



INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM



alianza  
FiDEM<sup>AC</sup>  
innovación en infraestructura



OMIACE



Calidad y Sustentabilidad  
en la Edificación, A.C.  
CASEDI



ALENER  
Alianza por la Eficiencia Energética

FORO INTERNACIONAL

# EDIFICACIONES SUSTENTABLES Y LA NORMALIZACIÓN

11 de abril de 2019

Torre de Ingeniería – UNAM

## Panel 3: Resiliencia post-sismo de las edificaciones

### Situación en México: retos y oportunidades

A Gustavo Ayala Milián

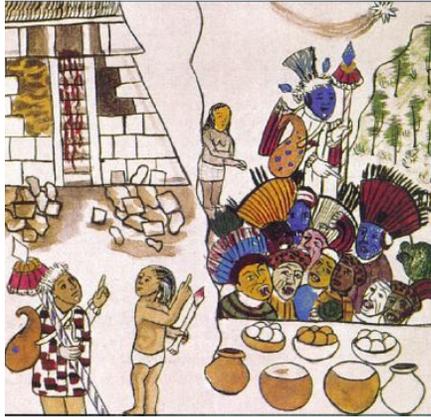
Profesor Investigador

Instituto de Ingeniería - UNAM

# Desastres hidrometeorológicos



# Desastres geofísicos



# Pérdidas Humanas

Evento/Localización	Año	M.	# de Muertos	Muertes/Mil. País	Muertes/Mil. Region
Michoacán/ ciudad de México	1985	8.1	40,000?		
Northridge/ Los Angeles, CA	1994	6.8	57	CA 1.8	14
Hanshin Awaji/Kobe, Japón	1995	7.2	5,500	47	3,600
Hur. Katrina/Nueva Orleans, Costa del Golfo	2005	---	1,970	Reg 1,640	N.O. 3,092
Wenchuan, China	2008	7.9	90,000	66	3,900
Port au Prince, Haiti	2010	7.0	316,000	32,250	100,000
Maule, Chile	2010	8.8	526	31	41
Christchurch, Nueva Zelanda	2011	6.3	184	46	74
Great Eastern/Tohoku, Japón	2011	9.0	19,000	148	3,300
Hur. Sandy/Nueva York, Nueva Jersey	2012	---	120	2 state 3	15
Morelos Axochiapan/México	2017	7.1	462		

**Muertes numerosas a pesar de existir buenos reglamentos**

# Pérdidas

Evento	Localización	% GDP	Pérdidas Estimadas
Great Eastern	Tohoku, Japón	1-4%	\$300,000 Mill
Hur. Katrina	Nueva Orleans/Golfo	0.1%	\$150,000 Mill
Wenchuan	China	1-3%	\$150,000 Mill
Hanshin Awaji	Kobe, Japón		\$89,000 Mill
Hur. Sandy	Nueva York/New Jersey		\$60,000+ Mill
Christchurch	Nueva Zelanda	20%	\$40,000 Mill
Maule	Chile	18%	\$30,000 Mill
Northridge	Los Angeles		\$26,000 Mill
Port au Prince	Haiti	100%	\$12,000 Mill
Michoacán	México	2.1-2.4%	\$11,500 Mill
Morelos Axo.	México		\$2,500 Mill

Pérdidas bajas  $\neq$  Velocidad de recuperación

# Recuperación

Evento/Localización	Año	Años est. de Recuperación
Michoacán/ ciudad de México	1985	
Northridge/ Los Angeles, CA	1994	<b>2-4</b>
Wenchuan, China	2008	<b>3-4</b>
Maule, Chile	2010	<b>4-5</b>
Hanshin Awaji/Kobe, Japón	1995	<b>7-10</b>
Hur. Katrina/New Orleans, Costa del Golfo	2005	<b>5-20</b>
Christchurch, Nueva Zelanda	2011	<b>10-20</b>
Great Eastern/Tohoku, Japón	2011	<b>10-20</b>
Hur. Sandy/Nueva York, Nueva Jersey	2012	<b>10-20</b>
Port au Prince, Haiti	2010	<b>Décadas</b>
Morelos Axochiapan/ciudad de México	2017	<b>???</b>

La velocidad de recuperación se ve disminuida por la interrupción de los sistemas urbanos complejos y la proporción del tipo de edificio

# Importancia de la Infraestructura

- Interdependencias
- Impacto
- **Resiliencia** de los sistemas



# Resiliencia la palabra de moda

---

- **Concepto amplio:**

La capacidad de las comunidades para sobrevivir, adaptarse y recuperarse de un evento catastrófico. Ahora importa el ESTRÉS que experimentan las personas.

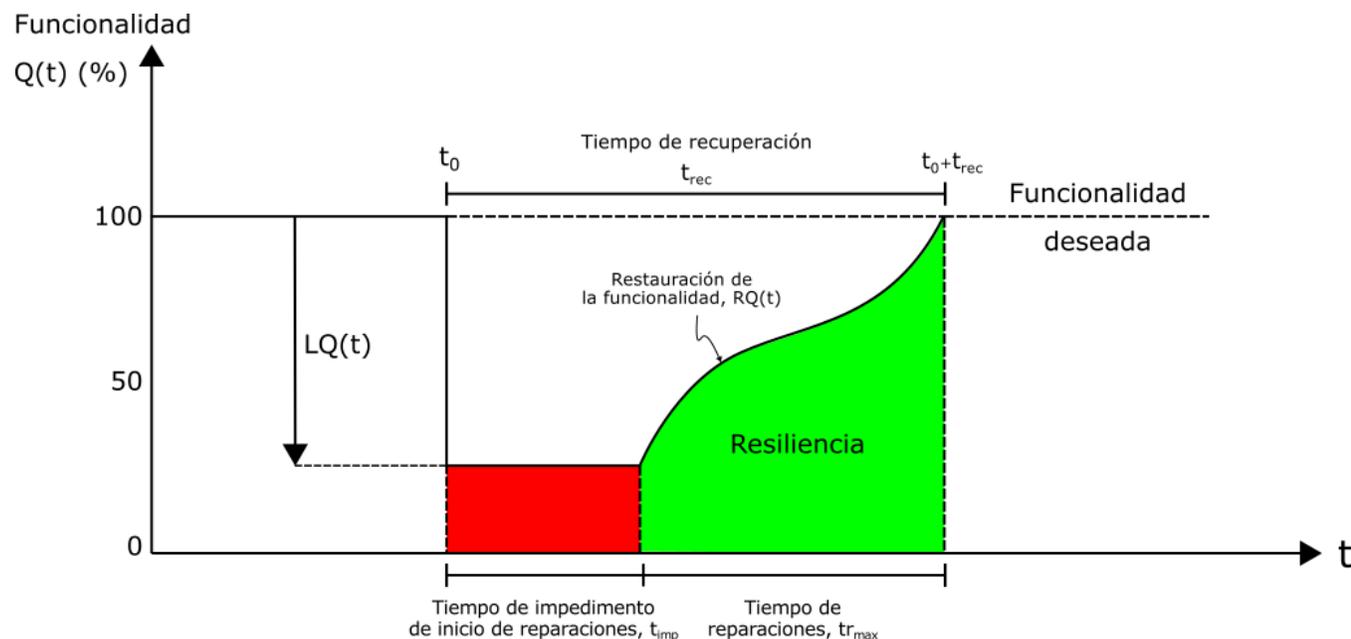
- **Palabra de moda:**

- Cada ciudad, cada gobierno, cada agencia gubernamental, cada académico(a) quiere que se le vea “haciendo algo sobre resiliencia”.

- **Componentes:**

- Investigación
- Políticas
- Implementación

# Comprendiendo resiliencia



**Vulnerabilidad:** Capacidad de un sistema a aceptar daño que produzca consecuencias desproporcionadas a ese daño.

**Robustez:** Habilidad de un sistema para soportar eventos destructivos, como los sismo, sin daño desproporcionado a la causa original.

**Resiliencia:** Habilidad de un sistema a recuperar su estado original de funcionalidad en el tiempo más corto posible y con un costo mínimo.

# Resiliencia estructural

---

- ▶ Tres palabras describen la **resiliencia estructural**: robustez, redundancia y recuperación. La capacidad de una estructura para absorber impactos desastrosos con retornos oportunos a la normalidad se conoce como **resiliencia estructural**.
- ▶ La resiliencia estructural considera las capacidades de la comunidad en relación con una preparación y movilización efectivas antes, durante y después de los eventos.
- ▶ Los desastres incluyen cualquier cosa que debilite la funcionalidad estructural por un período de tiempo.
- ▶ El diseño estructural, por otro lado, depende de la carga y no considera el tiempo de recuperación.
- ▶ En última instancia, la combinación de características de robustez, redundancia y recuperación satisfará los objetivos de la sociedad.

# Robustez

---

- ▶ Resistencia, o capacidad de los elementos, sistemas y otras medidas de análisis para soportar un nivel dado de demanda sin sufrir degradación o pérdida de funcionalidad.
- ▶ Un diseño robusto mejora la seguridad estructural y la resistencia al colapso contra condiciones de carga imprevistas y extremas.
- ▶ Un diseño robusto protege una estructura contra peligros como sismos al evaluar los indicadores de robustez y al diseñar para un colapso progresivo.

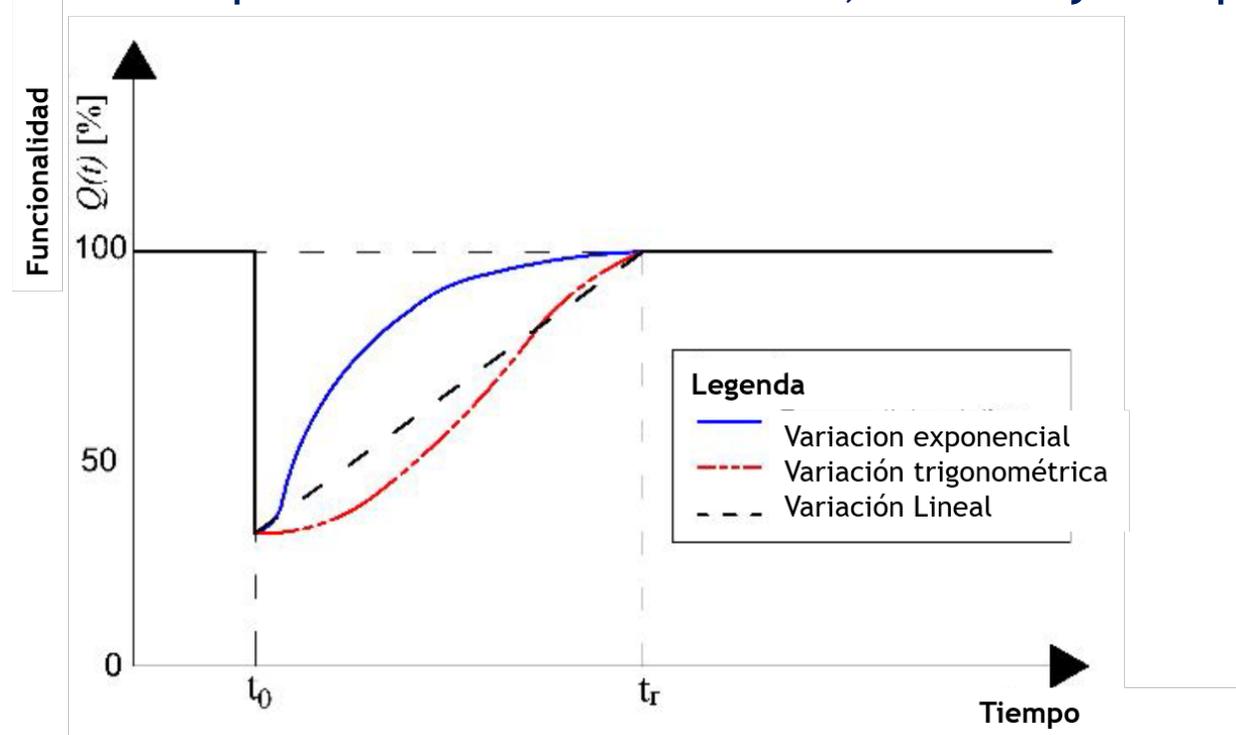
# Redundancia

---

- ▶ Se refiere a aquellos elementos o sistemas que pueden ser sustituibles, es decir, capaces de satisfacer los requisitos funcionales en caso de interrupción, degradación o pérdida de funcionalidad.
- ▶ Un diseño redundante agrega un sistema de respaldo para un funcionamiento sin problemas en caso de que los sistemas primarios estén comprometidos.
- ▶ Un diseño redundante puede ser costoso a nivel de edificio, pero puede ser apropiado para sistemas críticos dentro de la instalación.
- ▶ El logro de un diseño redundante requiere esfuerzos de planificación para identificar dónde la redundancia tiene más sentido que, por ejemplo, un enfoque de endurecimiento (robusto) o de tipo de recuperación.

# Recuperación

- ▶ No se trata solo del edificio. ¡Se trata de la gente!
- ▶ Al diseñar una estructura, es necesario considerar la preparación para emergencias contra un peligro al revisar todos los diseños de edificios para mejorar y facilitar las operaciones de evacuación, rescate y recuperación.



# Cómo alcanzar un sistema resiliente

---

La resiliencia sísmica de un sistema puede lograrse reduciendo su probabilidad de falla durante un sismo, así como reduciendo las consecuencias de tales fallas y el tiempo de recuperación.

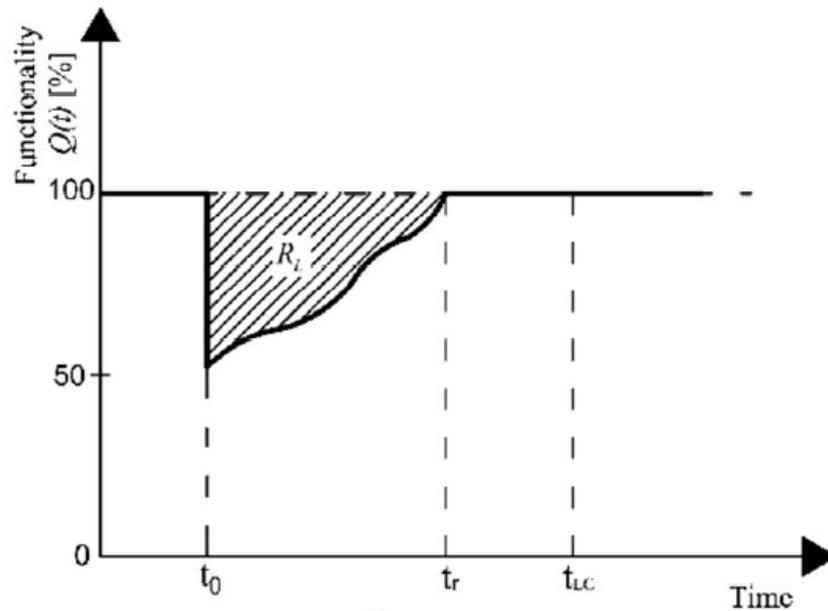
Un sistema resiliente es aquel que muestra:

1. Reducción de las probabilidades de falla,
2. Reducir las consecuencias de las fallas, en términos de vidas perdidas, daños y consecuencias económicas y sociales negativas.
3. Reducción del tiempo de recuperación (restauración de un sistema específico o conjunto de sistemas a su nivel "normal" de rendimiento funcional)

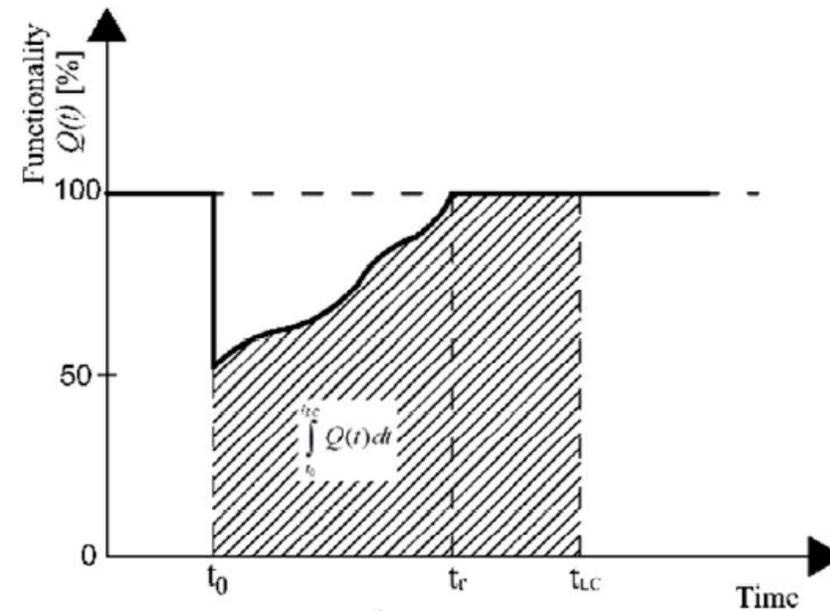
# Cómo calcular la resiliencia

$$R_L = \int_{t_0}^{t_r} [100 - Q(t)] dt$$

$$R = \frac{1}{t_{LC} - t_0} \int_{t_0}^{t_{LC}} Q(t) dt$$



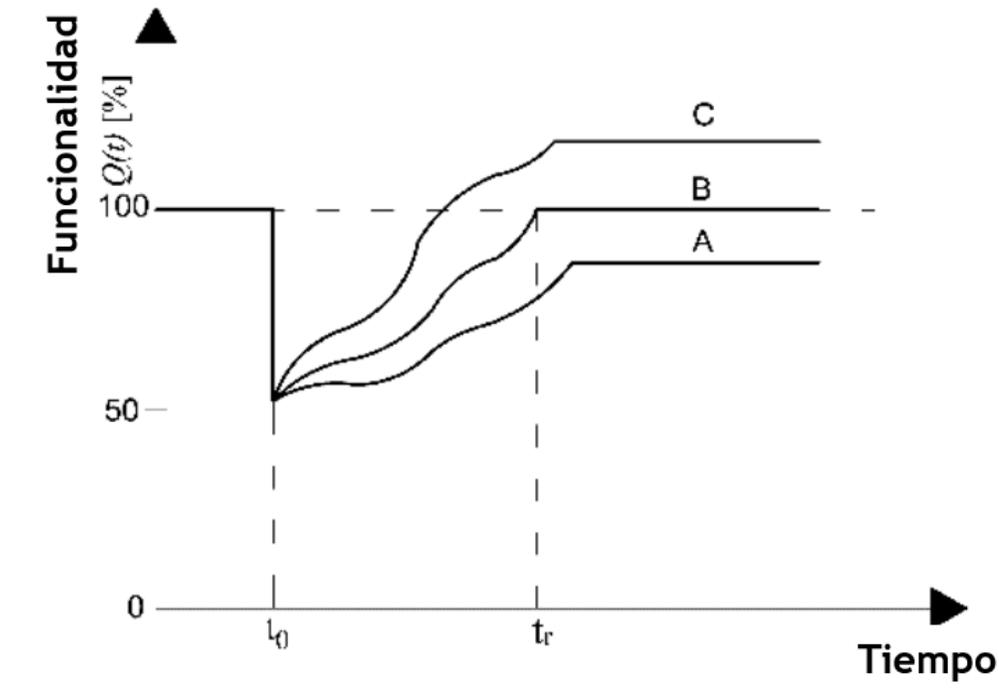
a.



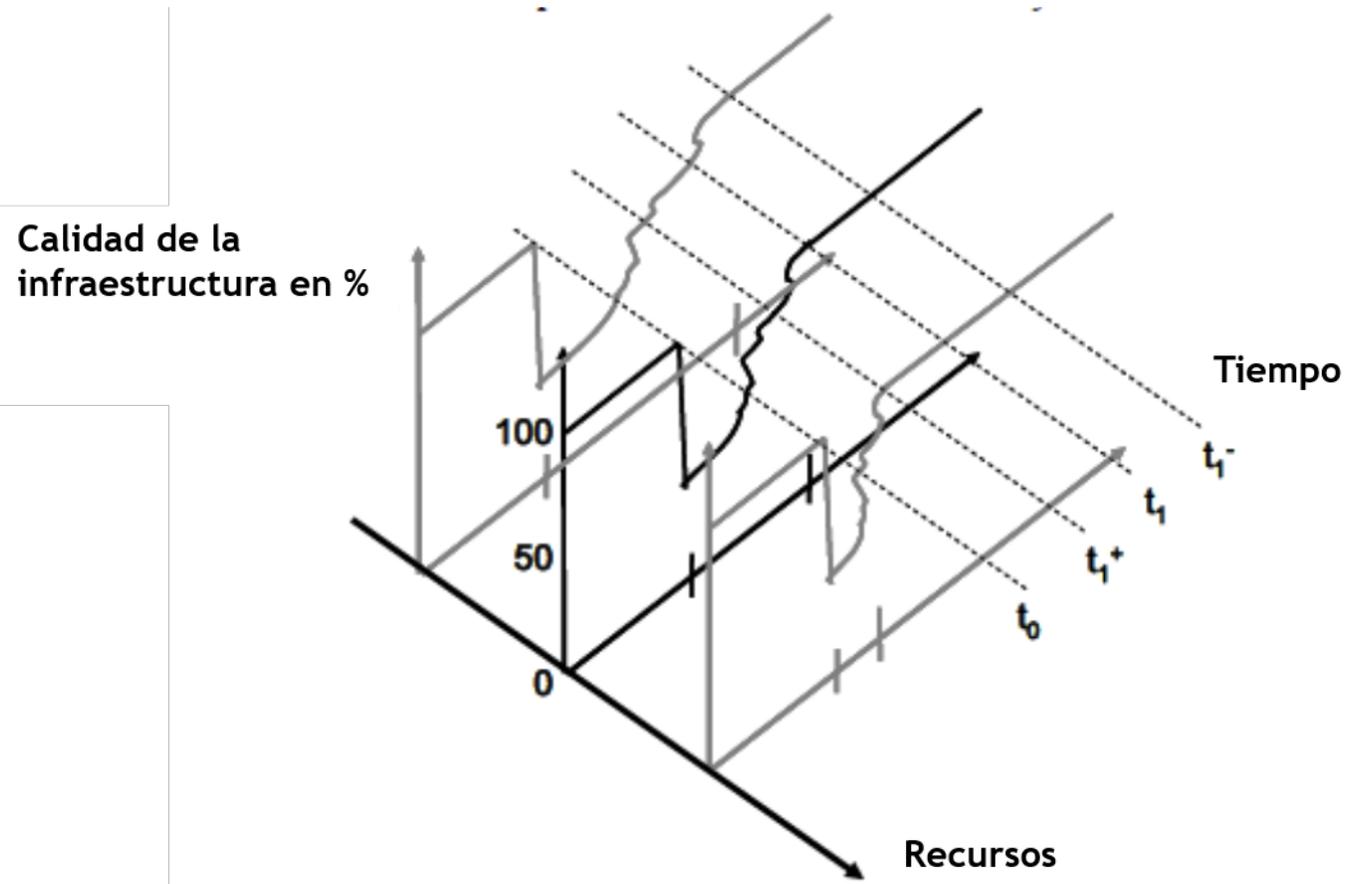
b.

# Beneficios de un sistema resiliente

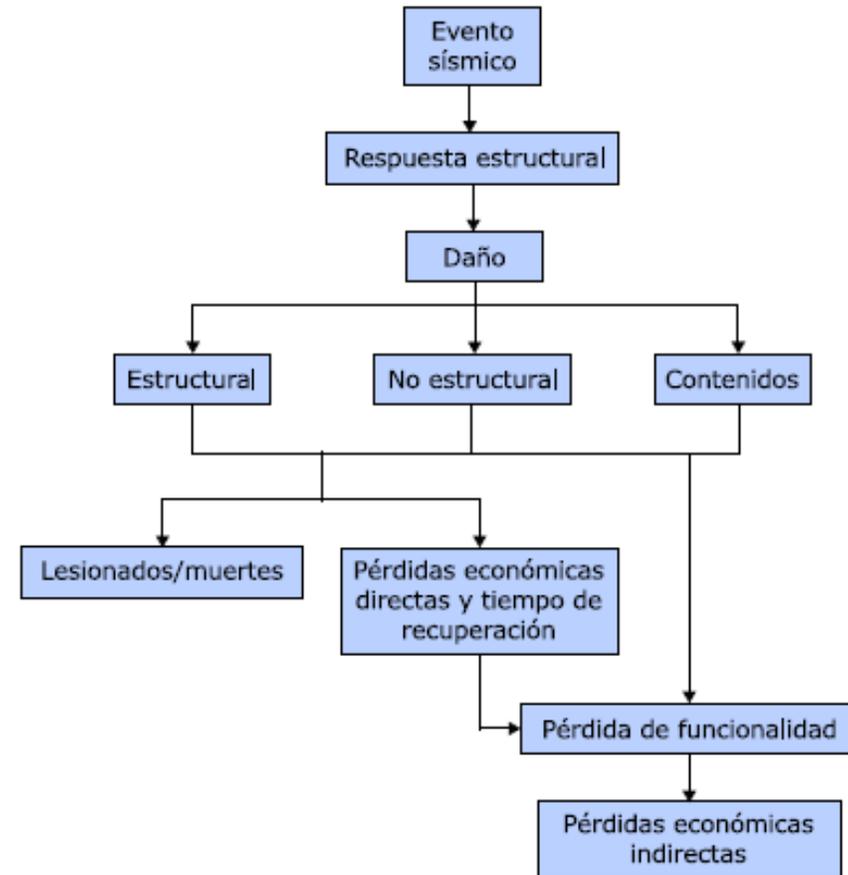
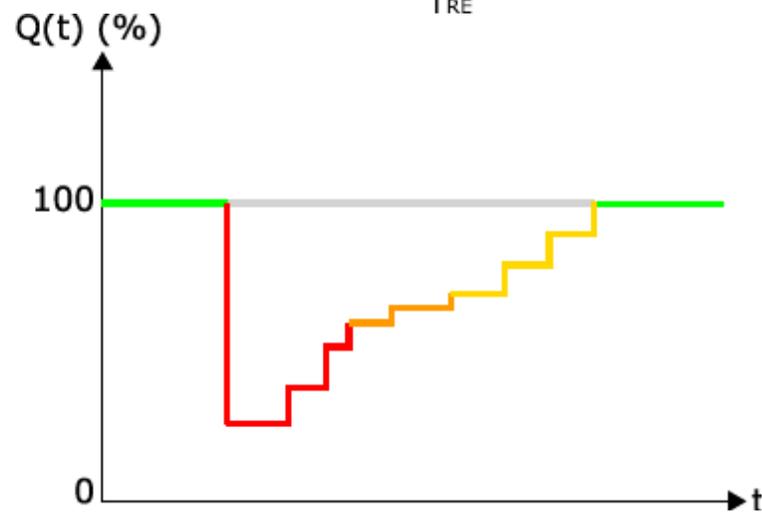
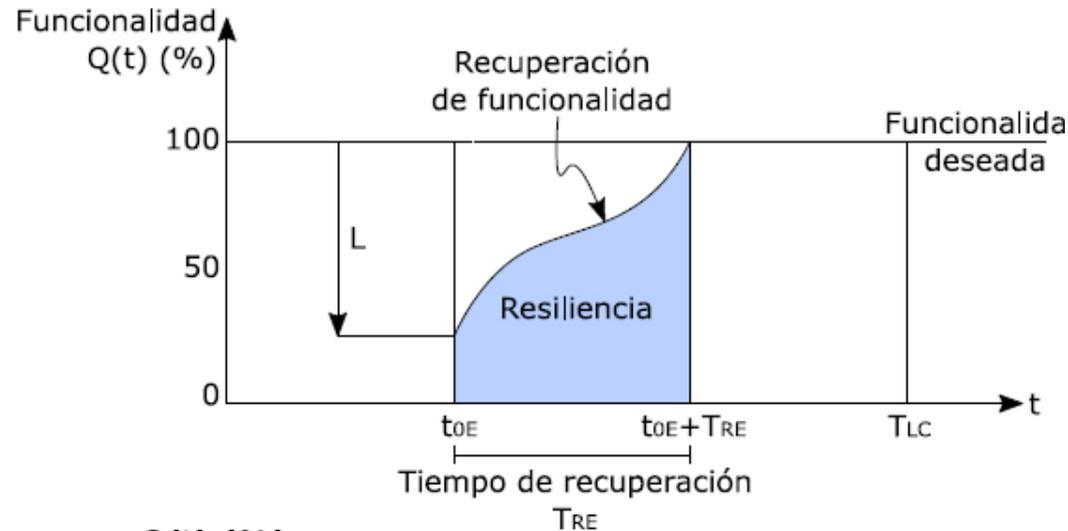
- ▶ La resiliencia sísmica es una característica estructural muy útil cuando se concibe un plan de prevención que puede aumentar la resiliencia del sistema estructural ante los eventos sísmicos.



# Recursos en la resiliencia



# Resiliencia en el marco de PBEE



# Resiliencia en el marco de PBEE

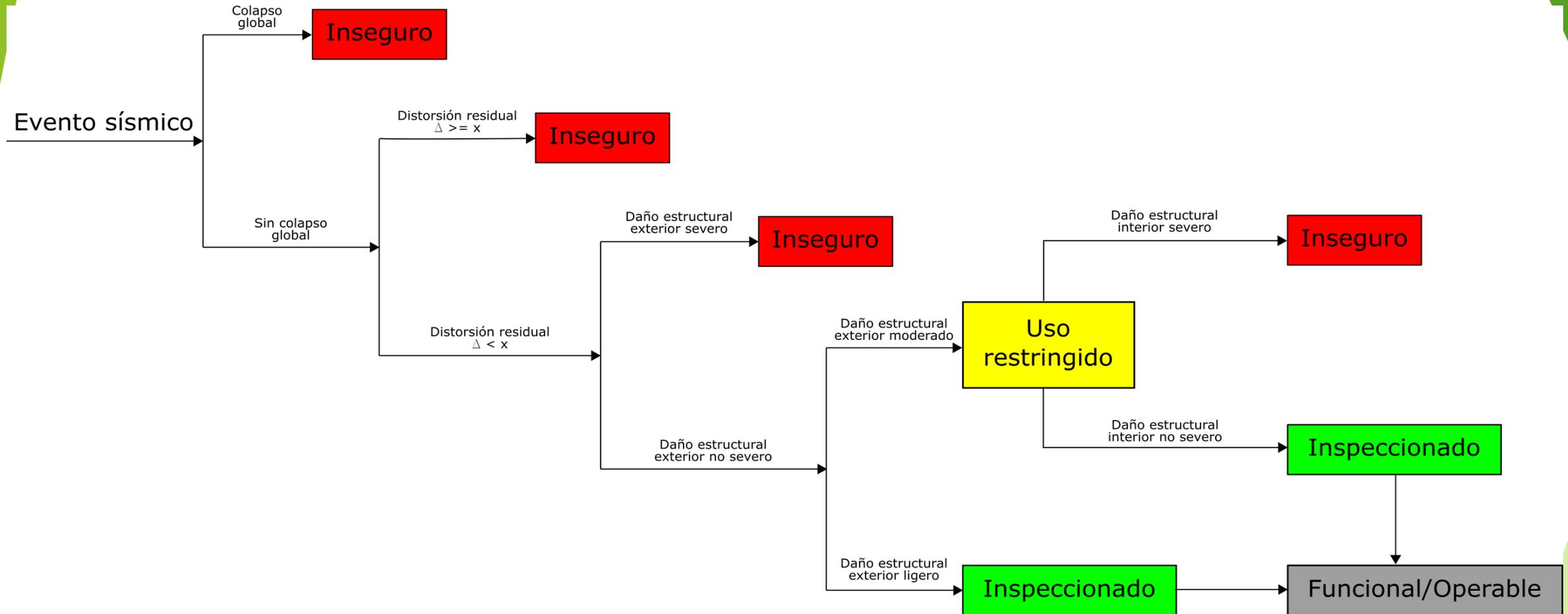
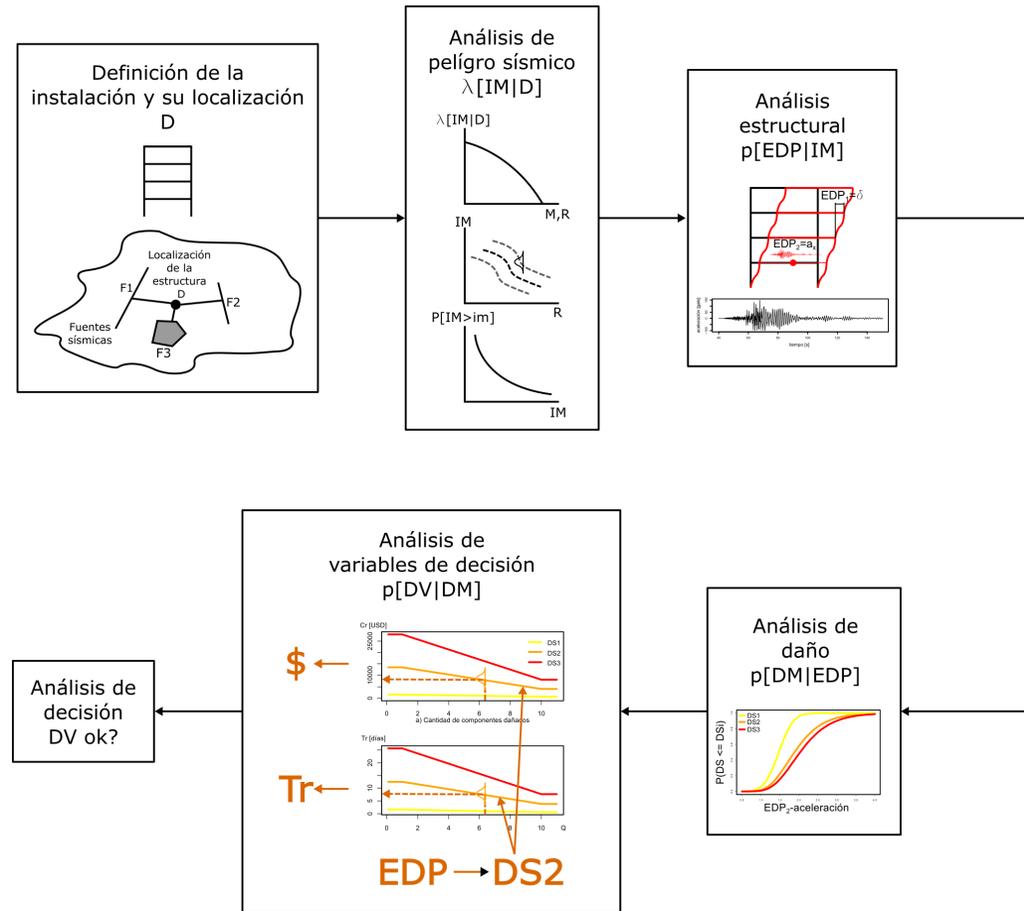


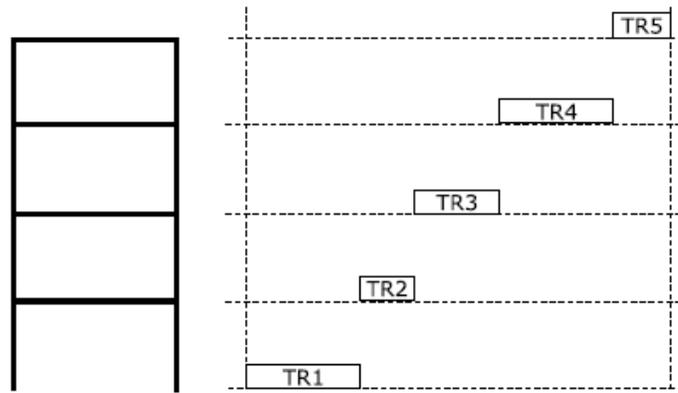
Diagrama de árbol para evaluar la seguridad de un edificio (ATC, 1985)

# Resiliencia en el marco de PBEE

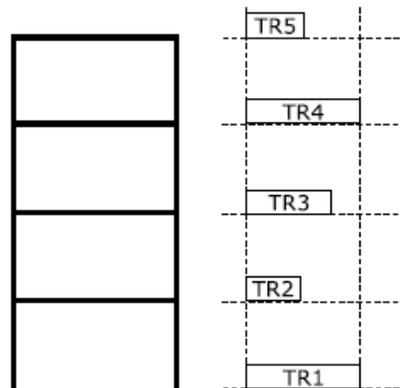


$$\lambda(DV > dv) = \int_{im} \int_{dm} \int_{edp} G(dv | dm) dG(dm | edp) dG(edp | im) | d\lambda(im) |$$

# Resiliencia en el marco de PBEE



a) en serie

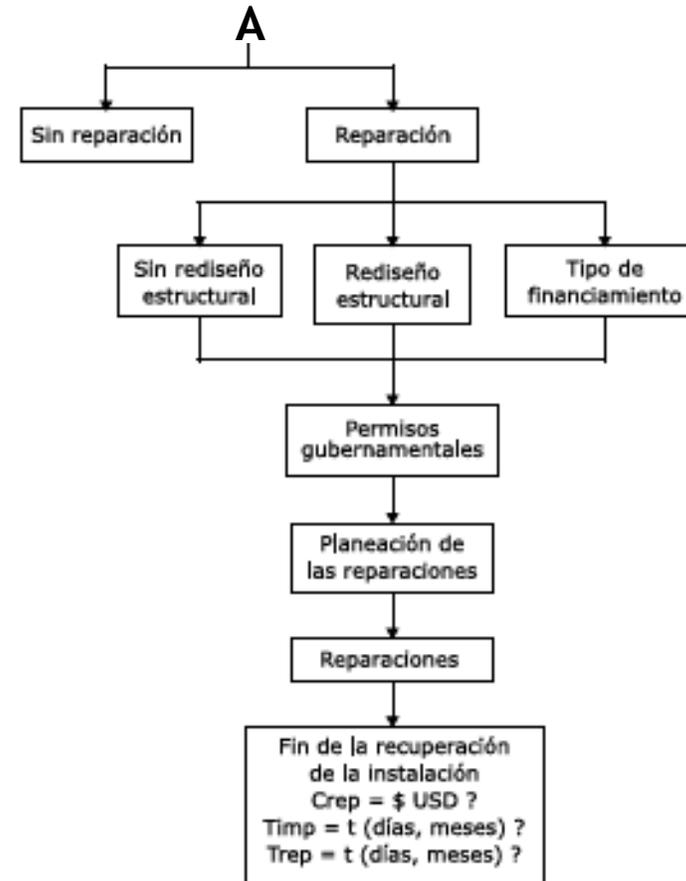


b) en paralelo

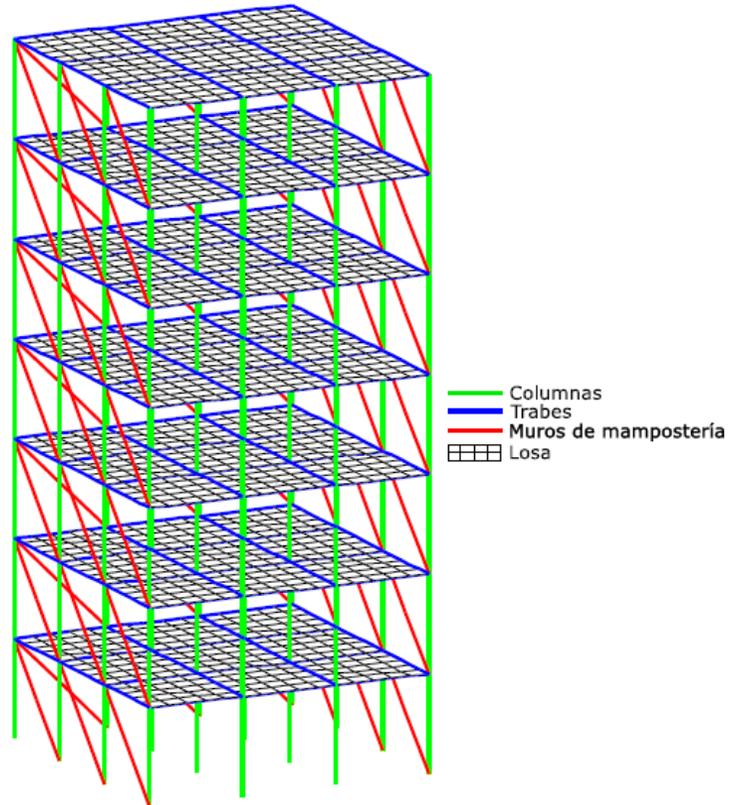
## LIMITACIONES:

- No considerará la pérdida ni recuperación de la funcionalidad.
- Programa PACT (FEMA P-58, 2012): el análisis generalmente se realiza mediante un planteamiento en 2D, lo cual limita el análisis de resultados y **no se perciben algunas variables que pueden ser importantes.**
- Al utilizar el mismo EDP para todo un conjunto de elementos (PG) da resultados: **1) conservadores y 2) están en contra del planteamiento probabilista.**
- **El tiempo de reparación de la secuencia de reparación en serie depende de un trabajador por grupo de desempeño.**
- **El tiempo de reparación de la secuencia de reparación en paralelo depende de un trabajador por elemento dañado por cada grupo de desempeño.**

# Procedimiento propuesto



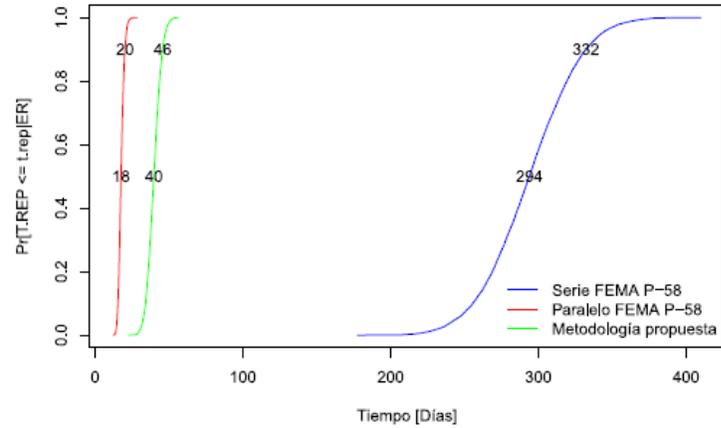
# Ejemplo de aplicación



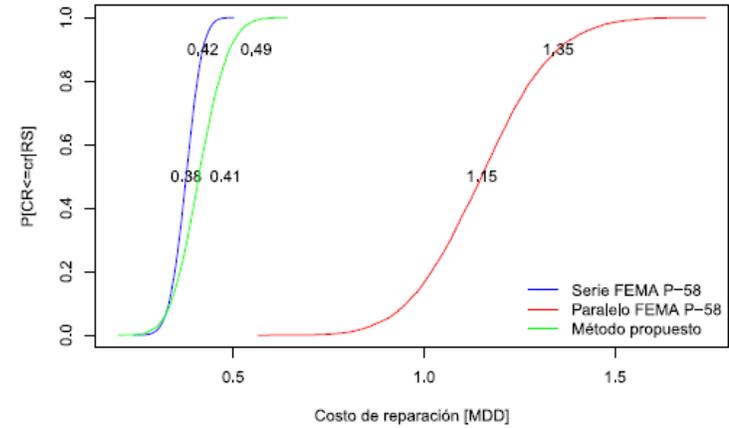
- Diseño estructural: NTC-Sismo 2004
- Localización del edificio: zona II del valle de la CDMX
- Factor de comportamiento sísmico  $Q = 2$
- Dimensiones: H entrepisos = 4m, L crujiás = 6.5 m
- Resistencia del concreto:  $f'c = 25$  MPa
- Módulo de elasticidad del concreto:  $E_c = 23,500$  MPa
- Esfuerzo de fluencia del acero:  $f_y = 410$  MPa
- Módulo de elasticidad del acero:  $E_s = 206,000$  MPa
- Resistencia de la mampostería  $f_m = 9$  MPa
- Módulo de elasticidad de la mampostería  $E_m = 4,850$  MPa
- Sobre carga muerta de losa  $w_d = 2,350$  Pa
- Carga viva reducida  $w_{rl} = 740$  Pa
- Dimensiones de columnas = 100 x 100 cm
- Ref. Long: 24 varillas del Núm. 10, Ref. Trans: Núm. 6 a cada 10 cm
- Dimensiones de trabes = 70 x 90 cm
- Ref. Long: 18 varillas del Núm. 10, Ref. Trans: Núm. 6 a cada 10 cm
- Espesor de cada losa: 15 cm
- Periodo fundamental del edificio  $T_1 = 0.61$  s

# Resultados

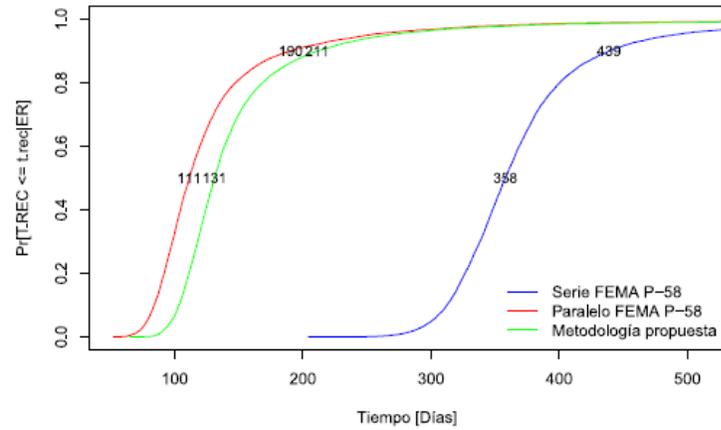
a) ECDF Tiempo de reparación



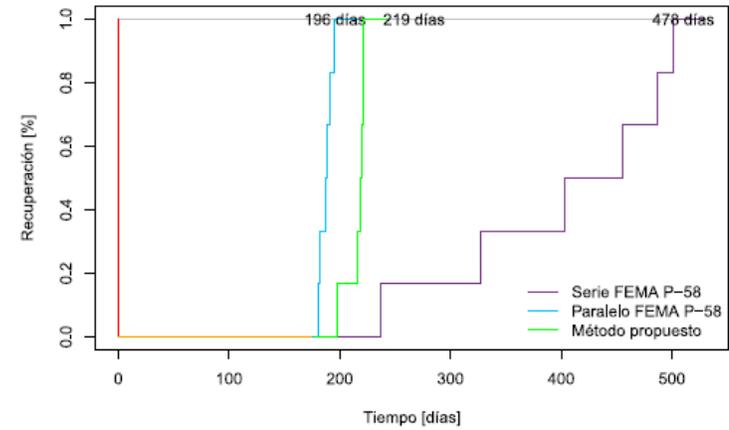
b) ECDF Costos de reparación



c) ECDF Tiempo de recuperación

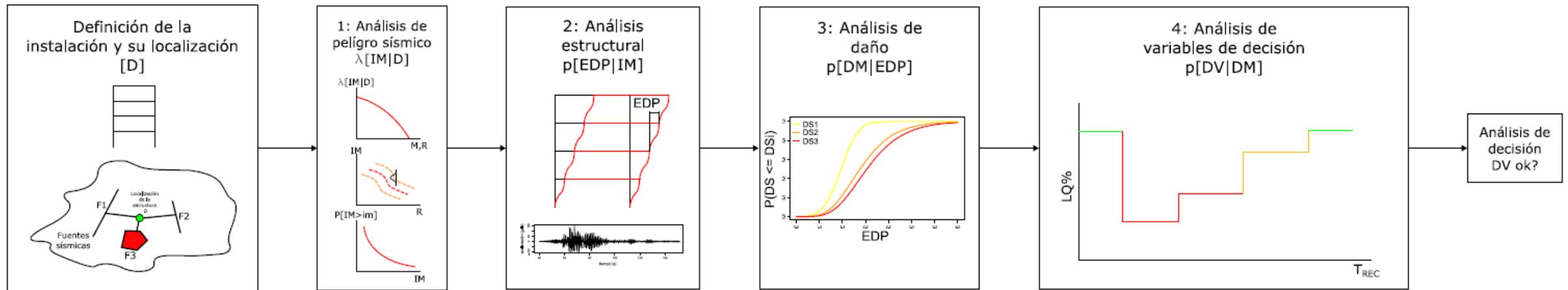


d) Curva de recuperación, Percentil 90,



# Pendiente de evaluar

## Esquema de evaluación del desempeño del PEER (2004):



# Preguntas a los ingenieros

---

---

¿Cómo evaluamos el desempeño de todo un edificio y diseñamos sistemas de infraestructura (tanto existentes como nuevos) para reducir significativamente las pérdidas a fin de simplificar y acortar el tiempo de recuperación?

¿Cómo modelamos las interdependencias en los sistemas para reflejar con precisión el rendimiento a largo plazo?

# Conclusiones

---

---

- La pérdida de funcionalidad es una propiedad intrínseca de las estructuras que pueden ser fácilmente afectadas ante eventos sísmicos de moderado a gran intensidad.
- Es posible evaluar la pérdida de funcionalidad como porcentaje del área dañada en plantas por unidad de tiempo.
- Es necesario identificar elementos estructurales susceptibles para experimentar daños y proponer refuerzo estructural para reducir la pérdida de funcionalidad/aumentar la resiliencia a eventos sísmicos.
- Es necesario planear estrategias de reparación y mitigación pre/pos la ocurrencia de eventos sísmicos

# Conclusiones

---

---

- Desarrollo de una metodología clara y robusta para estimar el costo y tiempo de reparación, y tiempo de los factores que impiden el inicio de las reparaciones en una estructura tipo edificio de concreto reforzado ante el daño que causa un evento sísmico.
- Las variables de decisión (tomando en cuenta que existe un ambiente de incertidumbre) pueden ser utilizadas por los tomadores de decisiones, i.e., dueños, aseguradoras, inversionistas, entre otros.
- Es posible aplicar la metodología a un conjunto de edificios y calcular la resiliencia global, i.e., diseñar un esquema de reparación global de una comunidad.
- Es posible realizar un estudio relacionado con la interacción entre dos o más edificios que se requiera ser reparados por una o varias empresas que realicen trabajos de reparaciones.
- Hay factores que afectan la resiliencia estructural y que no dependen de la toma de decisiones del dueño de la instalación, e.g., tiempo de los factores que impiden el inicio de las reparaciones.

# Recomendaciones

---

## Centrarse en los elementos esenciales de la resiliencia

### AMBIENTES FÍSICOS SEGUROS Y FUNCIONALES

- Operaciones de infraestructura e interdependencia
- Construir para reparabilidad
- Datos geotécnicos y de riesgos incorporados en la planificación del uso del suelo

### EQUIDAD SOCIAL RESPONSABILIDAD Y ECOLÓGICA

- Servir a toda la comunidad todos los días y estar preparado para limitar las pérdidas en futuros desastres

### POLÍTICA E IMPLEMENTACIÓN

- Necesita nuestro aporte para adoptarla.

# Gracias

---

---

