

Análisis comparativo de la normativa internacional para la caracterización de la peligrosidad sísmica

R. Secanell y J. Gallo

La realización de investigaciones de sitio para la selección, caracterización, licenciamiento y construcción de una central nuclear requiere la implementación de metodologías detalladas descritas en manuales técnicos. Este tipo de guías han sido realizadas principalmente en USA, Japón y por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) con el objetivo de proporcionar estándares para la colección y análisis de datos geológicos, geofísicos, geotécnicos, sísmicos, hidrológicos, etc. Este artículo debate cómo las guías existentes de caracterización de la peligrosidad sísmica se utilizan en el marco reglamentario en Francia, Japón, USA y en otros países que no tienen guías propias en este ámbito, tras los retos después del accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi (Japón, 2011).

The development of site investigation for the selection, characterization, licensing and construction of a nuclear power plant requires the use of detailed methodologies described in technical manuals. This kind of guidelines were performed mainly in USA, Japan and by the International Atomic Energy Agency (IAEA) with the aim to provide standards for the collection and analysis of geological, geotechnical, geophysical, hydrological, seismological data, etc. This article debates how the present guides of characterization of the seismic hazard, performed mainly by USA and IAEA, are used in the regulatory framework in France, Japan, USA and other countries without their own regulation in this subject, after the challenges from the accident of Fukushima Daiichi NPP (Japan, 2011).

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, gracias a un cierto renacimiento nuclear (a pesar del accidente de Fukushima) muchas plantas nucleares han sido caracterizadas (o reevaluadas) sísmicamente usando los procedimientos requeridos por organismos reguladores nacionales e internacionales. Los procesos más utilizados a nivel internacional, son los definidos en EE UU y por el OIEA. En EE UU, la *U.S. Nuclear Regulatory Commission* (USNRC), publica las metodologías propuestas en las *Regulatory Guides*. El OIEA, publica los procesos a aplicar en sus *Requirements* y *Safety Guides*.

Los requerimientos y guías del OIEA han sido aceptados por los casi 200 países miembros de la organización, entre ellos EE UU. Esto implica que los principios y conceptos expuestos en los documentos publicados por el OIEA son aceptados también por el regulador de EE UU. Sin embargo, este mismo regulador, puede imponer en su país, metodologías y procesos más estrictos

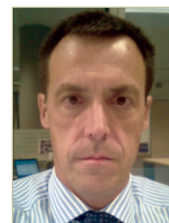
que aquellos definidos, de una forma más genérica por el OIEA. Estos procedimientos más estrictos no tienen por qué ser aceptados por todos los miembros de el OIEA. Este es el caso, por ejemplo, de la metodología SSHAC, de la que se hablará más adelante. Un proceso SSHAC 3 respeta las directrices de las guías OIEA, pero las guías OIEA no requieren explícitamente este tipo de complejos y costosos métodos de análisis.

De forma genérica, históricamente, algunos países nucleares han adoptado toda o parte de las regulaciones existentes en EE UU. Este sería el caso de España, donde, para la caracterización sísmica, no existen manuales o guías específicas al respecto. Como la mayoría de centrales son de origen estadounidense, históricamente el regulador español ha ido adoptando las metodologías requeridas en EE UU. Así, las últimas evaluaciones de la peligrosidad sísmica que se han realizado (IPEEE, 1999) siguieron básicamente la metodología americana.



RAMÓN SECANELL

es doctor en Ciencias Físicas por la UB (1999). Trabaja como sismólogo para GEOTER (grupo Fugro) desde 2001 y colabora como experto externo con el OIEA desde 2004. Es especialista en análisis de la peligrosidad sísmica y ha participado en más de 100 PSHA, en numerosos países, para instalaciones críticas (nucleares, presas, instalaciones petrolíferas, etc.).



JAVIER GALLO

es ingeniero industrial en la especialidad de Técnicas Energéticas por la Universidad Politécnica de Madrid. Trabaja en la Unidad Nuclear de Gas Natural Fenosa Engineering desde donde realiza el seguimiento de la evolución normativa de peligrosidad sísmica, como Centro de Referencia de Unesa.

Otros países han adoptado en parte (o prácticamente en su totalidad), las normativas recomendadas por el OIEA. La mayor parte de los países comúnmente llamados *newcomers* (aquellos que no forman parte aún de los países que disponen de centrales nucleares pero que tienen planes para su futura construcción) están en este grupo. Entre éstos, hay países de todos los continentes (Polonia, Chile, Uruguay, Vietnam, Malasia, Indonesia, Nigeria, Egipto, Marruecos, etc.).

Por último, algunos países, se rigen por una metodología de análisis propia. Este sería el caso de Francia o Japón, que disponen de potentes equipos en sus reguladores nacionales, y donde el regulador nacional define normativas y directrices propias de análisis de la peligrosidad sísmica (por ejemplo, en Francia, se rigen por la RFS 2001-01).

En este artículo, se describirán las principales metodologías utilizadas en EE UU, Francia, Japón y los países *newcomers*, para la caracterización de emplazamientos nucleares.

MARCO REGULADOR

Guías nacionales: EE UU, Francia y otros países con experiencia nuclear

En EE UU, la USNRC ha publicado una serie de guías ampliamente usadas por los consultores y por los operadores para recolectar y analizar los datos geológicos, geotécnicos y sísmicos (Tabla 1). La guía más reciente y más utilizada relacionada con la peligrosidad sísmica es la RG.1.208. La metodología SSHAC (*Senior Seismic Hazard Analysis Committee*), publicada inicialmente en 1997, desarrollada en la última década y sobre la cual se han publicado recientemente manuales de aplicación de la misma (USGS, 2009), es la metodología más utilizada en EE UU para tratar de reducir las incertidumbres. Los métodos probabilistas son preferidos a los deterministas para caracterizar sísmicamente los emplazamientos. Las características sísmicas de un emplazamiento, para cada nivel sísmico, se describen mediante espectros de respuesta y acelerogramas asociados a ese espectro de respuesta.

En Francia, el documento normativo de referencia del regulador francés (ASN, *Autorité de Surêté Nucléaire*) es la RFS 2001-01. Esta da detalles sobre la metodología a utilizar para definir la peligrosidad sísmica. La RFS 2001-01 está aún basada en un método determinista, el método más usual en los años setenta y ochenta, cuando se diseñaron una gran cantidad de instalaciones nucleares en Francia y en el mundo. La regla está basada en la de-

Regulatory Guides
NUREG/CR 6372 Uncertainty & Use of Experts ("SSHAC", 1997)
NUREG/CR5503 Techniques Identifying Faults & Origins (1999)
NUREG/CR 5562 Dating & Earthquakes, Geochronology (1998)
RG.1.132 Site Investigations for Foundations (1979)
RG.1.138 Laboratory Investigations of Soils and Rocks (2003)
RG.1.165 Identification & Characterization Seismic Sources (1997)
RG.1.198 Procedures and Criteria for Assessing Seismic Soil Liquefaction (2003)
RG.1.208 Performance-Based Approach Earthquake Motions (2006)

Tabla 1. Principales guías publicadas por el USNRC relacionadas con los riesgos geológicos y sísmicos.

finición de las características sísmicas de dos terremotos de referencia y de los efectos que éstos pueden producir utilizando métodos deterministas. Sin embargo, algunas actualizaciones y caracterizaciones de la peligrosidad sísmica realizadas recientemente en Francia mediante métodos probabilistas (siguiendo básicamente la normativa OIEA) han sido aceptadas por el regulador francés, permitiendo, por tanto, la utilización paralela de métodos deterministas y probabilistas.

Japón es otro país que dispone de un parque de centrales nucleares importante y de un equipo regulador potente (NRA, *National Regulatory Authority*) que redacta sus propias regulaciones nacionales. Después de los terremotos de Kashiwazaki-Kariwa en 2007 y Tohoku en 2011, Japón ha aceptado muchas de las recomendaciones del OIEA, a la que ha permitido realizar misiones para inspeccionar sus instalaciones y revisar su caracterización sísmica. Sin embargo, también en Japón, históricamente, los métodos deterministas han sido ampliamente utilizados.

Guías del OIEA

Los documentos técnicos y guías del OIEA han sido adoptados como documentos normativos de base por muchos países *newcomers*, sólo con algunas modificaciones propias de sus características nacionales (por ejemplo, en el caso de Egipto, la ribera del Nilo se trató de forma especial por razones sociales y económicas).

La N-R-3 contiene los requerimientos globales (*requirements*) para la evaluación de emplazamientos. Estos requerimientos tienen la intención de asegurar la protección del personal del emplazamiento, del público y del medio ambiente frente a los efectos de la radiación proveniente de una instalación nuclear.

Las *Safety Guides* que tratan la caracterización sísmica de sitios nucleares se muestran en la Tabla 2. Ellas proporcionan recomendaciones sobre cómo cumplir los requerimientos explicitados en la N-R-3. La *Safety Guide* asociada a la peligrosidad sísmica es la SSG-9. Esta permite el uso de métodos probabilistas y/o deterministas. Sin embargo, los métodos probabilistas son más utilizados por la comunidad científica y los deterministas se usan, principalmente, como control de los niveles probabilistas obtenidos. La guía de referencia para los estudios geotécnicos es la NS-G-3.6. Los estudios geotécnicos son necesarios para el análisis de la respuesta del suelo (*Site Response Analysis*) que normalmente se incluye en el análisis de la peligrosidad sísmica cuando las condiciones del suelo no son buenas. La caracterización completa de un emplazamiento es un proceso que suelo durar 2-3 años de media.

Respecto a la selección de emplazamientos, la guía de referencia es la DS433, que ha sustituido a la IAEA *Safety Guide 50-SG-S9 Site Survey for Nuclear Power Plants*. Este tipo de guías, en desuso después del accidente de Chernobyl (no se buscaban

IAEA Safety Guides
NS-G-1.6 Seismic Design & Qualification
NS-G-2.13 Seismic Safety Existing Installations (2009)
NS-G-3.6 Geotechnical Site Evaluation (2005)
IAEA Specific Safety Guides
SSG-9 Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations
IAEA Guides Under Development
DS433/DPP423 Safety Aspects in Siting

Tabla 2. Principales guías del OIEA relacionadas con los riesgos sísmicos y geológicos.

nuevos emplazamientos después de 1986), han vuelto a la actualidad ya que hoy existen numerosos países que buscan nuevos emplazamientos nucleares. El proceso de selección de un emplazamiento entre varios candidatos, se caracteriza por un *ranking* de los emplazamientos dependiendo de sus características geológicas, topográficas, hidrológicas, etc. La duración normal de un proceso de selección de emplazamientos suele ser de unos seis meses.

La Guía NS-G-2.13, *Seismic Safety Existing Installations* complementa a NS-G-1.6, *Seismic Design & Qualification*, extendiendo su alcance al proporcionar recomendaciones para otro tipo de instalaciones nucleares existentes, como reactores experimentales, instalaciones de reprocesado de combustible e instalaciones de almacenamiento de combustible.

METODOLOGÍAS USADAS PARA REALIZAR LA PARTE SÍSMICA DE UN SER (Site Evaluation Report)

Los procedimientos recomendados por las IAEA *Safety Guides* y los procedimientos impuestos por las NRC *Regulatory Guides* son similares en muchos aspectos. Sin embargo, la metodología NRC es más restrictiva y detallada. En este capítulo describiremos brevemente los principales pasos seguidos por los especialistas para realizar una caracterización completa del emplazamiento.

Procesos descritos en la SSG-9 del OIEA

Actualmente, existen muchos países que se encuentran en proceso de selección y/o caracterización de emplazamientos para nuevas plantas nucleares. En la mayoría de esos países, la metodología básica, los requerimientos y las recomendaciones usadas para realizar la caracterización del emplazamiento son aquellas publicadas por el OIEA. Siguiendo las recomendaciones del SSG-9 (IAEA, 2011), un análisis probabilista de la peligrosidad sísmica (PSHA) se debe realizar teniendo en cuenta las siguientes etapas principales:

- Compilación de una base de datos geológica, geofísica, geotécnica y sísmica usando cuatro escalas de trabajo: regional (radio de 300 km), regional cercana (25 km), vecindad del emplazamiento (5 km) y área del emplazamiento (1 km). La base de datos debe ser introducida en un Sistema de Información Geográfica, GIS (Figura 1).
- Desarrollo de uno o varios modelos sismotectónicos (Figura 2) que incluyan la descripción y justificación

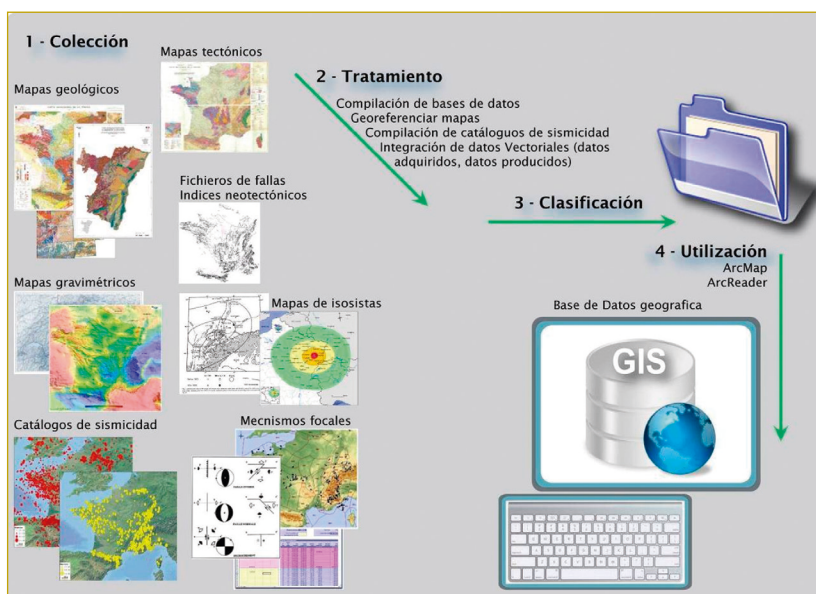


Figura 1. Esquema sintético de una base de datos GIS.

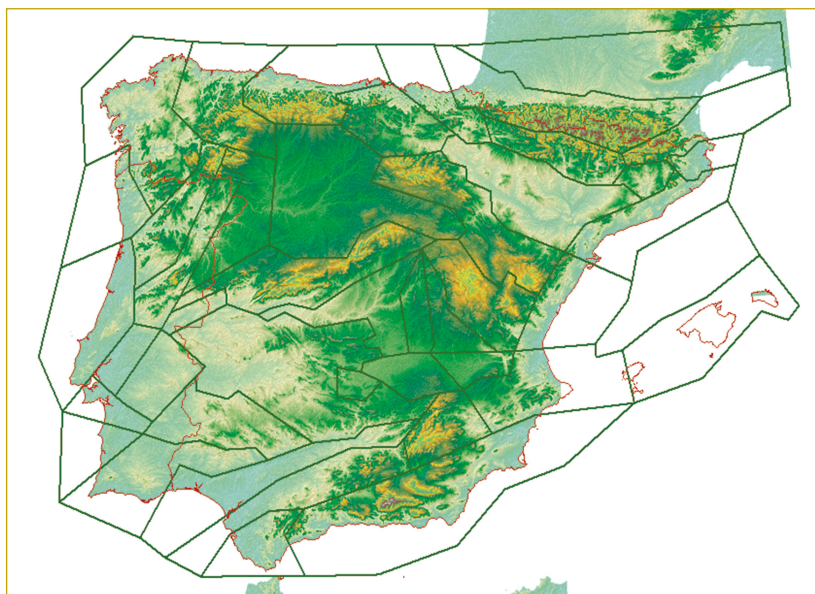


Figura 2. Ejemplo de zonación sismotectónica a nivel regional (IPEEE, 1999).

de la geometría de las zonas sismogénicas (definidas como zonas de sismicidad difusa y/o fallas) y su caracterización sísmica, mediante leyes de distribución de la sismicidad (por ejemplo, el modelo de Poisson o el modelo característico).

- Definición de un conjunto de leyes de atenuación del movimiento sísmico (*Ground Motion Prediction Equations*, GMPEs).
- Cálculo de la peligrosidad sísmica para obtener las curvas de peligrosidad sísmica (en condiciones de campo libre). El movimiento sísmico debe ser descrito y caracterizado para dos niveles sísmicos, SL-1 y SL-2, que deben ser establecidos por el regulador nacional (normalmente asociados a 475 y 10.000 años de pe-

riodo de retorno). El movimiento sísmico se debe caracterizar mediante espectros de respuesta (medio y percentiles 16 %, 50 %, 84 %) y acelerogramas ajustados a ese espectro de respuesta (Figura 3).

- El espectro de respuesta uniforme se obtiene del análisis estadístico de las curvas de peligrosidad sísmica. Dependiendo de las condiciones del suelo, se puede requerir un análisis específico de la respuesta de suelo.

Globalmente, la caracterización del emplazamiento se debe realizar a cuatro escalas diferentes:

1. Escala regional: tiene en cuenta la información geológica contenida en un radio de 300 km alrededor del emplazamiento.

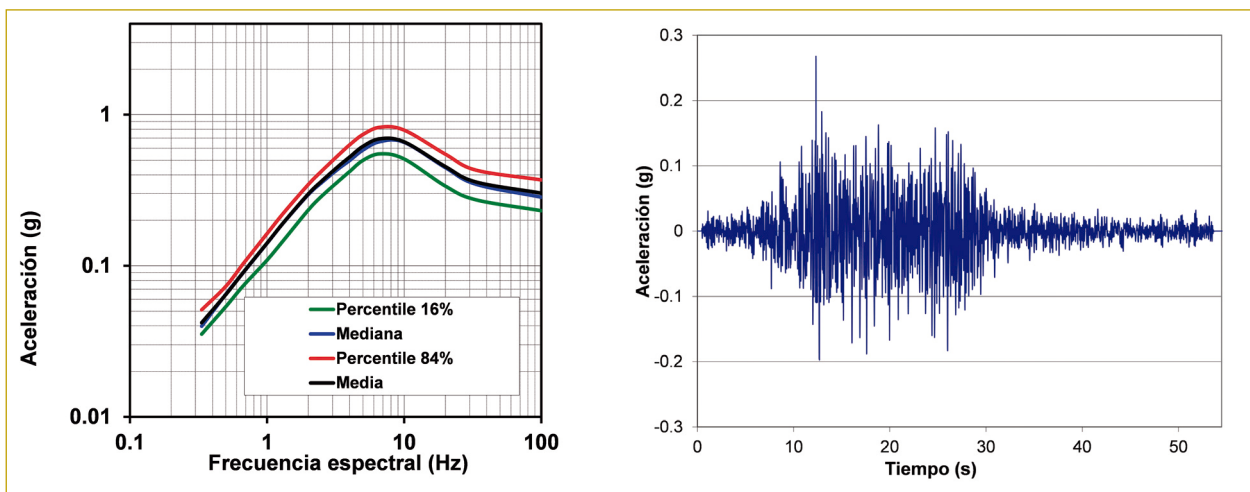


Figura 3. Ejemplo de caracterización de un movimiento sísmico mediante espectros de respuesta (izquierda) y acelerogramas representativos (derecha).

2. Regional cercana: típicamente tiene un radio de 25 km. En esta región se requiere información más detallada que en la escala anterior y, en caso necesario, se deben generar nuevos datos mediante estudios geológicos o geofísicos.

3. Vecindad del emplazamiento: el estudio se centra en la región situada a menos de 5 km del emplazamiento. A esta escala es muy importante excluir la posible presencia de fallas capaces. Aunque no se dice explícitamente, implícitamente sí se entiende en la SSG-9 que la presencia de fallas capaces a una distancia menor de 5 km del emplazamiento constituye un criterio de exclusión para nuevos emplazamientos.

4. Área del emplazamiento: tiene un radio de sólo 1 km. Cubre el área de la central nuclear y edificios adyacentes. La información contenida en esta escala corresponde básicamente a la información geotécnica.

Típicamente y con carácter general, para nuevos emplazamientos, la selección y caracterización de un emplazamiento tiene dos fases diferenciadas:

- Selección del emplazamiento: en esta fase se realizarán estudios con un nivel de detalle muy limitado (PSHA, estudios de geohazards, etc.). Los estudios deben estar basados en datos existentes. Las principales referencias para este tipo de estudios son las guías DS433 y SSG-9.
- Caracterización del emplazamiento: esta fase empieza cuando el sitio ya está seleccionado. Durante esta fase se deben generar nuevas informaciones, preferentemente en las escalas cercanas al emplazamiento. Los nuevos datos han de servir para refinar los estudios regionales realizados durante la etapa de

selección. Las principales referencias en esta fase son la SSG-9 y la NS-G-3.6 para aspectos de geotecnia (área del emplazamiento).

Metodología NRC para SAR (Safety Analysis Report) en EE UU

Las investigaciones, análisis y preparación de un SAR en EE UU siguen los procesos definidos en las guías USNRC presentadas en la Tabla 1.

Guía para un emplazamiento nuevo

La selección y caracterización de un emplazamiento en EE UU sigue cuatro fases principales que están descritas en el documento EPRI *Electric Power Research Institute (EPRI) Siting Guide* (2002). Sin embargo, de forma general, se determina si un emplazamiento es apto o no para albergar una instalación nuclear (incluso antes de seleccionar la tecnología nuclear) en dos fases, al igual que en el caso del OIEA: selección del emplazamiento entre varios candidatos y caracterización detallada del emplazamiento seleccionado.

La caracterización de un emplazamiento incluye, de forma genérica, estudios geotécnicos y ensayos de laboratorio, definir un modelo de ocurrencia de terremotos, un modelo de atenuación de la energía sísmica, el cálculo de la peligrosidad sísmica y, en muchos casos, un análisis de la respuesta del suelo, siguiendo la guía RG 1.208. Todos estos análisis producen datos que deben incluirse en el SAR como documento de apoyo al ESP (*Early Site Permit*). Por tanto, globalmente, la metodología estadounidense se asemeja en cierto modo al método OIEA.

Después de la selección de la tecnología para una planta, se deben realizar investigaciones más detalladas con el objetivo de actualizar el ESP SAR y preparar un nuevo SAR para un COLA (*Combined Operating License Application*).

Después de la recepción del permiso de construcción, el operador deberá realizar estudios adicionales si es necesario. El proceso de caracterización de un emplazamiento no es un análisis puntual. La caracterización de un emplazamiento debería actualizarse cada 10 años, un periodo de tiempo que se considera prudencial y en el cual, se pueden haber generado informaciones nuevas que tengan que ser consideradas para la actualización del emplazamiento. En 10 años, incluso la metodología y las normativas pueden cambiar.

Metodología SSHAC para un PSHA

La caracterización sísmica de emplazamientos nuevos y existentes en EE UU, debe realizarse de acuerdo a la metodología SSHAC. Fuera de EE UU, esta metodología tan sólo ha sido utilizada de forma estricta, en Sudáfrica (Bommer et al., 2014).

La metodología SSHAC ha sido desarrollada y definida en EE UU para realizar los PSHA. Dos principios básicos subyacen bajo la metodología SSHAC de un PSHA: (a) los datos de entrada deberían ser representativos del conocimiento actual de la comunidad científica (*Informed Technical Community, ITC*) y (b) el proceso SSHAC debe identificar claramente los propietarios intelectuales de esos datos de entrada y del cálculo probabilista.

El objetivo de un SSHAC es tener en cuenta todo el rango de incertidumbres de un estudio (USNRC, 1997). El hecho de identificar siempre la propiedad intelectual o los responsables de todos los datos de entrada y de los cálculos permite al regulador conocer el origen de cada uno de los parámetros utilizados. La metodología SSHAC define cuatro niveles de estudio (1 a 4) dependiendo del nivel de detalle. Incrementando el nivel de

detalle, se aumenta también la confianza de que todas las incertidumbres existentes entre la ITC sean tenidas en cuenta. En EE UU, la NRC ha requerido que las últimas actualizaciones de la peligrosidad sísmica de las centrales nucleares se realicen básicamente mediante estudios SSHAC nivel 3.

CONCLUSIONES

Las metodologías más utilizadas a nivel internacional son las definidas por el USNRC y por el OIEA. Otros países con reguladores fuertes como Japón o Francia, parecen adoptar, poco a poco, gran parte de las recomendaciones del OIEA.

Las diferencias entre las metodologías USNRC y OIEA no son excesivas y afectan, sobretodo, no a los conceptos básicos, sino al control de calidad del proceso. En EE UU, se utiliza principalmente el proceso SSHAC nivel 3 para caracterizar emplazamientos mientras que en otros países se utiliza la normativa OIEA, menos estricta en cuanto al control de incertidumbres y trazabilidad, *peer review*, número de expertos participantes, *workshops* realizados, etc.

En España no se han realizado todavía las actualizaciones de la peligrosidad sísmica a partir de la experiencia de Fukushima. El método

que se impondrá para estas actualizaciones tampoco está, de momento, decidido.

BIBLIOGRAFÍA

- Barry W. Miller, USNRC 2013, "United States Nuclear Regulatory Commission Actions Following the Fukushima Dai-Ichi Accident", in *Proceedings of the 8th Symposium NUCLEAR PLANTS CURRENT ISSUES*.
- Electric Power Research Institute (EPRI), 2000 Siting Guide: Site Selection and Evaluation Criteria for an Early Site Permit Application, March.
- Hanks, T.C., Abrahamson, N.A., Boore, D.M., Coppersmith, K.J., and Knepprath, N.E., 2009, Implementation of the SSHAC Guidelines for Level 3 and 4 PSHAs-experience gained from actual applications: U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1093, 66 p. [<http://pubs.usgs.gov/of/2009/1093/>].
- Ilie Petre-Lazar, H. Jadot & F. Turpin, S. Guisard, J. Chan-tron, and P. Labbé, Électricité de France, (EDF) 2013. "French Response to Fukushima Event –Seismic Safety Issues" in in *Proceedings of the 8th Symposium NUCLEAR PLANTS CURRENT ISSUES*.
- International Atomic Energy Agency, 2011, "Specific Safety Guidance on Seismic Hazard Assessment" (SSG-9), Vienna, IAEA.
- Julian J Bommer, Kevin J Coppersmith, Ryan T Copper-smith, Kathryn L Hanson, Azangi Mangongolo, Johann Neveling, Ellen M Rathje, Adrian Rodriguez-Marek, Frank Scherbaum, Re-filwe Shelembe, Peter J Stafford, and Fleur O Strasser (2013) A SSHAC Level 3 Probabilistic Seismic Hazard Analysis for a New-Build Nuclear Site in South Africa. *Earthquake Spectra* In-Press.
- Nuclear Regulation Authority (NRA), 2012 Enforcement of the New Regulatory Requirements for Commercial Nuclear Power Reactors.
- Sujit K. Samaddar, IAEA 2013 –"ISSC Activities Highlighted by Fukushima Event", in *Proceedings of the 8th Symposium NUCLEAR PLANTS CURRENT ISSUES*.
- U.S. NRC, 1997, Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis- Guidance on uncertainty and use of experts: Washington, D.C., NUREG/CR-6372.■