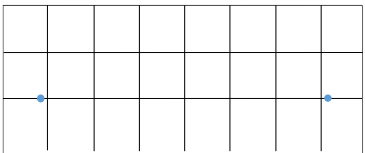


Figura 7. Porcentaje de rotaciones plásticas dada una demanda de ductilidad. Resultados para todas las estructuras

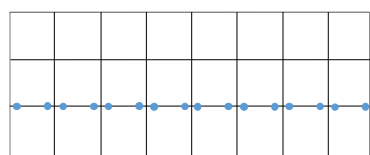
Curvas de tiempo de reparación esperado

Los daños físicos en cada elemento de concreto se pueden describir dependiendo de la severidad de la rotación plástica presentada (FEMA, 2018), esta información en conjunto con la localización de cada rotación, da la configuración del daño en una estructura (Fig. 8). A su vez, si se conoce el estado general del daño en una estructura, se pueden proponer medidas de reparación pertinentes, plasmadas en un programa general de obra. Esto indica que, para las estructuras propuestas, si se conoce el desplazamiento normalizado al de fluencia, se puede inferir un tiempo de reparación a través de la calendarización de actividades de reparación (Fig. 8).



Actividad\ Horas	1 día				2 día			
	2	4	6	8	2	4	6	8
Preparar área de trabajo								
Limpieza								
Relleno de grietas con resina epóxica								
Remover imperfecciones de superficie								
Limpieza								

a)



Actividad\ Horas	1 día				3 día				8 día			
	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
Preparar área de trabajo												
Limpiar área dañada												
Relleno de grietas con epóxico comercial												
Eliminar imperfecciones												
Mezcla primer resina												
Aplicar resina comercial												
Mezclar segunda resina												
Aplicar segunda resina												
Cortar lámina de fibra de carbono												
Mezclar tercer resina												
Aplicar tercer resina												
Colocar laminado												
Uniformizar superficie												
Aplicar tercer resina (segunda capa)												
Colocar arena sobre resina												
Limpieza final												

b)

Actividad\ Horas	1 día				45 días		46 días			
	2	4	6	8	6	8	2	4	6	8
Preparar área de trabajo										
Apuntalamiento										
Limpiar área dañada										
Relleno de grietas con resina (columnas)										
Eliminar imperfecciones (columnas)										
Relleno de grietas con epóxico (vigas)										
Eliminar imperfecciones (vigas)										
Mezcla de resina										
Aplicar primera base de resina										
Mezcla resina										
Aplicar segunda base de resina										
Cortar láminas de fibra de carbono										
Mezclar resina										
Aplicar tercer base de resina										
Colocación de laminado										
Uniformizar superficie										
Aplicar resina										
Colocar arena sobre resina										
Limpieza final										

c)

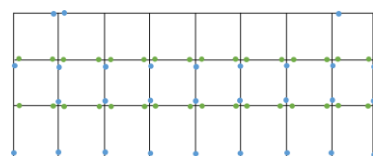
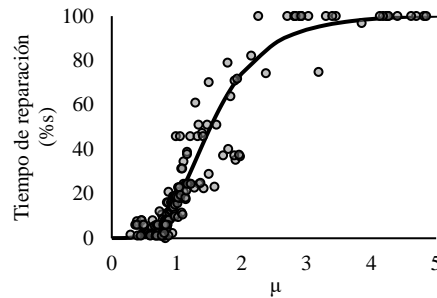


Figura 8. Programas de reparación en escuelas de 3 niveles a) 2 vigas daño ligero, b) 6 vigas daño ligero y 2 vigas daño moderado, c) 16 vigas daño moderado, 2 vigas daño ligero y 18 columnas daño ligero

Al estimar los tiempos de reparación para cada configuración de daño y normalizar estos valores al tiempo de reparación máximo en cada tipología, se obtiene una relación creciente entre la demanda de ductilidad y los tiempos de reparación relativos (Fig. 9). Al aplicar una regresión no lineal a los datos obtenidos se genera una función de los tiempos de reparación en relación con los valores de μ , cuyo comportamiento está regido por la Ec. (2), en donde a, b y c son factores adimensionales de ajuste con valores de 101.45, 1.53 y -3.73, respectivamente. Este modelo representa una manera de estimar de manera rápida los tiempos de reparación a partir de la respuesta estructural.

Figura 9. Tiempos de reparación en función de μ

$$RT = \frac{a}{1 + \left(\frac{\mu}{b}\right)^c} \quad (2)$$

Con el modelo de la ecuación anterior, se procesan los resultados de los IDA para relacionar la intensidad sísmica en términos de pseudoaceleración, S_a , con valores de RT . Esto se muestra en la Fig. 10, observado valores medios (línea negra continua), y desviación estándar (línea discontinua), correspondiendo este valor medio a la curva de tiempo de reparación esperado, $E(RT)$.

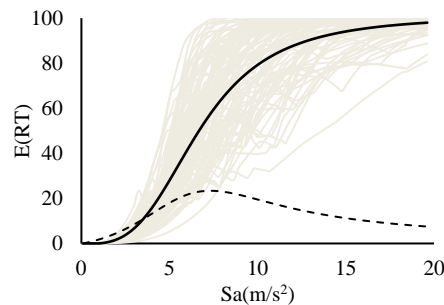


Figura 10. Curva de tiempo de reparación esperado

Curvas de pérdida de funcionalidad esperada

Como se mencionó anteriormente, la pérdida de funcionalidad estructural se calcula como la diferencia entre la integral de la curva de capacidad original y la residual, por lo tanto, es necesario obtener dichas curvas de comportamiento para cada configuración del daño (como las mostradas en la Fig. 8). Para esto es menester definir la degradación de rigidez y de resistencia en elementos dañados, lo cual puede lograrse considerando factores de degradación de propiedades relacionados al estado de daño en cada elemento (CDMX, 2017). En particular, en este caso se adoptó la propuesta de la Norma para Rehabilitación Sísmica de Edificios de Concreto Dañados (CDMX, 2017), en donde se indican factores de 1.0 y 0.75 de la resistencia y rigidez original para daño ligero, 0.75 y 0.5 de la resistencia y rigidez originales cuando el elemento presenta daño moderado, y finalmente 0.0 y 0.0 para un daño severo. La degradación de las propiedades mecánicas en el concreto reforzado también puede apreciarse en algunos diagramas de comportamiento histerético (Ibarra *et al.*, 2005), los cuales consideran el deterioro por incursión en el rango inelástico durante los ciclos de carga y descarga. En la Fig. 11 se muestran dichos diagramas para algunos elementos que componen una edificación escolar de un nivel, sometida a un sismo en particular (11/01/97). Es apreciable que existe una disminución, tanto en resistencia como rigidez, lo cual es consistente con los factores de reducción propuestos de acuerdo a la Norma para Rehabilitación de Edificios (CDMX, 2017).

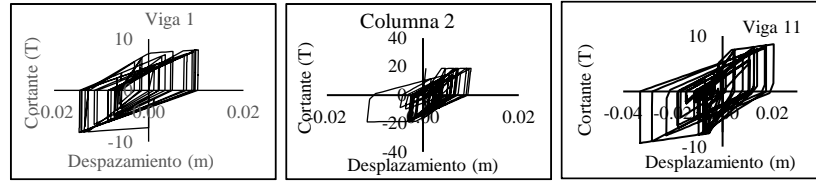


Figura 11. Comportamiento histerético de los elementos estructurales en una escuela de 1 nivel sometida al sismo del 11 de enero de 1997 registrado en la estación CALE

Una vez definidas las propiedades residuales de cada elemento, se llevaron a cabo análisis estáticos no lineales con elementos con propiedades disminuidas. Posteriormente, la capacidad completa del sistema estructural se evaluó como el área debajo de la curva de capacidad (Fig. 12). La diferencia entre las curvas sin daño (línea negra continua) y las curvas con daño (líneas grises) es la pérdida de funcionalidad estructural.

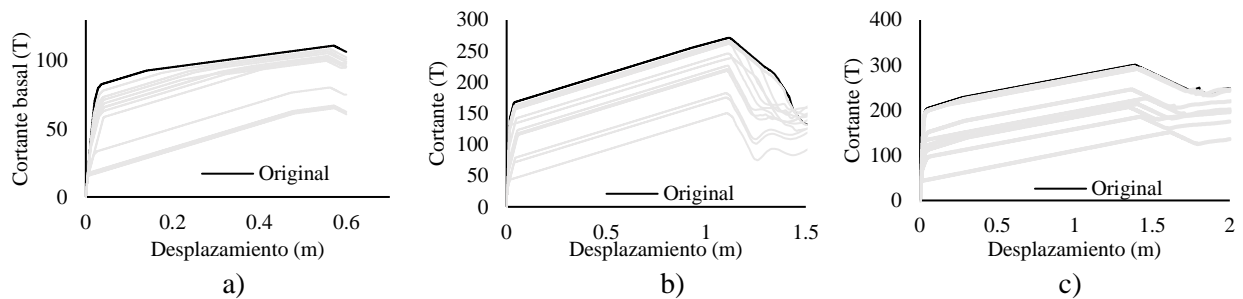


Figura 12. Curvas de comportamiento estáticas para estructuras a) de 1 nivel, b) 2 niveles, c) 3 niveles

Cada valor de la pérdida de funcionalidad está asociado a una demanda de ductilidad de tal manera que se tiene una relación creciente entre la demanda de ductilidad y la pérdida de funcionalidad (Fig. 13). Al aplicar una regresión no lineal a los datos obtenidos se genera una función de la funcionalidad en relación a los valores de μ , cuyo comportamiento está regido por la Ec. (3), en donde α , β y γ son factores adimensionales de ajuste con valor de 6.00, 0.54 y 3.66, respectivamente. Este modelo representa una manera de estimar de manera rápida la pérdida de funcionalidad a partir de la respuesta estructural.

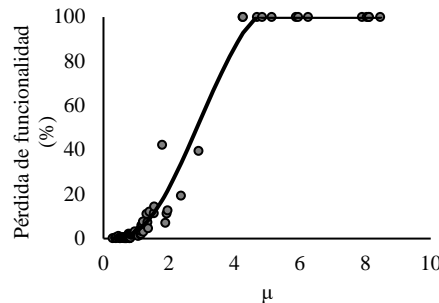


Figura 13. Pérdida de funcionalidad en función de μ

$$FL = \alpha \beta \left(\frac{1}{\mu}\right) \mu^\gamma \quad (3)$$

Utilizando la ecuación anterior, se procesan los resultados de los IDA para relacionar la intensidad sísmica S_a con FL . Esto se muestra en la Fig. 14, observándose valores medios (línea negra continua), así como la

desviación estándar (línea discontinua). Este valor medio corresponde a la curva de pérdida de funcionalidad esperada, $E(FL)$.

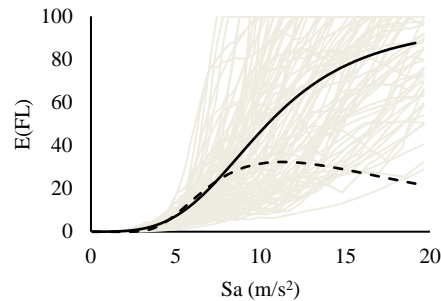


Figura 14. Curva de pérdida de funcionalidad esperada

Elementos no estructurales

La estimación del daño en elementos no estructurales es de gran relevancia para la funcionalidad en edificaciones, pues la correcta operabilidad de estas estructuras depende del correcto funcionamiento de la parte no estructural e incluso de los contenidos. Adicionalmente, las fallas en este tipo de elementos pueden comprometer la integridad de los habitantes, en particular en escuelas públicas (González *et al.*, 2020), razones por las que, en la presente investigación, se tomará en cuenta la parte no estructural al cuantificar la resiliencia.

Los elementos estructurales a tomar en cuenta se definieron a partir de los criterios del Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación (INEE) en su sección de mobiliario y equipo educativo básico en aulas escolares (Noyola *et al.*, 2016), en donde se especifica que los escritorios, sillas, pizarrones, repisas, luminarias, plafones, dispensadores de agua, ventas y sistemas de drenaje son indispensables para un funcionamiento adecuado de las instituciones de educación básica. Dentro de estos elementos, las ventanas, luminarias y plafones se seleccionaron como los más relevantes en términos de resiliencia, incluyéndose, además, muros de mampostería, propuesta llevada a cabo en conjunto con académicos y administrativos actualmente laborando en instituciones educativas.

Los tiempos de reparación para cada uno de los elementos previamente mencionados, se obtienen de la base de datos para la evaluación del desempeño de la FEMA (2018), que muestra no solo la probabilidad de ocurrencia de ciertos estados de daño, sino también, funciones de consecuencia asociadas a dichos daños. La Tabla 3 presenta un ejemplo de lo anteriormente mencionado, para el caso particular de ventanas genéricas, con vidrio monolítico, con laminado no especificado y una razón de aspecto de 6:5.

Tabla 3. Tiempos de reparación para distintos estados de daño en una pieza de vidrio (FEMA, 2018)

Estado de daño	Daño físico	Reparaciones recomendadas	Tiempos de reparación (días)
DS1- Daño ligero	Falla del sello	Remover pieza de vidrio y reemplazar el sello	0.68
DS2- Daño moderado	Agrietamiento de vidrio	Reemplazar pieza de vidrio	1.02
DS3- Daño severo	Colapso	Reemplazar pieza de vidrio	1.5

Las probabilidades de ocurrencia de cada estado de daño, dada una medida de respuesta estructural, se presentan a través de las curvas de fragilidad (Fig. 15). Estas pueden obtenerse con métodos empíricos, analíticos o consultado a la literatura disponible, lo cual se realizó en esta investigación (FEMA, 2018). También, es de relevancia hacer mención de la respuesta estructural que se incorpora en cada curva de fragilidad, siendo para el caso de muros y ventanas, la distorsión de entrepiso (ID) y para el caso de plafones y luminarias, las aceleraciones de entrepiso (PFA).

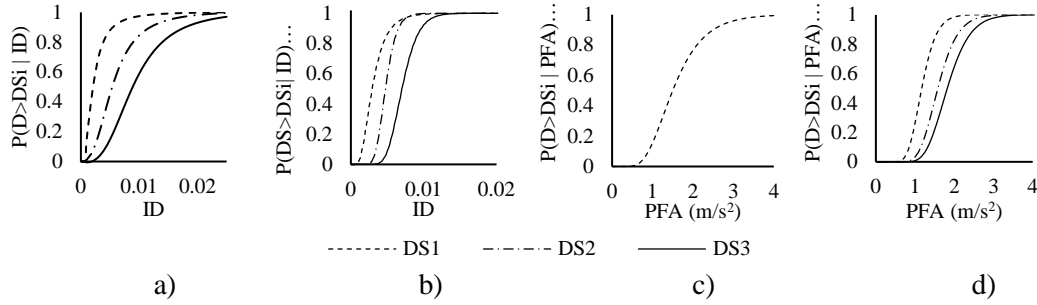


Figura 15. Funciones de fragilidad para distintos estados de daño en a) muros, b) ventanas, c) luminarias y d) plafones

Utilizando las curvas de fragilidad anteriores en conjunto con los tiempos de reparación asociados a cada estado de daño (ejemplo en Tabla 3), es posible definir curvas de valores esperados, utilizando la Ec. (4).

$$E(RT) = \sum_{j=1}^{NDS} \Pr(RT > RT_j | ID \text{ o } PFA) \cdot RT_j \quad (4)$$

En donde NDS es el número de estados de daño considerados y $\Pr(RT > RT_j | ID \text{ o } PFA)$ es la probabilidad de que se exceda un tiempo de reparación, asociado a un estado de daño, dada una medida de respuesta estructural (distorsión o aceleración de piso). La Fig. 16 muestra las curvas de tiempo de reparación esperados en los elementos no estructurales considerados.

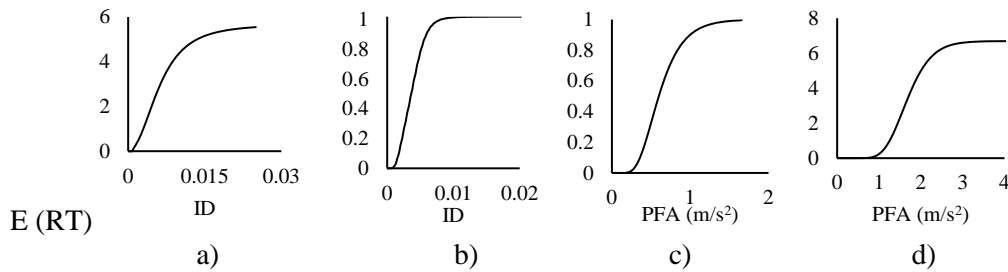


Figura 16. Curvas de tiempo de reparación esperada para elementos no estructurales. a) Muros, b) Ventanas, c) Luminarias, d) Plafones

Estimación de los tiempos de demora

Una parte importante en los tiempos de inactividad post-sísmica son los tiempos que retrasan el inicio de las actividades de reparación, entre los cuales se encuentran los tiempos de inspección, ingeniería, financiamiento, permisos y movilización a obra. Es por eso que, en esta investigación se reconoce que debe llevarse a cabo una estimación de los tiempos asociados a cada factor de demora anteriormente mencionado. Para ello, se adopta un enfoque similar al propuesto por Almufti y Willford (2013) quienes recopilan información por medio de entrevistas con especialistas en procesos de reparación post sismo y obtiene valores medios para cada tiempo de demora. En la presente investigación se llevó a cabo una recopilación de información valiéndose de asesoramiento por parte de ingenieros, arquitectos y académicos que han tenido un rol en las rehabilitaciones posteriores a eventos sísmicos en México. Esto permitió relacionar tiempos medios con daño general en las estructuras, el cual puede representarse con distorsiones. Los resultados de dicha investigación se muestran en la Fig. 17, observándose que, a pesar de haber una

dispersión significativa en los datos, si existe una tendencia creciente entre el daño global y los tiempos de demora.

En la Fig. 17a puede notarse que, un daño inexistente (distorsiones pequeñas) está asociado a tiempos de inspección mínimos y tiempos de ingeniería nulos; sin embargo, a medida que el daño incrementa, se requieren procesos de inspección más detalladas, por lo tanto, más actividades de cálculos e ingeniería. De manera similar, la Fig. 17b, muestra que los tiempos de movilización se incrementan a medida que crece la respuesta estructural, presentándose dos enfoques: 1) considerando un proceso tradicional con concursos de obra (línea continua Fig. 17b), 2) un enfoque con asignación de obra directa (línea negra punteada Fig. 17b). Dado que el proceso de asignación directa lleva a tiempos de movilización menores, se espera que incremente los valores de resiliencia. Adicionalmente, también se muestra el valor medio ± 1 desviación estándar (1SD), en donde se puede apreciar que, en el caso de los tiempos de inspección e ingeniería, estos se encontrarán con un 70% de confianza, en este rango, mientras que para el caso de los tiempos de movilización se presenta un 80% intervalo de confianza de que estos tiempos se encuentre entre $\pm 1SD$.

La información presentada anteriormente puede ser usada por las autoridades correspondientes en conjunto con el sector privado de la industria de la construcción para crear estrategias preventivas y de respuesta rápida ante eventos sísmicos.

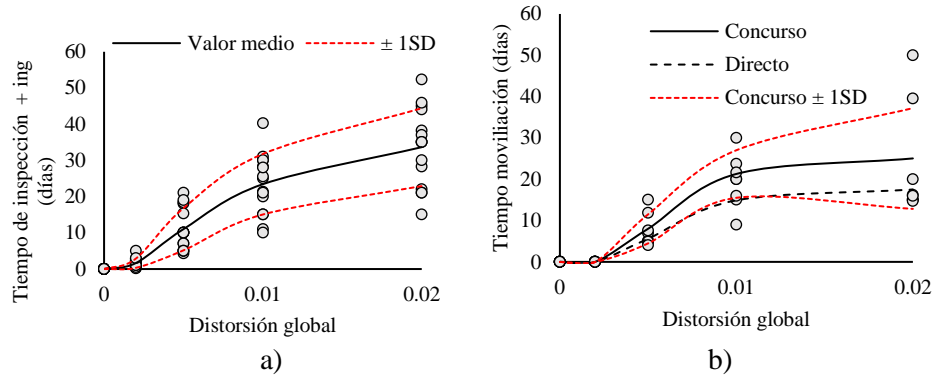


Figura 17. a) Tiempos de inspección e ingeniería b) tiempos de movilización como una función de la respuesta estructural

Al aplicar una regresión no lineal a los datos obtenidos se generan funciones que relacionan la distorsión global (D_{rift}) con los tiempos de inspección e ingeniería ($I-ET$), Ec. (5), y movilización a obra (MT), Ec. (6), en donde A, B, C y D, son factores de ajuste adimensionales con valores de -0.15, 0.00007, 34.63 y 1.97, respectivamente. Mientras que, θ , η y κ valen 23.72, 3.34 y 0.0063, respectivamente.

$$I - ET = \frac{AB + CD_{rift}^D}{B + D_{rift}^D} \quad (5)$$

$$MT = \frac{\theta D_{rift}^\eta}{\kappa^\eta + x^\eta} \quad (6)$$

Los modelos mostrados en la Fig. 17a y b permiten procesar los resultados de los IDA para relacionar la intensidad sísmica con los tiempos de inspección, ingeniería y movilización considerando concursos de obra. En la Fig. 18 se muestran los valores medios (líneas negras continuas) así como la desviación estándar

(líneas discontinuas). Dichos valores medios corresponden a los tiempos de inspección e ingeniería esperados, $E(IET)$ y tiempos de movilización esperados, $E(MT)$.

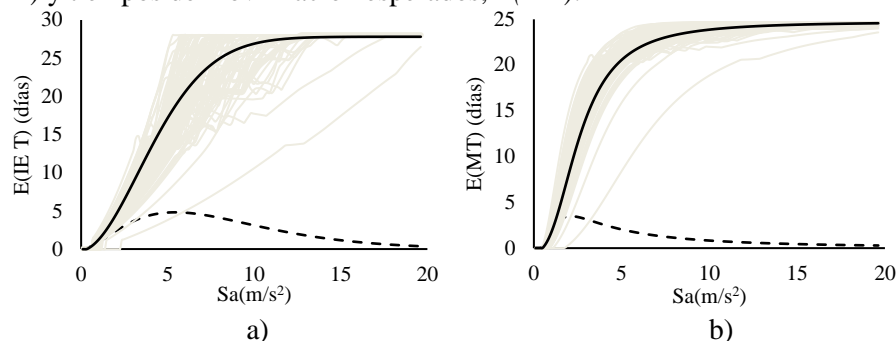


Figura 18. Funciones de tiempo esperado para a) inspección e ingeniería y b) movilización a obra

Finalmente, los tiempos de demora asociados a los permisos y financiamientos se proponen de acuerdo con la poca literatura disponible, entre la cual se encuentra documentos del Instituto Nacional de la Infraestructura Educativa (INIFED), en donde se indica que, como parte de las estrategias para la evaluación y control del daño por sismo, la gestión de los recursos se estima en un total de 9 días (INIFED, 2017).

Resiliencia sísmica

La resiliencia sísmica permite evaluar el potencial de una edificación y sus componentes para soportar acciones sísmicas importantes y regresar a una condición de funcionalidad aceptable en un lapso breve. Tal como se mencionó previamente, en el estudio de la resiliencia sísmica es usual observar importantes simplificaciones que pueden resultar en sobreestimaciones de los valores de resiliencia encontrados, tales como no tomar en cuenta los factores que retrasan el inicio de las actividades de reparación o las consecuencias del daño en elementos no estructurales. Para resaltar las consecuencias de llevar a cabo dichas simplificaciones, en esta investigación se cuantificó la resiliencia para algunos casos específicos, utilizando la Ec. (1) y con considerando tres enfoques: 1) no tomando en cuenta tiempos de demora ni los elementos no estructurales (Fig. 19a), 2) considerando los tiempos de demora (Fig. 19b) y c) un enfoque más refinado, en donde se toma en cuenta tanto la demora como la parte no estructural (Fig. 19c).

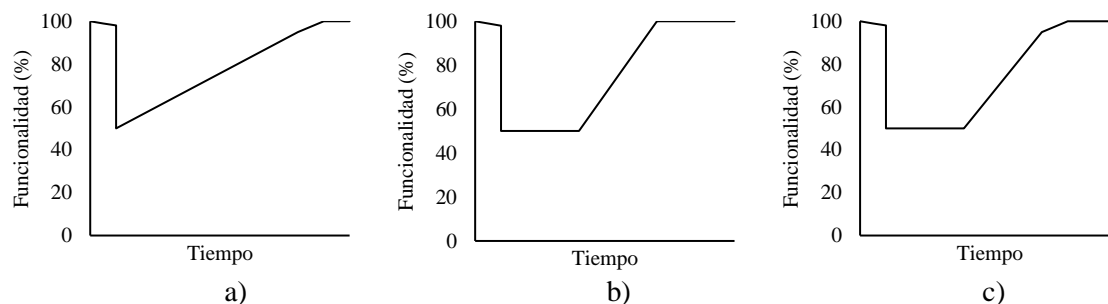


Figura 19. Perfil de funcionalidad considerando a) enfoque simple, b) tiempos de demora, c) tiempos de demora y parte no estructural

Aplicación de las curvas de tiempo y funcionalidad esperados

La resiliencia se estimó utilizando una extensa base de datos de escuelas públicas en el estado de Puebla, en México, dada su alta actividad sísmica. Para este fin, se definió la amenaza sísmica como una medida de intensidad espectral (Sa) asociada al periodo fundamental de cada estructura, considerando un amortiguamiento de 5% respecto al crítico. La intensidad sísmica se representó como una variable aleatoria definida por sus dos primeros momentos probabilísticos, el valor medio y la varianza. Así mismo, se

utilizaron ecuaciones de predicción de movimiento sísmico para evaluar la influencia de cada fuente en el sitio de estudio. Mayor información referente a la amenaza sísmica referida en esta investigación puede encontrarse en Jaimes y Niño (2017).

El software de análisis de riesgo sísmico, CAPRA (Cardona *et al.*, 2010) es utilizado usualmente para realizar cálculos de riesgo en términos de pérdidas económicas, ya sea anual o máxima esperada, usando a su vez una combinación de la amenaza, la exposición y funciones de vulnerabilidad o daño esperado, sin embargo, en esta investigación se utilizó la plataforma CAPRA para conocer la distribución del tiempo de recuperación y funcionalidad esperada en cada estructura de la base de datos, posibilitando la cuantificación de la resiliencia para la red de estructuras mencionada.

La Tabla 4 muestra los resultados del análisis mencionado, en términos de tiempos de reparación estructural (RT_s), pérdida de funcionalidad (FL_s), tiempos de reparación en muros (RT_{MW}), ventanas (RT_w), luminarias (RT_L) y plafones (RT_C), considerando los siete escenarios más críticos, seleccionados de acuerdo con la severidad de las consecuencias y frecuencia de ocurrencia de cada evento. Adicionalmente, se muestran tiempos de demora esperados, de modo que se tome en cuenta la inspección, ingeniería (I-ET) y movilización de obra, esta última con contratos de obra, MT (B), y con asignación directa, MT (D), observándose una reducción de hasta 39% en los tiempos de movilización al utilizar una asignación directa. Es importante mencionar que todos los tiempos están normalizados al tiempo máximo de inactividad posible.

Tabla 4. Funcionalidad y tiempos esperados para los 7 eventos más críticos

Evento	Magnitud	RT_s	FL_s	RT_M	RT_V	RT_L	RT_P	I - E T	MT (B)	MT (D)
1	7.66	0.27	0.19	0.23	0.04	0.03	0.23	0.04	0.09	0.06
2	7.18	0.19	0.09	0.27	0.05	0.04	0.25	0.04	0.10	0.07
3	7.66	0.28	0.19	0.23	0.04	0.03	0.23	0.04	0.09	0.06
4	6.69	0.08	0.04	0.33	0.06	0.04	0.28	0.04	0.10	0.08
5	7.18	0.18	0.09	0.27	0.05	0.04	0.25	0.04	0.10	0.07
6	7.66	0.27	0.19	0.23	0.04	0.03	0.23	0.04	0.10	0.06
7	7.66	0.27	0.19	0.23	0.04	0.03	0.23	0.04	0.10	0.06

Se calculó la resiliencia sísmica para los escenarios presentados anteriormente, considerando distintos enfoques: a) considerando solo tiempos de reparación estructural (resiliencia simple), b1) considerando tiempos de demora con concursos de obra (resiliencia DT- concursos), b2) considerando tiempos de demora con asignación directa (resiliencia DT- directo), d) considerando tiempos de demora con concursos de obra y elementos no estructurales (resiliencia DT + NS – concursos) y e) considerando tiempos de demora con asignación directa y elementos no estructurales (resiliencia DT + NS – directo). Los resultados se muestran en la Fig. 20, en donde puede observarse que existe una diferencia significativa entre los valores de resiliencia obtenidos. Cuando se utiliza un enfoque simple, la resiliencia varía entre 95 y 100%. Por otro lado, al incorporar los tiempos de demora, la variación de resiliencia va del 90 al 97%. Finalmente, los enfoques más refinados que incorporan también los tiempos de reparación no estructural, producen valores de resiliencia del 82 al 96%, los cual difiere hasta un 13% en contraste con el enfoque simple.

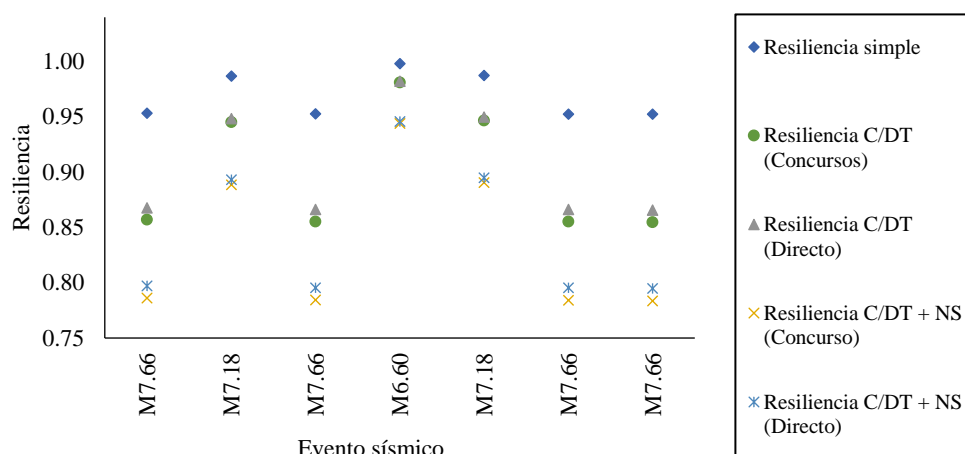
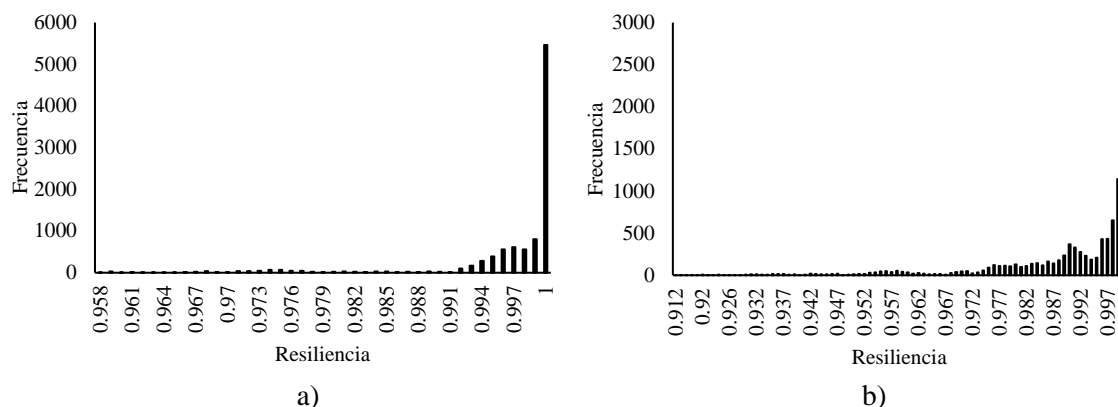


Figura 20. Valores de resiliencia estimados para distintos eventos y con distintos criterios para su cuantificación

Tal como se mencionó anteriormente, los tiempos de demora debido a la movilización pueden disminuirse al considerar una asignación de obra directa, lo cual, a su vez, puede lograrse con planes adecuados por parte de la administración correspondiente en colaboración con el sector privado de construcción. Esto sugiere que, poner énfasis en disminuir los tiempos de demora es un buen método para incrementar significativamente la resiliencia sísmica de infraestructura educativa en México.

Posteriormente, se cuantificó la resiliencia para toda la base de datos de escuelas, considerando tanto los tiempos de demora como la parte no estructural, con el fin de conocer la distribución del comportamiento esperado en términos de resiliencia ante eventos sísmicos fuertes. En la Fig. 21 se observa que dada la ocurrencia de un sismo hipotético de falla normal M6.69 en Puebla (Fig. 21a), se presentarían valores de resiliencia superiores a 99% en el 92.3% de los casos, con una media de 99.6%. Por otro lado, al presenciarse un evento telúrico intraplaca M7.18 se observan valores de resiliencia mínimos de 91%, con solo el 65% presentando valores superiores al 99% de resiliencia y una media del 98.8%. Finalmente, se encontró que, un sismo hipotético M7.66 intraplaca de falla normal provoca valores de resiliencia tan bajos como un 82%, con una media del 97%. Es importante señalar que, a pesar de haberse logrado cuantificar la resiliencia, es necesario contar con criterios adecuados para poder interpretar los valores obtenidos, lo cual es el objeto de estudio de la siguiente sección.



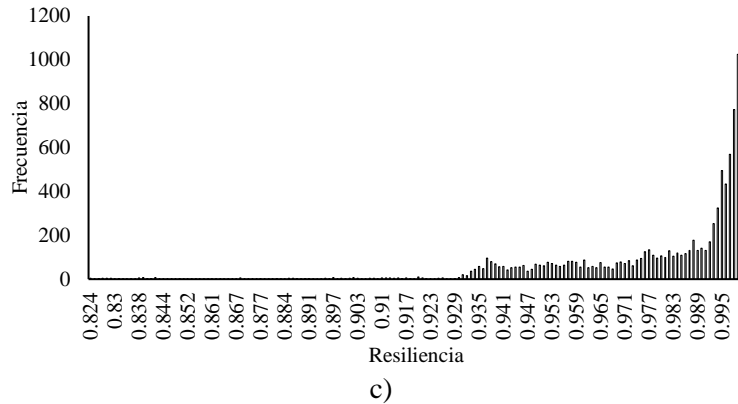


Figura 21. Histogramas de resiliencia para escuelas públicas en Puebla expuestas a sismos fuertes de magnitudes a) M6.69, b) M7.18, c) M7.66

Valores objetivo de RT , FL o Resiliencia

La definición de valores objetivo aceptables, es un concepto fundamental en el diseño sismo-resistente, con lo cual se pretende garantizar un comportamiento estructural predefinido. Desafortunadamente, en un contexto de diseño resiliente, existen pocas propuestas con límites aceptables, las cuales están, en su mayoría, basadas en criterios heurísticos, sin un respaldo analítico apropiado (Almufti y Willford, 2013, Gebelin *et al.*, 2017). Es por esto que, en esta investigación se propone establecer valores de tiempos, funcionalidad y resiliencia mínimos aceptables de acuerdo a una evaluación costo/beneficio, en donde se tomen en cuenta los costos que conlleva la inversión inicial de la construcción, así como las pérdidas directas e indirectas debido a la reparación (tanto estructural como no estructural) y a la inactividad.

La Ec. (7) permite calcular el factor costo/beneficio (C/B), en donde C_o es el costo inicial de construcción y L_D son las pérdidas económicas directas (reparaciones estructurales y no estructurales) y L_I son las pérdidas indirectas (pérdidas por inactividad).

$$C/B = \frac{C_o - L_D - L_I}{C_o} \quad (7)$$

Anteriormente, se estableció que, para los modelos de estimación de tiempos y funcionalidad aquí propuestos, se utiliza la demanda de ductilidad como parámetro de respuesta asociado al daño (lo cual es posible debido a la simplicidad de los marcos planos utilizados en esta investigación), por lo tanto, se deduce que, existe una estrecha relación entre: el daño (representado por medio de la ductilidad), las pérdidas, el factor C/B y los parámetros de resiliencia (tiempos y funcionalidad).

En la Fig. 22 se muestra la relación entre el factor C/B y los valores de μ , observándose que, para el grupo de estructuras bajo estudio, valores de μ aproximadamente menores a 1.6 están asociados a un factor C/B positivo, mientras que valores de μ mayores se relacionan con un C/B negativo. El cambio entre C/B positivo y negativo puede interpretarse como el valor mínimo aceptable ($C/B=0$), dado que representa una estructura con las características mínimas necesarias para soportar las consecuencias negativas de un sismo sin exhibir pérdidas económicas superiores a la inversión inicial de construcción. Al examinar este límite en términos de los parámetros de resiliencia, se encuentran tiempos de reparación y pérdida de funcionalidad máximos del 35% y 12% respectivamente (Fig. 9 y 13), lo cual provee un marco de referencia para tiempos de inactividad y valores de funcionalidad aceptables. Al mismo tiempo, el daño, reflejado por el valor de μ , permite estimar los parámetros de resiliencia restantes (tiempos de demora). Posteriormente, si se aplica la Ec. (1), con los valores aceptables de tiempo y funcionalidad previamente señalados, es posible definir un

valor mínimo aceptable de resiliencia, igual al 92%, el cual está asociado a resiliencia mínima desde el punto de vista económico. Es importante mencionar que el caso de estudio de la presente investigación involucra instituciones educativas públicas, por lo que la evaluación de las consecuencias económicas negativas por inactividad es difícil de abordar, por esta razón, se ponderaron los recursos no aprovechados. Cabe señalar que otro tipo de edificaciones con fines comerciales, tendrán repercusiones financieras por inactividad mucho más significativas, por lo que se esperaría que los límites mínimos de resiliencia aceptable se incrementasen en dicho caso.

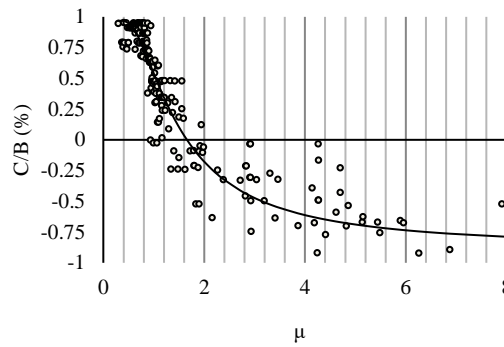


Figura 22. Factor C/B vs demanda de ductilidad

La Fig. 22 también muestra que, el factor C/B alcanza un máximo del 95% para un valor de $\mu=0.8$. Dicho valor máximo no llega al 100% en los casos presentados, debido a los daños en los elementos no estructurales y a los tiempos de inspección, los cuales son obligatorios en estructuras escolares, debido a su alta importancia. Al asociar el valor de μ a los parámetros de resiliencia, se encuentran valores de RT y FL iguales al 3% y 2.5% respectivamente, si aunado a esto se consideran elementos no estructurales, así como los tiempos de demora y se aplica la Ec. (1), se obtiene un valor de resiliencia del 99% el cual puede ser utilizado como un objetivo deseable de resiliencia, indicativo de estructuras capaces de soportar sismos fuertes y mantener una funcionalidad alta con un tiempo de inactividad mínimo.

La discusión anterior permite crear una clasificación para los valores de resiliencia, tiempos y funcionalidad aceptables, mostrada en la Tabla 5, lo cual es de gran utilidad para tener marcos de referencia en la cuantificación de la resiliencia y sus parámetros. Por ejemplo, algunos estudios (Cimellaro *et al.*, 2010; González *et al.*, 2018) han reportado valores de resiliencia variables entre 60 y 100%, sin embargo, no se había dado una interpretación clara de dichos valores.

Tabla 5. Clasificación de resiliencia, tiempo y funcionalidad para escuelas en México

Clasificación	Resiliencia (R)	Tiempo (RT)	Funcionalidad (F)
Alta	$R \geq 99\%$	$RT \leq 3\%$	$F \geq 97.5\%$
Media	$99\% > R > 92\%$	$3\% < RT < 35\%$	$97.5\% > F > 88\%$
Baja	$R \leq 92\%$	$RT \geq 35\%$	$F \leq 88\%$

Si se aplica la clasificación propuesta (Tabla 5) a los valores cuantificados de resiliencia para 7 escenarios críticos mostrados en la Tabla 4, se puede construir la Fig. 23, en donde las líneas horizontales marcan los límites de resiliencia propuestos. Es evidente que, al realizar simplificaciones en la cuantificación de la resiliencia (Resiliencia simple), se obtienen resultados cercanos a los valores óptimos de resiliencia del 99%, valores que disminuyen a medida que se va refinando el proceso de cuantificación, al incorporar tiempos de demora (Resiliencia C/DT) y finalmente al considerar adicionalmente la parte no estructural (Resiliencia $C/DT + NS$). Lo anterior permite señalar la importancia de seguir refinando las metodologías para

cuantificar la resiliencia, ya que las simplificaciones pueden llevar a importantes sobre estimaciones de este parámetro y, en el peor escenario, a comunidades mal preparadas ante eventos sísmicos.

Otro aspecto que es importante mencionar es el impacto que tienen los tiempos de demora en los valores de resiliencia, pues como se muestra en la Fig. 23, la resiliencia incrementa hasta un 3% cuando se considera un proceso de asignación directa en contraste con los procesos de concursos de obra, lo cual es significativo si se considera que es un 40% de lo necesario para pasar del límite inferior al superior de la resiliencia. Esto sugiere que el control de los tiempos de demora puede ser un punto clave para mitigar la pérdida de resiliencia.

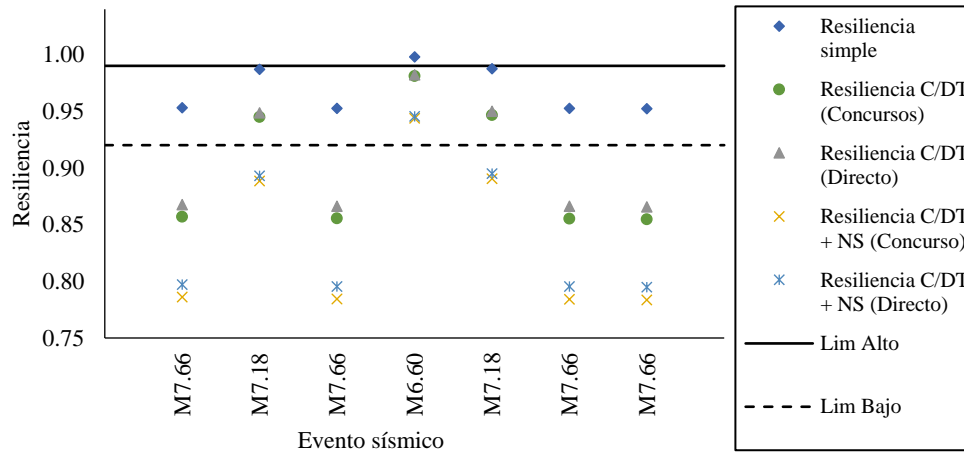


Figura 23. Clasificación de la resiliencia calculada de acuerdo con los objetivos propuestos

Finalmente, se presentan mapas de tiempo de recuperación (Fig. 24) de funcionalidad (Fig. 25) y de resiliencia esperada (Fig. 26) para todo un conjunto de escuelas públicas en Puebla, en donde se observa una codificación que obedece la propuesta de valores aceptables de la Tabla 4, en donde verde se refiere a un valor deseable, amarillo a un valor dentro de lo mínimo aceptable y rojo a un valor no aceptable. Cada parámetro de resiliencia se analizó bajo tres escenarios sísmicos de gran magnitud:

- Sismo intraplaca M6.69.
- Sismo intraplaca de falla normal M7.18.
- Sismo intraplaca M7.66.

El análisis de los tiempos de recuperación (Fig. 25) sugiere que en un escenario sísmico A, se tendría un RT promedio de 1.5%, el cual está en el rango deseable (Tabla 4), con afectaciones principalmente en la zona sur-oeste del estado, mientras que en un escenario B se observa una gran cantidad de estructuras con RT en el rango intermedio, presentándose un promedio de $RT=4.5\%$ y siendo la zona más afectada la sur-centro. Por otro lado, en el escenario C, se observa una media de 9.5%, el cual está en el rango intermedio de RT , sin embargo, se llegan a presentar tiempos de recuperación de hasta 64%, significativamente superiores al límite máximo aceptable de $RT=35\%$, con las zonas centro y sur-este presentado las mayores afectaciones.

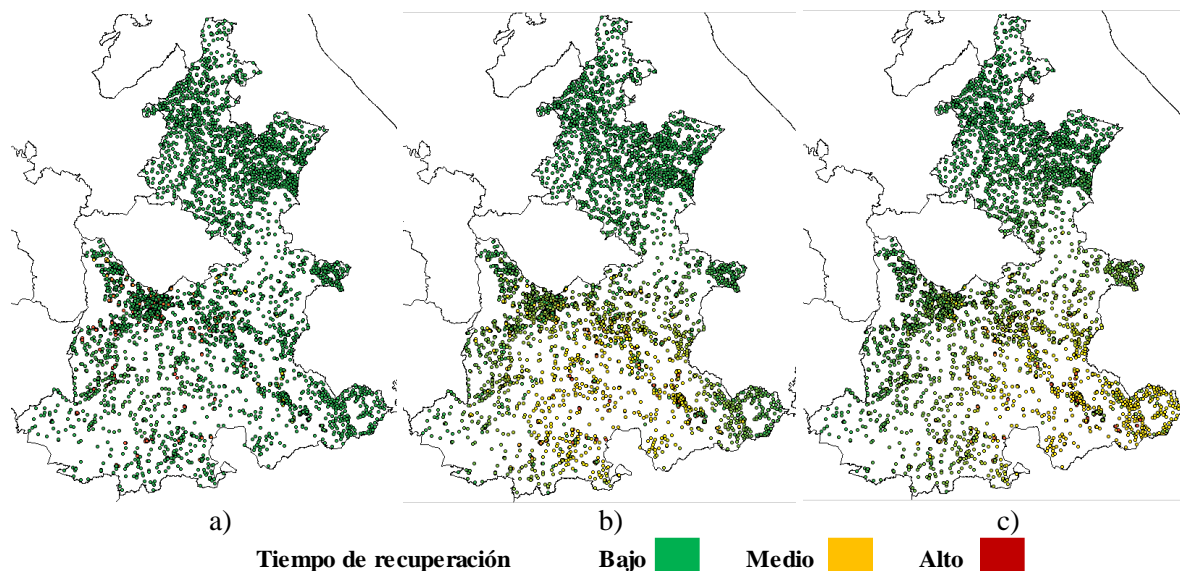


Figura 24. Mapas de tiempo de recuperación esperado para escuelas públicas en Puebla expuestas a sismos fuertes de magnitudes a) M6.69, b) M7.18, c) M7.66

El estudio en términos de funcionalidad (Fig. 25) proyecta resultados similares a los de *RT* (Fig. 24), en donde se observan valores medios de pérdida de funcionalidad iguales a 0.55%, 1.8% y 4.18% para los escenarios A, B y C, llegándose a presentar en todos los casos valores de *FL* superiores al límite permisible de la Tabla 4. Esto queda reflejado en los mapas de funcionalidad esperada en la Fig. 25.

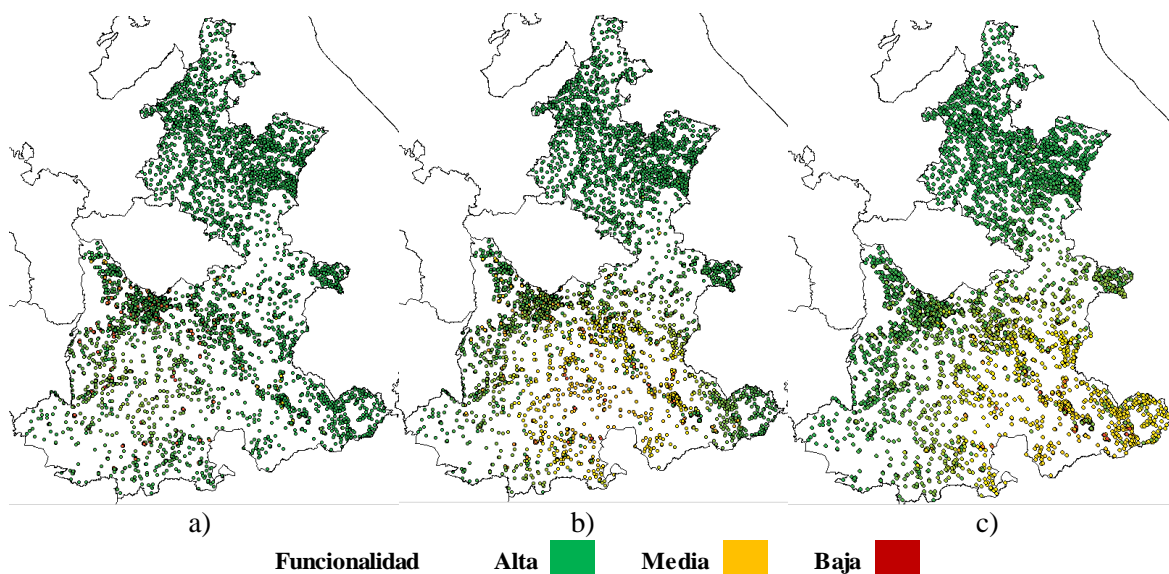


Figura 25. Mapas de pérdida de funcionalidad esperada para escuelas públicas en Puebla expuestas a sismos fuertes de magnitudes a) M6.69, b) M7.18, c) M7.66

Al analizar la resiliencia (Fig. 26), se encuentra que el escenario A afectaría a un 7.7% de las escuelas, siendo que el 92.3% de estas estructuras presentan valores de resiliencia alta (>99%). Por otro lado, el número de edificios con resiliencia alta disminuye a 65% cuando un sismo hipotético intraplaca M7.18 ocurre (escenario B), presentándose en este caso un 2.7% de estructuras con resiliencia baja. Por último, se

observó que un sismo hipotético M7.66 intraplaca de falla normal puede tener grandes efectos negativos, en términos de resiliencia, en escuelas públicas, ya que solo un 49% de dichas estructuras presentaron resiliencia alta, con un 37% presentando resiliencia media y un 14% resiliencia baja, lo cual podría potencialmente llevar a miles de estudiantes a quedarse sin instalaciones adecuadas por prolongados tiempos y en la peor instancia, comprometer la integridad de los alumnos.

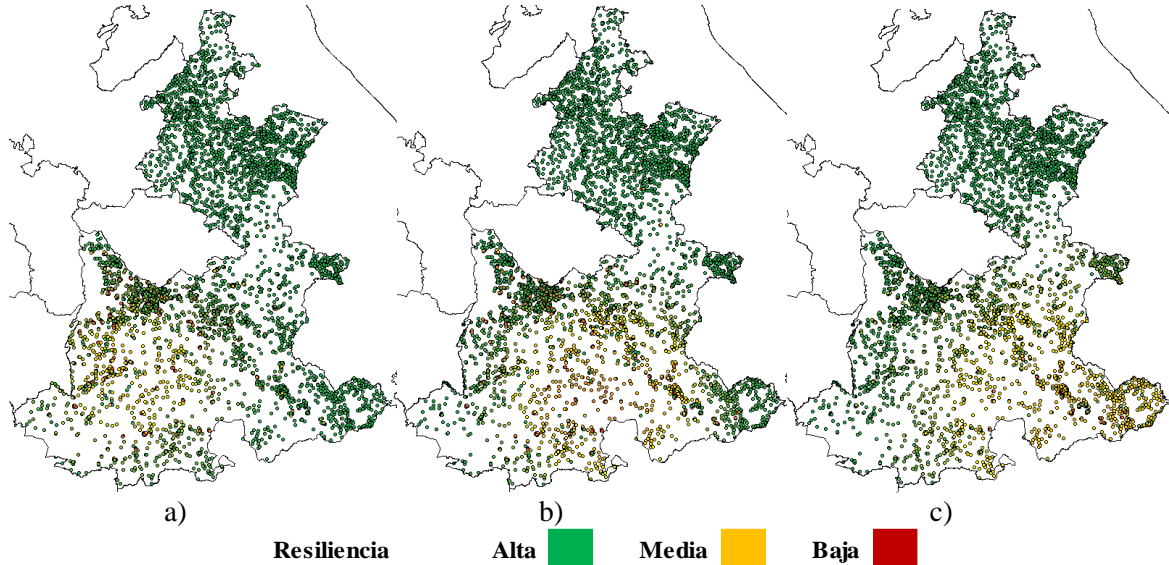


Figura 26. Mapas de resiliencia para escuelas públicas en Puebla expuestas a sismos fuertes de magnitudes a) M6.69, b) M7.18, c) M7.66

CONCLUSIONES

Esta investigación se enfoca en proponer una metodología para estimar resiliencia, a través de funciones de valores esperados de tiempo y funcionalidad, tomando en cuenta tiempos de demora y elementos no estructurales, resultando las siguientes conclusiones:

- Al llevar a cabo una comparación entre los valores de resiliencia calculados bajo distintos criterios, se concluye que, un enfoque simplificado para cuantificar la resiliencia no es confiable para la toma de decisiones, dado que puede llevar a sobreestimaciones importantes de este parámetro, siendo la alternativa de cuantificación de resiliencia la más refinada adecuada, pues los valores menores de resiliencia que resultan se encuentran más del lado de la seguridad.
- Una observación importante es que, el estudio de los tiempos de demora es de gran relevancia para la evaluación de la resiliencia, dado que la disminución de algunos de estos factores puede incrementar la resiliencia sísmica, tal como sucede cuando se controlan los tiempos de movilización al llevar a cabo una asignación de obra directa en vez de un proceso de concurso de obra.
- La definición de valores de objetivo de diseño y la propuesta de una clasificación de la resiliencia es un tema con pocos antecedentes en la literatura disponible, sin embargo, el método aquí presente sugiere que un análisis costo-beneficio es una buena herramienta para definir los valores viables de resiliencia, al menos desde el punto de vista económico. Particularmente, para edificios escolares, se propone un valor mínimo aceptable del 85% y un valor de resiliencia deseable del 99%.
- El análisis de resiliencia llevado a cabo en edificios escolares del Estado de Puebla deja en evidencia, desde el punto de vista de la resiliencia, que deben de tomarse medidas para preparar

mejor las estructuras ante eventos sísmicos, en conjunto con la preparación de planes de contingencia para disminuir los prolongados tiempos de inactividad posteriores a un sismo.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por la beca para realizar sus estudios de doctorado. Así mismo, también se agradece al CONACYT el apoyo por el patrocinio del proyecto A1-S-35223 “Definición de demandas sísmicas para el diseño de estructuras basado en riesgo y resiliencia” y a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, por el patrocinio del proyecto IN114421 “Efectos del intemperismo y de la interacción suelo estructura en el riesgo estructural sísmico” para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

Bruneau, M, S Chang, R Eguchi, G Lee, T O’Rourke, A Reinhorn, M Shinozuka, K Tierney, W Wallace y D Winterfeldt (2003), “A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities”. *Earthquake Spectra*, 733-752. DOI: [10.1193/1.1623497](https://doi.org/10.1193/1.1623497)

Bruneau, M y A Reinhorn (2007), “Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities”. *Earthq. Spectra* Vol 23, 41-62. DOI: [10.1193/1.2431396](https://doi.org/10.1193/1.2431396)

Cimellaro, G, A Reinhorn y M Bruneau (2010), “Framework for analytical quantification of disaster resilience”. *Engineering Structures*, 3639-3649. DOI: [10.1016/j.engstruct.2010.08.008](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.008)

Rojahn, C, L Johnson, T O’Rourke, V Cedillos, T McAllister y S McCabe (2019), “Increasing Community Resilience Through Improved Lifeline Infrastructure Performance”. *The Bridge*. pp. 34-42. PMID: 38495783; PMCID: PMC10941252.

Feng, K, N Wang, Q Li y P Lin (2017), “Measuring and enhancing resilience of building portfolios considering the functional interdependence among community sectors”. *Structural Safety*, Vol. 66, 118-126. DOI: [10.1016/j.strusafe.2017.02.006](https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.02.006)

Fontana, C, E Cianci y M Moscatelli (2020), “Assessing Seismic Resilience of School Educational Sector. An attempt to establish the initial conditions in Calabria Region, Southern Italy”, *International Journal of Disaster Risk Reduction*. DOI: [10.1016/j.ijdrr.2020.101936](https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101936)

Anwar, G, Y Dong y C Zhai (2019), “Performance-based probabilistic framework for seismic risk, resilience, and sustainability assessment of reinforced concrete structures”, *Advances in Structural Engineering*, 1-19. DOI: [10.1177/1369433219895363](https://doi.org/10.1177/1369433219895363)

Samadian, D, M Ghafory-Ashtiany, H Naderpour y M Eghbali (2020), “Seismic resilience evaluation based on vulnerability curves for existing and retrofitted typical RC school buildings”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. DOI: [10.1016/j.soildyn.2019.105844](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105844)

González, C, M Niño y M Jaimes (2020), “Event-based assessment of seismic resilience in Mexican school buildings”. *Bulletin of Earthquake Engineering*. DOI: [10.1007/s10518-020-00938-5](https://doi.org/10.1007/s10518-020-00938-5)

Gutiérrez, J y G Ayala (2022), “Análisis de la resiliencia sísmica de edificios”. *Ingeniería Sísmica* no. 107., DOI: [10.18867/ris.107.603](https://doi.org/10.18867/ris.107.603)

Almulti, I y M Willford (2013), “Resilience-based Earthquake Design Initiative for the Next Generation of Buildings”. Grupo Arup. DOI: [10.13140/RG.2.2.20267.75043](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20267.75043)

Mieler, M, B Stojadinovic, R Budnitz, M Comerio y S Mahin (2015), “A framework for linking community-resilience goals to specific performance targets for the built environment”. *Earthquake spectra*, Vol 31, pp. 1267-1283. DOI: [10.1193/082213EQS237](https://doi.org/10.1193/082213EQS237)

Hall, D y N Giglio (2016), “Architectural Graphic Standards 12th edition”. American Institute of Architects.

Yang, T, D Tung y Y Li (2018), “Equivalent Energy Design Procedure for Earthquake Resilient Fused Structures”, *Earthquake Spectra*, Vol 34, No 2. Pp. 1-21. DOI: [10.1193/122716EQS254M](https://doi.org/10.1193/122716EQS254M)

Tena-Colunga, A y H Nangulasmú-Hernández (2023), “Resilient seismic design of reinforced concrete framed buildings with metallic fuses including soil-structure interaction effects”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 164. DOI: [10.1016/j.soildyn.2022.107589](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107589)

Comerio, M (2006), “Estimating Downtime in Loss Modeling”. *Earthquake Spectra*, Vol. 22, 349-365. DOI: [10.1193/1.2191017](https://doi.org/10.1193/1.2191017)

Ghorawat, S (2011), “Rapid loss modeling of death and downtime caused by earthquake induced damage to structures”. Tesis de maestría. Texas A&M University.

Ortiz, D y E Reinoso (2020), “Tiempo de interrupción de negocios en la Ciudad de México por daños directos y efectos indirectos en edificios a causa del sismo del 19s de 2017”. *Revista de Ingeniería Sísmica* No. (104). DOI: [10.18867/ris.104.538](https://doi.org/10.18867/ris.104.538)

Alcocer, S, R Bautista y G Valencia (2019), “Desarrollo de capacidades nacionales para aumentar la resiliencia de edificios de concreto y mampostería con un enfoque de diseño por desempeño. Revisión de la literatura y del estado del arte de metodologías de evaluación post-sísmica”. Proyecto CONACyT-FORDECyT. Ciudad de México.

Wang, X, R Astroza, T Hutchinson, J Conte y R Bachman (2014), “Seismic demands on acceleration-sensitive nonstructural components using recorded building response data - case study”. *Proceedings of the 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. DOI: [10.4231/D3KP7TS06](https://doi.org/10.4231/D3KP7TS06)

Comerio, M (1998), “Disaster hits home, New policy for urban housing recovery”. California: University of California Press. ISBN: 9780520207806

Ibarra, L, R Medina y H Krawinkler (2005), “Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1489-1511. DOI: [10.1002/eqe.495](https://doi.org/10.1002/eqe.495)

Tanik, B, M Inel y E Ozer (2021), “Effect of Soil-Structure interaction on seismic behavior of mid- and low-rise builds”. *ASCE International Journal of Geomechanics*. DOI: [10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001944](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001944)

McKenna, F, S Mazzooni, M Scott y G Fenves (2009), “*Open system for earthquake engineering simulation*”. Pacific Earthquake Engineering Research Center.

FEMA-P-58 (2018), “Seismic performance assessment of buildings, Vol.1 Methodology”. Redwood City: Federal Emergency Management Agency. DOI: [10.4231/D3ZW18S8N](https://doi.org/10.4231/D3ZW18S8N)

Gobierno Ciudad de México, (2017), “Normas para la rehabilitación sísmica de edificios de concreto dañados por el sismo del 19 de septiembre de 2017”. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

Noyola, V, J Soca, M Aguilera y O Martínez (2016), “Infraestructura , Mobiliario y Materiales de Apoyo Educativo en las Escuelas Primarias ECEA 2014”. INEE. Ciudad de México. ISBN: 978-607-7675-92-1.

FEMA-P-58 (2018), “Seismic performance assessment of buildings, Vol.2 Implementation Guide”. Redwood City: Federal Emergency Management Agency. DOI: [10.4231/D3ZW18S8N](https://doi.org/10.4231/D3ZW18S8N)

INIFED; Estrategias y mecanismos de coordinación para la evaluación y validación de daños. SEP-INIFED, Ciudad de México, México, 2017.

Jaimes, M y M Niño (2017), “Cost-Benefit analysis to assess seismic mitigation options in Mexican public school buildings”. *Bull Earthquake Engineering*. DOI: [10.1007/s10518-017-0119-5](https://doi.org/10.1007/s10518-017-0119-5)

Cardona, O, M Ordaz, E Reinoso y L Yamín (2010), “CAPRA- Comprehensive approach to probabilistic risk assessment: International initiative for risk management effectiveness”. *Proceedings of the 14th European conference on earthquake engineering, Ohrid, Macedonia (2010)*.

Gebelin, J, M Barnard, H Burton, M Cochran, C Haselton, R McLellan y K Porter (2017), "Considerations for a framework of resilient structural design for earthquakes". SEAOC Convention Proceedings.

González, C, M Niño y M Jaimes (2018), “Estimación de la resiliencia sísmica en escuelas del sector público”. *Memorias del XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Campeche, México.