

«Comportamiento Sísmico» de los Sistemas Urbanos Complejos

ADRIANA GALDERISI Y
ANDREA CEUDECH

DIPIST - DEPARTAMENTO DE PLANIFICACIÓN URBANA Y REGIONAL,
UNIVERSIDAD FEDERICO II DE NÁPOLES (ITALIA)

T

eniendo en cuenta las diversas consideraciones técnicas y sociales y basado en el análisis de los fenómenos sísmicos, este estudio trata de entender cómo responde a un terremoto la ciudad, considerada como un sistema complejo. Empezando por la analogía entre el comportamiento de un sistema complejo sometido a una presión externa y una ciudad afectada por un terremoto, el estudio explica al detalle el «comportamiento sísmico» de los sistemas urbanos. Este análisis subraya el papel de la planificación urbana en la atenuación de los riesgos sísmicos, señalando que dicha atenuación requiere tanto intervenciones estructurales en el conjunto de edificios e infraestructuras como medidas para afrontar el riesgo sísmico en su dimensión «urbana».

INTRODUCCIÓN

Si observamos los daños causados por los terremotos en distintas ciudades, podemos ver que tales daños tienen muchas facetas, que varían con el tiempo a partir del momento mismo del terremoto. No obstante, la mayoría de los estudios dedicados a describir los daños causados por un hecho sísmico, considerando la ciudad como una «suma» de elementos (edificios más red de infraestructuras), han estado dirigidos a los daños físicos que se producen inmediatamente después del seísmo y a las consiguientes pérdidas de vidas humanas.

Considerando la ciudad como un todo, muy pocos estudios han tratado de poner de manifiesto las distintas dimensiones del daño estudiando las diversas facetas del daño urbano (físico, funcional, económico, social) y los distintos momentos en los que se producen a partir del terremoto.

Por consiguiente, el objetivo último de esta investigación es definir medidas de planificación urbana para mejorar la capacidad de respuesta de una ciudad, entendida como un todo, ante un hecho sísmico o, en otras palabras, mejorar el «comportamiento sísmico» de la ciudad. Sin perder de vista este objetivo general, los objetivos parciales de este estudio se pueden resumir como sigue:

- establecer un marco conceptual para analizar el comportamiento sísmico de una ciudad;
- diseñar las herramientas necesarias para describir y predecir el comportamiento sísmico de una ciudad.

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS SISTEMAS URBANOS COMPLEJOS

Con relación a los anteriores objetivos, la primera pregunta que hemos tratado de responder basándonos en el análisis de algunos casos internacionales, ha sido: ¿Qué sucede cuando una ciudad se ve sacudida por un terremoto?

Para responder a esta pregunta hemos comparado dos terremotos recientes: el de Los Angeles-Northridge, Estados Unidos (17 de enero de 1994) y el de Kobe, Japón (17 de enero de 1995), ciudades con una población parecida. Ambos tuvieron una magnitud parecida (6,9 grados Richter el de Kobe y 6,7 el de Northridge) y se produjeron casi a la misma hora (antes de amanecer). Sin embargo, afectaron a dos áreas metropolitanas muy distintas en cuanto a su tejido urbano, distribución territorial de actividades e infraestructuras, etcétera. Por eso, a pesar de la similitud entre ambos fenómenos naturales, los resultados fueron muy distintos¹. Los daños de la catástrofe de Northridge se evaluaron en unos 12.000 millones de euros, una de las catástrofes naturales más caras de la historia de Estados Unidos, mientras que los de Japón ascendieron a unos 117.000 millones de euros (Maddox, 2002).

Esta desproporción entre los daños producidos en las dos áreas metropolitanas se debió a varios

factores. En primer lugar, a las características de cada modelo urbano. La textura urbana de Northridge es regular, a menudo ortogonal, por lo que resulta muy accesible, mientras que Kobe es más irregular y se desarrolla en una dirección principal. Además Kobe está situada entre el mar y la montaña, con pocas conexiones transversales y accesos desde el exterior, con una parte antigua con una textura densa de pequeñas callejas de difícil acceso. Estos dos modelos urbanos tan distintos determinaron las distintas condiciones de accesibilidad para los equipos de rescate.

En segundo lugar, tras el terremoto de Kobe se produjeron incendios por la rotura de las tuberías de gas, aunque fueron atacados con 1.300 bomberos bien entrenados. La situación empeoró porque había muchas casas antiguas de madera en calles y callejas estrechas, que retrasaron la acción de los bomberos y por la rotura de las tuberías de agua.

Resumiendo, la comparación de estos dos casos pone de manifiesto que, cuando un terremoto afecta a una gran zona urbana, se producen daños que sólo en parte tienen que ver con las características geológicas del terreno. Esos daños pueden venir producidos: por la antigüedad y las características técnicas y estructurales de los edificios e infraestructuras, por la morfología de la textura urbana, por la densidad de la edificación y de la población, por el estado de conservación de los edificios, por la accesibilidad y permeabilidad de la estructura urbana y por la existencia de medidas de prevención de riesgos. Además, el terremoto de Kobe revela claramente las múltiples interacciones entre los distintos hechos sísmicos que determinan los daños que se producen durante y después de un terremoto (EQE International, 2002; USGS, 1996), así como la dimensión compleja de un seísmo catastrófico en un contexto metropolitano amplio. El impacto del seísmo no es sólo físico, sino también funcional, organi-

¹ El terremoto de Northridge produjo 57 muertos y unos 1.500 heridos, mientras que el de Kobe produjo 5.500 muertos y unos 35.000 heridos. Los edificios que sufrieron daños de moderados a graves fueron unos 12.500 en Northridge frente a 180.000 en Kobe.

zativo, psicológico y social. Además los daños, en su sentido más amplio y variado, vienen determinados por la interacción de fenómenos que pueden producirse en cualquier momento después del terremoto.

Después hemos hecho un análisis del terremoto de Nápoles en 1980, que se distingue por los muchos daños, aparte de los físicos, producidos en las primeras 12 horas que siguieron al seísmo: atascos de tráfico, dificultades de acceso de los servicios de emergencia, falta de espacios abiertos seguros, falta de servicios públicos, dificultades para las actividades de rescate (Galderisi y Ceudech, 2005).

Resumiendo, todos los hechos investigados demuestran que en el instante del seísmo se producen daños físicos en los edificios, con la consiguiente pérdida de vidas humanas. Luego, en las primeras 24 horas siguientes al terremoto (fase de emergencia), se produce otro tipo de daños no relacionados totalmente con los físicos: dificultad de ofrecer atención sanitaria, dificultad para alojar a la gente, atascos de tráfico, dificultad de ofrecer los servicios básicos como agua, gas, teléfono, etcétera. Posteriormente, a medio y largo plazo, generalmente se producen otros daños económicos y sociales: pérdida de actividad, paro, etcétera.

En concreto, los casos estudiados indican que el daño es un concepto multidimensional que no se puede reducir a su aspecto físico. No obstante, hasta ahora se ha estudiado más el daño físico y el sufrimiento humano, mientras que apenas se ha investigado el «daño funcional» que se puede producir en la fase inmediatamente posterior al seísmo, aunque ese daño sea tan importante como el físico y además produce efectos a largo plazo con consecuencias económicas y sociales que pueden llegar hasta la «muerte» de la ciudad.

Hasta ahora, la mayoría de los estudios de los daños urbanos debidos a terremotos, aplicados a

modelos urbanos conceptuales y operativos, han funcionado para el análisis del riesgo de daños sísmicos a los edificios; a partir de ahí, el daño a la ciudad se interpretaba como «la suma» de los daños a sus distintos elementos. Incluso aunque actualmente está ya muy extendida la idea de que las ciudades son sistemas complejos formados por elementos estrechamente interrelacionados, hasta ahora ha habido muy pocos estudios que, considerando la ciudad como un todo, hayan subrayado la dimensión «múltiple» del daño (físico, funcional, económico, etcétera), debido sobre todo a las interacciones complejas entre los elementos urbanos.

Si interpretamos la ciudad como un sistema complejo, se pueden entender mejor las consecuencias debidas al impacto de un seísmo. Por eso sería muy útil comparar el comportamiento de un sistema sometido a una presión externa con el de una ciudad afectada por un terremoto.

Desde finales de los años 1940, la teoría de sistemas se ha aplicado a muchos campos como la biología, la cibernética, etcétera. Una primera sistematización de estos estudios aparece en la «General System Theory» (von Bertalanffy, 1971). Durante las décadas de 1960 y 1970 se aplicó la teoría de sistemas al análisis de fenómenos territoriales y urbanos (Alexander, 1967; Mc Loughlin, 1973). A partir de 1970 surgieron varias teorías relacionadas con el comportamiento de sistemas complejos² que han puesto de manifiesto el papel de las relaciones no lineales entre los elementos de un sistema, sus características adaptativas y el papel que desempeña el azar en su evolución (Thom, 1972; Prigogine, 1976).

Respecto a las teorías sobre sistemas complejos y su comportamiento, se puede decir que un sistema complejo sometido a una presión externa puede reaccionar de tres maneras: restableciendo su equilibrio dinámico, evolucionando hacia nueva organización o muriendo. A igualdad de la pre-

² Paradigma de la complejidad, Teoría de catástrofes, Teoría de la estructura disipativa.

sión actuante, estas tres posibilidades vienen determinadas por la capacidad del sistema a hacer frente a la presión externa, es decir, por su resistencia. Pero ¿cómo definiríamos la resistencia de un sistema complejo?

El concepto de resistencia fue introducido a principios de los años 1970 para definir la capacidad de los sistemas naturales para soportar perturbaciones conservando su estructura y funcionamiento. Por tanto, la resistencia depende de la «carga» que pueda soportar un sistema natural sin que cambien su estructura y sus procesos. Así pues, un sistema resistente es un sistema capaz de absorber perturbaciones y recuperar el equilibrio (Holling, 1973).

Posteriormente, el concepto de resistencia se ha ido ampliando con referencia a los sistemas complejos subrayando la capacidad de tales sistemas, sometidos a una presión externa, para renovarse y reorganizarse (Gunderson y Holling, 2002), llegando a un nuevo estado de equilibrio. También se ha definido la resistencia como la cantidad de perturbación que puede soportar un sistema permaneciendo dentro del mismo estado o campo de atracción, o la capacidad del sistema permaneciendo dentro del mismo estado o campo de atracción, o la capacidad del sistema para renovarse o reorganizarse cuando ocurre algún cambio (Carpenter *et al.*, 2001; Folke *et al.*, 2002; Gunderson *et al.*, 2002). Es interesante observar que, en un sistema resistente, tal como lo definen Folke *et al.* (2002), el cambio puede crear oportunidades de desarrollo e innovación, haciendo pasar al sistema de un estado de equilibrio a otro.

El asunto de la resistencia fue tratado ampliamente en la reciente Conferencia Mundial sobre reducción de catástrofes que tuvo lugar en Kobe en enero de 2005. En el documento final de la conferencia se define la resistencia como la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad, expuestos potencialmente a un riesgo, para adaptarse al cambio resistiendo o modificándose con el

fin de mantener o de alcanzar un nivel aceptable de estructura y funcionamiento. En pocas palabras, podemos decir que un sistema resistente es capaz de absorber el impacto restableciendo su equilibrio dinámico o evolucionando hacia una organización distinta.

Relacionado estrechamente con el concepto de resistencia tenemos el de vulnerabilidad. El término vulnerabilidad indica la predisposición de las personas, bienes o actividades a sufrir daños por una presión externa. Desde este punto de vista, es una medida de la fragilidad o incapacidad de las personas o comunidades, edificios, infraestructuras o territorios de soportar la presión. La vulnerabilidad de un sistema, tal como la definen Fortune y Peters (1995), es la inversa de su capacidad de soportar perturbaciones, lo que a su vez se puede considerar como un indicio de su resistencia, subrayando que, en un sistema vulnerable, hasta los cambios más pequeños pueden ser devastadores. La estrecha relación entre los conceptos de resistencia y vulnerabilidad queda clara en referencia a las definiciones más recientes de vulnerabilidad que, aunque referidas a la sociedad, am-

El término vulnerabilidad indica la predisposición de las personas, bienes o actividades a sufrir daños por una presión externa.

plían el concepto pasando de la propensión o susceptibilidad a sufrir daños a la incapacidad de prevenir, afrontar, soportar y superar el impacto de un acontecimiento catastrófico (Wisner *et al.*, 2004). Hasta ahora se ha estudiado en profundidad la vulnerabilidad de los edificios e infraestructuras, pero mucho menos la «vulnerabilidad urbana».

Así pues, con referencia a la propuesta analogía entre ciudades y sistemas complejos, se puede decir que una ciudad afectada por un sismo podrá evolucionar de tres maneras distintas, dependiendo de la resistencia de la ciudad. Esas tres maneras representan los distintos «comportamientos sísmicos» de las ciudades. La primera posibilidad es soportar el cambio recuperando su equilibrio en poco tiempo, aunque el estado de equilibrio de un sistema complejo sea un estado dinámico, siempre distinto al anterior. La segunda

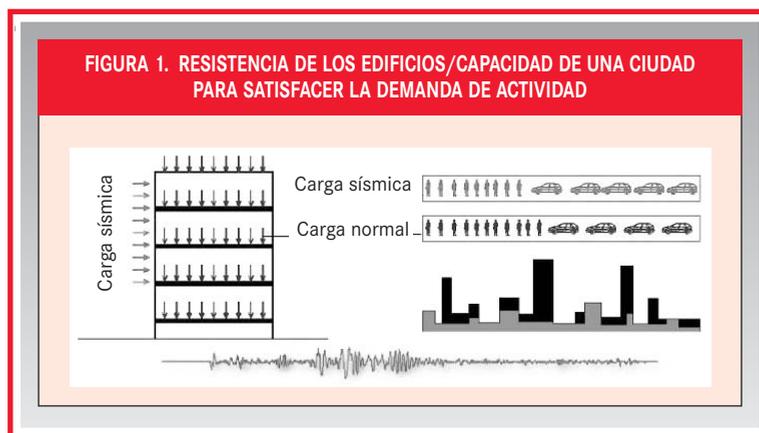
posibilidad es que el sistema pase a un estado distinto, aprovechando el cambio como oportunidad de renovación y desarrollo. Por ejemplo, tras el terremoto de Mesina y Reggio Calabria en 1908³, la ciudad de Reggio Calabria fue reconstruida con ejes regulares y ortogonales que cambiaron completamente su trazado original. Por último, la tercera posibilidad es que el sistema urbano pierda su estructura y función y se encamine a su desaparición. Este fue el resultado para muchos pueblos afectados por el terremoto de Val di Noto en 1693⁴.

Respecto a los significados reseñados del concepto de resistencia, se puede decir que, igual que el concepto de daño, también el de vulnerabilidad/resistencia urbana es un concepto multidimensional. La capacidad de una ciudad de responder a un terremoto dado, su comportamiento sísmico, depende de la resistencia urbana, que tiene muchos componentes, todos ellos igualmente importantes: la resistencia de los edificios e infraestructuras, la capacidad de organización de las instituciones y el desarrollo económico y cultural del contexto urbano. Para

analizar la resistencia urbana hay que tener en cuenta todos estos aspectos.

La planificación urbanística puede contribuir al análisis y mitigación de todos los componentes de la vulnerabilidad/resistencia urbana. No obstante, y en nuestra opinión, su principal tarea es desarrollar la capacidad de los sistemas urbanos para hacer frente a la demanda de actividades y servicios a la población en la fase post-seísmo. Este es el «componente funcional» de la vulnerabilidad/resistencia del sistema urbano y el más directamente relacionado con la organización espacial y funcional de la ciudad (Galderisi, 2004).

Para entender mejor este componente se puede decir que, así como la resistencia de los elementos físicos depende de las características morfológicas y estructurales de los edificios e infraestructuras, que les permiten responder a la presión ejercida por el terremoto, así la capacidad del sistema urbano para atender la demanda de actividades y servicios en la fase post-seísmo depende de la organización espacial y funcional de la ciudad que le permite responder a dicha demanda (figura 1).



³ El terremoto de Mesina de 28 de diciembre de 1908, que dio lugar a un violento tsunami que afectó a las costas de Sicilia y Calabria, fue, con el de Val di Noto en 1693, uno de los seísmos más catastróficos de la historia de Italia. La intensidad máxima se dio en Reggio Calabria, donde el porcentaje de daños en edificios y de pérdidas de vidas humanas fue el más alto. Los daños de Mesina fueron mayores dada su mayor densidad de población (90.000 habitantes por 27.000 de Reggio Calabria). Probablemente, el número de víctimas estuvo entre 60.000 y 120.000).

⁴ El terremoto de Val di Noto del 11 de enero de 1693 causó la destrucción total de más de 45 pueblos y un total de unas 60.000 víctimas mortales. Su intensidad fue igual o superior al grado IX de la escala MCS y afectó a unos 5.600 kilómetros cuadrados.

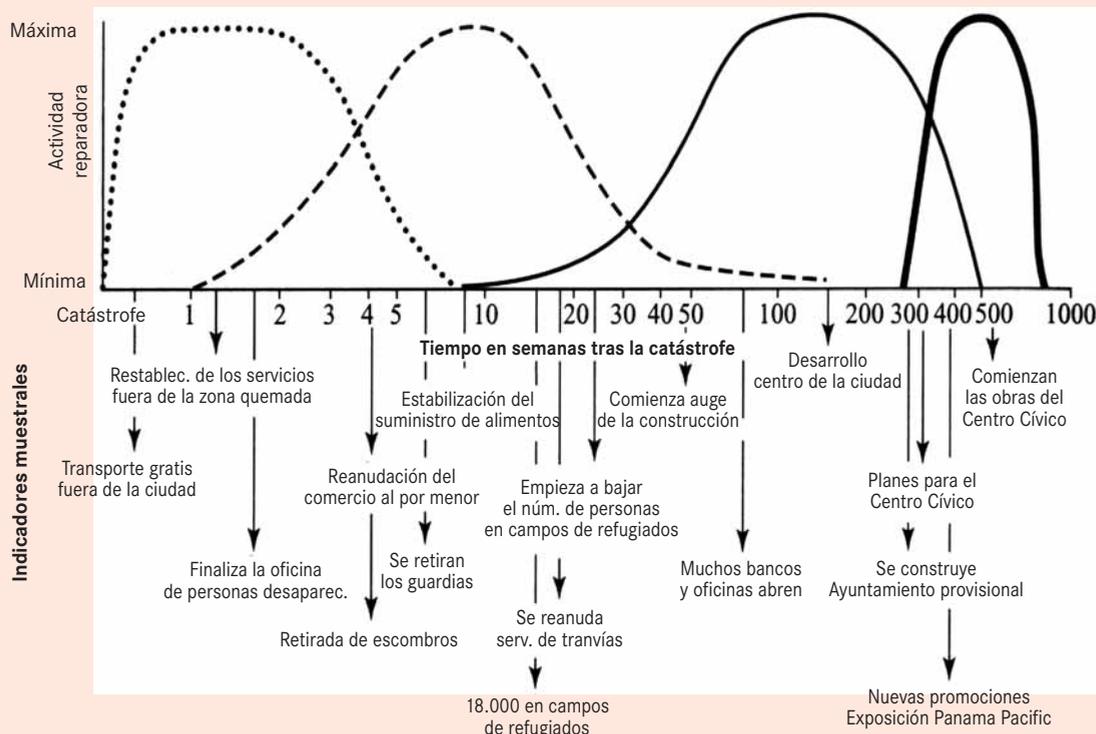
COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS SISTEMAS URBANOS: EL «COMPONENTE FUNCIONAL» DE LA VULNERABILIDAD/RESISTENCIA

Desde mediados de la década de 1970 se ha llevado a cabo distintos análisis sobre el componen-

te funcional de la resistencia urbana que, como acabamos de decir, es uno de los determinantes del comportamiento sísmico de los sistemas urbanos. Por ejemplo, la figura 2 presenta un modelo de actividad de recuperación tras una catástrofe elaborado a finales de esa década, que describe las actividades necesarias tras un terremoto y el periodo de tiempo en el que se desarrolla cada una de ellas (Vale y Campanella, 2005). Este modelo se aplicó a la descripción del terremoto de San Francisco de 1906.

En Italia, con un modelo similar, L. di Sopra (1981) analizó la evolución de la demanda de actividad y servicios tras el terremoto de Friuli en 1976. Con más detalle, el estudio de Di Sopra representa la evolución de la demanda debida al terremoto mediante curvas que tienen for-

FIGURA 2. ACTIVIDADES DE RECUPERACIÓN DESPUÉS DEL TERREMOTO DE SAN FRANCISCO DE 1906



Fuente: Vale y Campanella, 2002, tomado de *Reconstruction Following Disaster*, 1977.

ma de ola, con un ascenso rápido al principio. Las curvas presentan tres umbrales: de entrada, crítico (valor máximo) y de caída (cuando la demanda, ya satisfecha, empieza a disminuir). Cada curva tiene distinto umbral de entrada, que se produce en un momento distinto tras el terremoto. La envolvente de esas curvas representa la demanda total (figura 3).

Basándonos en los susodichos estudios, hemos analizado los hechos tras el terremoto de 1980 que afectó a la ciudad histórica de Nápoles y hemos descrito mediante curvas la evolución de la relación entre la demanda y oferta de actividad. Esos hechos los hemos reconstruido basándonos en las crónicas de los diarios de la época, porque hay daños que los informes oficiales no consideran como funcionales.

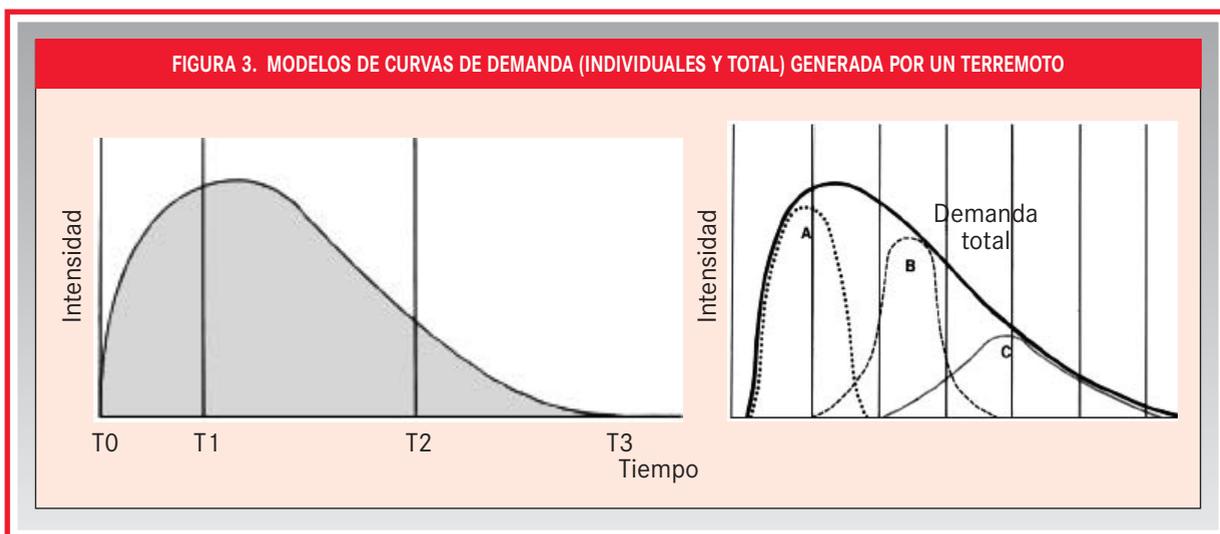
El terremoto de 1980 en la ciudad histórica de Nápoles produjo daños muy extendidos pero no muy graves en los edificios, con pocos colapsos. A pesar de ello, el hecho sísmico provocó una importante crisis funcional debido a la falta de funcionamiento de algunas zonas urbanas, con consecuencias en amplias zonas de la ciudad y que en muchos casos duraron bastante tiempo tras la emergencia. La ciudad histórica de Nápoles se caracteriza también por una tipología heterogénea,

una elevada densidad residencial, la presencia de actividades urbanas e importantes flujos turísticos.

Además, las texturas históricas se caracterizan muy a menudo por ser muy compactas y poco accesibles, debido a lo irregular de sus redes viarias secundarias, con pocas calles y muy inclinadas. Todas estas características determinan, sobre todo en periodos de gran afluencia turística, pero incluso en épocas normales, crisis y/o congestiones funcionales debidas a la ineficacia del sistema para satisfacer la demanda normal de actividad.

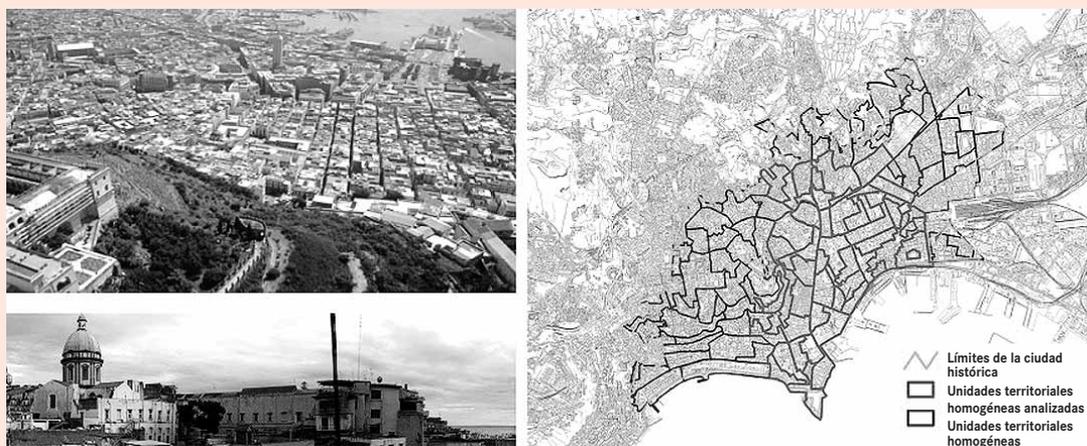
Hemos clasificado los principales daños funcionales producidos en Nápoles por el terremoto de 1980 siguiendo estos pasos:

- recogida y clasificación de la información sobre los hechos acaecidos durante la primera semana después del terremoto;
- definición de los componentes de la oferta y la demanda;
- definición de los daños funcionales, asignando notas a los componentes de la demanda no satisfechos. Las notas se asignan según los criterios cualitativos que expresan los artículos de prensa, la frecuencia con que aparece el tema en los artículos y el «peso» del propio artículo (su ubicación en el periódico y su extensión).



Fuente: Di Sopra, 1981.

FIGURA 4. LA CIUDAD HISTÓRICA DE NÁPOLES



Por lo que respecta a la elección de los componentes de la oferta y de la demanda, debemos señalar que nuestra atención se ha centrado en los componentes de la demanda relacionados más directamente con las características espaciales y funcionales de la ciudad. Por eso, con relación a las primeras 24 horas tras el terremoto, hemos analizado los siguientes componentes: acceso

desde las zonas afectadas a los puntos de concentración de emergencia y a los servicios de atención sanitaria y acceso de los equipos de rescate a las zonas afectadas (figura 5).

Para los componentes de la oferta hemos tenido en cuenta: la ubicación y distribución de los puntos de concentración de emergencia, la ubicación y distribución de las instala-

FIGURA 5. COMPONENTES DE LA OFERTA Y LA DEMANDA

	Demanda	Oferta
Primeras 24 horas tras el terremoto.	Acceso desde zonas afectadas a <ul style="list-style-type: none"> - Puntos de concentración de emergencia. - Servicios sanitarios Acceso de los equipos de rescate a las zonas afectadas.	Ubicación y distribución de puntos de concentra. de emerg. Ubicación y distribución de instal. de emergencia. Adecuación de la red viaria.
Primera semana	Viviendas provisionales.	Alojamiento provisional.
	La demanda depende sobre todo de la consistencia y distribución de la población.	La oferta depende sobre todo de las características morfológicas de la textura urbana y de las actividades de distribución

ESTUDIO

ciones de emergencia y la adecuación de la red viaria. Para la primera semana tras el terremoto, a dichos componentes de la demanda y la oferta hemos añadido la demanda de viviendas provisionales y la oferta de alojamiento provisional. Evidentemente, los componentes de la demanda de servicios y actividades tienen más que ver con la consistencia y distribución de la población, mientras que la oferta de espacio y actividades depende fundamentalmente de las características morfológicas de la textura urbana y de la ubicación y distribución de las actividades.

En resumen, el análisis de los terremotos de Friuli y Nápoles nos permite señalar que:

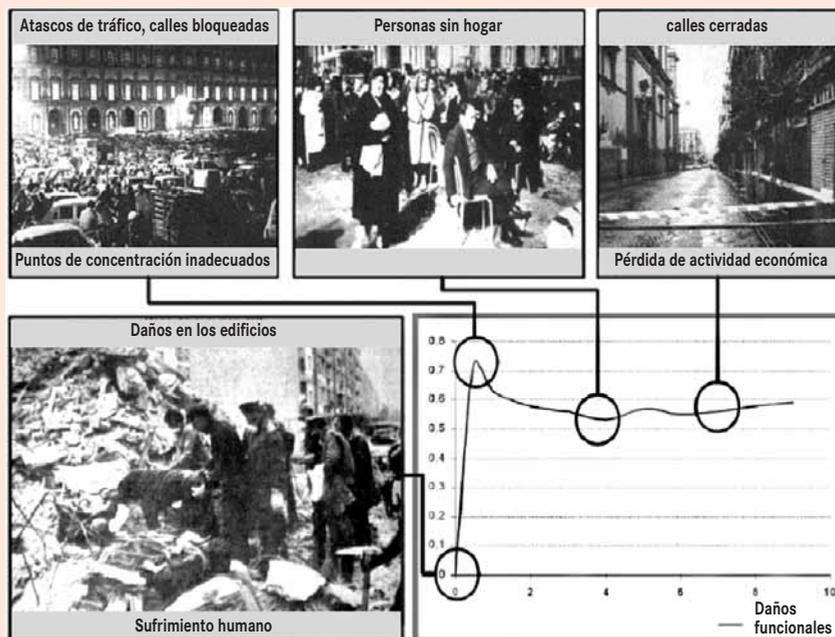
- la capacidad de una ciudad para satisfacer la demanda de actividades y servicios en la fase post-seísmo se puede representar mediante curvas que tienen forma de ola;
- las curvas presentan umbrales que significan cambio de estado del sistema;

- las curvas de cada tipo de demanda (o actividad de respuesta) tienen distintos «umbrales de entrada»;
- la demanda insatisfecha (diferencia entre demanda y oferta) representa el «daño funcional» del sistema.

CÓMO PREDECIR EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE UNA CIUDAD

Hasta ahora sólo se han realizado análisis *a posteriori* del comportamiento sísmico. Para poder aplicar el mismo modelo interpretativo a la predicción del comportamiento sísmico de una enti-

FIGURA 6. DAÑOS FUNCIONALES EN NÁPOLES TRAS EL TERREMOTO DE 1980



dad urbana afectada por un terremoto, debemos tener en cuenta que los sistemas complejos son no lineales y, por tanto, su evolución no es predecible basándose en las condiciones iniciales del sistema; y que los sistemas complejos son adaptativos, es decir, que tienen capacidad de autoorganizarse. Como dice Louise Comfort (1995), «los sistemas autoorganizativos reasignan espontáneamente sus recursos y reorganizan sus actividades para adaptar mejor su funcionamiento interno al entorno exterior inmediato».

Las características de los sistemas complejos que recoge Comfort hacen todavía más difícil hacer predicciones del comportamiento sísmico urbano en lo que respecta a los aspectos de la residencia urbana no relacionados con la resistencia de los edificios o las infraestructuras. En concreto, la capacidad de autoorganización reside fundamentalmente en la posibilidad de predecir la capacidad de la ciudad para hacer frente a la demanda de actividades y servicios producida después del seísmo.

No obstante, dado un seísmo es posible señalar los distintos componentes de la demanda y trazar algunas curvas, aunque sean sencillas, para poder seguir su evolución. Esta representación nos permite identificar los componentes más importantes de la demanda producida por los daños funcionales y comparar su evolución con la oferta existente. De este modo se pueden delinear las medidas de planificación urbana destinadas a mejorar la oferta ordinaria o a reorientar la demanda, aplicando con eficacia técnicas de predicción basadas en hipótesis.

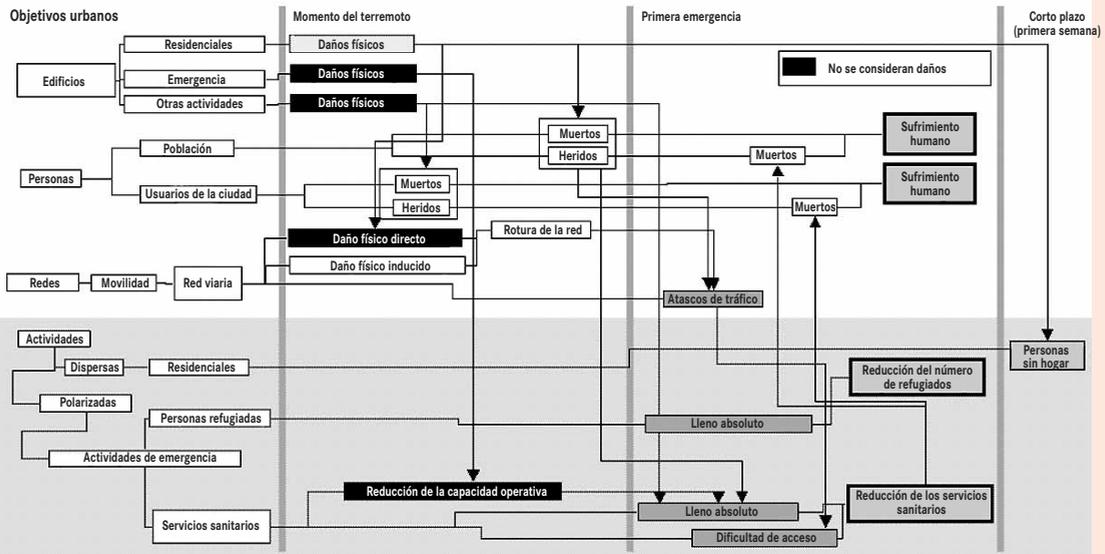
Generalmente, en el análisis de riesgos se emplean dichas técnicas para establecer una configuración determinada del riesgo que permita profundizar sólo en una parte de lo que sucederá tras el acontecimiento. «Establecer hipótesis quiere decir aceptar la ignorancia y construir uno o más supuestos entre distintas posibilidades de fenómenos urbanos: ¿Qué sucedería si...?, donde la hipótesis, lo que sigue al «si», se debe encontrar con dificultad entre algunos síntomas, predicciones y tendencias extraídas de la obser-

vación tanto del presente como de su historia» (Secchi, 2000).

Además la hipótesis es una herramienta importante para comunicar el riesgo a la población y para que los técnicos encargados de definirla compartan la información. Desde este punto de vista, la posibilidad de comunicar perfectamente lo que podría ocurrir en caso de un seísmo, puede contribuir a elevar la conciencia de riesgo de la sociedad. Hasta ahora se han desarrollado bastante las hipótesis de predicción de daños referidas sobre todo a daños físicos y a sufrimiento humano. Las principales referencias de establecimiento de hipótesis de daños son las numerosas aplicaciones internacionales del programa HAZUS (Hazards United States) desarrollado por la FEMA (Federal Emergency Management Agency) norteamericana. A partir de datos heterogéneos como las características del riesgo o de la población, este software permite evaluar los daños esperados en términos de sufrimiento humano, daños en los edificios e infraestructuras, personas sin hogar, etcétera. Pero todavía no profundiza en la predicción de daños referidos a la pérdida de eficiencia del sistema urbano o, en otras palabras, al daño debido a la superación de la capacidad de un sistema urbano para hacer frente a la demanda de actividades y servicios producida por el terremoto.

Sólo hace poco algunos autores japoneses (Kajitani, Okada, Tatano y Motohisa, 2002) e italianos (Nuti y Vanzi, 1999) han desarrollado hipótesis predictivas de daños dirigidas a prever los daños funcionales no relacionados directamente con los físicos, teniendo en cuenta aspectos de la fase de emergencia post-seísmo, con especial referencia a la relación existente entre daños a los edificios e infraestructuras y situaciones de crisis funcional debidas a la falta de eficacia de los servicios de emergencia. Basándose en estos estudios, hemos establecido una hipótesis de daños en una zona de la ciudad histórica de Nápoles (figura 7) para un terremoto de grado 7 en la escala de Mercalli, como el de 1980, que se produjera entre las 8 de la tarde y

FIGURA 7. ESTRUCTURA DE NUESTRA HIPÓTESIS



las 8 de la mañana siguiente. Con relación a los objetivos posiblemente afectados por el hecho sísmico y al desarrollo de la emergencia en el tiempo, hemos investigado algunos de los posibles daños en cadena producidos por un hecho sísmico específico en un momento dado.

La estructura de esta hipótesis se basa en el diagrama del árbol desarrollando en forma de fila y columnas. En las filas situamos distintos grupos de objetivos urbanos que se pueden ver afectados por el terremoto, por ejemplo las personas, los edificios, redes de infraestructuras, actividades, etcétera. En las columnas situamos los distintos períodos de tiempo que queremos considerar: el instante inmediato tras el terremoto, la primera fase de emergencia (las 24 horas posteriores al terremoto), el corto, medio y largo plazo. Para cada objetivo hemos establecido la magnitud del daño, teniendo en cuenta que cada daño se produce en un momento distinto (figura 7). Una vez elegido el hecho sísmico y el momento de producirse, la hipótesis incluye:

- la distribución de los daños a edificios;
- la evaluación de muertos y heridos;
- la evaluación de la pérdida de eficacia del sistema urbano (daños funcionales).

El punto de partida para la definición de los componentes del daño funcional es el establecimiento de una hipótesis referida al instante del terremoto, cuando se producen los daños inmediatos (a los edificios y el consiguiente sufrimiento humano). El primer objetivo del establecimiento de una hipótesis es definir la distribución del daño entre los edificios, para lo que se necesita un enfoque multidisciplinario; pero para nuestra investigación decidimos suponer que esa distribución de los daños a edificios con relación a las unidades territoriales en las que se subdivide la ciudad histórica de Nápoles. A ese nivel de daños le aplicamos un coeficiente de reducción en cada unidad territorial, para tener en cuenta la reconstrucción de los edificios llevada a cabo tras el terremoto de 1980, aunque dicho coeficiente no

introduce variaciones importantes en los resultados obtenidos. Las unidades territoriales tomadas como base para nuestro estudio se han definido basándonos en la identificación de zonas urbanas de textura, antigüedad de los edificios, actividades y morfología homogéneas (figura 4).

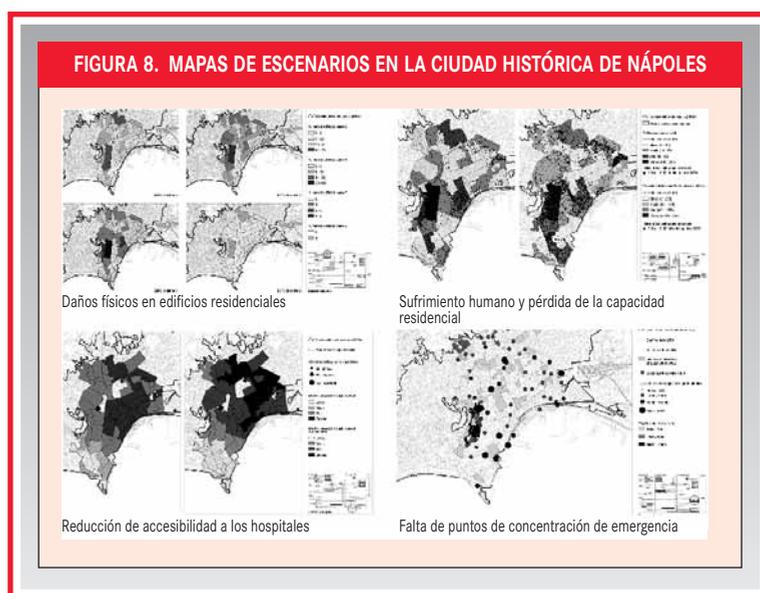
La distribución de la población, es decir, de las personas afectadas por el terremoto durante la noche en que se produce, se ha tomado del censo de Istat (Istituto Nazionali di Statistica) de 1991. La evaluación del sufrimiento humano se ha hecho mediante el cálculo de muertos y heridos en porcentaje de la población que vivía en los edificios dañados en cada unidad territorial. Después nos dedicamos a identificar los componentes más importantes de los daños funcionales que se pueden producir desde la primera emergencia hasta la primera semana después del terremoto, tratando de evaluar los picos de tendencia de esos componentes. En concreto, analizamos el acceso de las personas a los puntos seguros de concentración, la eficiencia de los servicios sanitarios de emergencia en relación con la capacidad y accesabilidad de dichas actividades (consideradas en su eficiencia total) y, por último, la eficiencia del sistema residencial.

Se ha definido la pérdida de eficiencia del sistema urbano referida al acceso de la población a los

puntos de concentración inmediatamente accesibles mediante la evaluación del tamaño de los espacios públicos al aire libre, sus zonas de influencia y su capacidad no utilizada; a partir de ahí calculamos la parte de la población no atendida. Hemos evaluado la reducción de la eficiencia del sistema urbano con relación a las actividades de los servicios sanitarios de emergencia basándonos en el número general de heridos que habrían acudido a cada hospital de la zona y en el distinto nivel de accesibilidad a dichos hospitales debido a los atascos de tráfico a lo largo de las calles. La distribución de los heridos en la red viaria se ha llevado a cabo elaborando un índice que tiene en cuenta el número de heridos en cada tramo de la red y la longitud de éste.

Por último, la evaluación de la reducción de eficiencia del sistema residencial se ha realizado mediante un cálculo del número de personas sin hogar a partir de los edificios inhabitables. Al número de personas sin hogar se le ha asignado también un coeficiente de reducción que tiene en cuenta las intervenciones realizadas en los edificios, pero este coeficiente tampoco introduce grandes variaciones en los resultados obtenidos.

Los mapas temáticos construidos para Nápoles (figura 8) recogen los daños físicos en los edificios



residenciales, que es el punto de partida de nuestra hipótesis; el sufrimiento humano y la reducción de la capacidad residencial debida principalmente a los daños físicos. Después tenemos algunos componentes de los daños funcionales como la reducción de accesibilidad a los hospitales y la falta de puntos de concentración de emergencia.

CONCLUSIONES

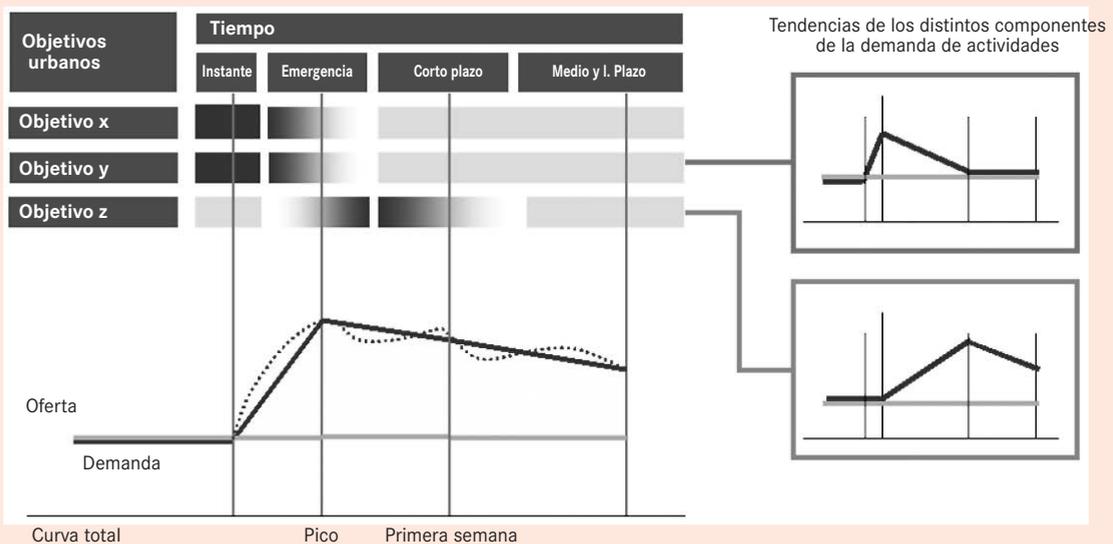
Como hemos visto, para predecir el comportamiento sísmico de un sistema urbano afectado por un terremoto, o al menos algunos determinantes de dicho comportamiento, se puede aplicar un modelo interpretativo de oferta/demanda, teniendo en cuenta que la evolución de un sistema complejo no se puede predecir basándose sólo en las condiciones iniciales del sistema.

El análisis de los casos estudiados pone de manifiesto que la crisis funcional de la ciudad afectada por un terremoto depende del equilibrio en-

tre la oferta y la demanda de actividades y servicios. Las técnicas de hipótesis sobre un riesgo sísmico dado nos permiten predecir la intensidad máxima de cada componente de la demanda y compararla con los niveles reales de oferta en el periodo posterior al terremoto (figura 9). Basándonos en este tipo de hipótesis podemos trazar un diagrama simplificado de tendencia de la demanda de actividad en cada periodo de tiempo: la diferencia entre la demanda total y la oferta ordinaria representa la magnitud total del daño funcional, lo que a su vez es una tendencia simplificada de la capacidad de la ciudad para responder a un terremoto o, en otras palabras, de uno de los determinantes del comportamiento sísmico de un sistema urbano.

Este tipo de análisis del comportamiento sísmico de sistemas urbanos pone de manifiesto que en una ciudad se debe perseguir la mitigación del riesgo sísmico mediante intervenciones estructurales tradicionales sobre los edificios, pero tales medidas no bastan para mitigarlo. Para implantar políticas urbanas que miti-

FIGURA 9. HIPÓTESIS Y TENDENCIAS DE LA DEMANDA DE ACTIVIDAD



- GUNDERSON, L. H.; HOLLING, C. S. (eds.), *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Island Press, Washington, DC.
- HOLLING, C. S. (1973), «Resilience and stability of ecological systems», in *Ann. Rev. of Ecol. and Syst.* 4.
- KAJITANI, Y.; OKADA, N.; TATANO, H.; MOTOHISA, H. (2002), «Statistical Analysis of Spatial Temporal Distributions of Human Activities after Earthquake Disaster», in *Proceedings of the Second Annual IIASA-DPRI Meeting for Integrated Disaster Risk Management* [Online], Available: <http://www.iiasa.ac.at/Research/RMS/dpri2002/Papers/kajitani.pdf>.
- MADDOX, D. (2002), «The Great Kobe Earthquake of January 17, 1995», in *Natural Hazards* [Online], Available: <http://www2.msstate.edu/~dem35/aboutme/kobe.pdf>.
- MC LOUGHLIN, J. B. (1973), *La pianificazione urbana e regionale*, Marsilio, Padova.
- NUTI, C., VANZI, I. (1999), «Criteria for evaluation of seismic risk of regional hospital system; a case study: the Abruzzo Region», in *Design And Retrofitting of Hospitals in Seismic Areas, Proceedings of the Workshop*. Ver: http://host.uniroma3.it/dipartimenti/dis/ricerca/Hospitals/Articoli_pdf/nv.01.eng.pdf
- PRIGOGINE, I. (1976), «Order through Fluctuations: self-Organization and Social System», in Jantsch E., Waddington C. H. (eds.), *Evolution and Consciousness*, Addison-Wesley, London.
- RIPPA, F.; VINALE, F. (1983), «Effetti del terremoto del 23 novembre 1980 sul patrimonio edilizio di Napoli», in Associazione geotecnica italiana, *Proceedings of XV National Congress*, Spoleto.
- SECCHI, B. (2000), *Prima Lezione di Urbanistica*, Laterza, Bari.
- THOM, R. (1972), *Stabilité structurelle et morphogénèse*, Interditions, Paris.
- VALE, L. J.; CAMPANELLA, T. J. (2005) (eds.), *The Resilient City*, Oxford University Press.
- WISNER, B.; BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I. (2004), *At Risk. Second Edition. Natural hazards, people's vulnerability and disasters*, Routledge, London.
- UN/ISDR (2004), *Terminology: Basic terms of disaster risk reduction*. Ver: <http://www.unisdr.org/eng/library/>.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (1996), *USGC Response to an Urban Earthquake. Northridge '94*, Open-file Report 96-263, Denver.