

# Evaluación basada en prestaciones

según el PEER / FEMA-P-58-1

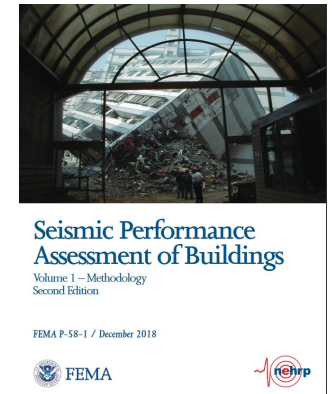
# Resumen

Los terremotos acontecidos en los 90 en Japón y Estados Unidos pusieron de manifiesto que las metodologías sismorresistentes basadas en dotar de resistencia lateral eran capaces de evitar colapsos, pero los cuantiosos daños produjeron importantes disfunciones en los edificios y dispararon los costes de reparación. Desde entonces se han impuesto las metodologías basadas en prestaciones, cuyo objetivo es predecir y cuantificar explícitamente el comportamiento de todos los sistemas del edificio en varios escenarios de riesgo sísmico. En esta ponencia se expone un caso de estudio siguiendo una de las metodologías de evaluación de prestaciones más sólidas de la actualidad, el FEMA-P-58-1. Se incide en los fundamentos y aspectos clave de la metodología para modelar los sistemas de los edificios, evaluar la probabilidad de alcanzar ciertos niveles de daños o costes de reparación, y desarrollar curvas de fragilidad.

# Temas a tratar

FEMA P-58-1 Una metodología para evaluar las probables prestaciones sísmicas de edificios teniendo en cuenta su emplazamiento y características estructurales, no estructurales, y su ocupación.

- Antecedentes
- La filosofía de la seguridad
- Los daños en elementos no estructurales
- Algún concepto de probabilidad y estadística.
- Curvas de fragilidad.



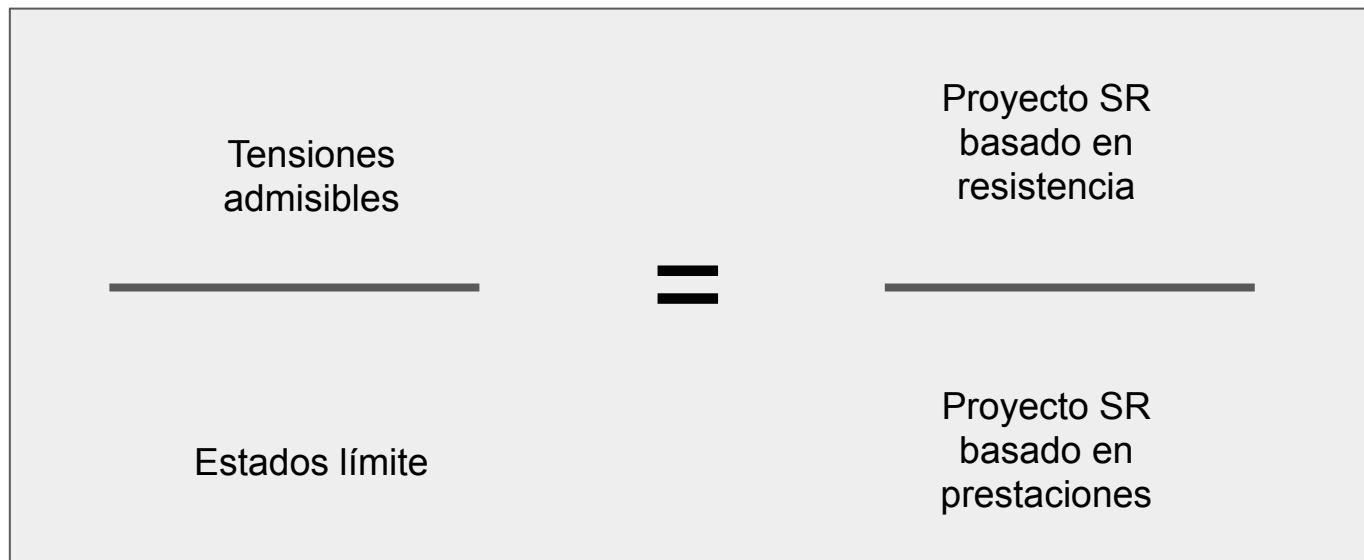
FEMA, P. (2012). Seismic performance assessment of buildings. *Implementation Guide*." *Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, CA, USA*.

<https://www.fema.gov/es/media-library/assets/documents/90380>

# Antecedentes: el método de los estados límite

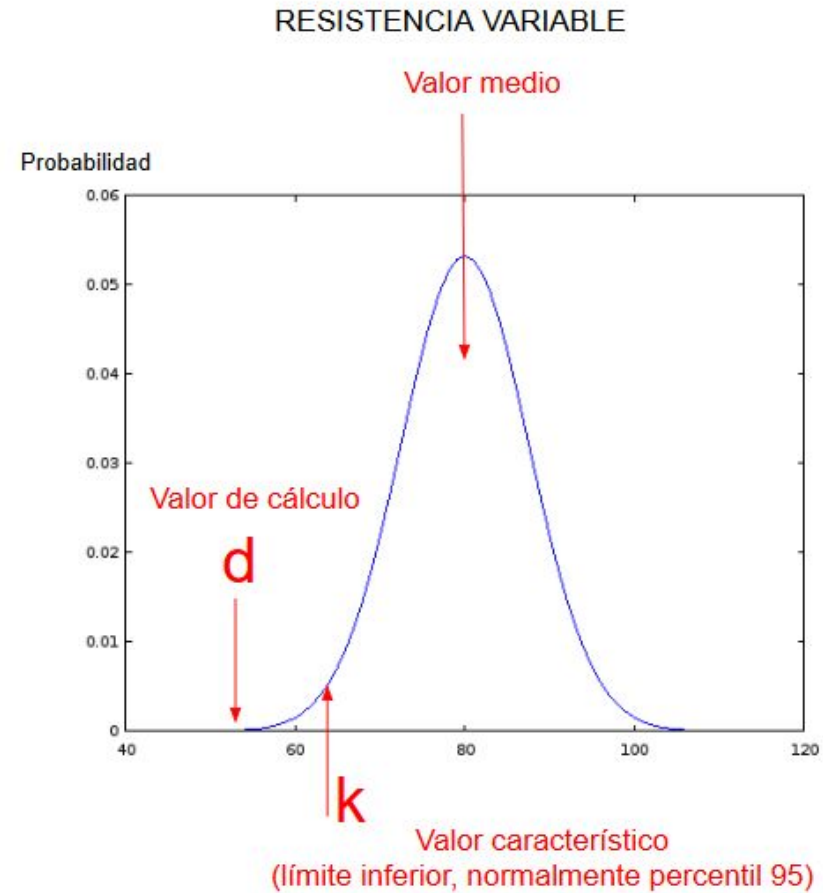
El precedente era el método de las tensiones admisibles (ASD Allowable stress design), que es muy intuitivo, pero:

- Solo tiene un objetivo (no es multi-objetivo)
- No todo es la resistencia.
- Aparecer otros fenómenos durante la vida útil del material: fisuración, vibraciones, deformaciones, fatiga, fluencia, reología, creep.



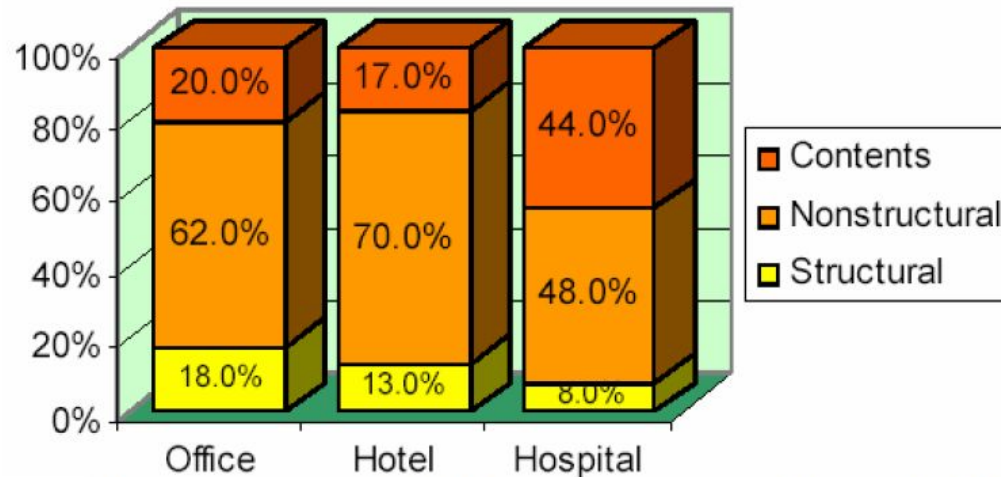
# Antecedentes: el método de los estados límite

- Son un paradigma de la seguridad estructural (LSD Limit State Design - LRFD Load and Resistance factor design)
- Las bases científicas fueron sentadas por Streletzki, 1947. Su estudio estadístico del factor de seguridad estructural se introdujo en el código ruso en 1955 y sigue vigente.
- La filosofía de los Estados Límite se basa en un concepto estadístico de la seguridad y la probabilidad de fallo.
- Aplica métodos estadísticos a las variaciones de las acciones y las propiedades de los materiales
- y están relacionados con la variabilidad.



# Un imprevisto del proyecto SR basado en resistencia: los daños sísmicos en elementos no estructurales

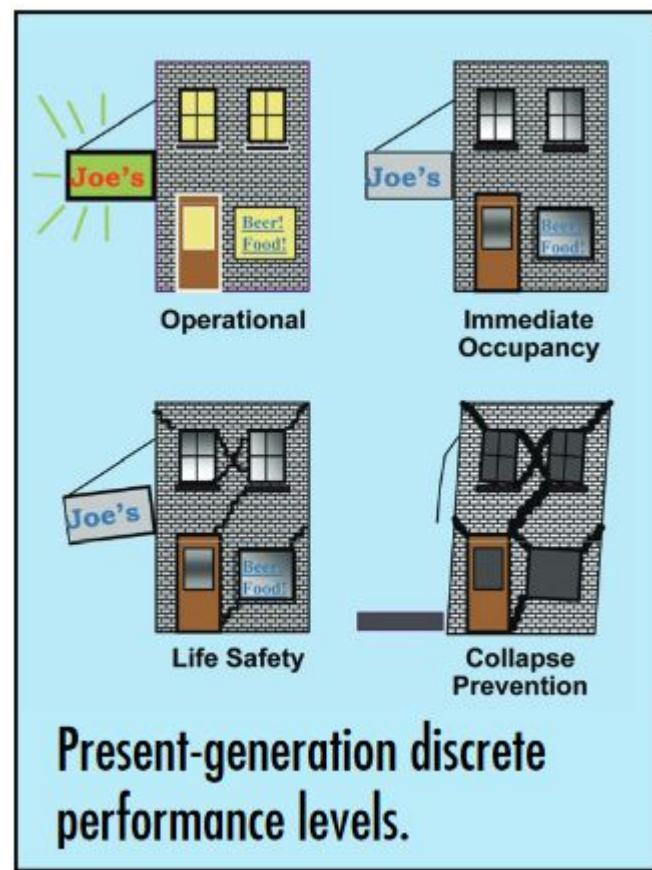
- Los ENE son todo excepto: pilares, vigas, forjados.
- Hay una dicotomía en el tratamiento que damos a los elementos no estructurales
- La importancia de los daños en ENE: su coste



*Investments in building construction (Miranda 2003)*

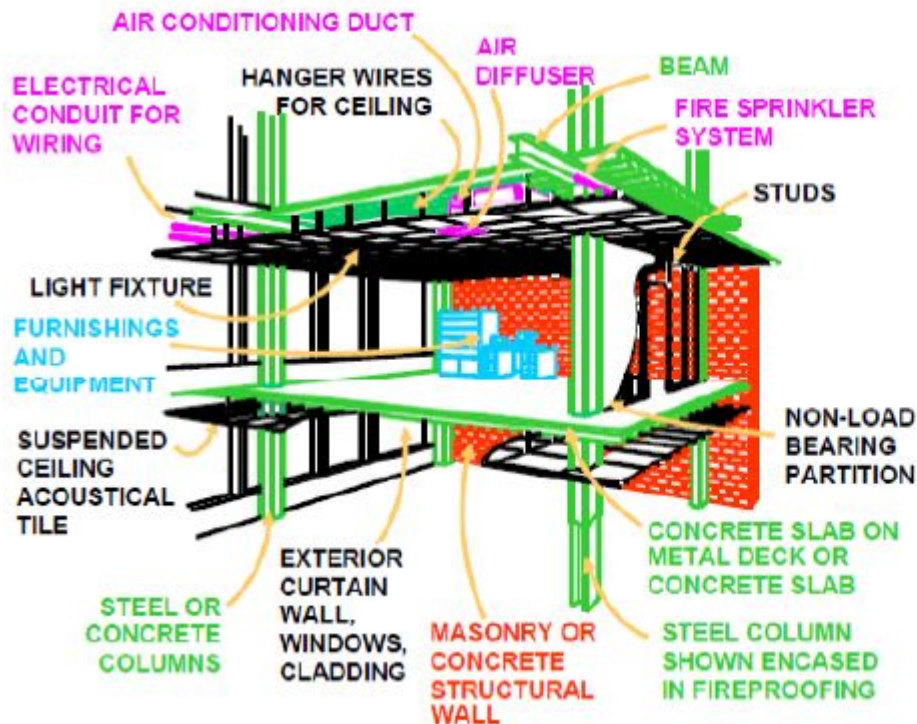
# Los daños sísmicos en elementos no estructurales

- Algunos Elementos No Estructurales (ENE): Cerramientos, tabiquería, techos, ventanas, ventanas, ordenadores, equipamiento de oficina, estanterías, archivos, calefacción, ventilación, climatización, cuadros eléctricos, tuberías, luminarias, rociadores de incendios, contenidos, cubiertas, ornamentación, muros cortina, fachadas ventiladas, petos, chimeneas, ascensores, paneles solares, servidores informáticos, máquinas de vending.
- (FEMA-E-74)



# Los daños sísmicos en elementos no estructurales

- Pueden impedir la evacuación
- Pueden impedir el uso del edificio
- Pueden disparar los costes de reparación
- Los ENE interactúan entre ellos



I. Movimiento de tierras	1,5%
II. Cimentación	5%
III. Estructura	20%
IV. Albañilería	15%
V. Cubierta	10%
VI. Saneamiento horizontal	2%
VII. Solados, revestimientos y alicatados	20%
VIII. Carpintería y cerrajería	8%
IX. Instalaciones de electricidad	4%
X. Instalaciones de fontanería y saneamiento	3%
XI. Griferías y sanitarios	3,5%
XII. Instalaciones especiales	4%
XIII. Vidrios	1%
XIV. Pinturas	3%

**Architectural Components**  
**Building Utility Systems**  
**Building Contents**  
**Structural Components**

Source: FEMA 74



# Los daños sísmicos en elementos no estructurales



Nisqually, 2001  
1-4 G\$

# Los daños sísmicos en elementos no estructurales

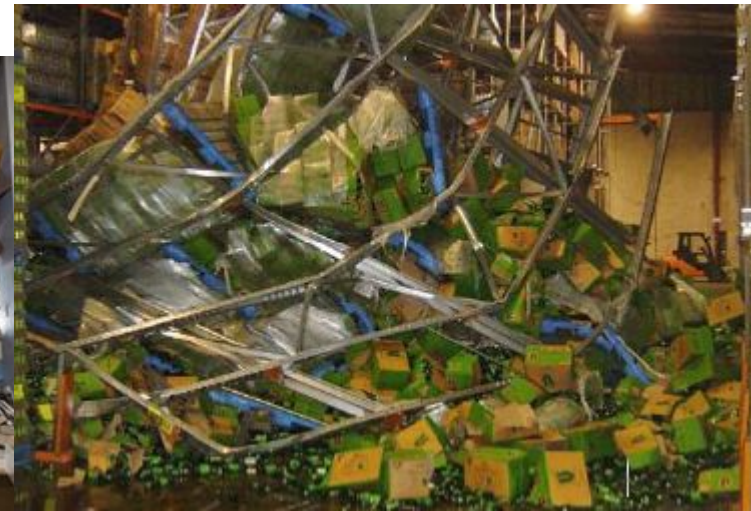




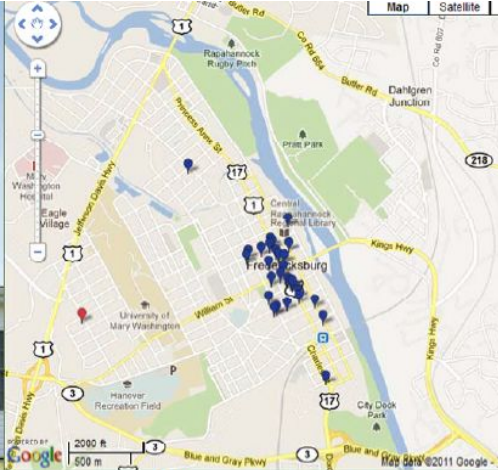
# Los daños sísmicos en elementos no estructurales



Fotografías: FEMA E-74



# Los daños sísmicos en elementos no estructurales



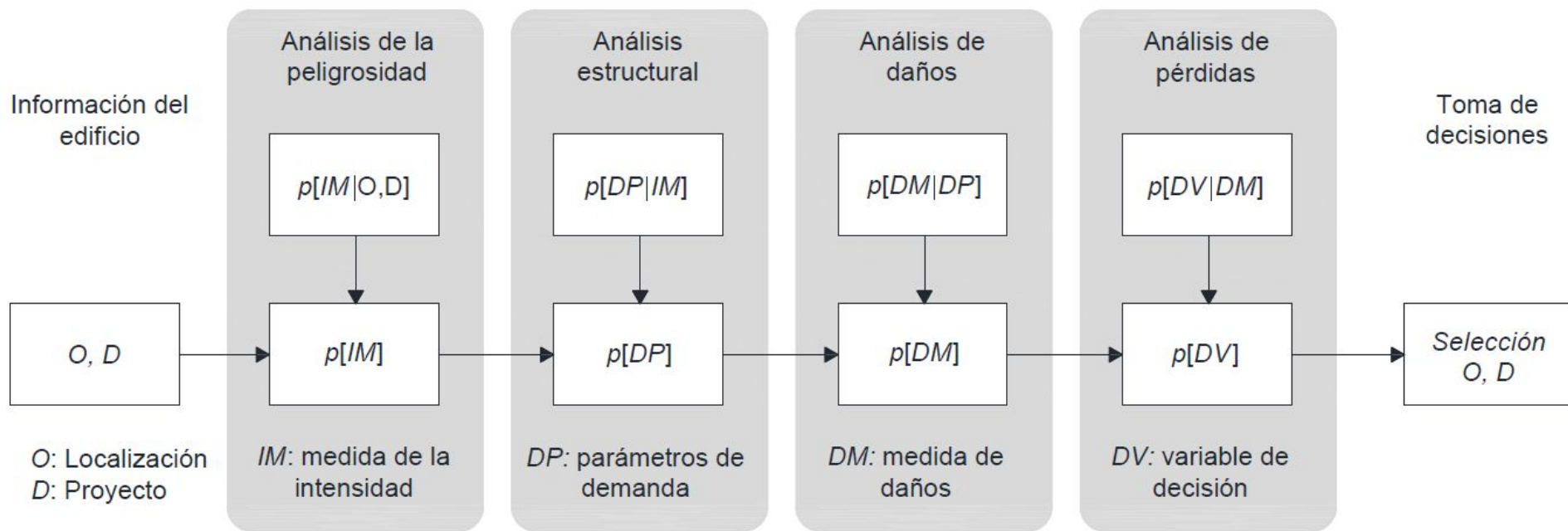
Source: EERI Clearinghouse  
Fotografías: FEMA E-74

Chimney damage in Fredericksburg  
Source: EERI Clearinghouse



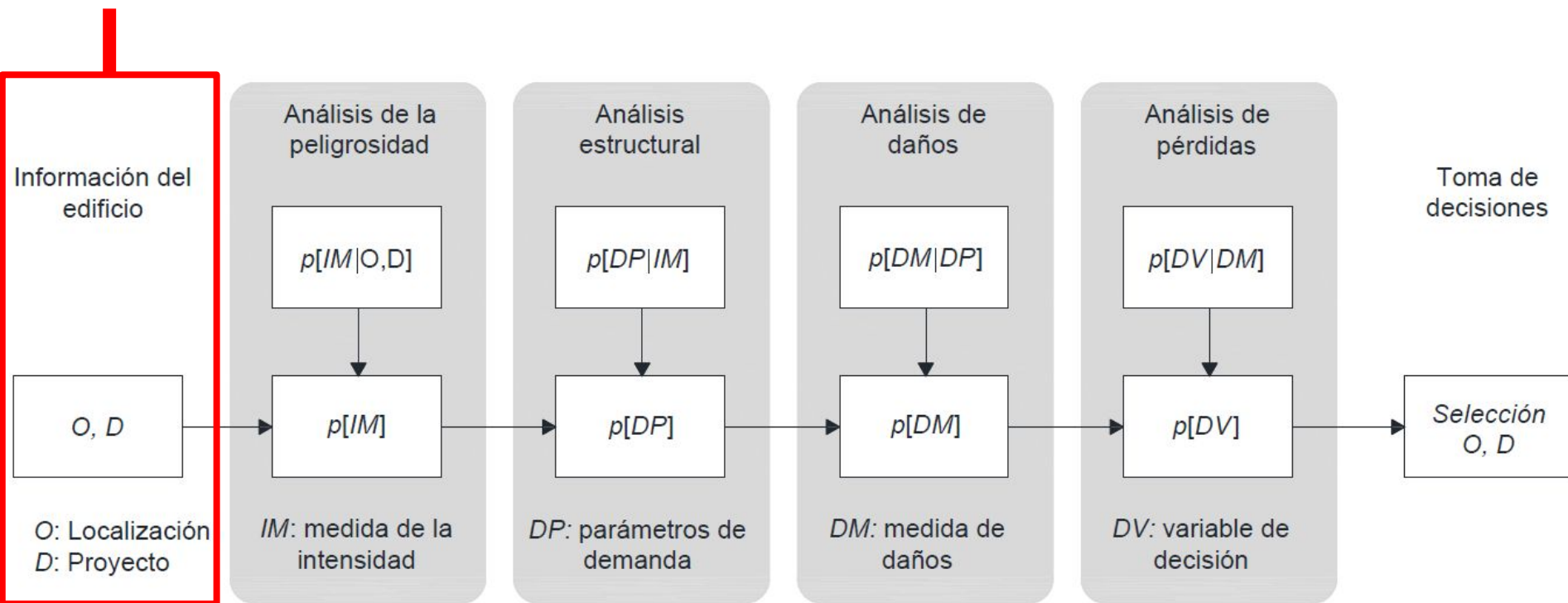
# La metodología FEMA-P-58-1

$$P(DV^n) = \sum_m \sum_i \sum_k P(DV^n | DM_k) p(DM_k | EDP_j^i) p(EDP_j^i | IM_m) p(IM_m)$$



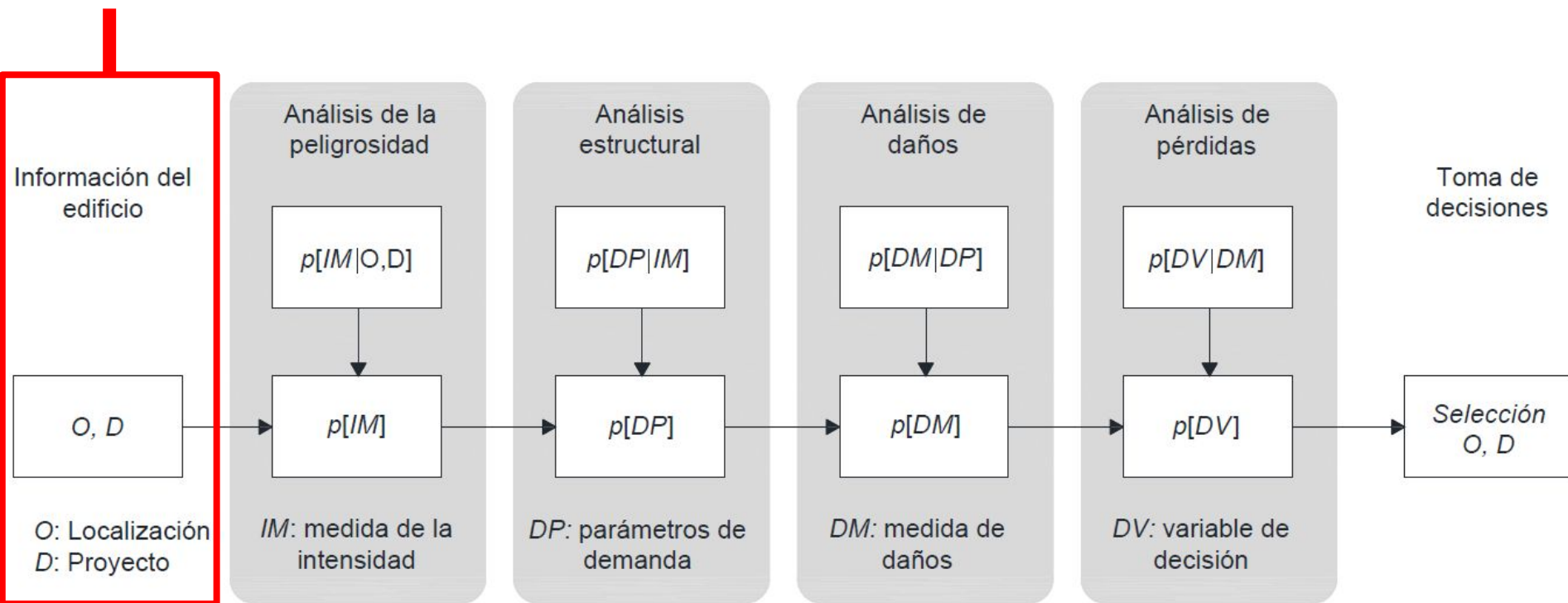
# La metodología FEMA-P-58-1

- Es necesario un modelo del edificio completo (estructura, ENE, contenidos, ocupación)
- El modelo se organiza en grupos de prestaciones
  - Grupo de prestaciones: conjunto de elementos susceptibles de sufrir daños de manera similar.
  - Las estanterías de una biblioteca son sensibles a \_\_\_\_\_
  - La instalación de agua fría sanitaria es sensible a \_\_\_\_\_
  - Los tabiques son sensibles a \_\_\_\_\_
  - Una máquina de aire acondicionado en la cubierta de un CC es sensible a \_\_\_\_\_
  - Una máquina de rayos X es sensible a \_\_\_\_\_



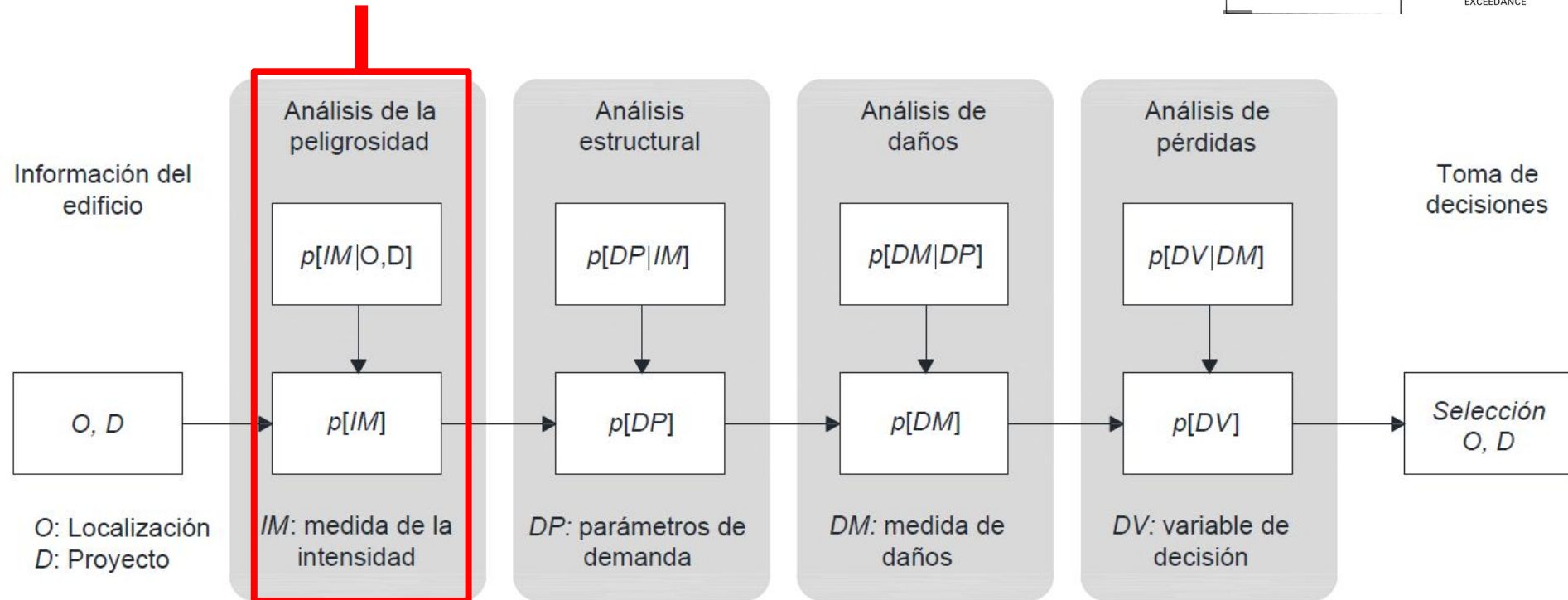
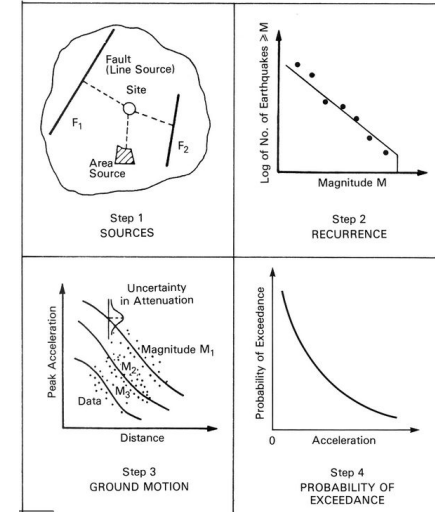
# La metodología FEMA-P-58-1

- Es necesario un modelo del edificio completo (estructura, ENE, contenidos, ocupación)
- El modelo se organiza en grupos de prestaciones
  - Grupo de prestaciones: conjunto de elementos susceptibles de sufrir daños de manera similar.
  - Las estanterías de una biblioteca son sensibles a la aceleración de planta en dos direcciones
  - La instalación de agua fría sanitaria es sensible al desplome relativo entre plantas
  - Los tabiques son sensibles al desplome entre plantas (principalmente).
  - Una máquina de aire acondicionado en la cubierta de un CC es sensible a la aceleración de cubierta
  - Una máquina de rayos X es sensible a la aceleración de planta



# La metodología FEMA-P-58-1

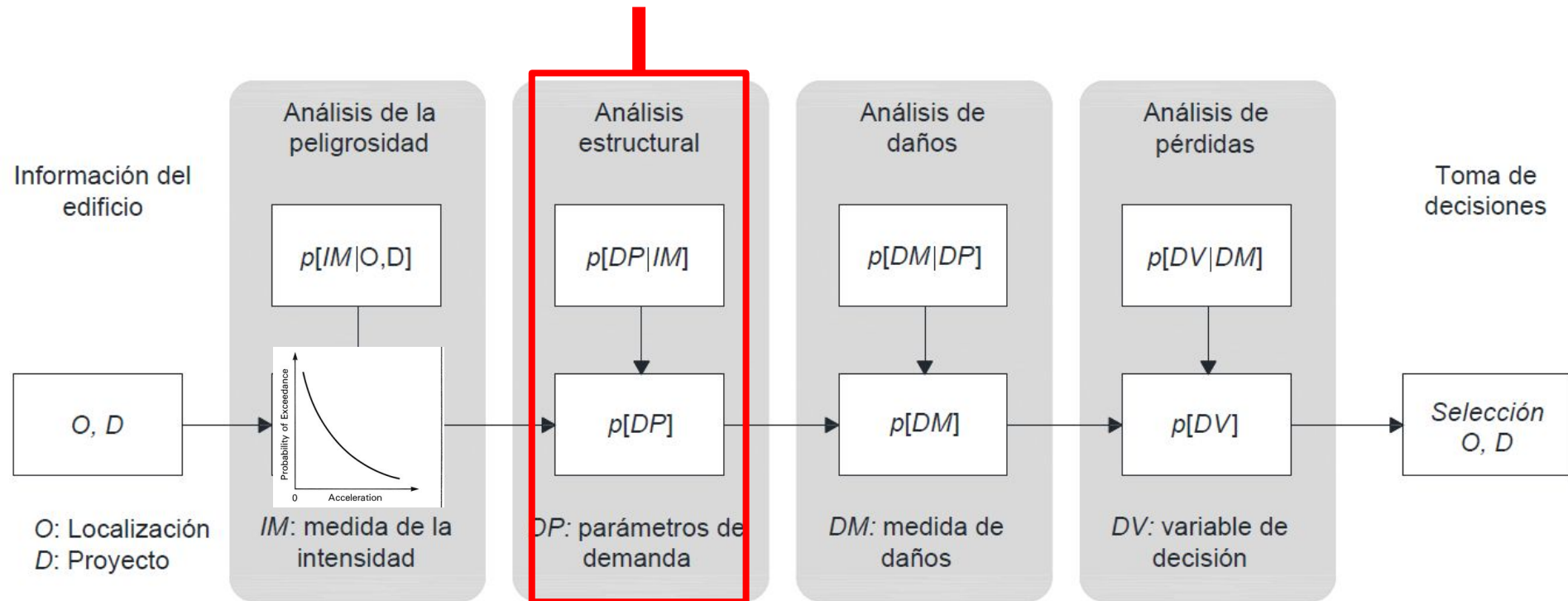
- ¿Cuánto es la probabilidad de que suceda un terremoto de cierta intensidad?
- ¿Cómo cuantificar la acción sísmica?
- Escenarios de peligrosidad (podemos tener en cuenta direccionalidad del sismo)
- Espectros a varias intensidad (frecuente, raro, MCE)
- Selección y modificación de terremotos (GMSM)
- Spectral matching





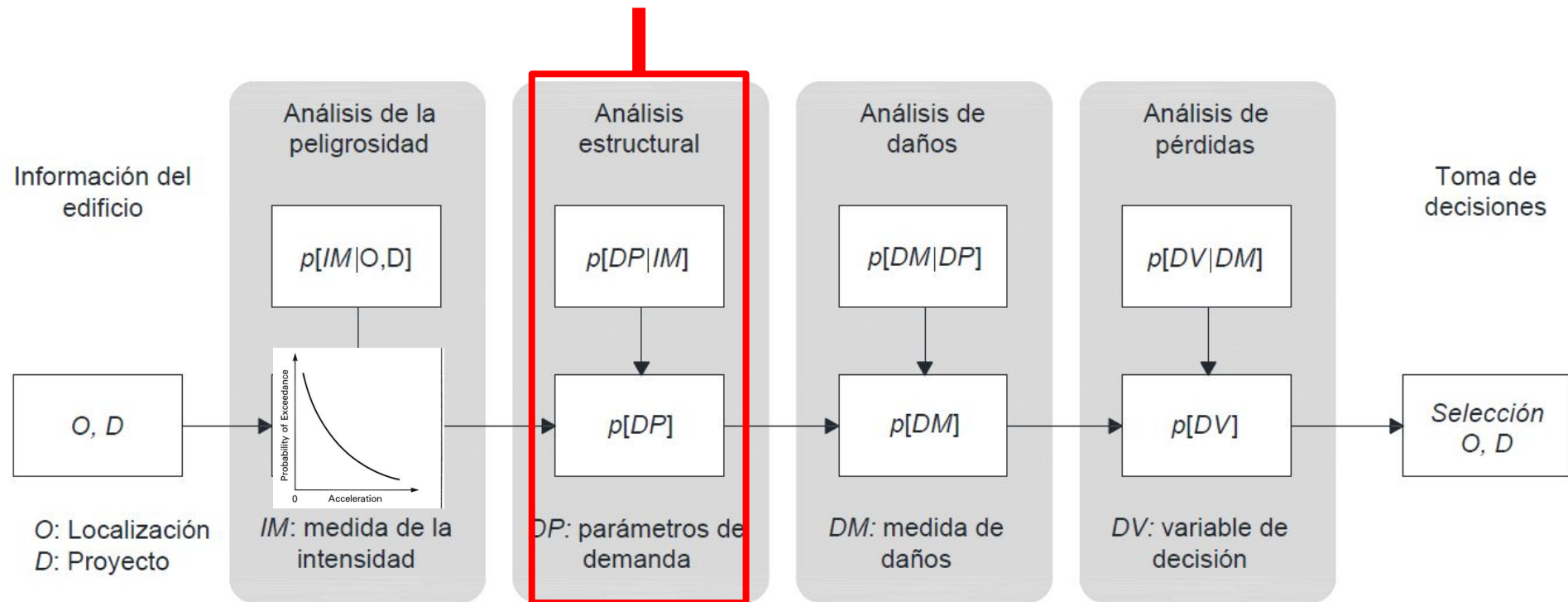
# La metodología FEMA-P-58-1

- ¿Cuánto es la respuesta del edificio en caso de un terremoto de cierta intensidad?
- La métrica son los parámetros de demanda que influyen en los daños al edificio
  - \_\_\_\_\_
  - \_\_\_\_\_
  - \_\_\_\_\_
- Usaremos varios acelerogramas para tener datos estadísticamente representativos



# La metodología FEMA-P-58-1

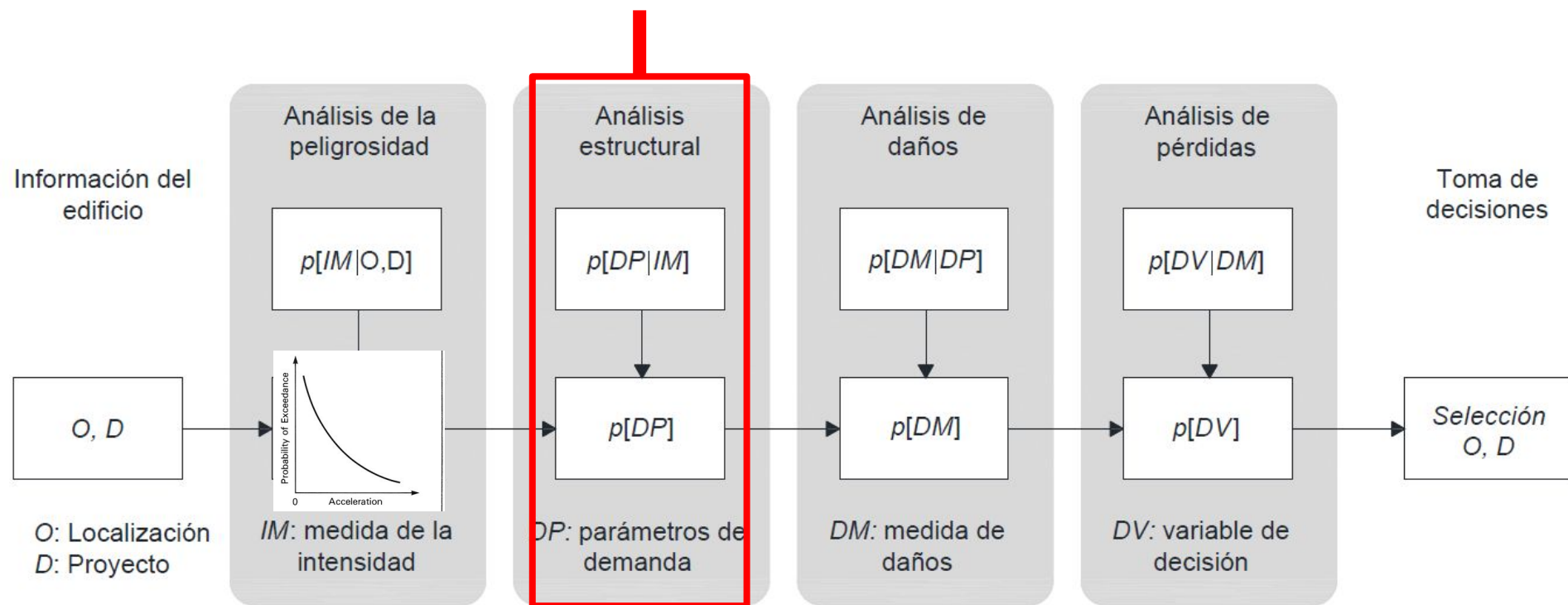
- ¿Cuánto es la respuesta del edificio en caso de un terremoto de cierta intensidad?
- La métrica son los parámetros de demanda que influyen en los daños al edificio
  - El desplome entre plantas en dos direcciones
  - La aceleración de planta en dos direcciones
  - Algunos autores han empleado velocidades
- Usaremos varios acelerogramas para tener datos estadísticamente representativos



# La metodología FEMA-P-58-1

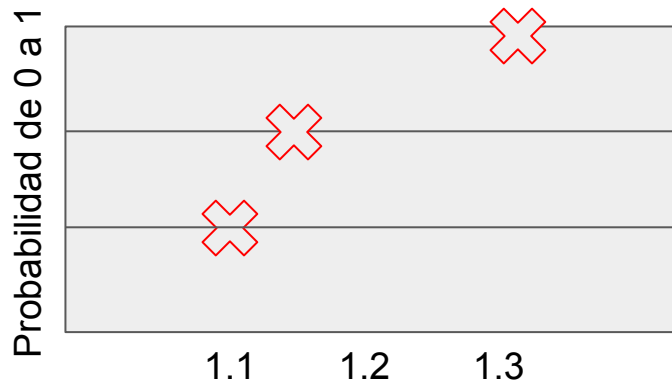
- Seamos ordenados: la matriz de DP

	Calitri	Lorca	Aquila
a0	0.23g	0.25g	0.24g
a1	0.75g	0.91g	0.64g
desplome	1.1%	1.3%	1.15%

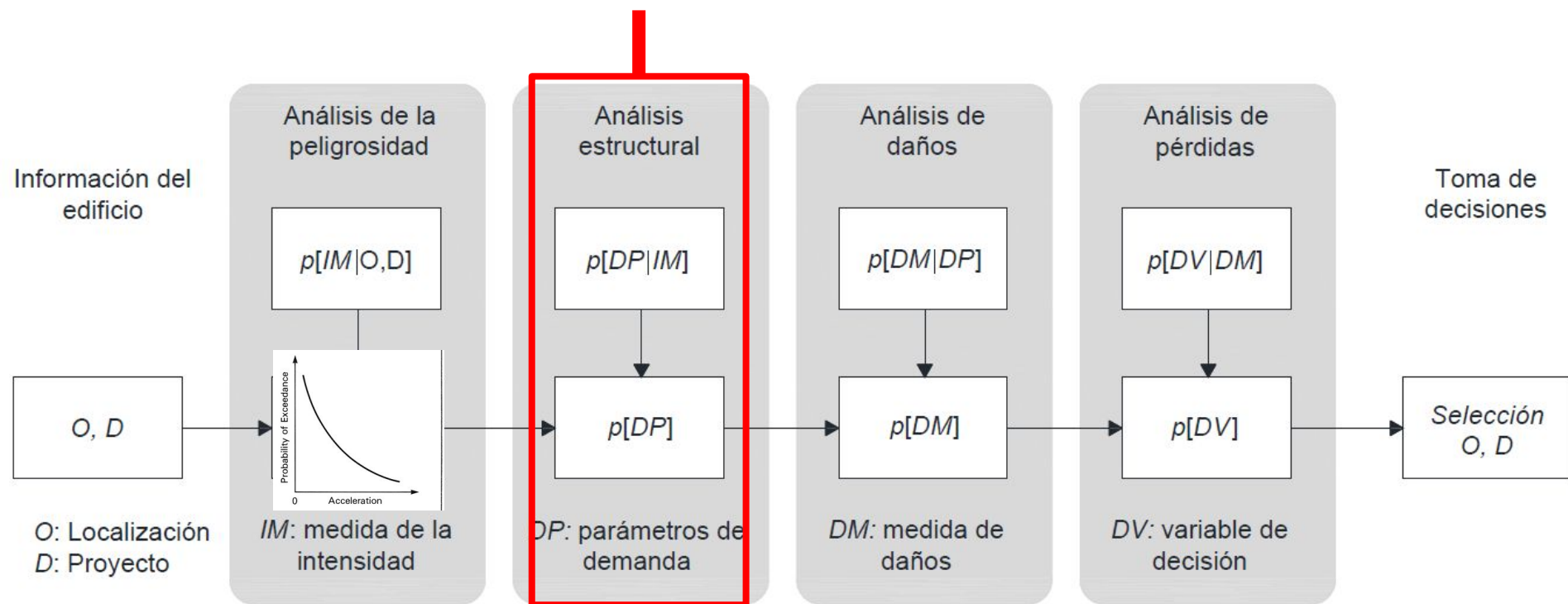


# La metodología FEMA-P-58-1

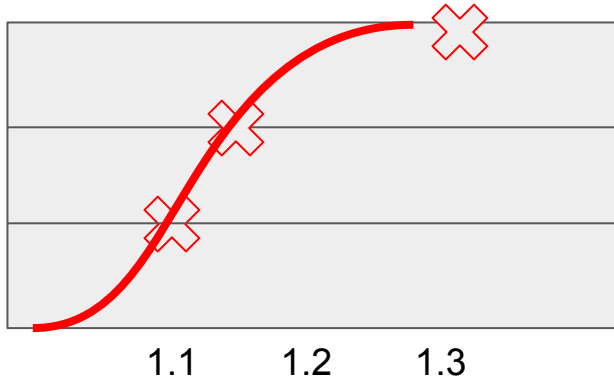
Distribución acumulada



	Calitri	Lorca	Aquila
a0	0.23g	0.25g	0.24g
a1	0.75g	0.91g	0.64g
desplome	1.1%	1.3%	1.15%

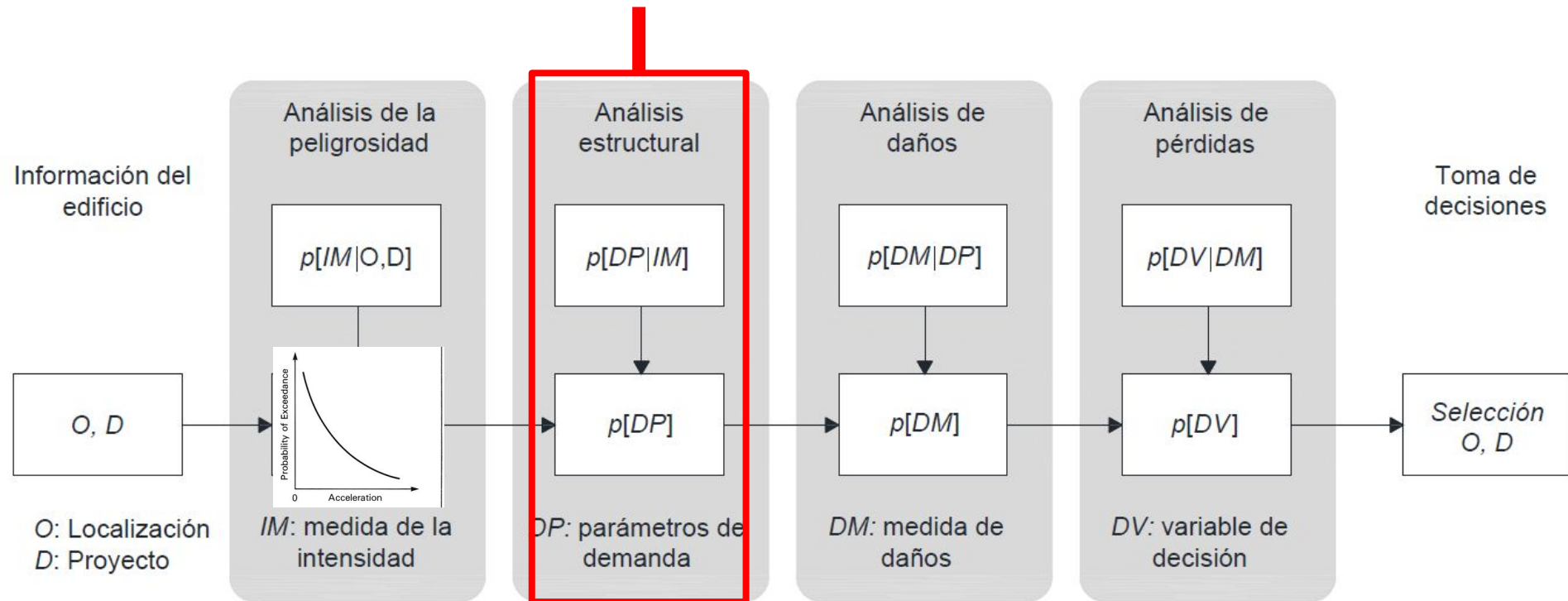


# La metodología FEMA-P-58-1

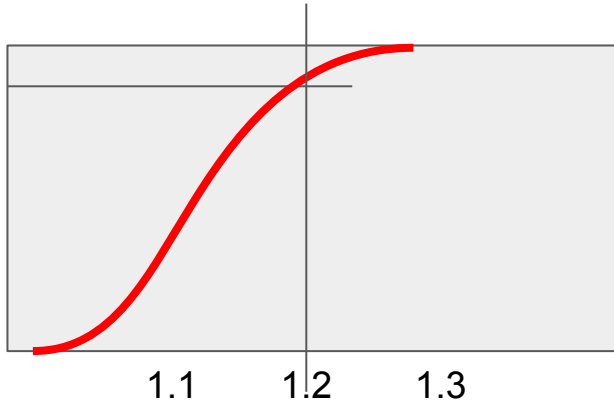


Hipótesis:  
X sigue una distribución lognormal  
 $\log(X)$  sigue una distribución normal

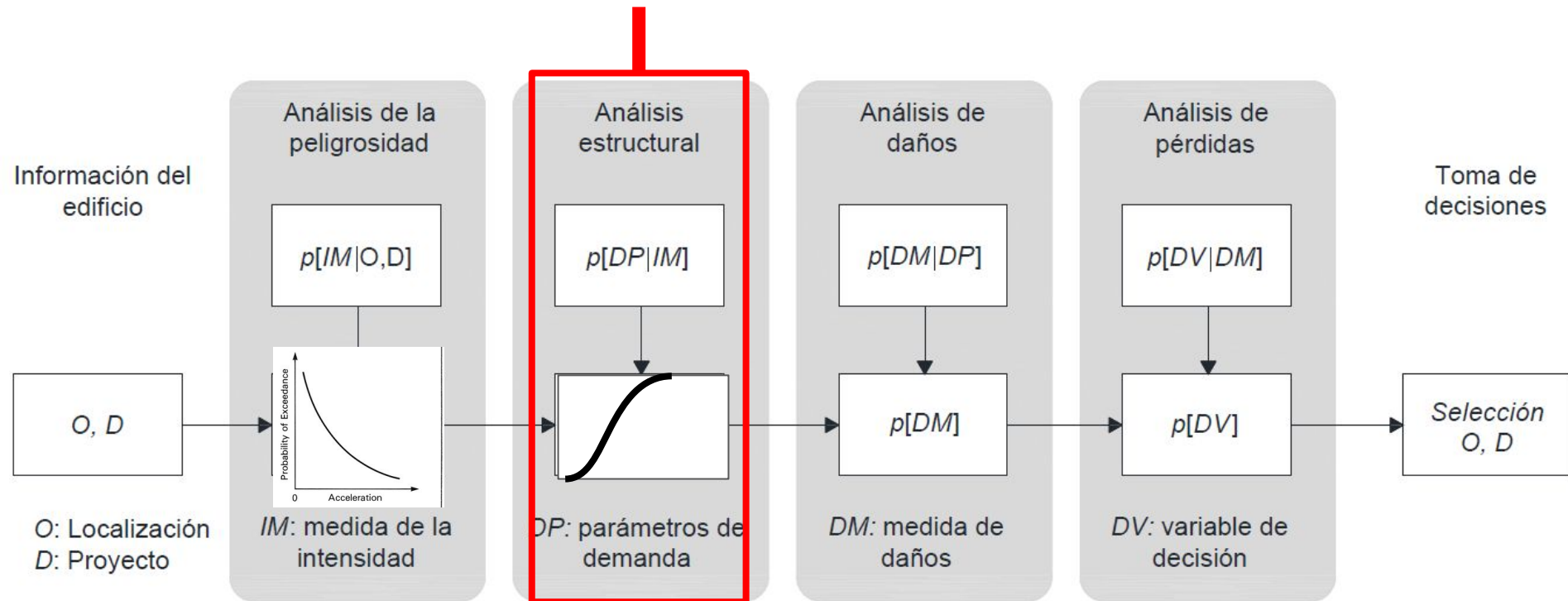
Distribución lognormal acumulada



# La metodología FEMA-P-58-1



Podemos estimar la probabilidad de exceder (o no exceder) un cierto desplome entre plantas



# Actividad 1

- 1) Empleando 5 acelerogramas, realizamos una serie de análisis dinámicos directos de un edificio de 2 plantas. En este escenario ¿qué probabilidad hay de que se supere un desplome entre plantas del 1%?

	desplome planta 0 (%)	desplome planta 1 (%)
sismo1	1.2	1.17
sismo2	0.95	1.05
sismo3	1.22	1.1
sismo4	1.15	1.32
sismo5	1.3	0.99

PISTAS:

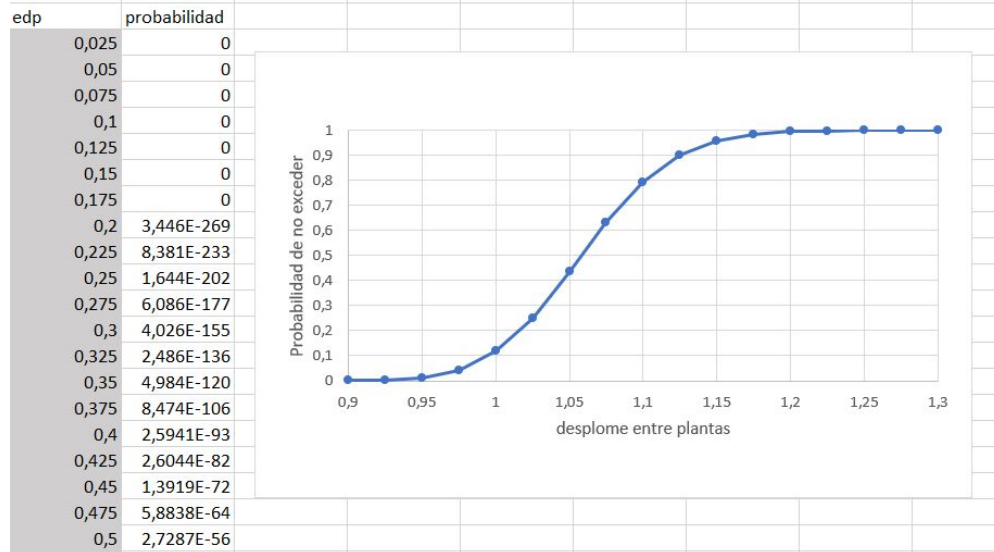
Una la distribución normal se caracteriza por el valor promedio y la desviación estándar

El logaritmo de los valores de la tabla sigue una distribución normal.

Podemos calcular la probabilidad usando hojas de cálculo LOGNORM.DIST(x,mean,standard\_dev,cumulative)

# Actividad 1

edp		log		promedio	
1,2	1,17	0,07918125	0,06818586	0,05648828	
0,95	1,05	-0,02227639	0,0211893	dev estandar	
1,22	1,1	0,08635983	0,04139269	0,04755203	
1,15	1,32	0,06069784	0,12057393		
1,3	0,99	0,11394335	-0,00436481		



$$100\% - 11.7\% = 88.3\%$$

PISTAS:

Una la distribución normal se caracteriza por el valor promedio y la desviación estándar

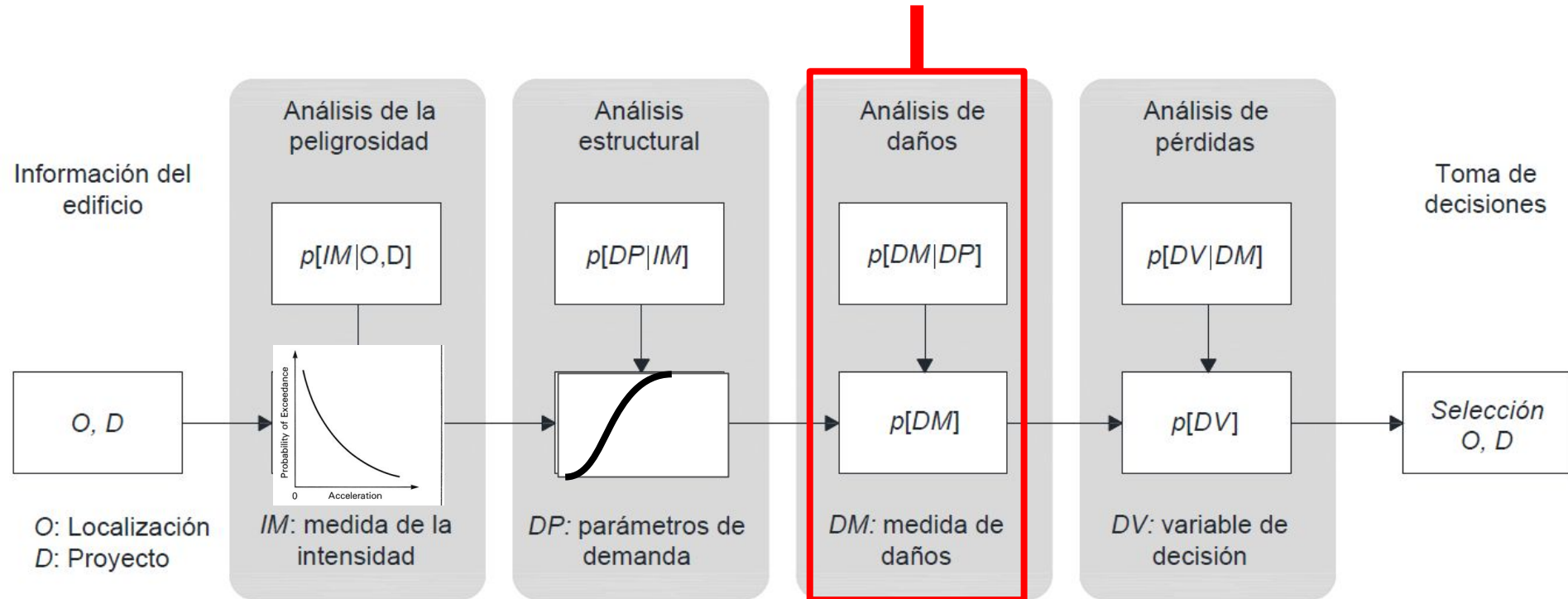
El logaritmo de los valores de la tabla sigue una distribución normal.

Podemos calcular la probabilidad usando hojas de cálculo LOGNORM.DIST(x,mean,standard\_dev,cumulative)



# La metodología FEMA-P-58-1

- ¿Cuánto es la probabilidad de que sucedan daños en función de los parámetros de demanda?
- Usando el mismo concepto estadístico: las curvas de fragilidad



# La metodología FEMA-P-58.

- La probabilidad de alcanzar un cierto nivel de daño en función de un parámetro de respuesta del edificio.
- Tendremos una curva de fragilidad para cada grupo de prestaciones (tabiquería anclada a forjados, fan-coils suspendidos)
- ¿En el caso del gráfico de la derecha, para  $a=0.5g$ , cuál es el estado de daño?

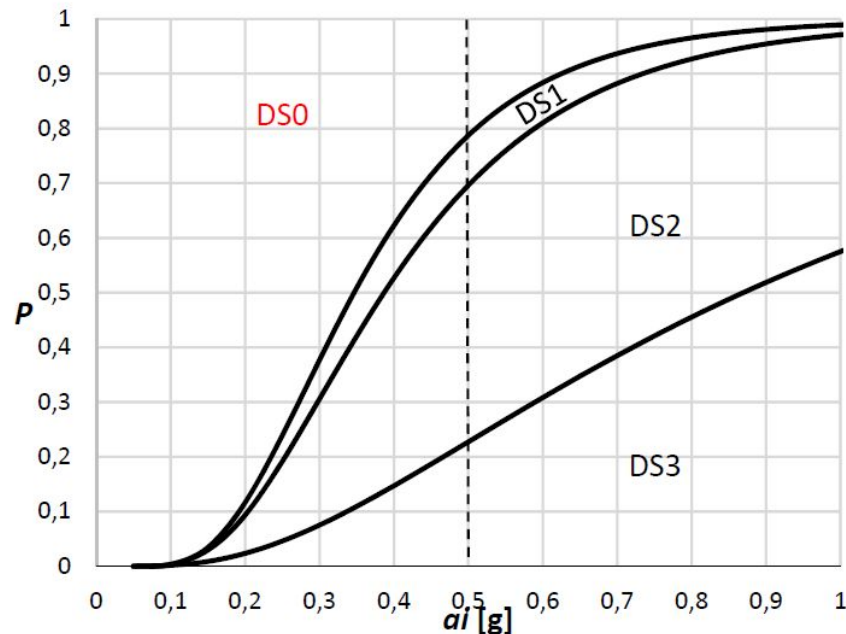
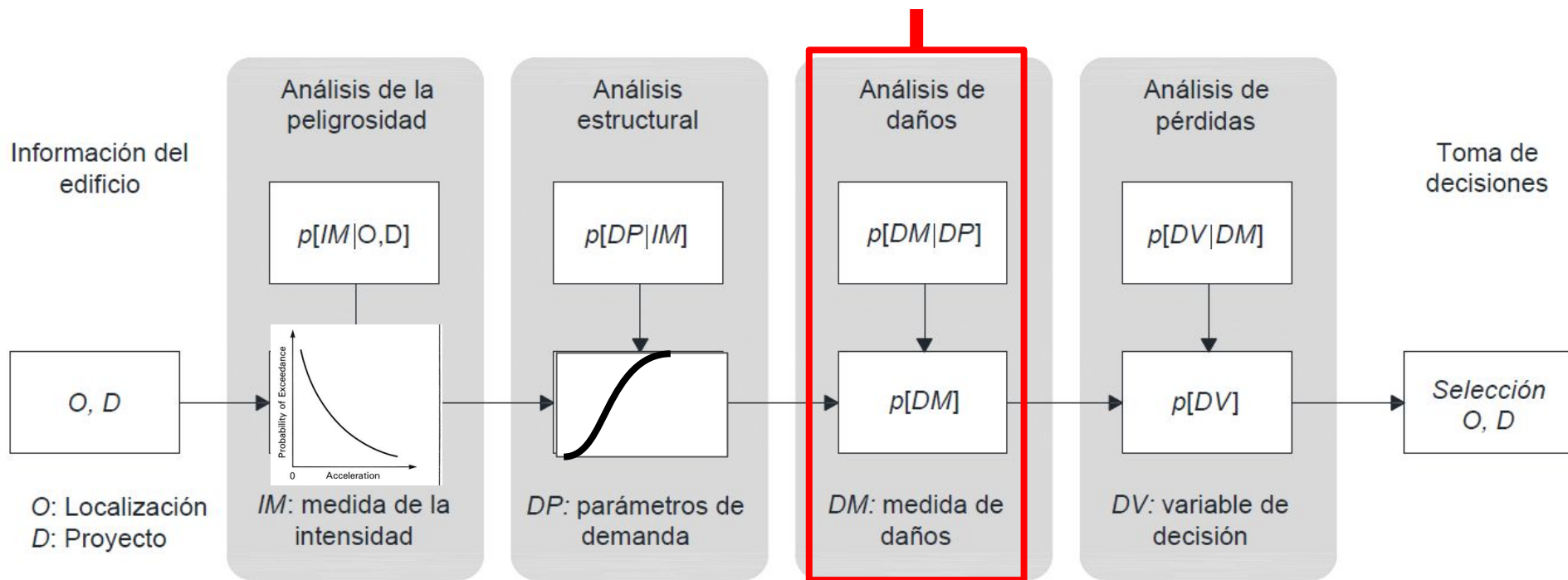


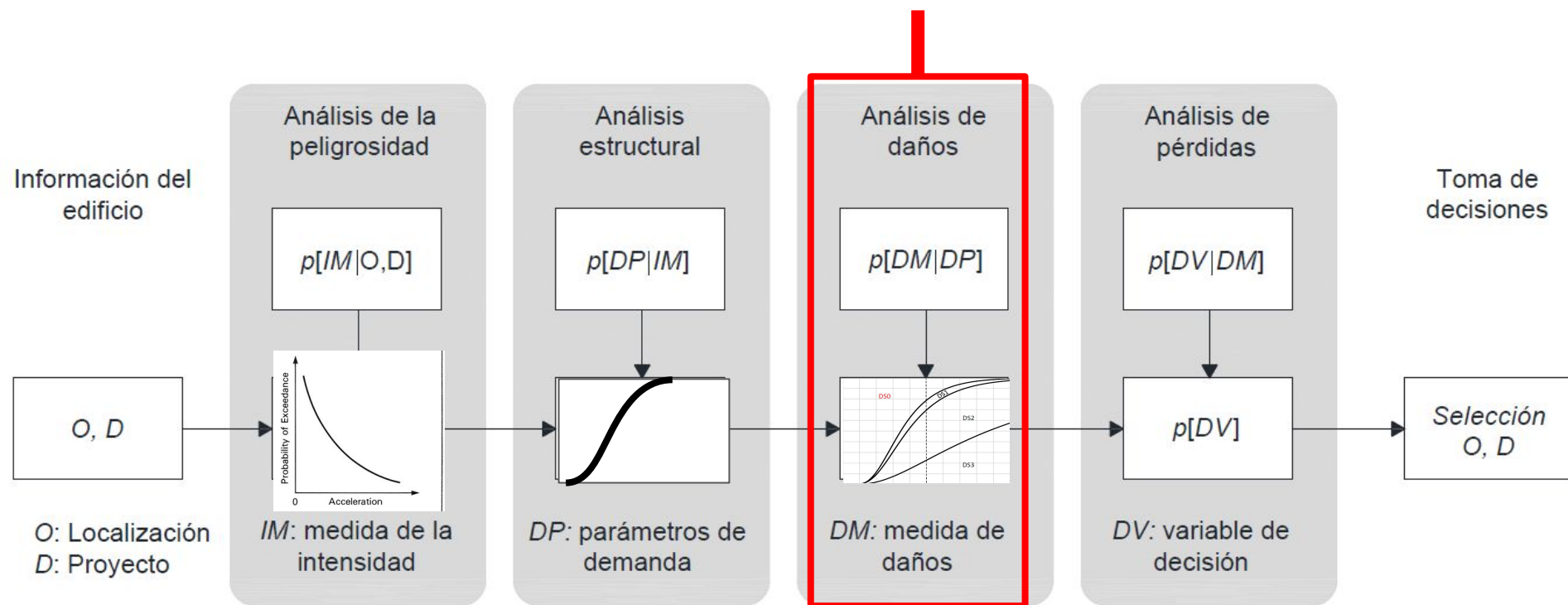
Fig. 4. Curva de fragilidad para el GP58.



# La metodología FEMA-P-58-1

- Seamos ordenados: la matriz de daños

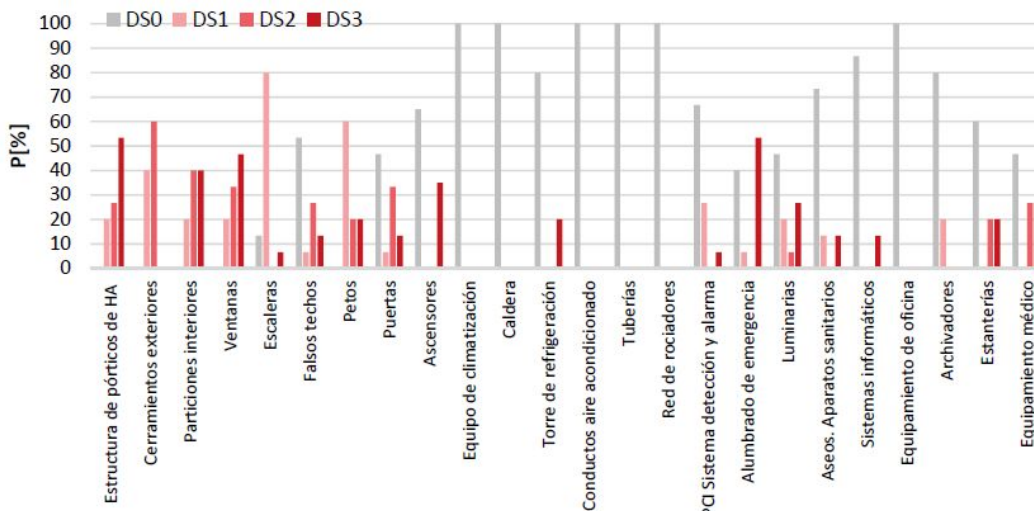
	Calitri	Lorca	Aquila
tabiques	DS1	DS2	DS1
petos	DS0	DS0	DS0
chimenea	DS1	DS0	DS0



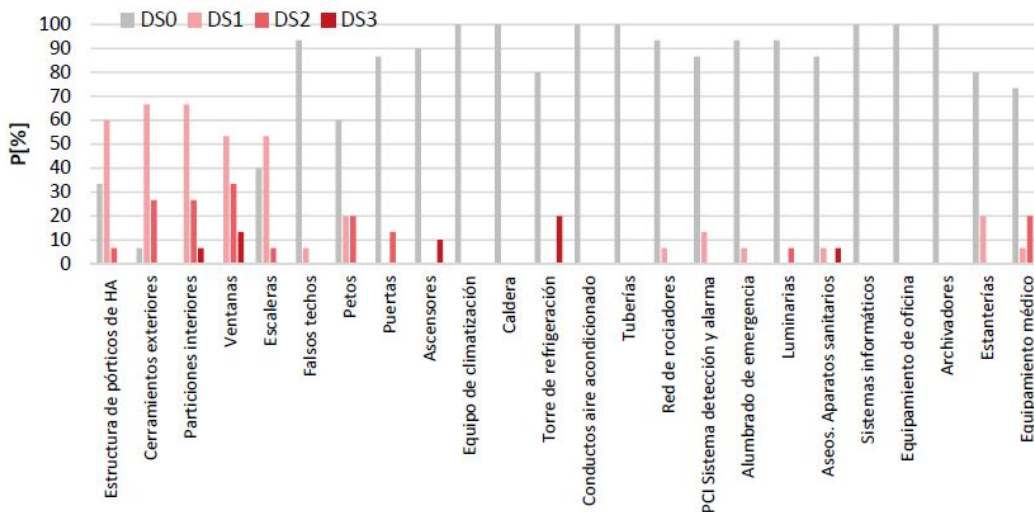
# La metodología FEMA-P-58-1

Ejemplo de segregación de estados de daño para dos niveles de intensidad sísmica en un edificio sanitario

- (a) sismo raro
- (b) sismo frecuente



(a)

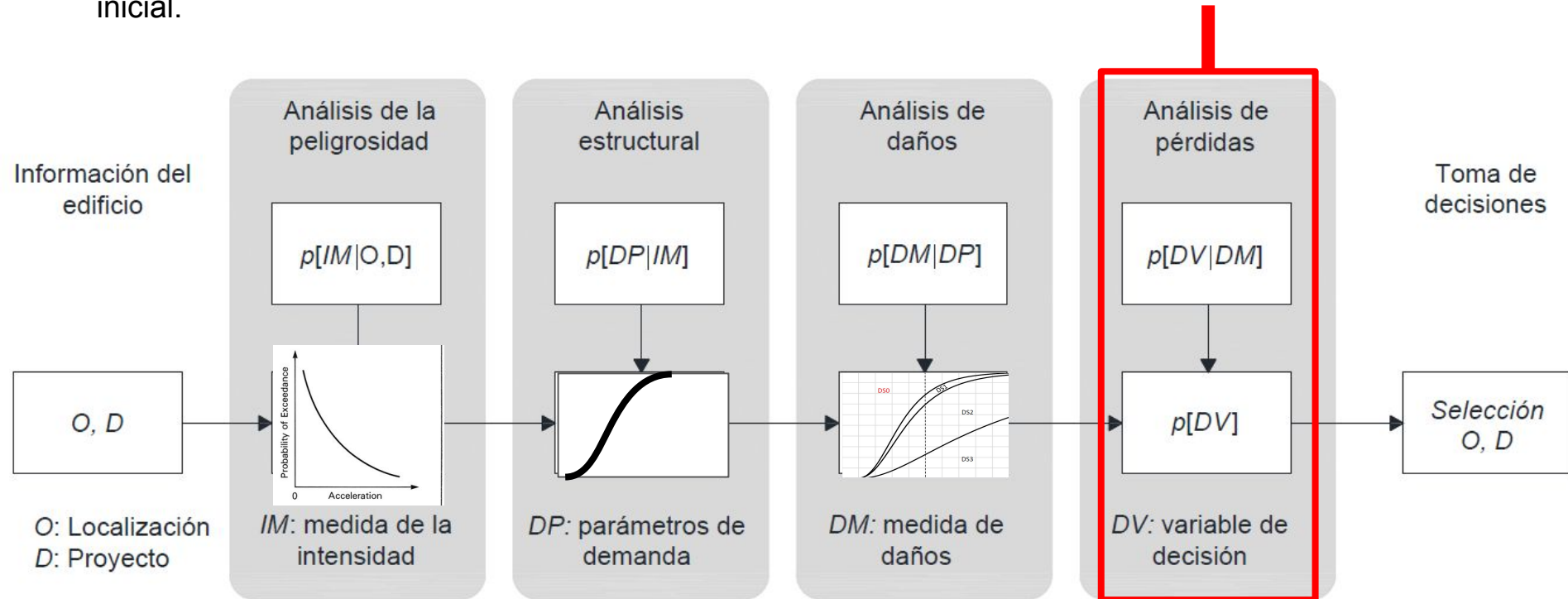


# La metodología FEMA-P-58-1

- La probabilidad de que las variables de decisión tomen un cierto valor condicionada a los daños
- ¿Pero esto cuanto me puede costar?
- Hay que estimar los costes de reparación para cada nivel de daño
- Los costes de reparación suelen estimarse como un porcentaje del coste inicial.

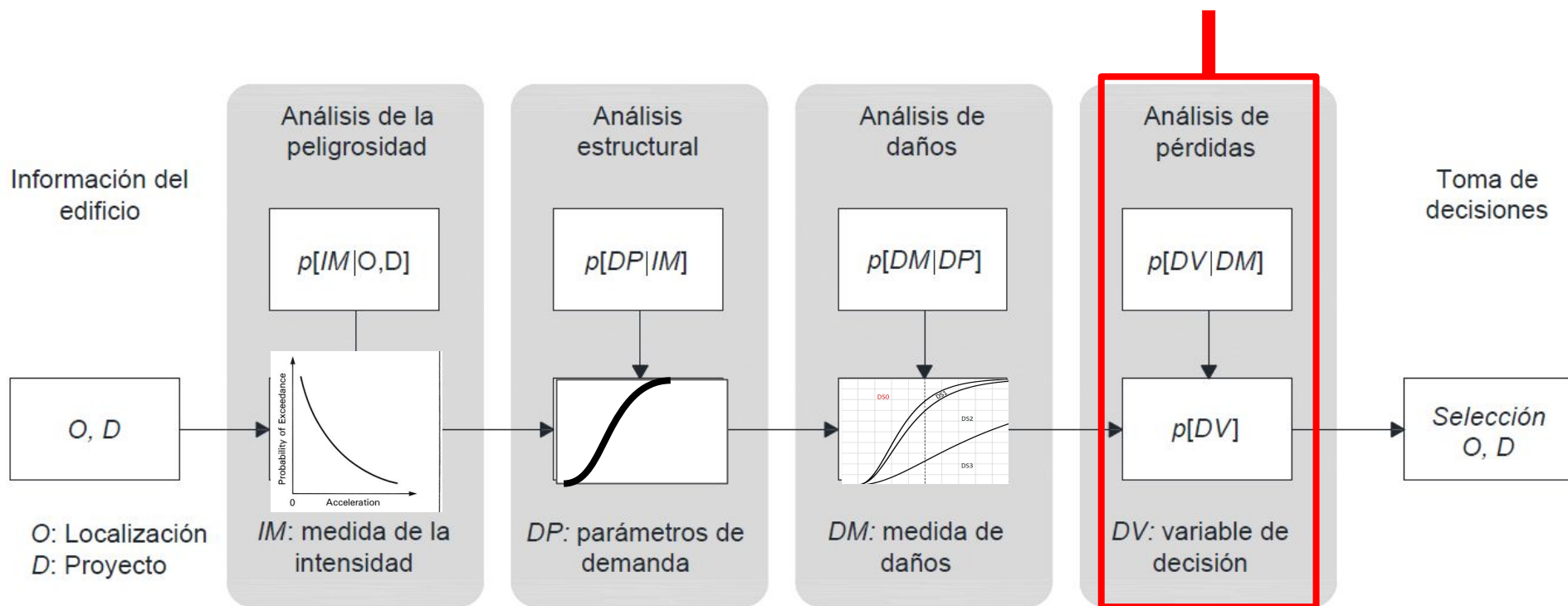
Matriz de costes unitarios de reparación

	DS1	DS2	DS3
Techo (por m2)	10€	50€	100€
AC (por aparato)	50€	100€	800€



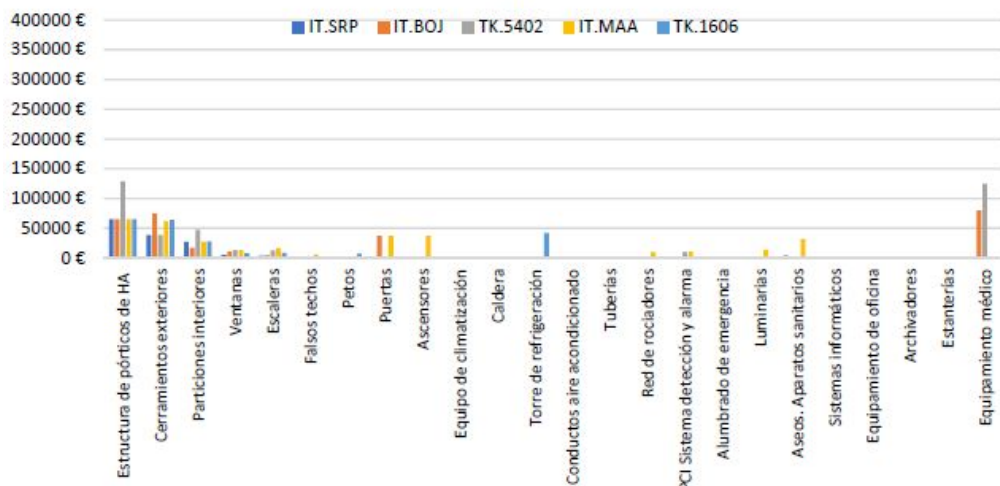
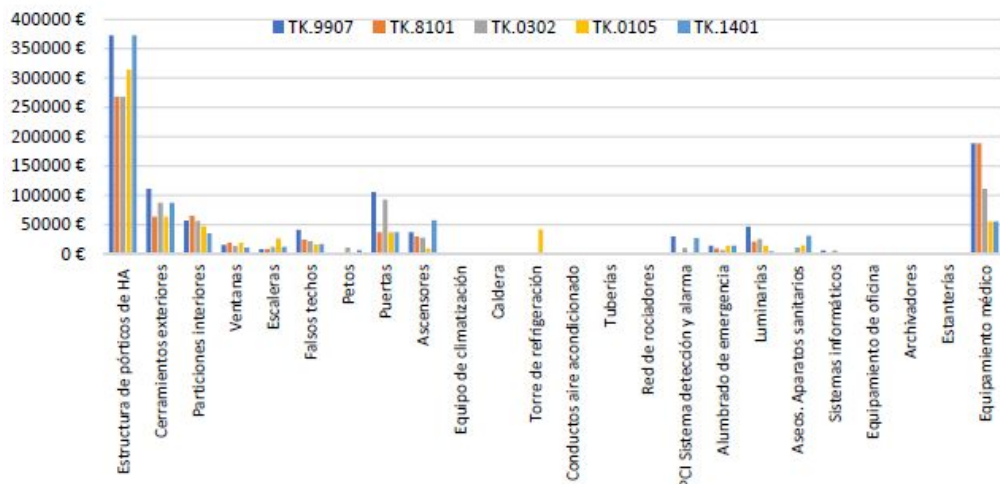
# La metodología FEMA-P-58-1

- Los resultados típicos son
- La matriz de costes
- La probabilidad de los costes de reparación
- La desagregación de los costes
- Probabilidad de estar días cerrado
- Impacto en comunidad
- Factores sociales



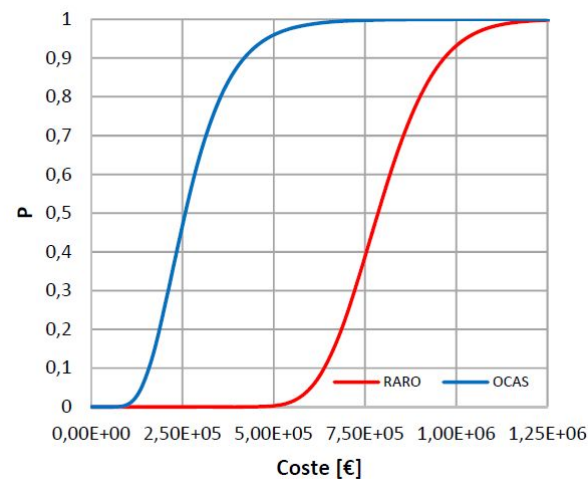


# La metodología FEMA-P-58-1



Ejemplo de segregación de costes de reparación para dos niveles de intensidad sísmica en un edificio sanitario

- (a) sismo raro
- (b) sismo frecuente

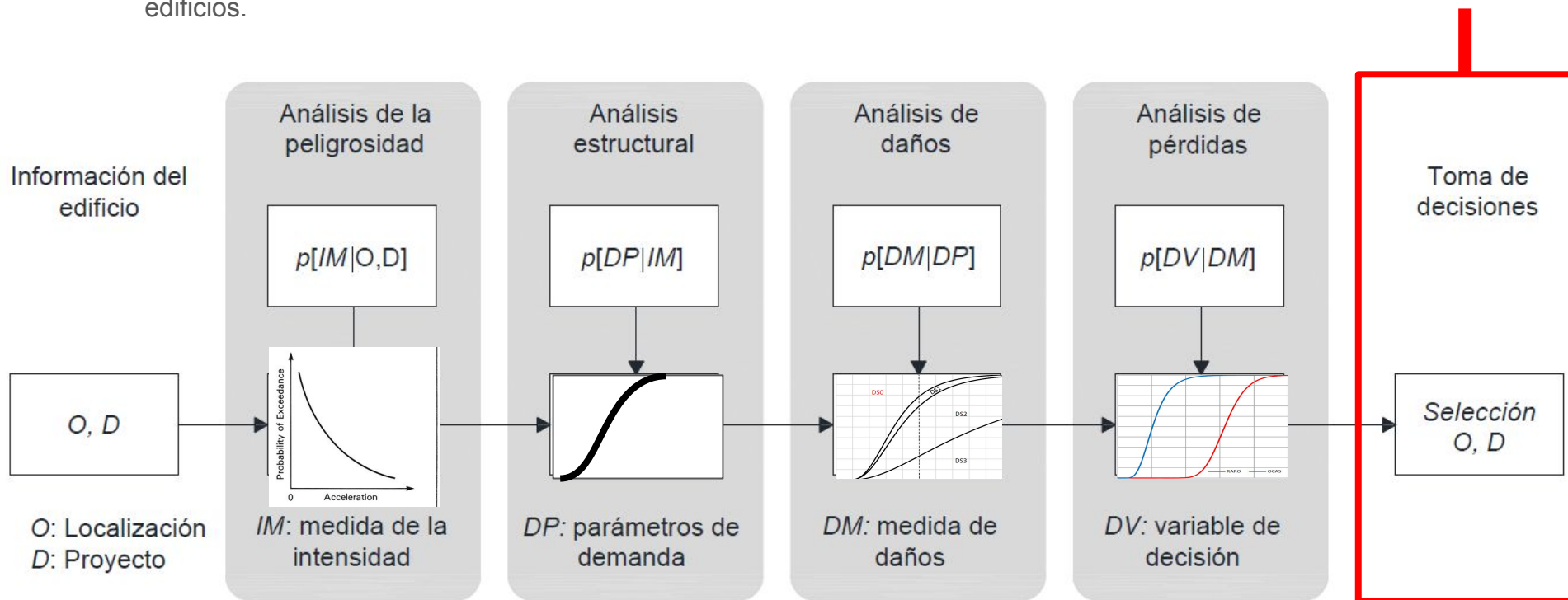


Probabilidad de no superar cierto coste de reparación

# La metodología FEMA-P-58-1

## Conclusiones

- La metodología tiene una base probabilista que permite conservar las incertidumbres del problema.
- A través de un análisis en cascada, la metodología permite cuantificar a partir de la respuesta estructural: (i) los niveles de daño en los sistemas del edificio, (ii) los tiempos y costes de reparación, (iii) otros impactos sociales, medioambientales, etc.
- Son necesarios avances en el desarrollo de curvas de fragilidad para variedad de sistemas tecnológicos de los edificios.





# Referencias

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2012). Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 1-Methodology. *Rep. No. FEMA P-58-1*.

FEMA, E. (2011). Reducing the risks of nonstructural earthquake damage. *Practical Guide, January*.

Filiatrault, A., & Sullivan, T. (2014). Performance-based seismic design of nonstructural building components: The next frontier of earthquake engineering. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(1), 17-46. DOI:10.1007/s11803-014-0238-9