

Peligro, vulnerabilidad, riesgo y la posibilidad de desastres sísmicos en el Perú

Leonidas Ocola*

Abstract

One basic condition for a sustainable development of a nation is a positive proactive management on disaster risk reduction. Such action requires previous knowledge and documentation about hazardous phenomena or events, their dangerousness assessment, and the vulnerability evaluation of: The people and their properties, the multiple societal aspects (economic, social, cultural, etc.), the infrastructure works, vital lines, and the environment. It also requires knowledge of the community coping-capacities and its resilience. In this paper, the main concepts of risk management and the most important features of the seismicity in the Peruvian territory are reviewed. The following characteristics are pointed out for the collision-subduction of the Nazca-South American tectonic-plates seismicity environment: Earthquakes of large magnitude, very large mezoseismic areas, seismic accelerations that not exceed the Earth's gravity on the continent, recurrence times tens to hundreds of years. The tectonic-readjustment-continental seismic environment is characterized by mezoseismic areas circumscribed to the activated geological faults – length: several tens of kilometers, width: few tens of kilometers – shallow hypocenters, geological faults with several meters of vertical displacement, the seismic ground acceleration exceeds the Earth's gravity, the recurrence time of strong events is about one thousand years. The volcanic seismic environment is present in the tectonic block of southern Peru, and it is limited to the zone of presently active volcanoes. Their seismic activity is of low hazardousness. The probabilistic seismic hazard map of maximum accelerations, for 10% of probability of exceedence in 50 years, shows the largest values for the central and southern coastal area of the country: 0.5-0.7 g; in the northern coastal areas this values are 0.4-0.5 g. In the “Sierra”

* Instituto Geofísico del Perú, Calle Badajoz 169, Mayorazgo 4ta. Etapa, Lima 3 (Ate), Perú, correo electrónico: geo_gps@geo.igp.gob.pe

the acceleration range is 0.2-0.4 g, and in the Subandean zone and “Llano Amazónico” the accelerations range between 0.05-0.2 g. There are no traditional-microzoning maps of large urban areas in Peru; however, there are several macroseismic soil response maps in term of macroseismic intensities. Peru has no national seismic vulnerability or risk maps, but there are maps of the basic factors of vulnerability: Poverty, population density, Human Development Index (HDI), and constructive environment. The poorest people are distributed in the alto-andina zone, with centers in the old Andean cultures settlements. The province with the largest population density is “La Provincia Constitucional del Callao”: 5,515 hab/km². Lima province has 2,603 hab/km². In the “Sierra”, people concentrate in the cities along the “panandina” road. The southern coastal zone is relatively unpopulated, with the exception of the cities of Tacna, Moquegua, Arequipa, among other minor centers. The southern and central coastal political Regions of Peru have the population with the higher HDI in the nation, together with the Regions of Junin and Cerro de Pasco in the “Sierra”. In the rest of the country, the HDI is medium-low or low. The major percentages of adobe edifications in Peru are in the provinces of Ica, Chincha, Lima, Trujillo, Chiclayo in the coastal zone, and in the principal cities along the “Sierra” from Peru-Bolivia to Peru-Ecuador borders. Considering the probabilistic seismic hazard levels, population concentration, HDI and the geographical distribution of the constructive environment vulnerable to earthquakes, it is concluded that the seismic-disaster-risk hotspots nationwide are the Regions of Ica, Lima, La Libertad, Lambayeque, and Piura along the coastal zone, and the main cities along the “Sierra” zone.

Keywords: *seismology, vulnerability, seismic risk, Peru.*

Resumen

Una condición básica para el desarrollo sostenible de una nación es una gestión proactiva positiva en la reducción de las posibilidades de desastres. Dicha gestión conlleva el conocimiento y documentación previos de los fenómenos o eventos peligrosos, la evaluación de sus peligrosidades, la determinación de las vulnerabilidades de la población y sus bienes, de la sociedad en sus múltiples aspectos (económico, social, cultural, etc.), de las obras de infraestructura, líneas vitales, y la del medio ambiente; y, requiere un conocimiento de las capacidades y resiliencia de la comunidad. En este trabajo, se revisa los principales conceptos sobre el manejo de riesgos y las principales características de la sismicidad en el territorio peruano. Se puntualiza las siguientes particularidades de los ambientes sísmicos de colisión-subducción de la placa tectónica de Nazca por debajo de la placa tectónica sudamericana: sismos de gran magnitud, áreas mezosísmicas muy grandes, aceleraciones sísmicas que no exceden la gravedad terrestre en el continente, recurrencias del

orden de decenas-centenas de años. El ambiente sísmico de reajuste-tectónico continental se caracteriza por áreas mezosísmicas limitadas —varias decenas de kilómetros de longitud por pocas decenas de kilómetros de ancho, hipocentros superficiales, fallas geológicas con desplazamientos superficiales máximos del orden de metros, severidad de sacudimiento del suelo que excede la aceleración de la gravedad, recurrencia de los sismos severos en el orden de un mil años. El ambiente sísmico volcánico se presenta en el bloque tectónico del sur de Perú, geográficamente limitado a la zona de los volcanes activos, la actividad sísmica es de baja peligrosidad. El mapa de peligro sísmico probabilístico de aceleraciones máximas, para una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, muestra los más altos valores de peligrosidad a lo largo de la costa central y sur del país: 0.5-0.7 g; en la costa norte 0.4-0.5 g de aceleración. En la sierra, las aceleraciones máximas probables están entre 0.2-0.4 g, en el Llano Amazónico y Selva Alta, las aceleraciones máximas varían entre 0.05- y 0.2-g. No se ha realizado una microzonificación sísmica tradicional de ciudades en el Perú, sin embargo, se cuenta con varios mapas de la respuesta macrosísmica del suelo en términos de intensidades macrosísmicas. Perú no cuenta con mapas nacionales de vulnerabilidades y riesgo-sísmicos, pero cuenta con mapas de los factores básicos de vulnerabilidad: pobreza, densidad de población, Índice de Desarrollo Humano (IDH) y ambiente constructivo. La población más pobre del país se distribuye en la zona alto-andina, con centros en los núcleos donde se asentaron las antiguas culturas andinas. La provincia de mayor concentración poblacional es la Provincia Constitucional del Callao con 5,515 hab/km² y Lima con 2,603 hab/km². En la sierra, la población se concentra en las ciudades distribuidas a lo largo de la carretera panandina. La costa sur está relativamente despoblada, siendo la excepción las ciudades de Tacna, Moquegua, Arequipa entre otros centros menores. Las regiones de la costa centro y sur de Perú tienen la población con el mayor IDH, conjuntamente con las Regiones de Junín y Cerro de Pasco en la sierra. En el resto del país el IDH es bajo o medio bajo. La mayor concentración de edificaciones de adobe se encuentra en las provincias de Ica, Chincha, Lima, Trujillo, Chiclayo en la costa; y en las principales ciudades de la sierra, desde la frontera Perú-Bolivia hasta la frontera Perú-Ecuador. De la conjugación, en el ámbito nacional, de los niveles de peligro sísmico, concentración poblacional, IDH y distribución geográfica del ambiente constructivo vulnerable a los sismos, se concluye que los puntos de mayor posibilidad de desastres, por sismos, son las Regiones de Ica, Lima, La Libertad, Lambayeque, Piura, en la costa, y las principales ciudades en la zona de la sierra.

Palabras clave: *sismología, vulnerabilidad, riesgo sísmico, Perú.*

Introducción

Desde la década de los noventa, Naciones Unidas promueve y apoya la reducción de desastres causados por fenómenos naturales. Primero, mediante la Década Internacional para la Reducción de Desastres Naturales [International Decade for Natural Disaster Reduction, IDNDR] 1990-1999. Década dedicada a promover soluciones para reducir el riesgo de los peligros naturales. La década concluyó con el reconocimiento que la reducción de desastres involucra objetivos sociales y económicos que tomarán un largo tiempo de alcanzar. En el año 2000, le sucede la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres [International Strategy for Disaster Reduction, ISDR], también de las Naciones Unidas, con el fin de promover e impulsar esta necesidad procediendo del énfasis de la década previa contra protección peligros naturales, al de los procesos involucrados en el conocimiento, evaluación y manejo de la posibilidad de desastre [o riesgo de desastre] (ISDR, 2004a). Estos procesos implican la detección, documentación e identificación de los fenómenos naturales, la evaluación de su peligrosidad, su impacto en los entes expuestos, y la capacidad de la sociedad o comunidad de recuperarse de los daños ocasionados por el fenómeno. El propósito de la ISDR es evaluar, en base de la información preexistente, el nivel de peligrosidad de los fenómenos futuros característicos, estimar los daños probables y visualizar el poder de recuperación de la sociedad ante los impactos. Este proceso involucra reconocer fortalezas y debilidades de la sociedad ante los peligros potenciales de los fenómenos ambientales, y tomar las medidas pertinentes para mitigar o eliminar las debilidades existentes. Por otro lado, la Conferencia Mundial sobre Reducción de Desastres de Hyogo, Japón, 18-22 enero 2005, adoptó el marco de referencia de acción para el período 2005-2015: “Construyendo Resiliencia de Naciones y Comunidades a Desastres”. La Conferencia proporciona una “oportunidad única para promover una estrategia y una aproximación sistemática a reducir vulnerabilidades y riesgos a peligros” (ISDR, 2005).

Resiliencia es la capacidad del ser humano de sobreponerse a sus dificultades y al mismo tiempo aprender de sus errores (Gloria Laengle, 2007). Según el ISDR (2004), resiliencia es la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad potencialmente expuesta a peligros, a adaptarse, resistiendo o cambiando para alcanzar y mantener un nivel aceptable de funcionamiento y estructura. El nivel está determinado por el grado al cual el sistema social es capaz de organizarse para incrementar su capacidad para aprender de desastres pasados a fin de perfeccionar la protección futura y mejorar las medidas de reducción de riesgos o daños probables futuros.

La capacidad de una sociedad o comunidad es la combinación de las fortalezas y recursos disponibles en una comunidad, sociedad u organización que puede reducir el nivel de riesgo, o los efectos de un desastre. La capacidad puede incluir los medios económicos o sociales, institucionales físicos así como personal experto o

atributos colectivos tales como liderazgo, gestión administrativa, habilidades prácticas, etc. (ISDR, 2004).

En el presente documento, se resume el estado de conocimiento, en el ámbito nacional de Perú, sobre los fenómenos sísmicos, su distribución espacial, la evaluación probabilística del peligro sísmico, y la distribución espacial de los factores generales de vulnerabilidad ante los fenómenos sísmicos. El conocimiento de los factores: peligro y vulnerabilidades de los elementos expuestos a un fenómeno potencial son indispensables para la evaluación de la posibilidad (riesgo) de desastre [*disaster risk*] a que está sujeta una comunidad o población de un territorio, sus obras y su infraestructura. Previamente, se revisará algunas definiciones de la terminología utilizada en el manejo de riesgo y desastres, ya que, el significado y amplitud de cobertura de algunos términos ha ido cambiando con el tiempo.

Aspectos generales

Definiciones

Peligro

Desde la definición del término peligro (en inglés: *Hazard*) por NU en 1992 (United Nations, Department of Humanitarian Affairs: UN-DHA, 1992), el concepto ha evolucionado con el progreso, desarrollo e implementación del manejo del riesgo, la posibilidad (riesgo) de desastres, y la atención de desastres. Los peligros son procesos, eventos físicos, fenómenos naturales, incidentes tecnológicos o actividades humanas potencialmente dañinos que pueden causar pérdidas de vida o heridos, daño a la propiedad, alteración social y económica y/o degradación del ambiente en un área determinada y en un período de tiempo dado (ISDR, 2004a, 2007). Los peligros son función del espacio y del tiempo, se les caracteriza por su localización (ubicación), severidad-intensidad-magnitud, frecuencia de recurrencia, tiempo y modo de evolución, y probabilidad de ocurrencia. La magnitud del impacto depende de estos factores, además de la exposición y vulnerabilidades de los elementos afectados. Es importante reconocer que el desarrollo de una sociedad modifica su exposición ante los peligros potenciales en función del tiempo. Especialmente, cuando este desarrollo no es armónico con las condiciones ambientales naturales.

Por otro lado, el Earthquake Engineering Research Institute (EERI) define el peligro sísmico como cualquier fenómeno físico asociado con un sismo que puede producir efectos adversos en las actividades humanas (fenómenos asociados a los sismos: sacudimiento del terreno, falla del terreno: fallamiento geológico, licuefacción, expansión lateral, deslizamientos, derrumbes, reptación, etc.). Por tanto, este término puede ser puramente descriptivo, o evaluado cuantitativamente, dependiendo de la situación (EERI, 1984).

El análisis de los peligros permite identificar, estudiar y hacer el seguimiento espacial y temporal de los fenómenos o eventos para determinar su potencial, origen, características, comportamiento y la exposición del universo de elementos que puedan afectar.

Vulnerabilidad

Similar a la definición de vulnerabilidad de los Grupos de Trabajo del Cambio Climático (Climatic Change, 2001), la vulnerabilidad sísmica se define como el grado al cual un sistema social o natural es susceptible a sufrir daños por sismos-y/o-fenómenos asociados. La vulnerabilidad es una función de:

- I La sensibilidad del sistema social a sismos-y-fenómenos asociados (el grado al cual responderá, incluyendo efectos perjudiciales – i.e. destrucción – y/o beneficiosos – i.e. nuevos terrenos por levantamientos costeros),
- II La capacidad de respuesta de la sociedad o comunidad (el grado al cual ajustes en prácticas, procesos, o estructuras pueden moderar o contrapesar el potencial dañino o tomar ventaja de las oportunidades creadas por un evento dado) y,
- III El grado de exposición del sistema a los peligros de los sismos-y/o-fenómenos asociados.

La vulnerabilidad de las sociedades humanas y los sistemas naturales al impacto de los fenómenos peligrosos, en particular a los de terremotos, es demostrada por los daños, el sufrimiento humano, las muertes, etc., que causan los desastres debido a fenómenos naturales. La vulnerabilidad es un parámetro que establece la relación entre la población y sus ambientes con las fuerzas sociales e institucionales, valores culturales, en general, el nivel de desarrollo humano, nivel de pobreza y concentración de poblacional, etc.

El ISDR define vulnerabilidad como las condiciones determinadas por los factores o procesos sociales, económicos y ambientales, los cuales aumentan la susceptibilidad de una comunidad o ente expuesto al impacto de los peligros (ISDR, 2004a). Se le puede definir, en una manera amplia, como la capacidad [incapacidad] a resistir el impacto de un evento peligroso y a recuperarse después. Se le puede subdividir en vulnerabilidad física, social, económica, etc. Al igual que la exposición de las poblaciones a los peligros, el desarrollo modifica las condiciones de la sociedad en el espacio y en el tiempo, resultando diferentes sectores sociales y económicos con diferente grado de capacidades de resistir y recuperarse del impacto negativo de los eventos peligrosos (ISDR, 2007).

De acuerdo a los elementos expuestos al peligro, hay varias clases de vulnerabilidad: física, social, económica, ambiental, etc. La vulnerabilidad física se refiere a la susceptibilidad de la población, ambiente constructivo y ambiente natural o tec-

nológico a la exposición ante los peligros. La vulnerabilidad social incluye los factores de los niveles de capacidad-de-leer-y-escribir, educación, infraestructura de salud, la existencia de paz y seguridad, acceso a los derechos humanos básicos, sistemas de buen gobierno, equidad social, valores tradicionales, costumbres y creencia ideológica, sistemas de organización colectiva. La vulnerabilidad económica caracteriza a la gente menos privilegiada en clases o castas, minoridades étnicas, los niños y adultos de la tercera edad, los minusválidos y discapacitados, las madres responsables de proveer las necesidades básicas de la familia. Los pobres y la población predominantemente femenina y de avanzada edad se caracterizan por la alta vulnerabilidad económica, sufren proporcionalmente las mayores pérdidas en desastres y tienen una capacidad limitada de recuperación. La vulnerabilidad ambiental se refiere a la extensión de la degradación de la naturaleza y sus recursos: aire y agua contaminados, disminución de la biodiversidad, degradación del suelo, escasez de agua (seguridad de alimentos y salud) (UN, 2006).

La vulnerabilidad se le expresa en porcentajes de pérdidas potenciales (de 0% a 100%) (vulnerabilidad estructural o por constitución), o niveles probabilísticos de exposición (vulnerabilidad por exposición). La vulnerabilidad a desastres es una función de las acciones y conducta humana.

Un concepto que es importante en la evaluación económica de los riesgos potenciales es el de la vulnerabilidad específica: es la vulnerabilidad de un elemento específico o particular bajo riesgo ante el impacto de un peligro potencial, i.e., una ciudad, una edificación, un elemento de una edificación, etc., dependiendo de la escala y extensión del área y/o elementos evaluados.

Por otro lado, el EERI considera la vulnerabilidad como la cantidad de daño inducida por un nivel de peligro dado, y expresada como una fracción del valor del ítem dañado bajo consideración (EERI, 1984). Es decir, el EERI considera la vulnerabilidad específica en sus evaluaciones.

Riesgo

Riesgo es la probabilidad de las consecuencias futuras perjudiciales-dañinas o pérdidas esperadas o anticipadas (muertes, heridos, propiedades, subsistencias, actividad económica alterada o ambiente-natural dañado) (ISDR, 2004). Se refiere a la probabilidad que un elemento dado, en una determinada localización (X), en un período de tiempo dado (t), sufra pérdidas o daño debido al impacto de un peligro: un daño probable futuro. Según se considere el riesgo desde una perspectiva social, física, o económica, el elemento expuesto puede ser una persona, un edificio o la economía de un país, etc. De acuerdo a la escala espacial del análisis, la localización puede ser un lugar o sitio específico, una ciudad, un área administrativa de un

gobierno local o un país entero. Similarmente, el período de tiempo puede ser de cualquier extensión desde unas pocas horas hasta siglos (ISDR, 2007).

Convencionalmente, el riesgo se expresa por la notación:

$$\text{Riesgo Sísmico } (\mathbf{X}, t) = [\text{Peligro Sísmico } (\mathbf{X}, t)] \times [\text{Vulnerabilidad } (\mathbf{X}, t)] \quad (1)$$

Implica que no habrá riesgo o posibilidad de daño si no hay peligro alguno aunque la vulnerabilidad sea alta; no habrá riesgo si la vulnerabilidad del ente expuesto al peligro es cero, aunque exista el peligro. No importa cuán severo sea el peligro. Usualmente, no se puede hacer nada para eliminar totalmente el peligro, pero sí se puede hacer bastante en disminuir o eliminar las vulnerabilidades. Es importante reconocer que el riesgo es función de la ubicación (\mathbf{X}) del elemento expuesto y del tiempo (t). En consecuencia, se requiere una vigilancia espacial y temporal continua, o por lo menos, periódica para tener una evaluación actualizada de los niveles de riesgo en los cuales se desarrolla la comunidad, por lo que, algunos autores, se refieren a las vulnerabilidades y riesgos como procesos que dependen del espacio y el tiempo.

Además de expresar el riesgo una posibilidad futura de daño físico y/o psíquico-emocional, es crucial reconocer que los riesgos son inherentes o pueden ser creados o existen dentro de los sistemas sociales como resultantes de un proceso social. Por tanto, es importante considerar el contexto social en el cual ocurren los riesgos y que la población no necesariamente comparte la misma percepción del riesgo y sus causas subyacentes (ISDR, 2004a).

A la definición de la ISDR, se contraponen la definición del Earthquake Engineering Research Institute (EERI), que define el riesgo sísmico como la probabilidad que las consecuencias sociales o económicas de los sismos sea igual o exceda un valor especificado en un sitio, varios sitios, o en un área, durante un tiempo de exposición especificado. El riesgo es por tanto expresado en términos cuantitativos (EERI, 1984). En consecuencia, el riesgo sísmico es calculable mediante la relación:

$$R. \text{ Sísmico}(\mathbf{X}, t) = [\text{Peligro Sísmico}(\mathbf{X}, t)] \times [\text{Vulnerabilidad}(\mathbf{X}, t)] \times [\text{Valor } (\mathbf{X}, t)] \quad (2)$$

Ese valor especificado de riesgo y aceptado por la sociedad tiene que ver con los conceptos de riesgo aceptable y riesgo específico.

Riesgo aceptable y riesgo específico

Un ítem expuesto al peligro sísmico siempre está sujeto a sufrir daño, por lo que, usualmente, se cuenta, por ley o por tradición, con pólizas y/o políticas que minimi-

zan el nivel de riesgo (pérdidas potenciales) a un nivel que es aceptable para la sociedad.

El riesgo aceptable se define como el nivel de riesgo que es considerado tolerable dados las consecuencias negativas y beneficios esperados. Se puede asignar diferentes niveles de riesgo aceptable a varios peligros de acuerdo a la naturaleza de los fenómenos y la clase de elementos expuestos al peligro. Los niveles aceptables de riesgo pueden variar desde “casi cero” para plantas nucleares y líneas de transmisión de gas natural a “moderado” para granjas y talleres de baja intensidad (<http://www.ci.tracy.ca.us/projects/>).

Según el ISDR, el riesgo aceptable es el nivel de pérdidas que una sociedad o comunidad considera aceptable dadas las condiciones sociales, económicas, políticas, culturales, tecnológicas y ambientales existentes. En términos de ingeniería, se usa también el término riesgo-aceptable para evaluar las medidas estructurales y no estructurales implementadas o estipuladas para reducir posibles daños a un nivel que no perjudique a la gente y/o dañe a la propiedad, en concordancia a códigos o “prácticas aceptadas” basadas, entre otros principios, en una probabilidad conocida del peligro (ISDR, 2004a). Las Normas Sismorresistentes Peruanas, por ejemplo, son el producto de una evaluación probabilística del peligro sísmico, consideraciones de fatiga de materiales, densidad de población e inversión, y conocimiento de ingeniería sismorresistente, entre otras consideraciones (NTE.030, 1997). En este caso, el Estado Peruano estableció el nivel de riesgo aceptable de las edificaciones a través de un Decreto Ley.

El riesgo aceptable implica que el grado de pérdidas de vidas humanas, materiales, económicas, sociales, y alteración del ambiente natural o social es aceptado como tolerable por la sociedad, comunidades o autoridades a cargo de las acciones para mitigar riesgos de desastres. Es el nivel de riesgo, por debajo del cual, ninguna actividad de prevención se considera que es necesaria, excepto la de hacer conocer el riesgo existente y velar por el cumplimiento de la Ley (Ocola, 2002).

Otro término que tiene que ver con la evaluación de la magnitud de un desastre es el riesgo específico. El riesgo específico es aquel riesgo que depende de las características del peligro, el grado de exposición y propiedades físicas únicas del elemento expuesto al peligro. Se le calcula mediante el producto matemático del peligro potencial por la vulnerabilidad específica del elemento expuesto a un peligro potencial, i.e.:

$$\text{Riesgo específico } (\mathbf{X}, t) = [\text{Peligro } (\mathbf{X}, t)] \times [\text{Vulnerabilidad Específica } (\mathbf{X}, t)] \quad (3)$$

A nivel país, una evaluación de riesgo implica la identificación y calificación de los peligros a que está expuesta la nación y un conocimiento de sus vulnerabilida-

des a dichos peligros, permitiendo un entendimiento integral de la distribución geográfica y sectorial del riesgo o posibilidad de daño.

Los niveles de riesgos aceptables y específicos están íntimamente relacionados a lo que se denomina la gestión del riesgo o manejo del riesgo, esto es, al empleo sistemático de las decisiones administrativas, organización, habilidades operacionales y responsabilidades para aplicar políticas, estrategias y prácticas para la reducción de la posibilidad de desastre (UN/ISRD, 2004). Las posibilidades de desastre se reducirán en la medida en que se disminuya la magnitud del impacto negativo de los peligros asociados a fenómenos naturales, incidentes tecnológicos y/o acciones antrópicas, mediante medidas de prevención (para evitar que ocurran daños), mitigación (para disminuir el nivel de daño probable) y preparación de las personas ante el impacto adverso del fenómeno o evento peligroso.

Desastre

El desastre es una interrupción severa o grave del funcionamiento de una comunidad o sociedad. Causa pérdidas de vidas humanas, materiales, ambientales, culturales, económicas, etc., además del gran sufrimiento humano. La sociedad afectada no puede seguir adelante por sus propios medios, requiere de la ayuda nacional y/o internacional para continuar funcionando. Los desastres se clasifican de acuerdo al fenómeno causal, sea este natural, tecnológico o antrópico (UN-DHA 1992, Ocola 2001). Un desastre es una función del proceso de riesgo. Resulta de la combinación del peligro, condiciones de vulnerabilidad e insuficiente capacidad o procedimientos para reducir las consecuencias potencialmente negativas del riesgo o daños futuros (ISRD, 2004). Un gran número de desastres es causado por interacción o modificación del ambiente natural por las personas, y por un mal uso del territorio que altera las condiciones naturales.

Tanto menos desastres afecten un país en desarrollo, tanto más rápido alcanzará los objetivos y progresos de las sociedades que lo constituyen. Es por esta y otras razones, que la gestión y la reducción de desastres son tareas prioritarias en el proceso de desarrollo de las naciones. La reducción de desastre o más propiamente, la reducción de la posibilidad de desastre (*disaster risk reduction*, en inglés) es el marco de referencia conceptual de elementos considerados con las posibilidades de minimizar vulnerabilidades y posibilidad (riesgo) de desastre de toda una sociedad, para evitar (prevención) o limitar (mitigación y preparación) los impactos adversos de los peligros, dentro el amplio contexto del desarrollo sostenible (ISDR, 2004a).

Según ISDR (2002), el marco de referencia de la reducción de desastre está compuesto de los siguientes campos de acción:

- Evaluación y conocimiento del riesgo, incluyendo análisis del peligro, vulnerabilidades y capacidades.
- Desarrollo del conocimiento, incluyendo educación, entrenamiento, investigación e información.
- Compromiso público y marco de referencia institucional, incluyendo organización, política, legislación y acción comunitaria.
- Aplicación de medidas que incluyan manejo ambiental, uso de tierras y planeamiento urbano, protección de las facilidades críticas, aplicación de la ciencia y tecnología, consorcios y redes, e instrumentos financieros.
- Sistemas de alertas tempranas, incluyendo pronósticos, disseminación de alertas, medidas de preparación y capacidades de reacción.
- Convencionalmente, se puede expresar la reducción de la posibilidad de desastre o reducción de desastre por la siguiente razón:

$$\text{Posibilidad de Desastre (X, t)} = \text{Riesgo (X, t)} / \text{Capacidad (X, t)} \quad (4)$$

(Ocola, 2004).

Es evidente que dado un nivel de riesgo, la posibilidad de un desastre será menor tanto mayor sea la capacidad de la comunidad o sociedad para hacer frente a la violencia o severidad del impacto, y tanto menor será el tiempo para reponerse o recuperarse de los efectos adversos, sin el auxilio externo de otras comunidades o sociedades.

Información básica

En Perú, la documentación escrita de la actividad sísmica y sus efectos se benefició grandemente con la visión del ingeniero J. Broggi, el primer Jefe institucional del ahora Instituto Geofísico del Perú (IGP), al asignar como tarea fundamental al doctor E. Silgado documentar los sismos sentidos y recuperar la descripción de los sismos históricos de las crónicas históricas de los archivos europeos. Los resultados fueron publicados en 1973 y en 1978 (Silgado, 1973, 1978). Por otro lado, fue fundamental para la interpretación de la descripción de los efectos macrosísmicos, la adaptación de la escala de Intensidades Macrosísmicas MSK al ambiente peruano (Ocola, 2005), entrenamiento del personal del IGP, con el apoyo financiero de la Organización de Estados Americanos (OEA), en la toma de datos de los efectos macrosísmicos del terremoto de Lima de 1974 por el grupo de científicos del U.S. Geological Survey (USGS): doctores A. Espinoza y T. Algermissen, además del doctor R. Husid.

Posteriormente, la OEA financió el Proyecto de Sismicidad Andina (SISAN) para desarrollar los Catálogos Sísmicos Instrumentales y los Catálogos Sísmicos de

Intensidades Macrosísmicas para las Repúblicas de Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú. El proyecto tomó casi cuatro años. Estos catálogos sísmicos fueron los primeros que se elaboraron para las cuatro naciones y se prepararon con información de los centros internacionales de datos, el USGS y datos locales instrumentales y descriptivos, y se publicaron en cuatro volúmenes en 1983 (Ocola, 1983). Los catálogos se entregaron en su versión digital a las instituciones de cada país que intervinieron en el proyecto junto con varios volúmenes impresos y al Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS). La versión digital, en citas magnéticas, fue íntegramente utilizada para elaborar los catálogos de Sismicidad del Proyecto SISRA del CERESIS para dichos países, con cambios y adiciones menores de formato e información, respectivamente.

Características espaciales de la sismicidad en el Perú

Perú está situado en la parte central del borde occidental del continente sudamericano, en la placa tectónica del mismo nombre y en la zona de subducción de la placa de Nazca por debajo de América del Sur. La placa sudamericana se desplaza hacia el Oeste y la Nazca hacia el Este. La zona de colisión superficial de ambas placas tectónicas se inicia en la fosa marina de Perú-Chile, la cual se desarrolla, aproximadamente, paralela a la cordillera de Los Andes, a lo largo del borde occidental del continente sudamericano. La sismicidad en Perú está dominada por la actividad sísmica asociada al proceso de subducción y la actividad sísmica asociada al reajuste tectónico del continente sudamericano (Figura 1). La actividad sísmica volcánica del Sur de Perú no contribuye mayormente a los niveles del peligro sísmico. Por otro lado, la actividad sísmica inducida no es muy conocida.

Los sismos de subducción ocurren en la zona de Wadati-Benioff desde la vecindad de la fosa marina hasta los 650 km de profundidad aproximadamente, con ausencia de actividad importante (magnitud ≥ 3.0 mb) entre 400-600 km de profundidad. La zona de Wadati-Benioff está segmentada en dos bloques tectónicos, alrededor de la latitud de Nazca. En el bloque sur, sur de Nazca, la subducción es normal, i.e., la actividad sísmica se inicia cerca de la fosa marina y penetra monotónicamente hacia la profundidad sin cambio significativo del buzamiento. En este bloque tectónico se desarrollan los volcanes activos del Sur de Perú y norte de Chile. Por el otro lado, en el bloque tectónico norte, la subducción es anormal. La geometría de la zona de Wadati-Benioff es similar a la del bloque sur en los primeros 100 km de profundidad, a partir de esta profundidad la actividad sísmica se distribuye casi horizontalmente hasta cerca de la frontera Perú-Brasil, para luego penetrar hacia los 650 km de profundidad, con la ausencia de actividad sísmica entre los ~ 300- y 500-km de profundidad. En este bloque tectónico no hay volcanes activos.

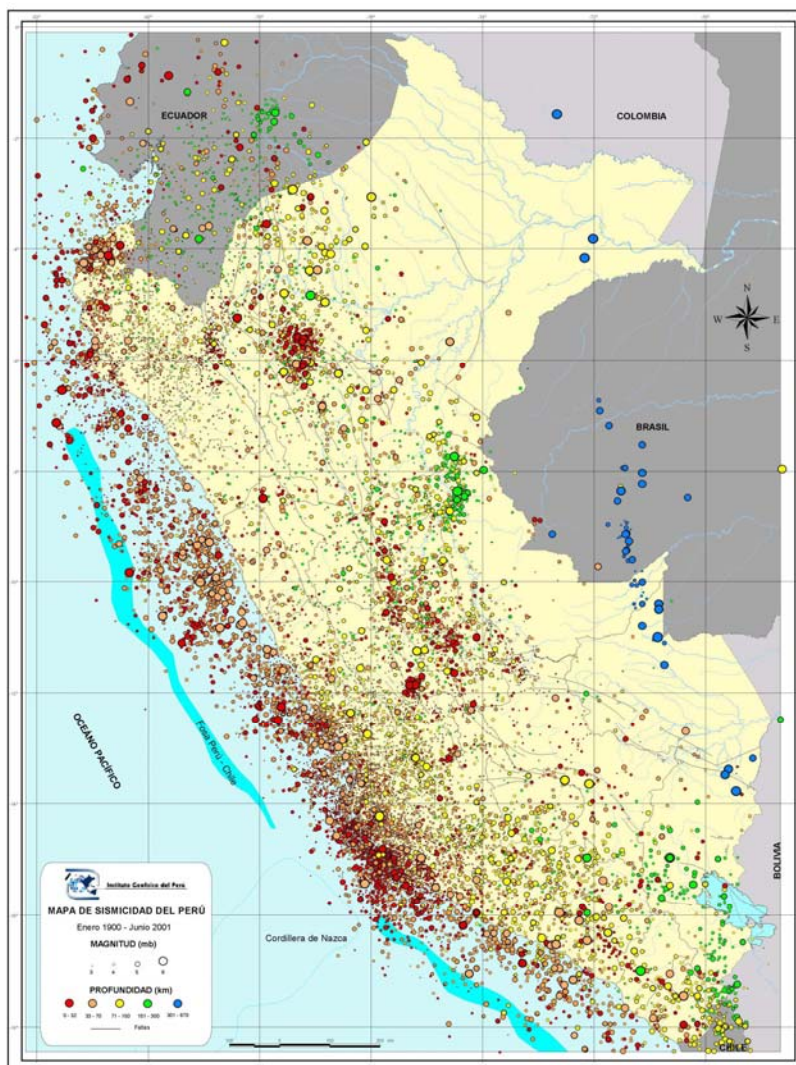


Figura 1. Sismicidad del Perú 1900-2001. Sismos instrumentalmente localizados y agrupados en las siguientes clases, de acuerdo a la profundidad y ambiente sísmico: 0-32 km (color: rojo), superficiales, colisión de las placas tectónicas y reajuste tectónico. 33-70 km (color: naranja), intermedio-superficiales, subducción y reajuste tectónico, 71-150 km (color: amarillo), intermedios, subducción, 151-300 km, intermedios profundos (color: verde), subducción, 301- 670 km, profundos, subducción. Los 670 km es la profundidad máxima de los sismos detectados a la fecha. El mapa fue publicado en el Atlas de Peligros Naturales del INDECI-PNUD (2003).

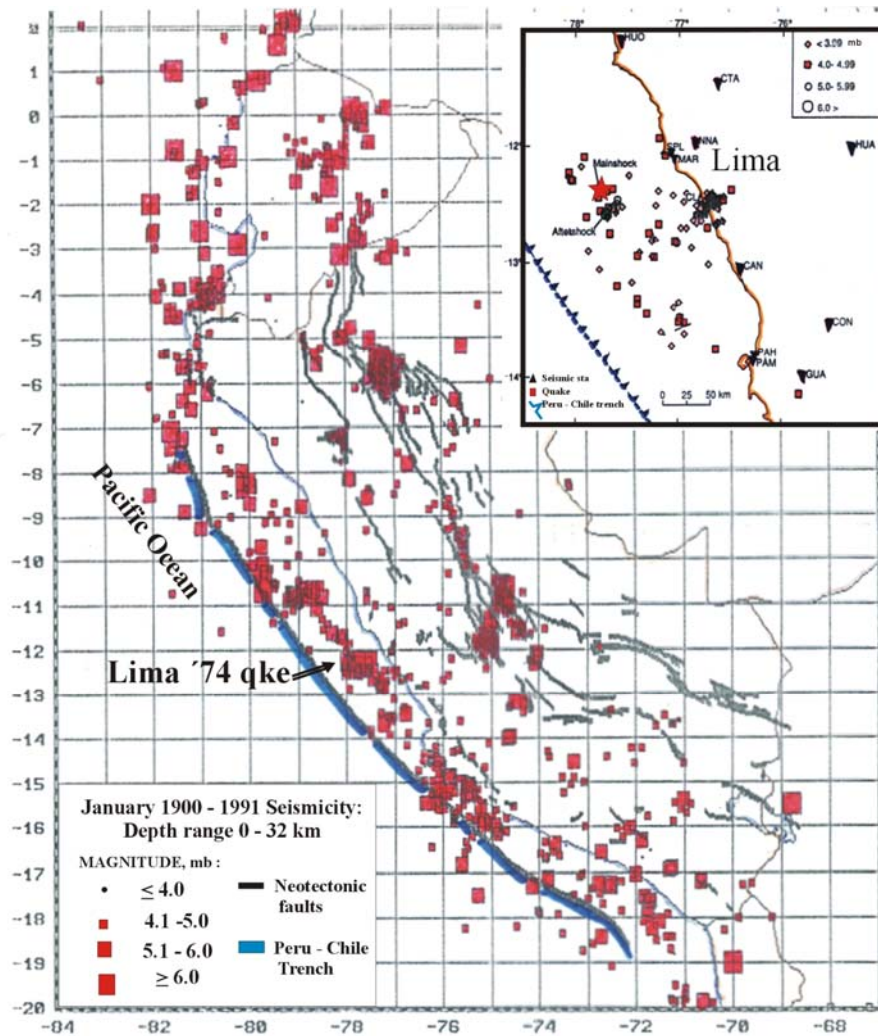
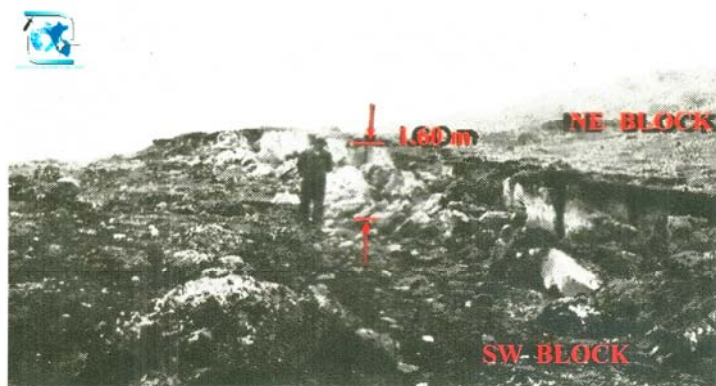


Figura 2. Sismicidad superficial y fallas neotectónicas de Perú. Sismos con profundidades entre 0 y 32 km, hipocentros para los que hay certeza que están relacionados con fallas activas del borde continental. Estos sismos son de muy alta peligrosidad. El tiempo de recurrencia de los sismos de gran magnitud es del orden de un mil años. La recurrencia de los sismos del ambiente de colisión es de decenas a centenas de años. En el mapa, se indica la localización del epicentro del terremoto de Lima de 1974, y en el inserto, se reproduce la distribución de las réplicas de dicho terremoto, localizadas por Langer y Spence (1995).



SISMO DEL AÑO 1969, MAGNITUD: 6.9 Ms; FALLA HUAYTAPALLANA

Figura 3. Falla geológica de Huaytapallana, Huancayo, sismo de 1969, magnitud 6.9 Ms. El hipocentro localizado a 5 km de profundidad, desplazamiento vertical máximo de 1.60 m y 0.70 m de desplazamiento horizontal sinistral. La falla permaneció sísmicamente activa por varios años después de ocurrido el evento (E. Deza, 1971).

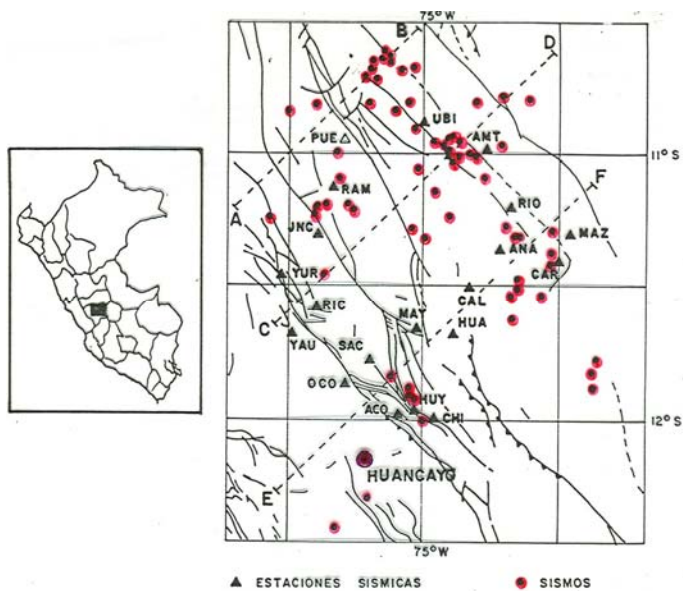


Figura 4. Actividad sísmica asociada con el reajuste tectónico cortical superficial en la zona Huancayo-Comas, al noreste de la ciudad de Huancayo. Resultados de un experimento temporal realizado por el ORSTOM (hoy IRD) y el IGP, Dorbath *et al.* (1986). Las letras a los extremos de las líneas punteadas designan los ejes de los perfiles verticales de sismicidad que se muestra en la Figura 5.

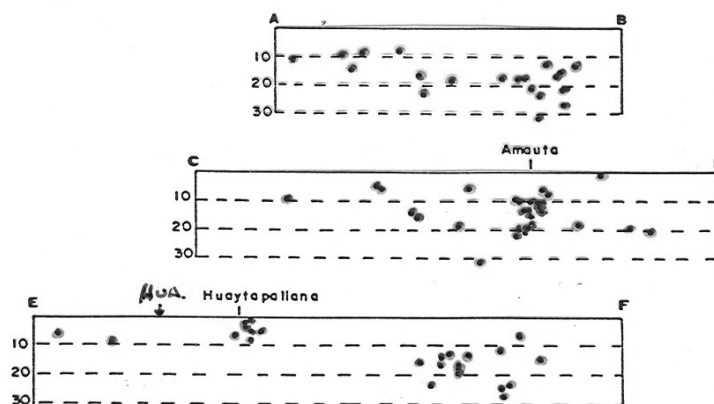


Figura 5. Perfiles verticales de sismicidad A-B, C-D, E-F de Dorbath *et al.* 1986), Figura 4. El perfil E-F muestra actividad sísmica a profundidades menores a 10 km en las fallas de Huaytapallana y Altos del Mantaro (hacia el Oeste). La actividad sísmica superficial, hasta profundidades de 30 km, es significativa e importante en el bloque tectónico superficial de la Cordillera Andina Oriental y contrafuertes subandinos.



Figura 6. Actividad eruptiva del volcán Ubinas del sur de Perú en el 2006. Esta actividad alcanzó un Índice de Explosividad Volcánica máximo de 3. La caída de tefra afectó severamente a la población, agricultura, ganadería, animales no domesticados y al ambiente natural. La población cercana al volcán fue evacuada. La actividad sísmica asociada con el proceso eruptivo del 2006 fue del tipo temblor y período largo, con algunas explosiones.

Los terremotos de gran magnitud ocurren en la zona más superficial de la zona de Wadati-Benioff: zona de colisión y trabazón de las dos placa tectónicas y predominancia de fallamiento geológico inverso (primeros 40-50 km de profundidad, por debajo del fondo marino). El terremoto de 1868 del sur de Perú se toma como sismo característico máximo para este bloque, cuya magnitud se estima que es > 9.3 Mw. Para el bloque norte, se toma como el sismo característico máximo el de 1746, con magnitud > 9.3 Mw. Las características generales de estos eventos son: una gran área (volumen) de ruptura en la zona hipocentral, gran área de sacudimiento severo del suelo-terreno, vasta extensión del área de percepción del sacudimiento del suelo, alteración del terreno y naturaleza: deslizamientos, derrumbes, licuefacción, gran destrucción del ambiente constructivo e infraestructura vital, especialmente la de alta vulnerabilidad, interrupción de las vías de comunicación terrestre, generación de grandes maremotos, gran número de réplicas, gran sufrimiento humano, entre otros efectos negativos. En suma, estos eventos producen desastres de gran magnitud y extensión.

Sin embargo, la actividad sísmica más violenta y peligrosa ocurre en el continente, aquella producida por el reajuste tectónico debido a la colisión-trabazón de las dos placas tectónicas mencionadas supra. Esta actividad sísmica está asociada con fallas geológicas superficiales activas (Figura 2), muchas de las cuales rompen superficie y producen fallas geológicas de decenas de kilómetros de longitud con desplazamientos (vertical y horizontal) del orden de metros: sismo de Quiches (Ancash) de 1976, Huaytapallana (Junín) 1969. Hay casos documentados en los cuales la aceleración de la gravedad en la superficie fue excedida, como el sismo de Huaytapallana, Huancayo, de 1999 (Figura 3).

La distribución de la actividad sísmica continental es muy superficial. Las Figuras 4 y 5 ilustran esta característica de la actividad sísmica superficial de reajuste tectónico.

El tercer ambiente sísmico es el volcánico. Los volcanes activos del sur de Perú se encuentran al sur de la latitud $\sim 15.5^\circ$ sur. Se conoce que hay actividad sísmica volcánica desde el volcán Sara Sara, cerca a Nazca, hasta los volcanes en la frontera con Chile. En la Figura 6 se muestra la actividad fumarólica del volcán Ubinas, y en la Figura 7 la clase de actividad sísmica detectada en dicho volcán durante el período de actividad del año 1998. Los sismos son de pequeña magnitud, algunos son sensibles. Históricamente, la actividad más fuerte documentada fue la asociada con la erupción del volcán Huaynaputina en 1660. Este volcán tuvo un índice de explosividad volcánica de 6. Los sismos se sintieron en la ciudad de Arequipa a ~ 80 km de distancia del epicentro. Los efectos del sacudimiento del suelo no son tan severos como los causados por los sismos de los otros dos ambientes sísmicos descritos líneas arriba.

Hay una cuarta clase de actividad sísmica, de la cual se conoce poco. La actividad sísmica inducida por alteración de las condiciones naturales, tales como, la extracción de petróleo en la selva, pozo Pavayacu, es el más conspicuo, el sismo fue sentido en superficie. Los reservorios de agua distribuidos en la vertiente occidental de los Andes. Aún no se tiene documentado un caso histórico de importancia de sismicidad inducida.

Mapas de peligro sísmico

Los mapas de peligro sísmico presentan una visión de la peligrosidad de la actividad sísmica en el espacio y tiempo de un determinado territorio, con el fin de que la sociedad tome las medidas pertinentes para evitar o mitigar los efectos negativos de los sacudimientos del terreno y el impacto de los fenómenos geológicos e incidencias tecnológicas asociados con los grandes terremotos. Se asume que una vez producida la evaluación de la peligrosidad de la sismicidad de un territorio y presentada en la forma de un mapa o plano, las personas, comunidades o la sociedad tomen las medidas preventivas del caso para evitar que a la ocurrencia de los niveles de severidad de sacudimiento del suelo pronosticados, no se produzcan pérdida de vidas humanas y daños que paralicen el funcionamiento de la sociedad, i.e., no se produzcan desastres por la incidencia directa del sacudimiento del suelo o el impacto de los fenómenos asociados: maremotos, fallamiento geológico del terreno, deslizamientos, derrumbes, avalanchas de nieve-hielo-detritos, licuefacción, etc. Lo cual implica: reforzar las edificaciones, planificar el desarrollo urbano, implementar medidas de alerta (maremotos, avalanchas, inundaciones, etc.), preparar a la población (simulacros sin previo aviso), planificar el desarrollo nacional (incluir el factor de la posibilidad de desastre en los proyectos de inversión y desarrollo), organizar los medios de comunicación masiva de la población, etc.

Un mapa de peligro sísmico es un pronóstico de la severidad de sacudimiento del suelo para un determinado número de años y con una probabilidad de excedencia, usualmente para 50 años de exposición y 10% de probabilidad de excedencia, i.e., hay un 10% de probabilidad que el valor calculado o especificado en el mapa sea excedido en los 50 años para los cuales se ha realizado el cálculo. Normalmente, la severidad de sacudimiento del suelo se especifica en función de las aceleraciones sísmicas máximas, para diseño sismorresistente. Algunas veces, se elaboran estos mapas en términos de intensidades macrosísmicas, cuando se preparan para fines de Defensa Civil.

Estos mapas se preparan mediante integración de la información sismológica, geofísica, geológica, tectónica e histórica. Los cálculos se realizan mediante proce-

dimientos probabilísticos cuando hay información observacional e instrumental, o determinísticos cuando no hay catálogos sísmicos, pero sí existe historia sísmica.

Por otro lado, la escala y resolución espacial de los mapas de peligro sísmico depende del propósito para el cual se prepara el mencionado documento. Hay mapas nacionales, regionales, urbanos, así como también, hay evaluaciones de peligro sísmico para sitios específicos. En el presente documento se tratará de los mapas nacionales y se introducirán algunos conceptos sobre los mapas de peligro sísmico en centros urbanos.

Mapas nacionales de intensidades macrosísmicas máximas históricas

La preocupación de reflejar la peligrosidad de los fenómenos sísmicos en el Perú en mapas, deviene desde los inicios de la documentación y estudios sísmicos sistemáticos iniciados por E. Silgado, quien publicó el primer esbozo de la distribución de las intensidades máximas en el territorio peruano en 1978 (Silgado, 1978). Posteriormente, Ocola (1982) publicó un mapa con las localidades para las cuales se encontró documentación escrita sobre la severidad de sacudimiento del suelo y se le asignó el valor de intensidad máxima, según la evaluación de los efectos reportados para el evento sísmico. No se hicieron curvas de igual intensidad de sacudimiento máximo (isosistas máximas), porque las intensidades máximas producidas por los sismos destructivos son áreas no puntos. Por otro lado, las intensidades históricas están documentadas en los lugares donde existen y/o existieron centros poblados históricamente. Esto implica, que en zonas como la Subandina, de relativa alta sismicidad, existan grandes tramos sin intensidades máximas severas. Al hacer contornos, inducen a concluir que dichas zonas son de baja peligrosidad sísmica. Lo cual es un error. No se debiera elaborar estos mapas con información puntual, sino con las envolventes de las áreas de máximas intensidades de cada evento y en coherencia con el patrón tectónico activo. Se debe tener en cuenta que el tiempo de recurrencia, estimado con base en estudios de paleosismicidad de los grandes eventos de reajuste tectónico en el continente, es de más de un mil años. Los catálogos sísmicos instrumentales no alcanzan los cien años de datos calificados.

El mapa de intensidades máximas actualizado se presenta en la Figura 8. Una versión ampliada se publicó en el Atlas de Peligros Naturales de INDECI-UNDP (Ocola, 2003).

Mapas nacionales de peligro sísmico probabilístico

Con la difusión de la evaluación probabilística del peligro sísmico preconizada por Cornell (1968) y la elaboración de los primeros catálogos sísmicos instrumentales y

de intensidades macrosísmicas, se inició la elaboración y publicación de mapas de evaluación probabilística del peligro sísmico en el territorio peruano, entre los cuales se encuentra el de Casaverde y Vargas (1980) y Ocola (1982). La diferencia fundamental en la evaluación probabilística del peligro sísmico por diferentes grupos radica en los criterios empleados para identificar y determinar los parámetros estadísticos de la sismicidad de las zonas sismogénicas. Los ingenieros civiles, por lo general, identifican las zonas sismogénicas con base en la distribución de la actividad sísmica documentada en los catálogos instrumentales que utilizan. Los sismólogos y geofísicos utilizan como guía, además de la distribución espacial y temporal de la sismicidad, la información geológica, geofísica, tectónica y el concepto del “gap-sísmico”, para delimitar geográficamente las zonas sismogénicas y calcular los parámetros estadísticos característicos de su sismicidad. Muchos de los mapas de peligro sísmico de los ingenieros civiles reflejan los más altos niveles de peligro sísmico donde recientemente la actividad sísmica fue la más frecuente. Sin embargo, la naturaleza muestra que las zonas más peligrosas sísmicamente son aquellas donde histórica o prehistóricamente han ocurrido grandes terremotos y que en las últimas decenas o centenas de años no se han repetido dichos eventos con magnitudes similares. Pueden ocurrir eventos sísmicos, pero de magnitudes menores. Este es el concepto de “gap-sísmico” que utilizan los sismólogos. La delimitación de las zonas sismogénicas requiere de una integración cuidadosa de información espacial multidisciplinaria, principalmente la neotectónica y geofísica.

En 1982 y con el apoyo de la OEA, se calculó el primer mapa de peligro sísmico probabilístico en términos de intensidades macrosísmicas (Ocola, 1982). Los cálculos se hicieron con el software EQRisk (McGuire, 1976). Se determinaron dos leyes de atenuación en función de intensidades macrosísmicas en la escala MSK para el ambiente sísmico de subducción y para el ambiente sísmico de reajuste tectónico del continente. El mapa se preparó con fines de Defensa Civil. Las funciones de atenuación se determinaron utilizando las envolventes de los gráficos Intensidad Macrosísmica *versus* distancia hipocentral. Los valores estimados son conservadores. La severidad de sacudimiento se calculó para una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años. Este mapa está incluido en el Atlas de Peligros Naturales de INDECI-PNUD (Ocola, 2003)

El mapa vigente de peligro sísmico de Perú fue el resultado del Proyecto Piloto financiado por la Comunidad Europea a los países de la Comunidad Andina de Naciones (en ese entonces, los países que conformaban el Pacto Andino). El investigador principal de parte de la Comunidad Europea fue el profesor D. Giardini, y participaron los doctores Julio Mezcuca de España, Bernard Dost de Holanda, Winfried Hanka de Alemania. De la parte de la CAN, participaron los doctores Herbert

Rendón de Venezuela, M. Cristina Dimatè de Colombia, Hugo Yépez de Ecuador, Larry Drake de Bolivia y L. Ocola de Perú. Se utilizó el catálogo sísmico instrumental de CERESIS de 1994, el software FRISK de R. McGuire. Se empleó la ley de atenuación de R. Saragoni (Saragoni *et al.*, 1981) para zonas de subducción, y para las zonas sismogénicas de reajuste tectónico continental se utilizó las leyes de atenuación de Quijada *et al.* (1993). La integración de los datos y procesamiento fue realizada en varios talleres del proyecto. El procesamiento final fue realizado por C. Dimatè y D. Giardini. La coordinación del Proyecto estuvo a cargo del profesor D. Giardini (Giardini *et al.*, 1997).

El mapa de peligro sísmico probabilístico resultante, se integró al Mapa Mundial de Peligro Sísmico del Proyecto GSHAPE, el cual ha tenido una gran difusión a nivel mundial. El mapa correspondiente a Perú, ligeramente modificado, se presenta en la Figura 9, el mismo que se encuentra publicado en el *Atlas de Peligros Naturales* de INDECI-PNUD.

El cálculo del peligro se hizo en términos de aceleraciones máximas, para una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años de exposición. Este mapa sirvió para zonificar el Perú e implementar la norma sismorresistente vigente (Figura 10) (NTE-E.030, 1997).

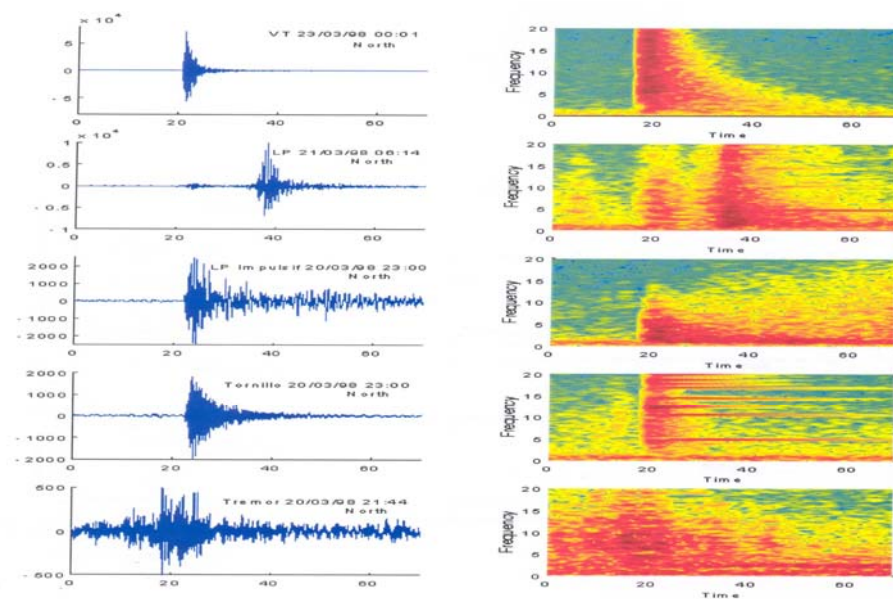


Figura 7. Señales sísmicas y espectrogramas (espectros en función del tiempo) de las diferentes clases de eventos o procesos volcánicos del volcán Ubinas.



Figura 8. Mapa de Intensidades Macrosísmicas Máximas publicado en el Atlas de Peligros Naturales de Perú del INDECI-UNDP del 2003. Los círculos indican la localización de uno de los lugares para los cuales existe descripción documentada escrita de los efectos máximos de los sismos históricos en las zonas mezosísmicas (zonas de máximos efectos macrosísmicos). Los número indican los años en que ocurrieron las intensidades máximas asociadas con el círculo. La primera versión de este mapa fue la del Proyecto SISAN publicada en 1982 (Ocola, 1982).

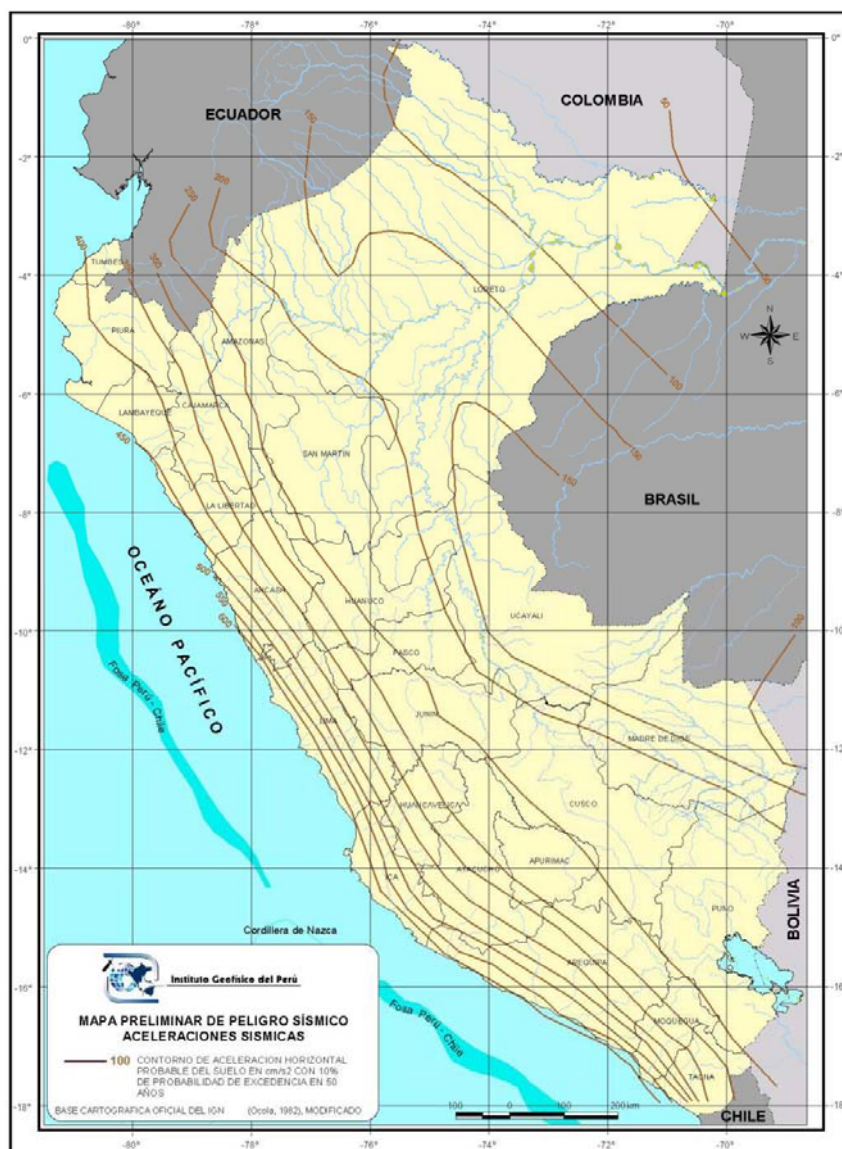


Figura 9. Mapa de peligro sísmico de Perú – aceleraciones sísmicas máximas en cm/s^2 (Gales), para un período de exposición de 50 años con un 10% de probabilidad de excedencia. El cálculo probabilístico se realizó en 1996. Se publicó en el Atlas de Peligros Naturales del Perú de INDECI-PNUD, 2003.



Figura 10. Zonas sísmicas oficiales de Perú (NTE-E.030, 1997). Los Factores de Zona, en unidades de la aceleración de la gravedad terrestre (g), son: Zona 3: 0.4 g, Zona 2: 0.3 g, Zona 1: 0.15 g. “Este factor se interpreta como la aceleración máxima del terreno con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años” (NTE-E.030, 1997).

Mapas de peligro sísmico de ciudades

Normalmente, los mapas nacionales y regionales de peligro sísmico están calculados con referencia a suelos competente. Sin embargo, las ciudades, por lo general, están emplazadas en suelos blandos, heterogéneos y bajo la influencia del agua subterránea a poca profundidad bajo la superficie. Esto implica que, cuando se desea calcular la severidad de sacudimiento en terrenos urbanos, se debe evaluar el incremento o disminución de la severidad de sacudimiento del suelo debido a las condiciones locales del sitio para el cual se realiza la evaluación. Cuando esta evaluación se hace para toda una ciudad o centro poblado, el resultado es una microzonificación de la severidad probable del sacudimiento del suelo.

Una microzonificación sísmica requiere evaluar la respuesta de los terrenos urbanos al sacudimiento de un terremoto. Lo que requiere de una instrumentación densa con instrumental sísmico para movimientos fuertes. Esto implica una gran inversión para instrumentación de una red densa de acelerógrafos y la operación de la misma. Por otro lado, el tiempo de recurrencia de sismos fuertes destructores es muy largo, algunos son de cientos de años. Si se cuenta con el financiamiento, solo es esperar y confiar en la buena suerte, para tener información para hacer frente al sismo destructor.

Por otro lado, si se cuenta con financiamiento y no hay indicios de la ocurrencia de un evento fuerte a corto plazo, se procede a obtener la información de las propiedades físicas y mecánicas de la columna suelo-subsuelo, que es lo costoso, y se procede al modelaje numérico para niveles de deformación del suelo comparables a los determinados para sismos destructores. Este procedimiento es adoptado en los estudios de sitio para obras de gran envergadura y costo, o para ciudades especiales que cuentan con el financiamiento apropiado, como lo ejecutado para la ciudad de Bogotá, Colombia (INGEOMINAS y U. de los Andes, 1997).

Si una ciudad es afectada por un movimiento sísmico fuerte que produce información sobre daños en construcciones populares, es posible hacer un levantamiento sistemático de los efectos de sismo en: las personas, viviendas de uno o dos pisos, objetos dentro de las viviendas, la naturaleza y los animales, para estimar la severidad de sacudimiento del suelo. Además de observar y evaluar la calidad de la construcción y materiales, técnica constructiva, antigüedad, grado de preservación, clase de suelo y su comportamiento, para explicar la distribución y nivel de daños. La selección de edificaciones de solo uno y dos pisos minimizan la amplificación de la severidad de sacudimiento debido al factor estructural. Cuando los datos se toman cuidadosa y sistemáticamente, el resultado es una

distribución diferencial de la severidad de sacudimiento del suelo asociada a la respuesta de los terrenos donde se asientan las viviendas. Este procedimiento se empleó por primera vez en la ciudad de Arequipa, Perú, después del terremoto de febrero 16 de 1979 (Ocola, 2005). El resultado de la respuesta diferencial de la ciudad de Arequipa, para ese sismo, se muestra en la Figura 11. El IGP aplica rutinariamente este procedimiento para evaluar los efectos de los terremotos de Perú en ciudades desde 1979, produciendo mapas de respuestas similares al de la Figura 11. Esta clase de mapas indica que el peligro es mayor donde la intensidad de sacudimiento fue mayor.

En algunos casos, cuando ocurre un terremoto que afecta una ciudad, en ella se encuentra estaciones acelerográficas que registran el movimiento fuerte. Si para dicha ciudad se hace un levantamiento sistemático de los efectos del terremoto, y si se conoce las velocidades de propagación de las ondas sísmicas de corte y densidades de masa en las capas de suelos más superficiales, y además se conoce la frecuencia dominante en el sitio, se puede calcular la aceleración máxima asociada a la intensidad macrosísmica evaluada para dicho sitio. De esta manera, se obtiene una estimación de la respuesta del suelo en el sitio para el cual se cuenta con la información geotécnica del suelo, las velocidades de propagación, la frecuencia dominante y la intensidad macrosísmica. Este procedimiento se aplicó para la ciudad de Lima para las intensidades macrosísmicas del terremoto de octubre de 1974. La Figura 12 muestra los 17 valores calculados (Ocola, 2007), y los valores de las aceleraciones máximas registradas en dos acelerógrafos. Las aceleraciones máximas calculadas para los pozos más cercanos a las estaciones acelerográficas no difieren más de 0.01 g. Se cuenta con información de intensidad macrosísmica en ~500 puntos para Lima Metropolitana del mencionado terremoto. Con información geotécnica y frecuencias predominantes adicionales, se espera cubrir el resto de Lima Metropolitana.

Mapas de riesgo sísmico

Mapas nacionales de riesgo sísmico

En la sección anterior se ha descrito los avances y documentos disponibles concernientes a la evaluación del peligro sísmico. Para la evaluación del riesgo sísmico se requiere la evaluación de las vulnerabilidades de los elementos expuestos al peligro potencial. Esta tarea no se ha hecho para ninguna de las variables: población, ambiente constructivo, ambiente social, económico y cultural, etc. En consecuencia, no se han elaborado los mapas de riesgo a nivel país para estas variables, ni se ha calculado el índice de riesgo sísmico a nivel país.

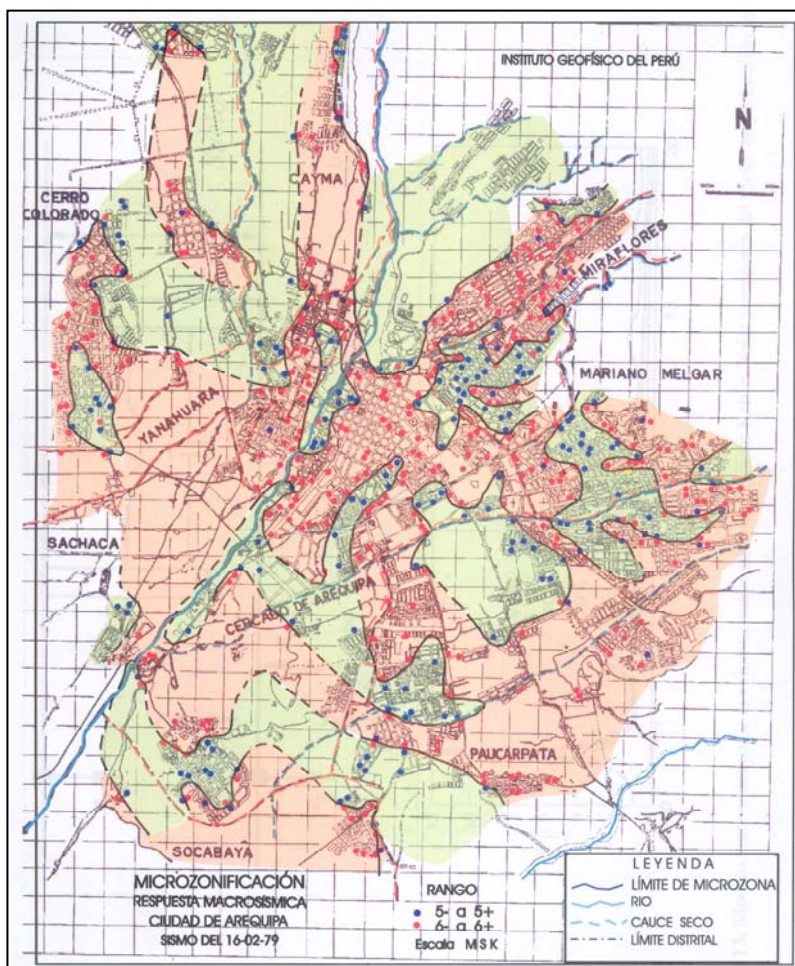


Figura 11. Respuesta Macrosísmica del suelo de la ciudad de Arequipa, Perú, al terremoto del 16 de febrero de 1979, magnitud: 7.2 Mw, epicentro: a 120 km al noroeste de la ciudad de Arequipa, cerca de la ciudad costera de Camaná. El levantamiento de información macrosísmica de campo y su posterior interpretación requirió adaptar la Escala de Intensidades Macrosísmicas MSK a las condiciones constructivas de Perú, el diseño de formularios para toma de datos en viviendas, suelos de cimentaciones y estructuras. Los resultados se interpretaron en términos de severidad de sacudimiento del suelo (intensidades MSK), vulnerabilidad observada (calidad global de la construcción), niveles de daños y antigüedad. La diferencia en color marca el agrupamiento de intensidades 5⁻ - 5⁺ y 6⁻ - 6⁺ MSK.

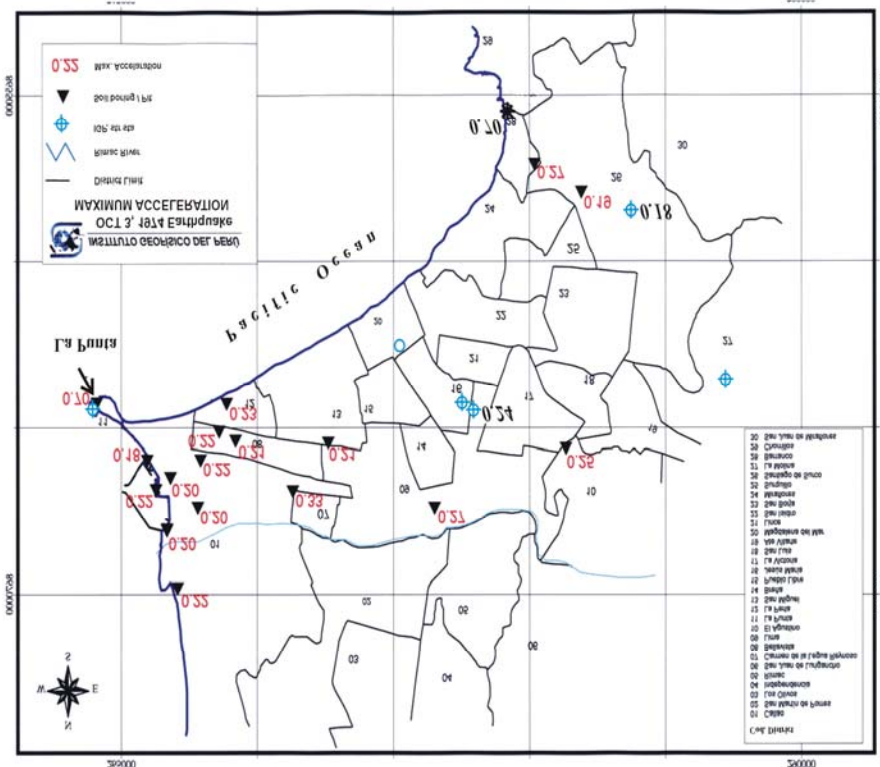


Figura 12. Aceleraciones máximas calculadas para el terremoto del 3 de octubre de 1974 en diferentes puntos de Lima Metropolitana y Callao. Los cálculos se hicieron en función de la intensidad macrosísmica, frecuencia característica e impedancia acústica de las ondas de corte del sitio donde se evaluó la intensidad macrosísmica. Los valores junto a los círculos con el signo “+” son las aceleraciones máximas registradas por los acelerógrafos del IGP. Los valores asociados con los triángulos son valores calculados por Ocola (2007). Los nombres junto a los números del inserto son los códigos de los distritos de Lima y Callao.

Evaluación del riesgo-1980: Distrito de Barranco, Lima

Como productos de los proyectos de la OEA-IGP, se elaboraron los Catálogos Sísmicos, se calculó los mapas nacionales de peligro sísmico, y se desarrolló una metodología para evaluar, como proyecto piloto, la vulnerabilidad de las viviendas populares en función de la clase y calidad de los elementos constructivos de las viviendas populares de una parte del distrito de Barranco del Lima. Además se

implementó curvas *ad hoc* para estimar los daños probables en las viviendas 1-2 pisos de adobe, albañilería sin confinar (material: ladrillo, bloquetas, etc.) y albañilería confinada (material: ladrillo, bloquetas de cemento, columnas y vigas de concreto armado) en función de la intensidad macrosísmica. Las curvas fueron similares a las observadas en la respuesta macrosísmica del ambiente constructivo de la ciudad de Arequipa para el terremoto de febrero de 1979.

Se hizo una inspección sistemática de vivienda por vivienda en el Distrito de Barranco, llenando formularios especialmente diseñados para tal fin. La vulnerabilidad y nivel de riesgo se calculó para dos niveles de severidad de sacudimiento del suelo: 8- y 9-MSK, de acuerdo al mapa de peligro sísmico calculado para Perú en función de intensidades macrosísmicas. Los resultados de los daños probables para Barranco, año 1980, para intensidades 8- y 9-MSK, se presentan en la Figura 13. Los daños se expresan en niveles de daño de la escala MSK. El daño dominante para la intensidad 8 MSK es 3, plano superior de la Figura 13. La mayoría de casas de adobe, son reparables. En cambio, los daños probables de Barranco-1980, para una intensidad de 9 MSK, es de nivel 4 MSK, plano inferior de la Figura 13. Involucra grandes grietas y derrumbes parciales de muros. Las viviendas no son reparables. A partir del año 2007, el ambiente constructivo de la zona evaluada ha cambiado drásticamente. La mayoría de las edificaciones son de concreto armado y abundan los edificios altos.

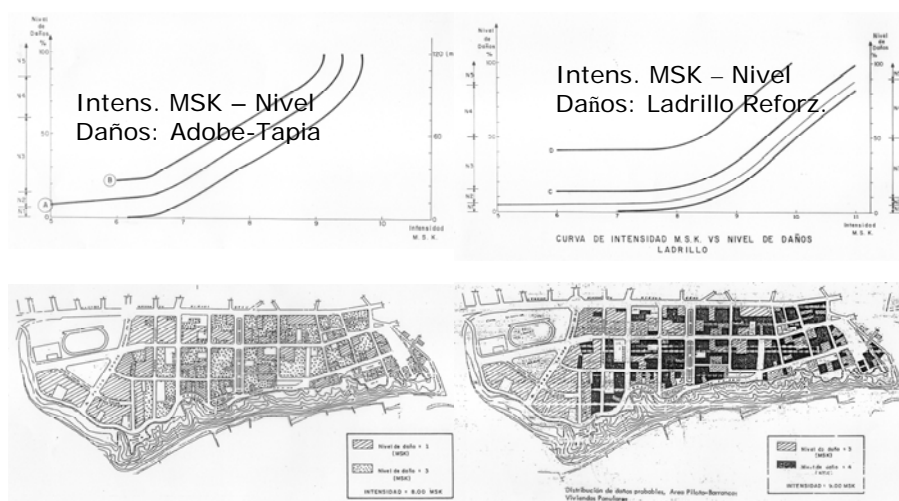
Se comparó la información obtenida de la inspección sistemática de las viviendas con la de las fichas existentes en el Municipio de Barranco de las declaraciones de los propietarios sobre la propiedad. Se investigó la posibilidad de usar la información de las declaraciones de los propietarios para realizar la evaluación de la vulnerabilidad y los niveles de daños posibles para intensidades macrosísmicas de 8 y 9 en la escala MSK. Se encontró que la cantidad de información contenida en las declaraciones de los propietarios sobre sus viviendas eran suficientes para la evaluación de la vulnerabilidad, y por tanto, había la gran posibilidad de realizar masivamente el ejercicio para toda Lima Metropolitana mediante computadoras, sin necesidad de la inspección sistemática de vivienda por vivienda. El único problema que encontramos fue que, a nivel provincial, la información no estaba disponible: era de naturaleza confidencial.

Mapas nacionales de los factores generales de vulnerabilidad

El factor vulnerabilidad conceptualizado desde la perspectiva social es mucho más amplio y complejo de lo que hasta aquí se ha definido. Así por ejemplo, Cardona (2004) define la vulnerabilidad como una predisposición intrínseca, y ser susceptible a daño. Por otro lado, Rashed T. y J. Weeks (2003), mencionan que el problema es complejo y no bien condicionado para el cual no hay una solución única identifi-

cable objetivamente. La vulnerabilidad es una función de la sensibilidad de un sistema social o físico a los cambios que puede introducir un fenómeno natural, a la capacidad de adaptación o reacción de la comunidad ante el impacto potencial, y a su grado de exposición. Por otro lado, en contra posición surge el concepto de resiliencia, como se mencionó en secciones anteriores. Por el cual, el sistema social y la sociedad no son mayormente sensibles a los impactos y cambios ocasionados por los peligros y tienen capacidad de adaptarse a la situación sin mayores problemas. La vulnerabilidad varía en función del espacio debido a la ligazón que existe entre las características socioeconómicas, culturales, demográficas, e históricas, además de su variabilidad en el tiempo.

Los principales factores generales de la vulnerabilidad son: pobreza, densidad poblacional y desarrollo humano. Los desastres afectan mayormente a “la clase más desposeída” y aniquila la economía de los países en desarrollo.



Daños – Intensidad 8 MSK

Daños – Intensidad 9 MSK

Figura 13. Riesgo sísmico estimado de viviendas populares del distrito de Barranco, provincia de Lima, año: 1980. Daño probable estimado según las curvas “Nivel de Daño vs. Intensidad Macrosísmica” (Figuras superiores) para la clase de vivienda dada: adobe-tapia y ladrillo reforzado, y calidad (vulnerabilidad) de vivienda: Buena, Regular, Mala. Distribución de daños (figuras inferiores): Daños 2- y 3-MSK para Intensidad Macrosísmica 8 MSK, y daños probables 3- y 4-MSK para Intensidad Macrosísmica 9 MSK. Viviendas con daños 4 MSK no son reparables.

Por otro lado, si una comunidad es pobre y no tiene los medios ni los bienes para capacitar a sus miembros, dicha comunidad es altamente vulnerable ante cualquier cambio perjudicial en su entorno, por falta de conocimiento, bienes y facilidades. En las siguientes secciones, se trata de estos factores a nivel país. Se tratará de identificar donde se encuentran los puntos críticos vulnerables al impacto de los fenómenos sísmicos.

Distribución territorial del índice de pobreza

La cuantificación de la pobreza se hace en términos absolutos y relativos. La pobreza absoluta cuantifica el número de personas por debajo de la línea de pobreza, la cual es independiente del lugar y del tiempo. Para que la medida sea absoluta, la línea de pobreza debe ser la misma en diferentes países. El Ministerio de Economía y Finanzas de Perú (MEF, 2001), para esta clase de medida de pobreza, “toma en cuenta el costo de una canasta mínima esencial de bienes y servicios y considera como pobres a todos aquellos cuyo consumo o ingreso está por debajo de ese valor”.

La pobreza relativa define la “pobreza” como aquella que está por debajo de una línea de pobreza relativa. Una medida relativa de pobreza es, por ejemplo, cuando se define como pobres aquellas familias cuyo ingreso económico es menor que el 50% de los ingresos medios de la población.

Además de los dos grupos mencionados, al cuantificar los niveles de pobreza se considera los grupos excluidos o marginados por la sociedad, entre otras razones, su pobreza, calidad de vida, vecindades, etc.

Al calcular la severidad de pobreza, el MEF utilizó el método de la línea de pobreza y el gasto de consumo como medida del bienestar. El nivel de pobreza se determina de la comparación del “valor *per cápita* de gasto en el hogar con el valor de una canasta mínima denominada línea de pobreza”. Las canastas mínimas “aseguran el consumo de 2,318 kilocalorías diarias por persona. La valorización de las Canastas Mínimas alimentarias se realizó considerando los precios reales pagados por los hogares en sus lugares de residencia”. El método de línea pobreza por consumo tiene las ventajas de ser más estable que el de ingresos, incorpora todos los bienes y servicios que consume el hogar y se refiere a lo que realmente se consume.

El MEF (2001), para asignar recursos financieros al país en el 2001, calculó los Índices Distritales de Pobreza, mediante el producto de la severidad de la pobreza promedio por habitante en cada distrito multiplicado por la población del distrito, normalizando dicho índice al 100% para todo el territorio peruano. Se consideran “pobres los hogares cuyo gasto total *per cápita* es menor al costo de una Canasta Básica de Consumo (CBC) que incluye una canasta alimentaria más otros bienes y

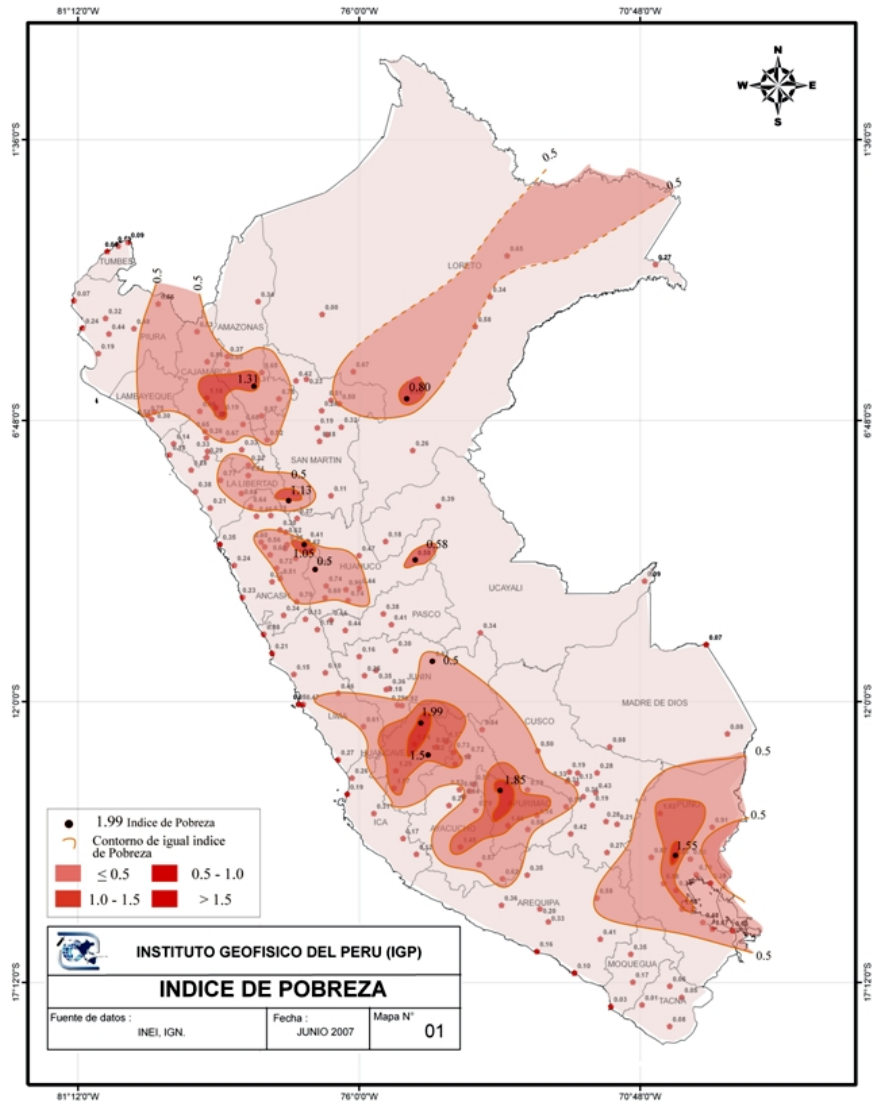


Figura 14. Patrón espacial de la pobreza en el Perú, según los resultados del MEF. Las curvas de igual índice de pobreza se han construido en base de los valores provinciales del MEF. Los valores puntuales se han localizado en la capital de cada provincia del territorio peruano. La mayor pobreza se distribuye en núcleos discretos a lo largo de la zona alto andina. Estos tienden a localizarse en los asentamientos de las antiguas culturas andinas. La influencia de la historia es evidente.

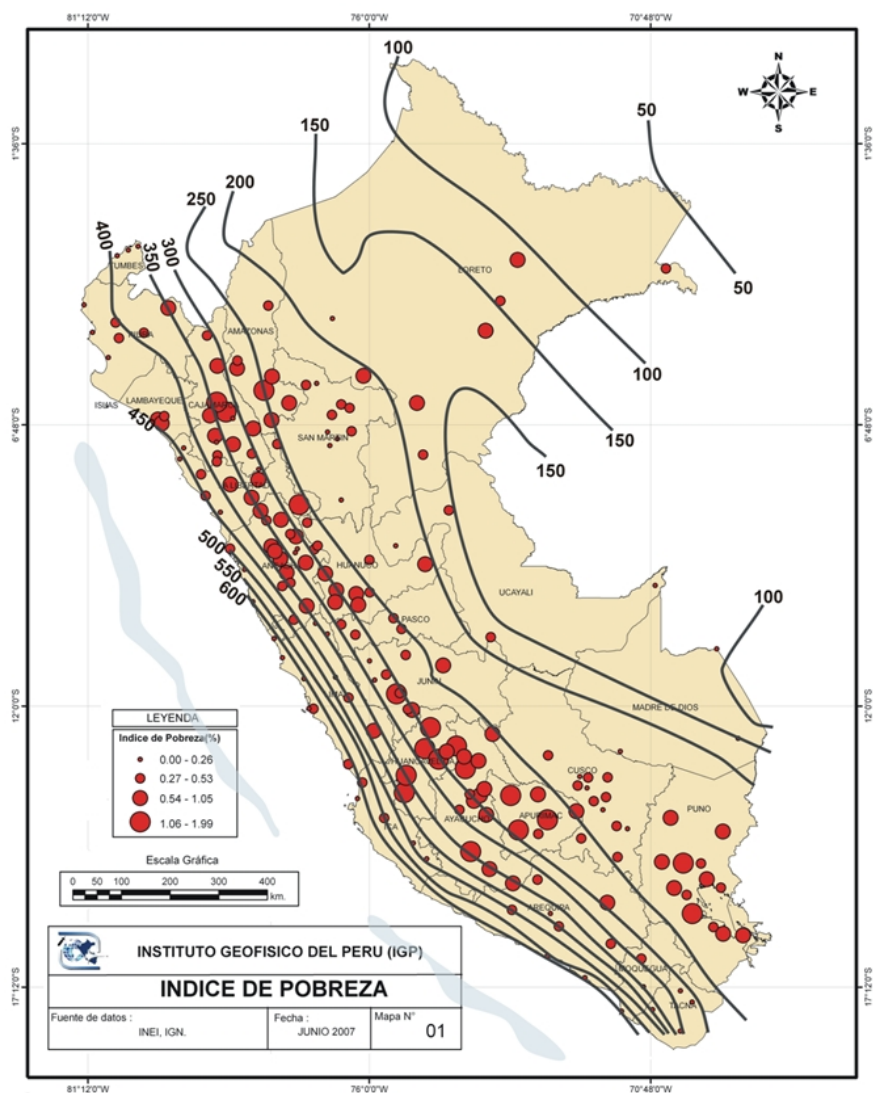


Figura 15. Mapa del Índice de Pobreza por capitales de provincia y el Mapa de Peligro Sísmico del Perú (Figura 9) superpuestos. Los Índices de Pobreza más bajos coinciden con los niveles de máximo peligro sísmico. Los mayores Índices de Pobreza ocurren entre las curvas de aceleración sísmica de 200-400 cm/s^2 . Las construcciones de adobe-tapia en la zona alto andina de mayor concentración, se localizan entre estas curvas isogálicas, Figura 20.

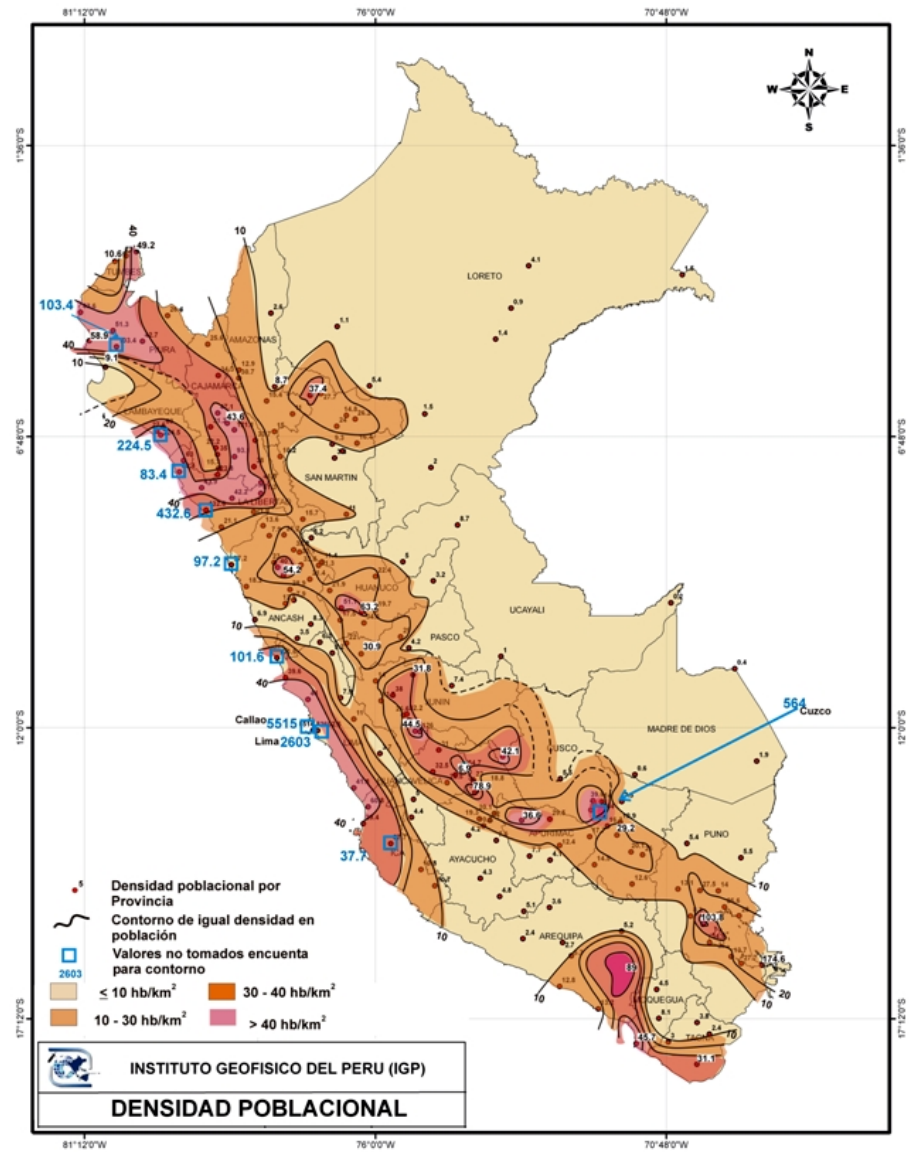


Figura 16. Patrones espaciales de la densidad poblacional, por provincia, del territorio peruano. Datos por provincia del INEI para 2005. La construcción de las curvas de igual densidad poblacional: (número de habitantes por km²: hab/km²), no se tomó en cuenta los valores de las provincias con signos especiales que tienen indicado el número de hab/km².

servicios no alimentarios”. La severidad de pobreza es el “valor promedio de los cuadrados de las diferencias entre los ingresos de los pobres y la línea de pobreza”.

En la Figura 14, se presenta la distribución del Índice de Pobreza en el territorio continental peruano por provincia, para una población proyectada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) al 2001. Los valores están asignados a las capitales de provincias. El mapa muestra que la mayor pobreza está concentrada en la zona alto andina, con núcleo donde se desarrollaron las ancestrales culturas andinas. En la Figura 15, se muestra la superposición de las curvas de igual peligro sísmico sobre la distribución puntual del Índice de Pobreza. Las zonas de máximo peligro sísmico, coinciden con la zona del más bajo índice de pobreza. Sin embargo, los centros de mayor pobreza, se encuentran entre las curvas de aceleración sísmica de 400- y 200-cm/s². El ambiente constructivo en toda la zona alto andina, principalmente de adobe o tapial, es altamente vulnerable. Las posibilidades de desastre son altas.

Las diez provincias (en paréntesis la Región a que pertenece) de mayor Índice de Pobreza en 1993 fueron, según el MEF (2001) por orden de severidad de pobreza: Tayacaja (Huancavelica), Andahuaylas (Apurímac), Huancavelica (Huancavelica), Huaytará (Huancavelica), Azángaro (Puno), Puno (Puno), Aymaraes (Huancavelica), Lucanas (Ayacucho), Angaraes (Huancavelica), Luya (Amazonas). Estas provincias constituyen los puntos críticos o álgidos de la pobreza en el Perú. Dos capitales de Región están entre las provincias más pobres. Huancavelica es la Región de mayor pobreza en territorio Peruano, seguida por Apurímac y Puno.

Distribución territorial de la densidad de población

La información básica proviene del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2007). La densidad de población en términos de número de habitantes por km² por provincia, graficados en las capitales de provincias se presenta en la Figura 16. Se ha graficado líneas de igual densidad de población con la finalidad de delinear los polos con mayor densidad poblacional. Es evidente, que la mayor parte del territorio está bajamente poblado, y la población se concentra en las ciudades. Con excepción de las provincias de Arequipa: 89 hab/km², Moquegua: 46 hab/km² y Tacna: 31 hab/km², la costa sur y la cordillera occidental están relativamente deshabitadas. En la costa central y norte de Perú se encuentran emplazadas las provincias con mayor concentración de población. Es notable la concentración de población en la Provincia Constitucional del Callao: 5,515 hab/km², Lima: 2,603 hab/km², Trujillo: 433 hab/km², Chiclayo 225 hab/km². En la sierra, la mayor concentración poblacional se encuentra en el Altiplano Perú-Bolivia y en los valles interandinos, con las mayores concentraciones en los asentos de las culturas ance-

trales andinas. La mayor concentración poblacional se encuentra en la provincia del Cusco: 565 hab/km², Yunguyo: 175 hab/km², San Román: 104 hab/km². En la parte centro y norte andina, la provincia más poblada es Huánuco: 63 hab/km². En la selva la densidad poblacional es baja. En la Selva Alta, la mayor densidad poblacional se localiza en Rioja (Región San Martín): 37 hab/km².

La vulnerabilidad poblacional a los terremotos se puede apreciar en la Figura 17, que es una superposición de la densidad poblacional de Perú y las curvas del peligro sísmico de la Figura 9. Como se mencionó en secciones precedentes, el máximo peligro potencial se encuentra a lo largo de las costas sur y centro de Perú. En consecuencia, la posibilidad de desastres por terremotos y maremotos en la costa central y norte es muy alto, debido al número de vidas humanas que podrían perderse por acción de un terremoto y maremoto. Particularmente preocupante es la situación de la Provincia Constitucional del Callao. De suceder un maremoto como el de 1746, en 20 minutos no se podrá evacuar, por las rutas previstas, a más de 5,600 hab/km² que probablemente sean actualmente. Se debe considerar soluciones de evacuación a torres elevadas, con paso libre del agua en los primeros pisos, apropiadamente construidas y estratégicamente distribuidas en el territorio de la provincia.

En general, la vulnerabilidad de la población en la sierra es alta. Particularmente, en el altiplano y los valles interandinos, por la concentración poblacional en los centros poblados, la topografía agreste y la gran incidencia de los fenómenos asociados con los terremotos superficiales: fallamiento geológico, avalanchas de nieve-hielo-detritos, deslizamientos, derrumbes, embalses de ríos, etc. La influencia de la historia de las sociedades o comunidades y la geografía territorial es importante en la generación y la sostenibilidad de sus vulnerabilidades ante los peligros naturales. Un plan nacional de prevención y/o mitigación de la posibilidad de desastres no puede olvidar estas variables universales.

Distribución territorial del desarrollo humano

El concepto de desarrollo humano comprende el proceso por el cual se incrementan las opciones de elección de la gente y se mejora las capacidades humanas (la extensión/variedad de opciones: lo que la gente puede ser y hacer) y libertades, permitiéndole: vivir una vida larga y saludable, tener acceso al conocimiento y a un estándar de vida decente y digno, y participar en la vida de su comunidad y en las decisiones que afecten sus vidas. Permite avanzar en la riqueza de la vida humana en vez de las riquezas económicas en las cuales viven los seres humanos, que son solamente parte de ella (A. Sen, 2007). Este concepto se basa en el desarrollo de capacidades en vez del tradicional de satisfacer necesidades básicas. Es evidente, si la persona es capacitada y desarrolla habilidades, ella puede satisfacer sus necesidades y disminuir los niveles de pobreza.

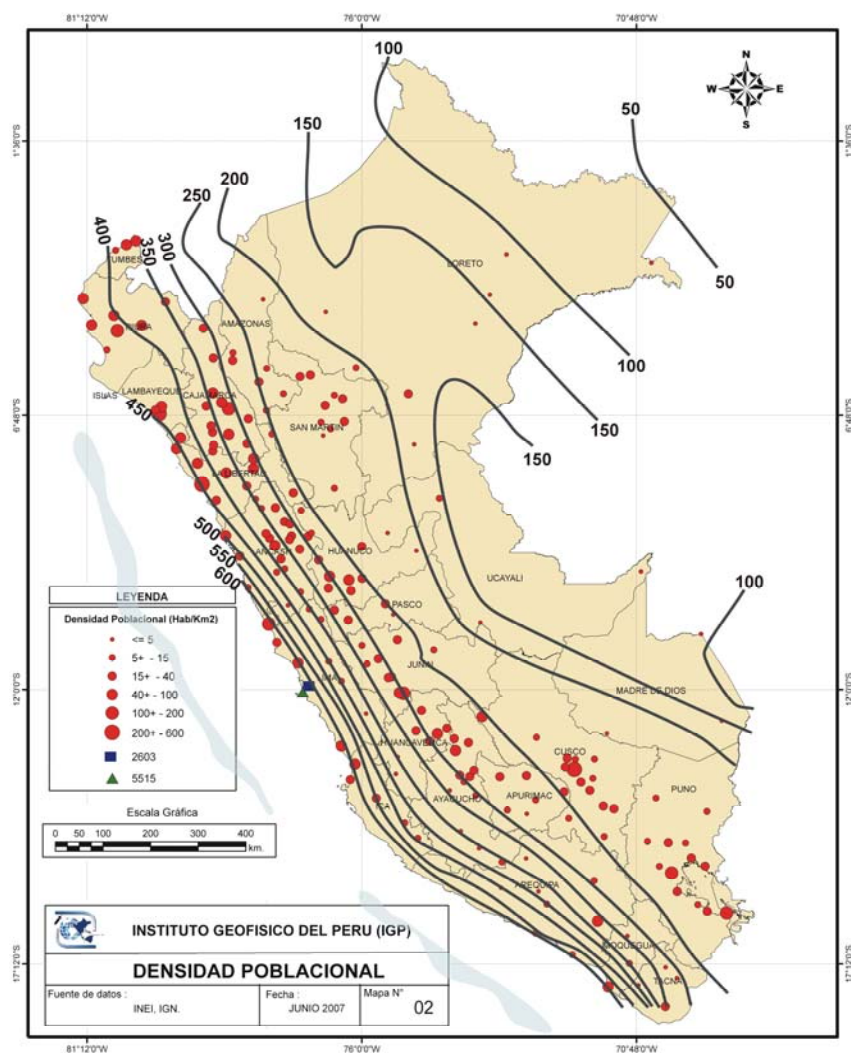


Figura 17. Distribución puntual, por provincia, de la población y el Mapa de Peligro Sísmico del Perú (Figura 9) superpuesto. Las curvas isogálicas en cm/s^2 . Las provincias de Lima con una densidad de $2,603 \text{ hab/km}^2$ y Callao con $5,515 \text{ hab/km}^2$ están localizadas en la zona de máximo peligro sísmico. Constituyen los puntos más críticos de la posibilidad de desastre sísmico por pérdida de vidas humanas. En la sierra, los puntos críticos son: Cusco 565 hab/km^2 , le siguen las provincias de Yunguyo 175 , Huancayo 126 , Hualgayoc 121 , San Román 104 .

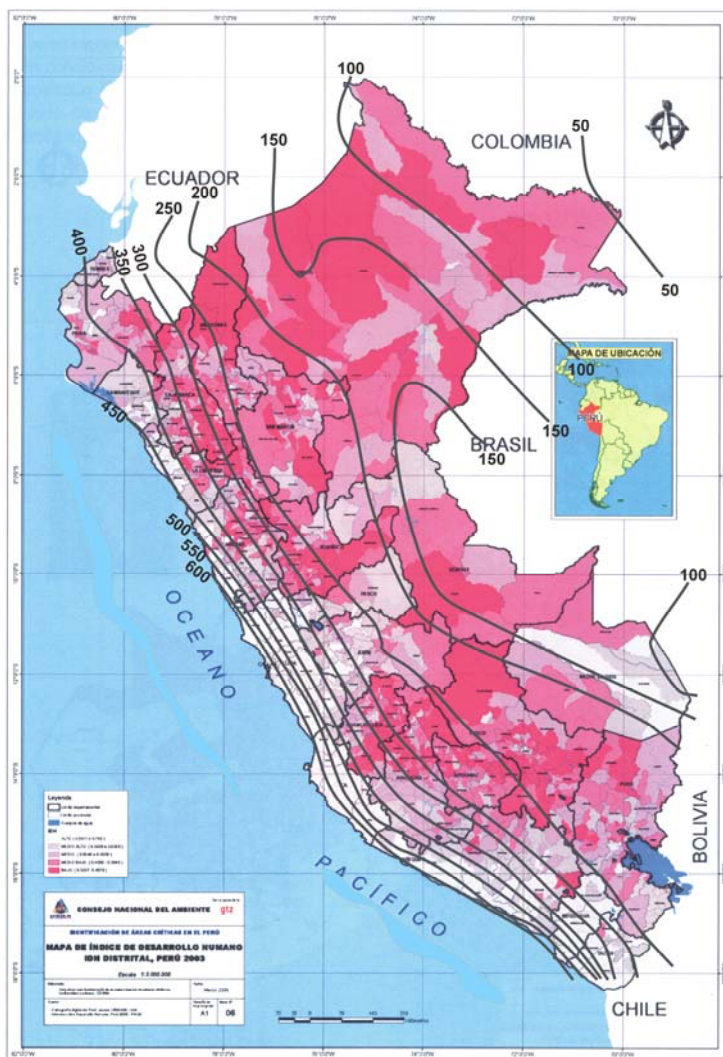


Figura 18. Mapa del Índice de Desarrollo Humano (IDH) de la CONAM-GTZ (Avellaneda *et al.*, 2006) y el Mapa de Peligro Sísmico de Perú, Figura 9, superpuesto. En el mapa, Avellaneda *et al.* clasifican el IDH en cinco niveles: el más desarrollado corresponde al patrón más claro, y el menos desarrollado al patrón más oscuro. Las poblaciones de la costa sur y centro tienen el IDH más alto, en la costa norte, el IDH es medio alto y medio, en la sierra sur altiplánica, sierra centro norte, zona subandina y selva, el IDH es medio bajo y bajo. En las Regiones de Junín y Pasco, el IDH es medio alto. Es evidente que las poblaciones de más alto IDH hacen frente al más alto peligro sísmico de territorio peruano.

Para comparar el estado de desarrollo humano de los diferentes países del mundo, el PNUD creó en 1990 el Índice de Desarrollo Humano (IDH); el cual determina el logro de un país o comunidad respecto a tres dimensiones básicas: longevidad (medida por la esperanza de vida al nacer), los conocimientos (medidos por la tasa de alfabetización y la duración media de la escolaridad) y el nivel de vida (medido por el ingreso real *per capita* ajustado según el costo de vida local, calculado a partir de paridades del poder adquisitivo). El IDH varía de uno (el mejor) a cero (el peor). Se considera el desarrollo humano superior cuando el IDH es igual o superior a 0.800, medio cuando IDH está entre 0.800 y 0.500, y bajo cuando el IDH es inferior a 0.500. Perú está listado, en base de datos compilados al 2004, en el puesto 82 con un IDH de 0.767, de un total de 177 países (*Human Development Report 2006*: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_Human_Development_Index).

En la Figura 18, se presenta el mapa de IDH distrital publicado por la CONAM & GTZ con datos del PNUD 2003 (Avellaneda *et al.*, 2006). El mapa muestra la distribución de los siguientes grupos de IDH: Alto: 0.6011 – 0.783, Medio Alto: 0.5509 – 0.6009, Medio: 0.5048 – 0.5508, Medio Bajo: 0.4580 – 0.5045, Bajo: 0.3227 – 0.4579.

El mapa muestra que a lo largo del Océano Pacífico, las Regiones de Tacna, Moquegua, Arequipa (la mayor parte), Ica, Lima, Lambayeque y Tumbes han alcanzado un IDH Medio Alto y Alto. En la sierra, sólo la Región Pasco y, en menor grado, la de Junín alcanzan un IDH de Medio Alto a Alto. En el resto de Regiones, predomina los IDH Bajo y Medio Bajo.

Los diez distritos con el más bajo IDH en el ámbito nacional peruano, según Avellaneda *et al.* (2006), con datos del PNUD 2003, son (con la provincia y región a que pertenecen en paréntesis): Casapara (Yungay, Ancash), Santa Rosa (El Dorado, San Martín), Anta (Acobamba, Huancavelica), Huancaraylla (Víctor Fajardo, Ayacucho), Omacha (Paruro, Cusco), Umari (Pachitea, Huánuco), Capacmarca (Chumbivilcas, Cusco), Huayllay Grande (Angaraes, Huancavelica), Ccarhuayo (Quispicanchi, Cusco), Quillo (Yungay, Ancash).

En el mapa del IDH, se han superpuesto las líneas de máxima aceleración del mapa de Peligro Sísmico, Figura 9. De la superposición, es evidente que las máximas aceleraciones ocurrirán a lo largo de las regiones con el mayor Índice de Desarrollo Humano. La magnitud de los desastres se espera que no sea tan traumática, ya que el factor capacidad de las sociedades costeñas es significativo. Por el contrario, el factor capacidad es mucho menor en la sierra, por lo tanto, las posibilidades de desastres es mayor, a igualdad de severidad del evento sísmico. Situación similar se da en la selva peruana.

Distribución territorial de las viviendas y su vulnerabilidad potencial

Según los resultados definitivos del Censo de Población y Vivienda del 2005 del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2007a), de un universo de 7'290,896 viviendas, el 71.1 % están localizadas en áreas urbanas y el 28.9 % en áreas rurales. De aquí, se desprende que para determinar las vulnerabilidades de casi 2/3 de las viviendas de la población peruana, se debe evaluar los niveles de peligro sísmico local de las áreas urbanas, es decir, se debe realizar una microzonificación sísmica y de otros peligros naturales asociados o independientes en las ciudades del país.

En cuanto a la resistencia de las viviendas a la severidad de sacudimiento, ésta se puede juzgar a partir de la naturaleza y calidad de los muros y paredes de las viviendas. De un universo de 5'858,149 viviendas, el primer grupo: 46.67% son viviendas con paredes de ladrillo o bloquetas de cemento o sillar con mortero de cemento o similar, el segundo grupo: 40.68% son viviendas de adobe o tapia y en menor grado de piedra con mortero de barro, y finalmente, el tercer grupo: 12.65% de las viviendas son de quincha, madera o estera. Este último grupo es el menos vulnerable al sacudimiento sísmico, aunque el más vulnerable a los incendios. El segundo grupo de viviendas es el más vulnerable al sacudimiento sísmico. Según el censo 2005, el 51.4% de las viviendas tiene techos pesados (concreto armado o tejas, caña o estereras con torta de barro), y el 48.6% tienen techos livianos (planchas de calamina, fibra de cemento o similares, madera, estera, otros). Este resultado implica que algunas casas del grupo de adobe tienen techos pesados, lo cual hace a este grupo de viviendas aún más vulnerable al sacudimiento sísmico.

La ocupación de las viviendas por la población fue la siguiente, según el Censo del 2005: de un total de 7'271,387 viviendas, el 87.30% son casas independientes, el 5.29% son departamentos en edificios, finalmente, el 7.32% son: viviendas en quinta o casa de vecindad o choza-cabaña o vivienda improvisada u otros. Esta tipología de viviendas es ocupada en un 97.41% por un sólo hogar, 2.01% por dos hogares, y el 0.58% son multi-hogares (21 casos de 9-hogares por vivienda, 51 casos de 8-hogares, 118 casos 7-hogares, etc.).

La distribución en el territorio peruano del porcentaje del universo total de viviendas censadas de las viviendas del primer grupo: paredes de ladrillo o bloquetas o sillar con mortero de cemento, por provincia se presentan en la Figura 19. El patrón espacial muestra una concentración de los círculos mayores a lo largo de las provincias costeras: corresponden a las principales ciudades del país. En la sierra, los círculos mayores se agrupan alrededor del Lago Titicaca y Cusco. Hay un segundo grupo importante en las capitales de las Regiones Ayacucho, Huancavelica, Junín, Pasco y Huanuco; estas ciudades están a lo largo de la carretera panandina. En la sierra norte, sólo Cajamarca muestra una concentración importante de esta clase de viviendas. Merecen una mención especial las concentraciones de vivienda de esta clase en Lima: 22.05%, Arequipa: 3.4% y Callao: 2.18% del total de viviendas en el territorio peruano. Casi un tercio de las viviendas de esta clase están concentradas en estas tres provincias.

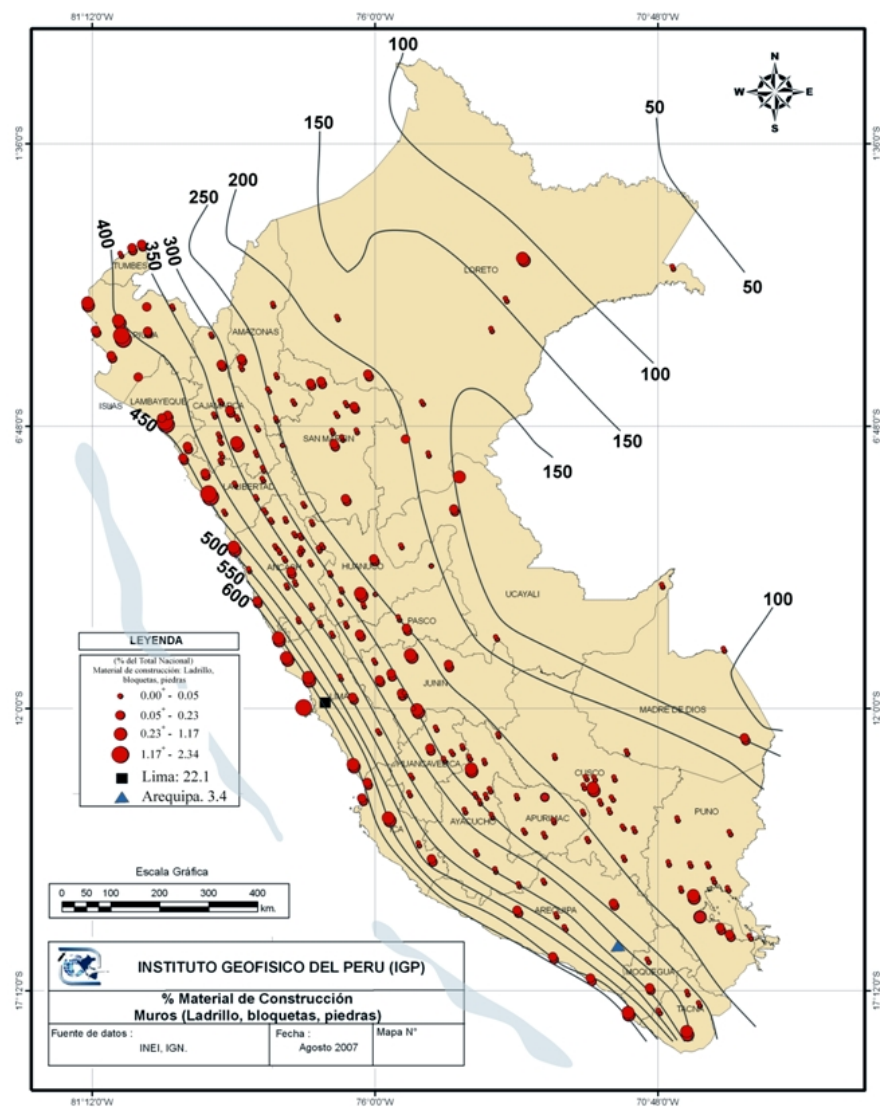


Figura 19. Distribución, por provincias, de las viviendas con muros-paredes de ladrillo, bloquetas o piedras, con mortero de cemento. Datos del INEI para el 2005, expresado en porcentaje con respecto al universo total de viviendas en el Perú. La provincia de Lima concentra el 22.05%, Arequipa el 3.4%. El mapa muestra la gran concentración de esta clase de viviendas en casi todas las ciudades de la costa. En la sierra, el número de ciudades, con un porcentaje significativo de esta clase de viviendas, es mucho menor.

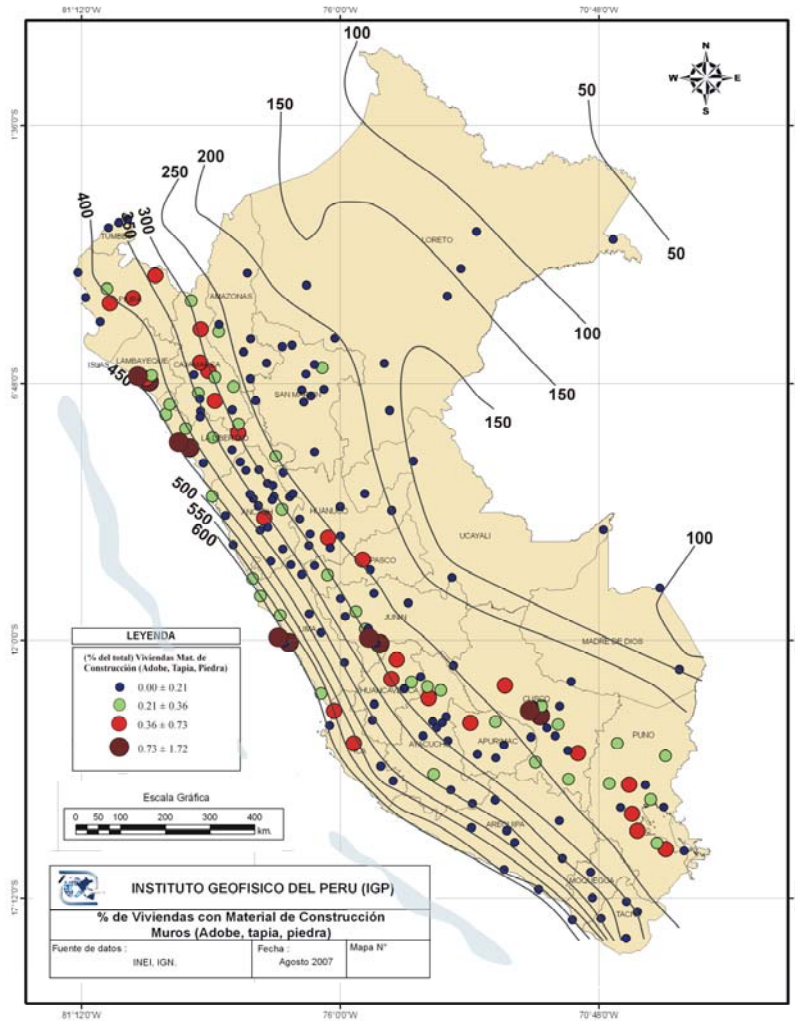


Figura 20. Distribución, por provincias, de las viviendas con muros-paredes de adobe, tapia o piedra, con mortero de barro o tierra. Datos del inei para el 2005, en porcentaje con respecto al universo total de viviendas en el Perú. Es evidente el bajo porcentaje de viviendas de adobe-tapia en la costa sur de Perú. En la costa central, la mayor concentración ocurre en las Regiones de Ica (ciudades de Ica y Chincha) y Lima, en la costa norte, en las Regiones de La Libertad (ciudad de Trujillo), Lambayeque (ciudad de Chiclayo) y Piura. En la sierra, la mayor concentración de viviendas de esta clase, se encuentra a lo largo de los centros de las culturas histórica andinas.

La distribución territorial del segundo grupo de viviendas: adobe-tapia y similares se muestra en la Figura 20. Esta Figura refleja la renovación del ambiente constructivo espacialmente: donde han ocurrido sismos más frecuentemente hay menor porcentaje de viviendas de adobe. En la costa central, la mayor concentración de viviendas de adobe se encuentra en las provincias de Ica, Chincha y Lima. En la costa norte en las provincias de Trujillo y Chiclayo, y cerca de la frontera con el Ecuador: Piura, Morropón y Ayabaca. En la sierra, la mayor concentración de edificaciones de adobe-tapia está a lo largo del eje Lago Titicaca-Cusco-Abancay-Ayacucho-Huancayo. El otro grupo es Pasco-Huánuco-Huaraz, y finalmente, el eje de la sierra norte las provincias de Cajamarca, Chota, Cutervo y Jaén.

En la Figura 20, se ha superpuesto las líneas isoGals de la severidad de sacudimiento del suelo del mapa de peligro sísmico del Perú de la Figura 9. De ocurrir sismos con las aceleraciones que indica este mapa, las viviendas de adobe-tapia de la costa colapsarían, las de la sierra serían dañadas más allá de cualquier reparación. La mayor posibilidad de desastre en la costa, por colapso de viviendas, se localiza en Ica, Chincha, Lima, Trujillo y Chiclayo.

Conclusiones

De la revisión histórica resumida de los trabajos de las entidades oficiales sobre catálogos sísmicos y mapas de peligro sísmico, de la documentación poblacional y estudios sociológicos y económicos en el ámbito nacional, se concluye:

- I. El Proyecto SISAN OEA-IGP fue un proyecto fecundo para el desarrollo de los Catálogos Sísmicos Instrumentales y de Intensidades Macrosísmicas de cuatro países de la Comunidad Andina de Naciones. Estos catálogos sirvieron de base para los catálogos sísmicos del Proyecto SISRA de CERESIS.
- II. La sismicidad tectónica de Perú proviene de los ambientes sísmicos de subducción y reajuste tectónico cortical del borde continental. La sismicidad cortical produce fenómenos geológicos-de-superficie en el fondo marino (maremotos, deslizamientos, etc.) y, particularmente, en alta montaña (avalanchas, deslizamientos, fallamiento, etc.). En la zona de la costa produce, además, fenómenos de licuefacción de suelos.
- III. El peligro sísmico del territorio peruano está documentado en los mapas de peligro sísmico oficiales publicados. Sin embargo, se requiere la actualización de estos a una mayor resolución y con mejor documentación de las zonas sísmogénicas corticales continentales y marinas.
- IV. La vulnerabilidad sísmica, debido a los factores: pobreza, concentración poblacional y desarrollo humano, fuera de Lima, se concentra en las zonas alto andinas, principalmente.
- V. Las zonas de alto peligro sísmico y frecuente ocurrencia de terremotos han forzado la renovación de las edificaciones de mayor vulnerabilidad, y la población ha desarrollado capacidades para hacer frente al impacto negativo de los terremotos.

VI. Después del terremoto del 15 de agosto del 2007, las siguientes provincias son las de más alta posibilidad de desastres: Ica, Lima, Callao, Trujillo, Chiclayo, Cusco, entre otras, por la alta densidad de población y alta concentración de viviendas de adobe-tapia.

Agradecimientos

El suscrito agradece al doctor H. Montes, Representante de Perú ante el Consejo Directivo de CERESIS y al doctor Bruce Presgrave, Presidente de la Comisión de Geofísica del IPGH por la invitación a presentar el presente trabajo en la 1ª Reunión Técnica Conjunta de las Comisiones del IPGH, en Itú, Sao Paulo, Brasil, el 27-29 de junio de 2007. Asimismo, agradece a la señora U. Torres por sus sugerencias y comentarios, a la señora I. Pérez-Pacheco y al señor R. Subieta por su apoyo en la preparación de las figuras y gráficos. Agradezco a los revisores anónimos por sus sugerencias, las que han contribuido a mejorar el manuscrito.

Referencias

- Avellaneda L., J. García y J. Ruiz, 2006. Peligros climáticos, biodiversidad, desertificación y pobreza en el Perú, CONAM y GTZ, Lima, Perú.
- Casaverde L. y J. Vargas, 1980. Zonificación sísmica del Perú, II Seminario Latinoamericano de Ingeniería sismorresistente. OEA y PUCP, Lima, Perú.
- Cornell C. A., 1968. Engineering seismic risk análisis, *Seismol. Soc. Amer. Bull.* 58(5), pp. 1503-1606.
- Deza E. 1971. The Pariahuanca earthquake, Huancayo, Perú, July-October 1969. Recent Crustal Movements, Royal Society of New Zeland, *Bulletin* 9, pp. 77-83.
- EERI. 1984. EERI Committee on Seismic Risk: Glossary terms for probabilistic seismic risk and hazard analysis. *Earthquake Spectra* 1, pp. 33-40.
- Giardini D., W. Hanka, B. Dost, J. Mezcua, L. Drake, M.C. Dimaté, H. Yepes, L. Ocola y H. Rendón. 1997. Pilot Project for Regional Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Assessment: Final Report. EC DGXII CII*-CT94-0103.
- Gloria Laengle. 2007. <http://www.psicopedagogia.com/definicion/resilencia>.
- INEI. 2007. Instituto Nacional de Estadística e Informática, <http://desa.inei.gob.pe/mapas/bid/>
- . 2007a. Sistema de recuperación de datos. Censos Nacional X de Población y V de Vivienda 2005. Resultados definitivos. <http://desa.inei.gob.pe/mapas/bid/>
- INGEOMINAS y Univ. de los Andes (Unidades Ejecutoras). 1997. Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá. Convenio Interadministrativo 01-93. Bogotá, Colombia.
- ISDR. 2002. Living with risk: A global review of disaster reduction initiatives. UN Inter-Agency Secretariat for the International Strategy for Disaster Reduction. Geneva 10, Switzerland.

- . 2004. Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives. <http://www.unisdr.org/unisdr/Globalreport.html>
- . 2004a. Priority areas to Implement Disaster Risk Reduction: Terminology: Basic terms of disaster risk reduction. <http://www.unisdr.org/wcdr-dialogue/terminology.html>
- . 2005. Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters. World Conference on Disaster Reduction 18-22 January 2005, Kobe, Hyogo, Japan. www.unisdr.org
- . 2007. Disaster Risk Reduction: 2007 *Global Review*. ISDR/GP/2007/3.
- McGuire R. K. 1976. Fortran Computer Program for Seismic Risk Analysis. *Open-File Report*, pp. 76-67, United States Department of the Interior. Geological Survey, pp. 90.
- MEF. 2001 [Ministerio de Economía y Finanzas. Dirección General de Asuntos Económicos y Sociales] Hacia la búsqueda de un Nuevo Instrumento de Focalización para la Asignación de Recursos destinados a la Inversión Social Adicional en el Marco de la Lucha contra la Pobreza. Documento de trabajo. Lima, Noviembre 2001.
- NTE-E.030. 1997. Reglamento Nacional de Construcciones. Norma Técnica de Edificaciones E.030. Diseño Sismorresistente, Octubre de 1997. Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción, Lima, Perú.
- Ocola L. 1982. Engineering aspects of seismological studies in Perú. United States Department of the Interior: Geological Survey. *Earthquake Information Bulletin*, vol. 14 (1), pp. 33-38.
- . 2004. Significado probabilístico de los calificativos bajo, medio y alto del peligro, riesgo, vulnerabilidad y posibilidad de desastre. *Revista de Investigación de Física*, vol. 7, No. 1, 2, pp. 38-44.
- Quijada P., E. Gajardo, M. Franke, M. Kosuch y J. Grases. 1993. Análisis de amenaza sísmica de Venezuela para el nuevo mapa de zonificación cn fines de ingeniería. En: Memorias del Octavo Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente, julio 1993.
- Saragoni R., Crempier, y M. Araya. 1981. Características de los movimientos fuertes en Chile. Publ. SES 1-2/81 (164).
- Sen A. 2007. Origins of the Human Development Approach. <http://hdr.undp.org/en/humandev/origins/>
- Silgado E. 1973. Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1970). Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Comisión de Geofísica. *Geofísica Panamericana*, 2(1), pp. 176-243.
- . 1978. Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974). Sector de Energía y Minas. Instituto de Geología y Minería. Lima, Perú.
- UN-DHA. 1992. Glossary. Internationally agreed glossary of basic terms related to Disaster Management, IDNDR 1990-2000, DHA-Geneva.
- UN. 2006. On Better Terms. A Glance at Key Climatic Change and Disaster Risk Reduction Concepts. Preliminary Publication. Geneva, Switzerland, pp. 24.

Copyright of *Revista Geofísica* is the property of Instituto Panamericano de Geografía e Historia and its content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.