
CAPÍTOL II: OBJECTIUS I METODOLOGIA

2.1 INTRODUCCIÓ

En aquest capítol s'exposen els objectius del present estudi i la metodologia que s'aplicarà, *HAZUS'99*, per poder avaluar les pèrdues associades a un event sísmic sobre els elements que componen la xarxa de gas, oleoductes i etilenoductes de Catalunya i de la ciutat de Barcelona.

En l'apartat 2.3 es descriu el procediment general de *HAZUS* i les eines que utilitza, sense especificar per els sistemes d'oleoductes, etilenoductes i gas natural. Es tracta el dany que provoca un sisme i es presenten els elements que utilitza el mètode per avaluar les pèrdues. S'introdueixen els conceptes dels estats de dany, les corbes de fragilitat, les corbes de restauració, els costos de reposició, els índex de dany i l'índex de dany compost que permeten avaluar les pèrdues econòmiques directes per cada component del sistema.

Per tancar el capítol es comenten breument els aspectes generals de l'aplicació dels sistemes d'informació geogràfica en l'anàlisi, les possibilitats que ofereixen per la representació tant de l'inventari de dades com dels resultats.

2.2 OBJECTIUS

L'objectiu principal d'aquest treball és avaluar d'una manera probabilística el comportament sísmic de la xarxa de gasoductes i oleoductes a Catalunya i la ciutat de Barcelona. Es proposa fer servir les directrius i procediments desenvolupats per *HAZUS* per estimar les pèrdues que es produirien a escala regional, que haurien d'ésser usades per planificar i estimular esforços per reduir els riscos dels sismes i preparar respostes d'emergència i recuperació. Els resultats d'aquest estudi tracten de quantificar el grau de destrucció que es donaria i, en conseqüència, saber en quins llocs actuar i de quina manera. Al final de l'estudi es pretén valorar si aquest mètode funciona adequadament pel nostre problema.

Un segon objectiu és utilitzar un suport informàtic amb un SIG (Sistema d'Informació Geogràfica) comercial, l'*ArcView 3.2* d'*ESRI* [13], per la gestió de les dades. En acabar l'estudi es vol analitzar si resulta una bona eina per aquest tipus de treballs.

Conèixer el risc de la nostra zona d'estudi ens pot permetre construir els nous sistemes de gas, oleoductes i etilenoductes en les ubicacions més adients, les de menor perill. Seria recomanable incorporar aquest tipus d'anàlisis a la normativa sismo-resistent *NCSE-02* [14].

Com s'explica en l'estudi, els resultats de la metodologia aplicada a una estructura individual no tenen sentit. El mètode és vàlid per estimar la resposta sísmica de conjunts d'elements del mateix tipus a escala regional i no ha de sortir del marc estadístic. Però sí que pot ser una referència per estudis a una escala menor, més acurada.

2.3 METODOLOGIA: *HAZUS'99*

2.3.1 ASPECTES GENERALS

El mètode aporta eines per estimar pèrdues per l'escenari sísmic de la zona, que permetrà anticipar-se a les conseqüències de sismes futurs i desenvolupar plans i estratègies per reduir el risc. L'estudi pot tenir diferents necessitats com estimar costos i beneficis d'estratègies de mitigació, pèrdues esperables si s'aplica una estratègia de mitigació del risc determinada, demanda de serveis mèdics, nombre de ferits per diferents escenaris sísmics, àrees susceptibles de patir incendis o fuites de materials perillosos, planejar i practicar exercicis de resposta a emergències, estudiar la capacitat de serveis d'emergència com bombers o policia, temps durant el qual haurà de prestar-se protecció amb plans d'emergència i quantificar-la, localització i àrees d'afectació de talls de subministrament d'aigua, llum i gas,...

Els objectius de la metodologia *HAZUS'99* [1] són:

- Anticipar la resposta d'emergència necessària en un desastre causat per un sisme.
- Desenvolupar plans per recuperar i reconstruir després del sisme.
- Mitigar les conseqüències del sisme.

Podem obtenir la següent informació:

- Estimació quantitativa de pèrdues en termes de cost de reparació i reposició.
- Pèrdues de funcionalitat i temps de restauració de serveis crítics.
- Extensió dels perills induïts pel sisme (incendis, inundacions, derrubis,...).

Per generar aquesta informació, la metodologia inclou:

- Classificació dels sistemes.
- Mètodes d'avaluació de dany i càlculs de pèrdues.
- Bases de dades que contenen informació usades com dades per defecte per calcular pèrdues.

Els sistemes d'informació geogràfica (SIG) faciliten la manipulació i exposició de dades i permeten mostrar els resultats en mapes i taules. La informació geogràfica pot ser superposada i es poden comparar resultats aplicant diferents escenaris sísmics i fer preguntes del tipus "què passa si...?".

Els passos a seguir en la metodologia d'estimació de pèrdues són:

- Seleccionar l'àrea d'estudi.
- Especificar la magnitud de l'escenari sísmic. La definició de l'escenari sísmic ha de considerar tant els sismes més destructius que s'han donat en la regió com la freqüència en què es donen aquests. La norma sísmica NCSE-02 [14] pren com a referència del perill sísmic el mapa de sismes esperats amb un període de retorn de 500 anys, és a dir, els sismes amb una probabilitat d'ocurrència del 10% en 50 anys. Aquests mapes són un bon indicador del nivell de perill sísmic d'una regió i es pot prendre com un escenari sísmic de referència per estudis de risc sísmic.

També es poden desenvolupar altres escenaris en funció dels objectius d'un estudi de risc més específic.

- Aportar informació per descriure el sòl i les condicions geològiques. El tipus de sòl pot tenir un efecte significant ja que pot modificar la intensitat del moviment del sòl amplificant-lo.
- Realitzar un inventari de les dades del sistema a estudiar que són necessàries per aplicar el mètode. La recopilació i anàlisi de la informació que fa referència a una línia vital és un valor afegit d'aquest tipus d'estudis atès que permet conèixer els punts forts i febles d'aquest tipus d'instal·lacions i serveis.
- Obtenir danys i funcionalitat dels elements del sistema. En el mètode *HAZUS* trobem fórmules, distribucions de probabilitat de dany per cada component de cada sistema i estimacions de funcions de pèrdua.
- Usar la informació de danys i funcionalitat per estimar pèrdues econòmiques directes i indirectes.
- Estimar incendis, derrubis i inundacions (danys indirectes). Per avaluar-ho, el mètode estima un percentatge d'àrea que pot ésser afectada per un incendi, derrubi o una inundació.

En sismes catastròfics, aquests danys indirectes poden arribar a ser superiors als directes. Els nivells de perillositat sísmica de Catalunya, però, no fan esperables danys indirectes que solen acompanyar danys directes importants a les instal·lacions. Per tant no s'ha considerat oportú avaluar els danys indirectes en aquest treball.

La Figura 1 esquematitza la metodologia *HAZUS'99*. Per cada escenari sísmic i per cada tipus d'instal·lació, la metodologia permet estimar el cost econòmic, la funcionalitat i el temps de recuperació. La qualitat i precisió dels resultats depèn de la qualitat de les dades i de la definició de l'acció sísmica. Els passos intermitjos que mostra la Figura 1 es comenten en els apartats posteriors.

2.3.2 L'ACCIÓ SÍSMICA A *HAZUS'99*

Els perills dels sismes considerats a la metodologia són anomenats PESH (*Potential Earth Science Hazards*) i estan directa o indirectament relacionats amb el sacseig del sòl (*ground shaking*), que es quantifica mitjançant paràmetres com el PGA (*Peak Ground Acceleration*), el PGV (*Peak Ground Velocity*) o S_A (acceleració espectral).

A més del sacseig, un altre efecte que provoquen els sismes són els desplaçaments permanents del sòl PGD (*Permanent Ground Displacement*), que poden donar-se per diferents fenòmens:

- **Ruptura per falla:** El sacseig ve causat per moviment de falles profundes, que poden arribar a aflorar en superfície i separar infraestructures.
- **Liqüefacció:** Aquesta pèrdua sobtada de rigidesa del sòl es pot donar en materials solts i saturats que es veuen sacsejats intensament degut al sisme i poden causar assentaments molt importants i moviments horitzontals del sòl.
- **Lliscaments:** Moviments de vessants en sòls o roca deguts al sacseig que poden tenir gran poder destructiu.

El capítol III està dedicat a desenvolupar l'acció sísmica.

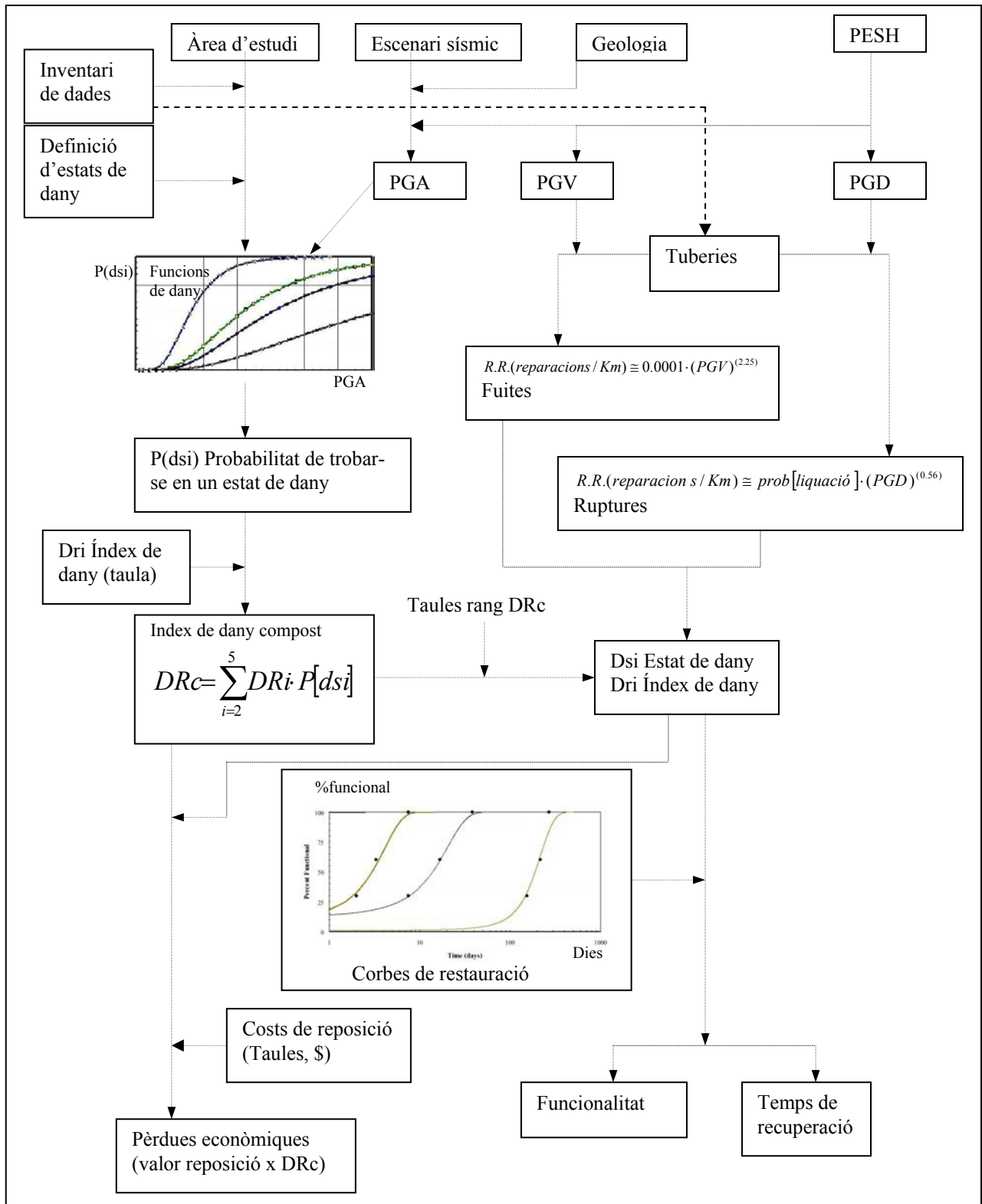


Figura 1. Esquema del procediment.

2.3.3 EL DANY I ELS ESTATS DE DANY

Per avaluar el dany, el primer pas és definir els estats de dany per cada component del sistema, que són una divisió del grau de dany en 5 categories: nul, lleu / despreciable, moderat, sever i complet. Cada estat de dany té associat un índex de dany Dri (segons l'element) amb el qual es calculen les pèrdues econòmiques directes. Aquests índexs de dany es calculen a partir de les funcions de dany o corbes de fragilitat.

2.3.4 L'INVENTARI

Per l'estimació del dany directe, és necessari caracteritzar els sistemes d'estudi. El primer pas consisteix a descomposar el sistema en diversos components segons la seva tipologia estructural, ja que presentaran diferent comportament enfront els sismes. Aquests components, alhora, es separen en classes segons el disseny, mètode constructiu, materials de construcció o altres característiques que poden influir en el comportament sísmic. Així, es durà a terme una anàlisi component a component que permetrà quantificar el dany i situar-lo en punts o zones concretes.

2.3.5 LES CORBES DE FRAGILITAT

A continuació s'ha de definir la probabilitat condicionada de trobar-se en un estat de dany o superar-lo, per un sisme donat. La eina utilitzada pel mètode són les corbes de fragilitat, o funcions de dany. Cada classe de cada element del sistema tindrà una corba característica. Poden estar donades en termes de PGA, com en la Figura 2, o en termes de PGD. La corba que es troba més per sobre dona la probabilitat que l'estat de dany sigui al menys lleu. Per exemple, suposant unes corbes com les de la Figura 2, si tenim un PGA de 0.4g, obtenim una probabilitat de 0.7 que el dany sigui lleu (*Slight/Minor*) com a mínim, i un 0.2 que sigui moderat com a mínim.

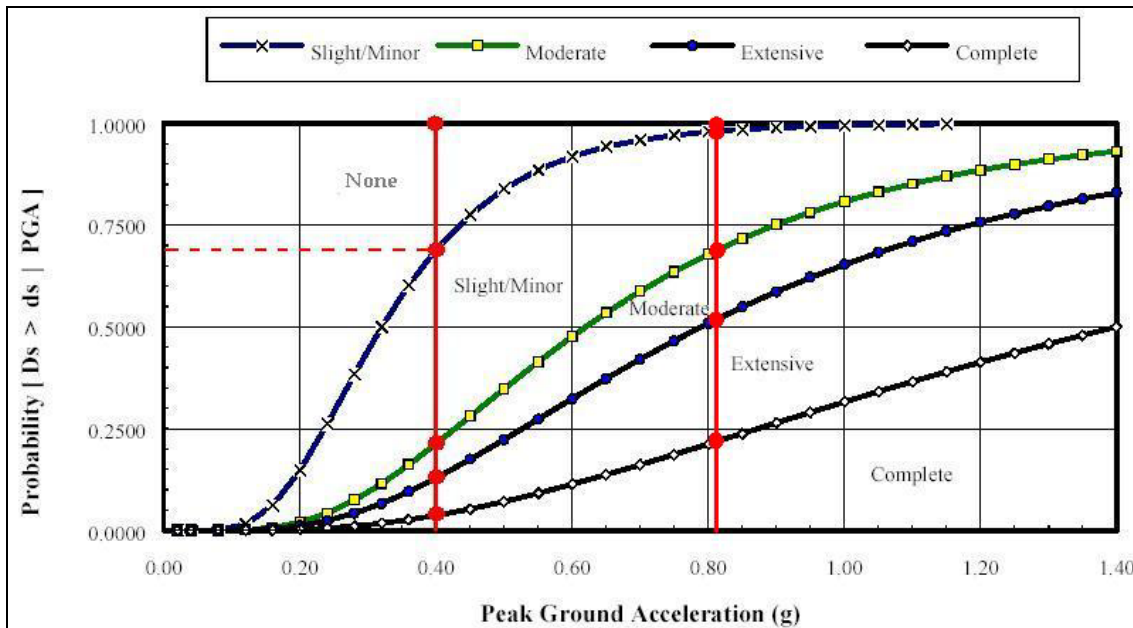


Figura 2. Exemple de corbes de fragilitat per diferents estats de dany en funció del PGA

Matemàticament les corbes de fragilitat es defineixen mitjançant distribucions lognormals amb paràmetres definits: la mitjana i el paràmetre β . La mitjana és el valor per al qual la probabilitat és 0.5 i β és un indicador de dispersió de la distribució. A major β , la corba és més suau. Aquestes expressions són regressions dels danys que han estat observats en sismes anteriors i que han estat filtrades per l'opinió i judici d'experts. També es poden obtenir de models en laboratori o de simulacions numèriques.

L'expressió de les corbes defineix la probabilitat d'estar o superar un cert estat de dany (ds_i) quan l'estructura està sotmesa a una acció sísmica [10]:

$$P[Ds \geq ds_i | X] = \Phi \left[\frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{X}{\mu} \right) \right] \quad (2.1)$$

on:

X és el paràmetre de definició del sisme (PGA o PGD).

μ és el paràmetre de definició mig del sisme (PGA mig o PGD mig).

Φ és la funció de distribució estàndard normal acumulada.

β és la dispersió, la desviació estàndard del paràmetre de definició.

És equivalent dir que la variable X segueix una distribució lognormal de paràmetres μ_x i β_x que dir que $Y = \ln(X)$ té una distribució normal de paràmetres μ i β (En aquest cas els paràmetres μ i β de l'equació (2.1) no són la mitjana i desviació estàndard de X sinó que ho són de $\ln(X) = Y$).

2.3.6 LES Matrius DE DANY

Les matrius de dany provenen de les funcions de dany i serveixen per avaluar la probabilitat condicionada d'estar en un cert estat de dany o excedir-lo per un sisme donat. Són una manera d'expressar numèricament les funcions de dany. Per exemple, per la Figura 2:

Estats de dany	Sisme menor (PGA=0.4g)	Sisme major (PGA=0.81g)
Nul (ds1)	30	2
Lleu (ds2)	50	30
Moderat (ds3)	5	16
Sever (ds4)	10	32
Complet (ds5)	5	20

Taula 1. Matrius de probabilitat de dany de les corbes de la Figura 2.

Les probabilitats d'estar en un cert estat de dany són les següents:

$$P[Ds=ds1|PGA \text{ or } PGD] = 1 - P[Ds \geq ds2|PGA \text{ or } PGD]$$

$$P[Ds=ds2|PGA \text{ or } PGD] = P[Ds \geq ds2|PGA \text{ or } PGD] - P[Ds \geq ds3|PGA \text{ or } PGD]$$

$$P[Ds=ds3|PGA \text{ or } PGD] = P[Ds \geq ds3|PGA \text{ or } PGD] - P[Ds \geq ds4|PGA \text{ or } PGD]$$

$$P[Ds=ds4|PGA \text{ or } PGD] = P[Ds \geq ds4|PGA \text{ or } PGD] - P[Ds \geq ds5|PGA \text{ or } PGD]$$

$$P[Ds=ds_5|PGA \text{ or } PGD] = P[Ds \geq ds_5|PGA \text{ or } PGD]$$

On $P[ds_i]$ és la probabilitat de trobar-se en l'estat de dany i , que pot ser 1 (nul), 2 (lleu), 3 (moderat), 4 (extensiu) i 5 (complet), per un valor donat de PGA o PGD.

Per la Figura 2, per un sisme petit ($PGA=0.40g$), la probabilitat que l'element tingui un estat de dany complet (ds_4) es del 5%, però l'estat de dany més probable en el que es trobarà serà un estat de dany lleu. En canvi, per un sisme gran ($PGA=0.80g$), tenim un 20% de probabilitat que l'estat de dany sigui complet, però l'estat de dany més probable és el sever.

2.3.7 ELS ÍNDEXS

La metodologia incorpora una sèrie d'índexs per quantificar conceptes, que es presenten tot seguit.

ESTAT DE DANY MÉS PROBABLE

Aquest índex ens proporciona valors que representen el nivell de dany estimat. És una mitjana ponderada dels estats de dany on el pes és la probabilitat de trobar-se en cadascun d'ells [11].

$$E[ds_i] = \sum_{i=1}^5 n(ds_i) \cdot P[ds_i] \quad (2.2)$$

on $n(ds_i)$ és el valor "i". Per exemple, per l'estat de dany moderat, $n(ds_3) = 3$. $P[ds_i]$ és la probabilitat de trobar-se en un estat de dany concret.

ÍNDEX DE DANY COMPOST (DR_c)

Ara que ja tenim les probabilitats de trobar-nos en cada estat de dany, es fa una valoració global econòmica del dany usant una eina que proposa el mètode (taules): els índexs de dany (DR_i). Aquests índexs són el tant per cent del cost de reposició que es necessita per reparar l'element. Així, per un dany complet, el DR_i seria del 100%, però per un dany moderat podria ser un 40%.

Els DR_i estan relacionats amb la vulnerabilitat. La vulnerabilitat d'una estructura ve donada com la probabilitat condicional de que un element del sistema tingui un dany determinat per un sisme d'una certa intensitat. De les anàlisis de vulnerabilitat, fent una predicció dels danys ocasionats per un cert sisme, s'obtenen els índex de dany que pateix el sistema. S'obtenen per cada element.

L'índex de dany compost és una manera de valorar el dany global del sistema [1]:

$$DR_c = \sum_{i=2}^5 DR_i \cdot P[ds_i] \quad (2.3)$$

Com que no hi ha pèrdues per l'estat de dany nul ($DR_1=0$), el sumatori va de 2 a 5. Quan es coneix l'índex de dany compost, consultant en quin rang es troba (taules que proporciona HAZUS) s'obté l'estat de dany de cada element.

ÍNDIX DE FUNCIONALITAT COMPOST (FR_c)

L'Índex de funcionalitat compost [11] reflexa la part proporcional d'un determinat element que segueix funcionant passat un cert període de temps des de l'ocurrència d'un event sísmic.

$$FR_c = \sum_{i=0}^5 FR_i \cdot P[ds_i] \quad (2.4)$$

on FR_i són els valors discrets de les funcions de reparació, els tants per cent dels elements que són funcionals, el percentatge de funcionalitat. Depenen, doncs, del temps post-sisme. Venen donats a *HAZUS'99* per les diferents infraestructures.

2.3.8 LES PÈRDUES ECONÒMIQUES DIRECTES

Es poden calcular les pèrdues econòmiques directes multiplicant el DR_c pel valor de reposició de cada element. En el mètode *HAZUS'99* es donen taules amb el cost de reposició de cada component del sistema en dòlars tasats l'any 1994. La seva aplicació a regions i països d'Europa requereix taules específiques de costos econòmics. Com que no se'n disposen, no s'efectua la valoració econòmica. Tot i això, l'estudi deixa a punt aquesta avaluació, que es pot realitzar de manera directa tant bon punt es disposi de taules de valoració.

2.3.9 FUNCIONALITAT I TEMPS DE RECUPERACIÓ

Per cada estat de dany i , segons l'element, *HAZUS* proporciona unes corbes de restauració en les que es reflexa la funcionalitat respecte els dies post-sisme, l'augment de la funcionalitat de l'element a mesura que es va reparant o reposant fins arribar a una operativitat del 100%. A partir d'aquestes corbes, podem obtenir la funcionalitat que tenen els elements del sistema i el temps de recuperació que els resta fins a recuperar la operativitat normal.

De la mateixa manera que les corbes de fragilitat, les corbes de funcionalitat han estat estimades basant-se en sismes passats i/o en l'opinió d'experts.

2.4 EL SIG A *HAZUS'99*

Els Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG) faciliten la manipulació i exposició de dades i permeten mostrar els resultats en mapes i taules. La informació geogràfica pot ser superposada i es poden comparar resultats aplicant diferents escenaris sísmics. Mitjançant el SIG *ArcView* podem georeferenciar, modificar i estructurar els sistemes i línies vitals objecte d'estudi. Podem localitzar els elements vulnerables i disposar de les seves propietats (classificació, cost de reposició...) per estimar danys, operativitat i pèrdues econòmiques.

2.4.1 REPRESENTACIÓ DE LA INFORMACIÓ: INVENTARI

Bàsicament tindrem dues capes de dades georeferenciades. En la primera es trobarà representada l'acció sísmica, això són els valors de PGA i PGD esperats en tota l'àrea d'estudi. En la segona es trobaran els sistemes d'estudi amb tots els seus components detallats. La capa de perill sísmic s'extrau de les conclusions de l'apartat 3.4 i,

estructuralment, és una capa de polígons (excepte per les falles, que es modelen com elements lineals) amb informació temàtica associada.

Totes dues capes poden ser superposades i representades en mapes. A més, cada tema tindrà associada una taula d'atributs definits per cada element.

Sobre aquesta estructura bàsica, s'aplicarà la metodologia marcada per *HAZUS* fent ús de les eines que disposa *ArcView* per manipular la informació.

2.4.2 REPRESENTACIÓ DE RESULTATS

Amb *ArcView* es poden dur a terme operacions com superposar mapes per unió, intersecció o identitat, realitzar anàlisis d'àrees d'influència (*buffers*) o anàlisis de xarxes (camins òptims...). El resultat d'aplicar aquests processos es pot representar de manera molt variada: en mapes temàtics, mapes de prismes, models digitals del terreny i perfils, taules i informes numèrics, o en gràfics estadístics. Aquesta varietat permet a l'usuari una representació òptima dels resultats de l'anàlisi.

2.5 RESUM I CONCLUSIÓ

La metodologia que s'aplica en el present estudi és *HAZUS'99*, per poder avaluar les pèrdues associades a un event sísmic sobre els elements que componen la xarxa de gas, oleoductes i etilenoeductes de Catalunya i de la ciutat de Barcelona. El mètode aporta eines per estimar pèrdues pels sistemes de disseny, que permetrà anticipar-se a les conseqüències de sistemes futurs i desenvolupar plans i estratègies per reduir el risc i també per reparar i reconstruir els bens afectats.

Es presenten mètodes d'avaluació de dany i càlcul de pèrdues. Com a resultat, podem obtenir una estimació quantitativa de pèrdues en termes de cost de reparació i reposició. També permet avaluar pèrdues de funcionalitat i temps de restauració de serveis crítics.

La perillositat potencial sísmica es manifesta en forma de sacseig del sòl (*ground motion*) i col·lapse del sòl (*ground failure*: líquefacció, esllavissades i falles superficials).

Per avaluar el dany, el primer pas és definir els estats de dany per cada component del sistema, que són una divisió del grau de dany en 5 categories: nul, lleu / despreciable, moderat, sever i complet. Cada estat de dany té associat un índex de dany (segons l'element) amb el qual es calculen les pèrdues econòmiques directes.

A continuació s'ha de definir la probabilitat condicionada de trobar-se en un estat de dany o superar-lo, per un sisme donat. L'eina utilitzada pel mètode són les corbes de fragilitat, o funcions de dany. Les matrius de dany provenen de les funcions de dany i serveixen per avaluar la probabilitat condicionada d'estar en un cert estat de dany per un sisme donat. Es fa una valoració global del dany usant una eina que proposa el mètode: els índexs de dany (Dri). Aquests índexs estan relacionats amb la vulnerabilitat.

El dany global s'expressa amb l'índex de dany compost (DRc). Es poden calcular les pèrdues econòmiques directes multiplicant el DRc pel valor de reposició de cada element. Es proporcionen unes corbes de restauració en les que es reflecteix la

funcionalitat respecte els dies post-sisme. Per quantificar la funcionalitat es calcula l'índex de funcionalitat FRc.

Els sistemes d'informació geogràfica són una eina adient per aquest tipus d'estudis amb gran volum de dades georeferenciades. Permeten una gestió ràpida i senzilla de la informació i una bona representació de l'inventari de dades i els resultats de l'anàlisi.