

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Departamento Académico de Estructuras



Trabajo de Investigación:

Sismos y Daños Ocasionados a Estructuras
Gran Terremoto del Este de Japón 2011 (Tohoku)

Elaborado por:

FABIAN MINAYA, Danira Katerin
ROSALES CUTIPA, Víctor Adrián

Profesor:

MSc. Luis Fernando Lázares La Rosa

Curso:

Dinámica

Ciclo: 2021-I

Sección: "J"

Lima - Perú

RESUMEN

Los movimientos sísmicos son grandes liberaciones de energía que se manifiestan como movimientos ondulatorios y que son capaces de generar daños a las construcciones humanas, paisajes y generar otros fenómenos tales como tsunamis y deslizamientos. La tecnología desarrollada por el hombre ha sido capaz de reducir sus efectos en cierta medida, pero la fuerza de estos fenómenos es aún capaz de sobrepasar a la tecnología humana. Una muestra de esto ha sido el Gran Terremoto del Este de Japón. Siendo este un país con gran cultura sísmica y brillante tecnología ante desastres naturales, se vio vulnerable ante tal fenómeno natural, el cual precedió a un tsunami y a distintos accidentes nucleares que desencadenaron una verdadera catástrofe en el país del sol naciente. Nuestro país, Perú, debe aprender de estos hechos y tomar conciencia de que su posición geográfica conlleva una alta actividad sísmica que debería ser contrarrestada con la adecuada ingeniería antisísmica; sin embargo, nuestro país aún es deficiente en este aspecto.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I: CONCEPTOS GENERALES	1
1.1. FENÓMENOS SÍSMICOS.....	1
1.1.1. SISMO Y TEMBLOR.....	1
1.1.2. TERREMOTO	1
1.1.3. ONDAS SÍSMICAS	1
1.2. PLACAS TECTÓNICAS	2
1.2.1. DEFINICIÓN	2
1.2.2. LÍMITES ENTRE PLACAS.....	2
A. LÍMITES DIVERGENTES.....	2
B. LÍMITES CONVERGENTES	2
C. LÍMITES DE FRICCIÓN	3
1.2.3. PLACAS QUE AFECTAN AL PERÚ	3
A. PLACA DE NAZCA.....	3
B. PLACA SUDAMERICANA.....	4
1.3. MAGNITUD DE UN SISMO.....	4
1.3.1. DEFINICIÓN	4
1.3.2. ESCALAS DE MAGNITUD	4
A. ESCALA SISMOLÓGICA DE RICHTER	4
B. ESCALA SISMOLÓGICA DE GUTENBERG.....	5
MAGNITUD DE ONDAS SUPERFICIALES (Ms)	5
MAGNITUD DE ONDAS DE CUERPO (Mb)	5
C. ESCALA SISMOLÓGICA DE HANKS Y HIROO KANAMORI	5
1.3.3. EFECTOS DEL SISMO EN RELACIÓN CON LA MAGNITUD	5
1.4. INTENSIDAD DE UN SISMO	6
1.4.1. DEFINICIÓN	6
1.4.2. ESCALAS DE INTENSIDAD.....	6
A. MERCALLI MODIFICADA ANDINA (MMA-01).....	6
B. ESCALA MACROSÍSMICA EUROPEA (EMS-98).....	6
C. ESCALA SÍSMICA DE LA AGENCIA METEOROLÓGICA DE JAPÓN.....	7
1.2. MAPA DE ISOSISTAS	8
1.3. HIPOCENTRO.....	8
1.4. EPICENTRO	8
1.5. TSUNAMIS Y MAREMOTOS	9
1.5.1. ETIMOLOGÍA DE TSUNAMI.....	9
1.5.2. DEFINICIONES.....	9
1.5.3. MAREMOTOS MÁS IMPORTANTES OCURRIDOS EN PERÚ	10

CAPÍTULO II: GRAN TERREMOTO DEL ESTE DEL JAPÓN (2011)	11
2.1. BREVE HISTORIA DE LOS SISMOS EN JAPÓN	11
2.1.1. MAYORES TERREMOTOS DE JAPÓN	11
2.1.2. LA INGENIERÍA SÍSMICA EN JAPÓN	11
2.1.3. RELACIÓN DE LOS JAPONESES CON LOS SISMOS	12
2.2. ASPECTOS SISMOLÓGICOS	13
2.2.1. UBICACIÓN DEL EPICENTRO	13
2.2.2. HORA DE INICIO Y DURACIÓN	13
2.2.3. MAGNITUD E INTENSIDAD	13
2.2.4. MECANISMO FOCAL	14
2.2.5. MAPA DE ISOSISTAS	15
2.3. ASPECTOS GEOTÉCNICOS	15
2.3.1. TIPOS DE SUELOS	15
2.3.2. ASENTAMIENTOS E INCLINACIONES	16
2.3.3. DESPLAZAMIENTOS LATERALES Y VERTICALES	17
2.3.4. LICUEFACCIÓN	17
2.3.5. ACELEROGRAMAS REGISTRADOS	18
2.4. ASPECTOS ESTRUCTURALES	18
2.4.1. EDIFICIOS	18
A. EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO	18
B. EDIFICIOS DE ACERO	19
C. SISTEMAS DE PROTECCIÓN	20
2.4.2. PUENTES	20
A. SISMO	21
B. TSUNAMI	21
2.4.3. DIQUES	22
2.4.4. TANQUES DE AGUA	23
2.4.5. PRESAS	23
2.4.6. PUERTOS	24
2.5. ASPECTOS NO ESTRUCTURALES	25
2.5.1. LÍNEAS DE VIDA	25
2.5.2. TUBERÍAS DE GAS	25
2.5.3. LÍNEAS DE COMUNICACIONES	26
2.6. EFECTOS DIRECTOS O INDIRECTOS DEL SISMO	26
2.6.1. TSUNAMI DE JAPÓN	26
2.6.2. DAÑOS A CENTRALES NUCLEARES	28
2.6.3. OTROS EFECTOS	29
CONCLUSIONES	30
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Actuar de un tsunami, nótese que las ondas se "comprimen" al llegar a la costa.....	10
Figura 2 Ubicación del epicentro, 130 km al este de Sendai, Japón	13

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de ondas sísmicas Fuente: Elaboración propia	1
Tabla 2 Escala Magnitud Momento	5
Tabla 3 Escala Mercalli Modificada Andina	6
Tabla 4 Escala Macrosísmica Europea	7
Tabla 5 Escala Sísmica de la Agencia Meteorológica de Japón	7
Tabla 6 Maremotos más importantes junto a su magnitud momento	10
Tabla 7 Mayores terremotos de Japón	11
Tabla 8 Tipos de suelos de Japón	15
Tabla 9 Daños en dos puertos de prefectura de Ibaraki.....	24
Tabla 10 Datos recopilados por el equipo EEFIT a lo largo de las prefecturas de Iwata y Miyagi.....	26
Tabla 11 Comparación de ciudades afectadas y totales en las prefecturas del noreste japonés.....	27
Tabla 12 Lugares afectados por olas superiores a 2 metros de altura fuera de Japón	28
Tabla 13 Causas de fallecimientos tras el terremoto y tsunami (Abril - 2011)	29

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Asentamientos e inclinaciones provocadas por el terremoto	17
Ilustración 2 Comportamiento de edificios escolares ante el terremoto.....	19
Ilustración 3 Fallas típicas de las construcciones	20
Ilustración 4 Torre Yozemi, Tokio	20
Ilustración 5 Cojinete Elastomérico dañado del Viaducto Sendai-Tobu	21
Ilustración 6 Los muelles restantes del puente Koizumi se muestran durante la marea baja. Se construye un puente temporal en el lado del puente que da al mar.....	22
Ilustración 7 Efectos generados en los diques	22
Ilustración 8 Tanques de agua afectados por el terremoto.....	23
Ilustración 9 Daños generados a la presa Fujinuma.....	23
Ilustración 10 Daños ocurridos en los puertos.....	24
Ilustración 11 Efectos producidos por el terremoto en las líneas.....	25
Ilustración 12 Líneas de gas temporales colocadas tras el terremoto	25
Ilustración 13 Carretera desplazada por el terremoto.....	26
Ilustración 14 Daños generados por el tsunami.....	27
Ilustración 15 Tsunami supera las defensas contra tsunamis de la central nuclear Fukushima I.....	29

INTRODUCCIÓN

Los movimientos sísmicos (temblores, terremotos) siempre han causado temor y desesperación a la humanidad. A medida que el hombre fue desarrollando mejores tecnologías, ha sido capaz de minimizar sus daños e incluso, ha llegado a neutralizarlos por completo, dependiendo de la magnitud de estos. Sin embargo, a pesar de todos estos avances, la fuerza de la naturaleza es capaz de sobrepasar los avances tecnológicos y causar daños a las ciudades o pueblos. Eso, sin mencionar que los terremotos también pueden generar otros efectos, tales como tsunamis y deslizamientos. Particularmente, en los casos peruano y japonés, la actividad sísmica es muy alta y esto requiere de gran destreza ingenieril para contrarrestarse y, así, asegurar viviendas seguras que sean capaces de resistir ante los movimientos sísmicos. Como ingenieros civiles, es fundamental comprender esta realidad y prepararnos para combatirla con ingenio.

La redacción de esta monografía se ve justificada ante la importancia de conocer sobre los movimientos sísmicos y conocer las características de los terremotos más resaltantes. Es especialmente importante para los ingenieros civiles y estudiantes, pues son problemas con los cuales se debe lidiar al momento de diseñar estructuras. En un país con alta actividad sísmica como el Perú, los conocimientos de sismología son sumamente preciados y valorados al representar la base para el desarrollo de tecnología antisísmica. Tecnología que, paradójicamente, no está normalizada en un país tan sísmico y perteneciente al Cinturón de Fuego del Pacífico.

Este escrito tiene como objetivo principal el exponer e informar acerca de los términos más importantes de la sismología. Además, busca ahondar con mayor profundidad sobre uno de los terremotos más sonados de los últimos tiempos: “El Gran terremoto del Este de Japón (2011)” con el fin de brindar un recopilado de información a los lectores. Se tiene la esperanza de que este trabajo monográfico pueda servir como fuente didáctica para las personas interesadas en la sismología y que, también, pueda concientizar a los lectores acerca de las deficiencias en infraestructura presentes en Perú.

El presente trabajo está estructurado en dos capítulos. Empezamos brindando información general acerca de los sismos; términos necesarios para la comprensión provechosa del segundo capítulo. Se presentan tablas e imágenes que ayudan a la mejor comprensión de los conceptos ligados a la sismología. En el segundo capítulo, abarcamos lo referente al Gran Terremoto del Este de Japón. Brindamos una breve sección cuyo fin es contextualizar al lector con la idiosincrasia japonesa para así comprender de mejor manera lo sucedido en este fenómeno natural. A continuación, se presentan los distintos aspectos del mencionado movimiento acompañados por imágenes y tablas que complementan la información escrita. Finalmente, se llega a la sección de conclusiones en la que los autores presentan breves ideas finales con el fin de dar un cierre a la monografía. El escrito culmina con la sección de bibliografías las cuales recomendamos visitar para obtener más información sobre los puntos tratados.

CAPÍTULO I: CONCEPTOS GENERALES

1.1. FENÓMENOS SÍSMICOS

1.1.1. SISMO Y TEMBLOR

Los sismos son fenómenos que se producen por la liberación de energía interna de la tierra por medio de la ruptura de las capas de la corteza. Esta energía se manifiesta como movimientos ondulatorios que son capaces de alcanzar variadas magnitudes.

Otra definición que se puede añadir es, un sismo es una sacudida del terreno que se produce por choque de placas tectónicas y por la liberación de energía en el curso de la reorganización brusca de los materiales de la corteza terrestre al salir del estado de equilibrio mecánico.

Ambos términos suelen usarse indistintamente para los movimientos sísmicos de pequeña o mediana intensidad. Según INDECI, los movimientos sísmicos catalogados como temblores son más leves en comparación a los sismos.

1.1.2. TERREMOTO

Esta denominación la reciben aquellos movimientos sísmicos de grandes magnitudes que alcanzan mayores intensidades y, consecuentemente, generan mayores daños que son fácilmente reconocibles.

1.1.3. ONDAS SÍSMICAS

La energía irradiada en todas las direcciones desde el foco u origen de la energía sísmica se manifiesta en forma de ondas sísmicas las cuales son divididas en dos grupos los cuales, a su vez, presentan una subdivisión.

Estos tipos de ondas sísmicas se resume en el siguiente cuadro:

Tabla 1 Tipos de ondas sísmicas
Fuente: Elaboración propia

ONDAS DE CUERPO	Generadas en el proceso de ruptura y viajan por el medio sólido
Ondas Primarias (P)	Las partículas vibran en la dirección en que la energía se irradia. Son más veloces.
Ondas Secundarias (S)	Porta mayor cantidad de energía y las partículas vibran en dirección perpendicular a la dirección en la que irradia la energía. Son más lentas.
ONDAS SUPERFICIALES	Producidas cuando las ondas sísmicas P y S sacuden las capas superficiales de la corteza y vuelven a irradiar energía por la superficie terrestre
Ondas Love (L)	Las partículas vibran en una trayectoria elíptica en un plano horizontal.
Ondas Rayleigh (R)	Las partículas vibran en una trayectoria elíptica en un plano vertical

1.2. PLACAS TECTÓNICAS

1.2.1. DEFINICIÓN

Una placa tectónica o placa litosférica es un fragmento de litósfera que se mueve como bloque rígido sin que ocurra deformación interna sobre la astenósfera de la tierra.

Estas se encuentran muy ligadas a la teoría de La Tectónica de Placas; la cual explica la estructura y dinámica de la superficie terrestre. Propone que la litósfera está fragmentada en una serie de placas grandes y en placas menores o microplacas, en cuyos bordes se concentra la actividad sísmica, volcánica y tectónica.

De acuerdo con el Ing. Julio Kuroiwa, la tierra está conformada por seis grandes placas:

Pacífica	Norteamericana	Sudamericana
Eurásica	Antártica	Indo-australiana

Y por otras seis de menores dimensiones:

Nazca	Cocos	Caribe
Filipinas	Somalia	Arábica

1.2.2. LÍMITES ENTRE PLACAS

Las placas tectónicas pueden tener límites entre sí de tres distintas maneras:

A. LÍMITES DIVERGENTES

Corresponden principalmente al medio oceánico. Se forman depresiones o amplios surcos por los cuales asciende magma basáltico. Provocan actividad volcánica lenta y constante. En este tipo de límites suelen formarse las dorsales oceánicas.

B. LÍMITES CONVERGENTES

Son los límites en los que las placas se encuentran o chocan, en esta situación sucede la subducción de una placa bajo la otra.

La subducción cuando una de las placas se pliega en un ángulo pequeño hacia el interior de la tierra y se introduce bajo la otra. Esto provoca la aparición de una fosa oceánica o fosa abisal y la consecuente elevación de cordilleras, arcos de islas, o arcos volcánicos. Dependiendo de su ubicación podemos caracterizar esta subducción como de tipo CONTINENTAL, de tipo OCEÁNICA o como una OCEÁNICA-CONTINENTAL.

C. LÍMITES DE FRICCIÓN

Se denomina así a la separación de dos placas por un tramo de falla transformante. Dos placas se deslizan horizontalmente en sentido contrario. La corteza no se crea ni se destruye. Este tipo de límite genera muchos fenómenos sísmicos y generalmente se encuentran en los fondos oceánicos.

1.2.3. PLACAS QUE AFECTAN AL PERÚ

El Perú se encuentra constituyendo la zona más activa del mundo; es decir integra el “Cinturón de Fuego del Pacífico”.

En el flanco oriental del continente Sudamericano, la placa Oceánica de Nazca se mueve con una velocidad de, aproximadamente, 10 cm/año contra la placa continental que lo hace a 4 cm/año en sentido contrario. La placa de Nazca (oceánica) se introduce por debajo de la placa Sudamericana (continental) hasta ser absorbida por el manto. Este movimiento produce la acumulación de energía en algunas zonas, que se resisten a los desplazamientos de las placas. Posteriormente, esta energía se libera en forma de sismos o erupciones volcánicas.

Es necesario aclarar que el proceso de fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana se realiza a lo largo de toda su superficie de contacto, pero los deslizamientos que dan origen a los sismos se producen sobre segmentos de longitud menor permitiendo considerar áreas pequeñas de fricción y de ruptura. Estas superficies de fricción no son visibles debido a que se encuentran por debajo del nivel medio del mar. Contrariamente, los sismos que ocurren en continente producen rasgos tectónicos en superficie que pueden permitir describir la historia de la ruptura, siendo estos conocidos como trazas de falla.

A. PLACA DE NAZCA

Su geometría es heterogénea, subhorizontal en las regiones norte y centro de Perú y normal en la región sur. En superficie, la placa sostiene a las Dorsales de Nazca, Sarmiento y Alvarado, y a las fracturas de Mendaña, Nazca y Virú; además de la depresión de Trujillo y la fosa peruano-chilena. Estas heterogeneidades aportan al comportamiento geodinámico presente en Perú.

Subdivisión de la Placa de Nazca en tres nuevas placas tectónicas:

- a. Placa Tectónica Nazca Sur
- b. Placa tectónica Nazca Centro
- c. Placa Tectónica Nazca Norte

B. PLACA SUDAMERICANA

A través del tiempo, el proceso de subducción ha modificado la morfología del Perú permitiendo el engrosamiento de la corteza y el plegamiento de sedimentos para dar origen a la formación de sistemas de fallas geológicas presentes en superficie, la Cordillera de los Andes es el principal resultado de esta deformación.

La configuración estructural de la Placa Sudamericana permite considerar las siguientes unidades: los Taludes inferior, medio y superior; la plataforma continental; la zona costanera; el pie de Monte Pacífico; la Cordillera Occidental, el Altiplano, la Cordillera Oriental, la zona Subandina y la Llanura Amazónica,

1.3. MAGNITUD DE UN SISMO

1.3.1. DEFINICIÓN

La magnitud es una medida indirecta de la cantidad total de energía que se libera, por medio de las ondas sísmicas, durante el evento sísmico, la que puede estimarse de las amplitudes de las ondas sísmicas registradas en los sismógrafos, que son instrumentos muy sensibles especialmente diseñados para este fin, que generalmente se colocan sobre suelo rocoso. Los sismógrafos registran los sismos que ocurren en todo el mundo. Con los registros, llamados sismogramas, de varias estaciones, es posible determinar el epicentro, la profundidad focal y calcular la magnitud del sismo.

1.3.2. ESCALAS DE MAGNITUD

La escala de magnitud será expresada en números arábigos, con aproximaciones hasta décimos.

A. ESCALA SISMOLÓGICA DE RICHTER

Propuesta por el Dr. Charles Richter, profesor del Instituto Tecnológico de California – CALTECH, con la colaboración de Beno Gutenberg, en el año 1958 desarrolla una metodología sencilla, de carácter empírico que determina el tamaño de los sismos, a partir, de los registros de sismógrafos, que se instaló en California, EUA. Esta escala recibe el nombre de:

MAGNITUD LOCAL (MI)	La magnitud local se obtiene correlacionando la duración total del sismo en una estación local de periodo corto, con la magnitud Mb, mediante una función estadística.
----------------------------	--

Como la relación entre la escala de magnitud y la energía se expresa exponencialmente ($10^{1.5} = 31,5$), un sismo de un grado mayor que otro, es 31,5 veces más grande y unas mil veces mayor que otro 2 grados menor.

B. ESCALA SISMOLÓGICA DE GUTENBERG

Benó Gutenberg, profesor del Instituto Tecnológico de California – CALTECH, colaboró con la escala de Richter de magnitud de sismos y alimentó este concepto con muchas más magnitudes basadas en diferentes fases de ondas. Entre ellas se encuentran:

MAGNITUD DE ONDAS SUPERFICIALES (Ms)	Se calcula con la amplitud de las ondas superficiales (para periodos de 20 segundos).
MAGNITUD DE ONDAS DE CUERPO (Mb)	Se determina con la amplitud y periodo de las ondas de cuerpo, generalmente las ondas longitudinales (Ondas P).

C. ESCALA SISMOLÓGICA DE HANKS Y HIROO KANAMORI

A propuesta de Hiroo Kanamori del Instituto Tecnológico de California en 1977, se ha definido la Magnitud de Momento (Mw), que se encuentra en función del momento sísmico, Mo. Dos años después recibirá la colaboración de Thomas C. Hanks.

MAGNITUD DE MOMENTO (Mw)	La magnitud de momento no está supeditada al proceso vibratorio, sino al tamaño de la ruptura y a los desplazamientos de los bloques de la falla, y constituye la expresión física más próxima a la dimensión real del sismo.
---------------------------------	---

1.3.3. EFECTOS DEL SISMO EN RELACIÓN CON LA MAGNITUD

El Dr. Hernando Tavera, presidente ejecutivo del IGP, informó se continúa usando la escala de Richter para sismos con magnitudes menores a 6.5 MI, mientras que para sismos mayores se usa la escala de Magnitud de Momento. Además, que hoy en día los registros sísmicos están en formato digital y esto se acomoda mejor con la escala Mw.

Tabla 2 Escala Magnitud Momento
Fuente: Indeci (Instituto Nacional de Defensa Civil)

MAGNITUD ESCALA (MI, Mw)	EFECTOS DEL SISMO
Menos de 3.5	Generalmente no se siente, pero es registrado.
3.5 – 5.4	A menudo se siente, pero sólo causa daños menores.
5.5 – 6.0	Ocasiona daños ligeros a edificios.
6.1 – 6.9	Puede ocasionar daños severos en áreas donde vive mucha gente.
7.0 – 7.9	Sismo mayor. Causa graves daños.
8 o mayor	Gran sismo. Destrucción total a comunidades cercanas.

1.4. INTENSIDAD DE UN SISMO

1.4.1. DEFINICIÓN

La intensidad o escala de observaciones es la medida o estimación empírica de la vibración o sacudimiento del suelo a través de cómo el hombre percibe las vibraciones sísmicas en el ambiente en que vive. También hace referencia al grado de daños que causa el fenómeno en las construcciones y los efectos que tiene en la naturaleza.

1.4.2. ESCALAS DE INTENSIDAD

A. MERCALLI MODIFICADA ANDINA (MMA-01)

Proveniente de la escala Mercalli Modificada usada en las Américas como consecuencia de no ser adecuada para la costa occidental de América del Sur. Esto último debido a la geografía particular del oeste Sudamericano; por otra parte, la escala Mercalli correspondía a edificaciones construidas en California durante la década de 1950.

Por estas razones, se desarrolla en el CISMID – UNI, una nueva escala aplicable a los países del territorio en cuestión, en esta iniciativa se encontraría involucrado el Dr. Julio Kuriowa. La nueva escala aparece en 1992 bajo el nombre Escala Mercalli Modificada para los Países Andinos (MMA-92) y en el año 2001 se presentaría una continuación simplificada, revisa y actualizada (MMA-01).

A continuación, pasamos a detallar lo especificado en la escala por medio de una tabla:

Tabla 3 Escala Mercalli Modificada Andina
Fuente: Adaptado de Reducción de Desastres – Julio Kuroiwa

GRADO I	No sentido por personas
GRADO II	Sentido por personas en descanso
GRADO III	Sentido levemente en el exterior
GRADO IV	Ruidoso
GRADO V	Sentido claramente en el exterior de edificaciones
GRADO VI	Sentido por todos
GRADO VII	Difícil mantenerse de pie
GRADO VIII	Susto y pánico aún en las personas que se encuentren conduciendo vehículos
GRADO IX	Pánico generalizado
GRADO X	Destrucción generalizada de edificios
GRADO XI	Verdadera catástrofe
GRADO XII	Cambios en el paisaje

B. ESCALA MACROSÍSMICA EUROPEA (EMS-98)

Es la base para la evaluación de la intensidad sísmica en los países europeos y algunos otros de otros continentes. Publicada en 1998 como actualización y depuración de su versión de 1992.

Su origen se remonta a una adaptación de la escala Medvedev-Sponheuer-Karnik propuesta durante la URSS para estimar la fuerza de los movimientos de tierra en base a los efectos sobre las construcciones humanas, afectación a la población y cambios en el paisaje.

La EMS contempla doce grados los cuales son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 4 Escala Macrosísmica Europea
Fuente: Instituto Geográfico Nacional - España

GRADO I	No sentido
GRADO II	Apenas sentido
GRADO III	Débil
GRADO IV	Ampliamente observado
GRADO V	Fuerte
GRADO VI	Levemente dañino
GRADO VII	Dañino
GRADO VIII	Gravemente dañino
GRADO IX	Destructor
GRADO X	Muy destructor
GRADO XI	Devastador
GRADO XII	Completamente devastador

C. ESCALA SÍSMICA DE LA AGENCIA METEOROLÓGICA DE JAPÓN

Es la usada en Japón y Taiwán para indicar la intensidad de los terremotos. Su unidad de medida es el Shindo (震度), palabra japonesa que significa “*grado de agitación*”. Posee la particularidad de que el valor dado puede variar de un punto a otro por factores como el tipo de terreno.

Esta escala posee un rango de valores entre 0 y 7 Shindo donde el 7 representa la mayor intensidad. Se muestra la siguiente tabla:

Tabla 5 Escala Sísmica de la Agencia Meteorológica de Japón
Fuente: Japan Meteorological Agency

Intensidad 0	Las personas no sienten ningún movimiento
Intensidad 1	Un ligero movimiento es sentido por personas en los interiores
Intensidad 2	La mayoría de las personas en los interiores sienten el movimiento y los objetos suspendidos oscilan ligeramente
Intensidad 3	Casi todos en los interiores sienten el movimiento
Intensidad 4	Casi todos son sorprendidos. Los objetos suspendidos oscilan violentamente y los objetos inestables ceden
Intensidad 5-	La mayoría de las personas están asustadas y se apoyan en cosas
Intensidad 5+	La mayoría de las personas encuentran difícil caminar sin sostenerse en objetos estables. Los muebles no enganchados pueden caer
Intensidad 6-	Se vuelve difícil mantenerse de pie. Las puertas pueden no abrirse. Los muros y ventanas pueden ser dañados y caer

Intensidad 6+	Es imposible mantenerse de pie o moverse sin gatear. Mas muebles pueden moverse y los objetos empiezan a caer
Intensidad 7	Muebles pueden moverse, caerse o incluso ser lanzados por la fuerza del terremoto.

1.2. MAPA DE ISOSISTAS

Conocer las características del sismo que presumiblemente pueda afectar a una estructura, dependerá de la historia sísmica de cada región. Por tanto, el parámetro intensidad sísmica aún es primordial al momento de realizar cualquier investigación que permita conocer el riesgo sísmico de una determinada región y/o ciudad, sobre todo si dicho parámetro permite estimar la severidad del sacudimiento del suelo en el lugar afectado por el sismo.

La información macro sísmica que se recoge en campo después de ocurrido un sismo reúne los datos que describen los efectos de un determinado sismo en superficie y que, al ser interpretados, considerando una determinada escala, permiten conocer la intensidad del sismo; es decir, su tamaño de manera cualitativa. La escala de intensidad más utilizada es la propuesta por Guillermo Mercalli en el siglo XIX (Escala de Mercalli Modificada) y en detalle, esta escala considera los efectos del sismo en las personas, objetos, construcciones y en el terreno. Esta información, permite mostrar en mapas la distribución espacial de los grados de intensidad y luego de ser evaluados, se obtienen los mapas de isosistas o mapas de valores similares de intensidad unidos con líneas.

Los mapas de isosistas han permitido conocer diversos parámetros físicos que definen los procesos que se desarrollan alrededor de los sismos como el grado de fracturamiento de rocas, la respuesta dinámica de los suelos y los patrones de atenuación de la intensidad (Gasperini, 2001). Del mismo modo, la intensidad sísmica ha sido usada para estimar los valores espectrales de la aceleración para sismos históricos (Boatwright et al., 2006); además de ser útil para los proyectos de planificación del crecimiento urbano de ciudades (Musson y Henni, 2001).

1.3. HIPOCENTRO

El hipocentro es el foco sísmico, donde se produce la máxima liberación de energía, al interior de la Tierra.

Se define mediante tres parámetros:

Latitud	Longitud	Profundidad
---------	----------	-------------

1.4. EPICENTRO

La representación del foco sísmico (hipocentro) sobre la superficie es llamada "epicentro".

Se define mediante dos parámetros:

Latitud	Longitud
---------	----------

1.5. TSUNAMIS Y MAREMOTOS

1.5.1. ETIMOLOGÍA DE TSUNAMI

La palabra tsunami o sunami tiene un origen japonés, específicamente proviene de dos kanjis (sinogramas japoneses):

津	[tsu]	«puerto o bahía»
波	[nami]	«ola»

Con esto se obtiene que “tsunami” literalmente significa «puerto ola» y se entendería como «olas en el puerto o bahía».

El origen japonés de esta palabra es bastante explicable y coherente con la realidad del país del sol naciente; pues este país asiático es azotado por estos fenómenos de manera frecuente desde hace muchos siglos.

Respecto al momento en el cual se da origen a esta palabra no se tiene un registro claro. En escritos muy antiguos se hace referencia a este fenómeno, pero sin el uso de esta palabra; sin embargo, es muy probable que tenga muchos siglos de antigüedad. Su uso se volvió coloquial a partir de la década de 1890.

En la actualidad, esta palabra es usada por muchas personas a lo largo del mundo para definir la serie o sucesión de olas con poder destructivo sobre la costa.

1.5.2. DEFINICIONES

Los tsunamis son fenómenos marinos espectaculares, aunque poco frecuentes. Provocan una gran destrucción y pérdida de vidas humanas a lo largo de las costas de los territorios afectados

Un tsunami consiste en trenes de ondas de periodo largo que llegan a la costa en intervalos de 10 a 70 minutos. Las olas pueden alcanzar diferentes alturas dependiendo de distintos factores que originan el tsunami o el relieve de la costa afectada.

Desde su generación se crean ondas que viajan por el cuerpo de agua. En altamar, la altura de las olas es de apenas decímetros con una amplia longitud de onda que puede variar de decenas de kilómetros a incluso doscientos kilómetros. Al momento de llegar a la costa, las olas que llegan primero reducen su velocidad mientras que las anteriores mantienen una mayor, por lo que terminan juntándose y generando olas de mayor altura que finalmente llegan a tierra generando desastre.

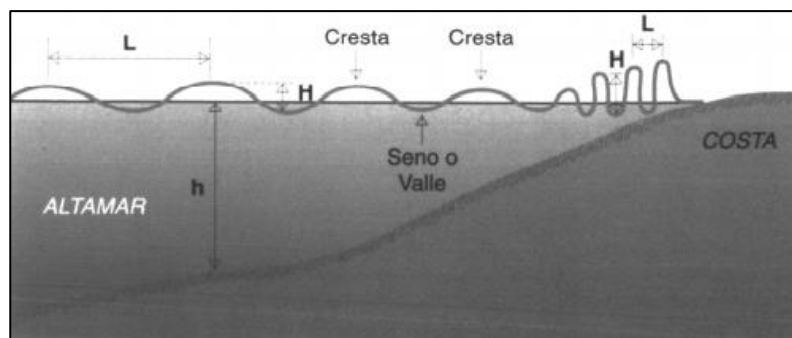


Figura 1 Actuar de un tsunami, nótese que las ondas se "comprimen" al llegar a la costa
Fuente: Reducción de Desastres – Julio Kuroiwa

La causa de los tsunamis suele ser un maremoto. También puede ser causada por la erupción de un volcán submarino.

Un maremoto es un terremoto cuyo epicentro se localiza en el fondo del mar. La energía que libera en forma de ondas mueve grandes masas de agua que forman olas que podrían terminar convirtiéndose en un tsunami.

1.5.3. MAREMOTOS MÁS IMPORTANTES OCURRIDOS EN PERÚ

Aquí mostramos varios de los maremotos más importantes ocurridos en el Perú con su respectiva magnitud momento. Todos estos maremotos vinieron acompañados de tsunamis.

Tabla 6 Maremotos más importantes junto a su magnitud momento
Fuente: Elaboración propia desde distintas fuentes

Fecha	Mw	Efectos
9 de julio de 1586	8.6	22 víctimas
24 de noviembre de 1604	8.5	1200 a 1700 víctimas
20 de octubre de 1687	8.4	1514 víctimas
27 de marzo de 1725	7.0	Ligero sobrepaso del mar
28 de octubre de 1746	9.0	15000 a 20000 víctimas Mayor terremoto de la historia de Lima
1 de diciembre de 1806	8.0	Ligeros daños en Lima y Callao
13 de agosto de 1868	9.0	Al menos 700 víctimas Mayor terremoto registrado en Perú
9 de mayo de 1877	8.8	34 víctimas
24 de mayo de 1940	8.2	1000 víctimas

CAPÍTULO II: GRAN TERREMOTO DEL ESTE DEL JAPÓN (2011)

2.1. BREVE HISTORIA DE LOS SISMOS EN JAPÓN

2.1.1. MAYORES TERREMOTOS DE JAPÓN

A lo largo de su historia, este país ha sido azotado por terremotos y tsunamis que han ocasionado destrucción. A medida que nos acercamos a la época moderna, podemos percibir una reducción del número de víctimas por estos fenómenos naturales.

Presentamos una tabla con datos ligeros de terremotos importantes de Japón hasta el año 2011, ya que obviamos el terremoto sobre el que nos expandiremos en las siguientes páginas.

Tabla 7 Mayores terremotos de Japón
Fuente: Elaboración propia desde distintas fuentes

Nombre	Efectos
Terremoto de Hōei de 1707	5000 víctimas
Gran terremoto de Kantō de 1923	105385 a 142800 víctimas
Gran terremoto de Hanshin-Awaji (Kobe) 1995	6434 víctimas
Terremoto de la costa de Chūetsu de 2007	10 víctimas
Terremoto de Iwate-Miyagi Nairiku de 2008	17 víctimas
Terremoto de Shizuoka-Oki de 2009	1 víctima
Terremoto del sur de Japón de 2010	0 víctimas

2.1.2. LA INGENIERÍA SÍSMICA EN JAPÓN

Japón posee una estricta normativa antisísmica que se viene aplicando desde hace muchas décadas en las construcciones japonesas. Esto debido a la gran exposición de este país ante los movimientos sísmicos y que la gran mayoría de muertes tras un terremoto provengan justamente del derrumbamiento de edificios y no por la sacudida sísmica.

En este sentido, los japoneses son verdaderos maestros cuando se habla de construir edificios capaces de resistir fuertes sismos. Muestra de ello son los increíbles rascacielos que permanecen imperturbables tras este tipo de movimientos; de igual manera, muchas de las viviendas y otras edificaciones construidas en los últimos años son capaces de permanecer intactas ante sismos de gran magnitud.

De parte de Paloma Sobrini, decana del Colegio de Arquitectos de Madrid, tomamos la siguiente declaración: “Sin ninguna duda, Japón es el país mejor preparado, En ningún otro lugar del mundo un terremoto de magnitud 9 en la escala de Richter hubiera provocado tan pocos daños”, con referencia al Gran Terremoto de Japón (2011).

Según Rafael Blázquez, catedrático de Ingeniería del Terreno en la Universidad de Castilla-La Mancha, los japoneses se ven obligados a elegir entre dos opciones para poder construir edificios tan grandes debido a que gran parte del

suelo de Japón es blando y para levantar un rascacielos es preciso hacerlo en un terreno estable. Estas opciones son o mejorar el suelo de forma artificial o implementar la técnica conocida como aislamiento de base: “Se interponen entre la cimentación y la estructura unos aisladores de neopreno. Cuando hay un terremoto, el edificio se desplaza con el movimiento del suelo, sin ofrecer resistencia y, por tanto, no colapsa. El principio básico es que hay que desacoplar el movimiento del suelo y el movimiento de la estructura”, indica el catedrático.

Adicional al uso de aisladores sísmicos en las edificaciones japonesas, la constante investigación realizada para aprender nuevas lecciones de cada sismo también provoca que Japón destaque en su ingeniería antisísmica ante el resto del mundo.

Los japoneses son conscientes de que su país es muy propenso a los grandes movimientos sísmicos, es por ello que ponen todo su esfuerzo en que sus nuevas construcciones civiles puedan resistir las próximas sacudidas y así salvar la mayor cantidad de vidas posible. Con esta misma intención, tratan de reducir los efectos de los tsunamis causados por los terremotos; por ello, construyen defensas en las ciudades más vulnerables y preparan planes de evacuación para la población.

2.1.3. RELACIÓN DE LOS JAPONESES CON LOS SISMOS

La manera en la que la población japonesa reacciona ante los movimientos sísmicos, sin duda, asombra al mundo.

Los japoneses adquieren a lo largo de su formación una alta conciencia sobre los peligros naturales que azotan a su país, por lo que su compromiso con la seguridad de la comunidad propicia en esta un alto nivel de respuesta ante los desastres.

La confianza que tiene la población en las construcciones y en el gobierno genera en las personas la tranquilidad requerida para afrontar de manera responsable los desastres naturales. De esta manera, incluso los niños saben qué hacer cuando hay un terremoto. A esto debemos sumarle el sistema de alerta sísmica implementado a lo largo de todo Japón y las indicaciones o advertencias diseminadas en las ciudades sobre lugares de evacuación, zonas seguras y sitios de concentración.

El nivel de resiliencia (*kintsugi*) de los japoneses también es digno de resaltar. Recordemos que Japón no solo es azotado por fenómenos naturales constantemente. Este país ha pasado por grandes periodos de crisis como los años siguientes a las guerras mundiales, y la población ha sido capaz de levantarse de los escombros. Pasado lo peor, la gente vuelve a su trabajo y todos juntos empiezan a reconstruir el país.

2.2. ASPECTOS SISMOLÓGICOS

2.2.1. UBICACIÓN DEL EPICENTRO

El Gran Terremoto del Este de Japón tuvo epicentro en el mar frente a la costa de Honshu, 130 km al este de Sendai, en la prefectura de Miyagi, Japón.

Las coordenadas geográficas (latitud, longitud) del epicentro se presentan a continuación, junto a la profundidad estimada a la que ocurrió (hipocentro).

38.297 N	142.373 E	29 km Profundidad
----------	-----------	-------------------

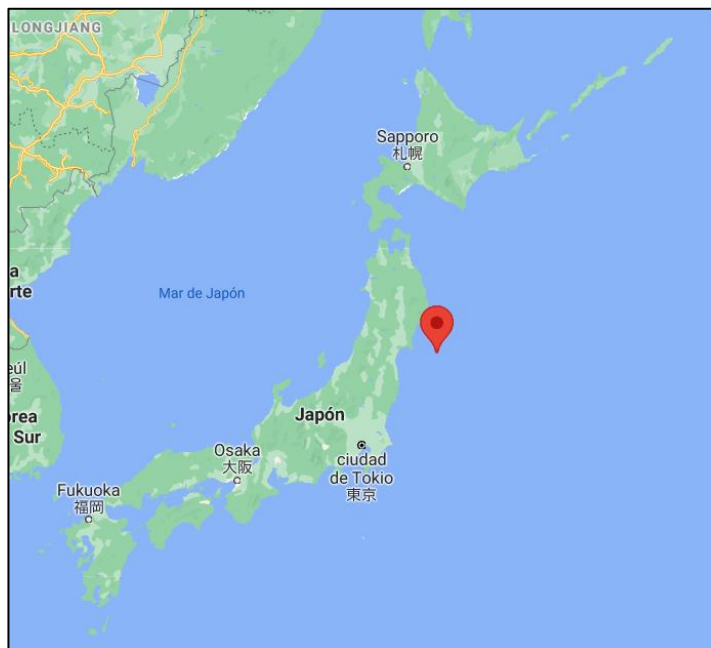


Figura 2 Ubicación del epicentro, 130 km al este de Sendai, Japón
Fuente: Adaptado de los datos de USGS

2.2.2. HORA DE INICIO Y DURACIÓN

De acuerdo con la USGS, el terremoto tuvo como hora de inicio:

05:46:24.120 UTC
14:46:24.120 Hora local de Japón

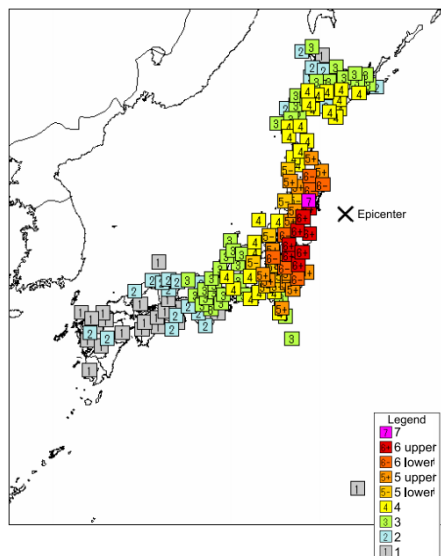
La duración del sismo sorprendió a muchos investigadores. Este terremoto tuvo una duración de 5-6 minutos.

2.2.3. MAGNITUD E INTENSIDAD

La magnitud de este terremoto en la escala sismológica de Hanks y Hiroo Kanamori (Magnitud Momento) fue de 9.0.

Para la intensidad se presenta la dada por la Escala Sísmica de la Agencia Meteorológica de Japón, razón por la cual se presentan diferentes valores correspondientes a distintos lugares desde donde se realiza la medición.

7 (máxima)	Ciudad de Kurihara, Prefectura de Miyagi
6+	28 ciudades y pueblos en las Prefecturas de Miyagi, Fukushima, Ibaraki y Tochigi
6- y menores	Observada a lo largo del país desde Hokkaido hasta Kyushu

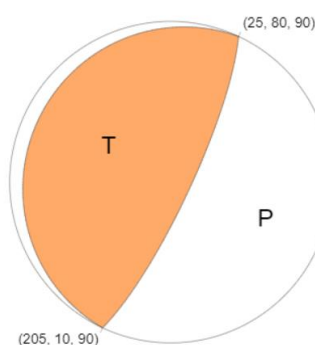


Gráfica 1 Repartición de la intensidad en la Escala Sísmica de la Agencia Meteorológica de Japón
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

2.2.4. MECANISMO FOCAL

Tenemos un mecanismo focal relacionado a una falla inversa producida por fuerzas tectónicas de compresión.

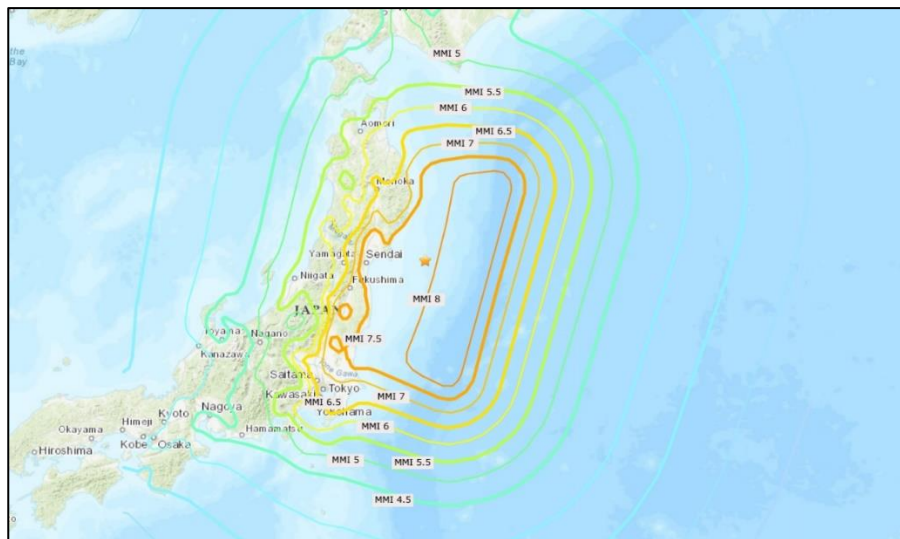
Se muestra la imagen del mecanismo de falla provista por el USGS (United States Geological Survey) Earthquake Information Center y una tabla con los datos de los planos nodales.



Gráfica 2 Mecanismo focal del terremoto de Japón (2011), notar que corresponde a una falla inversa
Fuente: USGS

Plano	Strike	Dip	Rake
NP1	205°	10°	90°
NP2	25°	80°	90°

2.2.5. MAPA DE ISOSISTAS



Gráfica 3 Mapa de isosistas del terremoto de Japón (2011)
Fuente: Elaborado en base a datos del USGS





2.3. ASPECTOS GEOTÉCNICOS

Los aspectos geotécnicos de este terremoto brindan importantes oportunidades para aprender sobre el desempeño sísmico de una amplia gama de sistemas geotécnicos e instalaciones construidas. Facilitado por la extensa red de estaciones de grabación de movimiento del suelo en el área, las características únicas de este gran terremoto, la amplia área geográfica afectada y la infraestructura moderna en todas las áreas afectadas.

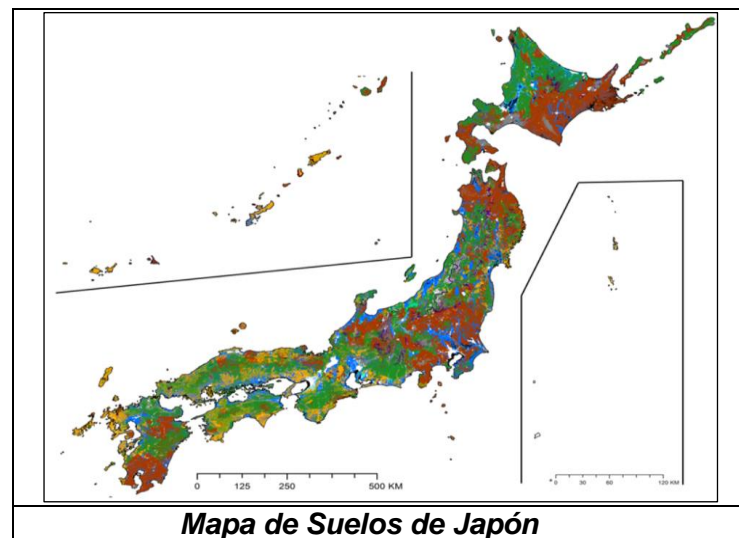
2.3.1. TIPOS DE SUELOS

Tabla 8 Tipos de suelos de Japón
Fuente: NARO (National Agriculture and Food Research Organization)

Suelo creado Suelo que ha sido fuertemente influenciado por los humanos y que se ha vuelto invisible en la naturaleza.	A 造成土	Suelo orgánico Suelo en el que los cuerpos de plantas húmedas se depositan de forma espesa sin descomponerse por exceso de humedad.	B 有機質土
Podzol Suelo con estratigrafía de capas blanqueadas y capas de humus o acumulación de hierro / aluminio.	C ポドソル	Andosoles Los andosoles son suelos ligeros cuyo material base se deriva principalmente de cenizas volcánicas.	D 黒ボク土
Suelo rojo oscuro Es un suelo básico con una capa subsuperficial de color rojo oscuro o derivado de piedra caliza o "sedimentos calcáreos".	E 暗赤色土	Suelos de tierras bajas Este suelo se distribuye en las tierras bajas aluviales de ríos, marinos y lagos de este mundo.	F 低地土

Suelo Rojo amarillo El suelo rojo-amarillo es un suelo rojo o amarillo degradado con baja acumulación de materia orgánica y baja saturación de bases.	 G 赤黄色土	Pedogénesis del agua estancada Suelos de meseta, colinas y montañosas que se ven afectados por agua estancada o subterránea durante todo el año o durante algún período del año.	 H 停滞水成土
Suelo de boque marrón Suelo de superficie secundaria marrón o tostada que se distribuye en montañas y cerros menos afectados por cenizas volcánicas.	 I 褐色森林土	Suelo inmaduro Suelo con estratificación nula o muy débil en la sección transversal del suelo.	 J 未熟土

Gráfica 4 Distribución de los suelos en Japón
Fuente: NARO (National Agriculture and Food Research Organization)



2.3.2. ASENTAMIENTOS E INCLINACIONES

Se evidenció la magnitud de asentamientos e inclinación más grandes para estructuras ligeras. En muchos casos se observaron inclinaciones de hasta 2 o 3 grados.

	
Asentamiento e inclinación de edificios en Urayasu (N35.6375, E139.8887).	Muchas de estas estructuras tenían cimentación tipo estera con vigas de alto grado que limitaron el daño a las superestructuras a pesar de los grandes asentamientos e inclinaciones.

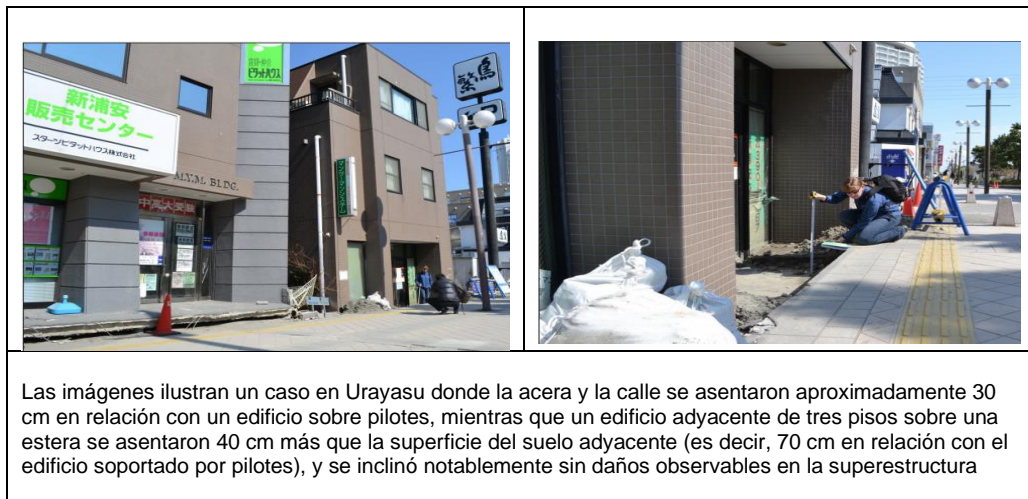


Ilustración 1 Asentamientos e inclinaciones provocadas por el terremoto
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

Se observó que las áreas que habían sido mejoradas mediante pilotes de compactación de arena y otras técnicas se habían desempeñado bien, en el sentido de que no se observaron desplazamientos de la superficie del suelo.

2.3.3. DESPLAZAMIENTOS LATERALES Y VERTICALES

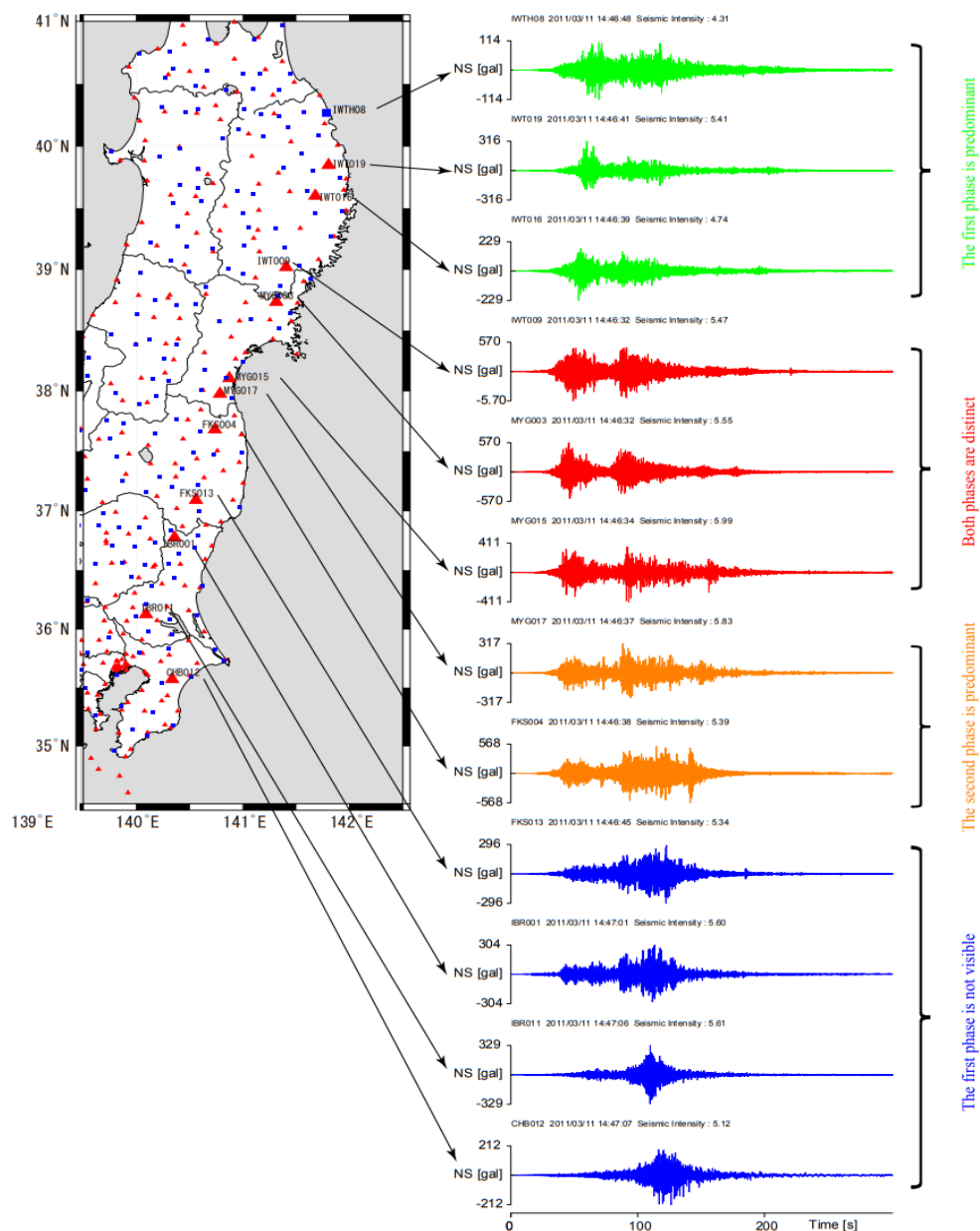
Área de fractura	400 km por 200 km
Desplazamiento vertical	3m
Desplazamiento lateral	24m

2.3.4. LICUEFACCIÓN

Los daños relacionados con la licuefacción se observaron principalmente alrededor de las costas norte y noreste de la bahía de Tokio (en Urayasu, Shinkiba, Inage, Kaihinmakuhari, Chiba, Isobe y Mihama, por ejemplo), en comunidades a lo largo del río Tone, incluidas Choshi, Sawara, Itako, Katori, Kamisu y Kashima, y en áreas a lo largo del río Naka, incluidas Hitachinaka, Miko y Oarai. Los suelos licuados en muchos de los sitios urbanos son principalmente materiales de relleno o aluvión joven.

Los daños inducidos por licuefacción en los servicios públicos causaron interrupciones generalizadas para los propietarios de viviendas y las empresas.

2.3.5. ACELEROGRAMAS REGISTRADOS



Gráfica 5 Acelerogramas registrados en distintos puntos de la zona noreste de Japón
Fuente: CSEM

2.4. ASPECTOS ESTRUCTURALES

2.4.1. EDIFICIOS

A. EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO

En general, los daños se concentraron en edificios anteriores a 1970, edificios de menos de diez pisos y edificios inusuales (diafragma flexible de gran luz).

Comportamiento de Edificios Escolares	
	
<p>Escuela primaria en Sukagaya. El daño de las columnas en los salones de clases dependió de la presencia o ausencia de relleno moldeado en la base. El relleno creaba una columna cautiva con paredes de ala integradas, causó fallas de corte.</p>	<p>Escuela secundaria incorporada 1966, ubicado a 10 km al N. de Kuriyama. Los muros de ala a lo largo del exterior, normalmente reforzados y fundidos excéntricamente con columnas, indujeron fallas por cortante que penetraron a través de las columnas.</p>

Ilustración 2 Comportamiento de edificios escolares ante el terremoto
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

B. EDIFICIOS DE ACERO

Sismos: El daño estructural se concentró en las estructuras de acero diseñadas de acuerdo con las disposiciones sísmicas japonesas más antiguas. Los modos de falla típicos incluyeron:

- 1) Fractura de la sección de red de los tirantes.
- 2) Fracturas de la placa de refuerzo debido a fatiga de ciclo bajo, una consecuencia de los movimientos del suelo de larga duración.
- 3) Levantamiento de cimientos en pórticos arriostrados, así como zona de paneles que cede en pórticos de acero resistentes al momento.

Tsunami: Los modos de falla típicos en los edificios industriales afectados por el tsunami incluyeron:

- 1) Torsión de la columna debido al impacto.
- 2) Fractura y agrietamiento.

Fallas típicas: Tsunami en Onagawa e Ishinomaki	
	
Torsión profunda de la columna (embestida)	Rotura por tracción de varillas de acero (placas de base expuestas)
	
Agrietamiento de la placa base	Falta de cimentación de pilotes en edificio de acero derribado

Ilustración 3 Fallas típicas de las construcciones
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

C. SISTEMAS DE PROTECCIÓN

	Edificio con aislamiento sísmico
	La Torre Yozemichi en el área de Shinjuku de Tokio.
	El desplazamiento máximo observado del sistema de aislamiento en el terremoto fue de aproximadamente 10 cm. No se reportaron daños estructurales o no estructurales, y el edificio permaneció completamente funcional después del terremoto.

Ilustración 4 Torre Yozemichi, Tokio
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

2.4.2. PUENTES

Aproximadamente 200 puentes de carreteras y numerosos puentes ferroviarios resultaron dañados durante el sismo del 11 de marzo por efectos que van desde el desprendimiento de tramos, roturas de cojinetes y fallas de cizallamiento de columnas, hasta socavación de cimientos y asentamientos de relleno.

Las causas serán clasificadas en dos categorías:

A. SISMO

La mayoría de los puentes del Sistema Nacional de Carreteras habían sido reacondicionadas sísmicamente durante los últimos 10-15 años (en respuesta al terremoto de Kobe de 1995) estos puentes tuvieron daños moderados, a excepción del Viaducto Sendai- Tobu, éste evidenció falla de sus cojinetes elastoméricos en un sección de su tramo, sufriendo daños de moderados a importantes; mientras las estructuras más antiguas propiedad de los gobiernos municipales y locales, fueron dañados debido a la poca actividad de programas de modernización y la falta de fondos.



Ilustración 5 Cojinete Elastomérico dañado del Viaducto Sendai-Tobu
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

B. TSUNAMI

El tsunami fue responsable de los daños en aproximadamente la mitad de los puentes. Un claro ejemplo está en la Ruta 45 Sendai – Hachinohe, aquí doce puentes resultaron seriamente dañados por las olas del tsunami con alturas que iban de 6.2 a 11.8m. A continuación, se describirá uno de ellos.

PUENTE KOIZUMI:

Construido en 1975, el puente Koizumi consta de 6 vanos de 30.1 m, 4 vigas de placas de acero sostenidas por pilares de hormigón sobre cimientos profundos. El puente había sido reequipado sísmicamente utilizando amortiguadores hidráulicos en los estribos, sin embargo; los seis tramos fueron barridos durante el tsunami. Se registraron olas del orden de 11.8 m en la ciudad de Ofunato, justo al norte del puente. Claramente el tsunami alcanzo el puente, tomando los 6 tramos aguas arriba.

Es evidente que los amortiguadores longitudinales instalados ofrecían poca contención a las cargas laterales impuestas por el tsunami. Una vez

que esos dispositivos fallaron, el peso relativamente liviano de las vigas I de acero, junto con los efectos de flotabilidad del aire atrapado entre las vigas, hicieron posible que la superestructura se elevara y llevara distancias significativas río arriba.



Ilustración 6 Los muelles restantes del puente Koizumi se muestran durante la marea baja. Se construye un puente temporal en el lado del puente que da al mar.
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

2.4.3. DIQUES

La mayoría de los tramos de diques funcionaron bien, con poco o ningún daño o angustia. Este buen desempeño en general puede atribuirse en parte al hecho de que los niveles de los ríos eran relativamente bajos en el momento del terremoto y, por lo tanto, la mayoría de los terraplenes de los diques no estaban saturados. En muchas áreas, los asentamientos de diques no deteriorados parecían tener entre 7 y 15 cm en relación con estructuras como pilares de puentes o estructuras de conducción de agua enterradas.

No obstante, numerosos diques han sufrido daños de moderados a mayores. Se observaron asentamientos de 20-40 cm en muchas áreas, con mayores asentamientos en tramos de longitudes relativamente limitadas (comúnmente sólo 100-300 m de longitud). Los daños mayores pueden atribuirse principalmente a la licuefacción de la base. Se produjeron pocas o ninguna inundación debido a que los niveles de agua eran bajos y dentro de los canales, incluso con diques que fueron casi totalmente destruidos por la licuefacción de los cimientos.



Ilustración 7 Efectos generados en los diques
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

2.4.4. TANQUES DE AGUA

	
<p><i>Tanque levantado en el campo de un parque en Urayasu (N35.6398, E139.8235).</i></p>	<p><i>Movimientos diferenciales inducidos por licuefacción alrededor de tanques enterrados en una planta de tratamiento de agua en la ciudad de Kashima (N35.932, E140.628).</i></p>

Ilustración 8 Tanques de agua afectados por el terremoto
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

2.4.5. PRESAS

Las autoridades japonesas inspeccionaron más de 400 presas después del sismo, y casi todas funcionaron relativamente bien. Muchas presas resistieron fuertes sacudidas del suelo, con daños menores a moderados. Como ejemplos están: La presa de relleno de roca Shitoki de 83.5 m de altura, terminada en 1984; la presa de relleno de tierra de Nishigo de 32.5 m de altura.

La excepción más notable al buen desempeño de la mayoría de las presas fue la presa Fujinuma.

Presa Fujinuma		La falla de la presa poco después del sismo provocó la liberación incontrolada de todo el embalse, río abajo llegó a una aldea y causó la muerte de 8 personas.	
			
3:11 pm	Sobrevoltaje de la presa principal	22/03/2011	Vista de la brecha principal de Fujinuma

Ilustración 9 Daños generados a la presa Fujinuma
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

2.4.6. PUERTOS

Los puertos de la zona del desastre sufrieron graves daños tanto por el terremoto como por el tsunami. Los puertos del norte de Soma, Hachinohe, Sendai, Ishinomaki y Onahama se encuentran entre los más dañados. Los puertos en las áreas al sur de la zona del desastre no sufrieron el mismo nivel de daños relacionados con el tsunami, pero aun así se vieron significativamente afectados.

Aproximadamente el 90% de los 29.000 barcos pesqueros en las áreas afectadas quedaron inutilizables después del terremoto. Los principales daños de estas estructuras están relacionados con la licuefacción.

Tabla 9 Daños en dos puertos de prefectura de Ibaraki
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

Puertos de la prefectura de Ibaraki	Compuesto	Daños por Licuefacción
Kashima:	Compuesto por un pasaje central que conecta con dos muelles públicos (M.P. del Norte y del Sur). Dos rompeolas protegen la entrada al puerto.	<ul style="list-style-type: none"> - Desplazamientos del cajón de hasta 15 cm en el área. - Asentamientos de relleno de muelles de hasta 30 cm. - Desplazamientos insignificantes del muelle. - Rotura de grúas debido a una ligera desalineación de sus rieles en el muelle norte, deformaciones mucho menores en el área del sur. - Los contenedores de carga fueron desplazados hasta 500m alrededor de la instalación por el tsunami, con marcas de agua que sugerían alturas de inundación de al menos 60cm.
Hitachi:	Compuesto de muelles de carga y un terminal petrolero.	Asentamientos de relleno de hasta 1 m, deformaciones laterales mucho más pequeñas de los muelles en la mayoría de las áreas y el colapso de la esquina noroeste del muelle 4.



Ilustración 10 Daños ocurridos en los puertos
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

2.5. ASPECTOS NO ESTRUCTURALES

2.5.1. LÍNEAS DE VIDA

Se suspendió el suministro de agua a aproximadamente 2,23 millones de hogares en el área dañada; se necesitaron más de dos meses para restaurar el agua en todas las áreas de servicio habitables. Aunque el tsunami causó muchos daños, hubo una interrupción generalizada por la deformación del suelo inducida por el terremoto.

Dieciocho plantas de tratamiento de aguas residuales resultaron dañadas, principalmente por el tsunami, pero también por sacudidas y deformaciones del suelo inducidas por la licuefacción. Aproximadamente 922 km de tuberías de alcantarillado en la región de Tohoku resultaron dañadas por el tsunami y los temblores, y las réplicas aumentaron los daños.

Las pérdidas de energía eléctrica apagan las estaciones de bombeo donde los motores diésel proporcionaron capacidad de bombeo de respaldo, los retrasos en el suministro de combustible llevaron a paradas adicionales cuando se agotó el combustible. Las 47 estaciones de suministro de agua potable y las 128 estaciones de bombeo de aguas residuales en Sendai se vieron afectadas en diversos grados por la pérdida de electricidad y combustible.

		
Extracción y fuga de la tubería de transmisión de agua de 2400 mm de diámetro en la junta deslizante (cortesía de Gobierno de la prefectura de Miyagi).	Erosión de arena en tuberías y pozos de registro rotos.	Las deformaciones del suelo inducidas por la licuefacción causaron daños importantes a la corriente de agua, planta en la ciudad de Kashima y sus conductos subterráneos.

Ilustración 11 Efectos producidos por el terremoto en las líneas
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

2.5.2. TUBERÍAS DE GAS



Ilustración 12 Líneas de gas temporales colocadas tras el terremoto
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

2.5.3. LÍNEAS DE COMUNICACIONES



Ilustración 13 Carretera desplazada por el terremoto
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

2.6. EFECTOS DIRECTOS O INDIRECTOS DEL SISMO

2.6.1. TSUNAMI DE JAPÓN

El terremoto del 11 de marzo fracturó un área aproximada de 300 kilómetros de largo con 200 kilómetros de ancho en los límites entre la placa del Pacífico y la placa norteamericana. El movimiento generó una cantidad de energía tal que empezó a movilizar una ingente cantidad de agua que finalmente llegarían a la costa japonesa generando destrucción a su paso. Este fenómeno afectó principalmente al noreste del país asiático.

Un equipo de investigadores del EEFIT (The Earthquake Engineering Field Investigation Team) pudo obtener datos acerca del tsunami en las prefecturas de Iwata y Miyagi. Dicha data es presentada en la siguiente tabla:

Tabla 10 Datos recopilados por el equipo EEFIT a lo largo de las prefecturas de Iwata y Miyagi
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

Locación (Norte a Sur)	Llegada de la primera ola (minutos)	Altura máxima del tsunami (metros)	Altura promedio del tsunami (metros)
Fudai	n/a	24.16	14.44
Taro	n/a	37.49	21.47
Miyako	29	40.45	15.98
Kamaishi	28	30.40	14.31
Ofunano	25	31.99	13.13
Rikuzentakata	37	21.63	14.24
Kesennuma	n/a	23.00	10.50
Minamisanriku	n/a	20.54	12.63
Onagawa	n/a	34.74	15.55
Ishinomaki	23	25.84	6.51
Shiogama	n/a	4.89	3.28
Shichigahama	n/a	9.21	5.09
Miyagino-ku	n/a	16.65	6.63
Puerto de Sendai	n/a	5.23	2.62
Wabayashi-ku	n/a	19.55	5.90
Natori	63	12.96	4.36
Iwanuma	64	8.75	5.38
Watari-cho	65	7.71	2.88
Yamamoto-cho	65	12.78	5.88

Se puede observar que las ciudades más al norte fueron las que experimentaron las olas de mayor altura. Esto en correspondencia al epicentro del terremoto. De igual manera, se presenta otra tabla en la que podemos ver la cantidad de ciudades afectadas por el tsunami en 4 de las prefecturas de Japón ubicadas en el noreste del territorio.

Tabla 11 Comparación de ciudades afectadas y totales en las prefecturas del noreste japonés
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

Prefectura	Número de ciudades en la prefectura	Número de ciudades afectadas
Iwate	35	14
Miyagi	36	17
Fukushima	58	12
Ibaraki	45	11
Total	174	54

Los daños que causó el tsunami en el territorio japonés son evidentes y estremecedores. Para ejemplificar la magnitud de los daños, se destina un espacio a presentar una corta galería fotográfica:






	
El nivel de la inundación llegó hasta la base del segundo piso de esta construcción. El tsunami trajo este bote el cual muestra la extensión de los daños. Ciudad de Ishinomaki.	Vista desde la ventana de un tercer piso en el aeropuerto de Sendai durante el tsunami.
	
Construcción dedicada a ser usada como evacuación en caso de tsunamis en Rikuzentakata. La flecha amarilla indica el nivel del agua durante el tsunami. Aproximadamente 19 metros desde el suelo.	Momento en el que una ola del tsunami se estrella en una calle en la ciudad de Miyako (Iwate). NatGeo photo
	Vista de Sendai, inundada tras el terremoto y posterior tsunami. U.S. Navy photo

Ilustración 14 Daños generados por el tsunami
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

Las olas del tsunami viajaron por el océano Pacífico afectando a casi toda la cuenca, aunque con daños muchos menores. El tsunami causó daños en lugares como California, Oregon y Hawaii. El resto países americanos no presentaron mayores daños puesto que la distancia recorrida era muy alta y el tsunami había perdido fuerza.

Se muestra una tabla en la que se nombran los lugares donde el tsunami producido por el terremoto excedió los 2 metros de altura fuera de Japón.

Tabla 12 Lugares afectados por olas superiores a 2 metros de altura fuera de Japón
Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

Locación	Distancia (km)	Tiempo de llegada (horas)	Altura de las olas (m)
Arica, Chile	16167	21.4	2.45
Caldera, Chile	16693	21.7	2.14
Coquimbo, Chile	16799	22.1	2.42
Talcahuano, Chile	16904	23.0	2.09
Islas Galápagos, Ecuador	13228	17.8	2.26
Holtekamp II, Indonesia	3971		2.8
Crescent City, California	7543	9.8	2.47
Río Khamath, California	7563		2.5
Puerto Moss Landing, California	8020		2
Puerto San Luis, California	8195	10.4	2.02
Río Smith, California	7531		2
Kahalul, Hawaii	6108	7.7	2
Puerto Orford, Oregon	7463	9.6	2.02

No hay duda de que el mayor daño fue ocasionado por este tsunami. Se contabilizó que el 92% de las víctimas tras la catástrofe fallecieron ahogadas por el tsunami y es muy probable que gran parte de los desaparecidos fueran arrastrados mar adentro o depositados en ciertas zonas por la fuerza del agua.

2.6.2. DAÑOS A CENTRALES NUCLEARES

El terremoto ciertamente alertó las alarmas de las centrales nucleares de Japón las cuales iniciaron con el apagado del sistema y el enfriamiento de los distintos reactores en todo el territorio. Varias de las plantas ubicadas en la costa noroeste del país no pudieron hacerlo con la rapidez suficiente como para evitar que el tsunami posterior comprometiera el material radiactivo y desencadenara los accidentes nucleares.

Se profundiza en el caso de mayor envergadura: el accidente nuclear de la central nuclear Fukushima I. Esta central ubicada en Okuma, prefectura de Fukushima fue inundada por el tsunami posterior al terremoto. Esto provocó que los sótanos se inundaran y se destruyeran los generadores de emergencia, lo que generó explosiones (fuera de los reactores nucleares) que liberaron material radiactivo al ambiente y al mar.



Ilustración 15 Tsunami supera las defensas contra tsunamis de la central nuclear Fukushima I

Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

Esta contaminación nuclear obligó al gobierno a ordenar evacuar la zona 20 kilómetros a la redonda. De esa manera, cerca de 154000 residentes tuvieron que ser evacuados de sus viviendas. El gobierno construyó muros a lo largo de la costa y un gran muro de tierra congelada de 1.5 kilómetros alrededor de la central para evitar la proliferación de las aguas contaminadas.

Se estima que la limpieza y desmantelamiento de la central podría terminar entre los años 2041 y 2051. Como medidas preventivas, no se permite que la población se acerque

Si bien solo hubo 1 víctima fatal registrada producto de la radiación y el accidente nuclear, se estima que más de 2200 personas fallecieron producto de los traumas y el estrés que vivieron los evacuados.

2.6.3. OTROS EFECTOS

El terremoto provocó el quiebre de distintos sistemas en varias de las zonas afectadas. Sistemas como el eléctrico, de agua y desagüe, de gas y de comunicaciones.

Particularmente, el sistema de gas representa un grave peligro pues genera el ambiente propicio para los incendios. Esto sucedió en varias ciudades a lo largo de las prefecturas más afectadas.

Se estima que cerca de 150 personas fallecieron en los incendios ocurridos a causa de la rotura de los sistemas de distribución de gas.

Tabla 13 Causas de fallecimientos tras el terremoto y tsunami (Abril - 2011)

Fuente: EERI (Earthquake Engineering Research Institute)

Causa de muerte	Número de víctimas	% de víctimas
Ahogamiento	12 143	92.5%
Quemaduras	148	1.1%
Aplastamiento o secuelas	578	4.4%
Desconocida	266	2.0%
Total	13 135	100%

CONCLUSIONES

- Japón y su población poseen una gran capacidad de respuesta ante los movimientos sísmicos. La educación japonesa ha preparado a los habitantes de su territorio para actuar con serenidad ante estos fenómenos naturales. En adición a ello, sus estrictas normas y constantes innovaciones le han permitido desarrollar tecnologías antisísmicas envidiables. Como muestra de ello, se tiene que los fenómenos sísmicos generan una cantidad muy baja de víctimas fatales en comparación a lo que podría suceder en otros países. Como prueba de ello se tiene al terremoto estudiado, en el que gran parte de las víctimas no fallecieron por causa directa del terremoto, sino lo hicieron por las secuelas que este provocó (revisar tabla 13).
- La infraestructura japonesa puede ser muy superior y capaz ante los movimientos sísmicos y los tsunamis de mediana envergadura. Lastimosamente, no estuvo preparada para un tsunami de las proporciones que se vieron tras el terremoto del 11 de marzo. Ciudades con gran historia de tsunamis quedaron minimizadas ante la furia de la naturaleza. Estos destrozos quedan ejemplificados en las varias ilustraciones y tablas referentes al tema en el cuerpo del informe.
- Las vibraciones del terreno generaron la pérdida de resistencia al corte del suelo, la licuefacción se presentó en muchas de las estructuras, se evidenció flujo de tierra, flujos laterales, la flotación de elementos menos pesados, que el suelo licuado fácilmente desplazó, tales como tanques, buzones, tuberías; esto generó una interrupción generalizada, cuya recuperación de líneas de vida como el servicio del agua llegaron a demorar en algunos lugares más de dos meses. Se pudo observar la reducción de la capacidad de soporte de los cimientos, pero también debemos de reconocer y mencionar los sistemas de mejoramiento que se tomaron en algunas estructuras, tales como el uso de técnicas de cimentación, claro ejemplo el uso de pilotes, uso de vigas de pared profunda, se pudo ver que estas áreas mejoradas se desempeñaron bien (no se presentó desplazamientos).
- Los puertos fueron afectados tanto por el sismo como por tsunami, los puertos del norte sufrieron graves daños por ambos mientras en el sur, no sufrieron el mismo nivel de daños relacionado con el tsunami; entre los daños más generales presentados se encuentran: colapso de rompeolas, desplazamiento de muelles, asentamientos, el tsunami dejó zonas inundadas, barcos varados, contenedores desplazados, rotura de grúas. En lugares cerca de la desembocadura de los ríos muchas defensas ribereñas (diques, muros contra inundaciones) fueron abrumados por olas del tsunami. Cabe mencionar que el diseño de esas estructuras no esperaba grandes órdenes de altura del tsunami.

- La zona más afectada por el terremoto y, consecuentemente, por el tsunami fue la zona noreste de Japón. Específicamente se habla de las prefecturas de Iwate, Miyagi, Fukushima e Ibaraki; prefecturas ubicadas cerca del epicentro. Por otra parte, ciudades como Tokio, ubicadas en la zona centro-sur, no registraron grandes perjuicios por el movimiento sísmico ni por la llegada del tsunami.
- El tsunami que siguió al terremoto perjudicó a la industria de la energía nuclear. Debido a las situaciones provocadas tras los accidentes nucleares, el gobierno japonés decidió plantearse la meta de abandonar este tipo de energía para centrarse en la generación de energías renovables para el año 2030.
- Esta catástrofe debe hacer reflexionar a la población y hacer un llamado al sector ingenieril del Perú para tomar conciencia sobre la vulnerabilidad de los países ante los fenómenos naturales. Especialmente, Perú es un país muy sísmico, ubicado entre placas bastante activas y con mucha energía atrapada que, sin duda, desencadenará un gran terremoto de proporciones similares al de Japón tarde o temprano. Por ello es necesaria la implementación de tecnología antisísmica en nuestras edificaciones, la correcta fiscalización y control de las obras para que se apeguen a los reglamentos, la educación de la población para que sepan cómo actuar ante los temblores y la creación de planes de evacuación y protocolos ante los futuros movimientos sísmicos y posibles tsunamis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hugo Rivera Mantilla (2017). *Geología General (4ta ed.)*. Lima, Perú: Ediciones Megabyte.
- [2] Oficina Nacional de Meteorología (2021). *Concepto de Tsunami*.
<http://onamet.gob.do/index.php/tsunami/concepto-tsunami>
- [3] Almudena Díaz. (2020). *ESPECIAL JAPÓN: la capacidad japonesa de sobreponerse a situaciones de desastre United Explanations*. Recuperado de
<https://www.unitedexplanations.org/2011/03/22/especial-japon-la-capacidad-japonesa-de-sobreponerse-a-situaciones-de-desastre/>
- [4] Shao, G., Li, X., Ji, C., & Maeda, T. (2011). *Focal mechanism and slip history of the 2011 Mw 9.1 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, constrained with teleseismic body and surface waves*. Earth, planets and space, 63(7), 559-564.
- [5] Centro Sismológico Euro- Mediterráneo (2021). *Aceleraciones registradas por la red japonesa (NIED)*. <https://www.emsc-csem.org/Page/?id=196>
- [6] National Agriculture and Food Research Organization (2021). *Clasificación del Suelo de Japón*. <https://soil-inventory.dc.affrc.go.jp/explain.html>
- [7] Teresa Guerrero (2011). *Los edificios japoneses, los más preparados para resistir un sismo*. Recuperado de <https://www.elmundo.es/elmundo/2011/03/21/ciencia/1300706112.html>
- [8] Brun Picozzi (2011). *¿Por qué el pueblo japonés reacciona tan ejemplar ante las catástrofes?* Recuperado de https://www.lainformacion.com/mundo/por-que-el-pueblo-japones-reacciona-de-forma-tan-ejemplar-ante-las-catastrofes_inv6wdnf6sirsjsbkzdyb5/
- [9] Earthquake Engineering Research Institute (2018). *Informe y presentaciones del taller sobre necesidades de investigación de NSF RAPIDS de Japón y Nueva Zelanda*.

http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/index.php?option=com_content&view=article&id=150

[10] Earthquake Engineering Research Institute (2018). *El 11 de marzo de 2011, gran terremoto y tsunami del este de Japón (Tohoku): dimensiones sociales.*

http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/images/2011_03_11_tohoku_japan/pdfs/Japan-SocSci-Rpt-hirez-rev.pdf

[11] Earthquake Engineering Research Institute (2018). *Rendimiento del puente en el Mw 9.0 Tohoku, Japón, terremoto del 11 de marzo de 2011* http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/index.php?option=com_content&view=article&id=148

[12] Earthquake Engineering Research Institute (2018). *Desempeño de estructuras de ingeniería en el Mw 9.0 Tohoku, Japón, terremoto del 11 de marzo de 2011.*

http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/images/2011_03_11_tohoku_japan/pdfs/Japan-eq-report-Buildings-medrez.pdf

[13] Earthquake Engineering Research Institute (2018). *Información sobre terremotos de USGS, incluidos ShakeMap y PAGER.*

https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official20110311054624120_30#executive

[14] Earthquake Engineering Research Institute (2018). *Datos de tsunami, incluidos runups, datos de DART e imágenes de satélite.* <https://ngdc.noaa.gov/hazard/11mar2011.html>

[15] Earthquake Engineering Research Institute (2018). *Informes de reconocimiento, videos y datos de GEER.* http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/index.php?option=com_content&view=article&id=82

[16] Earthquake Engineering Research Institute (2018). *Efectos geotécnicos del Mw 9.0 Tohoku, Japón, terremoto del 11 de marzo de 2011.* http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/images/2011_03_11_tohoku_japan/pdfs/Geotech_Tohoku-Rpt.pdf

- [17] Earthquake Engineering Research Institute (2018). *El tsunami del 11 de marzo de 2011 en Tohoku, Japón: efectos en las estructuras*. http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/images/2011_03_11_tohoku_japan/pdfs/Japan-Tohoku-report-tsunami-bldgs.pdf
- [18] Earthquake Engineering Research Institute (2018). *El tsunami de Tohoku en Japón del 11 de marzo de 2011*. http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/images/2011_03_11_tohoku_japan/pdfs/Japan-eq-report-tsunami2.pdf
- [19] Earthquake Engineering Research Institute (2018). *El terremoto y tsunami de Mw9.0 Tohoku del 11 de marzo de 2011*. http://learningfromearthquakes.org/2011-03-11-tohoku-japan/index.php?option=com_content&view=article&id=146